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/COBRAMSEG2026.6/58

Análise Estatística (ANOVA) Aplicado ao Estudo da Resistência à Compressão de um Solo-Cimento Estabilizado com Resíduo de Construção Civil

Anna Clara Ploeger Biffe
Engenheira civil, UEM, Maringá, Brasil, annacpbiffe@gmail.com

Juliana Maria de Souza
Doutoranda, UEM, Maringá, Brasil, jmaria.eng@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: A busca por soluções sustentáveis na engenharia geotécnica tem impulsionado o aproveitamento de resíduos na melhoria de solos, aliando desempenho técnico à responsabilidade ambiental. Este trabalho apresenta um estudo de confiabilidade estatística na validação de resultados laboratoriais de resistência à compressão não confinada de um solo laterítico argiloso estabilizado com resíduo de construção civil (RCC) e cimento. A estabilização granulométrica com RCC visa não apenas o reaproveitamento ambientalmente adequado do resíduo, mas também a melhoria das propriedades geotécnicas do solo e a redução do uso de aglomerantes. Foram realizados ensaios laboratoriais com diferentes teores de cimento (0%, 4%, 6% e 8%) e tempos de cura (7 a 28 dias). Os dados passaram por testes de normalidade e homocedasticidade, atendendo aos pressupostos do ANOVA. Os resultados indicaram influência significativa do teor de cimento e do tempo de cura na resistência, com ganhos superiores a 30%. O teste de Tukey identificou diferenças estatísticas entre as misturas, revelando que análises estatísticas e geotécnicas podem divergir quanto à interpretação dos ganhos de resistência. Modelos de regressão linear explicaram parte significativa da variação nos resultados, e as superfícies de resposta demonstraram de forma clara a interação entre os parâmetros analisados.

PALAVRAS-CHAVE: Análise estatística, ANOVA, Resistência à compressão não confinada, Solo-cimento, Resíduo de construção civil.

ABSTRACT: The pursuit of sustainable solutions in geotechnical engineering has driven the reuse of waste materials to improve soil performance while promoting environmental responsibility. This study presents a statistical reliability analysis to validate laboratory results of unconfined compressive strength for a lateritic clayey soil stabilized with construction waste (CW) and cement. Particle size stabilization using CW aims not only to provide an environmentally sound destination for the waste but also to enhance geotechnical properties and reduce the use of binders. Laboratory tests were carried out with different cement contents (0%, 4%, 6%, and 8%) and curing periods ranging from 7 to 28 days. Data were subjected to normality and homoscedasticity tests, meeting the assumptions for ANOVA. Results showed a significant influence of cement content and curing time on strength, with average gains exceeding 30%. Tukey's test identified statistical differences among mixtures, highlighting that statistical and geotechnical interpretations may diverge, as statistically similar mixtures can present meaningful geotechnical gains depending on practical applications. Linear regression models explained a considerable portion of the variability in strength results, and response surface methodology clearly demonstrated the interaction between cement content, curing time, and the effect of CW incorporation.

KEYWORDS: Statistical analysis, ANOVA, Unconfined compressive strength, Soil-cement, Construction waste.

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por soluções sustentáveis na engenharia civil tem impulsionado a busca por alternativas ao uso intensivo de recursos naturais, especialmente no campo da geotecnia. Uma das estratégias mais promissoras é o aproveitamento de resíduos sólidos, como o resíduo de construção civil (RCC), na estabilização de solos, com destaque para misturas de solo-cimento. Essa prática contribui não apenas para a melhoria do desempenho mecânico dos solos, mas também para a mitigação dos impactos ambientais causados pelo descarte inadequado de resíduos e pela extração excessiva de materiais naturais (Kumar et al, 2021; Kaur et al, 2022).

Estudos recentes demonstram que a adição de RCC a solos argilosos, em combinação com cimento, pode promover ganhos significativos na resistência mecânica e na durabilidade do material, sendo aplicável em obras de infraestrutura, como pavimentações e fundações (Yuan et al, 2023; Kumar e Arora, 2020). Contudo, a heterogeneidade dos materiais envolvidos, bem como as variações intrínsecas dos solos naturais, introduzem um nível elevado de variabilidade nos resultados obtidos em ensaios laboratoriais, exigindo uma abordagem estatística rigorosa para validar os dados e interpretar os efeitos dos parâmetros analisados (Rahman et al, 2020).

