

ESTABILIZAÇÃO DE SOLO – CIMENTO PARA BASE DE PAVIMENTO DE RODOVIA EM SÃO LUÍS – MA

Dellane Stephani Carvalho dos Santos (Universidade Ceuma) E-mail: stephanidscs@hotmail.com

Pedro Chaves Caldeira (Universidade Ceuma) E-mail: pedroccaldeira@hotmail.com

Resumo: A pesquisa abordou a estabilização físico-química de solo-cimento com o propósito de aprimorar a resistência à penetração no solo para ser aplicado como base de pavimento de rodovias em São Luís – MA. O seu objetivo geral foi analisar quantitativamente os resultados dos ensaios laboratoriais de caracterização mecânica das misturas de solo com cimento. O específico foi realizar ensaios de compactação, resistência à compressão simples de solo-cimento e Índice de Suporte Califórnia (I.S.C) com 3%, 5% e 7% de teor de cimento com 6 corpos de prova para cada teor utilizando cimento de Classe de Resistência 32 MPa. No Maranhão, as bases são em sua maior parte de solo laterítico com predominância de pedregulhos que proporcionam independência ao suporte com elevados índices. Apesar do solo laterítico aparecer em grande quantidade no Estado, o solo com maior presença de pedregulhos está desvantagem. O licenciamento ambiental e o valor para exploração de jazidas muitas vezes inviabilizam a aquisição do material. O trabalho buscou descobrir qual teor proporcionou melhor desempenho na estabilização do solo laterítico com cimento. Os resultados para 5% e 7% geraram altos valores podendo serem postos como base. Porém, o solo melhorado com cimento apenas pode ser aplicado como sub-base.

Palavras-chave: Laterítico, Aglomerante, Resistência.

SOIL – CEMENT STABILIZATION FOR ROAD FLOORING BASE IN SÃO LUÍS - MA

Abstract: The research approached the physical-chemical stabilization of soil-cement with the purpose of improving the resistance to penetration in the soil to be applied as a base for paving highways in São Luís - MA. Its general objective was to quantitatively analyze the results of laboratory tests of mechanical characterization of mixtures of soil with cement. The specific thing was to carry out compaction tests, resistance to simple compression of soil-cement and California Support Index (ISC) with 3%, 5% and 7% of cement content with 6 specimens for each content using cement of Class Resistance 32 MPa. In Maranhão, the bases are mostly of lateritic soil with a predominance of boulders that provide independence to the support with high rates. Despite the lateritic soil appearing in great quantity in the State, the soil with a greater presence of boulders is a disadvantage. Environmental licensing and the value for exploiting deposits often make the acquisition of the material unfeasible. The work sought to discover which content provided the best performance in stabilizing the lateritic soil with cement. The results for 5% and 7% generated high values and can be used as a basis. However, cement-enhanced soil can only be applied as a sub-base.

Keywords: Lateritic, Agglomerating, Resistance.

1. Introdução

A mistura do solo com cimento demanda aperfeiçoar as propriedades do solo como a plasticidade e a absorção de água ou estabilizá-lo aumentando significativamente suas características mecânicas. No Maranhão, as bases dos pavimentos, geralmente, são feitas de solo laterítico com predominância de pedregulhos (popularmente denominado “piçarra”), sendo estes os responsáveis por proporcionarem elevadas resistências mecânicas. No entanto, apesar de tipo de material estar presente em grande parte do Estado, o solo laterítico com maior quantidade de pedregulhos encontra-se em pouca parte.

Os solos naturais muitas vezes não imprimem altos valores de I.S.C e considerando as dificuldades em relação ao licenciamento ambiental e ao valor cobrado nas explorações de

jazidas, que muitas vezes inviabilizam a aquisição do produto, é interessante a realização da reciclagem do próprio material da pista com incorporação de cimento aumentando a capacidade de suporte do solo laterítico. Essa prática evita a degradação do meio ambiente e transforma o procedimento sustentável tendo em vista a diminuição da poluição emitida nos deslocamentos dos meios de transporte desde as jazidas até o local de aplicação. Desse modo, ajuda a reduzir o custo com transporte, transformando em vantagem econômica.

Os materiais escolhidos foram o solo laterítico areno – argiloso (I.S.C 12,3%), retirado da jazida do Vinhais (São Luís – MA), e o Cimento Portland (CP) da classe de resistência 32 Mpa. Este solo não pode ser aplicado como base de pavimento, pois é indispensável um valor mínimo de 80%. Com isso o estudo priorizou a estabilização físico-química de solo-cimento com o propósito de aprimorar a resistência à penetração no solo e ser aplicado como base de pavimento rodoviário em São Luís (MA). O objetivo geral foi analisar quantitativamente os resultados dos ensaios de caracterização mecânica de laboratório e descobrir qual teor de cimento proporcionou melhores desempenhos durante a estabilização.

