

# Efeito da Substituição Parcial de Solo por Agregado Reciclado nos Parâmetros de Compactação de Mistura Estabilizada com Cal

José Wilson dos Santos Ferreira  
Professor Adjunto, UnB, Brasília, Brasil, jose.wilson@unb.br

Gustavo Maffort de Oliveira  
Estudante de graduação, UTFPR, Campo Mourão, Brasil, gustavomaffort@alunos.utfpr.edu.br

Lívia Vanessa da Silva Telino  
Estudante de graduação, UTFPR, Campo Mourão, Brasil, telino@alunos.utfpr.edu.br

**RESUMO:** A construção civil é uma das principais áreas responsáveis pela geração de resíduos, sendo de sua responsabilidade a busca por práticas mais sustentáveis. Dentre elas, a aplicação dos resíduos de construção civil (RCC) em aplicações geotécnicas possibilita a redução de uso de matéria-prima e aumento da vida útil dos aterros sanitários. Associado a isso, quando não se cumpre os requisitos de projeto, uma das possíveis soluções é a estabilização química do solo com o uso de cal. Assim, o presente estudo tem como objetivo avaliar o efeito da substituição parcial de 25% de solo por agregado reciclado nos parâmetros de compactação da mistura estabilizada com 8% de cal. Para isso, empregou-se solo argiloso, cal hidratada CH-III e RCC, realizando ensaios de caracterização, como análise granulométrica, massa específica, fluorescência de raios-x, assim como dosagem pelo método do pH e compactação na Energia Normal considerando o solo, solo-RCC, solo-cal e solo-RCC-cal. A partir da caracterização, observou-se elevada presença de ferro (53,9%) e alumínio (22,7%) na composição do solo, os quais afetaram o método do pH. Em comparação aos parâmetros de compactação do solo natural, percebeu-se que a inserção de RCC e cal resultaram em maior massa específica aparente seca máxima e menor teor de umidade ótima, demonstrando satisfatória interação entre os materiais e viabilidade técnica e ambiental da solução proposta.

**PALAVRAS-CHAVE:** Sustentabilidade, Agregado reciclado, Estabilização química, Cal, Compactação

**ABSTRACT:** Civil construction is one of the main areas responsible for generating waste, and it is its responsibility to search for more sustainable practices. Among them, the application of construction waste (CW) in geotechnical applications makes it possible to reduce the use of raw materials and increase the useful life of landfills. Associated with this, when project requirements are not met, one of the possible solutions is chemical stabilization of the soil, such as the use of lime. Therefore, the present study aims to evaluate the effect of partially replacing 25% of soil with recycled aggregate on the compaction parameters of the mixture stabilized with 8% lime. For this, clayey soil, hydrated lime CH-III and CW were used, carrying out characterization tests, such as granulometric analysis, specific mass, x-ray fluorescence, as well as dosing using the pH method and compaction at Normal Energy considering the soil, soil-CW, soil-lime and soil-CW-lime. From the characterization, a high presence of iron (53.9%) and aluminum (22.7%) was observed in the soil composition, which affected the pH method. In comparison to the natural soil compaction parameters, it was noticed that the insertion of CW and lime resulted in a higher maximum dry density and a lower optimum moisture content, demonstrating satisfactory interaction between the materials and the technical and environmental feasibility of the proposed solution.

**KEYWORDS:** Sustainability, Recycled aggregate, Chemical stabilization, Lime, Compaction

## 1 INTRODUÇÃO

Um dos principais setores responsáveis pela geração de resíduos é a construção civil, e esse cenário é agravado quando se considera o descarte incorreto desses resíduos, ainda que esses materiais apresentem

elevado potencial de reinserção na cadeia produtiva, em áreas como pavimentação e construção civil (Holanda et al., 2021).

No ano de 2022, o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) divulgou um crescimento de 9,7% do Produto Interno Bruto (PIB) da construção civil comparado ao ano de 2021, mostrando a crescente que o mercado vem experienciando e, ao mesmo tempo, expressando de forma indireta o aumento na geração de resíduos (IBGE, 2022).

