

# ANÁLISE DA DOSAGEM DE SOLO-CIMENTO PARA PAVIMENTAÇÃO EM ÁREA RURAL NÃO PAVIMENTADA NO MUNICÍPIO DE CIANORTE-PR

Analysis of Soil-Cement Mixture for Pavement in Unpaved Rural Area in the Municipality of Cianorte-PR

ANA PAULA DE LIMA PEREIRA<sup>1</sup> – anadelima019@gmail.com  
ANDRÉ KAZUHIRO SHIOTANI<sup>2</sup> – andre.shiotani@umfg.edu.br

1. Acadêmico do curso de graduação do curso de Engenharia Civil da Faculdade UMFG.  
2. Professor Orientador. Faculdade UMFG - Rod PR-082 KM 468 - Lote 45/46 - Gleba, R. Ribeira, Cianorte - PR, 87200-000.

Recebido em 05/12/2024. Publicado em 09/12/2024

## RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo experimental acerca da viabilidade técnica da dosagem solo-cimento utilizando uma amostra de solo retirada de um ponto rural não pavimentado do município de Cianorte-PR. A análise foi realizada por meio de ensaios laboratoriais de caracterização do solo e de dosagem de solo-cimento, de acordo com as normas técnicas aplicáveis. O solo coletado foi classificado quanto à sua plasticidade e composição granulométrica, identificando-se uma predominância de areia e silte. O teor de materiais finos (argila e silte) foi de 1%, o que está dentro dos limites exigidos pela norma para solo-cimento. A partir dos resultados obtidos, foram preparadas amostras de solo-cimento com diferentes dosagens de cimento (variando entre 5%, 7% e 9% em peso do solo), e seus comportamentos foram avaliados por meio de ensaios de compressão simples. Os resultados obtidos indicaram que a adição de cimento ao solo A-3, classificado pela classificação HRB e caracterizado por ensaios de granulometria, é eficaz para atingir a resistência mecânica mínima de 2,1 MPa estipulada pelo DER/PR ES-P 11/18, quando o teor de cimento é de aproximadamente 7% para o solo em questão. O teor de umidade utilizado nos ensaios foi de 10,40%. Além disso, a análise demonstrou que o solo-cimento com essa dosagem apresenta boa resistência a ciclos de umidade e secagem, uma característica essencial para a durabilidade das camadas de pavimento em regiões com clima variável.

**Palavras-Chave:** Teor de cimento, classificação HRB, pavimento, solo

## ABSTRACT

This paper presents an experimental study on the technical feasibility of dosing soil-cement using a soil sample taken from an unpaved rural area in the municipality of Cianorte-PR. The analysis was carried out using laboratory tests for soil characterization and soil-cement dosage, in accordance with the applicable technical standards. The soil collected was classified in terms of its plasticity and granulometric composition, identifying a predominance of sand and silt. The content of fine materials (clay and silt) was 1%, which is within the limits required by the soil-cement standard. Based on the results obtained, soil-cement samples were prepared with different dosages of cement (varying between 5%, 7% and 9% by weight of the soil), and their behavior was evaluated using simple compression tests. The results obtained indicated that the addition of cement to A-3 soil, classified according to the HRB classification and characterized by granulometry tests, is effective in achieving the minimum mechanical strength of 2.1 MPa stipulated by the DER/PR ES-P 11/18, when the cement

content is approximately 7% for the soil in question. The moisture content used in the tests was 10.40%. In addition, the analysis showed that the soil-cement with this dosage has good resistance to wetting and drying cycles, an essential characteristic for the durability of sidewalk layers in regions with a variable climate.

**Keywords:** Cement content, HRB classification, sidewalk, soil

## 1 INTRODUÇÃO

O sistema rodoviário no Brasil é de extrema importância, sendo o principal meio de transporte do país, responsável por mais de 65% das movimentações logísticas (CNT, 2023). A crescente demanda por transporte eficiente exige que os pavimentos atendam a requisitos rigorosos de qualidade, segurança e conforto para os usuários.

Os pavimentos consistem em um conjunto de camadas sobre o solo preparado, projetado para resistir aos impactos e esforços do tráfego de veículos, bem como às variações climáticas, ao mesmo tempo em que proporciona uma superfície de rolamento segura e de boa qualidade para os usuários (Bernucci *et al.*, 2008).

Ao longo dos anos, as técnicas de pavimentação evoluíram, com avanços significativos desde os métodos mais simples até os sistemas mais sofisticados e sustentáveis, visando melhor aproveitamento das características dos diferentes tipos de solo (Bernucci *et al.*, 2022). Uma das técnicas que se destaca nesse contexto é o solo-cimento, que tem se mostrado eficaz no aprimoramento das propriedades físicas e mecânicas do solo.

De acordo com a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2004), o solo-cimento é o resultado de uma mistura de solo, cimento e água, que é submetida a um processo de compactação. Os materiais são dosados em proporções específicas, conforme as normas técnicas adequadas ao tipo de solo utilizado, para garantir a distribuição homogênea da mistura. Após a cura, essa combinação resulta em um material com boa resistência à compressão, baixo índice de retração volumétrica, boa impermeabilidade e alta durabilidade.

Monte (2012) destaca a importância do solo-cimento como uma alternativa sustentável, pois reduz a necessidade de exploração de pedreiras e áreas de empréstimo, minimizando o impacto ambiental. No entanto, o custo do cimento, que pode ser um dos fatores determinantes no comportamento mecânico do solo-cimento, deve ser considerado, pois o teor elevado de cimento pode tornar o processo economicamente desfavorável, dependendo do tipo de solo utilizado.

Além da dosagem do solo-cimento, outra técnica importante é a estabilização do solo com cimento. Essa técnica visa melhorar a resistência e a trabalhabilidade do solo, tornando-o adequado para várias aplicações, especialmente em pavimentação, como reforço de bases e sub-bases (Monte,

2012).

Segundo Bernucci *et al.* (2008), o uso de cimento como estabilizante altera propriedades do solo, como durabilidade e resistência, atendendo às exigências granulométricas necessárias para a construção de rodovias, oferecendo vantagens sobre as bases granulares tradicionais, como a brita graduada simples (BGS).

Devido à sua capacidade de estabilização, o solo-cimento tem diversas aplicações na construção civil, como na fabricação de blocos prensados, tijolos, preparação de bases e sub-bases para pavimentos asfálticos, construção de paredes monolíticas e elementos de fundação (ABCP, 2004). Para garantir a eficácia de sua aplicação, a ABCP (2004) desenvolveu normas técnicas que padronizam o uso do solo-cimento e asseguram a qualidade dos resultados.

