XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/56

Análise de Desempenho e Estimativa da Resistência de Misturas Cimentícias de Solo, Resíduo de Construção Civil e Pó de Pedra

Juliana Maria de Souza
Doutoranda, UEM, Maringá, Brasil, jmaria.eng@gmail.com

Rafaela Chagas Rudnick
Engenheira civil, UEM, Maringá, Brasil, rafaelacrudnick@gmail.com

Gleicy Loany de Alencar Cardoso
Doutoranda, UEM, Maringá, Brasil, pg56011@uem.br

Juliana Azoia Lukiantchuki
Professora Associada, UEM, Maringá, Brasil, jalukiantchuki@uem.br

RESUMO: O solo-cimento é um material que apresenta comportamento satisfatório para uso em aterros, taludes, fundações e como base e sub-base de pavimentos. Entretanto, a incorporação de cimento em solos coesivos pode causar o aparecimento de fissuras de retração no material, sobretudo com maiores teores do aglomerante. A incorporação de resíduo de construção civil (RCC) e o pó de pedra é uma alternativa para a redução do uso de cimento e mitigação desses problemas, pois melhoram a distribuição granulométrica do solo e colaboram com o ganho de resistência. O objetivo desse trabalho é avaliar a incorporação de cimento Portland, RCC e pó de pedra como materiais estabilizantes de um solo laterítico argiloso de alta plasticidade e estimar a equação de resistência pelo método de dosagem porosidade/cimento proposto por Consoli *et al*. (2007). Os ensaios analisaram misturas cimentícias de solo, solo com RCC e solo com pó de pedra, contendo 50% de cada material. Os teores de cimento usados foram de 4%, 6% e 8%. A caracterização do solo natural e das misturas foi feita por meio de ensaios físicos, químicos e mecânicos. Os coeficientes de determinação (R^2) encontrados para cada misturas indicaram que as relações porosidade/cimento (η/C_{iv}^{ξ}) determinadas foram satisfatórias.

PALAVRAS-CHAVE: Solo Laterítico Argiloso, Solo-cimento, Resíduo de Construção Civil, Pó de Pedra, Dosagem Porosidade/Cimento.

ABSTRACT: Soil–cement is a material that shows satisfactory performance for use in embankments, slopes, foundations, and as base and subbase layers of pavements. However, incorporating cement into cohesive soils can lead to the formation of shrinkage cracks in the material, especially at higher binder contents. The incorporation of construction waste (CW) and quarry dust is an alternative to reduce cement consumption and mitigate these issues, as they improve the soil's particle-size distribution and contribute to strength gain. This study aims to evaluate the incorporation of Portland cement, CW, and quarry dust as stabilizing materials for a highly plastic lateritic clayey soil and to estimate the strength equation using the porosity/cement dosage method proposed by Consoli *et al*. (2007). The tests analyzed cemented mixtures of soil, soil with CW, and soil with quarry dust, containing 50% of each material. The cement contents used were 4%, 6%, and 8%. The natural soil and the mixtures were characterized through physical, chemical, and mechanical tests. The coefficients of determination (R^2) found for each mixture indicated that the porosity/cement relationships (η/C_{iv}^{ξ}) determined were satisfactory.

KEYWORDS: Lateritic clayey soil, Soil-cement, Construction waste, Quarry dust, Porosity/cement dosage.

1 INTRODUÇÃO

Solos argilosos em misturas de solo-cimento são desafiadores por terem baixa resistência e alta compressibilidade, sofrerem variações volumétricas com a umidade e apresentarem alta plasticidade, o que pode causar instabilidade e deformações excessivas, prejudicando a qualidade do material. A correção granulométrica melhora o desempenho das misturas ao estabilizar a matriz do solo, favorecendo a compactação, reduzindo os vazios e elevando a resistência à compressão. Além disso, o uso de resíduos para ajustar solos argilosos contribui para a sustentabilidade e para a redução de emissões de carbono, impulsionando o desenvolvimento de materiais e técnicas alternativas que atendam aos requisitos estruturais (Briskievicz *et al*., 2025).

