

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/651

## Análise Comparativa Entre Adição de Cal Hidratada e Cimento na Estabilização de um Solo Argiloso para Utilização como Camada de Pavimento

Elis Della Giustina

Engenheira Civil, Universidade do Extremo Sul Catarinense, São Ludgero, Brasil, elisdg@outlook.com

Aziz Tebechrani Neto

Professor, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, Brasil, aziztneto@gmail.com

**RESUMO:** Uma das principais questões defrontados pela engenharia rodoviária atualmente, consiste na escassez de materiais naturais em condições adequadas para utilização nas obras de implantação e pavimentação, sendo necessário procurar outros materiais ou adotar métodos para viabilizar a utilização do solo disponível. Com isso, o presente trabalho tem como objetivo comparar o melhoramento de um solo argiloso entre a adição de cal hidratada e Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI) para uso em camada de pavimentação. Os teores utilizados para esta análise foram de 3, 5 e 7% e foram estudados em dois tempos de cura, 7 e 28 dias. O solo natural foi submetido a ensaios de limite de Atterberg, granulometria e compactação, para realizar sua caracterização utilizando a classificação HBR/TBR. As misturas foram submetidas a ensaios mecânicos na energia Proctor Normal, geralmente usada em projetos de engenharia rodoviária, onde a compactação é relativamente leve. Os resultados obtidos nas misturas com cal hidratada não atingiram as expectativas, apresentando valores relevantes de CRB apenas na porcentagem de 7%, podendo ser utilizada apenas em camada de subleito. As misturas com cimento se mostraram positivas em praticamente todas suas porcentagens, sendo os maiores valores de CBR no período de cura de 28 dias. Ainda, nas porcentagens de 5% e 7%, com um período de cura de 7 dias, a mistura pode ser empregada como reforço, enquanto que após 28 dias de cura, é indicada apenas para uso como camada de subleito. Sendo assim, fazendo uma análise comparativa entre o uso da cal hidratada e do cimento, obteve-se resultados mais satisfatórios nas misturas com CP V-ARI.

**PALAVRAS-CHAVE:** solo argiloso, cal hidratada, CP V-ARI, pavimentação.

**ABSTRACT:** One of the main issues facing road engineering today is the scarcity of natural materials in suitable conditions for use in implementation and paving works, making it necessary to look for other materials or adopt methods to make it feasible to use the available soil. Therefore, this study aims to compare the improvement of a clay soil between the addition of hydrated lime and Portland Cement of High Initial Strength for use in a paving layer. The contents used for this analysis were 3, 5 and 7% and were studied at two curing times, 7 and 28 days. The natural soil was subjected to Atterberg limit, granulometry and compaction tests in order to characterize it using the HBR/TBR classification. The mixtures were subjected to mechanical tests at Normal Proctor energy, generally used in road engineering projects, where compaction is relatively light. The results obtained from the mixtures with hydrated lime did not achieved expectations, showing relevant CBR values only at a percentage of 7%, which can only be used in the subgrade layer. The mixtures with cement proved to be positive in practically all their percentages, with the highest CBR values in the 28 days curing period. In addition, at percentages of 5 and 7%, using a curing period of 7 days, it would be possible to use the mixture in the reinforcement and in the 28 days period, only in the sub-base layer. Therefore, a comparative analysis between the use of hydrated lime and cement showed more satisfactory results for mixtures with CP V-ARI.

**KEYWORDS:** clay soil, hydrated lime, CP V-ARI, paving.

## 1. Introdução

O setor rodoviário desempenha um papel fundamental no Brasil, sendo o principal meio de locomoção de pessoas e mercadorias, responsável por cerca de mais de 60% das cargas transportadas, segundo dados de 2021 da Confederação Nacional do Transporte (CNT).

O pavimento pode ser definido como uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, constituída sobre a superfície final de terraplanagem, destinada técnica e economicamente a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, e a propiciar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança (BERNUCCI *et al.*, 2022).

Os principais problemas enfrentados na construção de estradas têm sido a durabilidade da superfície de rolamento e a falta de solos com resistência adequada (VIEIRA, 1994). Em vista disso, existem algumas técnicas que são capazes de aprimorar solos para serem usados em pavimentação.

