

Influência Da Mistura Solo-Resíduo De Construção Civil Na Resistência À Compressão Simples

Gabriel Galil Toledo

Estudante, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil, galil.toledo@engenharia.ufjf.br

João Paulo Saraiva Teixeira

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

Cátia de Paula Martins

Professora, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil, catia.martins@ufjf.br

Victor Hugo Medeiros Pessanha

Estudante, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil, victor.pessanha@engenharia.ufjf.br

Raphaella de Souza Resende Moreira

Estudante, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil, raphaella.resende@engenharia.ufjf.br

RESUMO: A crescente demanda por agregados na construção civil brasileira é uma consequência direta dos crescimentos econômico e populacional. Assim, torna-se necessário encontrar formas de utilizar os resíduos de engenharia, mitigando os impactos ambientais da gestão inadequada dos Resíduos de Construção Civil (RCC). O objetivo deste trabalho é avaliar a tendência de comportamento quanto à resistência à compressão simples resultante da adição de RCC a um solo residual maduro e, assim, o potencial de aproveitamento da mistura solo-RCC em obras de pavimentação. Para isso, foram coletadas amostras de solo e RCC, para os quais foram realizados ensaios de caracterização física conforme Especificação técnica DE-P00/006. Com os resultados, foi definida a composição da mistura para o estudo, sendo 32% de RCC maior, 52% de RCC menor e 16% de solo, configurando-se na faixa granulométrica de serviço 3, aplicável à base ou sub-base de solo-brita. Posteriormente o solo e as misturas foram submetidos ao ensaio de compactação e ruptura para os períodos de cura de 0 e 28 dias. Após os ensaios, ficou evidente o aumento da RCS da mistura para faixa 3 após 28 dias de cura, tornando o resíduo um material potencial para utilização, porém é necessária ainda a realização de ensaios mais representativos e definidores da aplicação para a camada de base ou sub-base, como o Índice de Suporte Califórnia e o Módulo de Resiliência.

PALAVRAS-CHAVE: Resíduos de Construção Civil (RCC); compactação; Resistência à Compressão Simples; pavimentação.

ABSTRACT: The increasing demand for aggregates in Brazilian construction is a direct consequence of economic and population growth. Therefore, it becomes necessary to find ways to use engineering waste, mitigating the environmental impacts of improper Construction and Demolition Waste (CDW) management. The aim of this study is to assess the trend in behavior regarding the simple compression resistance resulting from the addition of CDW to a mature residual soil, and thus, the potential for the utilization of the soil-CDW mixture in paving works. To achieve this, soil and CDW samples were collected, for which physical characterization tests were conducted according to Technical Specification DE-P00/006. Based on the results, the composition of the mixture for the study was defined, with 32% larger CDW, 52% smaller CDW, and 16% soil, configuring it within service gradation 3, applicable to soil-aggregate base or sub-base. Subsequently, the soil and mixtures were subjected to compaction and rupture tests for curing periods of 0 and 28 days. After the tests, it became evident that the simple compression resistance of the mixture for gradation 3 increased after 28 days of curing, making the waste a potential material for utilization. However, further tests, such as the California Bearing Ratio and Resilient Modulus, are still necessary to provide more representative and definitive results for the application in base or sub-base layers.

KEYWORDS: Construction and Demolition Waste (CDW); compaction; Simple Compression Strength; pavement.

1 INTRODUÇÃO

Conforme estabelece a Lei 12305/2010, os Resíduos da Construção Civil (RCC) são classificados como "aqueles gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras civis, incluindo os provenientes da preparação e escavação de terrenos para essas obras".

O setor da Construção Civil tem sido historicamente responsável pela realização de empreendimentos. Uma característica marcante das obras civis é a utilização de materiais naturais como matéria-prima, que são transformados e empregados na construção. Como resultado, esse processo gera uma quantidade significativa de resíduos anualmente em todo o mundo. Essa realidade contrapõe a premissa de sustentabilidade que atualmente está em discussão globalmente, visando a redução da poluição do planeta e a promoção de um maior reaproveitamento dos subprodutos da construção.