A estabilização de solos argilosos com resíduo de construção civil reduz a massa específica seca, aumenta a resistência à compressão não confinada, tornando a mistura mais resistente e rígida, e melhora os parâmetros de compactação (Suluguru *et al*., 2018; Kianimehr *et al*., 2019). A incorporação de pó de pedra ao solo reflete no aumento da massa específica aparente seca e diminuição da umidade necessária para compactação, além de colaborar para a redução do teor de cimento necessário para elevar a resistência do material (Pissato e Soares, 2006; Yilmaz e Yurdakul, 2017; Mishra *et al*., 2019).

Consoli *et al*. (2007) propuseram um método de dosagem para o solo-cimento que leva em consideração o volume de vazios (V_v) e o inverso do volume de cimento ($^1/_{V_{ci}}$). Para uma representação mais elegante, os autores propuseram utilizar a porosidade (η) expressando uma porcentagem do volume de vazios em relação ao volume total (Equação 1). Por sua vez, o índice volumétrico de cimento (C_{iv}) é utilizado para representar a porcentagem do volume de cimento em relação ao volume total (Equação 2).

$$\eta = \frac{V_v}{V} \tag{1}$$

$$C_{iv} = \frac{V_{cim}}{V} \tag{2}$$

Para que haja um melhor ajuste entre a resistência à compressão não confinada (q_u) e a razão vazios/cimento é preciso aplicar uma potência ξ ao parâmetro C_{iv}, em que a razão vazios/cimento fica representada pela relação $^{\eta}/_{C_{iv}^{\xi}}$ (Consoli *et al*., 2007).

A potência ξ ao parâmetro C_{iv} varia de acordo com o tipo de solo-cimento analisado. Consoli *et al*. (2007) encontraram o valor de potência de 0,28 para um solo classificado como areia argilosa. Em contrapartida, Consoli *et al*. (2011) estudaram solos classificados como argila arenosa e argila siltosa, sendo que para esses materiais a potência adequada foi de 0,35. Assim, a relação de resitência à compressão não confinada definidas nesses trabalhos para a areia argilosa, argila siltosa e argila arenosa são representadas pelas Equações 3, 4 e 5.

$$q_u(kPa) = 5{,}03.10^7 \left[\frac{\eta}{(C_{iv})^{0,28}}\right]^{-3,32} \tag{3}$$

$$q_u(kPa) = 4{,}34.10^8 \left[\frac{\eta}{(C_{iv})^{0,35}}\right]^{-3,55} \tag{4}$$

$$q_u(kPa) = 1{,}04.10^7 \left[\frac{\eta}{(C_{iv})^{0,35}}\right]^{-2,85} \tag{5}$$

Utilizando a porosidade da mistura compactada e o índice volumétrico de cimento ajustado por um expoente, que varia dependendo do solo e do cimento utilizado, o engenheiro pode escolher o teor de cimento e o grau de compactação adequados para que a mistura atinja a resistência do projeto a um custo apropriado. Além disso, a relação vazios/cimento é útil para o controle de compactação em campo das camadas de solo-cimento a partir da análise da curva de q_u por $^{\eta}/_{C_{iv}^{\xi}}$. Ao se identificar a compactação inadequada de uma

camada, é possível avaliar as necessidades do projeto e adotar medidas corretivas como o reforço da camada ou a redução da carga atuante (Consoli *et al*., 2007).

Diante disso, este trabalho tem como objetivo avaliar a estabilização de um solo argiloso por meio da incorporação de cimento, resíduo de construção civil e pó de pedra, com ênfase no desempenho mecânico e na resistência à compressão não confinada. Adicionalmente, busca-se ajustar uma equação de dosagem baseada na relação η / C_{iv}^{ξ}, conforme o método proposto por Consoli *et al*. (2007).

2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS E MISTURAS

2.1 Materiais

Os materiais selecionados para esta pesquisa foram solo laterítico, resíduo de construção civil, pó de pedra e cimento CP II–Z32, em que o aspecto visual dos materiais são mostrados na Figura 1.

