

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

Comportamento Mecânico de um Solo Melhorado com Cinza de Casca de Arroz e Cimento

Yeimy Ordoñez Muñoz

MSc, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, yeordonez29@gmail.com

Jessica Leindorf de Almeida

MSc, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, jessica.leindorf@hotmail.com

Paula Caroline Alves Pudell

MSc, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, pudell@hotmail.com

Carolina Faust Machado

BSc, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, carolina.faust@hotmail.com

Ronaldo Luis dos Santos Izzo

DSc, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, izzo@utfpr.edu.br

RESUMO: O objetivo desta pesquisa foi avaliar o comportamento mecânico de um solo melhorado com cinza de casca de arroz (CCA) (5-10-15%) e cimento (2-5%). Para isso foram desenvolvidas 6 misturas, e conduzidos ensaios de caracterização física (limites de Atterberg, densidade real dos grãos), ensaios de compactação Proctor na energia normal e ensaios de resistência à compressão simples (q_u) em três tempos de cura (7-28-90 dias). Esses resultados foram analisados estatisticamente segundo análise dos erros para definir as melhores misturas. Os resultados de caracterização mostraram variação dos limites de Atterberg, o que levou à redução de $(43,2 \pm 0,5)\%$ no índice de plasticidade (IP) na M6 em relação ao IP do solo puro. Os ensaios de compactação resultaram em uma diminuição do peso específico aparente seco máximo ($\gamma_{d_{max}}$) e um incremento da umidade ótima à medida que o teor de aditivos aumentou. A análise estatística dos ensaios de q_u mostraram que as melhores resistências em relação ao solo puro foram para as misturas M3 e M6 obtendo incrementos na q_u de $(114 \pm 3)\%$ e $(474 \pm 8)\%$ respectivamente. Conclui-se que a CCA é um potencial substituto do cimento no melhoramento geotécnico do solo.

PALAVRAS-CHAVE: Melhoramento de solo; Cinza de casca de arroz; Cimento Portland; Resistência à compressão simples.

ABSTRACT: The objective of this research was to evaluate the mechanical behavior of a soil improved with rice husk ash (CCA) (5-10-15%) and cement (2-5%). Six blends were analyzed, and physical characterization tests were carried out (Atterberg limits, real grain density), Proctor compaction tests at normal energy and unconfined compression strength tests (q_u) in three curing times (7-28-90 days). These results were statistically analyzed by following the errors analysis to define the best blends. The characterization results showed variation in the Atterberg limits, this led to a reduction of $(43.2 \pm 0.5\%)$ in the plasticity index (PI) in M6 in relation to the pure soil PI. Compaction tests showed that the maximum dry unit weight ($\gamma_{d_{max}}$) decreased and the optimum moisture content increased as the contents of additives. Statistical analysis of the q_u tests showed that the best resistances in relation to pure soil were for blends M3 e M6 obtaining increments of $(114 \pm 3)\%$ and $(474 \pm 8)\%$ respectively. Concludes that RHA is a potential substitute for PC in the geotechnical improvement of soils.

KEYWORDS: Soil improvement; Rice husk ash; Portland cement; Unconfined Compressive Strength.

1 Introdução



O solo é considerado o elemento mais importante na engenharia geotécnica, por ser muito variável e complexo e nem sempre ser encontrado com as melhores características quando são feitas análises para projetos de Engenharia Civil.

A adição de compostos que cumprem a função de estabilização e reforço do solo como mecanismo de melhoria tornou-se uma das principais ferramentas que proporcionam resistência e estabilidade em solos de comportamento geotécnico inadequado (SINGH e ARORA, 2019; VITALE *et al.*, 2019). Nesse contexto, de acordo com Lambe e Whitman (1969), a melhoria do solo é também denominada estabilização, que é a modificação de qualquer propriedade do solo para melhorar seu comportamento. Isso deve ser feito de modo a satisfazer as exigências das solicitações previstas de acordo com o tipo de obra a ser realizada.

