

ESTUDO DO POTENCIAL DE ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA E GRANULOMÉTRICA DE SOLO ARGILOSO COM RESÍDUO DE CONCRETO PARA FINS DE PAVIMENTAÇÃO

Raphaella de Souza Resende Moreira¹; Cátia de Paula Martins²; Heraldo Nunes Pitanga³; João Paulo Saraiva Teixeira⁴; Victor Hugo Medeiros Pessanha⁵; Klaus Henrique de Paula Rodrigues⁶

Resumo – O setor da construção civil é reconhecido como um grande consumidor de recursos naturais e gerador de resíduos, impulsionando a busca por soluções sustentáveis. Uma abordagem promissora é a reutilização de resíduos em obras de terra (geotecnia, pavimentação), reduzindo o impacto ambiental e economizando recursos, como solos e agregados. Esta pesquisa foca no desenvolvimento de uma composição de solo e resíduos de construção civil (RCC), resultantes de corpos de prova de concreto, para camadas estruturais de pavimentos asfálticos. A proporção sugerida é de 30% de solo, 20% de resíduo grosso e 50% de resíduo fino, visando, a princípio, a estabilização granulométrica do solo. Os testes realizados envolveram a caracterização geotécnica do solo, física dos agregados, compactação e resistência à compressão simples (RCS) do solo e da mistura solo-RCC, sendo que, no caso desta última, fez-se também uma análise após 28 dias de cura úmida. Os resultados mostram um aumento da densidade máxima e uma redução da umidade ótima da mistura comparativamente ao solo puro, indicando uma maior densificação e uma menor necessidade de água para a compactação. Apesar da redução da RCS inicial da mistura, observou-se um ganho significativo após 28 dias, sugerindo a ação química de cura devida aos agentes cimentícios presentes na composição dos resíduos de concreto.

Abstract – The construction sector is recognized as a major consumer of natural resources and generator of waste, driving the search for sustainable solutions. One promising approach is the reuse of waste in earthworks (geotechnics, paving), reducing environmental impact and saving resources such as soil and aggregates. This research focuses on developing a composition of soil and construction waste (CW), resulting from concrete test specimens, for structural layers of asphalt pavements. The suggested proportion is 30% soil, 20% coarse waste, and 50% fine waste, to stabilize the soil's granulometry. The tests carried out involved geotechnical soil characterization, aggregate physics, compaction, and unconfined compressive strength (UCS) of the soil and the soil-CW mixture, the latter also being analyzed after 28 days of wet curing. The results show an increase in the maximum dry density and a reduction in the optimum water content of the mixture compared to pure soil, indicating greater densification and a lower need for water for compaction. Despite the reduction in the initial UCS of the mixture, a significant gain was observed after 28 days, suggesting the chemical curing action due to the cementitious agents present in the composition of the concrete waste.

Palavras-Chave – Aproveitamento de resíduos; tempo de cura; estabilização físico-química; dosagem de mistura solo-agregado; pavimentação.

¹ Eng^a., Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Minas Gerais, Brasil, raphaella.resende@engenharia.ufjf.br

² Prof^a. Dra., Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Minas Gerais, Brasil, catia.martins@ufjf.br

³ Prof. Dr., Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Minas Gerais, Brasil, heraldopitanga@ufjf.br

⁴ Estudante, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Minas Gerais, Brasil, joao.teixeira@engenharia.ufjf.br

⁵ Eng., Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Minas Gerais, Brasil, victor.pessanha@engenharia.ufjf.br

⁶ Prof. Dr., Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, Brasil, klaus@ufv.br

1. INTRODUÇÃO

Apesar de se tratar de um dos principais materiais para a engenharia civil, o solo muitas vezes pode não possuir as características e requisitos técnicos necessários para sua aplicação direta em uma obra (Sartori, 2015). Neste contexto, é importante que se tenha conhecimento de métodos que promovam a melhoria dos parâmetros técnicos do material alvo de trabalho. Uma dessas possibilidades é a estabilização do solo, que consiste basicamente em submetê-lo a um tratamento visando garantir sua estabilidade para os fins aos quais o material se destina (Andrade, 2017). Esse processo pode ser de 3 tipos: mecânico, químico e granulométrico.

A depender do projeto, pode-se combinar mais de um tipo de estabilização, ressaltando-se que a determinação do método mais adequado a ser seguido vai depender de diversas variáveis (Brito; Paranhos, 2017). Neste estudo, a metodologia principal para estabilização é a granulométrica, mas vislumbra-se também a possibilidade de contribuição química na melhoria das propriedades de engenharia do material investigado. Tal contribuição seria fruto da ação de rehidratação do cimento ainda presente no resíduo de concreto, entretanto, a princípio, não é possível determinar e quantificar a parcela de contribuição química neste cenário, diferenciando-a da parcela referente à contribuição granulométrica.