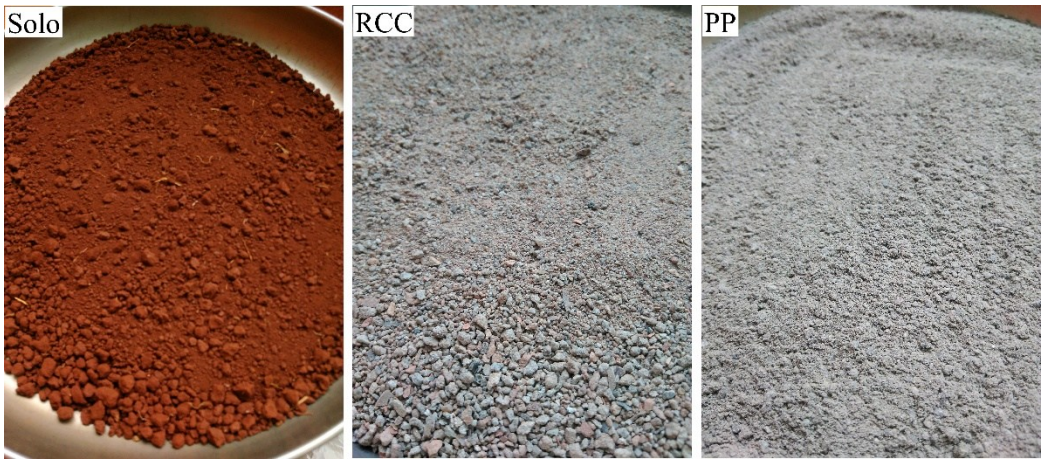


Figura 1. Aspecto visual do solo, RCC e pó de pedra

O solo foi coletado na cidade de Maringá, noroeste do estado do Paraná, no campus sede da Universidade Estadual de Maringá. O solo é classificado como Latossolo Vermelho Distroférrico, de acordo com a Embrapa, e como laterítico argiloso (LG') pela classificação MCT. A massa específica é de 3,24 g/cm³.

O resíduo de construção civil (RCC) foi cedido pela Usina Nova Obra, na cidade de Arapongas, noroeste do estado do Paraná. O processamento do resíduo na usina era composto por triagem manual seguida de peneiramento grosso, visando a remoção de contaminantes e materiais descartados de forma irregular. Em seguida, o material era encaminhado ao britador e separado automaticamente por faixa granulométrica. O resíduo selecionado é composto principalmente por componentes de concreto, como fragmentos de elementos estruturais, resíduos de concreteiras e partes de paredes com quantidade elevada de argamassa. De acordo com as informações da usina, o RCC coletado continha de 30% a 35% de cerâmica, sendo o restante composto por concreto. O RCC usado nessa pesquisa possui massa específica de 2,77 g/cm³ e granulometria inferior a 2 mm, sendo seco até a umidade higroscópica.

O pó de pedra (PP) foi cedido pela EXTRACOM Mineração e Obras Ltda, na cidade de Maringá, noroeste do estado do Paraná. Esse material compõe cerca de 75% da Bacia do Paraná e é originário dos derrames basálticos da Era Paleozóica. Nessa pesquisa, a granulometria adotada para o pó de pedra foi inferior a 2 mm, de modo a proporcionar a adequada homogeneização com o RCC e permitir a comparação dos parâmetros. A massa específica do pó de pedra é de 3,14 g/cm³.

O cimento escolhido para essa pesquisa foi o CP II – Z32 da Votoran, devido à sua composição com 6% a 14% de pozolana e até 10% de material carbonático. Além disso, esse aglomerante confere certa impermeabilidade às misturas e oferece uma boa trabalhabilidade.

2.2 Misturas

Nessa pesquisa foram adotadas três misturas para avaliação de comportamento, em que a mistura de resíduos é a principal e a de solo foi utilizada como parâmetro comparativo, sendo elas:

- S: composta por solo natural;
- S_RCC: composta por 50% solo e 50% RCC;
- S_PP: composta por 50% solo e 50% pó de pedra.

À essas misturas foram incorporados os seguintes teores de cimento: 0%, 4%, 6% e 8%. Todas as misturas foram preparadas em termos de massa seca. A Tabela 1 apresenta as misturas avaliadas, sua composição e massa específica e a Figura 2 mostra as curvas granulométricas.

Tabela 1. Composição das misturas avaliadas.