O município de Curitiba/PR é cercado por vastas áreas da Formação Guabiriotuba caracterizada por ser expansiva e retrativa, com alta suscetibilidade à erosão e movimentos gravitacionais de massa em encosta que trazem grandes riscos às comunidades assentadas nessas áreas (DE LIMA *et al.*, 2013). Consequentemente, a maioria dos solos do município de Curitiba não possui as melhores características geotécnicas no momento da execução de uma obra civil. Por conseguinte, é de crucial importância a busca de diferentes alternativas que permitam o melhoramento mecânico dos solos e ainda sejam econômicas e ecologicamente corretas.

A estabilização do solo é feita para melhorar as propriedades mecânicas e o cimento é um dos estabilizadores mais comuns, amplamente aplicado para melhorar diferentes tipos de solos. No entanto, a fabricação de cimento traz consigo um alto consumo de energia. Além disso, cada tonelada de cimento libera cerca de uma tonelada de dióxido de carbono na atmosfera (GHORBANI e SALIMZADEHSHOOILI, 2019). Portanto, na atualidade estão sendo desenvolvidas algumas soluções para reduzir o consumo de cimento nos métodos de melhoria do solo, por exemplo, substituindo uma parte do cimento por outros agentes potencialmente estabilizadores.

A cinza de casca de arroz (CCA) é um dos potenciais substitutos do cimento. Devido ao seu alto teor de sílica, a CCA é considerada como um material pozzolânico altamente reativo. Essas características são obtidas quando a CA é queimada sob condições controladas (SITI *et al.*, 2018). Assim, a reatividade da cinza se dá pela reação entre óxido de cálcio (CaO), dióxido de silício (SiO_2) e formação de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), os quais são os principais fatores que influenciam no processo de estabilização.

Pesquisadores estudaram a adição de CCA e outros materiais com o objetivo de melhorar as propriedades mecânicas de solos. Dentre os materiais abordados além da CCA se destacam o cimento, cinzas volantes e cal. Kumar e Gupta (2016) estudaram o comportamento de uma argila melhorada com CCA (5 - 10 - 15 - 20)%, cinza volante (30 - 35 - 40 - 45)%, cimento (0 - 2 - 4)%. E, Roy (2014) estudou um solo argiloso de alta plasticidade com CCA (10 - 15 - 20)% e 6% de cimento. Kumar e Gupta (2016) obtiveram os melhores resultados para misturas compostas por 10% de CCA, 40% de cinza volante e 4% de cimento. Os incrementos com relação ao solo puro da resistência à compressão simples (q_u) foram de 382%. Finalmente, Roy (2014) encontrou incrementos na q_u de 93% em relação ao solo puro com adições de 10% de CCA e 6% de cimento.

Pesquisadores estudaram o melhoramento de solos da Formação Guabiriotuba com diferentes materiais tais como pó de vidro (ARRIETA *et al.*, 2020); resíduos de rochas ornamentais (CARDOSO, 2019); cal e CCA (MOREIRA *et al.*, 2019). No entanto, para o solo analisado na presente pesquisa, ainda não se encontra estudos científicos que avaliem em conjunto materiais de estabilização como CCA e cimento, como os propostos nesta pesquisa. Admitindo tal panorama, a incorporação de materiais como a CCA pode ser uma boa alternativa para melhorar as características geotécnicas do solo da Formação Guabiriotuba. Ao ser um potencial substituto do cimento, a CCA pode contribuir para a diminuição da utilização desse material no melhoramento de solos, por conseguinte, auxiliar na redução da poluição do meio ambiente causada pela fabricação do mesmo.

2 Materiais e Metodo

2.1 Materiais

O solo objeto de estudo é siltoso e pertencente à Formação Guabiriotuba. A amostra de solo foi coletada na zona sudeste da região metropolitana de Curitiba, no município de São José dos Pinhais e pertencente à segunda camada da Formação Guabiriotuba. O solo foi extraído na encosta de uma estrada, a uma profundidade de cerca de 2-3 m. Em seu estado natural, o solo apresentou umidade higroscópica de 40% e peso específico



aparente seco de 11,60 kN/m³ (ARRIETA *et al.*, 2020). Baldovino *et al.* (2020) realizaram a caracterização física do solo em estudo. Na Figura 1 observa-se a curva granulométrica realizada com a lavagem prévia do solo. Os autores encontraram porcentagens passantes de 10%, 30%, 50%, 60% e 90 % pelas peneiras com diâmetros D10 (0,003 mm), D30 (0,01 mm), D50 (0,025 mm), D60 (0,038 mm) e D90 (0,3 mm), respectivamente.