Assim, um dos grandes desafios da construção civil é destinar corretamente as milhares de toneladas de resíduos sólidos gerados anualmente pelo setor. Segundo a ABRECON (Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição), em 2022 o Brasil gerou cerca de 120 milhões de toneladas de resíduos de construção civil (RCC), sendo que 70% é descartado incorretamente. Em contrapartida ao crescimento do RCC gerado, os recursos naturais disponíveis estão cada vez mais escassos, o que impacta diretamente nos custos e viabilidade das grandes obras.

Considerando os argumentos apresentados, esta pesquisa se justifica para investigar o aproveitamento dos Resíduos de Construção Civil em aplicações de engenharia, com foco particular na área de pavimentação. Assim sendo, o objetivo deste estudo é analisar a evolução do comportamento da resistência à compressão simples ao incorporar RCC a um solo residual maduro (caso a mistura se comporte de forma a obter resistência suficiente e aumentá-la de acordo com o tempo de cura de 28 dias), visando avaliar o potencial de emprego da mistura solo-RCC em projetos de pavimentação.

2 METODOLOGIA

O Processo Metodológico adotado compreendeu uma sequência de procedimentos. Primeiramente, procedeu-se à extração do material natural de uma jazida de empréstimo, localizada nas dependências da Universidade Federal de Juiz de Fora, mediante as devidas autorizações. Em seguida, obteve-se o material proveniente da construção civil, conhecido como RCC (Resíduo da Construção Civil), cedido por uma empresa privada de consultoria da cidade de Juiz de Fora, Minas Gerais, para os propósitos da presente pesquisa.

No ambiente laboratorial, o próximo passo envolveu a exposição das amostras em bancadas, permitindo a adequada "secagem ao ar", visando determinar a umidade higroscópica dos materiais. Posteriormente, realizou-se o processo de destorroamento de todo o volume de material, utilizando-se de instrumentos como almofariz e mão de grão, com o intuito de eliminar quaisquer grumos presentes nas amostras.

Após essa etapa preliminar, procedeu-se a uma meticolosa revisão bibliográfica com base no estudo de Cândido (2023), visando a obtenção dos parâmetros cruciais de Limite de Liquidez, Limite de Plasticidade e Massa Específica dos Sólidos. Esse procedimento foi realizado em virtude da prévia caracterização e estudo do solo para esse fim específico.

A etapa subsequente foi dedicada aos ensaios de análise granulométrica, conduzidos em conformidade com as normas ABNT NBR 7181 e DNER ME080, para o solo e o RCC. Em relação ao Resíduo, os materiais foram fracionados em duas porções granulométricas distintas, conforme enviado pela empresa parceira: uma com granulometria maior e outra com granulometria menor. Esse processo culminou na obtenção de uma representação gráfica da distribuição granulométrica.

Após a realização dos ensaios preliminares, procedeu-se ao preparo das amostras, adotando uma mistura classificada conforme a Faixa Granulométrica de Serviço 3, em conformidade com a Especificação Técnica DE-P00/006. Esta composição apresentou uma distribuição percentual dos materiais: 32% de RCC de granulometria superior, 52% de RCC de granulometria inferior e 16% de solo, além da amostra de solo puro.

Após selecionar cápsulas contendo solo e a Mistura, estas foram submetidas a 24 horas em estufa para determinar a umidade. Em seguida, adicionou-se água para criar amostras com teores de umidade diferenciados. Esse processo foi validado pela retirada e verificação dos teores de umidade das cápsulas. As amostras foram compactadas com Energia Proctor Normal, seguindo a norma ABNT NBR 7182, resultando na obtenção da Curva de Compactação, que representa a densidade máxima e o teor de umidade ótimo para o material.

Após compactar mais cinco Corpos de Prova com a mistura especificada e sete com solo puro, utilizando os mesmos métodos anteriores, foram asseguradas amostras suficientes para o Ensaio de Resistência à Compressão Simples. Este ensaio, realizado de acordo com a norma ABNT NBR 12770, incluiu a desmoldagem precisa dos Corpos de Prova e a montagem cuidadosa do equipamento, juntamente com os acessórios necessários, como o LVDT (Transdutor para Medição de Deslocamento Linear), assim como mostrado na Imagem 1.