Nesse contexto, a resistência à compressão não confinada (q_u) se destaca como um parâmetro essencial na avaliação do comportamento de misturas solo-cimento e solo com RCC, por sua simplicidade de execução e sensibilidade às variações nos teores de ligante e nos tempos de cura (Kardani et al, 2021). A análise estatística, por sua vez, possibilita a identificação de tendências, relações causais e a análise da confiabilidade dos resultados experimentais, especialmente quando associada a ferramentas como a análise de variância (ANOVA), testes de comparações múltiplas (Tukey) e modelos de regressão linear (Dejarnette e Mamidala, 2023; Ialongo, 2021).

A aplicação dessas técnicas estatísticas permite não apenas verificar a significância das diferenças observadas entre os tratamentos testados, mas também modelar o comportamento das misturas em função de variáveis como o teor de cimento e o tempo de cura. O uso de testes de normalidade e homocedasticidade assegura a validade das inferências realizadas via ANOVA, enquanto os testes pós-ANOVA, como o de Tukey, oferecem um detalhamento mais preciso sobre as combinações com desempenho estatisticamente distinto. Além disso, a utilização de modelos de regressão e superfícies de resposta contribui para a construção de modelos preditivos robustos, capazes de estimar o comportamento do solo estabilizado e fornecer subsídios quantitativos para o projeto e aplicação em campo (Tabachnick e Fidell, 2019; Bewick et al, 2021).

Diante disso, este trabalho tem como objetivo analisar estatisticamente a resistência à compressão não confinada de um solo laterítico argiloso estabilizado com cimento Portland e RCC, por meio de testes laboratoriais e aplicação de métodos estatísticos inferenciais. Dessa forma, se busca compreender a influência dos teores de cimento e do tempo de cura sobre o desempenho das misturas, contribuindo para o avanço no uso sustentável de materiais na engenharia geotécnica.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

O levantamento de dados experimentais é baseado nos resultados dos ensaios de resistência à compressão não confinada obtidos por Souza (2020). Foram avaliados aproximadamente 130 resultados experimentais para as misturas de solo-cimento (S) e solo com RCC (S_RCC). Os dados experimentais foram obtidos variando o teor de cimento (0%, 4%, 6% e 8%) e o tempo de cura (7, 14, 21 e 28 dias), como mostra a Tabela 1. Essas variações foram utilizadas como dados para o desenvolvimento do planejamento fatorial.

Tabela 1. Composição das misturas avaliadas.

Mistura	Solo (%)	RCC (%)	Cimento (%)	Mistura	Solo (%)	RCC (%)	Cimento (%)
S	100	0	0	S_RCC	50	50	0
S_4	96	0	4	S_RCC_4	48	48	4
S_6	94	0	6	S_RCC_6	47	47	6
S_8	92	0	8	S_RCC_8	46	46	8

2.2 Métodos

Após a obtenção dos dados experimentais de resistência à compressão simples (q_u), foi feita uma análise estatística exploratória com o objetivo de avaliar a distribuição dos valores e a qualidade dos dados obtidos. Os resultados foram organizados em planilhas conforme os teores de cimento e os tempos de cura, possibilitando a construção de histogramas para observação da forma da distribuição, detecção de dados discrepantes e análise da centralidade dos valores.

Para verificar se os dados atendiam aos pressupostos da estatística paramétrica, aplicaram-se testes de normalidade, como o de Kolmogorov-Smirnov (K-S) e Shapiro-Wilk (S-W), ambos utilizados para comparar a distribuição empírica dos dados com uma distribuição teórica normal. A verificação da normalidade é essencial para a aplicação da análise de variância (ANOVA), que exige essa premissa para a validade dos resultados inferenciais. Também foram avaliadas a homogeneidade de variâncias (homocedasticidade) e a independência dos resíduos.