A granulometria e os demais resultados obtidos da caracterização realizados por Baldovino *et al.* (2020) classificam o solo como um silte de alta plasticidade (MH) de acordo com os critérios do Sistema Unificado de Classificação do Solo (SUCS) segundo a ASTM D 2487 (2017). Também foram determinados os coeficientes de uniformidade, encontrando resultados iguais a $C_u = 12,88$ e $C_c = 0,88$. As propriedades do solo encontradas por Arrieta *et al.* (2020) estão na Tabela 1.

Tabela 1 - Propriedades físicas do solo

Propriedades	Valores	Norma seguida para ensaio
Limites de Atterberg		
Limite de Liquidez (LL), %	50,82	NBR 6459 (ABNT, 2017)
Limite de Plasticidade (LP), %	35,96	NBR 7180 (ABNT, 2016)
Índice de Plasticidade (IP), %	14,86	
Granulometria		NBR 7181 (ABNT, 2016)
% de Areia Grossa (0,6 mm < D < 2 mm)	5	
% de Areia Média (0,2 mm < D < 0,6 mm)	12	-
% de Areia Fina (0,06 mm < D < 0,2 mm)	18	-
% de Silte (0,002 mm < D < 0,06 mm)	60	-
% de Argila (D < 0,002 mm)	5	-
Outras propriedades		
Massa Específica Real dos Grãos (Gs)	2,62	D 854 – 14 (ASTM 2014)
Classificação SUCS	MH	D 2487 – 17 (ASTM, 2017)
Cor	Amarelo	
Diâmetro Efetivo (D10)	0,003 mm	-
Coeficiente de Uniformidade (C_u)	12,88	-
Coeficiente de Curvatura (C_c)	0,88	

Fonte: Adaptado de Baldovino *et al.* (2020).

A CCA foi adquirida em um estabelecimento comercial da cidade de Curitiba. A CCA é proveniente da combustão controlada de casca de arroz em caldeiras com leito fluidizado, gerando propriedades aglomerantes para ser utilizada na produção de concreto e na estabilização de solos.

O cimento utilizado nesta pesquisa foi o cimento Portland de alta Resistência Inicial (CPV-ARI) tendo sido adquirido em um estabelecimento da cidade de Curitiba. Contém um alto teor de clínquer e alto grau de finura. Essas características resultam em um material com alta resistência inicial e a massa específica é igual a 3,12 g/cm³.

2.2 Método

2.2.1 Preparação das Amostras e caracterização das misturas

A preparação das misturas e do solo puro para os ensaios de caracterização e moldagem dos corpos de prova incluiu os seguintes procedimentos: secagem na estufa à temperatura de 110 ± 5 °C até chegar ao peso constante; peneiramento e determinação da umidade higroscópica. Esses processos seguiram as etapas estabelecidas pela NBR 6457 (ABNT, 2016).

A determinação da massa específica real dos grãos do solo e da CCA seguiu o método descrito pela ME 093 (DNER, 1994). A determinação dos limites de Atterberg, foi realizada com secagem prévia do solo e os ensaios seguiram os procedimentos descritos na norma NBR 6459 (ABNT, 2016) para a determinação do limite de liquidez e a norma NBR 7180 (2016) para o ensaio de limite de plasticidade.

2.2.2 Ensaios de compactação



Para a determinação do teor ótimo de umidade e do peso específico aparente seco máximo das misturas Solo-Cimento-CCA foi realizado o ensaio de compactação Proctor na energia normal. O cilindro utilizado foi de 10 cm de diâmetro e 12,73 cm de altura, onde o solo puro e as misturas foram submetidas a 26 golpes com um soquete de massa de 2,5 Kg e caindo de 30,5 cm. Esses procedimentos seguiram a norma NBR 7182 (ABNT, 2020).

