

Permeabilidade de Areia Fina Estabilizada por Álcali-Ativação com Uso de Resíduos: Cal de Carbureto e Cinza de Casca de Arroz

Cesar Alberto Ruver

Professor-Pesquisador, UFRGS, Porto Alegre, Brasil, E-mail: cesar@ufrgs.br

Dionatta Willy de Quadros Fraga

Discente de Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, Brasil, E-mail: dionatta95@gmail.com

Gabriel Melo Pacheco

Discente de Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, Brasil, E-mail: melo22044@gmail.com

RESUMO: Baixos coeficientes de permeabilidade são imprescindíveis em obras geotécnicas que requerem impermeabilização e/ou retenção de líquidos. Este trabalho tem como objetivo analisar a variação do coeficiente de permeabilidade, associada a resistência à compressão simples, de uma areia fina estabilizada com resíduos (cal de carbureto e casca de arroz). No estudo empregou-se três proporções de cal de carbureto e cinza de casca de arroz (1:1; 1,5:1 e 2:1), usadas na substituição de 10% e 20% em relação a areia. Também se variou o peso específico e adotou-se tempos de cura de 7, 28 e 60 dias. Os ensaios de permeabilidade foram realizados em permeâmetro de parede flexível com carga e volume constante. Os resultados mostram uma variação do coeficiente de permeabilidade entre 10^{-6} m/s e 10^{-5} m/s. Os resultados mostram um aumento da resistência com o aumento do peso específico, do tempo de cura e da substituição dos agentes cimentantes. O aumento da proporção de cal, causa queda na resistência e posterior elevação. Já em termos de permeabilidade, o efeito foi benéfico – redução da permeabilidade, para o aumento de substituição dos agentes cimentantes, do peso específico e da proporção de cal. O aumento do tempo de cura, gerou aumento da permeabilidade.

PALAVRAS-CHAVE: Coeficiente de Permeabilidade, Estabilização de Solos, Aproveitamento de Resíduos, Álcali-Ativação.

ABSTRACT: Low permeability are essential in geotechnical constructions that require waterproofing and/or liquid retention. This work aims to analyze the variation in the permeability coefficient, associated with the resistance to simple compression, of fine sand stabilized with residues (carbide lime and rice husk). In the study, three proportions of carbide lime and rice husk ash were used (1:1; 1.5:1 and 2:1), used to replace 10% and 20% in relation to sand. The specific weight was also varied and curing times of 7, 28 and 60 days were adopted. The permeability tests were carried out in a flexible permeameter with constant load and volume. The results show a variation in the permeability coefficient between 10^{-6} m/s and 10^{-5} m/s. The results show that an increase in resistance with an increase in specific weight, curing time and replacement of cementing agents. The increase in the proportion of lime causes a decrease in resistance and a subsequent increase. In terms of permeability, the effect was beneficial – reducing permeability, increasing the replacement of cementing agents, the specific weight, and the proportion of lime. The increase in curing time resulted in increased permeability.

KEYWORDS: Permeability Coefficients, Soil Stabilization, Residues Utilization, Alkali-Ativation.

1 INTRODUÇÃO

Uma das propriedades de grande importância em obras geotécnicas é o coeficiente de permeabilidade. Obras como *liners* de fundo e cobertura de aterros sanitários, barreiras de contenção de resíduos e transporte de contaminantes, núcleo de barragens de enrocamento, barragens de terra, entre outros, exigem que os materiais geotécnicos empregados tenham baixa permeabilidade. Os solos em seu estado natural, muitas vezes não atendem o valor de permeabilidade máximo exigido, sendo que neste casos, pode-se lançar mão da ação de aditivos com vista a tornar o materiais menos permeáveis. Em muitos estudos sobre permeabilidade que

empregam a estabilização de solos, a avaliação da permeabilidade é comparada com a resistência a compressão simples, pois normalmente a eficiência da estabilização é determinada pelo ganho de resistência mecânica, enquanto a permeabilidade apresenta comportamento distinto e variado (Osinubi, 1998; Cruz, 2004; Menger et al., 2020; Jangde e Khan, 2023). Menger et al. (2020) observaram que a adição de cimento Portland em uma areia fina em diferentes proporções, gerou grandes ganhos de resistência, porém o coeficiente de permeabilidade foi pouco afetado, inclusive, havendo um pequeno aumento no valor. Osinubi (1998) na estabilização de um solo residual com cal, verificou um aumento do coeficiente de permeabilidade até 14 dias de cura, passando o valor a reduzir aos 28 dias de cura. Também observaram que a maior compactação reduziu o valor do coeficiente de permeabilidade. Ainda segundo o autor, o aumento do teor de cal fez aumentar o coeficiente de permeabilidade. Jangde and Khan (2023) verificaram que adição de caulinita a uma argila mole fez aumentar a resistência à compressão simples e reduzir o coeficiente de permeabilidade, atuando positivamente para as duas propriedades.