Confirmados os pressupostos, executou-se a ANOVA de fator duplo com repetição, a fim de verificar a existência de diferenças estatísticas significativas entre os grupos de misturas em função das variáveis independentes: teor de cimento e tempo de cura. Em seguida, se aplicou o teste de comparações múltiplas de Tukey para identificar, par a par, quais combinações apresentaram diferenças estatisticamente significativas. Esse teste controla a taxa de erro do tipo I e fornece uma medida precisa da diferença mínima significativa entre médias.

Complementando a análise, foram ajustados modelos de regressão linear com base nos dados obtidos. A regressão permitiu quantificar o efeito individual e combinado das variáveis sobre a resistência à compressão. A qualidade do ajuste dos modelos foi avaliada pelo coeficiente de determinação (R^2), que indica a proporção da variância da q_u explicada pelas variáveis independentes. Também foram geradas superfícies de resposta para facilitar a visualização das interações entre os parâmetros analisados, contribuindo para a interpretação dos efeitos do teor de cimento e do tempo de cura sobre o desempenho das misturas solo-cimento e solo com RCC.

3 RESULTADOS

Os histogramas da Figura 1 indicam que a distribuição da resistência à compressão não confinada é aproximadamente normal para a maioria dos grupos analisados, conforme sugerido também pela curva de ajuste (FDM). Entretanto, observa-se uma exceção no grupo apresentado na Figura 1(a), no qual o ajuste não reproduz adequadamente a forma do histograma, indicando desvio relevante do comportamento gaussiano.

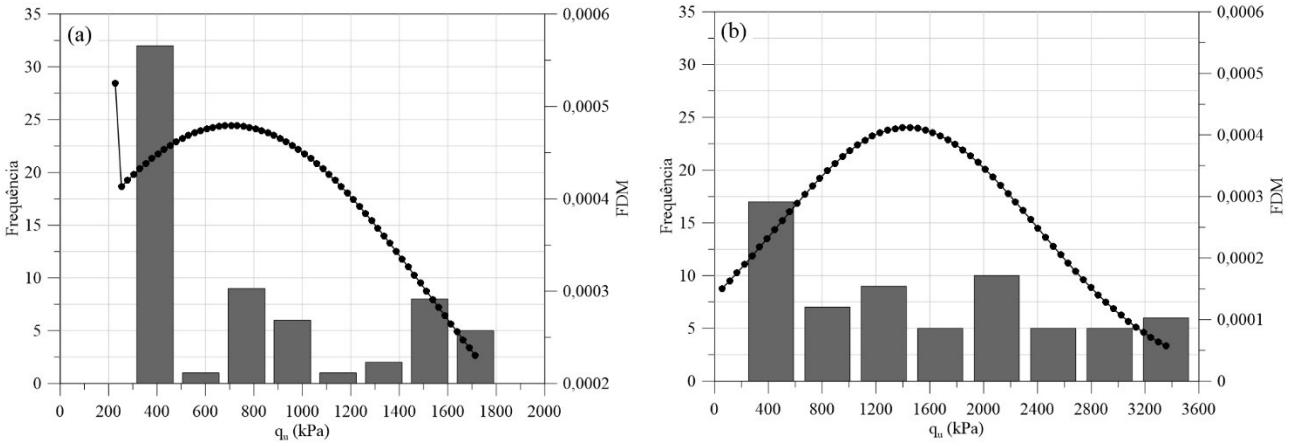


Figura 1. Curvas de normalidade para o (a) solo e (b) S_RCC.

Para o grupo de solo natural, a curva de ajuste evidencia assimetria positiva acentuada, caracterizada por uma cauda longa à esquerda, o que sugere a presença de valores discrepantes de alta resistência influenciando a média e distorcendo a distribuição. A ocorrência de assimetria à esquerda indica a existência de resultados de q_u muito baixos em relação ao conjunto, corroborando a heterogeneidade do material e a

possibilidade de condições de amostragem e moldagem menos favoráveis em parte dos corpos de prova. Esse comportamento é compatível com a interpretação de que o incremento de cimento tende a promover ganho expressivo de resistência, reduzindo a incidência de valores muito baixos e aproximando a distribuição de um padrão mais próximo do normal em amostras estabilizadas com o aglomerante.