2.2.3 Moldagem dos corpos de prova

Para os ensaios de resistência à compressão simples, foram moldados corpos de prova (CPs) cilíndricos de $5 \pm 0,05$ cm de diâmetro e $10 \pm 0,05$ cm de altura.

Após a pesagem dos materiais em balança de precisão de 0,01 g, os materiais foram misturados com uma espátula metálica até que a mistura adquirisse coloração uniforme. Em seguida, a água foi adicionada até que se observasse a homogeneidade das misturas. A quantidade de CCA e cimento necessária para cada mistura foi calculada em relação à massa de solo seco total. A compactação na moldagem foi feita de forma estática, em três camadas e com o auxílio de uma prensa hidráulica manual com capacidade de 15 Toneladas.

Em seguida, os CPs foram embalados com plástico filme, identificados e armazenados em câmara úmida, à temperatura aproximada de 24 °C, para prevenir mudanças significativas de umidade no processo de cura durante 7, 28 e 90 dias.

2.2.4 Ensaios de Resistência à Compressão Simples

Os ensaios para determinação da resistência à compressão simples dos CPs foram realizados com uma prensa automática de células de carga (GEOCOMP), com uma velocidade de deformação de 1 mm / min. Os ensaios foram executados com quatro réplicas por mistura e atenderam aos procedimentos da norma NBR 12770 (ABNT, 1992).

2.2.5 Análise Estatística

Os resultados obtidos nos ensaios dos limites de Atterberg, massa específica real dos grãos, resistência à compressão simples, passaram por tratamento estatístico, onde foram considerados os erros aleatórios das medições e os erros dos sistemas (equipamentos) utilizados. O erro padrão é dado pelo desvio padrão multiplicado pelo valor de correção de Student's (1,320 e 1,197) para três e quatro amostras, respectivamente. Esse resultado é dividido pela raiz quadrada do número de amostras (N) analisadas, como mostra a Equação 1.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_p}{\sqrt{N}} \quad (1)$$

Onde σ_p é o desvio padrão e N é o número de amostras. Os erros finais associados para os diferentes ensaios, foram obtidos combinando o erro padrão e o erro sistemático fornecido pelo instrumento usado para as medições em cada ensaio, conforme descrito na Equação 2.

$$Erro\ final = \sqrt{\sigma_m^2 + \sigma_s^2} \quad (2)$$

Onde σ_m é o erro padrão e σ_s é o erro sistemático. A significância dos resultados obtidos foi feita por meio da análise de quantas vezes o erro é menor do que a diferença dos valores médios dos resultados de cada ensaio realizado. Ao obter os valores médios e os erros associados pode-se fazer a comparação dos resultados, dentro de certezas estatísticas que variaram de 68, 95 a 99% e os ajustes de curvas das grandezas obtidas.

3 Resultados

As propriedades físicas das misturas foram determinadas em termos de massa específica real dos grãos (Gs) e limites de Atterberg. Os valores médios dos limites de Atterberg e os valores de Gs são apresentados na Tabela 10.



Tabela 2. Média dos limites de Atterberg e do Gs das misturas

	%CCA	% Cimento	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Gs
Solo	0	0	50,8 ± 0,1	36,0 ± 0,1	14,8 ± 0,1	2,62 ± 0,06
M1	5	2	50,8 ± 0,1	38,1 ± 0,1	12,7 ± 0,2	2,63 ± 0,07
M2	10	2	50,4 ± 0,4	38,2 ± 0,1	12,2 ± 0,4	2,62 ± 0,08
M3	15	2	49,8 ± 0,1	38,4 ± 0,2	11,4 ± 0,2	2,62 ± 0,08
M4	5	5	48,9 ± 0,1	38,5 ± 0,1	10,4 ± 0,1	2,65 ± 0,07
M5	10	5	48,4 ± 0,1	39,7 ± 0,2	8,7 ± 0,2	2,64 ± 0,08
M6	15	5	47,9 ± 0,1	39,5 ± 0,2	8,4 ± 0,2	2,63 ± 0,08

A adição de aditivos provocou uma diminuição no índice de plasticidade (IP). Segundo Harichane e Ghrichi (2009) a diminuição do IP provoca melhoria na trabalhabilidade do solo ou em outras palavras, a modificação das características de plasticidade dos solos causadas pela adição de pozolanas provavelmente tornará esse solo adequado para a maioria das operações de construção, mesmo sob condições ambientais severas, como a chuva.