Os resultados foram obtidos através dos ensaios de compactação do solo-cimento – NBR 12023 (ABNT, 2012); Índice de Suporte Califórnia (I.S.C) conforme NBR 9895 (ABNT, 2017) e, como contraprova, ensaios de compressão simples de solo-cimento – NBR 12025 (ABNT, 2012). O trabalho promoveu misturas com três teores de cimento distintos: 3% (solo melhorado com cimento), 5% e 7% (solo-cimento) com 6 corpos de prova para cada teor, ou seja, total de 18 amostras, sendo imersas em tanque de água e rompidas com 4 dias e 7 dias de cura.

É de grande valor que se tenha informações geotécnicas sobre os materiais utilizados e o que o cimento pode influenciar, na hora da estabilização do solo, sobre as características do comportamento da mistura e o tempo de sua implantação, obtendo total controle dos testes com o propósito de evitar resultados diferentes entre o laboratório e o campo.

2. Estabilização do Solo com Cimento

O solo estabilizado com cimento se segura no conjunto de três componentes tendo suas quantidades predeterminadas em dosagem no laboratório buscando diferentes valores de durabilidade e resistência: solo, cimento e água. Segundo Pitta (1997), há três tipos de misturas que se divergem em alguns pontos, como por exemplo, o teor de cimento empregado e as principais propriedades físicas: solo-cimento (SC), solo melhorado com cimento (SMC) e brita graduada tratada com cimento (BGTC).

O solo-cimento (SC) compreende na junção de solo pulverizado, cimento e água. Na prática brasileira utiliza-se solo com dosagem para atingir uma resistência mecânica, e frequentemente são solo granulares. O teor de cimento deve ser no mínimo 5% em massa (relação porcentual entre a massa solta de cimento e a massa solta de solo seco) (PITTA, 1997). Para a ES 143 (DNIT, 2010), a base de solo-cimento tem: limite de liquidez $\leq 40\%$ e índice de plasticidade $\leq 18\%$; resistências à compressão simples $\geq 2,1$ Mpa; expansão $\leq 0,5\%$ e o CBR $\geq 80\%$.

O solo melhorado com cimento (SMC) apresenta características físicas e mecânicas menores comparadas a de um solo-cimento. O teor de cimento deve ficar entre 3% e 5% em massa. Essa mistura preocupa-se em verificar a capacidade portante, os índices de consistência e a sensibilidade à água. A elevação de cimento aumenta o Índice de Suporte Califórnia, reduz a plasticidade e a variação volumétrica podendo ser empregado na pavimentação (PITTA, 1997). Suas resistências mínimas encontradas para sub-base são 1,2 a 2,1 MPa e base são de 1,5 MPa a 2,1 MPa para o DER do Paraná (2005). Conforme a ES 140 (DNIT, 2010), a sub-base de solo melhorado com cimento tem o CBR $\geq 30\%$ e a expansão $\leq 1\%$. E, para a ES 142

(DNIT, 2010), a base de solo melhorado com cimento: limite de liquidez $\leq 25\%$ e índice de plasticidade $\leq 6\%$; a expansão $\leq 0,5\%$ e o CBR $\geq 80\%$.

A brita graduada tratada com cimento (BGTC) teve sua origem na Cement Treated Base do Estado da Califórnia. É um material pétreo triturado e emprega teores de cimento semelhantes ao SMC definido pela medida da resistência à compressão simples (PITTA, 1997).

Conforme a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2009), praticamente todos os tipos de solo conseguem ser misturados no solo-cimento. Porém, o ideal seriam solos que apresentem teores de areia entre 45% e 50%. Não deve ser usado se conter matéria orgânica na composição, ou seja, solo de cor preta, e é capaz de ser feito com o próprio local da obra.

É necessário conhecer bem os materiais que serão utilizados na mistura, ajudando a prever algumas reações do solo no instante em que entra em contato com o ligante. As reações do solo podem ocorrer devido à presença de agentes como sulfatos promovendo a expansão e, assim, verificar a possibilidade de ser aplicado em estrada. Por isso é indispensável o ensaio de laboratório e sua correta análise, pois o tipo de solo, existência de materiais nocivos no cimento, teor de cimento, teor de umidade (facilita a compactação e consistência), operações de mistura, grau de compactação, grau de pulverização, tempo e condição de cura e dosagem influenciam de maneira significativa os resultados.

Pode-se utilizar também alíneas, que devem ser ordenadas alfabeticamente por letras minúsculas precedidas de parênteses; cada alínea deve ser separada por ponto e vírgula e a última alínea deve terminar com um ponto.