Em detrimento a utilização materiais cimentícios comerciais e tradicionais (cimento Portland e cal hidratada), pesquisas recentes mostram-se promissoras na utilização de misturas de resíduos (Cristelo, et al., 2011; Miranda et al., 2020; Lotero et al., 2021; Servi et al., 2022; Anburuvel, 2024). Entre os diversos resíduos estudados, pode-se dar destaque a cal de carbureto e a cinza de casca de arroz. Atualmente o estado do Rio Grande do Sul produz cerca de 7,8 milhões de toneladas de arroz por safra (IBGE, 2022), que geram cerca de 0,04% em volume de cinza de casca de arroz (ICTA/UFRGS, 2021). A cal de carbureto é um resíduo gerado da produção de gás acetileno. No Brasil são geradas cerca de 6 mil toneladas, gerando cerca de 17 mil toneladas de cal de carbureto por ano. (Du, Zhang e Liu, 2011; Horpibulsuk et al., 2015; Market Research Store, 2015). Mais especificamente, em termos de região metropolitana de Porto Alegre, uma planta industrial localizada na cidade de Esteio/RS produz 120 toneladas de acetileno por mês, gerando assim 342 toneladas de cal de carbureto por mês (Winter, 2018).

No processo de estabilização química pela álcali-ativação, ocorre a mistura de um precursor, rico em silicatos e/ou aluminossilicatos amorfos em pó (por exemplo: a cinza de casca de arroz) e um ativador alcalino, aquoso ou pó (por exemplo: a cal de carbureto), capaz de fornecer um meio com elevado pH (Davidovits, 1994; Palomo, Grutzeck and Blanco, 1999). Conforme descrito nos trabalhos de Fernández-Jiménez et al. (2006) e Duxson et al. (2007), a adição de cal, gera um meio alcalino, fazendo solubilizar o precursor, cuja reação resultante final é o silicato de cálcio hidratados (CSH), responsável pelo ganho da resistência mecânica ao longo do tempo.

Assim, conforme citado por (Servi *et al.*, 2022), os altos volumes de gerados de cal de carbureto e cinza de casca de arroz, associados a altos teores de sílica e óxido de cálcio nestes resíduos, respectivamente, tem mostrado que a mistura de ambos é uma alternativa promissora para a estabilização de solos. Desta forma, o objetivo principal deste trabalho é mostrar a avaliação da permeabilidade, associado a resistência a compressão simples para diferentes misturas de cal de carbureto e cinza de casca de arroz na estabilização de uma areia fina (estado cristalino). Pois conforme citado por (Osinubi, 1998), a maior parte dos estudos com estabilização tem a finalidade de verificar a evolução da resistência, porém pouco estudos são realizados para verificar a permeabilidade destes solos tratados.

2. METODOLOGIA DE PESQUISA

Como o objetivo do trabalho é estudar a permeabilidade de uma areia tratada com diferentes adições de resíduos (cal de carbureto e cinza de casca de arroz), teve que se definir variáveis envolvidas no estudo: (a) dependentes (resposta): (a1) coeficiente de permeabilidade – k e (a2) resistência a compressão simples – RCS; (b) variáveis independentes: (b1) peso específico aparente seco – γ_d (15,5 kN/m³; 16,5 kN/m³, e 17,5 kN/m³), (b2) proporção entre cal de carbureto e cinza de casca de arroz – CC:CCA (1:1; 1,5:1; e 2:1), (b3) percentual dos agentes cimentantes substituídos em relação ao peso da areia (10% e 20%); (b4) tempo de cura de (7 dias, 28 dias e 60 dias); e (c) variáveis constates: (c1) 12% de água em peso em adição aos materiais secos; (c2) temperatura (ambiente controlado) de cura de 23+/-2 ° C. Os pesos específicos e o teor de água são os usuais empregados em diversas pesquisa do LEGG/UFRGS, onde o trabalho foi realizado, obtidos de ensaios de compactação e limitação do equipamento de moldagem (Paula, 2016; Godoy, 2018; Winter, 2018; Queiróz *et al.*, 2022). Já as proporções dos materiais e o percentual de mistura foram adotados com base no trabalho de Queiróz et al. (2022), que utilizou os mesmos materiais. Como as reações pozolânicas com estabilização com cal são lentas, escolheu-se um tempo de cura usuais de 7 dias (embora precoce para estabilização com cal), 28 dias e 60 dias. A temperatura de 23+/-2° C, corresponde a uma temperatura média no estado no estado do Rio