O limite de plasticidade (LP) nas misturas tende a aumentar, enquanto o limite de liquidez (LL) diminui com o aumento dos teores de CCA e cimento. De acordo com Concha (1986), esse comportamento pode ser explicado devido ao aumento de finos e a conformação de uma matriz muito efetiva na fixação das partículas umas às outras, ou seja, a formação de partículas maiores que diminuem a plasticidade do solo.

As análises estatísticas mostraram com 95% de certeza que existem diferenças significativas entre os limites de Atterberg das misturas em relação ao solo puro. A variação mais significativa nos limites de Atterberg foi observada na mistura M6, o qual pode-se dever a maior presença de finos em forma de cimento e CCA. Na M6 onde houve uma diminuição de $(6,4 \pm 0,2)$ pontos percentuais (p.p.) o que equivale a uma redução $(43,2 \pm 0,5)\%$ com relação ao IP do solo puro.

Os resultados dos ensaios dos limites de Atterberg foram apresentados no gráfico de plasticidade de Casagrande (Figura 1). Observa-se que as misturas M4, M5 e M6 tendem a mudar de um silte de alta compressibilidade (MH) para um silte de baixa compressibilidade (ML). Segundo Jala e Sharma (2019), esse comportamento pode ser atribuído à troca catiônica das partículas do solo com íons de cálcio da CCA e do cimento, o que leva a uma diminuição na plasticidade do composto de solo mais aditivo.

Finalmente, a análise estatística dos ensaios de Gs das misturas M1 até M6 mostraram que não há diferenças significativas com relação ao solo puro.

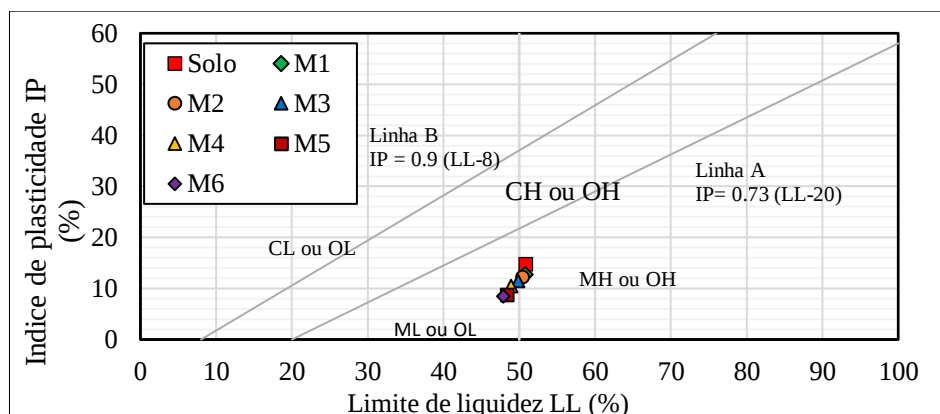


Figura 1. Limites de Atterberg das misturas

3.1 Ensaios de compactação

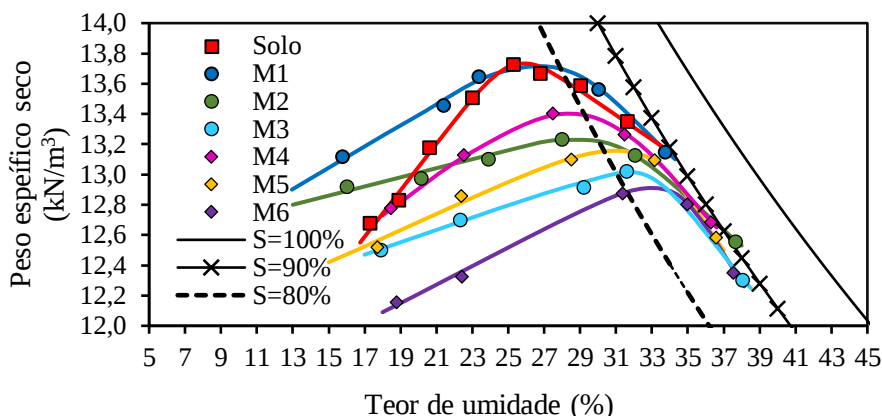
Para determinar os parâmetros ótimos de moldagem dos CPs, foram realizados ensaios de compactação, sendo executados ensaios na energia de compactação Normal conforme a NBR 7182 (ABNT, 2020).