Mistura	Solo (%)	RCC (%)	PP (%)	Cimento (%)	Massa específica (g/cm³)
S	100	0	0	0	3,24
S_4	96	0	0	4	
S_6	94	0	0	6	
S_8	92	0	0	8	
S_RCC	50	50	0	0	2,93
S_RCC_4	48	48	0	4	
S_RCC_6	47	47	0	6	
S_RCC_8	46	46	0	8	
S_PP	50	0	50	0	3,10
S_PP_4	48	0	48	4	
S_PP_6	47	0	47	6	
S_PP_8	46	0	46	8	

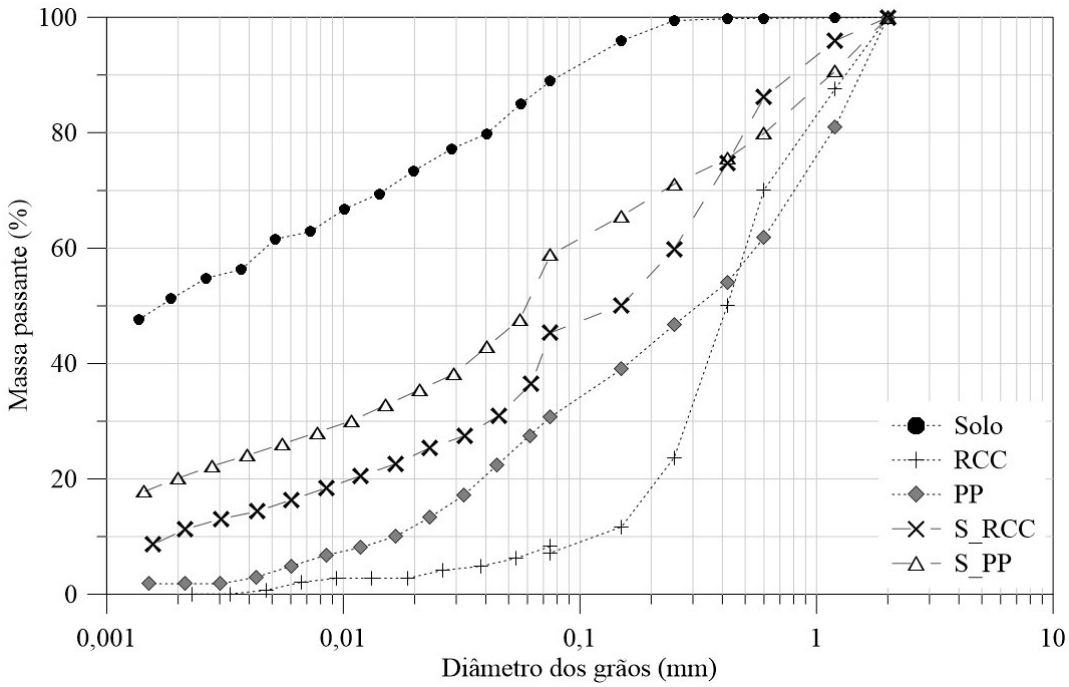


Figura 2. Curvas granulométricas dos materiais e misturas

Para a obtenção dos parâmetros de compactação, massa específica seca máxima e teor de umidade ótima, foi aplicada a energia normal. A adição de cimento às misturas reflete na elevação dos valores de massa específica seca e dimiuição do teor de umidade, como visto na Figura 3.

A incorporação do RCC ao solo-cimento gera um aumento de quase 12% da massa específica seca e reduz em 45% o teor de umidade das misturas. A adição de cimento à mistura S_RCC não ocasiona uma variação expressiva nos parâmetros ótimos de compactação.

