

## Avaliação do Comportamento Mecânico da Mistura de um Solo Laterítico com Cimento Portland

NILTON CÉSAR DA SILVA BENTES

*Acadêmico de Bacharelado em Engenharia Civil | IFAM  
Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia do Amazonas  
Manaus, Amazonas, Brasil*

MARCOS RAIKER PRINTEZ FERREIRA

*Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia do Amazonas  
Manaus, Amazonas, Brasil*

FÁBIO MARTINS DA SILVA

*Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia do Amazonas  
Manaus, Amazonas, Brasil*

### Resumo:

*O presente estudo se propõe a avaliar de forma comparativa a influência da adição de Cimento Portland nas propriedades físicas e mecânicas de uma amostra de solo coletada na região metropolitana de Manaus-AM. Para tanto, foram realizados ensaios de limites de consistências e granulometria, para caracterização; compactação, para obtenção da umidade ótima e massa específica aparente seca máxima e, por fim, ensaio para obtenção do Índice de Suporte Califórnia – ISC e expansão. A análise comparativa se deu por meio da interpretação dos resultados obtidos com o solo na condição natural (SN) frente a amostras com adição de 3% de cimento Portland (SN+3%CP). Os resultados apontam pouca influência nos parâmetros físicos, no entanto uma melhora de 563% no ISC.*

**Palavras-chave:** Solo Laterítico; Cimento Portland; Propriedades Físicas e Mecânicas.

### Abstract:

*The present study proposes to evaluate in a comparative way the influence of the addition of Portland Cement on the physical and mechanical properties of a soil sample collected in the metropolitan region of Manaus-AM. For this purpose, consistency and granulometry limits have been tested for characterisation; compaction, to obtain optimal humidity and maximum dry apparent specific mass, and finally, test for Índice de Suporte Califórnia – ISC and expansion. The comparative analysis was done by interpreting the results obtained with the soil in the natural condition (SN) in front of samples with addition of 3% Portland cement (SN + 3% CP). The results point to little influence on the physical parameters, however a 563% improvement in ISC.*

**Palavras-chave:** Lateritic Soil; Portland Cement; Physical and Mechanical Properties.

## INTRODUÇÃO

Os solos lateríticos são de ocorrência superficial, típicos das partes bem drenadas das regiões trópicas úmidas, altamente intemperizados e lixiviados, constituintes de horizontes pedológicos A e B, podendo atingir espessuras de uma dezena de metros e possuem predominância das cores vermelha e amarela (DIAS, 2007). Tais solos apresentam boas características para emprego em pavimentação.

Segundo Parente, et al. (2002), estabilização de solos, definida como tratamento capaz de melhorar suas propriedades para o uso em pavimentação, pode ser feita pela adição de outros solos ou pela adição de aglutinantes ou agentes químicos. O solo-cimento é uma mistura íntima de solo pulverizado, cimento Portland e água, sendo muito utilizado quando não se dispõe de materiais naturais adequados.

Estudos como o de Santos et al. (2006) apontam que Manaus está assente sobre uma bacia sedimentar composta por rochas de menor dureza, comparada à do granito. As propriedades de resistência desses materiais são modificadas devido ao intenso intemperismo físico-químico da região amazônica que desagregam ainda mais tais rochas, propiciando o desenvolvimento de espessos solos, recobertos por densa cobertura vegetal da floresta, contribuindo ainda mais para a escassez de material pétreo (SARGES et al, 2010). Tal fator gera um problema geotécnico comum na região amazônica, qual seja, a falta de material pétreo para confecção de agregados graúdos. Isso, somado ao bom desempenho dos solos lateríticos para emprego na pavimentação, tem feito com que a alternativa de estabilização com cimento Portland seja bastante utilizada.

Nesse sentido, o presente estudo se propõe a avaliar de forma comparativa a influência da adição de Cimento Portland nas propriedades físicas e mecânicas de uma amostra de solo coletada na região metropolitana de Manaus-AM. A análise comparativa vai se dar por meio da interpretação dos resultados obtidos com o solo na condição natural frente a amostras com Cimento Portland.

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para embasar teoricamente a pesquisa, foram discutidos alguns pontos-chaves a fim de estabelecer conexões entre os diversos conceitos presentes na literatura e o objetivo do estudo

## RESISTÊNCIA DO SOLO AO CISALHAMENTO

O solo, em geral, rompe por cisalhamento. Exemplos de danos por cisalhamento são deslizamentos de terra e falhas nas fundações. De acordo com (DAS,2011) “A resistência ao cisalhamento de uma massa de solo é a resistência interna por área unitária que a massa de solo pode oferecer para resistir a ruptura e deslizamentos ao longo de qualquer plano do seu interior”.

A propriedade dos solos em resistir a cargas e preservar sua estabilidade, é diretamente dependente da resistência do solo; cada parte do solo se rompe quando é excedida essa resistência (CAPUTO, 2008). Existem diversos métodos em laboratório onde se é possível definir através de alguns parâmetros a resistência do solo ao cisalhamento, sendo os mais comuns o ensaio de cisalhamento direto e de compressão triaxial.