Sabe-se que o solo natural é um material complexo e muito variável e, devido à sua abundância, tem grande emprego na engenharia rodoviária. Porém, nem sempre o solo satisfaz às especificações para sua utilização em camadas de base e/ou sub-base de pavimentos. Neste caso, deve-se optar por alternativas como: dimensionar os pavimentos considerando as limitações do solo; substituir o material existente por outro de melhor qualidade; ou corrigi-lo, alterando suas propriedades e criando um material que atenda às necessidades do projeto. Esta última alternativa é chamada de estabilização de solos (NUNEZ, 1991).

Para Rosa (2009), a cal é um dos estabilizantes de maior utilização e abundância, bem como o mais econômico usado para estabilização de solos, com aplicação em pavimentação e aterros. A sua eficiência foi comprovada através de vários estudos sobre a utilização da cal no melhoramento de solo para pavimentação, apresentando bons resultados em relação a sua capacidade de suporte e na redução de recalques.

Já a adição de cimento ao solo é um método definido pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2006) como um estabilizante químico, tornando-o menos sensível aos efeitos da água e diminuindo a sua plasticidade. É empregado principalmente para melhorar a trabalhabilidade de certos solos em pista ou para atender as especificações granulométricas, atualmente, os órgãos e concessionárias têm voltado a especificar o solo-cimento, mostrando-se novamente como um material para competir com as tradicionais bases granulares de brita graduada simples (BERNUCCI *et al.*, 2022).

Diante do exposto, o presente trabalho irá estudar resultados obtidos a partir da mistura de um solo argiloso com Cimento Portland CP V-ARI, um tipo de cimento pozolânico de alta resistência inicial, e da mistura do mesmo solo tratado com cal-hidratada nas seguintes porcentagens: 3, 5, 7%. O estudo irá avaliar as porcentagens de dosagem e os parâmetros de resistência para camadas de base e sub-base em aplicação na pavimentação, tendo em vista critérios econômicos e ambientais.

## 2. Materiais e Métodos

O solo utilizado na pesquisa, foi um solo residual de Formação Geológica Palermo, coletado no Iparque – UNESC, na cidade de Criciúma – SC, com as seguintes coordenadas: 28°43'52.7"S 49°24'27.7"W.

Quando se trata da utilização de solos para estruturas de pavimento, saber identificar e classificar o solo disponível na natureza é crucial para que se elabore um projeto viável. Portanto, foram realizados os seguintes ensaios: Análise granulométrica – NBR n° 7181/2018; Limite de liquidez – NBR n° 6459/2016; Limite de plasticidade – NBR n° 7180/2016; Ensaio de compactação – NBR n° 7182/2016. Todas as amostras seguiram a NBR n° 6457/2016.

Com os ensaios de caracterização concluídos, utilizou-se a classificação HBR/TBR para classificar o solo. Após, deu-se início aos ensaios de CBR do solo natural, das misturas com cal hidratada e das misturas com cimento (CP V-ARI) nas porcentagens de 3, 5 e 7%. A fim de verificar a influência do tempo de cura, foram realizados ensaios com 7 e 28 dias de cura.

Sabendo que o objetivo da utilização da Cal Hidratada e do CP V-ARI, foi o de estudar uma possível melhora das características mecânicas de solos para utilização em camadas de pavimentos. Após todos os ensaios descritos acima, foi analisado o resultado seguindo as normativas do DNIT, conforme o manual de pavimentação (2006) que prescreve as seguintes considerações:

- Materiais para subleito: Expansão menor ou igual a 2% e CBR maior que 2%.
- Materiais para reforço: Expansão menor ou igual a 1% e CBR maior que o do subleito.

- Materiais para sub-base: Expansão menor ou igual a 1%, CBR maior que 20% e Índice de grupo (IG) igual a zero.
- Materiais para base: Expansão menor ou igual a 0,5%, CBR maior que 80%, Limite de liquidez menor que 25% e índice de plasticidade menor que 6%.

### 3. Resultados e Discussões

Com os resultados obtidos a partir do ensaio de compactação, pôde-se determinar que a umidade ótima do material foi de 28%, como demonstrado no gráfico da Figura 01, sendo um valor comum em solos argilosos. Essa umidade foi corrigida posteriormente para utilização nos demais ensaios, tendo em vista que o material ficou exposto e adquiriu umidade do ar nesse período. A Curva Granulométrica (Figura 02) também demonstrou valores dentro dos parâmetros esperados, quando comparado com diversas pesquisas em que foi realizado o ensaio de granulometria deste mesmo solo.