Este estudo tem como objetivo analisar o comportamento e a resistência do solo-cimento a partir de amostras de solo extraídas, com foco em ensaios de caracterização granulométrica, limites de consistência, dosagem do solo-cimento e compressão simples. A análise buscará fornecer dados sobre o uso do solo-cimento em áreas rurais com tráfego pesado, com o intuito de auxiliar no planejamento e manutenção de estradas nesses locais.

O objetivo principal deste trabalho é classificar o solo utilizando a classificação HRB, determinar o teor de cimento e umidade ótima para os corpos de prova, e avaliar a resistência à compressão simples da mistura solo-cimento, a partir da dosagem adequada, em amostras de solo coletadas em uma área rural não pavimentada no município de Cianorte-PR, visando à aplicação na pavimentação da região.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 Importância do estudo do solo para pavimentação**

Segundo Caputo (1998), pode-se compreender compactação de um determinado solo, como o procedimento manual ou mecânico que tem como objetivo a redução do volume de seus vazios e, conseqüentemente, o aumento de sua resistência, trazendo mais estabilidade ao solo, e posteriormente será feito o processo de pavimentação das vias.

De acordo com Santos *et al.* (2018), entender as propriedades dos solos é fundamental para o planejamento e a construção de estradas. Por isso, é crucial estudar e avaliar as características do solo. Para facilitar esse processo, foram desenvolvidas classificações geotécnicas que agrupam os solos com características semelhantes em relação ao seu comportamento geotécnico. Essas classificações fornecem a base para a seleção dos materiais e para a elaboração de projetos de infraestrutura rodoviária mais eficientes e seguros.

O sistema de classificação de solos utilizado para pavimentação, denominado HRB (Highway Research Board), é amplamente empregado em projetos de engenharia rodoviária. Ele categoriza os solos em diferentes grupos e subgrupos com base em suas características granulométricas e limites de consistência.

## **2.2 Estudo do solo**

O estudo dos solos para aplicações em construção de estradas visa compreender de maneira detalhada suas propriedades físicas e químicas, as quais são fundamentais para a definição de seu comportamento sob diferentes condições de carga e ambiente. Segundo o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes DNIT (2006), duas características particularmente importantes para a avaliação de solos para este fim são a granulometria e os limites de consistência. A granulometria, que descreve a distribuição do tamanho das partículas do solo, e os limites de consistência, que indicam as condições de umidade nas quais o solo passa de estados distintos (líquido, plástico e sólido), são parâmetros essenciais para determinar a adequação do solo à construção de pavimentos rodoviários.

De acordo com Silva (2013), a classificação do solo quanto ao tamanho das partículas divide os materiais em duas categorias principais: solos grossos e solos finos. Os solos grossos são aqueles cujas partículas possuem diâmetro superior a 0,074 mm, enquanto os solos finos são compostos predominantemente por partículas com diâmetro igual ou inferior a essa medida.

Segundo Ribeiro (2008), a identificação de solos finos requer, além da análise granulométrica, a determinação de limites específicos, pois esses solos podem exibir diferentes estados de consistência conforme a quantidade de água presente. A consistência do solo pode variar entre os estados sólido, semissólido, plástico ou fluido denso, dependendo do teor de umidade.

Conforme descrito por Caputo (1988), quando a umidade de um solo é elevada, ele adquire a consistência de um fluido denso, caracterizando-se no estado líquido. À medida que a água vai evaporando, o solo começa a endurecer e, ao atingir o limite de liquidez (LL), perde a capacidade de fluir, mas ainda mantém a habilidade de ser moldado e preservar sua forma, estando, assim, no estado plástico. Com a continuação da perda de água, o solo gradualmente perde essa plasticidade, até que, ao atingir o limite de plasticidade (LP).

## **2.3 Classificação de solos para pavimentação – Classificação HRB**

Segundo o DNIT (2006), o sistema leva em consideração a distribuição granulométrica do

solo, seus limites de liquidez e plasticidade, além do índice de grupo, que está diretamente relacionado ao método de dimensionamento do pavimento. Esses parâmetros são essenciais para avaliar as propriedades do solo e determinar o tipo de pavimento mais adequado para cada área, garantindo tanto a durabilidade quanto a segurança da infraestrutura viária.

O Sistema de Classificação HRB, conforme ilustrado no Quadro 1, fornece aos engenheiros informações essenciais sobre as propriedades do solo, auxiliando na tomada de decisões durante o planejamento e o projeto de estradas, a fim de uma base sólida e durável para a infraestrutura viária.

Quadro 1 – Classificação HRB

CLASSIFICAÇÃO GERAL	MATERIAIS GRANULARES 35% (OU MENOS) PASSANDO NA PENEIRA Nº 200							MATERIAIS SILTO-ARGILOSOS			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 A-7-6
CLASSIFICAÇÃO EM GRUPOS	A-1-A	A-1-B		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
Granulometria - % passando na peneira											
Nº 10	50 máx.										
Nº 40	30 máx.	30 máx.	51 min.								
Nº 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 min.	36 min.	36 min.	36 min.
Características da fração passando na peneira Nº 40											
Limite de Liquidez				40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.
Índice de Plasticidade de	6 máx.	6 máx.	NP	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.*
Índice de Grupo	0	0	0	0	0	4 máx.	4 máx.	8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Materiais Constituintes	Fragmentos de pedras, pedregulho fino e areia			Pedregulho ou areias siltosas ou argilosas				Solos Siltosos		Solos Argilosos	
Comportamento como subleito	Excelente e bom							Sofrível a mau			

\* O IP do grupo A-7-5 é igual ou menor do que LL menos 30.

Fonte: DNIT (2006)

## 2.4 Solo-cimento na pavimentação

A NBR 12253 (ABNT, 2012) define o solo-cimento como uma mistura de solo, cimento e água em proporções específicas, conforme as normas técnicas. Quando compactada e submetida a

um processo de cura adequado, essa mistura desenvolve as propriedades necessárias para formar uma camada de pavimento resistente.

Segundo Bernucci (2008), os pavimentos rodoviários são classificados em rígidos, flexíveis e semirrígidos. Pavimentos rígidos utilizam placas de cimento Portland e sua espessura depende da resistência das placas e das camadas subjacentes. Pavimentos flexíveis são compostos por agregados e ligantes asfálticos, com camadas de subleito, sub-base, base e revestimento asfáltico. Já os pavimentos semirrígidos combinam uma base cimentada, como o solo-cimento, com um revestimento betuminoso, oferecendo características tanto de materiais cimentados quanto betuminosos.

De acordo com Monte (2012), o solo-cimento pode ser utilizado tanto em camadas do leito quanto em camadas de base e sub-base do pavimento.