Sendo um dos mais antigos e simples ensaios para a obtenção da resistência ao cisalhamento, o ensaio de cisalhamento direto é baseado diretamente no critério de Mohr-Coulomb, que consiste em aplicar-se uma tensão normal em um plano e verificar a tensão cisalhante que provoca a ruptura.

Segundo Maiolino (1985) a resistência ao cisalhamento do solo pode ser simplificada como um somatório de diversos fatores, sendo eles, composição, índice de vazios, história de tensões, temperatura, pressão efetiva entre outros. Porém podemos

simplificar e obter essa resistência através da coesão e do ângulo de atrito, parâmetros esses que podem ser obtidos por meio de ensaios laboratoriais.

A resistência ao cisalhamento do solo é determinada pelas propriedades coesivas e de atrito entre as partículas do solo, que é definida como a tensão de cisalhamento máxima que o solo pode suportar sem quebrar. (Pinto, 2000).

### ATRITO

O atrito é uma função da interação entre duas superfícies em contato. A contribuição da resistência devido ao atrito pode ser mostrada por analogia com o problema de um corpo deslizando sobre uma superfície horizontal lisa, como na figura 1.

A resistência ao deslizamento ( $\tau$ ) é proporcional à força normal aplicada ( $N$ ), segundo a relação:

$$T = N \cdot f$$

onde “ $f$ ” é o coeficiente de atrito entre os dois materiais. Para solos, esta relação é escrita na forma:

$$\tau = \sigma \cdot \text{Tg } \varphi$$

onde “ $\varphi$ ” é o ângulo de atrito interno do solo, “ $\sigma$ ” é a tensão normal e “ $\tau$ ” a tensão de cisalhamento.

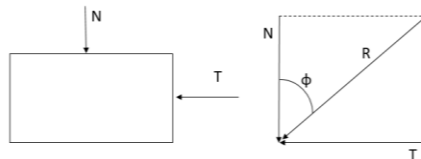


Figura 1: Analogia ao atrito de um corpo

Primeiramente suponha um bloco com peso  $N$  sendo empurrado por uma pessoa conforme mostrado na figura 2. Para deslocar o bloco a Força horizontal  $F$  deverá ser maior que a força de atrito entre o bloco e o peso:

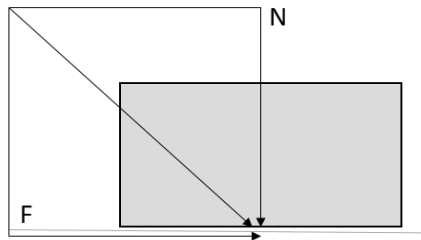


Figura 2: Analogia ao atrito

Nos materiais granulares, constituídos de grãos isolados e independentes, o atrito é um misto de deslizamento e de rolamento, afetado fundamentalmente pela entrosagem ou imbricamento dos grãos.

Enquanto no atrito simples de escorregamento entre os sólidos o ângulo de atrito “ $\varphi$ ” é praticamente constante, o mesmo não ocorre com os materiais granulares, em que as forças atuantes, modificando sua compactidade e portanto, acarretam variação do ângulo de atrito “ $\varphi$ ”, num mesmo solo. Portanto, o ângulo de atrito interno do solo depende do tipo de material, e para um mesmo material, depende de diversos fatores (densidade, rugosidade, forma, etc.).

Logo, podemos definir o atrito do solo como o contato existente entre os grãos e essa interação existente entre eles é o que tem por finalidade impedir o deslocamento dos grãos do solo, sendo então esse fator por muitas vezes o principal mecanismo de resistência do solo. Quando ocorre o rompimento do solo, onde atinge-se a máxima tensão de ruptura, indica que esse atrito não foi suficiente para manter a resistência deste solo.

## **COESÃO**

O solo coeso é definido pela força de atração entre as superfícies de suas partículas, podendo ser real ou aparente. A coesão real é resultado do efeito de agentes cimentantes, como teor de óxidos e de argilas silicatadas (Mullins et al., 1990), bem como o resultado da atração entre partículas próximas por forças eletrostáticas (Mitchell, 1976). A coesão aparente é resultado da tensão superficial da água nos capilares do solo, formando meniscos de água entre as partículas dos solos parcialmente saturados, que tendem a aproximá-las entre si. A coesão aparente constitui uma parcela da resistência ao cisalhamento de solos parcialmente saturados (Fredlund & Rahardjo, 1993).

Segundo Vargas (1977), de uma maneira intuitiva, coesão é a resistência que a fração argila concede ao solo, pelo qual ele se faz capaz de sustentar a coesão em forma de torrões ou blocos, ou pode ser repartido em diferentes formas e manter esta forma. Os solos que possuem essa propriedade são determinados como coesivos. A coesão é uma característica comum de solos muito finos e tem-se constatado que ela aumenta com a quantidade de argila e atividade coloidal.

A coesão por vezes está muito presente principalmente em solos classificados como argilosos, são ainda fatores diretamente ligados a carga e tempo a que é trabalhada nos solos, esse trabalho acontece por fatores químicos, onde acontece a cimentação das partículas finas presentes no solo, devido uma atração química produzida entre elas. A coesão pode ser comparada a uma cola, onde o objetivo é deixar as partículas mais próximas fazendo que aumente sua resistência.