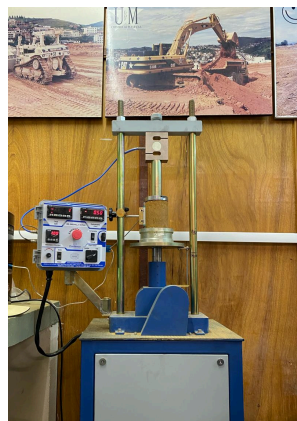


Imagem 1: Prensa de Resistência à Compressão Simples da UFJF montada com Corpo de Prova de solo. Autores, 2023.

Posteriormente, os resultados obtidos foram incorporados a uma planilha de cálculo especializada, a qual processou os dados e forneceu os valores de resistência correspondentes às amostras de Faixa 3 e Solo Puro. Este procedimento detalhado garantiu uma avaliação precisa e confiável da resistência dos materiais em estudo.

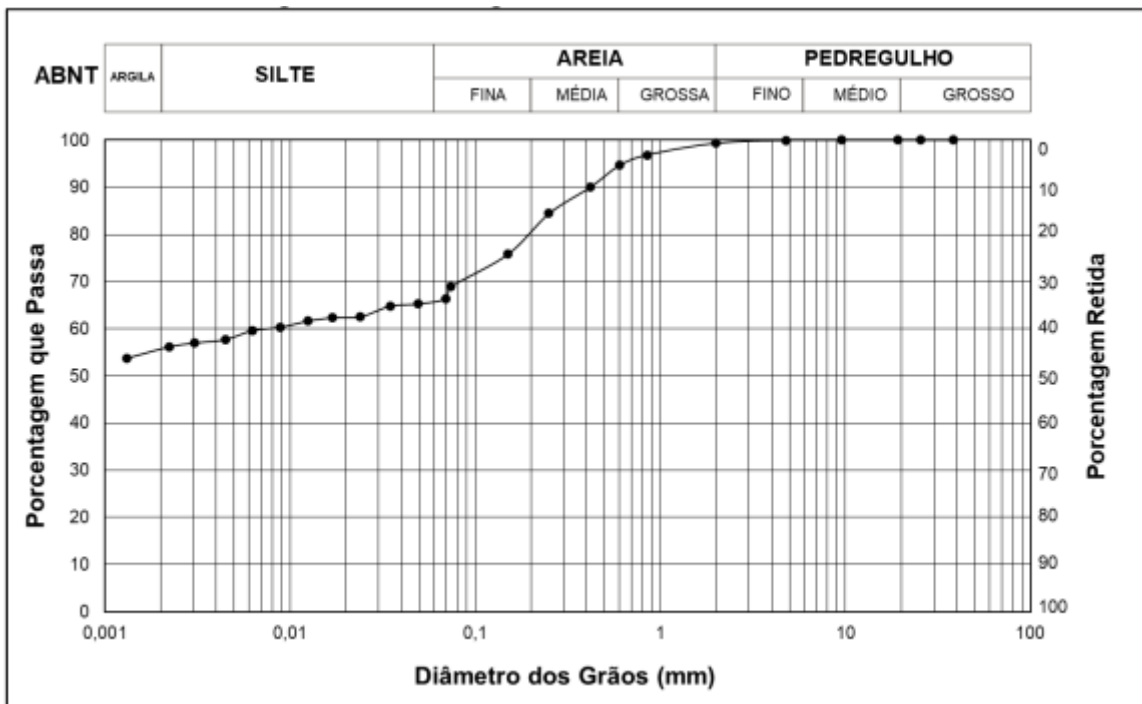
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após todo o procedimento dos ensaios de Análise Granulométrica, Compactação e Resistência à Compressão Simples, foi possível obter os dados necessários para a análise da utilização da mistura de Resíduo da Construção Civil com solo residual maduro em obras de pavimentação, como base ou sub-base de solo-brita.