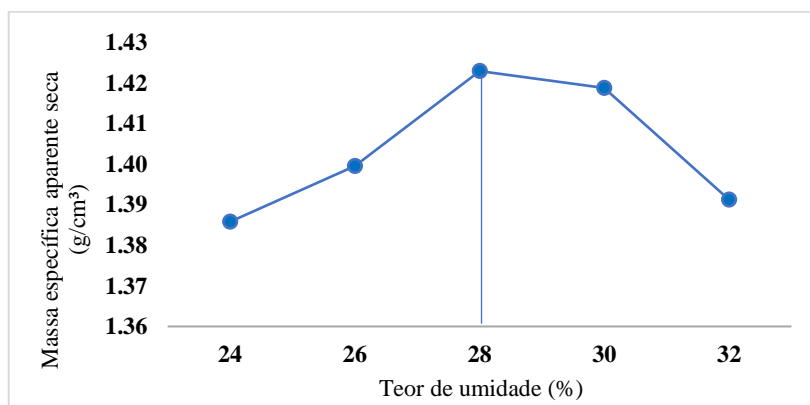


Figura 01: Curva de compactação Proctor Normal

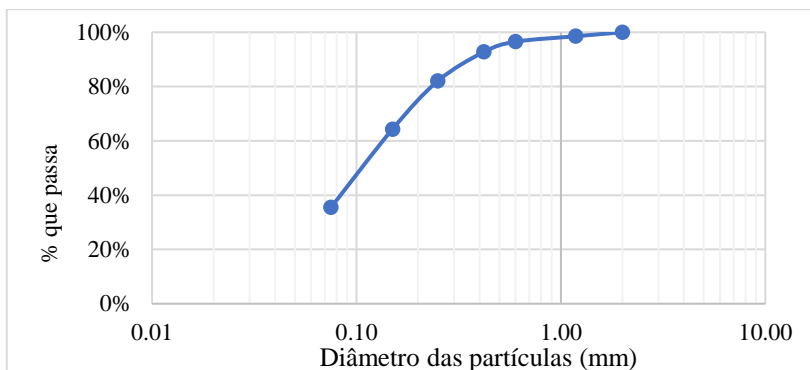


Figura 02: Curva Granulométrica

Os resultados dos ensaios de caracterização (Tabela 01), confirmaram os resultados esperados, demonstrando que o solo se caracteriza como solo argiloso, podendo ser classificado como solo tipo A-7, segundo a classificação HRB.

Tabela 01. Classificação do solo

Ensaio	Resultados
Limite de Liquidez	65,07 %
Limite de Plasticidade	46,36 %
Índice de Plasticidade	18,71 %
Índice de Grupo	16,17 %
HRB	SOLO A-7

O resultado do ensaio CBR para o solo natural (Tabela 02), mostrou um valor de CBR, dentro da normativa DNIT, impróprio para o uso em qualquer uma das camadas de pavimentação e como subleito, devido ao valor de expansão.

Tabela 02: CBR e expansão do solo natural

<b>Solo natural</b>			
Expansão (%)	Ruptura		CBR (%)
	Penetração (c.mm)	Carga (kg)	
2,70	254	33	2,43
	508	51	2,50
<b>CBR final = 2,50 %</b>			

Na mistura do solo natural com adição de cal hidratada, obteve-se um declínio do CBR em relação ao solo natural, nas baixas porcentagens de cal, obtendo-se um aumento apenas na porcentagem de 7%, em ambos os tempos de cura, como demonstrado no gráfico da Figura 03.