2.1 Reação do Solo com Cimento

O cimento Portland é um cimento hidráulico oriundo da mistura do clínquer. O clínquer tem em sua composição silicatos de cálcio, e os compostos principais do clínquer são: C3S – Silicato tricálcio (45 a 60%); C2S – Silicato bicálcio (15 a 30 %); C3A – Aluminato tricálcio (6 a 12%); C4AF – ferroaluminato tetracálcio (6 a 8%) (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Como o cimento faz parte da mistura solo-cimento, é importante ter conhecimento de algumas características desse material. Cada composto do cimento reage de uma maneira diferente no momento que entra em contato com a água. Segundo Mehta e Monteiro (2014), o C3A reage nos primeiros minutos e ocasiona elevado calor de hidratação e propicia pouco desenvolvimento de resistência e forte retração; o C3S é o culpado pelas resistências nas idades iniciais e colabora para o elevado desprendimento de calor (cerca de 40% em massa de hidróxido de cálcio – CH); o C2S ajuda na criação de resistência em idades mais avançadas com uma liberação de calor baixa (cerca de 18% em massa de CH) e o C4AF influencia no desenvolvimento vagaroso e pequeno de resistência mecânica e boa resistência ao ataque por sulfatos.

A mistura do solo e cimento busca promover um aprimoramento das propriedades físicas e mecânicas, como por exemplo, a resistência ao cisalhamento (atrito causado no contato das partículas) propondo uma melhora na infraestrutura. Para Medina e Motta (2004) a estabilização do solo varia em mecânica, granulométrica e química. A estabilização mecânica faz uso da compactação ou drenagem no solo para alcançar a densidade aparente máxima e umidade ótima, podendo ser usada em complemento a outros tipos de estabilização. É apenas estabilização mecânica se não for acrescentado outro material diferente no solo.

Estabilização granulométrica trata de misturar diferentes tipos de solo com diferentes partículas para corrigir a granulometria do solo tornando em um material mais compacto. Estabilização química ocorrem por meio de reações químicas como as cimentantes pozolânicas, aglomeração e carbonatação. Os agentes químicos mais empregados são o

cimento Portland, a cal, a cinza volante e emulsões betuminosas.

Medina (1987 apud PEREIRA, 2012) acrescenta a estabilização física, cujas propriedades do solo são modificadas quanto a sua textura (plasticidade, por exemplo). Portanto, pode-se considerar o solo-cimento como uma estabilização físico-química.

No momento que a água entra em contato com o aglomerante, ocorrem trocas iônicas entre os cátions $[[Ca]^{+2}]$ (liberados na hidratação do cimento) e reagem com os argilominerais do solo modificando o pH da solução eletrolítica. A cimentação formada após a reação é denominada de reação pozolânica, no qual aumenta a rigidez da mistura fazendo uso das reações pozolânicas (acontecem em velocidade mais lenta) e da sílica ativa presente no solo (MEDINA, 1987 apud PEREIRA, 2012).

Para Abiko (1987) a estabilização do solo se desenvolve devido às forças de adesão resultante do processo de cimentação e isso ocorre através de dois mecanismos: o processo primário e secundário. O primário trata-se dos produtos das reações de hidratação do Cimento Portland, ou seja, silicatos e aluminatos presentes no cimento são hidratados formando um gel hidratado que preenche os espaços vazios e os grãos do cimento ligam-se conferindo maior resistência ao solo. Os contatos entre várias membranas formam uma rede que diminuem a plasticidade inicial (ponto de quebra da cimentação) da mistura cimento e água, sendo este o ponto de início da pega. O endurecimento do cimento se inicia de três a cinco horas quando são formadas protuberâncias na membrana gelatinosa que envolve os grãos do cimento e, depois de um tempo, essas protuberâncias são convertidas em fibrilas empacotadas saindo dos grãos de cimento. À medida que a hidratação vai se acontecendo, as fibrilas aumentam e agregam mais e mais grãos, formando uma estrutura que abrange resíduos de grãos de cimento que não reagiram no processo de hidratação e outros agregados como partículas de areia e pedra.

O processo secundário é a relação do argilomineral, presente no solo, com o hidróxido de cálcio (cal) liberado na hidratação do cimento. Decorre uma troca de cátions entre as estruturas dos argilominerais com os íons de cálcio vindos da hidratação do cimento (ABIKO, 1987).

2.2 Aplicações e Vantagens

Em obras rodoviárias, o uso de solo-cimento aumenta a capacidade de suporte da estrutura aumentando, conseqüentemente, o número de eixos padrão admissível. Com a junção desses materiais (solo e cimento), a resistência aumenta e é possível diminuir a espessura da camada betuminosa (a mais onerosa) e de cada camada diminuindo, assim, a espessura total do pavimento. Logo, abaixa o volume de escavação e de movimentação de solo (MONTE, 2012).