Monte (2012) diz que em obras rodoviárias, o aumento da resistência do pavimento, ao combinar solo e cimento, permite suportar mais eixos e reduz a espessura das camadas, diminuindo a espessura total da estrutura. Isso diminui o volume de escavação e a movimentação de solo, reduzindo também a necessidade de exploração de pedreiras e áreas de empréstimo. Esses fatores geram benefícios econômicos e ambientais, incluindo a diminuição da espessura das camadas betuminosas.

Para pavimentos, a resistência à compressão simples da mistura solo-cimento, aos sete dias de cura, deve atender ao limite estabelecido pelo DER/PR ES-P 11/18. Especificamente, para sub-base ou base, a resistência mínima exigida é superior a 2,1 MPa. Isso significa que, após sete dias de cura, a mistura solo-cimento deve apresentar uma resistência à compressão simples superior a 2,1 MPa para garantir a qualidade e durabilidade da estrutura do pavimento.

Segundo Rios (2011), a qualidade do material solo-cimento depende de uma mistura e compactação adequadas, influenciadas pelo tipo de equipamento, processos de trabalho adotados, e pelo tempo de execução, que variam conforme o tipo de solo, teor de cimento e teor de água. O solo-cimento requer um período de cura antes de ser utilizado, de 7 dias.

## 2.5 Cimento

Segundo Gusmão *et al.* (2018), o cimento é o principal componente da mistura de solo-cimento, pois, devido às suas propriedades, ele estabiliza o solo, proporcionando um bom índice de impermeabilidade, elevada durabilidade e baixo índice de retração volumétrica, desde que sua dosagem seja corretamente definida.

De acordo com a ABCP (2002), o cimento é um pó fino com propriedades aglomerantes, que se endurece ao entrar em contato com a água. Sua composição é predominantemente formada pelo

clínquer, obtido a partir da combinação de calcário, argila e outros componentes químicos. O cimento Portland apresenta variações dependendo da adição de materiais como sulfato de cálcio, que prolonga o tempo de pega; escória, que pode aumentar a durabilidade, mas, se utilizada em excesso, compromete a resistência; material pozolânico, que proporciona maior impermeabilidade; e carbonato, que pode reduzir os custos na produção do cimento.

Conforme ilustrado no Quadro 2, no Brasil, existem cinco tipos básicos de cimento e três tipos especiais, cada um com características e propriedades de resistência distintas.

Quadro 2 – Classificação Cimentos Portland

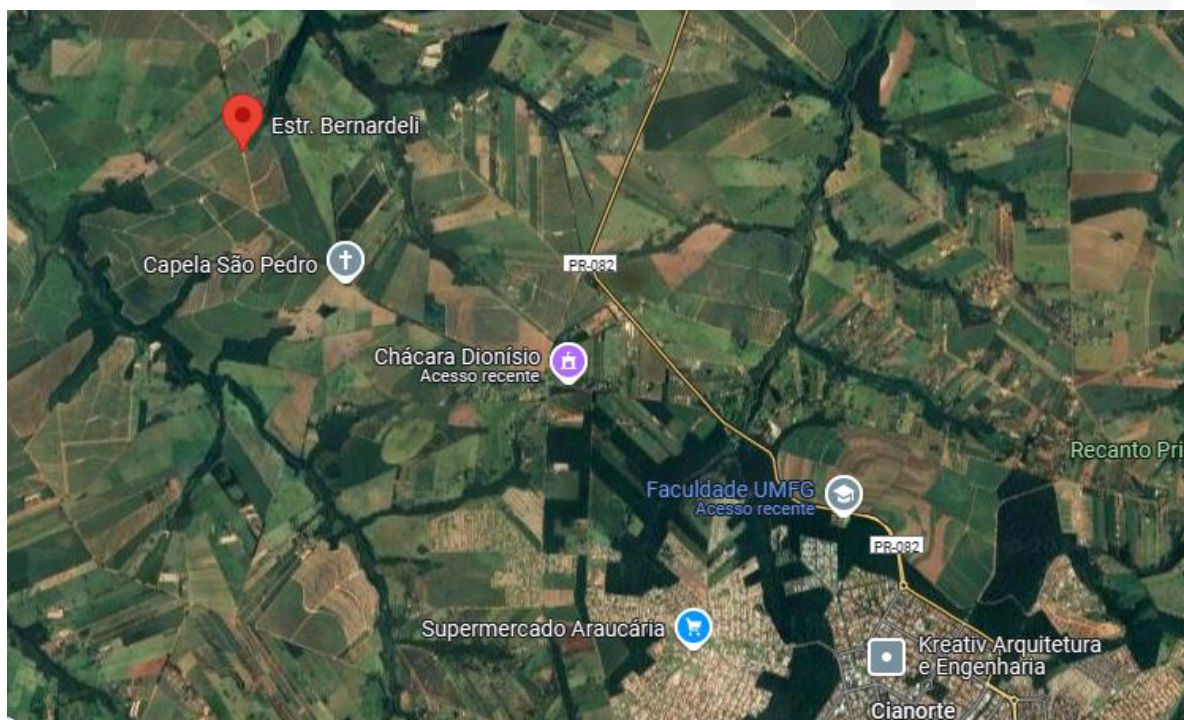
Tipo de Cimento Portland	Sigla	Composição (% em massa)				Norma Brasileira
		Clínquer + sulfato de cálcio	Escória granulada de alto-forno	Material pozolânico	Material carbonático	
Comum	CPI	95-100	0-5			ABNT NBR 16697:2018
	CPI-S	90-94	0	0	6-10	
Composto	CP II-E	51-94	6-34	0	0-15	
	CP II-Z	71-94	0	6-14	0-15	
	CP II-F	75-89	0	0	11-25	
Alto-Forno	CP III	25-65	35-75	0	0-10	
Pozolânico	CP IV	45-85	0	15-50	0-10	
Alta Resistência Inicial	CP V-ARI	90-100	0	0	0-10	

Fonte: Adaptado ABNT NBR 16697:2018

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

Para esse estudo foi utilizado o solo do município de Cianorte – PR, de onde foram coletadas a uma profundidade de 0,85 cm a 1,5 m, amostras da estrada Bernadeli conforme ilustra a Figura 1, próximo a coordenada 23°37'26.0"S 52°38'53.0"W conforme ilustra a Figura 2, uma estrada rural não pavimentada.

Figura 1 – Ponto de coleta de solo, localizado na Estrada Bernadeli



Fonte: Adaptado do Google Earth (2024)

Figura 2 – Coordenada ponto de coleta de solo, localizado na Estrada Bernadeli



Fonte: Adaptado do Google Earth (2024)

O material coletado foi submetido a ensaios de dosagem solo-cimento, utilizando: caracterização simples de granulometria por peneiramento fino, teor de umidade, massa específica aparente e a testes de compressão.