Primeiramente, destaca-se os resultados obtidos nos ensaios de Limite de Liquidez, Limite de Plasticidade e Massa Específica dos Sólidos, conforme documentado. Nesse contexto, cabe ressaltar que o solo revelou um Limite de Liquidez (LL) de 40% e Limite de Plasticidade (LP) de 30%. O ensaio de Massa Específica dos Sólidos, por sua vez, apresentou um valor de 2,81 (Cândido, 2023).

Com os resultados da análise granulométrica, foi desenvolvido um gráfico que representa a Curva Granulométrica característica do material natural, representado pelo Gráfico 1.

Gráfico 1: Curva Granulométrica característica do solo estudado.



Fonte: Cândido, 2023,

Com base nos dados anteriores e nos resultados obtidos pelos ensaios, desenvolveu-se uma planilha utilizando o *Microsoft Excel* para aplicação do método gráfico de Rothfuchs, que consiste na adequação da proporção dos materiais utilizados para cada Faixa de serviço, no caso desta pesquisa a Faixa 3. Os resultados da análise granulométrica são apresentados na Tabela 1.

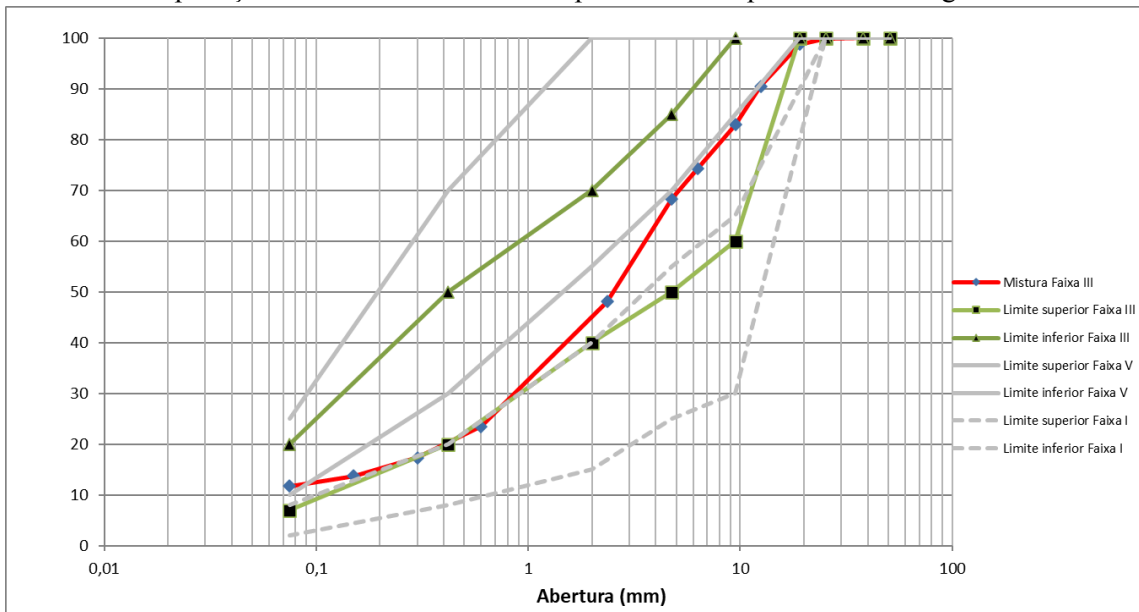
Tabela 1. Resumo da análise granulométrica aplicada no método de Rothfuchs.

Porcentagem dos componentes		32	52	16	Soma dos Componentes (%)
Peneira	Abertura (mm)	RCC Maior	RCC Menor	Solo Puro	Mistura
2"	50,8	100	100	100	100
1 1/2"	38,1	100	100	100	100
1"	25,4	99,60	100	100	100
3/4"	19,1	95,97	100	100	99
1/2"	12,5	70,23	100	100	90
3/8"	9,5	46,68	100	100	83
1/4"	6,3	19,81	99,83	100	74
4	4,75	3,82	98,29	99,96	68
8	2,36	1,03	61,26	99,36	48
30	0,6	0,59	15,78	94,65	24
50	0,3	0,42	7,10	84,44	17
100	0,15	0,26	3,00	75,81	14
200	0,075	0,09	1,32	68,93	12

Fonte: Autores, 2023.