Ainda, Monte (2012) destaca como pontos importantes para a aplicação do solo-cimento a minimização da exploração de pedreiras e áreas de empréstimo para obtenção de materiais adequados. A diminuição do custo do transporte, dos problemas provocados pelos caminhões nas estradas, da poluição do ar, do ruído e do congestionamento de tráfego são vantagens que podem ser adquiridas para o ramo econômico e ambiental. Na hora de escolher o material para a construção do pavimento, leva-se em consideração o preço do cimento e o custo do transporte do cimento para a obra.

A Lei Estadual nº 5.405 de 08 de abril de 1992 institui o Código de Proteção de Meio Ambiente, sua seção V art. 27, parágrafo único informa: a expedição de Licença Ambiental para empreendimentos ou atividades de exploração de recursos naturais, minerais e vegetais, de origem não antrópica, potencialmente esgotáveis, será condicionadora ao pagamento de "royalties", sem prejuízos de outras taxações previstas na legislação em vigor. Logo, o

proveito do próprio material da pista evita o procedimento de solicitação de licença ambiental o que atrasa o início das atividades.

Conforme Grande (2004), além das citadas, algumas vantagens que podem ser consideradas para o solo-cimento são: Absorção e perda de umidade do material não causam grandes variações volumétricas; O material não danifica se for coberto por água; Elevação da resistência à compressão; Devido a uma menor permeabilidade, tem maior durabilidade; O solo encontra-se em abundância na natureza; Nas paredes monolíticas o chapisco, emboço e reboco são desnecessários graças ao acabamento liso da parede. As superfícies prensadas e a impermeabilidade torna possível ser aplicada uma camada de pintura com tinta à base de cimento no material.

Porém, a maior desvantagem da atividade solo-cimento é o custo empregado para a compra do cimento pertencente à mistura (VILLIBOR; NOGAMI, 2009). Cezne, Oliveira e Gomes (2016) informam que para solos com predominância de teor de argila é necessária grande quantidade de cimento (difícil de misturar e compactar), tornando a técnica financeiramente elevada. Isso pode ser devido ao fato do solo argiloso ter maior coesão, logo precisa de uma porção de cimento que tem propriedades aglutinantes.

3. Solos Laterítico

Os solos tropicais são divididos em solos lateríticos, saprolíticos e transportados. Os solos lateríticos são solos residuais maduros tidos como solos superficiais mais propícios em locais bem drenados das regiões tropicais úmidas, transfazendo a região superior do subsolo com o intemperismo, caracterizando o processo da laterização. Não apresentam características da rocha mãe. Os solos saprolíticos (sapro – grego = podre) são solos residuais jovens ocorrendo devido ao processo residual da rocha matriz e é subjacente ao solo laterítico. Os transportados criam solos mais fofos e heterogênicos que os residuais. Os lateríticos e saprolíticos possuem seixos de espessuras distintas variando desde alguns centímetros até 1,5 metros delimitando os solos lateríticos dos saprolíticos, segundo Villibor et al (2009).

Em outras palavras, os solos saprolíticos evoluem para os reconhecidos solos lateríticos em função de uma série de intempéries e dentre os solos lateríticos estão solos arenosos, argilosos, concreções lateríticas, pedregulhos e outros.

Os solos lateríticos serviram por muito tempo como materiais principais e sub-base para a construção da maioria das estradas e paredes de casas residenciais em países tropicais e subtropicais do mundo (LEMOUGNA, 2011). No Maranhão, o clima com suas estações chuvosas e secas definidas e as altas temperaturas contribuíram para o intemperismo tendo como resultado as lateritas paleogênicas ou concreções lateríticas e muito presentes em bases rodoviárias (MARANHÃO, 1998 apud SANT'ANA; BERNUCCI, 2016).

A laterização acaba por resultar em solos lateríticos com grande presença de caulinita como argilomineral predominante e de hidróxidos e óxidos hidratados de ferro e/ou alumínio. Segundo Mélo (2011), a água combina com as agregações do solo ocorrendo o recobrimento destes pelos hidróxidos e óxidos hidratados, e assim, reduzindo a capacidade de absorção de água pelos argilominerais.

O Método de Ensaio 030 (DNER, 1994), adverte que os solos lateríticos apresentam uma relação molecular de sílica-sesquióxido (Kr) menor que 2.

A NBR 6502 (ABNT, 1995), conceitua os solos granulares (não coesivos ou grossos) são solos compostos por pedras pedregulhos, cascalhos, areias. Por serem partículas grandes, há maior presença de vazios com maior permeabilidade. As partículas de areia variam de 2 mm a 0,06 mm de diâmetro, compreendendo areia fina, média e grossa. Enquanto os pedregulhos

(popularmente “piçarra”) ficam retidos na peneira de 2 mm.

