

## AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO PUNÇIONAMENTO DE MISTURAS COMPACTADAS DE SOLO ARGILOSO E AGREGADOS DE RESÍDUOS DE CONCRETO

Raphaella de Souza Resende<sup>1</sup>; João Paulo Saraiva Teixeira<sup>2</sup>; Victor Hugo Medeiros Pessanha<sup>3</sup>; Heraldo Nunes Pitanga<sup>4</sup>; Cátia de Paula Martins<sup>5</sup>; Klaus Henrique de Paula Rodrigues<sup>6</sup>

**Resumo** – Este estudo investigou o potencial de reutilização de resíduos de construção civil, especificamente de corpos de prova de concreto, para estabilização de solo argiloso, visando a aplicação em pavimentação asfáltica. A pesquisa propôs uma mistura, em termos de massa seca total, com 30% de solo, 20% de RCC graúdo e 50% de RCC miúdo. Foram realizados ensaios para a caracterização do solo e dos agregados derivados dos resíduos, bem como ensaios de compactação e Índice de Suporte Califórnia (ISC) sobre o solo e a mistura solo-RCC. Os resultados indicaram uma melhor capacidade de densificação da mistura solo-RCC comparativamente ao solo puro. Para a mistura solo-RCC, foi observada uma redução da umidade ótima, caracterizando uma redução da demanda de água necessária para o alcance da densidade seca máxima. Para o ISC, obteve-se o valor de 22,83% para o solo; em contrapartida, a mistura solo-RCC resultou em um valor de ISC de 64,37%, indicando o melhor desempenho da mistura quanto à resistência ao punçionamento. Conclui-se que a dosagem proposta para a mistura solo-RCC é promissora para aplicação em pavimentação, apontando favoravelmente para o caráter sustentável da proposta técnica de combinação do solo com os resíduos de construção civil.

**Abstract** – This study investigated the potential for reusing construction waste (CW), specifically concrete specimens, to stabilise clay soil for use in asphalt paving. The research proposed a mixture, in terms of total dry mass, with 30% soil, 20% coarse CW and 50% fine CW. Tests were carried out to characterise the soil and the aggregates derived from the waste, as well as compaction and California Bearing Ratio (CBR) tests on the soil and the soil-CW mixture. The results indicated a better densification capacity of the soil-CW mixture compared to pure soil. For the soil-CW mixture, a reduction in optimum water content was observed, characterizing a reduction in the water demand required to reach maximum dry density. For the CBR, a value of 22.83% was obtained for the soil; in contrast, the soil-CW mixture resulted in a CBR value of 64.37%, indicating the mixture's better performance in terms of puncture resistance. It can be concluded that the dosage proposed for the soil-CW mixture is promising for application in paving, pointing favorably to the sustainable nature of the technical proposal for combining soil with construction waste.

**Palavras-Chave** – Aproveitamento de resíduos; RCC; dosagem de mistura solo-resíduo; pavimentação.

<sup>1</sup> Eng. civil., Universidade Federal de Juiz de Fora, raphaella.resende@engenharia.ufjf.br

<sup>2</sup> Estudante, Universidade Federal de Juiz de Fora, joao.teixeira@engenharia.ufjf.br

<sup>3</sup> Eng. civil, Universidade Federal de Juiz de Fora, victor.pessanha@engenharia.ufjf.br

<sup>4</sup> Prof. Dr., Universidade Federal de Juiz de Fora, heraldopitanga@ufjf.br

<sup>5</sup> Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>., Universidade Federal de Juiz de Fora, catia.martins@ufjf.br

<sup>6</sup> Prof. Dr., Universidade Federal de Viçosa, klaus@ufv.br

## 1. INTRODUÇÃO

O solo corresponde a um dos materiais de maior importância na engenharia civil, podendo ser material de apoio ou até mesmo constituinte da estrutura. Nesse sentido, por se tratar de um material de origem natural, pode ter as mais diversas propriedades, sendo que estas características intrínsecas, de um modo geral, não são adequadas para sua aplicação direta em camadas estruturais do pavimento, por exemplo (Sartori, 2015). Neste cenário, é importante que se tenha o adequado conhecimento do solo com que se pretende trabalhar para então propor metodologias que melhorem as características do solo, adequando-se ao fim que se busca.