Para o estudo foram coletados 60 kg de amostra de solo para execução dos ensaios e análise

em laboratório. Essas amostras de solo foram retiradas através de escavação por trado manual com diâmetro de 0,15 m, Figura 3. Todo solo retirado foi devidamente ensacado e etiquetados de acordo com a sua localização e encaminhadas ao laboratório da faculdade UMFG onde foram realizados os ensaios.

Figura 3 – Ponto de Coleta de Solo.



Fonte: Autoria própria.

Além do solo coletado, também foi utilizado cimento do tipo CP II - Z32 da marca Votoram, porém, não foi submetido a nenhum tipo de ensaio. Este cimento é propriamente utilizado na construção civil. O teor de cimento ideal foi estipulado a partir de ensaios de laboratório.

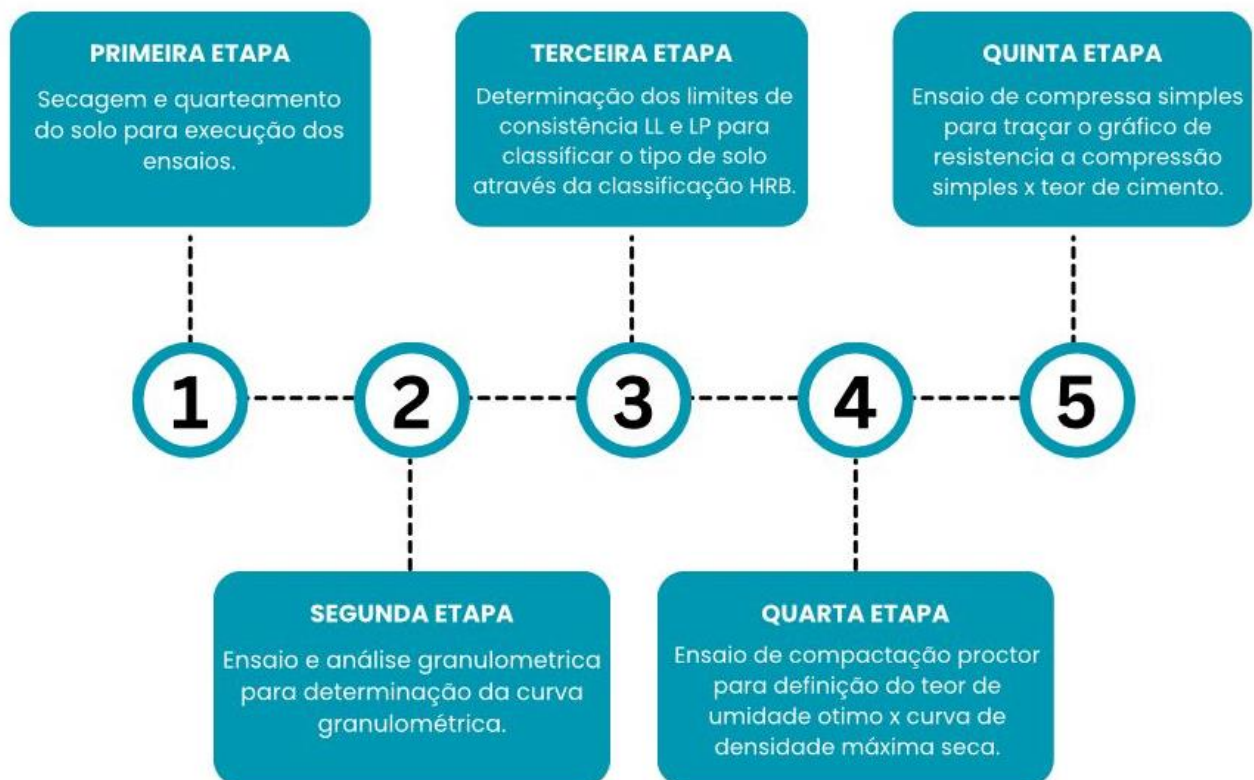
Para realização dos ensaios foram utilizados os equipamentos listados abaixo, todos estão estipulados pelas normas:

- Almofariz de porcelana e mão de gral para destorroamento do solo quando for necessário determinar o limite de consistência;
- Aparelho Casagrande manual e cinzel curvo;
- Balança com precisão de 0,01 g e capacidade máx de 5000 g;
- Bureta com capacidade de 250 ml;
- Capsulas metálicas para separação de amostras;

- Câmara úmida com capacidade de temperatura de  $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$  e umidade relativa do ar não inferior a 95%.
- Espátula flexível com cabo de madeira;
- Estufa capaz de manter temperatura entre  $105^\circ\text{C}$  e  $110^\circ\text{C}$ ;
- Molde Cilindro Proctor com diâmetro de 100 mm;
- Peneiras granulométricas com abertura nominal de 1,2; 0,6; 0,25; 2,00; 0,42; 0,150 e 0,075 mm de acordo com a NBR 7181 (ABNT, 2016);
- Placa de vidro esmerilhada;
- Régua Biselada.

Para realizar a análise da dosagem, segue-se uma sequência de etapas e ensaios conforme ilustra a Figura 5.

Figura 5 – Ordem de execução de ensaio.



Fonte: Autoria própria.

A preparação das amostras de solo foi realizada conforme as orientações da norma NBR 6457 (ABNT, 2016), que sugere a secagem ao ar até a umidade hidróscópica. Primeiro, o solo foi homogeneizado usando uma peneira de 4,8 mm. Em seguida, foi espalhado sobre uma forma e

deixado secar. Após esse processo, a amostra foi dividida em porções adequadas para cada um dos ensaios realizados.

Para a determinação das características granulométricas, a partir da amostra total que foi coletada em campo quarteada e homogeneizada, foi retirada em uma capsula uma amostra de 150 g que foi lavada de forma manual em uma peneira de 0,075mm de abertura a fim de eliminar todo material fino presente, e 2 amostras com a mesma quantidade em gramas para determinação do teor de umidade higroscópica do solo. Ambas foram levadas imediatamente para estufa a uma temperatura de 105°C.

A amostra de 150g que foi lavada, após passar pela estufa e ser determinada o seu peso seco, foi realizado a granulometria do material de forma manual utilizando as peneiras de abertura nominal de 1,2;0,6;0,42;0,25;0,15; e 0,075 mm, representado na Figura 6, utilizando o método proposto de peneiramento fino pela norma NBR 7181 (ABNT, 2016).

Figura 6 – Peneiramento Fino.



Fonte: Autoria própria.