O argilomineral tem grande influência no comportamento do solo quanto à resistência, permeabilidade, compressibilidade e adensamento, além de interferir nas propriedades de limite de liquidez e plasticidade (MÉLO, 2011). Os minerais de argila é a classe mineral mais importante, pois possuem maior impacto sobre suas características físicas e químicas.

4. Materiais e Métodos

Os materiais empregados para a realização dos experimentos foram o solo laterítico, retirado da jazida do Bairro Vinhais – São Luís (MA) e o Cimento Portland resistente aos sulfatos de classe de resistência 32 MPa (CP IV – 32 RS). A prática consiste em ensaios de laboratório: ensaio de compactação do solo-cimento – NBR 12023 (ABNT, 2012); ensaio de compressão simples do solo-cimento – NBR 12025 (ABNT, 2012) e o ensaio de Índice de Suporte Califórnia – ISC ou *California Bearing Ratio* – *CBR* – NBR 9895 (ABNT, 2017), e os resultados analisados quantitativamente utilizando gráficos, tabelas e inferências estatísticas da média aritmética, variância e desvio padrão do *CBR*.

Os ensaios da caracterização do solo laterítico: relação sílica/sesquióxido: $K_r = 1,65$; Limite de liquidez – NBR 6459 (ABNT, 2016) e Limite de plasticidade – NBR 7180 (ABNT, 2016): NL e NP; Solo areno – argiloso: 63% de areia fina e 37% de material argiloso; Índice de Grupo (IG) = 0; Classificação do solo: *HBR A-2-4*; Densidade máxima aparente: $\gamma = 1832 \text{ kg/m}^3$ e $e = 6,8\%$; Capacidade de suporte: *CBR* = 12,3% e Expansão 1%

O solo laterítico desta pesquisa é areno – argiloso e é considerado não líquido e não plástico devido à predominância de areia. Sua relação sílica/sesquióxido (K_r) do solo, conforme o ME 030 (DNER, 1994), é $K_r \leq 1,65$, o que o classifica como laterítico. Apresenta o índice de grupo (IG) = 0, conceituando-o como solo ótimo, pois os valores variam de 0 a 20 para determinar a capacidade de suporte do terreno de fundação de um pavimento, assim, quanto maior o I.G pior é o solo. Seu valor tem como base os limites de Atterberg (liquidez e plasticidade) e na porcentagem de material fino que passa na peneira 0,075mm (DNER, 1981). Para a classificação do solo, utilizou-se a *AASHTO: HBR A-2-4*. Os dados do ensaio de *CBR* e expansão apresentada pela empresa foram comparados aos resultados obtidos nesta pesquisa.

A NBR 12253 (ABNT, 2012) sugere teores de cimento em porcentagem para o ensaio de compactação do solo-cimento conforme o *HBR* de cada solo. Assim, o solo laterítico obteve um *HBR A-2-4* e corresponde a um teor de cimento de 5%. Como a norma informa que para os ensaios de compressão simples dos corpos de prova devem ser realizados com no mínimo três teores de cimento, visando alcançar uma resistência mínima de 2,1 MPa para ser considerada solo-cimento ou uma resistência menor que 2,1 MPa para ser considerada como solo melhorado com cimento, a pesquisa utilizou dois pontos percentuais superiores e inferiores a partir do ponto médio de 5%, ou seja, as porcentagens foram 3%, 5% e 7% com 6 corpos de prova (CP) para cada teor de cimento totalizando 18 corpos de prova.

Foi separado 84 kg de solo (6 kg cilindro de Proctor + 2 kg cilindro de compressão simples) e exposto ao processo de secagem na estufa à 60°C durante 24h. Primeiro, foi posto em prática as misturas do solo laterítico com o cimento Portland até ficarem homogêneas. Sendo que a cada quatro corpos de prova correspondem a um teor de cimento diferente. Após as misturas, adiciona água a 6,8% e, por fim, os materiais foram colocados no molde metálico cilíndrico executando o ensaio de compactação do solo-cimento, conforme a NBR 12023 (ABNT, 2012). A expansão é medida a cada 24 horas.

Depois, 12 moldes cilíndricos, com diâmetro 15 cm (centímetros) e altura 11 cm, ficaram imersos na água por 4 dias e, em seguida, rompidos no *CBR*. Outros 6 corpos de 10 x 20 cm

foram inseridos na água após 24 horas do processo da mistura e rompidos na compressão simples ao término da cura de 7 dias.