Grande do Sul, que foi mantida constante na câmara úmida. A partir das variáveis definidas, determinou-se um programa experimental do tipo fatorial incompleto, mas que se contempla o cruzamento de todas as variáveis independentes, que foi composto por 15 ensaios.

Posteriormente, houve a caracterização e preparação dos materiais (secagem, peneiramento, separação e caracterização). A seguir fez-se a moldagem dos corpos de prova, espera pelo tempo de cura e realização dos ensaios de permeabilidade e compressão simples.

3 MATERIAIS EMPREGADOS

3.1 Areia

Como solo a ser estabilizado, empregou-se uma areia sedimentar eólica (formação de duna) proveniente de Osório/RS. A tabela 2 apresenta as características físicas da areia e a figura 1 apresenta curva granulométrica da areia (e dos demais materiais). Pelos índices físicos, a areia é caracterizada como de granulometria uniforme e mal graduada, Pelo sistema de classificação unificada de solos (SUCS) é classificada como SP (areia mal graduada), segundo a norma ASTM D2487 (ASTM, 2017), e pelo sistema AASHTO/HRB é classificada como A-3 (areia fina), segundo a norma ASTM D3282 (ASTM, 2015). Em termos de curva granulométrica, verifica-se que é composta com grãos de tamanho de areia fina (entre 0,06 mm e 0,2 mm), segundo a NBR 6502 (ABNT, 2022).

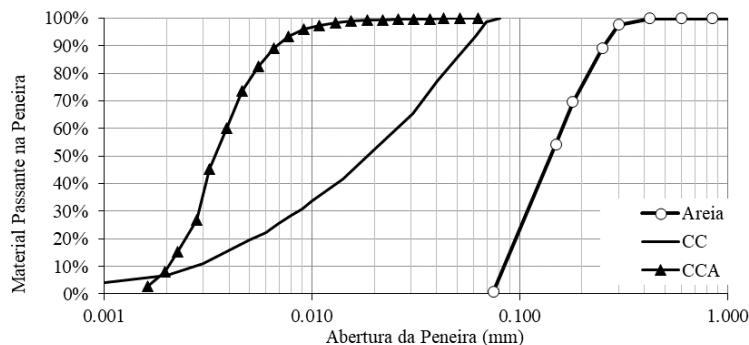


Figura 1. Curva granulométrica dos materiais: areia; cal de carbureto (CC) (Servi *et al.*, 2022) e cinza de casca de arroz (CCA) (Servi *et al.*, 2022).

3.2 Cal de Carbureto (CC)

A cal de carbureto (CC) empregada no presente trabalho trata-se de um resíduo proveniente da produção do gás acetileno. Foi fornecida por uma empresa localizada na cidade de Esteio/RS. Por ser um resíduo, usualmente é encaminhada para o aterro sanitário. A cal foi obtida no formato de pastoso, sendo colocada em uma estufa a 60° C até a sua total secagem (48 h), sendo após destorroada para desfazer os grumos e peneirada na peneira de nº 200 (abertura de 0,075 mm). A seguir, foi armazenada em um saco plástico vedado para minimizar o efeito de uma eventual carbonatação. É composta, segundo a NBR 6502 (ABNT, 2022) por 6,3% de areia fina, 86,9% de silte e 6,8% de argila. O peso específico real dos grãos é de 2,24 g/cm³. A tabela 3 apresenta o resultado de espectrometria de fluorescência de raios-X. Em termos de composição química, verifica-se um grande teor de óxido de cálcio, seguido de sílica, e baixos teores de óxido de ferro e alumínio.