Para confirmar a hipótese de distribuição normal, indicada pelos histogramas, foi aplicado o teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov (K-S), que compara a distribuição empírica dos dados com uma distribuição teórica normal. Os resultados do teste K-S (Tabela 2) indicaram que, para todas as amostras considerando seus respectivos teores de cimento e tempos de cura, os valores de P foram superiores ao nível de significância de 0,05. Dessa forma, não houve evidências estatísticas para rejeitar a hipótese nula, indicando que os dados apresentam distribuição normal. Os valores de P foram menores que F de significância, confirmando que a hipótese nula não pode ser rejeitada e viabilizando a análise de variância (ANOVA).

Tabela 2. Teste de aderência para o solo-cimento e S_RCC com variação do teor de cimento e tempo de cura

Amostra	valor-P	F de significância	Hipótese
S_0	0,32241	0,62394	Nula
S_4	0,26006	0,62394	Nula
S_6	0,23692	0,62394	Nula
S_8	0,26109	0,62394	Nula
S_RCC_0	0,20624	0,62394	Nula
S_RCC_4	0,28056	0,62394	Nula
S_RCC_6	0,33141	0,62394	Nula
S_RCC_8	0,26719	0,62394	Nula

A análise de variância (ANOVA) foi aplicada adotando-se a resistência à compressão simples das diferentes misturas como variável dependente (Y) e o teor de cimento e o tempo de cura como variáveis independentes (X). Essa abordagem permitiu avaliar a significância estatística dos efeitos por meio da comparação entre o valor calculado de F e o F crítico, bem como entre o valor de P e o nível de significância $\alpha = 0{,}05$. Os resultados apresentados nas Tabelas 3 e 4 mostram o efeito dos teores de cimento (0%, 4%, 6% e 8%), dos tempos de cura (7, 14, 21 e 28 dias) e do efeito combinado entre esses dois fatores.

Conforme apresentado na Tabela 3, os resultados para o teor de cimento com $F > F_{crítico}$ e $p < 0{,}05$ indicam diferenças estatisticamente significativas entre os grupos, evidenciando incremento de q_u associado à incorporação de cimento. Para o fator tempo de cura, obteve-se $F = 1{,}295$ e $p = 0{,}287$, o que não caracteriza efeito significativo do tempo de cura sobre a resistência das amostras de solo natural, dentro do nível de significância adotado. Por outro lado, a análise das interações apresentou significância, demonstrando que o efeito do teor de cimento depende do tempo de cura e a evolução da resistência é influenciada pela combinação entre ambos os fatores.

Tabela 3. ANOVA para a amostra de solo-cimento.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Teor de cimento	14782840,876	3	4927613,625	635,042	1,3072E-38	2,798
Tempo de cura	30135,869	3	10045,290	1,295	0,287	2,798
Interações	210587,932	9	23398,659	3,015	0,006	2,082
Dentro	372456,359	48	7759,507			
Total	15396021,036	63				

Os resultados da ANOVA para as amostras S_RCC (Tabela 4) indicaram influência estatisticamente significativa apenas do teor de cimento, uma vez que $F = 92{,}441$ é superior a $F_{crítico}$ e e $p < 0{,}05$. Em contrapartida, o fator correspondente ao tempo de cura e o termo de interação entre os fatores não apresentaram significância estatística para o modelo.

Embora a ANOVA permita verificar a existência de diferenças estatisticamente significativas, ela não especifica quais grupos diferem entre si. Assim, foi necessária a aplicação de um teste *post-hoc* e, para identificar os pares de grupos com diferenças significativas, foi empregado o teste de Tukey.

Tabela 4. ANOVA para a amostra S_RCC.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Teor de cimento	48929242,560	3	16309747,520	92,441	5,8928E-20	2,798
Tempo de cura	629527,495	3	209842,498	1,189	0,324	2,798
Interações	1030363,114	9	114484,790	0,649	0,750	2,082
Dentro	8468838,801	48	176434,142			
Total	59057971,970	63				

Na Tabela 5 são apresentados os resultados do teste de Tukey. Foram incluídas apenas as combinações de amostras cuja diferença absoluta entre as médias foi menor que a diferença mínima significativa (DMS). Isso significa que, para um nível de confiança de 95%, essas combinações não apresentam diferença estatisticamente significativa na resistência à compressão e, por isso, são agrupadas com a mesma letra (por exemplo, “a - a” ou “b - b”). As demais comparações resultaram em letras distintas (por exemplo, “a - b”), indicando médias estatisticamente diferentes.