5. Resultados e Discussões

Apesar de Villibor e Nogami (2009) considerarem que o solo arenoso fino laterítico do estado de São Paulo e Paraná, sem qualquer aglutinante, era uma boa opção para base de pavimentos, superando o solo-cimento, isso pode ocorrer devido à diferença do clima dos solos lateríticos das regiões sul e sudeste para a região nordeste alterando as propriedades dos solos. Porém, o solo areno – argiloso retirado da jazida do Vinhais, São Luís (MA), não apresentou bons resultados para implantação como base de pavimento, podendo transferir a culpa para a predominância de areia fina (63%) o que compete ao material uma menor capacidade de suporte, com *CBR* igual a 12,3% e expansão de 1%. As variáveis quantitativas contínuas dos ensaios do solo laterítico mais o cimento de classe de resistência 32 MPa estão dispostos nas tabelas e gráficos por seguinte:

Tabela 1 – Resultados dos ensaios com 3% de teor de cimento

Teor de cimento	3%					
Corpo de Prova	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	CP 5	CP 6
CBR (%)	61,6	73,9	62	70,3	—	—
Expansão (%)	0,4	0,5	0,5	0,4	—	—
Compressão Simples (Mpa)	—	—	—	—	1,3	1,6
Média aritmética CBR (\bar{X})	66,8			1,45		
Variância amostral CBR (s^2)	37,58			0,045		
Desvio Padrão amostral CBR (s)	6,1			0,21		

Fonte: o Autor (2020)

Tabela 2 – Resultados dos ensaios de solo-cimento com 5% de teor de cimento

Teor de cimento	5%					
Corpo de Prova	CP 7	CP 8	CP 9	CP 10	CP 11	CP 12
CBR (%)	87,2	88,6	97,6	88,6	—	—
Expansão (%)	0,5	0,4	0,5	0,5	—	—
Compressão Simples (MPa)	—	—	—	—	1,7	1,34
Média aritmética CBR (\bar{X})	90,5			1,52		
Variância amostral CBR (s^2)	22,8			0,064		
Desvio Padrão amostral CBR (s)	4,7			0,25		

Fonte: o Autor (2020)

Tabela 3 – Resultados dos ensaios de solo-cimento com 7% de teor de cimento

Teor de cimento	7%					
Corpo de Prova	CP 13	CP 14	CP 15	CP 16	CP 17	CP 18
CBR (%)	99,9	100,6	113,6	113,4	—	—
Expansão (%)	0,6	0,6	0,6	0,6	—	—
Compressão Simples (MPa)	—	—	—	—	1,71	1,77
Média aritmética CBR (\bar{X})	106,8			1,74		
Variância amostral CBR (s^2)	58,6			0,0018		

Desvio Padrão amostral CBR (s)	7,6	0,04
--------------------------------	-----	------

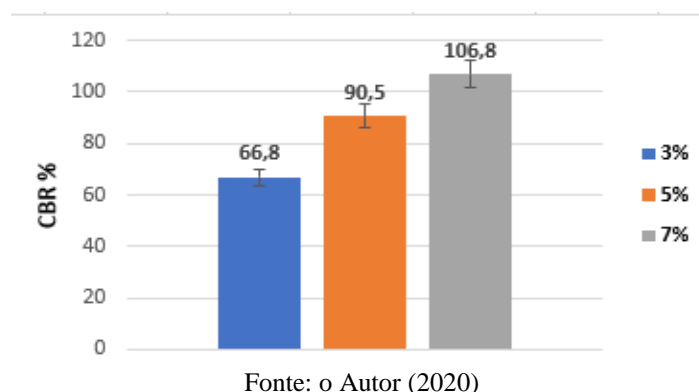
Fonte: o Autor (2020)

Mediante os resultados resumidos na Figura 1, nas misturas com teor de cimento 3%, o DNIT – ES (140/2010) informa que a sub-base de solo melhorado com cimento deve possuir o *CBR* $\geq 30\%$ e a expansão $\leq 1\%$. A média do *CBR* dos corpos de prova foi 66,8% revelando-se superiores a 30%. Como não alcançou a casa dos 80% para ser posto como base, só podem ser empregadas como sub-base de pavimento. A expansão média foi 0,45%, menor que 1% atendendo o DNIT – ES (140/2010). As resistências à compressão simples dos corpos de prova ficaram no intervalo de 1,2 a 2,1 MPa confirmando a proposta de emprego da mistura como sub-base, conforme o DER – PR (2005). Portanto, os ensaios com a mistura de solo melhorado com cimento foram satisfatórios se fosse para sub-base, mas não aplicáveis para base. O desvio padrão amostral do *CBR* para o teor de 3%, isto é, a divergência dos resultados em função da média amostral foi 6,1%, uma diferença pequena entre os dados.