Para realizar o ensaio de limite de liquidez (LL), conforme a NBR 6459 (ABNT, 2016), foi separada uma amostra de 100 g de solo. Essa amostra foi primeiramente destorroada em um almofariz com o auxílio de uma mão de gral e, em seguida, peneirada em uma peneira com malha de 0,425 mm. O solo peneirado foi colocado novamente em um almofariz de porcelana, no qual se adicionou água aos poucos, misturando vigorosamente a fim de que o solo atingisse uma consistência plástica. O material preparado foi então distribuído sobre a concha do aparelho Casagrande, cobrindo dois terços de sua superfície e formando uma camada de aproximadamente 1 cm de espessura no centro da concha. Com isso, foi feita uma ranhura no sentido longitudinal do aparelho utilizando um cinzel

curvo.

O ensaio foi iniciado com a rotação da manivela do aparelho Casagrande a uma velocidade de 2 voltas por segundo. A quantidade de golpes foi contada até que a ranhura se fechasse completamente em uma extensão de 1 cm.

Para a determinação do limite de plasticidade (LP), de acordo com a NBR 7180 (ABNT, 2016), foi utilizada uma amostra de 100 g de solo, devidamente peneirada em uma peneira de 0,425 mm. O solo foi então misturado com água até atingir uma consistência plástica. Retirou-se 10 g dessa mistura, que foi moldada manualmente a fim de formar uma massa elipsoidal e em seguida rolada sobre um vidro esmerilhado até atingir a forma de um cilindro com 100 mm de comprimento e 3 mm de diâmetro.

Para realizar a moldagem do ensaio de Proctor, a fim de determinar teor de umidade ótima e massa específica seca, conforme a NBR 12023 (ABNT, 2012), iniciou-se com a homogeneização do solo, cimento e água. O teor de cimento a ser utilizado nessa etapa foi determinado de acordo com a NBR 12253 (ABNT, 2012), considerando a classificação do solo específica para cada caso.

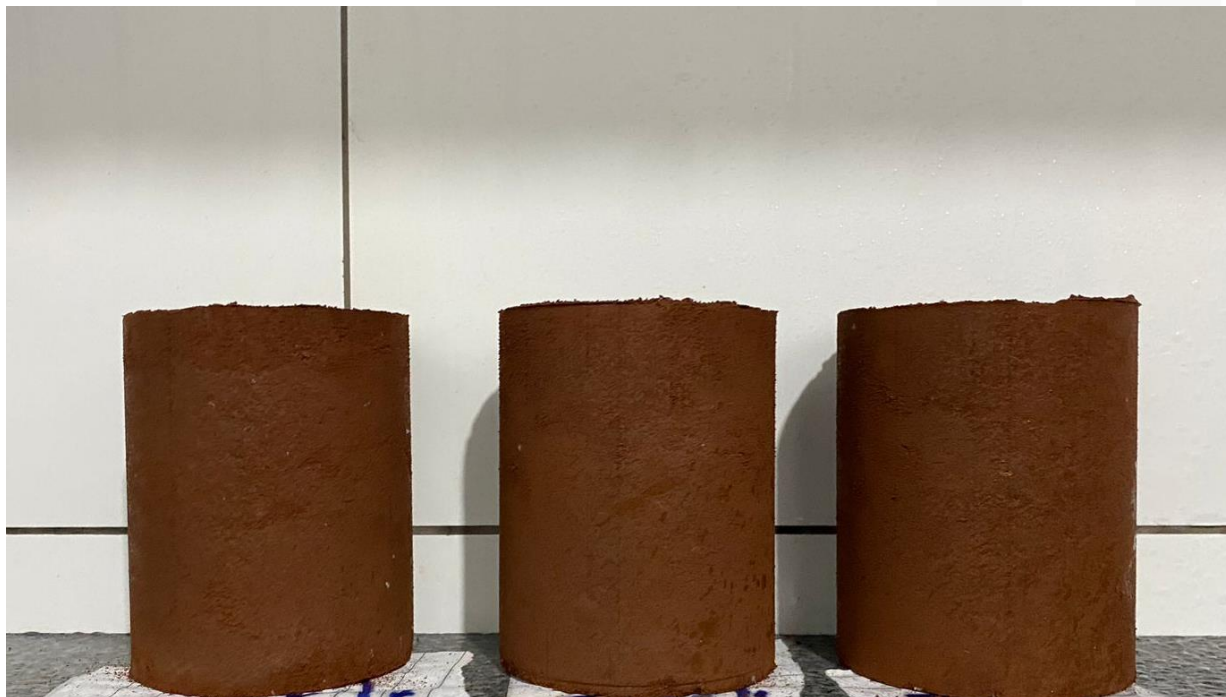
Em seguida, utilizou-se um molde cilíndrico Proctor com 10 cm de diâmetro e 12,73 cm de altura, que possui um volume de 1000 cm<sup>3</sup>. A compactação foi realizada com o auxílio de um soquete de 2,5 kg, aplicando 26 golpes por camada, com a energia normal de compactação de 6 kgf.cm/cm<sup>3</sup>. A amostra foi compactada em três camadas, sendo que, ao final de cada etapa de compactação, ranhuras foram feitas na camada compactada para garantir uma melhor aderência com a camada seguinte, formando assim um corpo de prova uniforme.

Com os resultados obtidos a partir desse processo, foi possível traçar a curva de compactação, a partir da qual se determinaram a umidade ótima ( $\omega_{ót}$ ) e a máxima massa específica aparente seca ( $\gamma_d \text{ máx}$ ) do solo, onde, o teor de umidade obtido foi utilizado para moldar os corpos de prova.

A moldagem dos corpos de prova cilíndricos foi realizada conforme os procedimentos descritos na NBR 12024 (ABNT, 2012). Foram preparados três corpos de prova, utilizando o teor de umidade ótimo previamente determinado, e variando os teores de cimento conforme as especificações: 5% (teor inferior), 7% (teor recomendado) e 9% (teor superior).

Após a moldagem, os corpos de prova ilustrados na Figura 7, foram colocados em uma câmara úmida, com temperatura controlada de  $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$  e umidade relativa do ar não inferior a 95%. De acordo com a NBR 12024 (ABNT, 2012), para fins de dosagem de solo-cimento, o período mínimo de cura exigido para os corpos de prova deve ser de sete dias.

Figura 7 – Corpos de prova solo-cimento.



Fonte: Autoria própria.

Os ensaios de compressão simples foram realizados seguindo as recomendações da norma NBR 12025 (ABNT, 2012). Onde logo após a sua moldagem e cura especificada de 7 dias, cada corpo de prova será imerso em um tanque com água à temperatura ambiente, por 4 horas. Decorrido o período de imersão, cada corpo de prova será retirado do tanque e secado superficialmente com auxílio de um pano. O ensaio de compressão simples se inicia com a disposição de cada corpo de prova sobre o prato da prensa Marshall manual, representado na Figura 8, de tal forma, que seu centro fique alinhado verticalmente ao eixo do pistão ao qual será comprimido.