No caso do solo escolhido, o laterítico, sua composição é em grande parte propícia ao processo de coesão, devido a presença do óxido de ferro e alumínio, que são substâncias que o tornam susceptíveis para o processo. Além de quê, são solos que são mais facilmente encontrados em regiões que apresentam os climas tropical e subtropical, que é o caso da região norte.

## **ESTABILIZAÇÃO DOS SOLOS**

Segundo ROJAS (2015) autores relatam que solos cimentados exibem um comportamento mecânico complexo, influenciado por diversos fatores, dentre os quais se destacam a quantidade de cimento adicionada, a porosidade da mistura e o teor de umidade.

INGLES; METCAFT (1972) definem a estabilização de solos como sendo a aplicação de processos técnicos através dos quais se busca a melhoria das propriedades mecânicas de um determinado solo, especialmente daquelas relacionadas com resistência, deformabilidade, condutividade hidráulica e durabilidade.

Existem atualmente muitas obras de pavimentação sendo executadas, onde encontram-se os mais variados tipos de solos, alguns muito inutilizáveis. Seria então necessário aplicar um processo com o qual se pudesse fazer um proveito do solo nativo.

Utilizando esse solo presente na região, temos uma facilidade quanto a obtenção e utilização do mesmo, tendo a apenas que trabalharmos técnicas que possam torná-los úteis para o que buscamos.

Na pavimentação, a estabilização de solos tem como objetivo melhorar e agregar ao solo uma característica que o torne mais aceitável para o trabalho. Segundo (INGLES; METCALF, 1972; SANTANA, 1983) as propriedades de resistência e compressibilidade do solo original são alteradas a partir de um processo físico ou químico, a fim de criar um novo material que atenda de uma forma melhor aos requisitos do projeto de dado local.

A estabilização de solos é classificada em duas classes: física e química. A estabilização física de solos é uma etapa que busca melhorar as características e propriedades iniciais do solo através da manipulação da densificação do solo por esforços de compactação ou através da adequação da granulometria agregando outros solos, tornando o contato entre grãos mais efetivo.

Já a estabilização química é definida por englobar todos os processos onde as interações químicas prevalecem, independentemente do tipo de aditivo incorporado. Segundo (WINTERKORN PAMUKCU, 1991) são processos de tratamento onde um ou mais compostos químicos são inseridos ao solo, resultando em reações químicas dos constituintes do solo com os aditivos.

Pode ser também indicada como a técnica de atribuir ao solo rigidez, melhorando sua trabalhabilidade e reduzindo sua expansão, pela introdução de compostos quimicamente ativos. Ainda segundo (LIMA, 1981; BERNUCCI et al., 2008; LITTLE NAIR, 2009) essa técnica é aplicada para que o produto da estabilização possa atender as propriedades de engenharia que o solo natural não era capaz de apresentar.

Há uma grande variedade de aditivos químicos utilizados na estabilização de solos, e cada um pode proporcionar modificações em características dos solos de acordo com mecanismos peculiares de ação. No entanto, em geral, quando se trata de estabilização química destacam-se quatro mecanismos: substituição das moléculas de água e cátions, melhoria das ligações entre os agregados das partículas argilosas, floculação e dispersão (LIMA, 1981).

Os principais estabilizantes químicos utilizados nos solos são o cimento Portland e a cal hidratada. O cimento agrega ao solo um ganho de resistência imediata e ao decorrer do período de cura (28 dias), em função do processo em que acontece a formação de componentes e também da hidratação do cimento. Os efeitos de sua utilização se apresentam como aumento da resistência da mistura, redução da plasticidade do solo, melhora da trabalhabilidade e redução da variação volumétrica (expansibilidade e compressibilidade).

O aumento de resistência pode ser mais ligeiro quando a mistura é exposta a temperaturas mais elevadas, entretanto, a secagem pode prejudicar a hidratação do cimento. A estabilização com cimento Portland pode ser indicada para uma grande diversidade de solos, mas sua aplicação mais comum e destacadamente aos solos granulares (INGLES; METCALF, 1972; LITTLE NAIR, 2009; EREN FILIZ, 2009).

## **SOLO-CIMENTO**

O material solo-cimento é definido pela NBR 12253/92, Solo-cimento – Dosagem para Emprego como Camada de Pavimento, como sendo “o produto endurecido resultante da cura de uma mistura íntima compactada de solo, cimento e água, em proporções

estabelecidas através de dosagem, conforme este projeto, e executada conforme a NBR 12254/90”

De maneira semelhante, o American Concrete Institute, citado pelo U. S. Army Corps of Engineers, define solo-cimento como uma mistura adequadamente proporcionada de solo, cimento e água, compactada em uma alta densidade (USACE, 2000).