Com base nos dados fornecidos na Tabela 1, foi elaborado o Gráfico 2, que identifica a proporção dos materiais que se adequam à Faixa de interesse.

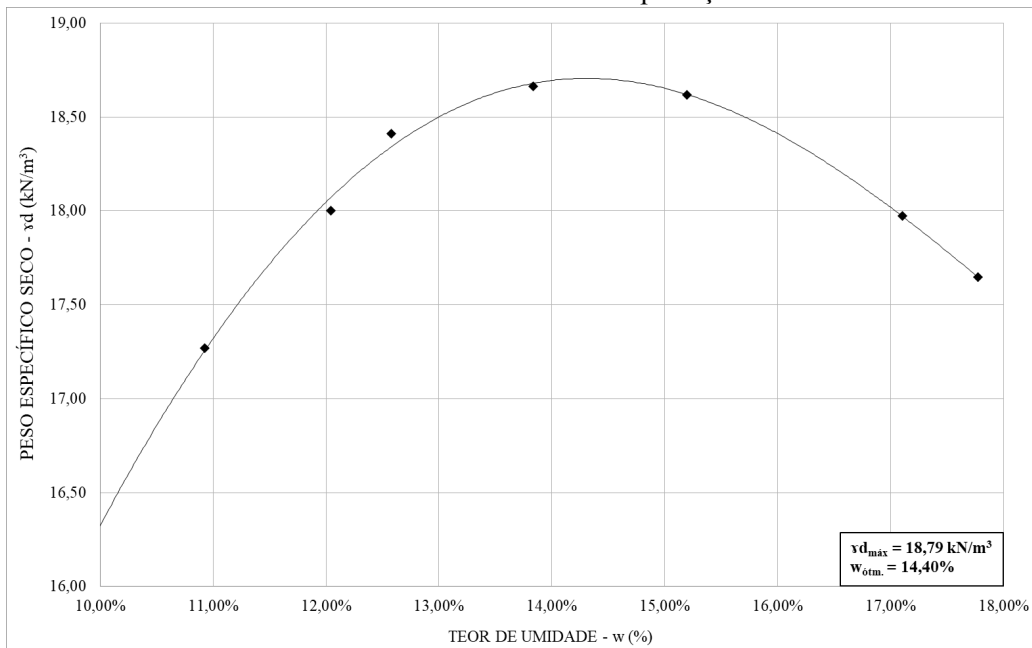
Gráfico 2: Aplicação do método de Rothfuchs para Faixa 3 a partir da análise granulométrica.



Fonte: Autores, 2023.

Com a definição da mistura, foi executado o ensaio de Compactação, com o objetivo de obter a umidade ótima da faixa estudada. Com objetivo de obter uma curva bem definida, foram testados 8 corpos de prova, e após a execução de todos eles, foi obtido o $w_{ótimo} = 14,40\%$ e o $\rho d_{máx} = 18,79 \text{ kN/m}^3$. No Gráfico 3 é possível ver com detalhes as umidades testadas, assim como os ramos seco e úmido.

Gráfico 3: Resultados Ensaio de compactação Faixa 3.



Fonte: Autores, 2023.

Após ser obtido o Teor de Umidade Ótimo para a mistura, foi possível realizar o ensaio de Resistência à Compressão Simples (RCS) em duas etapas diferentes, onde tanto o solo puro quanto a mistura solo-RCC seriam analisados, primeiramente sem cura e posteriormente após cura de 28 dias. Cada um dos Corpos de

Prova ensaiados tiveram seus Teores de Umidade e Massa Específica calculados e foram comparados com o ensaio de Compactação, com todos os resultados satisfatórios, tornando-os aptos para o ensaio de RCS. Para o resultado final foi calculado o valor da RCS média (média dos valores de resistência a compressão dos ensaios com coeficiente de variação inferior a 10%) dos materiais estudados, a Tabela 2 detalha os valores obtidos dos materiais sem cura.

Tabela 2. Resistência à Compressão Simples da mistura sem cura.