Figura 8 – Corpos de prova ensaio compressão.



Fonte: A autoria própria.

Antes de iniciar o carregamento de cada corpo de prova, a prensa é zerada. Após o início do carregamento, o ensaio é interrompido no momento da ruptura do corpo de prova, e a resistência à compressão é determinada pela carga máxima suportada.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

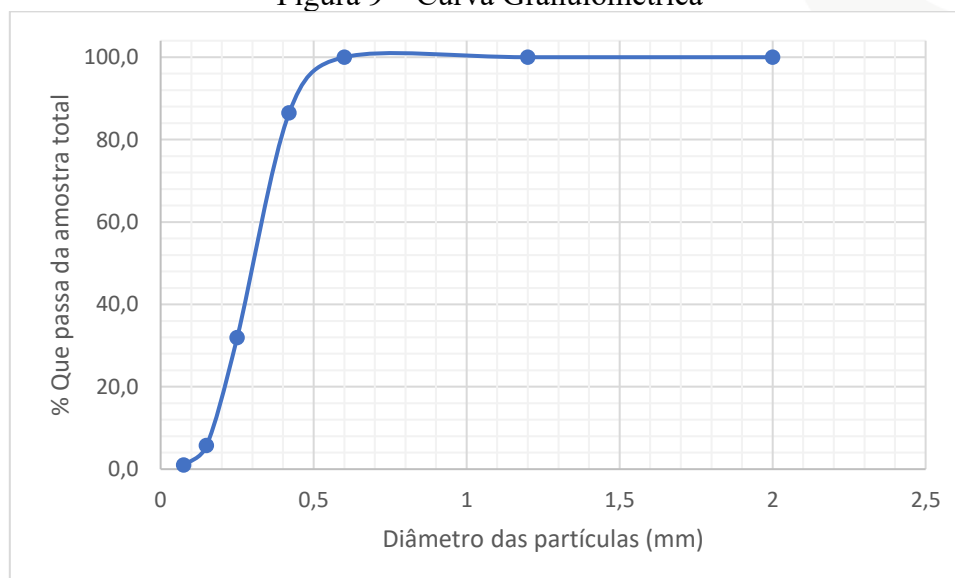
Como pode ser analisado na Tabela 1 e na Figura 9, o ensaio de granulometria determinou a distribuição granulométrica das partículas da amostra. O solo apresentou 1% de materiais finos, como silte e argila, estando dentro dos limites granulométricos estabelecidos pela norma de execução de camadas em solo-cimento do DER, que prevê uma porcentagem máxima de 10% de materiais menores que 0,075 mm.

Tabela 1 – Resultados Granulometria

Peneiras (N°)	Abertura (mm)	Material retido (g)	Percentual retido (%)	Percentual retido acumulado (%)	Percentual passante acumulado (%)
10	2	0,00	0,0	0,0	100,0
16	1,20	0,00	0,0	0,0	100,0
30	0,60	0,00	0,0	0,0	100,0
40	0,42	19,00	13,5	13,5	86,5
60	0,25	76,70	54,6	68,1	31,9
100	0,15	36,80	26,2	94,3	5,7
200	0,075	8,00	4,7	99,0	1,0
Fundo					
Massa da amostra (g)	Total	140,50			

Fonte: Autoria Própria.

Figura 9 – Curva Granulométrica

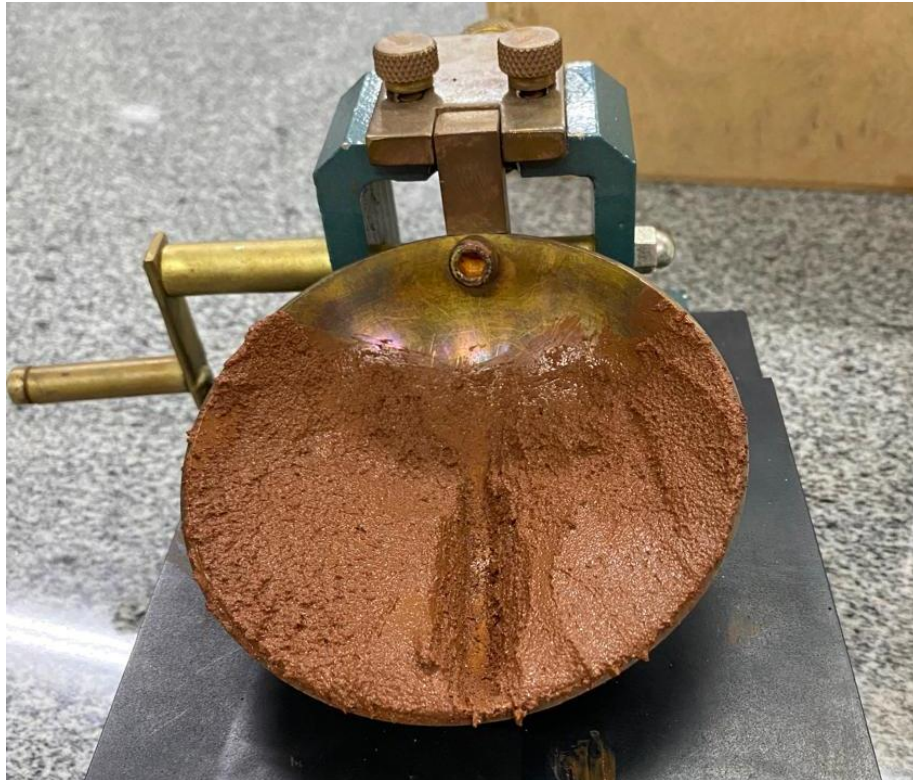


Fonte: Autoria Própria.

O ensaio de limite de liquidez foi realizado conforme os procedimentos estabelecidos pela norma técnica, com o objetivo de determinar a consistência do solo e sua capacidade de transição entre os estados líquido e plástico. Durante o procedimento, foi observado que a amostra não atingiu a consistência plástica, conforme ilustrado na Figura 10. Essa condição é caracterizada pela incapacidade de a ranhura formada na superfície do solo ser fechada após a aplicação de golpes sucessivos de um pistão. No caso em questão, a ranhura foi fechada antes da aplicação de mais de 35 golpes mínimos estipulados pela norma, o que caracteriza a amostra como sem limite de liquidez (NL), conforme especificado pela norma. Esta classificação indica que o solo apresenta um

comportamento típico de solos extremamente finos ou com alta proporção de partículas cujas características dificultam e fazem com que o solo não se comporte de forma plástica.

Figura 10 – Amostra no aparelho Casagrande.



Fonte: Autoria própria.