3.3 Cinza de Casca de Arroz (CCA)

A cinza da casca de arroz (CCA) é originária da queima controlada da casca de arroz, de modo a manter o seu estado amorfo, sendo produzido e comercializado por uma empresa de Alegrete/RS. Embora seja um resíduo, possui valor comercial e é muito utilizado na construção civil, como adição em concretos e argamassas. A figura 1 apresenta a curva granulométrica. Pela curva granulométrica, segundo a NBR 6502 (ABNT, 2022), é composta por 91,7% de silte e 8,3% de argila. O peso específico real dos grãos é de 2,16 g/cm³. A tabela 3 apresenta os resultado de espectrometria de fluorescência de raios-X. Verifica-se que a cinza de casca de arroz apresenta alto teor de sílica e pequenos teores de óxido de cálcio, potássio, ferro e alumínio.

Tabela 2. Característica físicas da areia

Índice Físico	Valor
Massa específica real dos grãos	2,65 g/cm ³
Coef. Uniformidade (c_u)	2,00
Coef. de Curvatura (c_c)	0,84
D_{10}	0,085 mm
D_{30}	0,11 mm
D_{60}	0,17 mm
Índice de vazios mínimo (e_{min})	0,55
Índice de vazios máximo (e_{max})	0,85
k ($D_r = 73,4\%$)	$5,9 \times 10^{-5}$ m/s

Tabela 3. Composição química da (Consoli *et al.*, 2019; Servi *et al.*, 2022)

Composto	CC	CCA
SiO ₂	3,10%	93,60%
Al ₂ O ₃	0,46%	0,26%
CaO	74,00%	1,20%
Fe ₂ O ₃	0,26%	0,20%
SO ₃	0,54%	0,40%
MgO	0,72%	-
K ₂ O	-	2,91%
MnO	-	0,50%
P ₂ O ₅	-	0,82%

4 PROCEDIMENTOS EXECUTIVOS

4.1 Moldagem dos Corpos de Prova

Foram moldados corpos de prova cilíndricos com 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura. A moldagem era realizada por compactação estática em um molde metálico tripartido, sendo a compactação feita em três camadas. Inicialmente fazia-se a mistura dos materiais secos para cada corpo de prova, após acrescentava-se a água (teor de 12%), fazendo nova mistura até a homogeneização. Após era feita a moldagem e retirada dos corpos de prova do molde. Em seguida, era feito a pesagem e eram realizadas três medidas de altura e diâmetro. E por fim, os corpos de prova eram ensacados e levados para a câmara com controle de umidade e de temperatura (23+/-2° C), onde eram mantidos até atingirem o tempo de cura para a realização do ensaio.

4.2 Ensaio de Permeabilidade

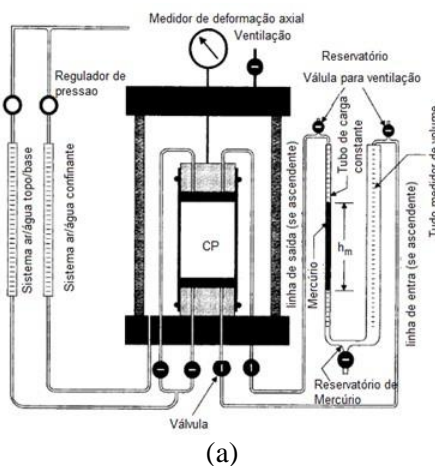
Para a realização dos ensaios de permeabilidade seguiu-se os procedimentos da norma americana ASTM D 5084 (ASTM, 2016b). Os ensaios de permeabilidade foram realizados em um permeâmetro de parede flexível, empregando o método E (volume e carga constante) (ASTM, 2016b) (diagrama mostrado na figura 2a). O permeâmetro (figura 2b) utilizado é dotado de uma câmara de acrílico transparente, que permite a visualização do corpo de prova, que é preenchida com água destilada e posteriormente pressurizada para aplicação da tensão confinante. O corpo de prova é confinado e isolado de fluido confinante no interior da câmara com uma membrana de látex e vedado por um conjunto de dois anéis de borracha (*o-rings*) na base e no *top cap*. As pressões eram aplicadas na base e no topo do corpo de prova, assim como a tensão confinante através de água pressurizada, por ar comprimido, sendo utilizados dois *bladders* (um para a base e topo do corpo de prova, e outro para a tensão confinante) como sistema de interfase água/ar. Para as leituras das tensões era utilizado um transdutor de pressão. Os ensaios foram realizados em três etapas: (a) percolação (inundação e remoção de parte do ar por circulação de água), dois dias antes do ensaio de permeabilidade, sendo aplicada uma tensão confinante de 30 kPa, tensão de base de 10 kPa (1 m.c.a) e tensão de topo 0 kPa (aberto para o ambiente externo); (b) aplicação de contrapressão (dissolução das bolhas de ar remanescentes e saturação) em incrementos de pressão de 50 kPa a cada 15 minutos até a pressão de base de 500 kPa e confinante de 520 kPa; (c) ensaio de permeabilidade, propriamente dito, a carga constante (circulação de água para determinação da vazão). A fase de consolidação não foi empregada por tratar-se de material cimentado.