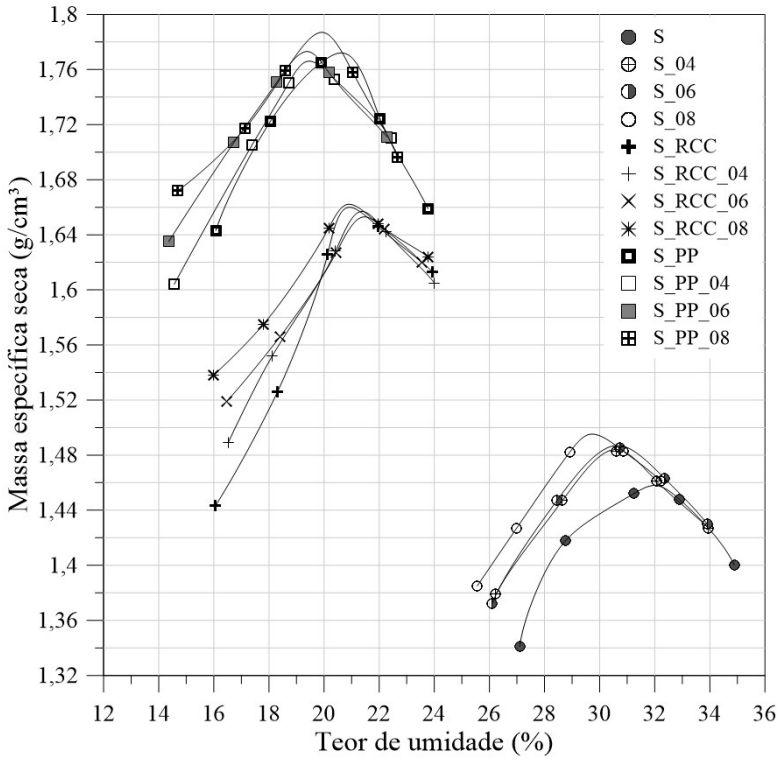


Figura 3. Curvas de compactação das misturas avaliadas

Com o incremento de pó de pedra ao solo-cimento, o aumento da massa específica seca e redução do teor de umidade é em media 19% e 55%, respectivamente. Nas misturas S_PP se observa uma variação mais significativa do teor de umidade.

A preparação das misturas para a moldagem dos corpos de prova foi realizada com base na massa seca, considerando-se a umidade higroscópica dos materiais para efeito de moldagem. Os corpos de prova, de geometria cilíndrica, apresentaram 100 mm de altura e 50 mm de diâmetro. A moldagem foi executada empregando o teor de umidade ótimo e a massa específica seca máxima determinados pelas curvas de compactação. Cada corpo de prova foi moldado em cinco camadas, garantindo-se grau de compactação mínimo de 95%.

3 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO NÃO CONFINADA

O ensaio de resistência à compressão não confinada foi conduzido em prensa manual, equipada com célula de carga de 20 kN e dois transdutores de deslocamento variável linear (LVDTs) com curso máximo de 5 mm, instalados no prato metálico da prensa, uma vez que o conjunto foi considerado rígido (Figura 4).

As amostras cimentadas foram ensaiadas após 28 dias de cura. Para cada condição, prepararam-se quatro corpos de prova, mantidos em caixa térmica, em câmara úmida, para minimizar interferências durante a cura. Os corpos de prova eram pesados e imersos em água 24 horas antes da ruptura, visando à saturação e à redução dos efeitos de sucção. No momento do ensaio, eram retirados da imersão, secos superficialmente e pesados novamente para verificar a absorção. As misturas sem cimento foram conservadas sob as mesmas condições, porém rompidas aos 7 dias e sem etapa de imersão, a fim de evitar perda de massa dos corpos de prova.

Como Consoli *et al*. (2007) verificaram que a sucção matricial representou apenas 3% a 8% da resistência de pico em misturas artificialmente cimentadas, sua influência foi considerada secundária, não sendo realizados ensaios específicos de sucção neste estudo.