Segundo a Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição, o Brasil gerou cerca de 120 milhões de toneladas de resíduos de construção civil em 2022. Desse montante, 70% ainda são descartados incorretamente (ABRECON, 2023). Inúmeras pesquisas têm sido desenvolvidas com o objetivo de criar novas destinações à esse volume exorbitante de resíduos.

Neste estudo, foram utilizados resíduos da construção civil (RCC), resultantes de corpos de prova oriundos de uma empresa especializada no controle tecnológico do concreto, para a combinação com um solo argiloso, com o intuito de atingir as propriedades técnicas adequadas para o seu emprego como material de camadas estruturais de pavimento asfáltico, conforme as diretrizes técnicas do Departamento de Estradas e Rodagem de São Paulo (DER/SP) e do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT).

2. OBJETIVOS

O presente trabalho visa, como objetivo principal, a análise e a comparação dos valores de resistência à compressão simples de um solo argiloso puro e de uma mistura deste mesmo solo e agregados derivados do beneficiamento de resíduos de concreto (RCC), em proporções previamente determinadas (mistura solo-RCC). Como objetivo secundário, é estudada também a possibilidade de ação cimentícia na mistura solo-RCC devida aos agentes cimentícios presentes no concreto. Estima-se que a estabilização física, proporcionada pela granulometria dos agregados de RCC, e a química, proporcionada pelos agentes cimentícios neles presentes, reforcem o potencial de aplicação da mistura solo-RCC em camadas de pavimentação.

3. METODOLOGIA

3.1 Etapas da pesquisa

A Figura 1 ilustra todas as etapas para o desenvolvimento da pesquisa.



Figura 1. Etapas do desenvolvimento da pesquisa.

3.2 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.



(a)



(b)

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

3.3 Caracterização dos materiais

A caracterização geotécnica do solo envolveu os resultados de granulometria, limite de plasticidade, limite de liquidez, índice de plasticidade e de massa específica dos sólidos do solo conforme apresentados na Tabela 1.

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 ³

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% Absorção água 7,09% Densidade 2,48g/cm ³
Abrasão <i>Los Angeles</i>	RCC graúdo	39%
Módulo de finura	RCC miúdo	3,15
Massa unitária	RCC miúdo	1220 kg/m ³
Granulometria	RCC graúdo	99% pedregulho e 1% areia
Granulometria	RCC miúdo	59% areia, 39% pedregulho e 2% silte.

3.4 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 e Rodagem de São Paulo (DER/SP, 2006) para misturas solo-brita destinadas às camadas de base e sub-base de pavimentos asfálticos, conforme mostradas na Figura 4.

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

Figura 4. 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.

3.5 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 5) de ambos materiais.



Figura 5. Processo de compactação dos materiais investigados.

3.6 Ensaio de Resistência à Compressão Simples

Segundo Bernucci et al. (2022), o ensaio de resistência à compressão simples (RCS) é comumente utilizado quando há componente cimentício no material investigado, razão pela qual foi o ensaio escolhido para analisar o potencial de cimentação dos agregados derivados dos resíduos de concreto. O solo puro foi testado apenas para o tempo zero (sem cura), enquanto a mistura solo-RCC foi ensaiada imediatamente após a moldagem (tempo zero) e também após o período de 28 dias de cura em câmara úmida (Figura 6).



Figura 6. Corpos de prova da mistura solo-RCC dispostos na câmara úmida.

Os ensaios foram realizados em triplicata, determinando-se a média aritmética dos valores individuais, segundo as prerrogativas da NBR 12770 (ABNT, 2022), sobre corpos de prova moldados no cilindro Proctor ($H=12\text{cm}$; $D=10\text{cm}$), nos respectivos parâmetros de ótimo de compactação Proctor intermediário do solo e da mistura solo-RCC, com controle destes parâmetros (grau de compactação mínimo de 98% e variação da umidade de compactação de 1% em torno da umidade ótima). Para os corpos de prova que foram rompidos após os 28 dias de cura, foi também determinada a umidade de rompimento, sendo este um parâmetro relevante na análise da potencial hidratação do cimento presente nos agregados de concreto.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Compactação

A Figura 7 apresenta a curva de compactação do solo puro, sendo obtidos, como resultados, os seguintes valores dos parâmetros de ótimo: $W_{\text{ótimo}} = 22,10\%$ e $\gamma_{\text{dmax}} = 15,60 \text{ kN/m}^3$.