No ensaio para determinação do limite de plasticidade, a amostra apresentou comportamento anômalo ao esfarelar quando submetida à manipulação para a formação do cilindro. O solo não foi capaz de manter a coesão necessária para formar o cilindro de 3 mm de diâmetro, o que impediu a continuidade do teste. De acordo com a norma vigente para este tipo de análise, quando o solo não apresenta a consistência plástica necessária para a formação do cilindro e exibe comportamento de esfarelamento, o solo é classificado como não plástico (NP). Este resultado sugere que a amostra não possui uma fração de partículas suficientemente plásticas para manter a coesão e formar a estrutura requerida para a determinação do limite de plasticidade.

Com os resultados dos ensaios de granulometria por peneiramento fino e dos limites de consistência, foi utilizado a classificação HRB para classificar o solo. O qual se enquadrou no tipo A-3, sendo uma areia, areia siltosa ou argilosa. Tendo em consideração a quantidade de amostra passante na peneira de abertura de 0,075 mm obteve-se um material granular.

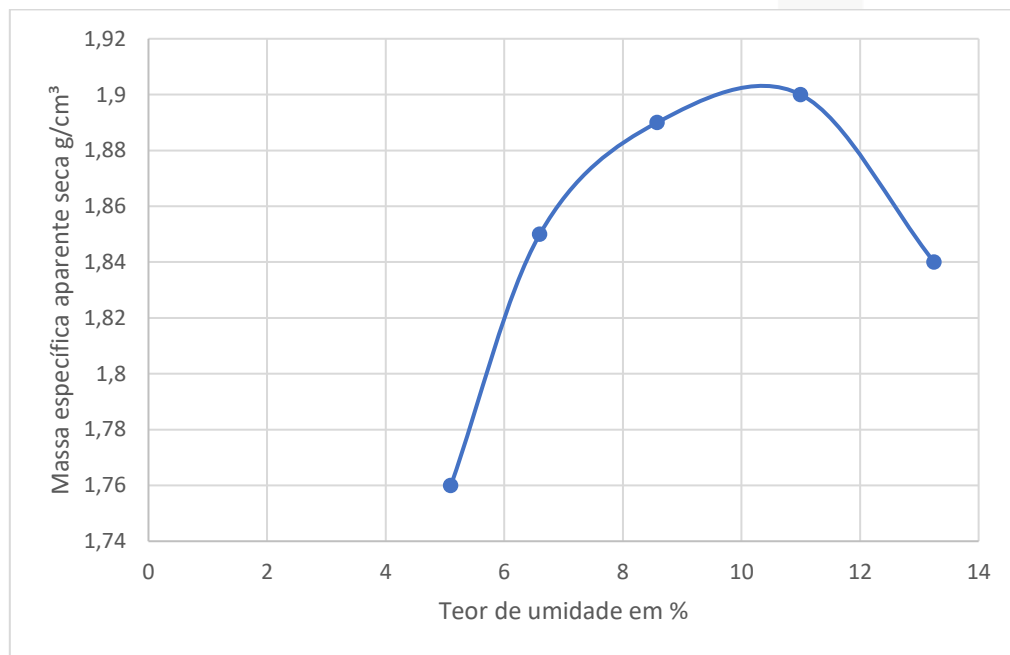
Através do ensaio de compactação de Proctor foram obtidos os resultados presentes na Figura 11 e Tabela 2 que permitiram traçar a curva que relaciona a densidade máxima seca x teor de umidade ótima, para o qual obteve-se uma densidade máxima seca de 1,9 g/cm<sup>3</sup> e teor de umidade ótima de

10,40%.

teor umidade (%)	massa especifica aparente seca (g/cm <sup>3</sup> )
5,1	1,76
6,6	1,85
8,58	1,89
11	1,9
13,25	1,84

Fonte: Autoria própria.

Figura 11 – Curva de compactação



Fonte: Autoria própria.

Com o teor de umidade ótima, foram moldados 9 CP (corpo de prova) para determinação da dosagem de cimento mínima necessária para que o solo atinja resistência mínima de 2,1 MPa, 3 com o teor de 5%, 3 com o teor de 7% e 3 com o teor de 9% de cimento, após moldados, os CP's foram levados para câmara úmida onde permaneceram por 7 dias realizando a cura a uma temperatura de 25°C e umidade do ar não inferior a 95%.

Após um período de cura de 7 dias, os corpos de prova foram imersos em água por 4 horas. Em seguida, foram submetidos ao ensaio de compressão simples utilizando uma prensa hidráulica. Os resultados obtidos, conforme apresentados na Tabela 3 e na Figura 12, indicam que, para atender à Resistência à Compressão Simples (RCS) mínima exigida pelo Departamento de Estradas de Rodagem (DER), o teor mínimo de cimento recomendado é de 7%, o qual proporcionou uma resistência média de 2,11 MPa.

Os valores podem variar, pois a norma exige que a prensa seja calibrada com uma precisão de 1 mm/m. No entanto, a prensa utilizada neste estudo não possui essa função de ajuste.

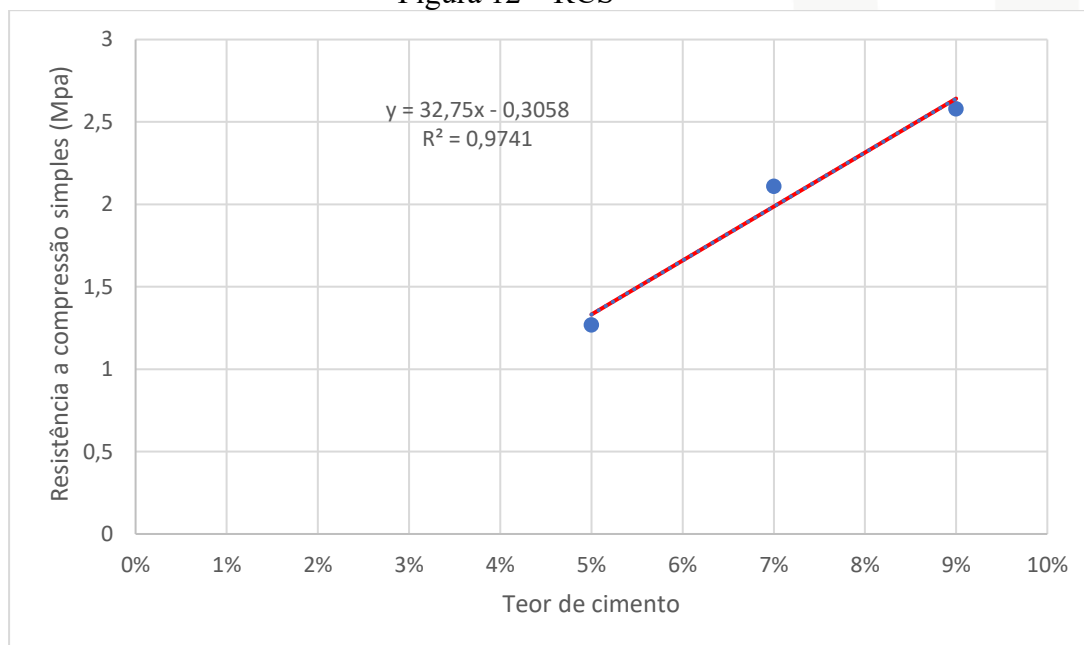
Segundo Cancian *et al.* (2015) a resistência a compressão pode variar também de acordo com o teor de cimento utilizado.