Tabela 5. Resultados do teste de Tukey.

Combinação	Cura (dias)	Média 1	Média 2	Módulo da média	DMS	Classificação
S_0 – S_4	7	295,129	266,573	28,556	166,354	a - a
S_0 – S_4	14	295,129	268,075	27,054	166,354	a - a
S_0 – S_4	21	295,129	279,623	15,506	166,354	a - a
S_0 – S_4	28	295,129	255,613	39,516	166,354	a - a
S_RCC_0 – S_RCC_4	7	389,307	747,659	358,352	793,247	a - a
S_RCC_0 – S_RCC_4	14	389,307	848,742	459,435	793,247	a - a
S_RCC_0 – S_RCC_4	21	389,307	877,981	488,674	793,247	a - a
S_RCC_0 – S_RCC_4	28	389,307	884,063	494,756	793,247	a - a
S_RCC_6 – S_RCC_8	28	1955,605	2329,698	374,094	793,247	b - b
S_8 – S_RCC_8	28	1554,375	2329,698	775,323	819,878	a - a

Com base nos dados mostrados, se observa que na combinação “S_0 – S_4” a amostra de solo natural apresentou resistência semelhante à resistência da amostra de solo com 4% de cimento, independente da variação do tempo de cura. Estatisticamente, utilizar solo natural sugere a obtenção da mesma resistência que um solo com 4% de cimento, gerando economia de aglomerante.

Na combinação “S_RCC – S_RCC_4”, se entende que a amostra S_RCC possui resistência estatisticamente semelhante às amostras_RCC_4, não sendo estatisticamente necessária a aplicação de cimento para se obter resistência satisfatória. Esse fato pode ser explicado pela diferença mínima significativa (DMS), que considera as duas misturas como a mesma matriz. Porém, em termos geotécnicos, a resistência é praticamente dobrada com o acréscimo de 4% de cimento, o que torna viável a utilização da mistura com a incorporação de cimento a depender da finalidade prática.

As combinações “S_RCC_6 – S_RCC_8” e “S_8 – S_RCC_8” aos 28 dias de cura apresentaram semelhança estatística entre as médias de resistência, portanto o S_8 pode ser utilizado em substituição a S_RCC com 6% ou 8% de cimento. Essa conclusão estatística está diretamente associada às matrizes comparadas no teste, que apresentaram diferenças mínimas significativas semelhantes e não foram distinguidas pelo critério adotado. Contudo, essa equivalência não se sustenta sob uma perspectiva prática de desempenho mecânico, pois a mistura de S_8 apresentou resistência média de 1554,375 kPa, enquanto a mistura de S_RCC_8 atingiu 2329,698 kPa, o que corresponde a um incremento de resistência da ordem de 50%.

Em seguida, foi conduzida uma análise espacial por meio da geração de superfícies de resposta no software SURFER® (Golden Software, Inc.), que representam a influência combinada do teor de cimento e do tempo de cura sobre a resistência à compressão não confinada das misturas de solo estabilizado.