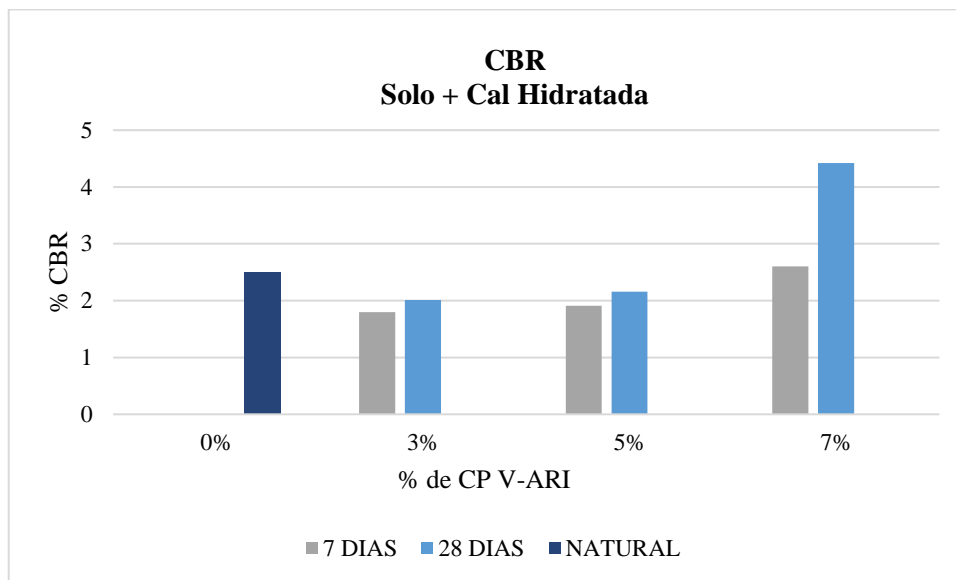


Figura 03: Gráfico CBR Solo + Cal Hidratada

Contudo, analisando a expansão dessa mistura (Figura 04), pôde-se perceber que o solo apresentou uma menor expansão em todas as porcentagens e em ambos os tempos de cura.

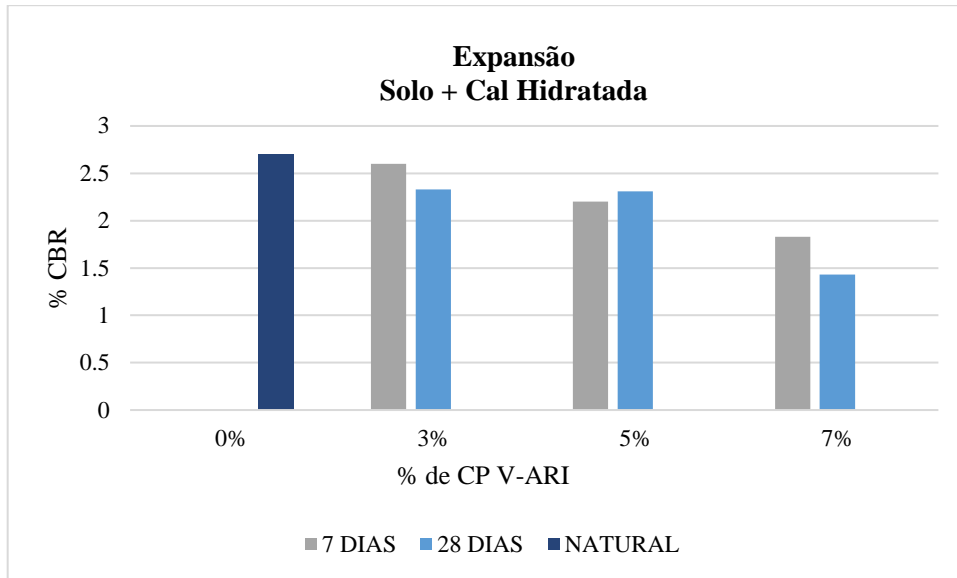


Figura 04: Gráfico expansão Solo + Cal Hidratada

A mistura do solo natural com adição de CP V-ARI, apresentou um aumento considerável em seu valor de CBR (Figura 05), em todas as porcentagens e em ambos os tempos de cura, juntamente com uma diminuição da sua expansão (Figura 06).