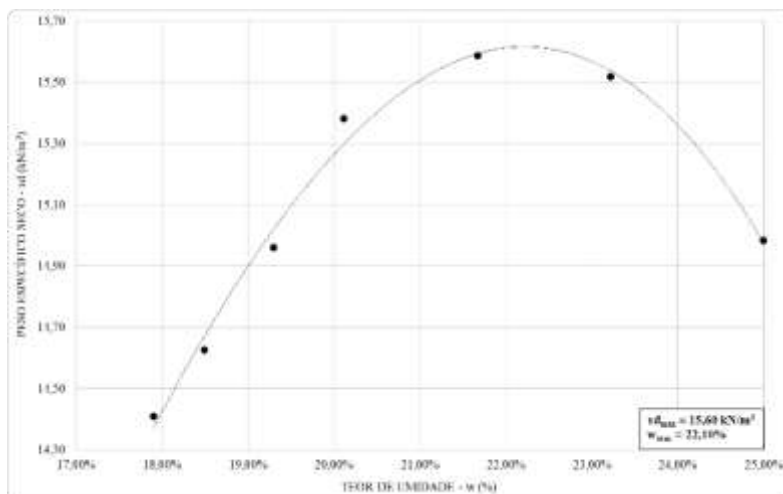


Figura 7. Curva de compactação do solo na energia Proctor intermediária.

Para a mistura solo-RCC, a curva de compactação é apresentada na Figura 8, sendo obtidos os seguintes parâmetros de ótimo: $W_{\text{ótimo}} = 14,50\%$ e $\gamma_{\text{dmax}} = 17,90 \text{ kN/m}^3$.

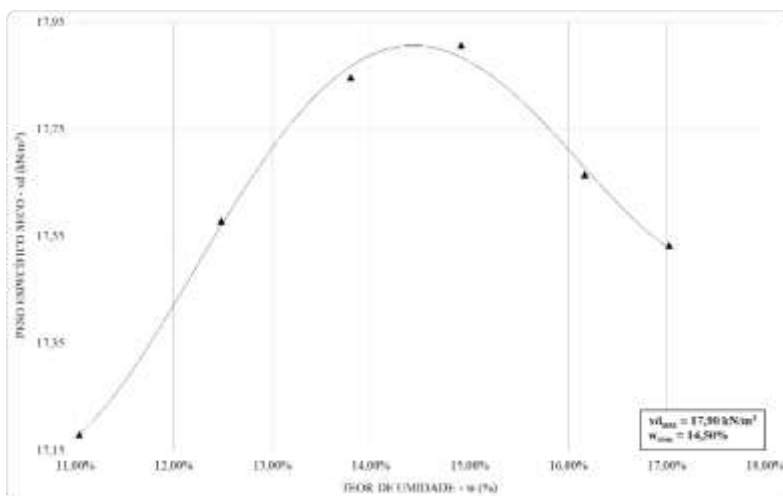


Figura 8. Curva de compactação da mistura solo-RCC na energia Proctor intermediária.

Comparativamente ao solo puro, nota-se, para a mistura solo-RCC, a ocorrência de uma redução significativa no teor de umidade ótimo, concomitantemente ao aumento do peso específico aparente seco máximo. Este comportamento já foi observado em pesquisas anteriores, como a de Pessanha (2019), a qual também tratou da adição de RCC a solos argilosos.

4.2 Resistência à Compressão Simples

Os resultados para a resistência à compressão simples (RCS) do solo e da mistura solo-RCC são apresentados na Tabela 3. De forma geral, o que se observa é uma ligeira redução no valor de RCS ao se adicionar os agregados de resíduo de concreto ao solo, no tempo zero (sem cura), visto que o solo puro tem RCS médio de 273,84 kPa, e a mistura solo-RCC tem sua média em 245,57 kPa.

Tabela 3. Resultados dos ensaios de resistência à compressão simples (RCS)

Material ensaiado	Identificação da amostra	RCS (kPa)	Umidade de moldagem (%)	Umidade de ruptura (%)
Solo puro	A	281,31	22,4	22,4
Solo puro	B	267,45	22,3	22,3
Solo puro	C	272,75	22,3	22,3
Mistura solo-RCC	D	250,42	14,8	14,8
Mistura solo-RCC	E	237,59	14,6	14,6
Mistura solo-RCC	F	248,69	13,8	13,8
Mistura solo-RCC após 28 dias	d	1818,57	13,7	6,66
Mistura solo-RCC após 28 dias	e	1849,15	14,8	6,57
Mistura solo-RCC após 28 dias	f	1994,74	13,1	6,40

Em contrapartida, após a manutenção dos corpos em câmara úmida e ocorrência da possível cura cimentícia durante 28 dias, nota-se um aumento expressivo (cerca de 7 vezes), no valor de RCS, apresentando uma média de 1887,49 kPa (Figura 9). A possibilidade de cura é evidenciada também pela significativa redução no teor de umidade dos corpos de prova após os 28 dias de cura, sendo resultado da hidratação dos compostos cimentícios presentes no resíduo. Ademais, outras possibilidades podem ser consideradas para essa elevação na resistência, como um aumento da componente de sucção matricial da mistura e possíveis reações de carbonatação durante o período de cura em câmara úmida.