Nesse sentido, relatório apresentado pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais – ABRELPE, em 2021 foram coletados cerca de 48 milhões de toneladas de resíduos de construção civil (RCC), o que representa um aumento de 2,9% em relação ao ano de 2020 (cerca de 47 milhões de toneladas de RCC). O estado do Paraná foi responsável por cerca de 6,6 milhões de toneladas de RCC, equivalente a 13,6% da produção nacional (ABRELPE, 2022).

No Brasil, o material mais encontrado nos RCC é de argamassa de concreto, representando 63%. Com isso, o material reciclável produzido em maior quantidade é a brita corrida reciclada (cerca de 38%), seguida por concreto e blocos (29%), areia reciclada (18%) e britas 1,2 e 3 recicladas (13%) (ABRECON, 2015; SINIR 2020).

Como solução para adoção de práticas sustentáveis na Engenharia e alternativa para a elevada geração de resíduos de construção civil, tem-se desenvolvido pesquisas com foco no uso do agregado reciclável em diversas aplicações, como em misturas cimentadas para pavimentação (Milani et al., 2022), em estruturas de contenção (Holanda et al., 2021), em pisos intertravados e produção de blocos de concreto vazados para vedação (Suave, 2022).

Ainda assim, misturas de solo-RCC podem apresentar limitações de comportamento mecânico para emprego em projetos geotécnicos. Dentre as soluções possíveis, a mais tradicional é a estabilização química com agentes como a cal e o cimento. Estudo realizado por Marino e Carvalho (2021) em solo argiloso de Brasília demonstrou que a utilização de teores de 2% e 5% de cal CH-I produziu efeitos de agregação, além de aumentar o teor de umidade ótima das misturas e redução da massa específica seca máxima. Já Milani *et al.* (2022) substituíram solo arenoso por RCC em misturas estabilizadas quimicamente com cimento, demonstrando resultados satisfatórios de comportamento mecânico para substituições de solo por RCC até 50%. Acima dessa quantidade, os autores argumentam que o cimento deixa de agir como um estabilizante químico e age apenas como filler, preenchendo os vazios da mistura.

Devido à grande variabilidade do solo, das características e propriedades dos RCC e solicitações de projetos, estudos precisam ser realizados para se entender o comportamento e particularidades das misturas de solo-RCC-cal em função das características regionais. Desta forma, o presente trabalho busca avaliar o efeito nos parâmetros de compactação da substituição de solo por 25% de agregado de construção civil em mistura estabilizada com cal, a fim de se compreender a interação entre os materiais e sua resposta em parâmetros fundamentais para projetos geotécnicos.

## **2 METODOLOGIA**

### **2.1 Materiais**

Os materiais foram adquiridos na região de Campo Mourão/PR. O solo foi coletado nas dependências da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). A água utilizada foi a destilada para os ensaios de caracterização e da rede de abastecimento para os ensaios de compactação. A cal utilizada nos procedimentos foi a cal hidratada CH-III e o agregado reciclado que foi obtido em indústria de beneficiamento na cidade de Londrina/PR.

### **2.2 Caracterização dos materiais**

Inicialmente o solo foi preparado segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT NBR 6457 (2016), sendo realizada a secagem ao ar, destorroamento, homogeneização, quarteamento e armazenamento. Na sequência foram realizados os ensaios de granulometria sem defloculante (ABNT NBR 7181, 2016), índices de consistência (ABNT NBR 6459, 2016; ABNT NBR 7180, 2016) e massa real dos grãos (ABNT NBR 6458, 2016). A Figura 1 demonstra algumas etapas de caracterização dos materiais. Para

o agregado reciclado, foram realizados os ensaios de massa específica dos sólidos e granulometria por peneiramento, de acordo com as normas mencionadas anteriormente.