Para o ensaio de permeabilidade, a diferença de carga se dava pelo deslocamento de uma coluna de mercúrio, devido a diferença de peso específico em relação a água, correspondendo a 4,96 kPa de diferença de pressão entre o topo e a base. Durante ensaio, a coluna de mercúrio era levada até uma certa altura. Após a liberação do fluxo de água (abertura de uma válvula), quando a base da coluna de mercúrio atingia a posição “0 cm”, inicia-se a cronometragem do tempo (em segundos), com resolução de décimos de segundo, indicada por uma régua graduada. A cronometragem era interrompida, sendo registrado o tempo (t), quando a coluna de mercúrio percorria um trecho de 40 cm (Δl). O procedimento era realizado quatro vezes, para determinação de um coeficiente de permeabilidade médio. A seguir determinava-se o coeficiente de permeabilidade, com base na Lei de Darcy (equação 1). Durante o ensaio era determinada a temperatura da água inicial e final usada no ensaio, para posteriormente corrigir o coeficiente de permeabilidade para o padrão de 20° C (equação 2).

$$Q = k_o \cdot i \cdot A \therefore k_o = \frac{Q}{i \cdot A} = \frac{\left(\frac{a_t \Delta l}{t}\right)}{\left[\frac{H}{\left(\frac{\gamma_m - \gamma_w}{\gamma_w}\right) h_m}\right]} \cdot A \quad (1)$$

$$k = R_T \cdot k_o = \left[\frac{2,2902 \cdot (0,9842^t)}{T^{0,1702}} \right] \cdot k_o \quad (2)$$

Onde: k_o = coeficiente de permeabilidade em uma determinada temperatura da água (cm/s); i = gradiente hidráulico; A = área transversal do corpo de prova (~ 19,63 cm²); a_t = área transversal do tubo por onde circula o mercúrio (0,0367 cm²); t = tempo (s) de deslocamento da coluna mercúrio em um trecho Δl (s); Δl = trecho de deslocamento da coluna de mercúrio pré definida (40 cm, neste estudo); H = altura do corpo de prova (~10 cm); γ_w = peso específico da água (0,998 g/cm³); γ_m = peso específico do mercúrio (13,63 g/cm³); altura da coluna de mercúrio (4 cm, utilizado estudo); k = coeficiente de permeabilidade no padrão de 20° C; R_T = coeficiente de correção da viscosidade da água a uma determinada temperatura, para 20° C; T = temperatura média no início e fim da água utilizada no ensaio (°C).



(b)

Figura 2. (a) Diagrama do permeâmetro, tipo E (adaptado de ASTM, 2016b); e (b) fotografia do permeâmetro de parede flexível empregado nos ensaios de permeabilidade.

4.3 Ensaio de Compressão Simples

Logo após a realização do ensaio de permeabilidade, o mesmo corpo de prova era rompido na prensa. Os procedimentos atenderam parcialmente a norma ASTM D2166 (ASTM, 2016a). Para o ensaio de compressão simples era utilizada uma prensa automática, com movimentação constante de 1,14 mm/min, dotada de uma célula de carga de 1.000 kgf, que registrava a carga aplicada com resolução de 0,001 N. O registro da carga era realizado por um *data logger*, que fazia a leitura da carga a cada segundo, bem como registrava a carga máxima aplicada. Com a carga máxima era determinada a tensão de ruptura por compressão, efetuando-se a divisão da carga máxima pela seção real do corpo de prova.