Uma dessas metodologias possíveis é a estabilização do solo. De acordo com Andrade (2017), o processo em questão consiste basicamente em tratar o solo para prepará-lo e garantir sua estabilidade para fins de uso. A estabilização poderá ser categorizada em 3 tipos:

- Estabilização mecânica – “[...] visa dar ao solo (...) uma condição de densificação máxima relacionada a uma energia de compactação e a uma umidade ótima.” (Marques, 2018).
- Estabilização química – “[...] refere-se às alterações produzidas na sua estrutura pela introdução de uma certa quantidade de aditivo.” (França, 2003).
- Estabilização granulométrica – “Processo de melhoria das características de solos *“in natura”* mediante a adição de um ou mais materiais, de forma a se obter uma mistura final com propriedades adequadas de estabilidade e durabilidade.” (Bernucci et al., 2022).

Conforme apontado por Brito e Paranhos (2017), a escolha da metodologia de estabilização mais adequada dependerá de uma série de variáveis, tais como as características do solo disponível, sua destinação, os requisitos técnicos do projeto e sua viabilidade econômica. Além disso, é importante dizer que, por vezes, pode ser necessário combinar múltiplos métodos de estabilização para alcançar os padrões técnicos requeridos, sendo esta uma escolha individual de cada projeto.

Por outro lado, segundo a ABRELPE (2022), apenas em 2021, foram coletados mais de 48 milhões de toneladas de resíduos da construção e demolição no Brasil, em um panorama no qual vem crescendo significativamente a preocupação e a responsabilidade ambientais. Por conta disso, tem-se investido em pesquisas que buscam viabilizar o reaproveitamento de resíduos, visto que os benefícios provenientes dessa prática são inegáveis, ambiental e economicamente (Gonçalves, 2001), estando esta pesquisa inserida nesse contexto.

Neste estudo, foram utilizados resíduos da construção civil (RCC) provenientes do rompimento de corpos de prova de concreto produzidos por uma empresa de engenharia em Juiz de Fora, Minas Gerais. Após tratamento e britagem, esses resíduos são disponibilizados para combinação com solo argiloso, visando alcançar propriedades adequadas para suporte das camadas estruturais de um pavimento asfáltico específico, conforme as diretrizes técnicas do Departamento de Estradas e Rodagem de São Paulo (DER/SP) e do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). O foco principal deste estudo é a estabilização granulométrica do solo pela incorporação de agregados de RCC.

## 2. OBJETIVO

O objetivo do presente trabalho é o de promover a análise e a comparação dos valores encontrados para o Índice de Suporte Califórnia (ISC) de um solo argiloso puro e de uma mistura entre este mesmo solo e agregados de resíduos de construção civil, em proporções previamente determinadas. Através da estabilização granulométrica do solo pelos agregados, espera-se que a mistura em análise tenha um melhor desempenho de engenharia quando comparada ao solo em seu estado original, particularmente quanto a sua resistência ao puncionamento, desempenho tal que deverá ser suficiente para viabilizar a aplicação da mistura solo-RCC em camadas estruturais de pavimentação asfáltica,

### 3. METODOLOGIA

Na Figura 1, tem-se o fluxograma que ilustra todas as etapas para o desenvolvimento da pesquisa.

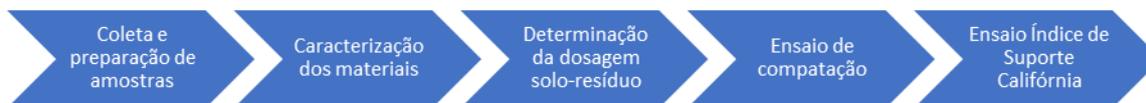


Figura 1. Etapas do desenvolvimento da pesquisa.