Buscando compreender o comportamento e composição dos materiais, foram preparadas 10 gramas de solo, cal e RCC para o ensaio de fluorescência de raios-x (FRX). Essas amostras foram obtidas através do peneiramento dos materiais utilizando a peneira de 0,075 mm e enviadas para análise no Laboratório Multiusuário da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

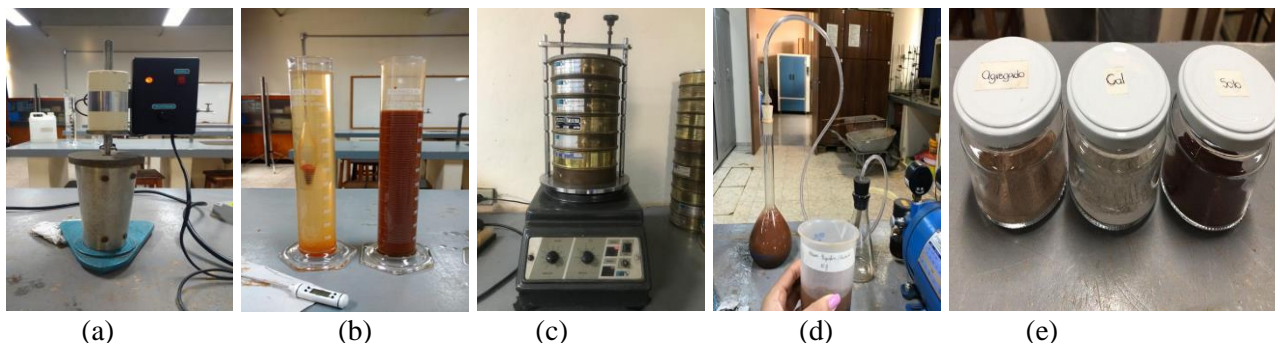


Figura 1. Ensaios: (a) e (b) sedimentação; (c) peneiramento; (d) massa real dos grãos; (e) FRX.

### 2.3 Método do pH

A norma do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT 419 (2019) tem como objetivo estimar o teor de cal necessário para estabilização do solo. Também conhecida como método do pH, sugerido por Eades e Grim (1966), consiste em medir o pH do solo com variação do teor de cal, com o intuito de alcançar o valor de pH igual a 12,4, estabelecido como o teor mínimo para estabilizar o solo.

Para a análise do pH, foram adotados os teores de cal de 2%, 4%, 6%, 8% e 10% em relação a massa seca de solo, a qual foi de 25 g, previamente passante na peneira nº 40, assim como uma mistura sem solo e com 2 g de cal, considerada referência. Logo depois, a mistura foi colocada em um recipiente de vidro com 100 ml de água destilada com tampa e identificação como mostrado na Figura 2a. A agitação da mistura foi realizada por 30 segundos, com intervalos de 10 minutos para se obter uma mistura homogênea. Após 1 hora da conclusão do processo, foram registrados os valores de pH para cada amostra (Figura 2b).

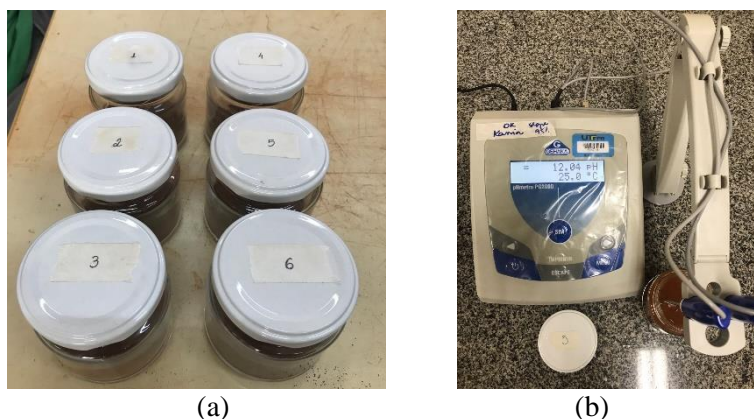


Figura 2. Ensaio do pH: (a) preparação das amostras; (b) medidor de pH.

### 2.4 Curvas de Compactação

Os parâmetros de compactação do solo, isto é, massa específica aparente seca máxima ( $\rho_{dmax}$ ) e teor de umidade ótima ( $\omega_{ót}$ ), foram determinados com base na norma ABNT 7182 (2016), considerando o solo, solo-RCC, solo-cal e solo-RCC-cal. A partir do trabalho realizado por Milani *et al.* (2022), foi adotado a substituição de 25% de solo por resíduo de construção civil.