5 RESULTADOS

As figuras 3(a) a 3(d) apresentam os resultados do coeficiente de permeabilidade obtido através dos ensaios de permeabilidade realizados. Nas presentes figuras são avaliados, individualmente, a influência do percentual de mistura em substituição a areia – 10% e 20% (figura 3a), proporção entre a cal de carbureto e a cinza de casca de arroz (CC:CCA) – 1:1; 1,5:1; e 2:1 (figura 3b), tempo de cura – 7 dias, 28 dias e 60 dias (figura 3c), e peso específico aparente seco – 15,5 kN/m³; 16,5 kN/m³; e 17,5 kN/m³ (figura 3d). O menor coeficiente de permeabilidade obtido foi de $1,3 \times 10^{-6}$ m/s, da ordem de 46 vezes menor que a areia *in natura*, para um peso específico de 17,5 kN/m³, 20% de mistura e razão CC:CCA de 1:1,5; e o maior coeficiente de permeabilidade foi de $1,5 \times 10^{-5}$ m/s, da ordem de quatro vezes menor areia *in natura* para um peso específico de 15,5 kN/m³, 10% de mistura e razão CC:CCA de 1:1. Em análise a figura 3(a) é possível verificar que quanto maior a substituição da mistura menor é o coeficiente de permeabilidade, uma vez que se adiciona mais material fino e cimentante. Na figura 3(b) é possível verificar a influência da proporção entre a cal de carbureto e a cinza de casca de arroz, sendo possível verificar que quanto maior o teor de cal, menor a permeabilidade. A figura 3(c) mostra a influência do tempo de cura. Enquanto o tempo de cura tende a aumentar a resistência dos solos estabilizados com cal, no caso da permeabilidade ocorre um aumento da permeabilidade. Isso ocorre, porque nos primeiros dias ocorre a floculação o que provoca o aumento de volume dos produtos de reação,

sendo esta floculação reduz com o tempo de cura, devido a formação de produtos de cimentação, favorecendo a abertura de poros, facilitando a percolação de água. Já a figura 3(d) mostra a influência do peso específico, mostrando que quanto maior o peso específico menor a permeabilidade. Isso ocorre devido a maior densificação, consequentemente, menor índice de vazios, que por sua vez reduz a permeabilidade.