A presença de agentes cimentantes no solo irá provocar mudanças substanciais nas propriedades geotécnicas do material. Estas modificações dependerão das características específicas do solo, do teor de aditivos, da quantidade de água, do tipo e grau de compactação e do tipo e tempo de cura. De maneira geral, a adição de cimento aumentará a resistência e a rigidez, diminuirá a compressibilidade e irá alterar os limites de consistência; a condutividade hidráulica será reduzida nos solos granulares, mas aumentará nos solos argilosos, assim como a durabilidade medida em ciclos de molhagem e secagem aumentará (PRIETTO, 1996).

Heineck (1998) relata que a melhoria das características mecânicas dos solos pela adição de cimento Portland é definida como um processo utilizado de forma cada vez mais intensa nas diversas áreas da engenharia geotécnica, como por exemplo, na contenção de maciços, execução de fundações sobre solos moles, prevenção de liquefação em areias e execução de pavimentos.

Para Felt (1955), o tipo e composição química do solo, quantidade de cimento e água adicionados, a densidade na qual a mistura é compactada, o tempo pelo qual o solo, o cimento e a água são misturados antes da compactação e o grau de pulverização do solo, se este for argiloso, são os fatores que mais influenciam o comportamento das misturas de solo-cimento

ROJAS (2015) O solo/cimento é o material resultante da mistura homogênea, compactada e curada de solo, cimento e água em proporções adequadas. O produto resultante deste processo é um material com boa resistência à compressão, baixa condutividade hidráulica, baixo índice de retração volumétrica e boa durabilidade.

A ação cimentante que ocorrerá no solo a partir da adição de cimento em suas propriedades se dará a partir de reações de hidratação e hidrólise, onde irá ocorrer ligações de características mecânicas e químicas junto às superfícies rugosas dos grãos, superfície onde o cimento se anexa através dos pontos de contato. Percebe-se que a cimentação se torna mais eficiente quando se tem um maior número de contatos, característica que se faz presente em solos com uma boa graduação.

## **DOSAGEM**

De acordo com a Associação Brasileira de Cimento Portland(1989), para a utilização mínima de cimento, o solo deve possuir teores de até 35% de material argiloso e cerca de 65% de silte e areia, além de que os limites de liquidez, de plasticidade e índice de plasticidade devem apresentar resultados inferiores a 45%, 18% e 10% respectivamente. Segundo Freire (1976, apud Dallacort, 2002) solos em que existe uma alta concentração de material argiloso necessitam de um grau de teor maior de cimento, devido à grande quantidade de pontos de contatos superficiais existentes nos grãos. Ainda de acordo com Rotta et al. (2001) quanto maior é a densidade apresentada na amostra de solo durante o processo de formação da estrutura cimentante mais significativa é a contribuição do processo de cimentação na sua resistência.

Abaixo temos uma Tabela 1 onde INGLES; METCALF (1972) demonstra um indicativo da quantidade de cimento que deve ser adicionada para que ocorra a estabilização em alguns tipos de solos.

**Tabela 1 - Quantidade de cimento para estabilização em alguns tipos de solos**

Tipo de solo	Porcentagem de cimento
Pedra finamente britada	0,5 a 2
Pedregulho areno-argiloso bem graduado	2 a 4
Areia bem graduada	2 a 4
Areia mal graduada	4 a 6
Argila-arenosa	4 a 6
Argila-siltosa	6 a 8
Argilas	8 a 15

Fonte: (INGLES; METCALF, 1972).

De acordo Feuerharmel (2003), a adição de cimento ao solo ocasiona alterações de suas substâncias nas suas propriedades. A variação do grau com que as modificações ocorrem dependem de certas características presentes no solo, depende também da adição, teor de adição, quantidade de água, tipo, tempo e grau de compactação, temperatura, entre outras.

Os passos para a execução da dosagem do solo-cimentos estão descritos na norma NBR 12253:1992, onde definem-se como:

- caracterização do solo conforme as normas NBR 6458, NBR 6459, NBR 7180 e NBR 7161 e a classificação do solo seguindo o HBR (ASSTM D 3282) da American Association of State Highway Officials, onde somente os solos A1, A2, A3 e A4 poderão ser utilizados para executar o composto de solo-cimento;
- adoção do teor de cimento sugerido para solo-cimento segundo a Tabela 2.

**Tabela 2 - teor de cimento sugerido para o ensaio de compactação do solo cimento**

Classificação do solo	Teor de cimento sugerido, em massa (%)
A.1.a	5
A.1.b	6
A.2	7
A.3	9
A.4	10

Fonte: NBR 12253 (ABNT, 1992a).

- após a execução do ensaio de compactação, usando o teor de cimento sugerido, obtemos a umidade ótima e a massa específica aparente seca máxima.
- prepara-se então os corpos de prova, seguindo os valores encontrados de umidade ótima e de massa específica aparente seca máxima.
- moldados os corpos de prova e decorrido o período de cura, dá-se início ao ensaio de compressão simples.

## VAZIOS X CIMENTOS

Segundo Larnach (1960) , tem-se que tanto com a compactação de solos ou no solo-cimento não há uma expulsão completa do ar existente no sistema solo-água-ar ou solo-cimento-água-ar, a resistência não pode ser ligada com a relação água-cimento, pois

está apenas se aplica a materiais onde o ar foi na sua totalidade expulsa e onde água está preenchendo todo o vazio existente.