As curvas de compactação do solo, solo-RCC, solo-cal e solo-RCC-cal foram construídas utilizando energia normal de Proctor, aplicando 26 golpes em cada uma das três camadas com auxílio de soquete de 2,5

kg caindo a altura de queda de 30,5 cm. Vale ressaltar que entre camadas adjacentes foi realizada escarificação, a fim de aumentar a aderência entre elas.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Caracterização dos materiais

As curvas de distribuição granulométrica do solo e RCC são apresentadas na Figura 3. Observa-se a distinção do tamanho das frações que compõem ambos materiais, enquanto o solo é predominantemente composto de parcela fina, o agregado reciclado compreende material grosso do tipo pedregulho.

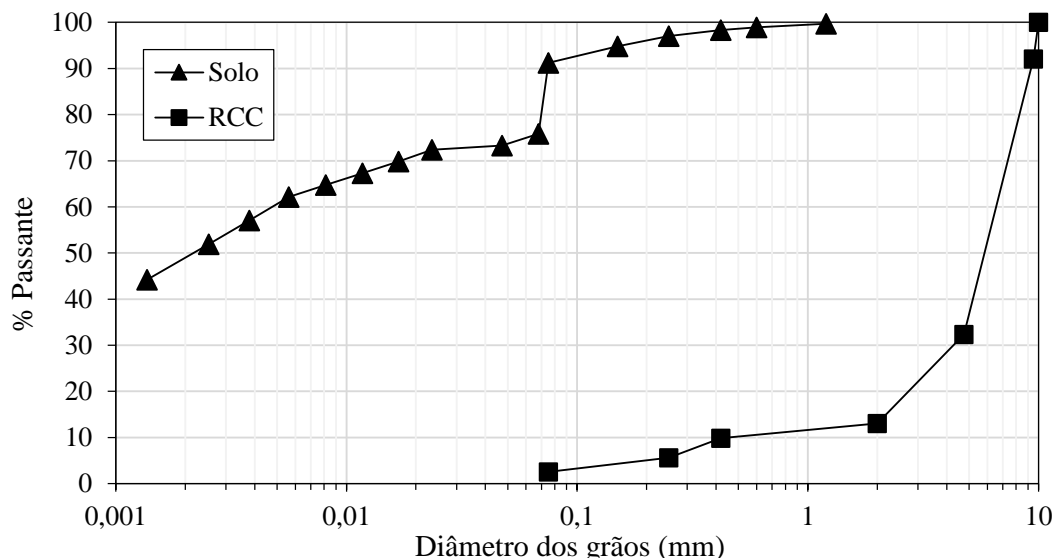


Figura 3. Curva de distribuição granulométrica do solo e RCC.

A Tabela 1 apresenta os resultados de caracterização física do solo e agregado reciclado. Pontua-se que seguiu-se a ABNT NBR 6502 (2022) ao atribuir o as nomenclaturas das frações.

Tabela 1. Caracterização física do solo e RCC.

Parâmetro	Unidade	Valor	
		Solo	RCC
Massa real dos grãos - gamas	g/cm <sup>3</sup>	3,24	1,92
Limite de Liquidez - LL	%	51	-
Limite de Plasticidade - LP	%	33	-
Índice de Plasticidade - IP	%	18	-
Pedregulho médio (6 - 20 mm)	%	0	46
Pedregulho fino (2 - 6 mm)	%	0	40
Areia grossa (0,6 - 2 mm)	%	1	4
Areia média (0,2 - 0,6 mm)	%	3	5
Areia fina (0,06 - 0,2 mm)	%	21	5
Silte (0,002 - 0,06 mm)	%	25	0
Argila (< 0,002 mm)	%	50	0

A partir das informações anteriores, o solo é classificado pela *American Association of State Highway and Transportation Officials* – AASHTO e Sistema unificado de Classificação de Solos – SUCS como A-7-5 e MH, respectivamente. Atribui-se a classificação do solo pela sistemática SUCS devido ao elevado grau de intemperismo químico sofrido pelo solo bem como a obtenção da granulometria sem uso de defloculante.