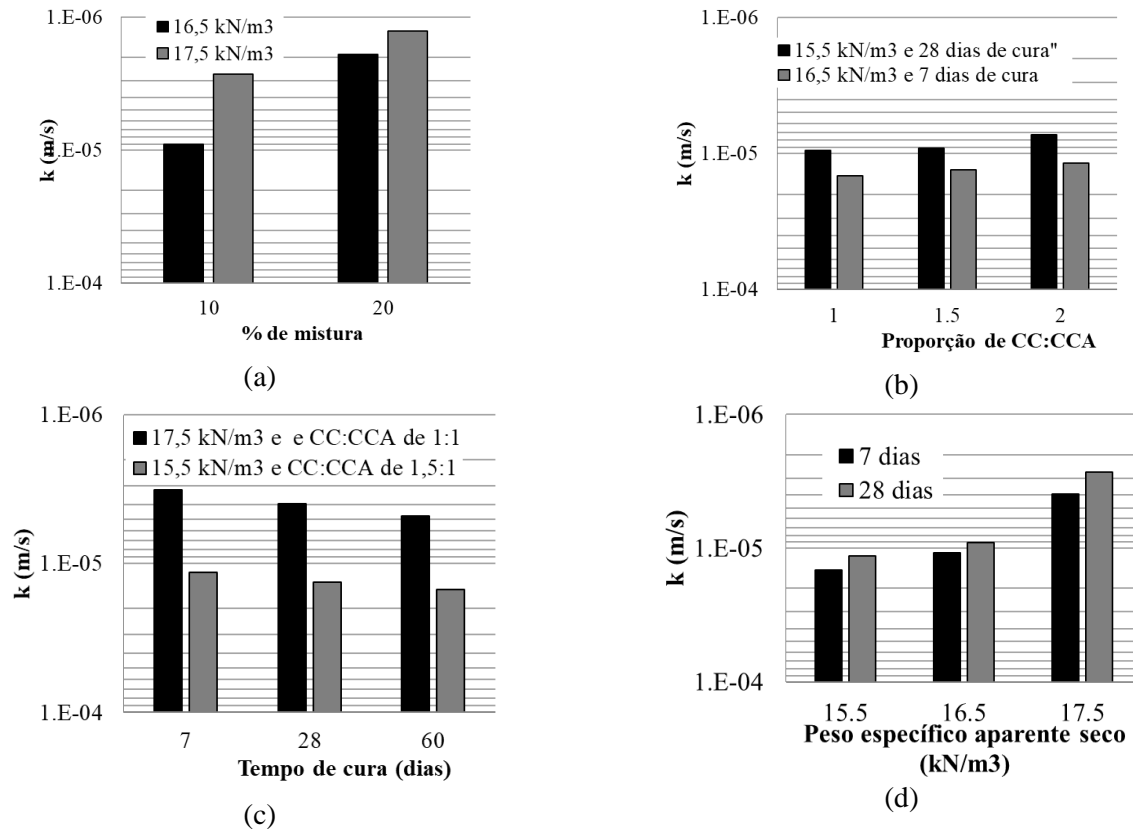


Figura 3. Variação do coeficiente de permeabilidade em função (a) do percentual da mistura para 7 dias de cura e CC:CCA de 1,5; (b) da proporção entre CC:CCA para 10% da mistura; (c) do tempo de cura para 10% da mistura; (d) do peso específico aparente seco a para 10% da mistura e CC:CCA de 1:1

As figuras 4(a) a 4(d) mostram os resultados dos ensaios de compressão simples realizados após o ensaio de permeabilidade, Assim, como nos resultados de permeabilidade, os dados foram separados por parâmetro de influência: percentual de mistura, proporção de cal de carbureto e cinza de casca de arroz, tempo de cura e peso específico. A figura 4(a) mostra que quanto maior o percentual de mistura, maior é a resistência, cujo resultado converge com a permeabilidade, sendo está menor. A figura 4(b) mostra o resultado da influência da proporção de cal de carbureto com a cinza de casca de arroz. Os resultados mostram-se com uma variação parabólica, sendo que na proporção de 1:1,5, é menor que os valores de 1:1 e 2. Esta mesma tendência foi observada por Queiróz et al. (2022) quando realizou os mesmos ensaios com temperatura de cura de 40° C para 7 dias e 28 dias de cura. Isso mostra que há excesso de cal em relação a cinza da casca de arroz, a qual passa a funcionar mais como um *filler*. A figura 5(a) mostra que o melhor ajuste obtido para a relação da resistência a compressão simples com o coeficiente de permeabilidade é um polinômio. A figura 4(c) mostra a influência do tempo de cura na resistência a compressão simples, havendo considerável influência deste parâmetro. O efeito do tempo de cura em termos de resistência se mostra mais significativo do que na permeabilidade. Pela figura 5(b) é possível verificar uma relação inversamente proporcional entre a resistência no tempo e o coeficiente de permeabilidade. Por fim a figura 4(c) mostra a influência do peso específico na resistência. Para baixo tempos de cura, ocorre pouco aumento de 15,5 kN/m³ para 16,5 kN/m³, ao passo que para 16,5 kN/m³ para 17,5 kN/m³, há um aumento expressivo da resistência. Já para maiores tempo de cura (28 dias) a influência tende a ser quase proporcional. Agora analisando a permeabilidade, figura 3(d), percebe-se o mesmo efeito observado na resistência para os 7 dias de cura em comparação com os 28 dias de cura (figura 4c), mostrando haver uma relação linear da redução da permeabilidade com o aumento do peso específico aparente seco (figura 5c).