Os dados conseguidos dos *CBR* para os corpos de prova com 5% de cimento atenderam a expectativa da capacidade de suporte e expansão esperada para ser aplicada como base de pavimento de solo-cimento, ou seja, *CBR* $\geq 80\%$ e a expansão $\leq 0,5\%$ conforme o DNIT – ES (143/2010), com sua média 90,5% e expansão 0,47%. Em contrapartida, os valores das compressões simples não atingiram o mínimo esperado ($\geq 2,1$ MPa) com 1,52 MPa. O desvio padrão amostral do *CBR* foi 4,7%, sendo este uma diferença pequena. Logo, essa mistura pode ser aplicada como base de pavimento de rodovia, porém, não é considerada a melhor opção quando comparada com o teor de 7%.

Por conseguinte, a mistura de solo-cimento com 7% acarretou em resultados tão satisfatórios quantos os ensaios anteriores com média do *CBR* igual a 106,8%. A expansão de 0,6% ultrapassou um pouco o tabelado pela norma do DNIT – ES (143/2010). No entanto, o aumento da expansão pode ser proporcional ao aumento de cimento na mistura, não sendo muito prejudicial na hora da aplicação na pista. Os resultados das compressões simples não foram maiores que 2,1 MPa, tendo 1,74 MPa. O desvio padrão amostral do *CBR* foi 7,6%, o maior desvio padrão entre os ensaios, mas considerado pequeno em relação à média obtida. A mistura de 7% de cimento foi firmada como a melhor opção entre os teores selecionados para ser posta como base de pavimento de rodovia com tráfego pesado ou muito pesado devido sua capacidade de suporte ser maior que 100%.

Figura 1 – Resultados dos ensaios de CBR %



6. Considerações Finais

É notório afirmar que dependendo da carga do tráfego que vai solicitar a rodovia, todos os resultados dos ensaios de laboratórios foram satisfatórios. O teor de 3% para solo melhorado com cimento produziu uma média de $CBR = 66,8\%$, expansão de 0,45% e resistência à compressão simples de 1,45 MPa. O valor obtido não está dentro os limites indicados pelo DNIT para serem aplicados como base de pavimento de rodovias, porém, é capaz de ser sub-base da estrutura, pois foi $\geq 30\%$. Essa capacidade de suporte da mistura de solo melhorado com cimento ser inferior aos teores maiores de cimento (5% e 7%) pode ser justificada ao fato do cimento tender a formar núcleos independentes na massa do solo não favorecendo o aumento da resistência mecânica.

Os dados conseguidos para os ensaios de solo-cimento com 5% de teor de cimento tiveram como média o $CBR = 90,5\%$, expansão 0,47%, resistência à compressão simples 1,52 MPa e o desvio padrão amostral do CBR de 4,7% foi aceitável. Mesmo não atingindo 2,1 MPa, a capacidade de suporte da mistura teve desempenho convincente tornando a mistura capaz de ser aplicada como base para rodovia. Com 7% de cimento, as médias foram $CBR = 106,8\%$, expansão 0,6% e resistência à compressão simples 1,74 MPa. Assim, apesar da expansão de 7% ultrapassar um pouco o valor preestabelecido e não atingir o 2,1 MPa, isso não exclui a mistura de poder ser empregada como base de pavimento rodoviário, pois o valor do CBR é muito elevado e o mais indicado, entre as misturas, para tráfego pesado ou muito pesado. O aumento da expansão dos corpos de prova de 0,45% até 0,6% pode ser proporcional ao aumento do cimento empregado no solo.

O cimento comporta-se de maneira inerte em relação ao solo até o momento de entrar em contato com a água. A argila tem como característica comum a contratibilidade por perda de umidade e expansibilidade com ganho de umidade, o que pode interferir na organização das bases estruturais da pavimentação. Além disso, uma maior proporção de argila no solo requisita de uma quantidade maior de cimento para a estabilização, desse modo o aumento do CBR é mais perceptível em solos finos, porém, estes acarretam custos mais elevados. Com tais características, o solo laterítico areno – argiloso da pesquisa pode ser encarado como uma boa opção por ter maior porção de areia e ser teoricamente mais econômico.

É evidente o crescimento da capacidade de suporte das misturas em comparação com o CBR natural do solo laterítico areno – argiloso (12,3%) e a redução da sua expansão que antes era 1% para em média 0,4% e 0,6%, relacionando-se com a sua propriedade de estabilização volumétrica prometida pelo cimento. À vista disso, evitando a degradação ambiental, a emissão de poluentes pelos meios de transporte no deslocamento de material até seu ponto de aplicação, a solicitação de licenciamento ambiental para exploração de jazidas e o pagamento de royalties, a pesquisa é uma comprovação do grande progresso mecânico que o Cimento Portland de Classe de Resistência 32 MPa oferece para o solo laterítico.

Contudo, é valorosa a ideia de continuação dos experimentos com diferentes teores de cimento em busca do ensaio que apresente os melhores resultados em todos os aspectos exigidos perante o DNIT e a adição de resíduos industriais como forma de reduzir a quantidade de Cimento Portland responsável por grandes emissões de gás carbônico.