Os resultados de fluorescência de raios-X são apresentados na Figura 4. Os elementos químicos mais relevantes presentes no solo são o ferro (Fe), alumínio (Al) e silício (Si), correspondentes aos percentuais de 53,9%, 22,7% e 16,6%, respectivamente. A partir dessa composição química e considerando-se a semelhança no processo de formação dos solos da região noroeste do Parná originários de derrames basálticos, é de se esperar que os minerais presentes no solo sejam o quartzo [SiO<sub>2</sub>], óxido de ferro [Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>] e caulinita [Al<sub>2</sub>(Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)(OH)<sub>4</sub>], conforme observações de Gonçalves *et al.* (2018).

Já no caso da cal (Fig. 4b), vê-se que 95,6% da concentração diz respeito à presença de cálcio (Ca), o que serve de indicativo da pureza do material. No RCC, os elementos químicos com maior presença na sua composição são o ferro, cálcio e silício, os quais corroboram com a identificação da composição desse agregado, isto é, argamassas e materiais cerâmicos.

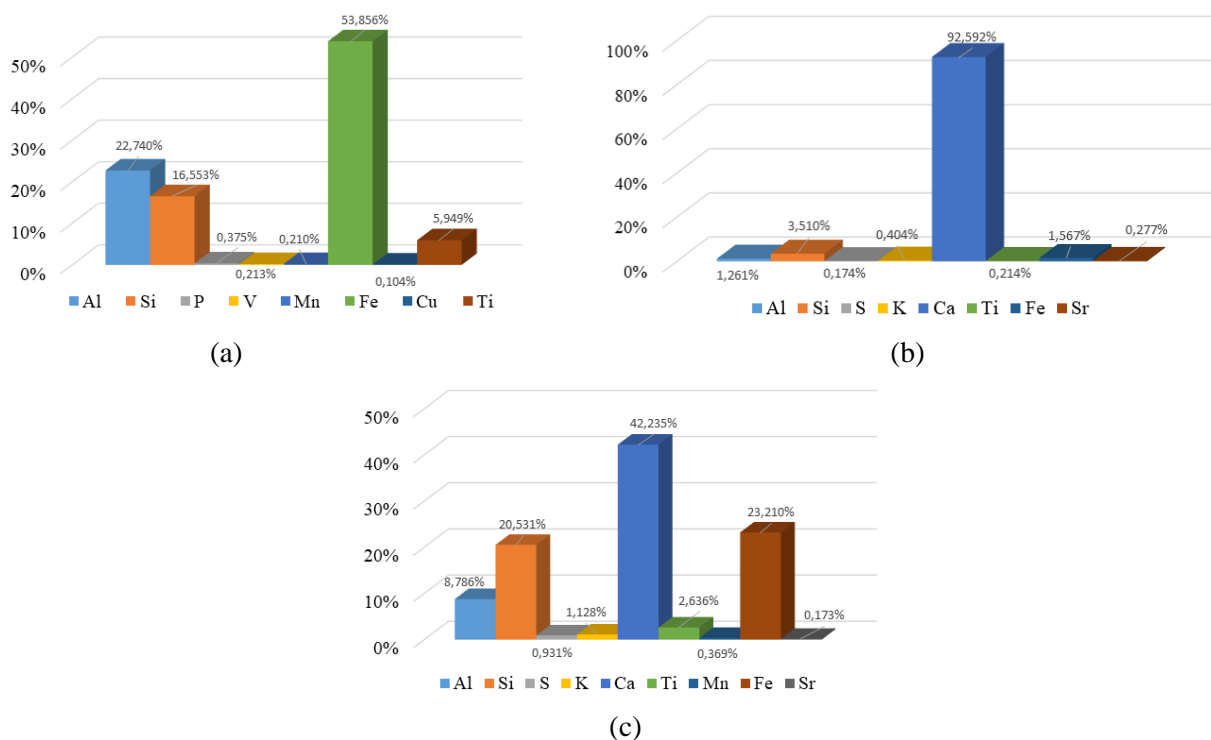


Figura 4. FRX dos materiais: (a) solo; (b) cal; (c) RCC.