A Figura 2 apresenta as curvas de compactação das 6 misturas, bem como as curvas de saturação (S) para 80, 90 e 100% referentes à energia de compactação Proctor normal. Em geral, as 6 misturas apresentaram achatamento das curvas de compactação com relação ao solo sem adições. É evidente a diminuição do $\gamma_{d_{max}}$ e



incremento da umidade ótima à medida que os teores de cimento, CCA e FPP aumentam. A mistura M6 destaca a maior variação nos parâmetros de compactação com relação ao solo puro. Obtendo uma redução de $0,82 \text{ kN/m}^3$ no $\gamma_{d_{\max}}$ e incremento da umidade ótima de 7,2%.

Figura 2 - Curvas de compactação misturas solo-CCA-cimento



A diminuição do $\gamma_{d_{\max}}$, pode ser atribuída à baixa massa específica da CCA, e pela presença de mais finos na forma de cinzas e cimento, que requerem mais água devido à sua maior área de superfície específica.

3.2 Ensaios de Resistência à Compressão Simples

As Figuras 3 a-b apresentam os resultados dos ensaios de q_u para misturas estabilizadas com CCA e cimento. Observa-se na Figura 3a os resultados obtidos para as três primeiras misturas baseadas em adições de 2% de cimento e os três teores de CCA. O maior incremento foi para a mistura M3, onde a q_u após 90 dias de cura, resultou em $(114 \pm 3)\%$ maior que a q_u do solo puro. Por outro lado, as misturas baseadas em 5% de cimento e os três teores de CCA (Figura 3b), a mistura que apresentou a melhor resistência foi a M6, mostrando um aumento da q_u de $(474 \pm 8)\%$ em relação ao solo puro.

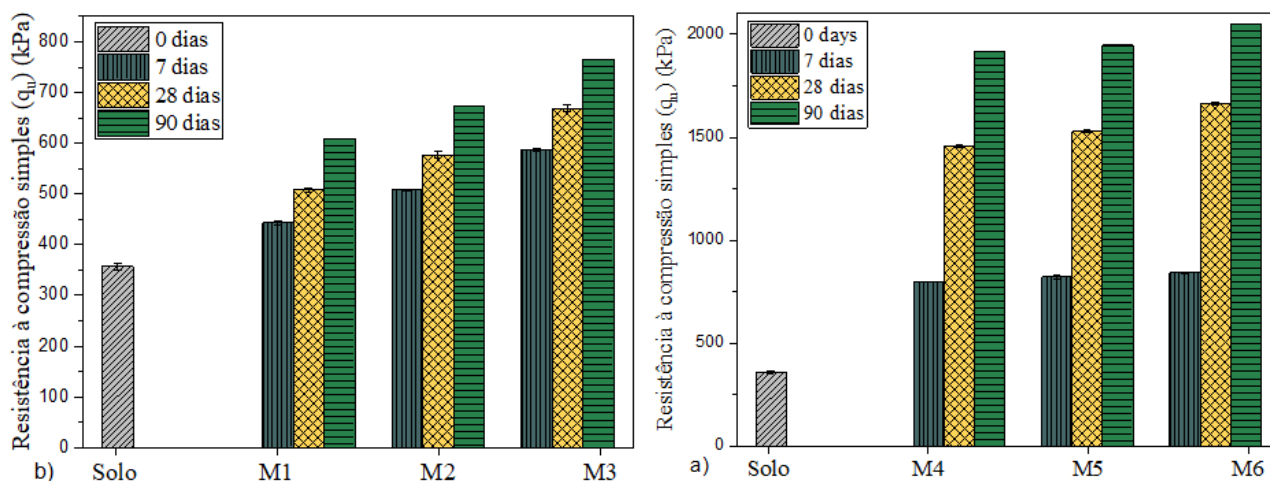


Figura 3. Resistência à compressão simples de misturas com três teores de CCA e (a) 2% Cimento, (b) 5% de cimento