#### 3.1 Coleta e preparação de amostras

As amostras do solo argiloso (Figura 2) são provenientes de um talude de corte localizado no campus da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), em Juiz de Fora-MG. Após sua coleta, as amostras foram dispostas em bandejas até atingirem a umidade higroscópica, seguindo para o destorroamento e homogeneização, conforme a NBR 6457 (ABNT, 2016a).



Figura 2. Solo argiloso coletado.

Já as amostras do resíduo de concreto foram cedidas por uma empresa especializada em ensaios de engenharia e controle tecnológico em Juiz de Fora-MG. Antes de serem descartados, os resíduos de corpos de prova de concreto são triturados pela empresa, resultando em duas granulometrias diferentes: uma similar à brita 1 (9,50 - 19,1 mm) – resíduo grosso ou RCC graúdo (Figura 3a) – e outra variando de 0,6 a 2,36 mm – resíduo fino ou RCC miúdo – (Figura 3b). Assim como o solo, os dois tipos de resíduos foram secos ao ar, desagregados e misturados para os testes.

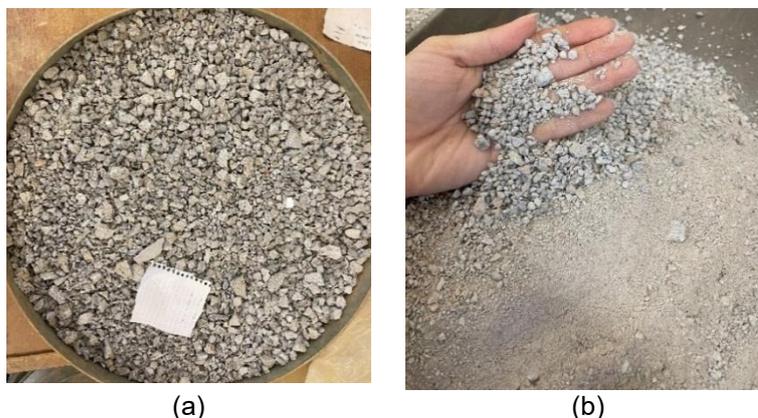


Figura 3. Agregados de resíduo de concreto empregados na pesquisa: (a) agregado de maior granulometria (RCC graúdo); (b) agregado de menor granulometria (RCC miúdo).

### 3.2 Caracterização dos materiais

A caracterização geotécnica do solo envolveu os resultados de granulometria, limite de plasticidade, limite de liquidez e massa específica dos sólidos do solo conforme apresentados na Tabela 1. Destaca-se que os referidos ensaios foram realizados seguindo as orientações das normas NBR 7181 (ABNT, 2025a), NBR 7180 (ABNT, 2016d), NBR 6459 (ABNT, 2016e) e NBR 6458 (ABNT, 2025b), respectivamente.

Tabela 1. Ensaios de caracterização do solo e respectivos resultados (Cândido, 2023)

| Ensaio                       | Resultado  |
|------------------------------|--|
| Granulometria                | 56% argila, 33% areia, 10% silte e 1% pedregulho |
| Limite de plasticidade       | 30%  |
| Limite de liquidez           | 40%  |
| Índice de plasticidade       | 10%  |
| Massa específica dos sólidos | 2,79g/cm <sup>3</sup>                            |

Já para os resíduos, foram realizados os ensaios de caracterização que melhor se adequavam a cada um deles, dadas as suas diferentes características e granulometrias. Logo, os ensaios adotados e seus respectivos resultados encontram-se apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Ensaios e respectivos resultados de caracterização dos resíduos (Moreira, 2023)

| Ensaio                       | Resíduo analisado | Resultado   |
|------------------------------|-------------------|---|
| Índice de forma              | RCC graúdo        | 2,12  |
| Densidade e absorção de água | RCC graúdo        | Porosidade 17,61%<br>Absorção água 7,09%<br>Densidade 2,48g/cm <sup>3</sup> |
| Abrasão <i>Los Angeles</i>   | RCC graúdo        | 39%   |
| Módulo de finura             | RCC miúdo         | 3,15  |
| Massa unitária               | RCC miúdo         | 1220 kg/m <sup>3</sup>  |
| Granulometria                | RCC graúdo        | 99% pedregulho e 1% areia   |
| Granulometria                | RCC miúdo         | 59% areia, 39% pedregulho e 2% silte.                                       |