Em seu estudo, Larnach (1960) usou uma areia com dimensões finas misturada com argila que se encontrava pulverizada na proporção de nove partes da areia para uma de argila. As quantidades de cimento usadas, em relação à massa do solo seco, foram de 5,3%, 11,1% e 17,7%. Para cada quantidade percentual de cimento foram realizados os ensaios de resistência à compressão simples e de flexão em vigotas, moldadas com teores de umidade e massas específicas aparentes secas diferentes, ambos definidos a partir das curvas de compactação das misturas de solo e de cimento.

A expressão utilizada por Larnach (1960) para definir a relação água/cimento foi a seguinte, como exposta na figura 3:

$$\frac{V_v}{V_{ci}} = \frac{\text{Volume absoluto de vazios (ar + água)}}{\text{Volume absoluto de cimento}}$$

Figura 3: Expressão para relação água/cimento.

A Figura 4 expõe os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples das amostras de solo-cimento previamente curadas por 7 dias. Observa-se dados bem ajustados quanto à relação vazios/cimento.

Para Larnach (1960), a utilização desse tipo de interação, semelhante ao que acontece em concreto, pode ser muito útil para dosagem e controle de execução de misturas de solo-cimento em campo.

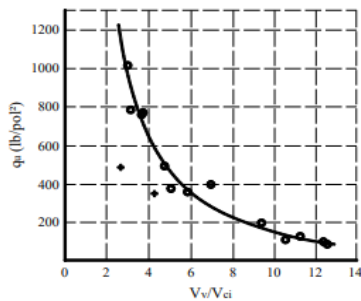


Figura 4 - Relação entre o fator vazio x cimento e resistência à compressão simples, por Larnach (1960).

## MATERIAIS E MÉTODOS

O solo natural será coletado em jazida de empréstimo dentro da região metropolitana de Manaus. O cimento Portland será adquirido junto ao comércio local.

Para caracterização física e mecânica do solo na condição natural e da mistura, serão utilizados os métodos de ensaios da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. Tais como, NBR 7181/16 (versão corrigida de 2018): Solo – Análise Granulométrica sem sedimentação; NBR 6459/16 (versão corrigida de 2017): Solo – Determinação do Limite de Liquidez; NBR 7180/16: Solo – Determinação do Limite de Plasticidade; NBR 7182/16 (versão corrigida de 2020): Solo – Ensaio de Compactação na energia intermediária. Ressaltando-se que antes dos ensaios descritos, as amostras serão preparadas conforme a NBR 6457/16 (versão corrigida de 2016) Amostra de Solo:



Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Por fim, para obtenção da expansão e do índice de resistência à penetração, será utilizada a NBR 9895/16 (versão Corrigida de 2017): Índice de Suporte Califórnia.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### Solo Natural

A Figura 05 mostra o resultado do ensaio de granulometria, do qual foi possível extrair a informação relativa ao percentual de cada fração, de acordo com a NBR 6502 (1995), quais sejam: Pedregulho (0,73%), Areia (63,35%) Argila mais Silte (35,91%).

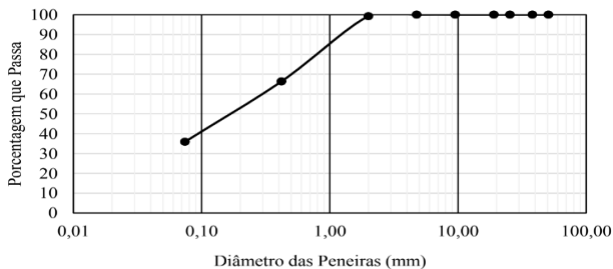


Figura 05. Curva granulométrica do Solo Natural.

O gráfico da Figura 06 apresenta os resultados dos ensaios de Limites de Atterberg, que, em conjunto com a granulometria permitiu a caracterização, segundo os dois principais sistemas utilizados no Brasil. Desse modo, segundo o que preconiza o Sistema de Classificação unificado, a amostra é um ML (silte de baixa compressibilidade). Já segundo o Highway Research Board HRB, trata-se de um solo A-6 (materiais siltosos e argilosos).

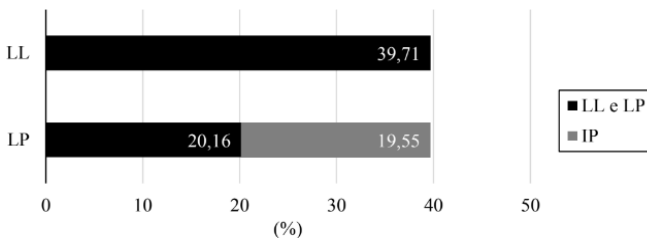


Figura 06. Resultados dos ensaios de Limites de Atterberg do Solo Natural.

Os resultados obtidos junto ao ensaio de Compactação Proctor Normal foram trabalhados e se encontram sintetizados no gráfico da Figura 07. Desse modo, os parâmetros de compactação massa específica aparente seca máxima e umidade ótima são, respectivamente,  $1,756\text{g/cm}^3$  e 17,70%. Com base nos valores, foi moldado o corpo de prova para determinação do Índice de Suporte Califórnia, que será apresentado posteriormente com o referido parâmetro na condição de mistura.