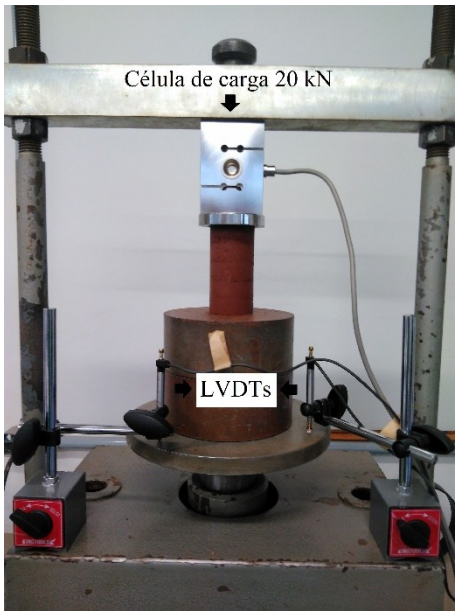


Figura 4. Montagem do ensaio de resistência à compressão não confinada

4 RESULTADOS

Os valores obtidos no ensaio de resistência à compressão não confinada são apresentados na Figura 5. Para a mistura solo-cimento, observa-se que a adição de 4% de cimento não promove aumento significativo da resistência em relação ao solo natural, enquanto com 6% e 8% de cimento, os valores de q_u tornam-se cerca de 3 e 6 vezes superiores aos do solo sem cimento, respectivamente.

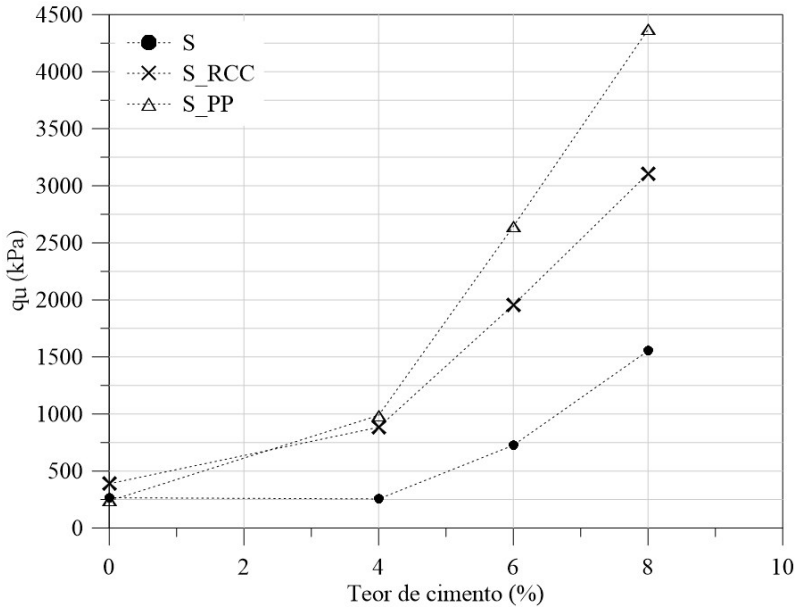


Figura 5. Resistência à compressão não confinada das misturas

Ao contrário da mistura S, S_RCC tem ganho de resistência com 4% de cimento, em que o valor de q_u é o dobro da mistura sem cimento. Com a adição de 6% e 8% de cimento, q_u aumenta 5 e 8 vezes, respectivamente, quando comparada à mistura sem aglomerante. O ganho de resistência de S_RCC cimentada pode estar associado ao menor fator água/cimento devido à menor umidade ótima, colaborando com as reações de hidratação do cimento. Em comparação à mistura sem cimento, a adição do aglomerante em S_PP resulta no aumento dos valores de resistência em 4, 11 e 19 vezes para os teores de 4%, 6% e 8%, respectivamente.

Com 4% de cimento, S_RCC e S_PP desenvolvem resistência semelhante, sendo essa aproximadamente 200% maior que a resistência de S_04. Comparada à mistura S_06, S_RCC_06 tem incremento de resistência de cerca de 156%. Com relação à mistura S_08, o aumento de q_u de S_RCC_08 é de 95%. Comparando S_PP a S, o incremento médio na resistência para teores de 6% e 8% de cimento é de 240% e 165%, respectivamente.

A mistura S_PP_06 apresenta resistência comparável à da S_RCC_08. Assim, os resultados sugerem que a estabilização granulométrica com pó de pedra é mais eficiente do que com RCC, pois permite reduzir o consumo de cimento e, ainda assim, alcançar maiores valores de resistência.

Com base no método de dosagem proposto por Consoli *et al*. (2007), que considera os volumes de vazios e de cimento, foi possível estimar a equação de q_u para as misturas analisadas. A Figura 6 apresenta as respectivas equações e as curvas ajustadas para as três misturas avaliadas com R² acima de 96%: S, S_RCC e S_PP.