### 3.2 Método do pH

Na Figura 5 são mostrados os resultados do teste de pH, a fim de estimar a quantidade mínima de adição de cal ao solo. Verificou-se que os valores obtidos não alcançaram o pH mínimo de 12,4 para nenhum teor de cal hidratada necessário para a estabilização do solo, conforme recomendado pela norma do DNIT 419 (2019).

Ressalta-se que o teor significativo de alumínio e ferro presentes no solo, 22,7% e 53,9% respectivamente, demonstra que se trata de solo tropical residual rico em óxi-hidróxidos de alumínio e ferro, em que o valor de pH de 12,4 não será atingido, em decorrência do início precoce das reações químicas, em que o hidróxido de cálcio é consumido muito rapidamente pelas reações, conforme observação do DNIT (2019). Comportamento semelhante foi demonstrado por Medeiros, Silva e Furlan (2019) ao compararam a eficácia do método do pH para solos argilosos lateríticos e não lateríticos.

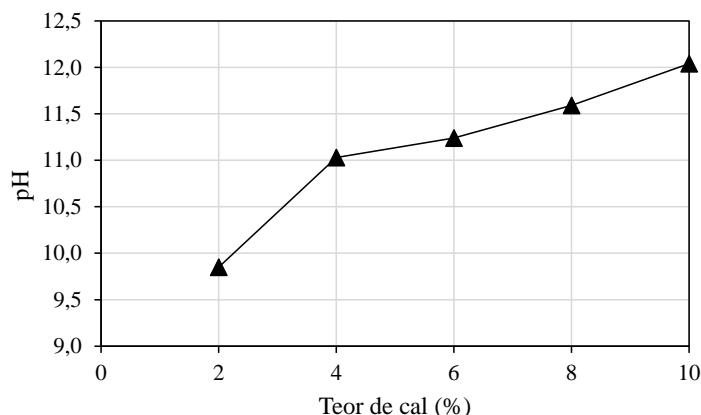


Figura 5. Resultados dos testes de pH.

Dado que o método do pH não apresentou eficiência na faixa investigada e considerando observações de estudos prévios de estabilização química no mesmo solo utilizado neste estudo, optou-se por utilizar 8% de cal, valor compreendido entre 6-10%, faixa associada ao processo de estabilização química.

### 3.3 Parâmetros de compactação

As curvas de compactação para o solo, solo-RCC, solo-cal e solo-RCC-cal são mostradas na Figura 6, ao passo que os parâmetros de compactação obtidos estão dispostos na Tabela 2.