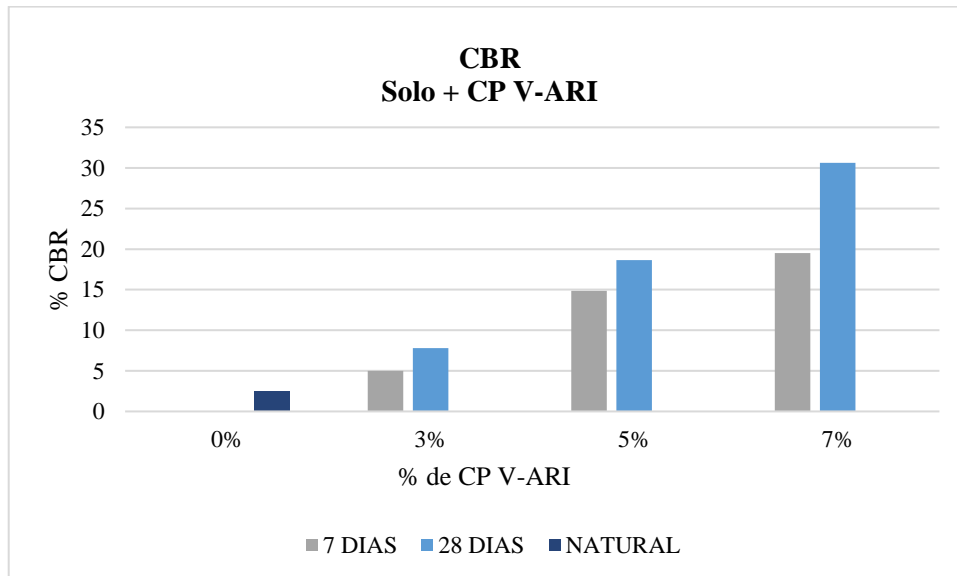


Figura 05: Gráfico CBR Solo + CP V-ARI

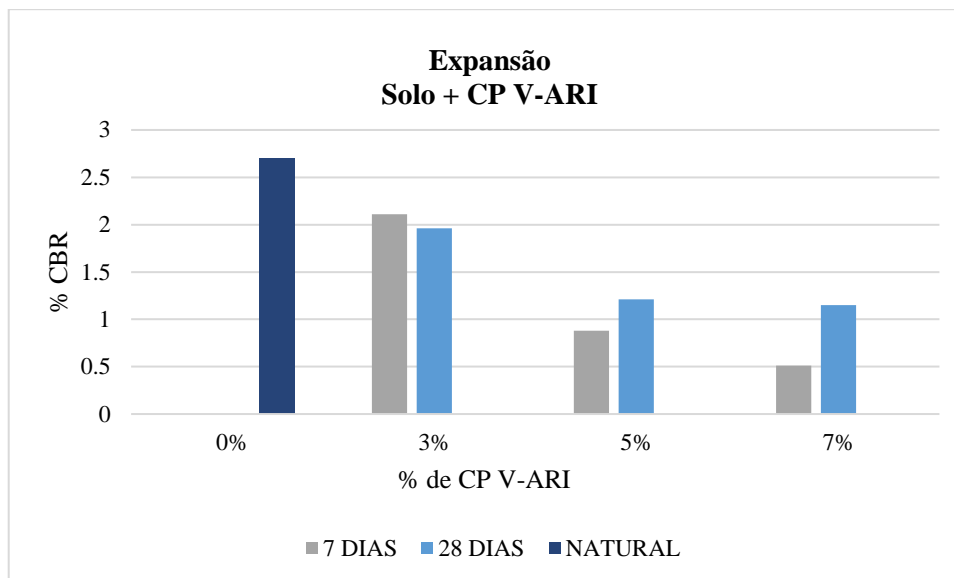


Figura 06: Gráfico Expansão Solo + CP V-ARI

Avaliando todos os gráficos apresentados acima, pôde-se montar a seguinte tabela para uma melhor análise comparativa dos resultados (Tabela 03):

Tabela 03: Resultados das misturas entre cal hidratada e CP V-ARI

<b>SOLO NATURAL</b>						
<b>CBR (%)</b>			<b>Expansão (%)</b>			
2,50%			2,70%			
<b>SOLO NATURAL + CAL HIDRATADA</b>						
% adicionada	<b>CBR (%)</b>			<b>Expansão (%)</b>		
	3%	5%	7%	3%	5%	7%
7 dias	1,82	1,91	2,60	2,60	2,20	1,83
28 dias	2,01	2,16	4,42	2,33	2,31	1,43
<b>SOLO NATURAL + CP V-ARI</b>						
% adicionada	<b>CBR (%)</b>			<b>Expansão (%)</b>		
	3%	5%	7%	3%	5%	7%
7 dias	5,01	14,87	19,51	2,11	0,88	0,51
28 dias	7,81	18,65	30,63	1,96	1,21	1,15