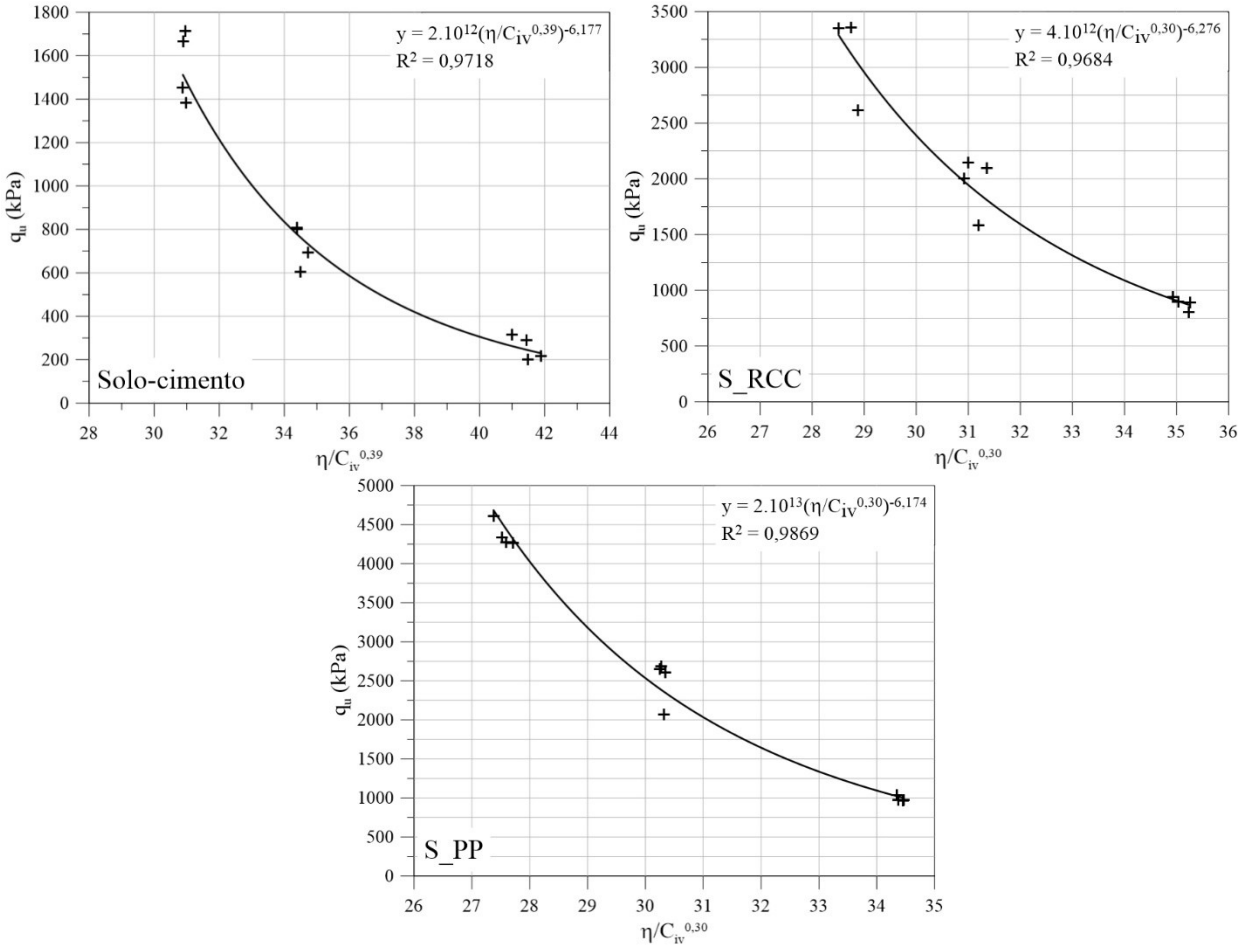


Figura 6. Equações e curvas de dosagem porosidade/cimento das misturas

Na mistura S, o expoente ideal ξ na relação porosidade/cimento foi de 0,39. Esse valor, superior ao reportado por Consoli *et al*. (2011), pode ser atribuído às características do solo adotado neste estudo: uma argila com índice de plasticidade mais elevado do que os solos avaliados pelos autores. Esse comportamento reforça a tendência de solos argilosos apresentarem expoentes maiores, refletindo a maior dependência do cimento para o desenvolvimento de resistência.