As análises estatísticas mostraram com $\sim 95\%$ de certeza que existem diferenças significativas entre as misturas com 10 e 15% de CCA em relação ao mínimo teor de CCA (5%). As maiores diferenças foram observadas para as misturas com 2% de cimento, onde após 90 dias de cura os CPs com 15% CCA apresentaram uma q_u de $(26 \pm 2)\%$ maior que a q_u da mesma mistura com o mínimo teor de CCA. Por outro



lado, as misturas com 5% de cimento mostraram incrementos menores após 90 dias de cura, a q_u dos CPs com 15% de CCA foi (7 ± 1)% maior que a q_u dos CPs com 5% de CCA.

A variação no incremento da q_u com o teor de cimento e CCA pode-se dever à diferença na composição físico-química e mineral de cada tipo de solo e da CCA. Essas condições permitem uma maior ou menor troca catiônica com o cimento, o que leva ao desenvolvimento de reações pozolânicas e, portanto, ao aumento da resistência à compressão simples e à tração do solo. Desta forma, pesquisas que estudaram o uso da CCA como um substituto potencial para o cimento no melhoramento mecânico de solos encontraram diferentes teores ideais de CCA e cimento, como segue: 35% e 20% (JONGPRADIST *et al.*, 2018), 12 e 15% (DAUD *et al.*, 2018), 12 e 10% (NGUYEN *et al.*, 2020) e finalmente 10 e 4% (KUMAR e GUPTA, 2016) para CCA e cimento, respectivamente. O que demonstra que no melhoramento de solos, fatores como o tipo de solo, CCA e cimento influenciam no incremento da resistência mecânica dos mesmos.

4 Conclusão

A partir das análises dos resultados obtidos na presente pesquisa conclui-se:

Houve diferenças estatisticamente significativas entre os limites de Atterberg das misturas com relação ao solo. Esse comportamento é atribuído à troca catiônica entre as partículas do solo com os íons cálcio provenientes da CCA e do cimento, o que levou ao incremento da quantidade de vazios que são ocupados pela água enquanto o material passa de um estado líquido para o plástico.

Os ensaios de compactação evidenciaram uma diminuição do $\gamma_{d_{max}}$ e um incremento da umidade ótima na medida que o teor dos aditivos aumentam. Esse comportamento pode ser atribuído à presença de mais finos na forma de cinzas e cimento, os quais possuem uma maior área de superfície específica e, portanto, requerem maior quantidade de água para atingir o $\gamma_{d_{max}}$.