### 3.3 Determinação da dosagem solo-resíduo

A definição da dosagem entre o solo e os agregados dos resíduos foi baseada na redução do quantitativo de solo e no aumento do quantitativo de resíduo, sendo, para isso, necessário estabelecer critérios técnicos para definir os percentuais em massa de cada material. Dessa forma, foram utilizadas as faixas granulométricas recomendadas pelo Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo (DER/SP, 2006) para misturas solo-brita destinadas às camadas de base e sub-base de pavimentos asfálticos, conforme mostradas no Quadro 1.

| Peneira de Malha Quadrada |       | % em Massa, Passando |         |          |          |          | Tolerância |
|---------------------------|-------|----------------------|---------|----------|----------|----------|------------|
| ASTM                      | mm    | I                    | II      | III      | IV       | V        |            |
| 1"                        | 25,4  | 100                  |         |          |          |          |            |
| 3/4"                      | 19,0  | -                    | 100     | 100      | 100      | 100      |            |
| 3/8"                      | 9,5   | 30 – 65              | 50 – 85 | 60 – 100 | -        | -        | ± 7        |
| n° 4                      | 4,8   | 25 – 55              | 35 – 65 | 50 – 85  | 55 – 100 | 70 – 100 | ± 5        |
| n° 10                     | 2,0   | 15 – 40              | 25 – 50 | 40 – 70  | 40 – 100 | 55 – 100 | ± 5        |
| n° 40                     | 0,42  | 8 – 20               | 15 – 30 | 20 – 50  | 20 – 55  | 30 – 70  | ± 5        |
| n° 200                    | 0,075 | 2 – 8                | 5 – 20  | 7 – 20   | 8 – 25   | 10 – 25  | ± 2        |

Quadro 1. Faixas granulométricas para misturas solo-brita a serem aplicadas nas camadas de base e sub-base de pavimento asfáltico (DER/SP, 2006).

Para este estudo, a faixa IV foi selecionada para determinar a granulometria de projeto. Usando as granulometrias dos componentes individuais da mistura (solo, RCC graúdo e RCC miúdo), chegou-se à mistura final que se enquadrasse dentro dos limites da faixa de serviço. Essa

mistura correspondeu à seguinte proporção em massa de seus componentes: 30% de solo; 20% de RCC graúdo; 50% de RCC miúdo.

### 3.4 Ensaio de compactação

Os ensaios de compactação do solo e da mistura solo-RCC foram realizados seguindo as recomendações normativas das normas NBR 7182 (ABNT, 2016b) e DNER-ME 129 (1994). Para a determinação das respectivas curvas de compactação, os intervalos de umidade foram de, aproximadamente, 2%. Para o solo, adotou-se o cilindro menor (cilindro Proctor), e para a mistura solo-RCC, adotou-se o cilindro maior (cilindro CBR), sendo adotada a energia Proctor intermediária para a compactação (Figura 4) de ambos materiais.



Figura 4. Processo de compactação com soquete grande e cilindro CBR.

### 3.5 Ensaio CBR (Índice de Suporte Califórnia)

Os ensaios para determinação do Índice de Suporte Califórnia (ISC), ou ensaio CBR (Figura 5), foram realizados seguindo as recomendações das normas NBR 9895 (ABNT, 2016c) e DNIT 172/2016-ME (DNIT, 2016). Salienta-se que este ensaio tem como fundamento a penetração (puncionamento) de um pistão padrão na amostra compactada, sendo seu resultado percentual uma comparação com a mesma resistência à penetração (resistência ao puncionamento) apresentada por uma amostra padrão (brita graduada). Em teoria, quanto maior o valor do ISC, mais resistente ao puncionamento será o material.

Os corpos de prova para realização do ensaio foram moldados nas condições ótimas de compactação, obtidas previamente através da curva de compactação, sendo realizados controles de umidade (variação máxima de 1% em relação à umidade ótima) e do grau de compactação (mínimo de 98%) para todos os corpos de prova moldados.