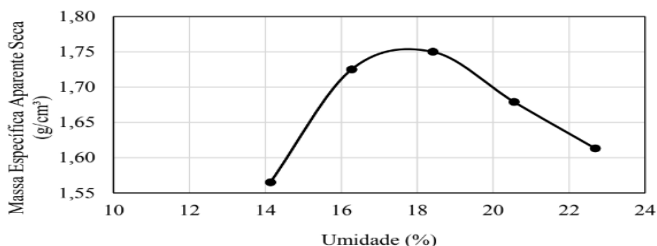


Figura 07. Gráfico do ensaio de compactação do Solo Natural na energia intermediária.

### Solo Natural + 3% de Cimento Portland

A Figura 08 mostra o resultado do ensaio de granulometria, do qual foi possível extrair a informação relativa ao novo percentual de cada fração, de acordo com a NBR 6502 (1995), quais sejam: Pedregulho (0,77%), Areia (60,05%) Argila mais Silte (39,17%).

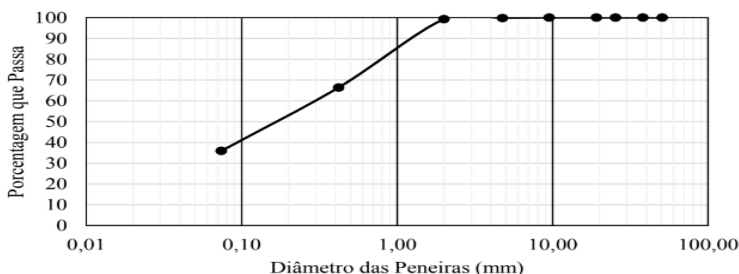


Figura 08. Curva granulométrica do Solo Natural + 3% de Cimento Portland.

No gráfico da Figura 09 podemos visualizar os resultados dos ensaios de Limites de Atterberg, que, em conjunto com a granulometria permitiu a nova caracterização, segundo os dois principais sistemas utilizados no Brasil. Desse modo, segundo o que preconiza o Sistema de Classificação unificado, a amostra é um ML (silte de baixa compressibilidade). Já segundo o Highway Research Board-HRB, trata-se de um solo A-6 (materiais siltosos e argilosos).

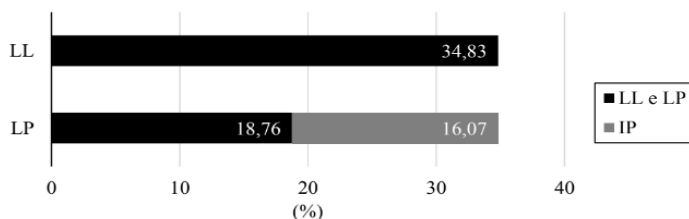


Figura 09. Resultados dos ensaios de Limites de Atterberg do Solo Natural + 3% de Cimento Portland.

Por fim, os resultados obtidos junto ao ensaio de Compactação Proctor Normal foram trabalhados e se encontram sintetizados no gráfico da Figura 10. Desse modo, os parâmetros de compactação massa específica aparente seca máxima e umidade ótima são, respectivamente, 1,792g/cm³ e 18,10%. Com base nos valores, foi moldado o corpo de prova para determinação do Índice de Suporte Califórnia, que será apresentado posteriormente com o referido parâmetro na condição natural.

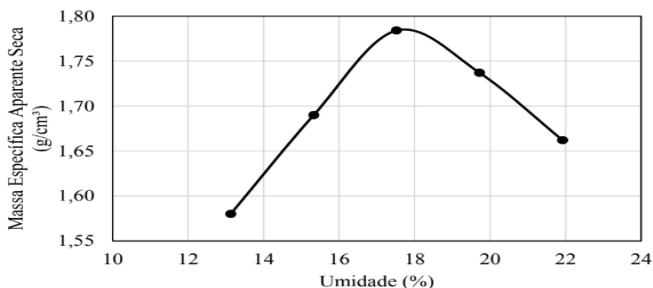


Figura 10. Gráfico do ensaio de compactação do Solo Natural + 3% de Cimento Portland.

## COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Para a devida consecução dos objetivos estabelecidos no presente trabalho, o presente tópico trata da visualização em conjunto dos resultados dos ensaios do solo na condição natural frente aos resultados da mistura com 3% do aglomerante hidráulico. Desse gráfico da Figura 11 apresenta os resultados da análise granulométrica, no qual podemos observar pouca variação.

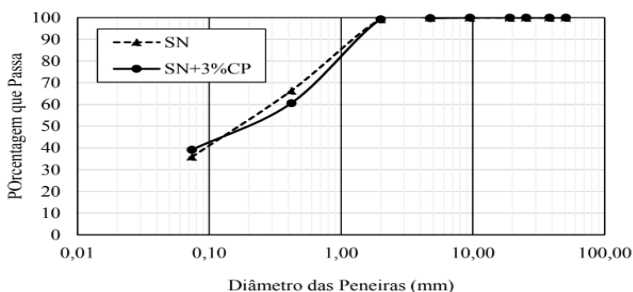


Figura 11. Curva granulométrica da amostra na condição natural frente à mistura.