Assim, o solo natural com adição da cal hidratada não atendeu as expectativas. Diversos estudos demonstram que a cal é um bom estabilizante para utilização em camada de pavimentação mesmo em baixas porcentagens, porém no solo argiloso de formação palermo utilizado nessa pesquisa, percebeu-se que na porcentagem de 3%, o CBR diminuiu 0,68% em relação ao CBR do solo natural no período de 7 dias e 0,49% no período de 28 dias. O mesmo ocorreu na porcentagem 5%, em que o CBR diminuiu 0,59% no período de 7 dias e 0,34% no período de 28 dias. Foi possível perceber uma melhora apenas na porcentagem de 7%, em que o CBR aumentou 0,10% no período de 7 dias e 1,92% no período de 28 dias, sendo a melhora mais relevante no maior tempo de cura.

Quanto a expansão, percebe-se uma diminuição de acordo com as porcentagens, sendo apenas na porcentagem de 7% uma melhora desejável, em que aumentou 0,87% no período de 7 dias e 1,27% no período de 28 dias, ficando abaixo de 2%.

A diminuição do CBR com adição da cal e a baixa diminuição da expansão do solo, pode ter sido causado por algumas condições, como o fato de o material ter sido destorroado na peneira de n°10 ao invés da peneira de n°200, o que pode ter deixado alguns grumos no material que impediram as reações necessárias. Outra explicação pode ter sido a composição mineralógica do solo, em que algum elemento pode ter impedido as reações.

Segundo Gallato (2006), alguns dos componentes encontrados no solo da Formação Palermo, são a sílica, o óxido de alumínio e hematita, onde a sílica representa 49,41%, o óxido de alumínio 26,81% e a hematita 9,69% da composição total da amostra. Ainda, segundo Scarmagnani (2013), resultados obtidos a partir de difratometria de raios-X, identificou a presença de dois argilominerais que podem influenciar nas propriedades mecânicas do solo, a caulinita e a illita. Ou seja, alguns desses componentes podem ter influenciado no resultado do presente trabalho, porém necessitaria de estudos específicos para essa confirmação.

A mistura do solo natural com CP V-ARI, mostrou uma melhora considerável em todas as porcentagens analisadas. Para o tempo de cura de 7 dias, a porcentagem de 3% apresentou um aumento no CBR de 2,51% e uma diminuição na expansão de 0,59%; a porcentagem de 5% apresentou um aumento de 12,37% no CBR e uma diminuição na expansão de 1,83%; a porcentagem de 7% apresentou um aumento de 17,01% no CBR e uma diminuição da expansão de 2,19%. Para o tempo de cura de 28 dias, a porcentagem de 3% apresentou um aumento no CBR de 5,31% e uma diminuição na expansão de 0,74%; a porcentagem de 5% apresentou um aumento de 16,15% no CBR e uma diminuição na expansão de 1,49%; a porcentagem de 7% apresentou um aumento de 28,13% no CBR e uma diminuição da expansão de 0,40%.

Sendo assim, praticamente todas as misturas com CP V-ARI estão dentro da normativa para uso como subleito, com exceção da porcentagem de 3% no tempo de cura de 7 dias em que a expansão ficou maior que 2%.

Percebe-se também, que as misturas com a cal apresentaram, no geral, uma diminuição mais relevante da expansão no maior período (28 dias), enquanto as misturas com CP V-ARI apresentaram, no geral, uma diminuição da expansão no menor período (7 dias). Ambas as misturas tiveram sua expansão estabilizada em torno do terceiro e quarto dia submersas.

Comparando todos os resultados, pode-se observar que a cal teve um melhoramento apenas na porcentagem de 7%, enquanto o cimento se mostrou relevante já nas menores porcentagens.

## Conclusão

A partir dos resultados apresentados no presente trabalho, pode-se concluir que o solo natural não é ideal para utilização em nenhuma camada de pavimentação nem como subleito, pois apresenta uma alta expansão para os parâmetros do DNIT.

O solo com adição de 7% da cal com tempo de cura de 7 dias ou 28 dias, pode ser utilizado como camada de subleito, já que apresenta um CBR maior que 2% e uma expansão menor que 2%, sendo o melhor cenário a mistura de 7% no período de cura de 28 dias, em que apresenta um CBR de 4,42% e uma expansão de 1,43%, tendo uma melhora de 176,80% do valor de CBR do solo natural.