Figura 5. Montagem do ensaio de ISC.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

## 4.1 Compactação

A Figura 6 apresenta as respectivas curvas de compactação do solo e da mistura solo-RCC na energia Proctor intermediária. Para o solo, foram obtidos, como resultados,  $W_{\text{ótimo}} = 22,10\%$  e  $\gamma_{\text{dmáx}} = 15,60 \text{ kN/m}^3$ . Já para a mistura solo-RCC, esses valores corresponderam a  $W_{\text{ótimo}} = 14,50\%$  e  $\gamma_{\text{dmáx}} = 17,90 \text{ kN/m}^3$ . Quando confrontados os dois resultados, constata-se que a incorporação dos agregados de resíduos ao solo promove uma redução significativa no teor de umidade ótimo, assim como um incremento do peso específico aparente seco máximo. Salienta-se que este comportamento já foi observado em pesquisas anteriores, como a de Pessanha (2019).

Portanto, o produto de engenharia resultante da incorporação dos agregados de RCC ao solo (mistura solo-RCC) constitui um material mais denso que o solo natural, apontando para uma perspectiva de melhoria das propriedades de engenharia do solo estabilizado granulometricamente pelos resíduos. Também a demanda hídrica necessária para promover o rearranjo das partículas do material compactado é significativamente diminuída com a incorporação dos resíduos, visto que a umidade necessária para atingir a densidade seca máxima foi reduzida no caso da mistura.