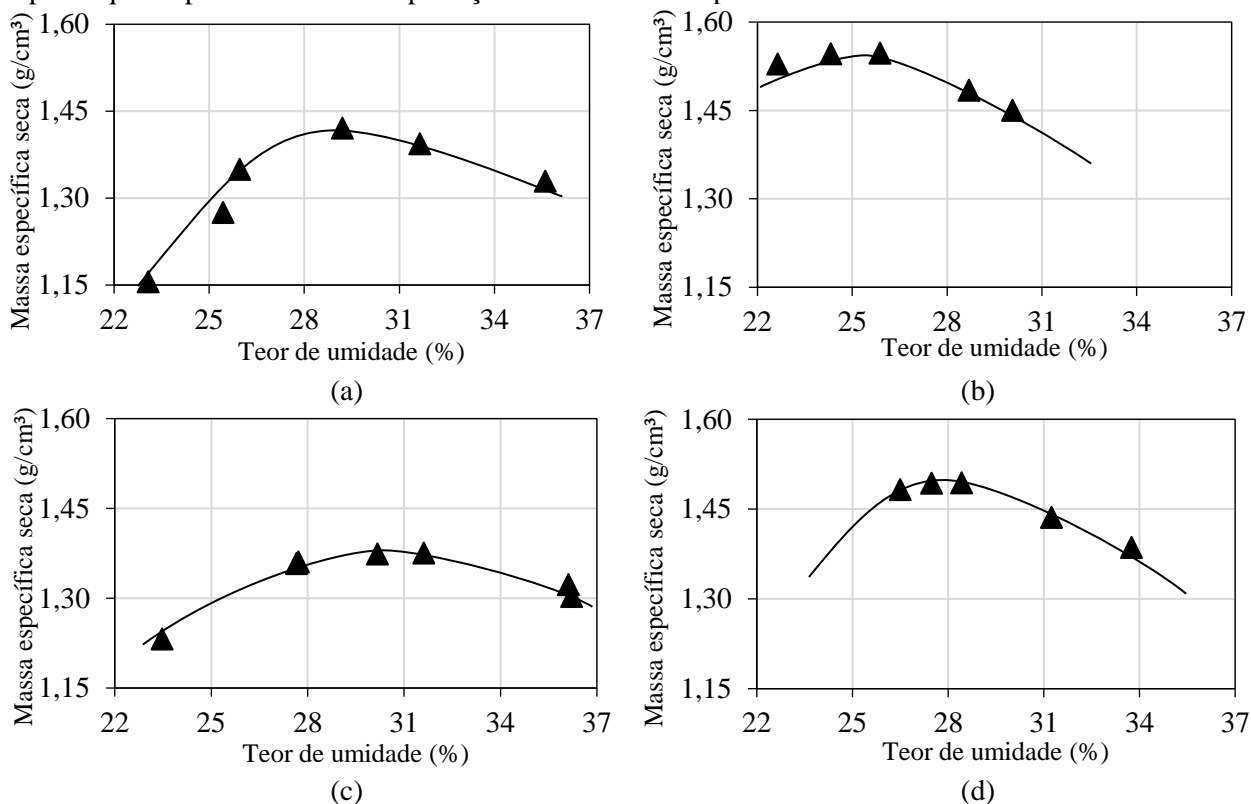


Figura 6. Curvas de compactação: (a) solo; (b) solo-RCC; (c) solo-cal; (d) solo-RCC-cal.

Pode-se notar que a massa específica aparente seca máxima do solo é de  $1,42 \text{ g/cm}^3$  e teor de umidade ótima de 28,8%. Com a inserção do agregado é notório uma mudança nas características do solo, já que seu teor de umidade ótima reduziu para 25,3% e sua massa específica aparente seca máxima aumentou para  $1,55 \text{ g/cm}^3$ , o que resulta de melhor interação entre o agregado reciclado e solo argiloso. Pressupõe-se os vazios criados pelo material de maior dimensão, isto é, o RCC, são preenchidos pelo solo fino e, conseqüentemente, há menor quantidade de vazios para serem preenchidos pela água.

Tabela 2. Parâmetros de compactação das misturas.

Condição Experimental	Teor de umidade ótima (%)	Massa específica aparente seca máxima (g/cm <sup>3</sup> )
Solo	28,8	1,42
Solo-RCC	25,3	1,55
Solo-Cal	30,6	1,37
Solo-RCC-Cal	27,8	1,50

Para o solo-cal, observou-se redução na massa específica aparente seca máxima e aumento no teor de umidade ótima. Isso se deve à menor densidade da cal em comparação com a densidade do solo. Além disso, por ser um material mais fino, a inserção de cal no solo resulta na necessidade de uma maior quantidade de água para hidratação e reações químicas da cal com as partículas do solo.

Por fim, na mistura de solo-RCC-cal é observado comportamento intermediário entre as misturas solo-RCC e solo-cal, em virtude das características particulares de cada mistura descritas anteriormente. Em comparação do solo natural compactado, percebe-se o efeito benéfico que a substituição de 25% de solo por RCC produz, reduzindo a quantidade de água e aumentando a densificação da mistura, possibilitando uma diminuição do consumo de matéria-prima e utilização de resíduo de construção civil.