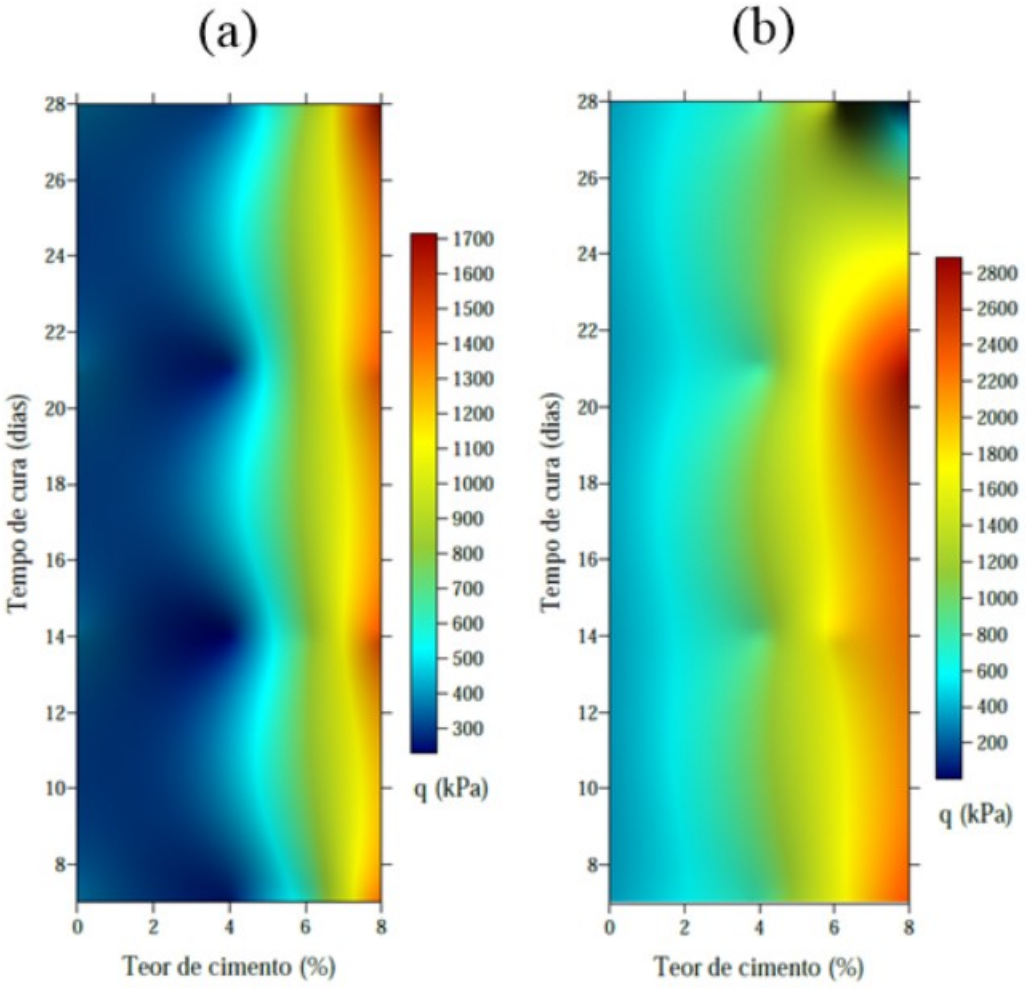


Figura 2. Superfícies de resposta de q_u para o (a) solo-cimento e (b) S_RCC

O aumento do teor de cimento e do tempo de cura resultou na elevação progressiva da resistência do solo natural (Figura 2a), porém os incrementos observados foram menos pronunciados do que aqueles obtidos na mistura contendo resíduo de construção civil. Esse comportamento sugere que o solo natural apresenta menor potencial de ganho de resistência associado ao processo de cimentação, em razão de limitações microestruturais e químicas do próprio material. Embora o cimento favoreça a formação de ligações entre partículas, a ausência de contribuição pozolânica, presente nas misturas com RCC, restringe o desenvolvimento de produtos cimentantes adicionais e, consequentemente, limita o aumento de resistência mesmo em idades de cura mais elevadas.

Como conclui Souza (2020), a mistura de solo-cimento apresentou menor desenvolvimento da etringita comparada a mistura S_RCC, o que pode ser ilustrado pelo desenvolvimento da resistência nas diferentes misturas decorrente dos diferentes estágios da hidratação do cimento para o mesmo tempo de cura e quantidade de aglomerante.

A superfície da Figura 2 (b) mostra um crescimento expressivo na resistência da mistura S_RCC, mesmo com baixos teores de cimento, sugerindo que o RCC colabora com o incremento de resistência estrutural à mistura.

A análise de regressão linear (Tabela 6) confirmou a significância dos modelos estudados e o impacto das variáveis no modelo, complementando o que foi discutido a respeito da ANOVA e do teste de Tukey.

Tabela 6. Regrssão linear para S e S_RCC

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,816
R-Quadrado	0,666
R-quadrado ajustado	0,661
Erro padrão	287,995
Observações	64

O coeficiente de determinação (R^2) do modelo que compara a resistência das amostras S e S_RCC indica que o ajuste explica apenas 66,6% da variabilidade dos dados. O erro padrão de 287,995 também é elevado, sugerindo grande dispersão dos resíduos e indicando que ambos os modelos podem apresentar baixa precisão.