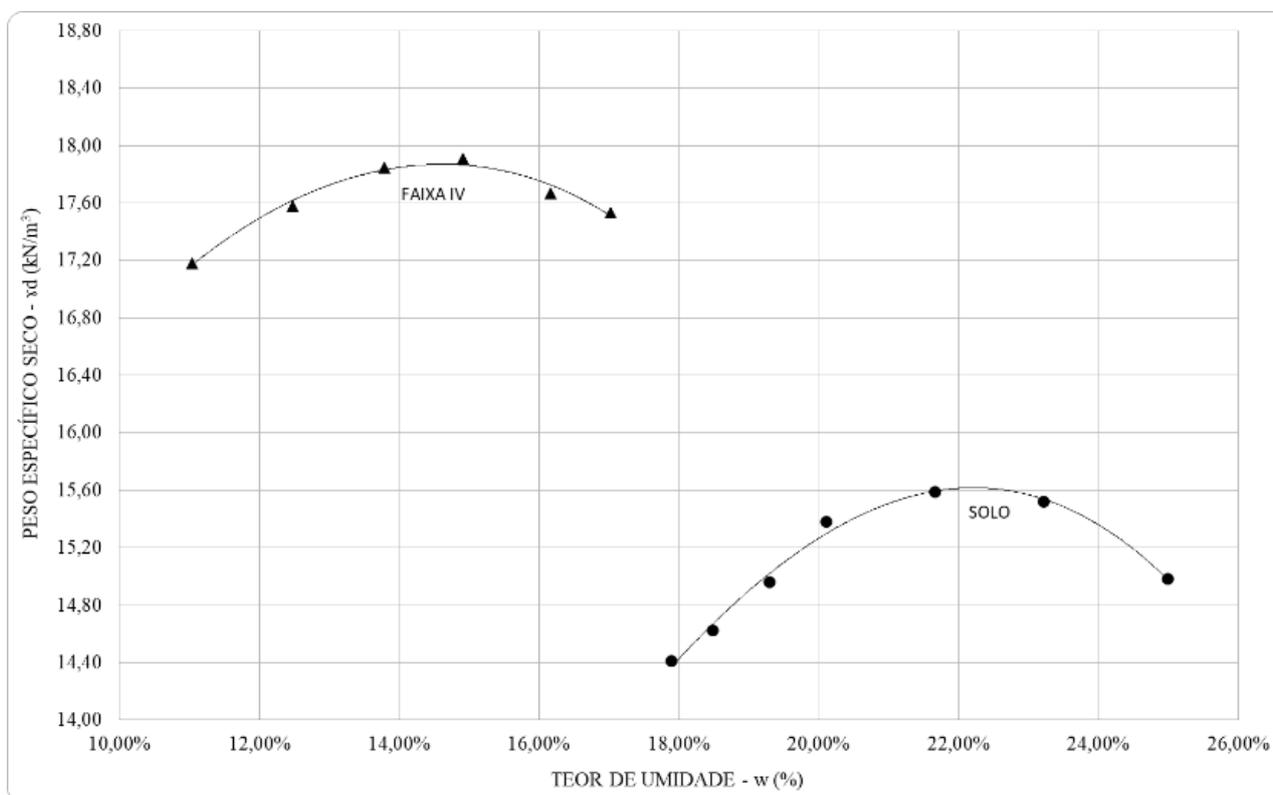


Figura 6. Curvas de compactação do solo e da mistura solo-RCC na energia Proctor intermediária.

## 4.2 Índice de Suporte Califórnia

Os resultados para o Índice de Suporte Califórnia do solo e da mistura solo-RCC estão apresentados na Figura 7. De forma geral, foi observado um aumento expressivo no valor de ISC ao se adicionar resíduo ao solo. Tais comportamentos já foram observados anteriormente em estudos com adição de resíduo feitos por Pessanha (2019) e Hortegal (2009).

Além disso, ao adicionar o resíduo, são atingidos os valores mínimos previstos para utilização do material nas camadas estruturais de sub-base e de base de pavimentos asfálticos. Segundo o DNIT (2006), o ISC mínimo para a utilização de um dado material em camada de sub-base é de 20%, enquanto que para a base (vias de tráfego leve) é de 60%. A especificação técnica 006 do DER/SP (2006) prescreve 30% como o mínimo para a camada de sub-base.

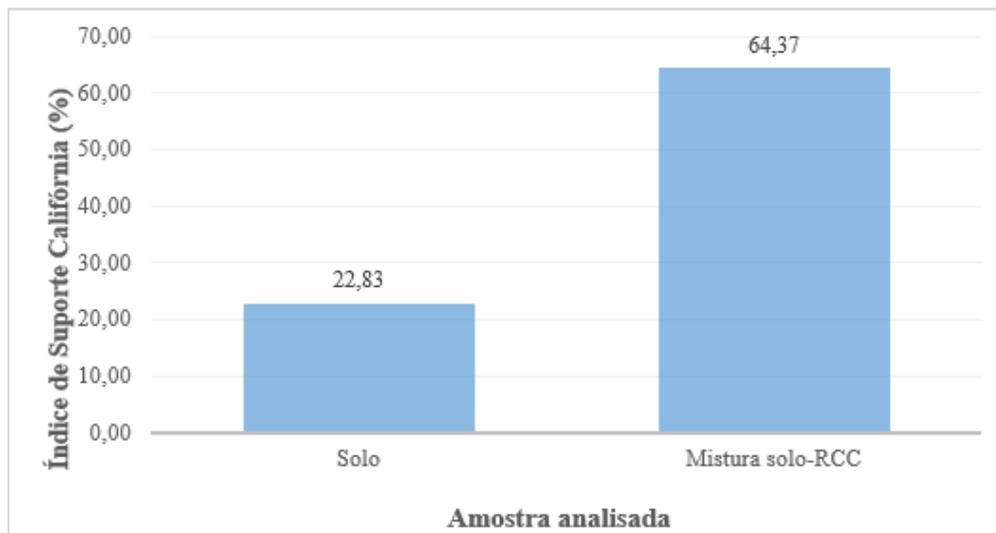


Figura 7. Resultados médios finais de ISC.

## 5. CONCLUSÕES

É possível perceber que a adição de RCC ao solo alterou os parâmetros de compactação, resultando em menor teor de umidade ótima e aumento da massa específica aparente seca máxima. Observou-se, na mistura solo-RCC, uma menor necessidade de água para atingir a densidade máxima e uma melhoria na compactação/densificação.