O solo natural com adição de CP V-ARI atendeu as expectativas, apresentando as melhorias mais relevantes nos teores de 5% e 7%.

A mistura de 3% de CP V-ARI no tempo de cura de 7 dias, não seria ideal para utilização em nenhuma camada de pavimento e nem como subleito, pois apesar de apresentar um valor aceitável de CBR, sua expansão ficou maior que 2%.

As misturas de 5 e 7% de CP V-ARI poderiam ser usadas como reforço de subleito no período de cura de 7 dias.

O melhor resultado da mistura com cimento, é na porcentagem de 7% CP V-ARI e adotando um tempo de cura de 28 dias, sendo sua expansão de 1,15% e CBR de 30,63%. Em que, obteve uma melhora de 1225,20% do valor de CBR do solo natural. Podendo ser utilizado em camada de subleito.

O período de cura de 28 dias apresentou valores maiores de CBR em ambas as misturas.

Comparando todos os resultados, pode-se observar que a cal teve um melhoramento apenas na porcentagem de 7%, enquanto o cimento se mostrou relevante já nas menores porcentagens.

Analisando os melhores casos entre as misturas com cal e CP V-ARI, fica claro que as misturas com o cimento apresentam resultados mais satisfatórios para a utilização em camada de pavimento.

#### 4. Referências

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2018). NBR 7181: *Solo – Análise granulométrica*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2018). NBR 6459: *Solo – Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 7180: *Solo – Determina o limite de plasticidade*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 7182: *Solo - ensaio de compactação*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 6457: *Amostra de solo – Preparação de ensaio de compactação e caracterização*. Rio de Janeiro.
- Azevedo, Giovanna Monteiro; Chrusciak, Mariana; Matos, Alex Bortolon. (2016). *Análise Da Mistura De Solo Mole Do Campus Paricarana Da Ufr Com Cimento Para Melhoria De Seus Parâmetros*. Universidade Federal de Roraima (UFRR).
- Bernucci, L.B.; Motta, L.M.G.; Ceratti, J.A.P.; Soares, J.B (2022). *Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros*. Rio de Janeiro: Petrobras: ADEBA.
- Confederação Nacional do Transporte (2021) *Situação de rodovias brasileiras afeta desenvolvimento socioeconômico do país*. Disponível em < <https://www.cnt.org.br/agencia-cnt/situacao-rodovias-brasileiras-afeta-desenvolvimento-socioeconomico>>. Acesso em 29 de maio de 2023.
- Dal Ponte, Camila Scarabelot (2018). *Estudo do comportamento geotécnico da predominância do resíduo da construção civil em solo argiloso para aplicação em obras de recuperação ambiental*. (Graduação em Engenharia Civil). Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma.
- Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte (2006). *Manual de Pavimentação*. 274 p. Ed. 3. Diretoria de Planejamento e Pesquisa, Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa, Instituto de Pesquisa Rodoviária (IPR), Rio de Janeiro.
- Galatto, Sérgio Luciano (2006). *Avaliação da eficiência de coberturas secas sobre rejeito de carvão visando à prevenção da drenagem ácida de mina*. 129f. Dissertação (mestrado). Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC, Criciúma.
- Krebs, A.S.J (2004). *Contribuição ao conhecimento dos recursos hídricos subterrâneos da bacia hidrográfica do Rio Araranguá*. Florianópolis, UFSC, Departamento de geografia, 375 p.
- Lambe, W, Whitman, R.V. (1969). *Soil Mechanics*. New York: John Wiley & Sons, 582 p.
- Nery, Kaio; Ribeiro, Daniel; Sales, Andrei (2017). *Efeitos da Adição de Cimento e de Cal em um Solo da Região de Curitiba para Fins de Pavimentação*. 91 pp. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba.
- Scarmagnani, Jackson Alexandre (2013). *Análise das propriedades mecânicas de um solo da Formação Palermo estabilizado mecanicamente*. 15f. Artigo (TCC). Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC, Criciúma.
- Tiscoski, Douglas (2009). *Análise da resistência à compressão simples da mistura solo cimento e perma-zyme para fins rodoviários*. (Graduação em Engenharia Civil). Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma.
- Vargas, Milton (1977). *Introdução à Mecânica dos Solos*. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 509 p.