4 CONCLUSÕES

Este trabalho averiguou a aplicabilidade da análise de variância (ANOVA) na interpretação de resultados de resistência à compressão não confinada de um solo laterítico argiloso estabilizado com cimento, considerando misturas solo-cimento e solo com RCC. A consistência das inferências foi assegurada pela verificação das premissas do método, por meio de testes de normalidade (Kolmogorov–Smirnov) e homocedasticidade, conferindo robustez à avaliação estatística dos efeitos dos fatores estudados.

Os resultados indicaram efeito significativo do teor de cimento e do tempo de cura sobre a resistência, com evidências de interação entre esses fatores, principalmente nas misturas com RCC, nas quais o incremento de cimento tende a potencializar a evolução resistente ao longo da cura. O teste de Tukey complementou a ANOVA ao discriminar quais grupos diferiram estatisticamente, permitindo identificar comparações relevantes entre combinações de teor de cimento e tempo de cura. Entretanto, foi observado que equivalências estatísticas nem sempre refletem diferenças práticas de desempenho, ressaltando a necessidade de interpretação conjunta estatística e geotécnica.

De modo geral, a abordagem ANOVA associada ao pós-teste mostrou-se adequada para validar e interpretar dados experimentais de estabilização, contribuindo para análises mais consistentes em estudos com múltiplos fatores. Além disso, os resultados reforçam o potencial do RCC como material incorporado para melhoria do desempenho mecânico e para a otimização do consumo de cimento visando atingir resistências especificadas. Dessa forma, o emprego de ferramentas estatísticas robustas se apresenta como suporte relevante para a tomada de decisão em dosagens e para o desenvolvimento de soluções tecnicamente eficientes e ambientalmente mais sustentáveis.

AGRADECIMENTOS

À UEM por permitir o uso de suas instalações e laboratórios para o desenvolvimento dessa pesquisa. E à CAPES pelo financiamento proporcinado que colaborou para os resultados obtidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bewick, V. Cheek, L. Ball, J. (2021). Statistics review 7: Correlation and regression. *Critical Care*, London, v. 25, n. 2, p. 301–306.

Dejarnette, B. Mamidala, S. (2023). Fundamentals of ANOVA in engineering data analysis. *Engineering Statistics Journal*, v. 45, n. 2, p. 112–128.

Ialongo, C. (2021). Understanding linear regression in clinical research. *Biochemia Medica*, Zagreb, v. 31, n. 2, p. 020201.

Kardani, R. Goli, A. Saberian, M. (2021). Stabilization of expansive soils using industrial and construction wastes: A review. *Journal of Cleaner Production*, v. 289, p. 125726.

Kaur, J. Sharma, R. Kumar, P. (2022). Geotechnical behavior of cement-treated soil blended with recycled aggregates. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, v. 14, n. 1, p. 68–75.

Kumar, A. Arora, S. (2020). Use of construction and demolition waste as a stabilizer in clayey soils. *Construction and Building Materials*, v. 252, p. 119027.

Kumar, S. Bhardwaj, P. Gupta, A. Rai, A. K. Singh, A. Kumar, P. (2021). Recycling of construction and demolition waste for sustainable building materials: A review. *Environmental Technology & Innovation*, v. 21, p. 101252. DOI: 10.1016/j.eti.2021.101252.

Rahman, M. A. Islam, M. S. Haque, A. (2020). Effectiveness of recycled materials in improving soil strength: Statistical and geotechnical analysis. *Materials Today: Proceedings*, v. 42, p. 1681–1686.

Souza, J. M. (2020). *Estabilização de um solo argiloso através da incorporação de cimento Portland, resíduo de construção civil (RCC) e resíduo de pó de pedra*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá.

Tabachnick, B. G. Fidell, L. S. (2019). *Using multivariate statistics*. 7. edition. New York: Pearson.

Yuan, Y. Liu, C. Wang, Z. (2023). Sustainable utilization of construction waste for soil stabilization: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 194, p. 106783.