Finalmente, as análises estatísticas mostraram com 95% certeza que existem diferenças significativas entre o q_u das misturas (M1 até M6) em relação ao q_u do solo puro. A M3 e M6 resultaram em incrementos (114 ± 3)% e (474 ± 8)% na q_u em relação a q_u do solo puro, respectivamente. Esse incremento da q_u com a adição da CCA e cimento ao solo, mostrou o potencial da CCA como substituto de parte do cimento.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal de Tecnologia do Paraná e ao apoio financeiro concedido pela Coordenação do Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) - Código Financeiro 001, Fundação Araucária do Paraná e Conselho Nacional de Ciência e Desenvolvimento Tecnológico (CNPq) no Brasil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Society for Testing and Materials (2014). ASTM D 854-14: *Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- American Society for Testing and Materials (2017). ASTM D 2487. *Standard practice for classification of soils for engineering purposes (unified soil classification system)*. West Conshohocken, PA.
- Arrieta Baldovino, J. D. J.; Dos Santos Izzo, R. L.; Da Silva, É. R.; Lundgren Rose, J. (2020) *Sustainable Use of Recycled-Glass Powder in Soil Stabilization*. *Journal of Materials in Civil Engineering*. v. 32, n. 5, p. 04020080.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1992). NBR 12770. *Determinação da resistência à compressão não confinada*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 6457: *Amostras de solo Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 7180. *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 (2017). NBR 6459. *Versão Corrigida: Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020). NBR 7182. *Versão Corrigida: Solo - Ensaio de compactação*. Rio de Janeiro.
- Cardoso, A. (2019) *Comportamento mecânico de um solo da Formação Guabirotuba com adição de resíduo de rochas ornamentais*. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 127p.
- Concha, L. M. C. (1986) *Estudo da fadiga de duas misturas de solo-cimento*. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Rio de Janeiro: UFRJ, 148 p.
- Daud, N. N.; Daud, M. N. M.; Muhammed, A. S. (2018) Rice husk ash (RHA) as a partial cement replacement in modifying peat soil properties. In: *AIP Conference Proceedings*. AIP Publishing LLC. 246 p.
- De Lima, F. M.; Fernandes, L. A.; De Melo, M. S.; Góes, A. M., e Machado, D. A. M. (2013) Faciologia e contexto deposicional da Formação Guabirotuba, Bacia de Curitiba (PR). *Brazilian Journal of Geology*, v. 43, n. 1, p. 168-184.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). DNER-ME 093. *Solos – Determinação da Densidade Real*. Rio de Janeiro.
- Ghorbani, A.; Salimzadehshooiili, M. Dynamic Characterization of Sand Stabilized with Cement and RHA and Reinforced with Polypropylene Fiber. (2019) *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 31, n. 7, p. 04019095.
- Harichane, K.; Ghrici, M. Effect of combination of lime and natural pozzolana on the plasticity of soft clayey soils. (2009) 2nd International conference on new developments. In: *soil mechanics and geotechnical engineering*. Nicosia, North Cyprus, pp 574-581.
- Jala, S. K.; Sharma, P. (2019) Effect of Cement Kiln Dust and RBI Grade 81 on Engineering Properties of Plastic Clay. In: *Recycled Waste Materials*. Springer, Singapore. p. 37-49.
- Jongpradist, P.; Homtragoon, W.; Sukkarak, R.; Kongkitkul, W.; Jamsawang, P. (2018) Efficiency of rice husk ash as cementitious material in high-strength cement-admixed clay. *Advances in Civil Engineering*, vol. 2018.
- Kumar, A.; Gupta, D. (2016) Behavior of cement-stabilized fiber-reinforced pond ash, rice husk ash-soil mixtures. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 44, n. 3, p. 466-474.
- Moreira, E. B., Baldovino, J. D. J. A., Dos Santos Izzo, R. L., De Almeida, J. L., Moreira, F. E. B., Bordignon, V. R.; Perretto, F. (2019) Influence of lime addition and rice husk ash on the physical properties of a sedimentary silty-sandy soil. *Brazilian Journal of Development*. v. 5, n. 12, p. 31107-31115.
- Nguyen, D. T.; Nguyen, N. T.; Pham, H. N. T.; Phung, H. H.; Van Nguyen, H. (2020) Rice husk ash and its utilization in soil improvement: An overview. *Journal of Mining and Earth Sciences*. Vol, v. 61, n. 3, p. 1-11.
- Roy, A. Soil stabilization using rice husk ash and cement. (2014) *International journal of civil engineering research*, v. 5, n. 1, p. 49-54.
- Singh, V.; Arora, V. K. (2019) Strength Improvement of Silt Loam Using Egg Shell Powder and Quarry Dust. In: *Recycled Waste Materials*. Springer, Singapore, p. 59-68.
- Siti, A. S.; Shafiq, N.; Mohamed O.M. (2018) Compressive Strength and Microstructure Analysis of Treated Rice Husk Ash (TRHA) Incorporated Mortar. *International Journal of Engineering & Technology*. v. 4, n. 35, p. 388-391.
- Vitale, E.; Russo, G.; Deneele, D. (2019) Use of Alkali-Activated Fly Ashes for Soil Treatment. In: *National Conference of the Researchers of Geotechnical Engineering*. Springer, Cham, p. 723-733.