#### 4 CONCLUSÕES

Ao avaliar o efeito da substituição parcial de solo argiloso por agregado reciclado em mistura estabilizada com cal, observou-se que:

- devido a quantidade de ferro e alumínio presentes no solo, o método do pH não foi eficiente para determinar a quantidade de cal a ser adicionada ao solo;
- no que diz respeito a ensaio de compactação, os resultados mostraram que a inserção de agregado diretamente no solo provoca aumento na massa específica aparente seca máxima e redução do teor de umidade ótima da mistura. Entretanto, quando a cal é inserida na mistura, ela causa efeito reverso em relação a mistura solo-RCC, pois provoca a diminuição da massa específica seca máxima e aumento do teor de umidade ótima, em decorrência da menor densidade da cal e maior área superficial para ser hidratada;
- em comparação do solo natural compactado com a mistura solo-RCC-cal, observa-se que a substituição de 25% de solo por RCC resulta em maior densificação, indicativo da satisfatória interação entre os materiais, demonstrando a viabilidade técnica e ambiental da solução apresentada para redução do consumo de matéria-prima e adoção de práticas sustentáveis com a utilização de resíduos de construção civil.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRECON – Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição. (2015). Relatório de geração de resíduos. Disponível em: <https://abrecon.org.br/leis-e-normas>. Acesso em: 04 jun. 2023.
- ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. (2022). Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil. 04 jun. 2022. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama-2022/>. Acesso em: 04 jun. 2023.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2016). NBR 6457. Amostra de solo - preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2016). NBR 6458. Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm – determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro.

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2016). NBR 6459. Solo - determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2022). NBR 6502. Solos e rochas - terminologia. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2016). NBR 7180. Solo - determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2016). NBR 7181. Solo: análise granulométrica. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2016). NBR 7182. Solo: ensaio de compactação. Rio de Janeiro.
- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. (2019). DNIT 419/2019 - ME. Pavimentação - solo-cal - estimativa do teor mínimo de cal para estabilização química de solo - método de ensaio. Brasília.
- Eades, J. L.; Grim, R. E. (1966). A quick test to determine lime requirements for lime stabilization. Highway research record, 139 (1966). Disponível em: <<https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/hrr/1966/139/139-005.pdf>>. Acesso em: 14 mar. 2024.
- Gonçalves, F. et al. (2018). Caracterização físico-química e mineralógica de três solos do estado do Paraná. In: XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Anais...COBRAMSEG.
- Holanda, S. H. B. et al. (2021). Avaliação da influência do glicerol sobre a geração de biogás de resíduos sólidos urbanos através do teste BMP. Brazilian Journal Development, v.7, n. 5, p. 44257-44267. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/29216/23036>. Acesso em: 04 jun. 2023.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2022). Aumento da geração de resíduos no ano de 2022. Produto Interno Bruto (PIB). Disponível em: <<https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/34748-pib-cresce-1-2-no-2-trimestre-de-2022>>. Acesso em: 04 jun. 2023.
- Marino, D. M.; Carvalho, J. C. (2021). Influência da estabilização com cal em um perfil de solo tropical. In: 1º Simpósio Virtual de Práticas de Engenharia Geotécnica da Região Sul – e-Geosul 2021, Paraná. Anais... ABMS, p. 1-6.
- Medeiros, A. A. L.; Silva, M. F.; Furlan, A. P. (2019). Avaliação comparativa dos métodos de dosagem pH e de Thompson para a estabilização com cal de dois solos tropicais. In: 33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET, Balneário Camboriú-SC. Anais... ANPET, p. 2040-2051.
- Milani, D. M. et al. (2022). Effect of Sandy Soil Partial Replacement by Construction Waste on Mechanical Behavior and Microstructure of Cemented Mixtures. Sustainability, v. 14, n. 19, p. 12438, 2022. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2071-1050/14/19/12438>>. Acesso em: 14 mar. 2024.
- SINIR – Sistema Nacional de Informação sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos. (2020). Relatório Nacional de Gestão de Resíduos Sólidos. Disponível em: <https://sinir.gov.br/relatorios/nacional/>. Acesso em: 04 jun. 2023.
- Suave, L. Avaliação dos agregados de resíduos da construção civil em matriz geopolimérica visando aplicação em pisos intertravados. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2022.