O valor do Índice de Suporte Califórnia (ISC) aumentou consideravelmente com a adição de RCC. Em uma análise inicial, esses resultados indicam que a mistura solo-RCC atende às normas para uso em base (no caso de tráfego leve) e sub-base de pavimentos.

Conclui-se que a utilização do RCC em camadas de pavimento asfáltico mostra-se uma opção tecnicamente viável e sustentável, pois atende aos requisitos técnicos prescritos pelos órgãos rodoviários, reduzindo a necessidade de disposição final deste resíduo em aterros sanitários, além de promover sustentabilidade ao reduzir a extração de materiais naturais (solos, rochas para produção de britas) para pavimentação.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Faculdade de Engenharia da UFJF pelo suporte financeiro oferecido.

## REFERÊNCIAS

- ANDRADE, T. S. (2017). *Estudo de estabilização para camada de base: material granular, cimento e estabilizante líquido*. Trabalho de conclusão de curso, Centro Universitário Luterano de Palmas.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2016a). *NBR 6457. Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização*. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2016b). *NBR 7182. Solo – Ensaio de compactação*. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2016c). *NBR 9895. Solo – Índice de Suporte Califórnia (ISC) – Método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2016d). *NBR 7180. Solo – Determinação do Limite de Plasticidade – Método de ensaio*. Rio de Janeiro.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2016e). *NBR 6459. Solo – Determinação do Limite de Liquidez – Método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2025a). *NBR 7181. Solo – Análise Granulométrica – Método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2025b). *NBR 6458. Solo – Determinação da massa específica dos sólidos, da massa específica aparente e da absorção de água da fração retida na peneira com abertura de 2,0 mm – Método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (2022). ABRELPE. *Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2022*. Disponível em: <<http://abrelpe.org.br/panorama/>>. Acesso em: 16 dez. 2022.
- BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. (2022). *Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros*. PETROBRÁS: ABEDA – Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto. Edição 02. 756p.
- BRITO, L. C., PARANHOS, H. S. (2017). *Estabilização de Solos*. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Edição 06. Ano 02, Vol. 01. pp 425-438. ISSN:2448-0959
- CÂNDIDO, V. B. (2023). *Avaliação do comportamento mecânico de solo residual em misturas com rejeito de minério de ferro*. 133 f. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Juiz de Fora, 133p.
- DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO (2006). *DER/SP 006. Sub-base ou base de solo brita*. São Paulo.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (1994). *DNER-ME - 129. Solos – compactação utilizando amostras não trabalhadas*. Rio de Janeiro.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (2006). *DNIT. Manual de Pavimentação*. 3ª. ed. Rio de Janeiro. 274p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (2016). *DNIT 172/2016-ME. Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas – Método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- FRANÇA, F.C. (2003). *Estabilização Química de Solos para Fins Rodoviários: Estudo de Caso com o Produto “RBI Grade 81”*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Viçosa, 104p.
- GONÇALVES, R. D. C. (2001). *Agregados Reciclados de Resíduos de Concreto: um novo material para dosagens estruturais*. Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo, 148p.
- HORTEGAL, M. V., FERREIRA, T. C., SANT’ANA, W. C. (2009). *Utilização de agregados resíduos sólidos da construção civil para pavimentação em São Luís – MA*. Pesquisa em Foco, v. 17, p. 60-74.
- MARQUES, G. L. O. (2018). *Notas de Aula da Disciplina Pavimentação – TRN075*. Disponível em: <https://www.ufjf.br/pavimentacao/files/2009/03/Notas-de-Aula-2018.pdf>. Acesso em: 5 mar. 2025.
- MOREIRA, R. S. R. (2023). *Estudo do Comportamento Mecânico de Solo Argiloso Estabilizado com Resíduo de Concreto para Fins de Pavimentação*. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Juiz de Fora, 83p.
- PESSANHA, V. H. M. (2019). *Estudo da Caracterização e Compactação de Misturas de Solo Argiloso e Resíduo da Construção Civil*. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Juiz de Fora, 87p.
- SARTORI, G. (2015). *Estudo de Estabilização de Solos para Fins de Pavimentação na Região de Campo Mourão*. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 54 p.