Material Ensaiado	Massa úmida (kg)	Peso Específico Úmido (kN/m ³)	Carga Máxima (Kgf)	RCS Média
Faixa 3	2,156	21,61802464	19	
Faixa 3	2,143	21,48767477	168	163,00
Faixa 3	2,143	21,48767477	162	
Solo	2,010	20,15	240	
Solo	2,072	20,59856167	234	236,67
Solo	2,072	20,17414916	236	

Fonte: Autores, 2023.

Assim, foi possível verificar que a RCS média obtida para o solo após o ensaio foi de 236 kPa, superior aos resultados obtidos para a mistura solo-RCC enquadrada na Faixa 3, que foi de 163 kPa.

No entanto, os resultados para a Resistência à Compressão Simples do solo e da Faixa 3 trazem uma mudança significativa se comparados os resultados sem cura e após cura de 28 dias, assim como detalhado na Tabela 3.

Tabela 3. Resistência à Compressão Simples da mistura com cura.

Material Ensaiado	Massa úmida (kg)	Peso Específico Úmido (kN/m ³)	Carga Máxima (Kgf)	RCS Média
Faixa 3	2,100	20,87692061	1174	
Faixa 3	2,092	20,9763022	1067	1176
Faixa 3	2,136	21,23481068	1287	
Solo	1,994	19,99	1672	
Solo	2,028	20,16114048	1353	1580
Solo	1,998	20,03377237	1715	

Fonte: Autores, 2023.

A Faixa 3 teve um aumento percentual maior, enquanto o ensaio para o tempo 0 teve uma resistência média de 163 kPa, após 28 dias foi de 1173 kPa (aumento de 720%), o solo teve um aumento de 667%.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O avanço nos estudos relacionados ao reaproveitamento de Resíduos da Construção Civil em projetos de pavimentação desempenha um papel crucial na redução do acúmulo de resíduos no Brasil e no cenário global. Nesse sentido, os ensaios realizados neste estudo revelam importância. No que concerne aos objetivos desta pesquisa, estes foram referentes à análise da evolução do comportamento da resistência à compressão simples com a adição de RCC a um solo residual maduro ao longo de 28 dias.

Os resultados obtidos demonstraram-se, dentro das possibilidades, evidenciando uma resistência adequada para aplicação em obras de pavimentação, além do aumento da resistência às tensões após o período de cura de 28 dias. É relevante salientar que quaisquer desafios enfrentados durante os ensaios foram superados com sucesso.

Entretanto, afirmar categoricamente que esse material é completamente apropriado para utilização em obras de pavimentação seria prematuro, uma vez que os dados disponíveis para sustentar tal alegação são insuficientes. Os resultados de Resistência à Compressão Simples, por si só, não são conclusivos. Portanto, é recomendável que os estudos prossigam visando caracterizar de forma mais abrangente a adequação da

amostra para aplicação em obras de pavimentação, por meio de ensaios como o Índice de Suporte Califórnia e o Módulo de Resiliência. Espera-se que este trabalho seja utilizado como referência para a continuidade de outras pesquisas e que possam oferecer uma afirmação com vistas a dar suporte à verificação da aplicação como material de pavimentação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal de Juiz de Fora, ao projeto de pesquisa e aos colaboradores pelo apoio para o desenvolvimento desta pesquisa..

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 12770: Solo - Ensaio de Resistência à Compressão Simples. Rio de Janeiro, 2011.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 7181: Solo — Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 2016.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 7182: Solo — Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro, 2016.
- Brasil. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 3 ago. 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm. Acesso em: 01 mar. 2024.
- CÂNDIDO, V. B. R. Avaliação do comportamento mecânico de solo residual em misturas com rejeito de minério de ferro. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2023.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER). ME 080: Agregados para misturas asfálticas. Rio de Janeiro, 1994.
- Secretaria dos Transportes - Departamento de Estradas e Rodagem de São Paulo. ET-DE-P00/006: Sub-base ou Base de Solo Brita. Revisão B. São Paulo, fev. 2006.
- Torres, Levi. 70% do entulho do Brasil é descartado incorretamente. Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição (ABRECON), 03 jun. 2023. Disponível em: <https://abrecon.org.br/artigos/70-do-entulho-no-brasil-e-descartado-incorretamente>. Acesso em: 01 mar. 2024.