Tabela 3 – Resistência a compressão simples

Teor de Cimento	Resistência Média em MPa	Situação
5%	1,27	Não atende
7%	2,11	Atende
9%	2,58	Atende

Fonte: Autoria Própria.

Figura 12 – RCS



Fonte: Autoria Própria.

O gráfico gerado a partir dos dados experimentais permitiu a construção de uma regressão linear, resultando na Equação 1.

$$y = 32,75x - 0,3058 \quad (1)$$

Onde  $y$  representa a resistência à compressão (em MPa) e  $x$  o teor de cimento (em %). Ao substituir os valores de  $x$  e  $y$  na equação, obteve-se um teor de cimento de 7,35%. Esse valor foi determinado a partir da análise dos resultados obtidos no ensaio de compressão simples, nos quais foram considerados teores genéricos de 5%, 7% e 9%, sem levar em consideração possíveis falhas na

execução do ensaio. Com base nesta equação, conclui-se que, para atingir o valor mínimo de resistência 2,11 em MPa encontrado, o teor de cimento necessário é de aproximadamente 7,35%.

## **5 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Conclui-se que a dosagem de 7% de cimento é a mais adequada para o solo coletado na área rural estudada, uma vez que apresenta resistência mínima à compressão exigida. Embora o teor de 9% também tenha alcançado resultados satisfatórios, o teor de 7% se mostra mais vantajoso em termos de viabilidade econômica. Os resultados reforçam a viabilidade do uso de solo-cimento como solução sustentável para a pavimentação de áreas rurais não pavimentadas, contribuindo para a melhoria das condições de trafegabilidade e acessibilidade na zona rural.

Os ensaios laboratoriais revelaram que o solo apresenta características adequadas para estabilização, com uma porcentagem de 1% de materiais finos, o que se encontra dentro da classificação dos solos e dos limites exigidos pelas normas para esse tipo de aplicação.

Entre as dosagens testadas, a de 7% de cimento apresentou o melhor desempenho, proporcionando um equilíbrio adequado entre resistência mecânica e durabilidade, sem comprometer a trabalhabilidade do solo-cimento. Essa dosagem resultou em uma significativa resistência à compressão, essencial para garantir a estabilidade e da camada de pavimento. Além disso, o solo estabilizado com essa dosagem mostrou boa resistência a variações de umidade, o que é fundamental para regiões de clima variável.

## REFERÊNCIAS

- ABCP - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Dosagem das Misturas de Solo-Cimento: Normas de dosagem e métodos de ensaios.** São Paulo, 2004. Disponível em: <[https://abcp.org.br/wpcontent/uploads/2016/01/ET-35\\_Solo\\_cimento\\_Normas\\_dosagem\\_meto\\_dos\\_ensaios.pdf](https://abcp.org.br/wpcontent/uploads/2016/01/ET-35_Solo_cimento_Normas_dosagem_meto_dos_ensaios.pdf)>. Acesso em: 14 nov. 2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12253: Solo-cimento – Dosagem para emprego como camada de pavimento - Procedimento.** Rio de Janeiro, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.** Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez.** Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade.** Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181: Solo – Análise granulométrica.** Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 1023: Solo – Ensaio de compactação.** Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12024: Solo-cimento – Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos - Procedimento.** Rio de Janeiro, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **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. **NBR 12253: Solo-cimento – Dosagem para emprego como camada de pavimento Procedimento.** Rio de Janeiro, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos.** Rio de Janeiro, 2018.
- BERNUCCI et al. **Pavimentação Asfáltica: Formação básica para engenheiros.** Rio de Janeiro: Petrobras, 2008.
- BERNUCCI, Liedi Bariani et al. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. 2ª Edição.** Rio de Janeiro: Petrobras, 2022.
- CERATTI, Jorge Augusto Pereira. **Estudo do Comportamento a Fadiga de Solos Estabilização com cimento para Utilização em Pavimentos.** 1991. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.
- CNT. (2023). Confederação Nacional dos Transportes. Pesquisa CNT de rodovias 2023: relatório gerencial. Brasília: CNT,

CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos Solos e Suas Aplicações**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1988. Disponível em: <<https://engenhariacivilfsp.files.wordpress.com/2015/05/mecanica-solos-fundamentos-vol1-6ed-caputo.pdf>>. Acesso em: 14 nov. 2024.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes **Manual de pavimentação**: versão corrigida e errata 1. 2021. Disponível em: chromeextension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://www.gov.br/dnit/ptbr/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletaneade manuais/vigentes/ipr\_719\_manual\_de\_pavimentacao\_versao\_corrigida\_errata\_1.pdf. Acesso em: 14 nov. 2024.

DER – Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Paraná. **Especificação técnica: Solo-cimento e solo tratado com cimento**. 2019. Disponível em: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://www.der.pr.gov.br/sites/der/arquivos\_restrito/s/files/documento/2019-10/es-p11-18solocimentoesolotratadocomcimento.pdf. Acesso em: 14 nov. 2024.

GUSMÃO, Anderson Caetano; GROPPPO, Juliano Daniel; ALMEIDA, Nathan Marçal Dias de; PEREIRA, Rondinelly Geraldo. **Solo-Cimento: Determinação do Tipo de Cimento**. 15º Congresso Nacional de Meio Ambiente – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, Muzambinho, 2018.

**NORMA DNIT 414/2019 – ME Pavimentação – Solo-Cimento – Dosagem físico-química de solo-cimento – Método de ensaio**

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

SANTOS, Humberto Gonçalves dos; JACOMINE, Paulo Klinger Tito; ANJOS, Lúcia Helena Cunha dos; OLIVEIRA, Virlei Álvaro de; LUMBRERAS, José Francisco; COELHO, Maurício Rizzato; ALMEIDA, Jaime Antonio de; ARAUJO FILHO, José Coelho de; OLIVEIRA, João Bertoldo de; CUNHA, Tony Jarbas Ferreira. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed., ver. e ampl. - Brasília: Embrapa, 2018. 356 p. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1094003>>. Acesso em: 14 nov. 2024.

UMFG