Nas misturas S_RCC e S_PP, o ξ ideal foi de 0,30, se aproximando do valor indicado por Consoli *et al*. (2007) para uma areia argilosa. Embora apresentem plasticidade superior à desse material, o expoente encontrado sugere que a correção granulométrica promovida pelos resíduos reduz parcialmente a influência da plasticidade, mantendo, ainda assim, a necessidade de cimento para o ganho de resistência, o que justifica valores de ξ relativamente elevados.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho avaliou a estabilização de um solo argiloso por meio da incorporação de cimento, resíduo de construção civil (RCC) e pó de pedra, com ênfase no desempenho mecânico e na resistência à compressão não confinada, além do ajuste de uma equação de dosagem baseada na relação porosidade/cimento. Os resultados de compactação indicaram que a adição de RCC e pó de pedra reduz a umidade ótima e eleva a massa específica seca máxima, sendo o pó de pedra mais efetivo nesse aspecto.

Do ponto de vista mecânico, as misturas S_RCC apresentaram resistências comparáveis às de misturas solo-cimento com maiores teores de aglomerante, sugerindo potencial de redução do consumo de cimento para atingir a resistência de projeto. Tendência semelhante foi observada para as misturas S_PP, que alcançaram desempenho equivalente ao de composições S e S_RCC com maiores teores de cimento, reforçando a eficiência do pó de pedra como estabilizante granulométrico.

As correlações obtidas pela razão η / C_{iv}^{ξ} apresentaram coeficientes de determinação (R^2) satisfatórios para todas as misturas. Os expoentes ξ ajustados também foram coerentes com os ensaios de resistência, evidenciando maior dependência do teor de cimento na mistura S, enquanto S_RCC e S_PP exibiram comportamento semelhante em relação à variação do aglomerante.

AGRADECIMENTOS

À UEM por permitir o uso de suas instalações e laboratórios para o desenvolvimento dessa pesquisa. Aos técnicos pela colaboração na realização do ensaios. E à CAPES pelo financiamento proporcinado que colaborou para os resultados obtidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Briskievicz, J. F. Luz, C. A. Souza, F. B. (2025). Making Use of Construction Waste in Soil-Cement Mixtures: Granulometric Correction of Clay Soil. *ACS Omega*, 10, 39471 – 39481.

Consoli, N. C. Foppa, D. Festugato, L. Heineck, K. S. (2007). Key parameters for strength control of artificially cemented soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. J. Geotech. Geoenviron. Eng. 133: 197-205.

Consoli, N. C. Rosa, A. D. Corte, M. B. Lopes Jr. L. S. Consoli, B. S. (2011). Porosity-cement ratio controlling strength of artificially cemented clays. *Journal of Materials in Civil Engineering*. J. Mater. Civ. Eng. 2011, 23: 1249-1254.

Kianimehr, M. Shourijeh, P. T. Binesh, S. M. Mohammadinia, A. Arulrajah, A. (2019). Utilization of recycled concrete aggregates for ligth stabilization of clay soils. *Construction and Building Materials*, 227, 116792.

Mishra, S. Sachdeva, S. N. Manocha, R. (2019). Subgrade soil stabilization using stone dust and coarse aggregate: a cost effective approach. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 5:20.

Pissato, E. Soares, L. (2006). Utilização de finos de pedreira em misturas de solo cimento: correção granulométrica de um solo argiloso. *Exacta*, vol. 4, n° 1. p. 143-148. São Paulo.

Suluguru, A. K. Surana, S. R. Guharay, A. Kar, A. Muktinutalapati, J. (2018). Experimental Investigations on Building Derived Materials in Chemically Aggressive Environment as a Partial Replacement of Soil in Geotechnical Applications. *Geotechnical and Geological Engineering*, 37:947–963. https://doi.org/10.1007/s10706-018-0662-0.

Yilmaz, F. Yurdakul, M. (2017). Evaluation of marble dust for soil stabilization. *Acta Physica Polonica A*, Vol. 132, n° 3.