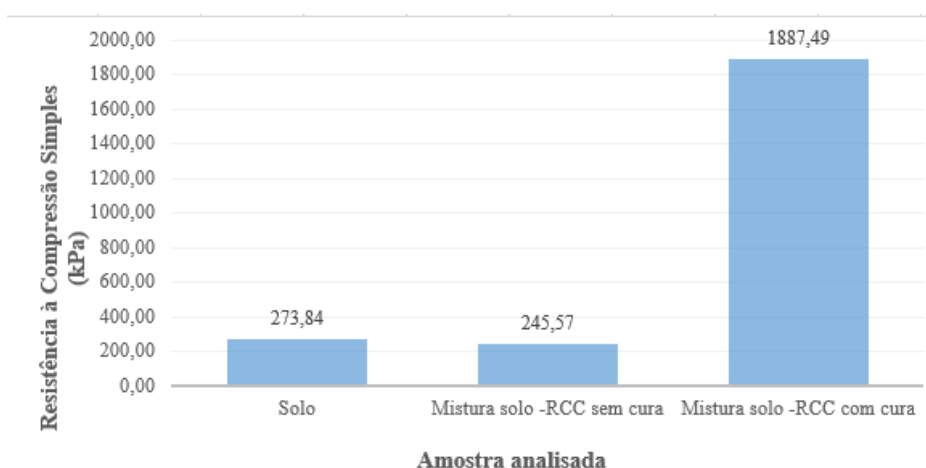


Figura 9. Resultados médios finais de RCS para os diferentes cenários analisados.

5. CONCLUSÕES

É notável que a adição de RCC ao solo ocasionou alteração nos parâmetros de compactação (aumento da massa específica aparente seca máxima, redução do teor de umidade ótima). Por sua vez, o valor de resistência à compressão simples aumentou significativamente, por volta de 7 vezes, com a adição de RCC e resguardado o tempo de cura de 28 dias em câmara úmida. No tempo zero (sem cura), não houve contribuição de ganho de resistência na mistura solo-RCC. O aumento observado pode ser atribuído, provavelmente, às reações de reidratação do cimento ainda não totalmente curado presente nos agregados de RCC. Essas reações permitiram a formação de agentes de cimentação do solo, contribuindo para o aumento da resistência. Entretanto, esse não é o único fator que pode ter contribuído para o ganho de resistência, podendo-se ainda citar o aumento da sucção matricial e a carbonatação. São necessárias análises mais minuciosas a fim de assegurar, de fato, qual foi o fator chave para esse aumento. Destaca-se, ainda, que é interessante realizar o ensaio de resistência à compressão simples em tempos de cura diferentes do adotado nessa pesquisa.

Com base nos resultados, a priori, vê-se a utilização do RCC nas camadas estruturais de pavimento asfáltico como uma opção possível, ainda que necessite de estudos mais aprofundados (ensaio CBR e de Módulo de Resiliência). Salienta-se que, a despeito do RCS não

constituir um parâmetro de dimensionamento de projetos de pavimentos asfálticos, a literatura técnica (Bernucci et al., 2022) e os documentos normativos (DNIT, 2006) apontam esta resistência como critério de seleção preliminar visando o emprego potencial de misturas cimentadas em camadas estruturais de pavimento. A adoção do uso de RCC, tal como o empregado na pesquisa, enquadra-se como uma opção sustentável na sociedade atual, a qual atribui grande importância às soluções que consigam reduzir a extração de materiais naturais (solos e rochas para a produção de britas, por exemplo) para aplicação em tais obras, conjuntamente às novas funcionalidades que podem ser dadas aos resíduos, visto que estes serão aproveitados e não mais descartados em aterros sanitários ou outras áreas de disposição de resíduos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) e ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil (PEC) da UFJF pelo suporte à pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, T. S. de. (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 PARA RECICLAGEM DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL E DEMOLIÇÃO – ABRECON (2023). *70% do entulho no Brasil é descartado incorretamente*. Disponível em: <<https://abrecon.org.br/artigos/70-do-entulho-no-brasil-e-descartado-incorretamente>>. Acesso em: 31 mar. 2024.
- BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G. DA; 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
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2022). *NBR 12770: Solo coesivo - Determinação da resistência à compressão não confinada - Método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- 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.
- 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.