O gráfico da Figura 12 também nos mostra a pouca variação na plasticidade do solo, o que pode ser explicado pelo pequeno percentual de cimento adicionado. Em termos percentuais, houve um aumento na plasticidade do solo de aproximadamente 7,50%.

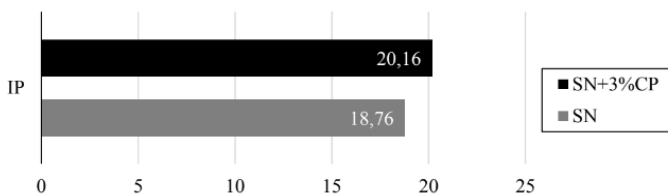


Figura 12. Resultados dos ensaios de Limites de Atterberg da amostra na condição natural frente à mistura.

Pouca variação também foi observada nos parâmetros de compactação, conforme podemos observar nos gráficos das Figuras 13 e 14.

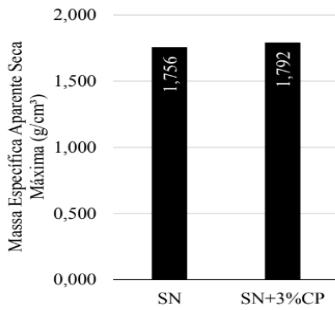


Figura 13. Massa específica aparente seca máxima da amostra na condição natural frente à mistura

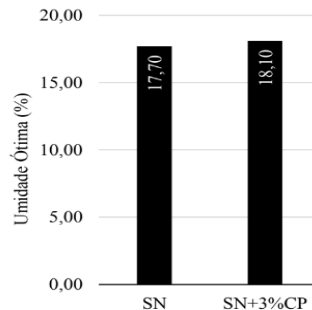


Figura 14. Umidade ótima na condição natural frente à mistura.

Por meio do gráfico da Figura 15 podemos observar o parâmetro no qual a adição do cimento Portland surtiu efeito positivo, uma vez que o Índice de Suporte Califórnia teve seu valor alterado: de 15,04% para 99,71%, o que representa uma melhora de, aproximadamente 563%, influenciado pelas próprias condições do ensaio, que requer período de submersão do corpo de prova, suficiente para que as reações químicas do cimento Portland sejam completadas. Não foi observada melhora na expansão, no entanto os valores obtidos nas duas condições ainda assim caracterizam o solo como pouco expansivo e dentro dos parâmetros exigidos para aplicação na pavimentação.

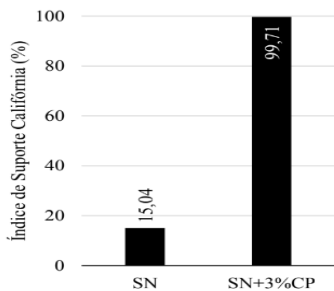


Figura 15. Índice de Suporte Califórnia na condição natural n frente à mistura.

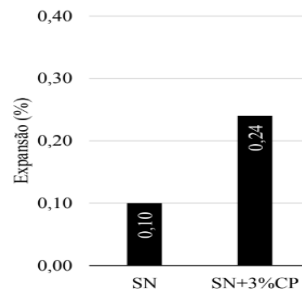


Figura 16. Expansão na condição natural frente à mistura

## CONCLUSÃO

Os dados obtidos no presente estudo nos permitem concluir que a adição de 3% de cimento Portland junto não influenciou nas propriedades físicas, o que pode ser embasado, de modo qualitativo, por meio do resultado da caracterização segundo os dois principais sistemas de classificação de solos utilizados no Brasil.

Podemos concluir ainda que a adição do aglomerante hidráulico contribuiu positivamente na propriedade mecânica analisada (Índice de Suporte Califórnia), o que resultou numa melhora, em termos percentuais, de 563%. Mesmo não influenciando de forma positiva na expansão do solo, concluímos que o resultado da mistura ainda permite caracterizar o solo artificial como pouco expansivo e dentro dos parâmetros exigidos para aplicação na pavimentação.