Referências

ABIKO, A. K., Estabilização de solos com cimentos pozolânicos de cinza da casca de arroz e de resíduos cerâmicos. Tese de Doutorado, São Paulo: EPUSP, p. 1-180, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 12023: Solo-cimento - Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 12253: Solo-cimento — Dosagem para emprego como camada de pavimento — procedimento. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6459: Solo – determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7180: Solo — determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 12025: Solo –cimento – Ensaio de Compressão Simples de Corpos de prova cilíndricos — Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 9895: Solo – Índice de Suporte Califórnia (ISC) - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6502: Rochas e Solos, Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). Solo-cimento, 2009.

CEZNE, A. B.; OLIVEIRA, H. A. & GOMES, Y. Y. S. B., Estudo de dosagem de areia e cimento para estabilização de um solo tropical. Universidade Federal de Goiás, Goiânia, p.1-47, 2016.

DAIBERT, D. J. & SANTOS, P.R. C., Análise dos Solos - Formação, Classificação e Conservação do Meio Ambiente, ed.1, São Paulo: Saraiva, 2014.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE (DNIT). Pavimentação – base de solo-cimento – especificação de serviço (ES), Publicação Instituto de Pesquisa Rodoviária IPR – 143, Rio de Janeiro, p. 1-10, nov. 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE (DNIT). Pavimentação – sub-base de solo melhorado com cimento – especificação de serviço (ES), Instituto de Pesquisa Rodoviária IPR – 140, Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE (DNIT). Pavimentação – Base de solo melhorado com cimento - Especificação de serviço – (ES), Instituto de Pesquisa Rodoviária IPR – 142, Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE (DNIT). Método de Ensaio (ME) 030. Solo – determinação da relação sílica-alumina e sílica-sesquióxidos em solos, Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DO PARANÁ (DER - PR). Pavimentação: solo-cimento e solo tratado com cimento. Paraná, ES, 2005.

GRANDE, F. M., Fabricação de tijolos modulares de solo-cimento por prensagem manual com adição de sílica ativa. Dissertação (Mestrado em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia) Universidade de São Paulo, São Carlos, p. 1-180, 2004.

LEMOUGNA, P. N.; MELO, U. F. C.; KAMSEU, E. & TCHAMBA, A. B., Laterite Based Stabilized Products for Sustainable Building Applications in Tropical Countries: Review and Prospects for the Case of Cameroon, 3. ed. Journal Sustainability, p. 293 – 305, 2011.

MARANHÃO. Lei Estadual nº 5.405 de 08 de abril de 1992. Institui o Código de Proteção de Meio Ambiente e dispõe sobre o Sistema Estadual de Meio Ambiente e o uso adequado dos recursos naturais do Estado do Maranhão. Diário Oficial do Estado do Maranhão. São Luís, MA, p. 1–21, 1992.

MEDINA, J. & MOTTA, L. M. G., Apostila de estabilização de solos. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Engenharia, 2004.

MEHTA, P. K. & MONTEIRO, P. J. M., Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais, 2. ed. São Paulo: Nicole Pagan Hasparyk, 2014.

MÉLO, V. S., Classificação e estabilização de solos lateríticos do estado da Paraíba e do Rio Grande do Norte. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande - Paraíba - Brasil, p. 1–109, 2011.

MONTE, M. A. V., Aplicação de Solo-Cimento em Pavimentos Flexíveis, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade do Porto, Portugal, 2012.

PEREIRA, K. L. A., Estabilização de um solo com cimento e cinza de lodo para uso em pavimentos. Dissertação (mestrado em Engenharia civil), Universidade Federal do Rio Grande do Norte – Natal, 1-125, 2012.

PITTA, M. R., Dimensionamento de pavimentos com camadas estabilizadas com cimento, 4. ed., São Paulo: Associação Brasileira Cimento Portland – ABCP, 1997.

SANT'ANA, W. C. & BERNUCCI, L. L. B., Caracterização dos Solos da Ilha de São Luís para fins de Pavimentação, in: XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG), Belo Horizonte, 2016.

SPECHT, L. P., Comportamento de misturas solo-cimento-fibra submetidas a carregamentos estáticos e dinâmicos visando a pavimentação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

VILLIBOR, D. F.; NOGAMI, J. S; CINCERRE, J. R.; SERRA, P. R. M. & NETO, A. Z., Pavimentos de Baixo Custo para Vias Urbanas: Bases Alternativas com Solos Lateríticos. 2. ed. São Paulo: Editora Arte e Ciência, 2009.

VILLIBOR, D. F & NOGAMI, J. S., Pavimentos Econômicos: Tecnologia do Uso dos Solos Finos Lateríticos. 2. ed. São Paulo: Editora Arte e Ciência, 2009.