---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- \_\_\_\_\_. NBR 6457 (versão corrigida:2016) Amostra de Solo: Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016.
- \_\_\_\_\_. NBR 6459 (versão corrigida 2017): Solo – Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro, 1984.
- NBR 7181/16 (versão corrigida 2:2018): Solo – Análise Granulométrica
- \_\_\_\_\_. NBR 6502: Rochas e Solos. Rio de Janeiro, 1995.
- \_\_\_\_\_. NBR 7180: Solo – Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.
- \_\_\_\_\_. NBR 7181 (versão corrigida 2:2018): Solo – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 2016.
- \_\_\_\_\_. NBR 7182 (versão corrigida:2020): Solo – Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro, 2016.
- \_\_\_\_\_. NBR 9895/16: Solo - Índice de suporte Califórnia (ISC) - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2020.
- AMARAL, S. da C. **Estudo de mistura Laterita-asfalto da região metropolitana de Belém-PA para revestimento de pavimento**. 2004. 198f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
- CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. Volume 1: fundamentos. 6.ed., rev. e ampl., [9. Impr.]. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- DALLA ROSA, Amanda. **Estudo dos parâmetros-chave no controle da resistência de misturas solo-cinzal**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, BR-RS, 2009.
- DIAS, I. de M. **Estudo de Solos Tropicais para uso em Pavimentação a Partir de Ensaios Triaxiais Estatísticos**. Dissertação de Mestrado da Escola Politécnica de São Carlos. São Paulo, 2007.
- ESPINDOLA, Carlos Roberto. Laterita e solos lateríticos no Brasil. **Boletim técnico da FATEC-SP**. São Paulo, 2008.
- INGLES, O. G.; METCALF, J. B. **Soil stabilization: principles and practices**. Sydney: Butterworths, 1972.
- MAIOLINO, A. L. G. **Resistência ao cisalhamento de solos compactados: Uma proposta de tipificação**, 1985, 385f. Dissertação de Mestrado. Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- MULLINS, C.E.; MACLEOD, D.A.; NORTHCOTE, K.H.; TISDALL, J.M. & YOUNG, I.M. **Hardsetting soils: Behavior, occurrence and management**, 1990.
- LIMA, D. C. **Algumas Considerações Relativas à Aspectos da Estabilização dos Solos, em Particular à Estabilização Solo-Cal**. 1981. 171 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1981.
- PARENTE, E. B.; A. B. PARREIRA e J.B. SOARES (2002). Avaliação do comportamento mecânico de um solo laterítico e de outro não laterítico estabilizados com cimento. **XVI ANPET - Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes**, Panorama Nacional de Pesquisa em Transportes.
- PINTO, Carlos de Souza. **Curso básico de mecânica dos solos**. 3a Edição. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.
- ROCHA, M. T.; REZENDE, L. R. Estudo laboratorial de um solo tropical granular estabilizado quimicamente para fins de pavimentação. **Revista Matéria**, v.22 n.4, 2017.
- ROJAS, J. W. J. **Estudo de remediação do solo contaminado por borra oleosa ácida utilizando a técnica de encapsulamento**. Dissertação de Mestrado da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2007.
- SANTOS, J. O. S.; HARTMANN, L. A.; FARIA, M. S. G.; RIKER, S. R.; SOUZA, M. M.; ALMEIDA, M. E.; MCNAUGHTON, N. J. A Compartimentação do Cráton Amazonas em Províncias: Avanços Ocorridos no Período 2000-2006. In: **Simpósio de Geologia da Amazônia**, 9. 2006, Manaus, [Anais eletrônicos...]. Manaus: Manaus Editora, 2006.
- SARGES, R. R.; NOGUEIRA, A. C. R.; FROTA, C. A.; SILVA, C. L. Depósitos argilosos Cenozóicos do estado do Amazonas: utilização como agregados de argilas calcinadas para pavimentações na região Amazônica. **Brazilian Geographical Journal Geosciences and Humanities**, research medium 1, 2010.
- SILVA, M. F. **Estudo da estabilização com cal de um solo laterítico e um solo não laterítico**. 2016. 142f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.
- SUAREZ D. A. A. (2008). **Estudo do comportamento mecânico de dois solos lateríticos do Estado de São Paulo com adição de emulsão asfáltica**. São Carlos, 2008. 144f. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo.
- U.S ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE). Design and Construction of Levees. **Engineer Manual** N° 1110-2-1913, Appendix G: Use of Soil cement for Levee Protection,2000. p.146-162.Washington D. C.
- WINTERKORN, H.; PAMUKCU, S. Published 1991; **Environmental Science**. Soil stabilization and grouting are methods of soil improvement, 1991.
- PRIETTO, P. D. M. **Estudos do comportamento mecânico de um solo artificialmente cimentado**. 1996. 150p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – CPGEC/UFRGS, Porto Alegre.
- HEINECK, K. S. **Estudo da Influência de Cimentações Introduzidas sob Tensão**. 1998. 118f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande de Sul, Porto Alegre.
- FELT, E. J. Factors Influencing Physical Properties of Soil-cement Mixtures. Research and Development Laboratories of the Portland Cement Association; **Bulletin D5**. Autorized Reprint from Bulletin 108 of the Highway Research Board, 1955, 138f.

DALLACORT, R.; JÚNIOR, H. C. L.; WILLRICH, F. L.; BARBOSA, N. P. Resistência à compressão do solocimento com substituição parcial do cimento Portland por resíduo cerâmico moído. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.6, n.3, p. 511-518, 2002.

ROTTA, G. V.; PRIETTO, P. D. M.; CONSOLI, N. C.; GEHLING, W. Y. Y. Influência do índice de vazios de formação da matriz cimentante no comportamento mecânico de solos cimentados. **Solos e Rochas**, São Paulo, ABMS/ABGE, v.245, n.1, p. 23-41, 2001.

FEUERHARMEL, C. **Aspectos do comportamento não saturado de dois solos coluvionares – Gasoduto Bolívia – Brasil**. 2003, 128f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande de Sul, Porto Alegre.