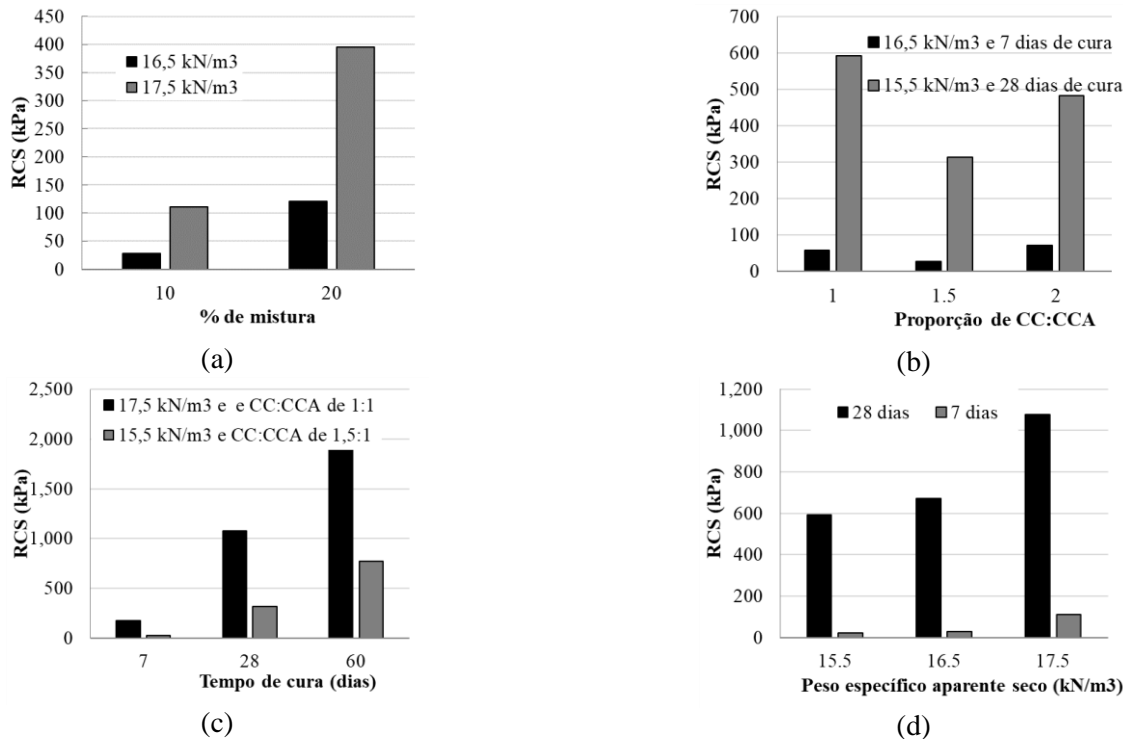


Figura 4. Variação da resistência a compressão simples (RCS) em função (a) do percentual da mistura para 7 dias de cura e CC:CCA de 1,5; (b) da proporção entre CC:CCA para 10% da mistura; (c) do tempo de cura para 10% da mistura; (d) do peso específico aparente seco a para 10% da mistura e CC:CCA de 1:1

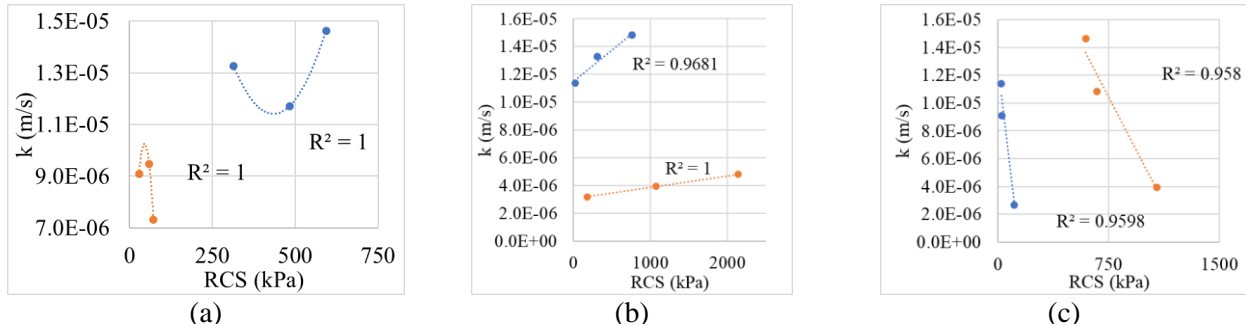


Figura 5. Relação entre a resistência a compressão simples (RCS) x coeficiente de permeabilidade (k) variando (a) proporção entre cal de carbureto e cinza de casca de arroz, (b) o tempo de cura, (c) peso específico aparente seco.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (2022) ‘NBR 6502: Solos e rochas - Terminologia’, *Associação Brasileira de Normas Técnicas*. Rio de Janeiro/RJ: ABNT, pp. 1–40.
- Anburuvel, A. (2024) ‘The Engineering Behind Soil Stabilization with Additives: A State-of-the-Art Review’, *Geotechnical and Geological Engineering*, 42, pp. 1–42.
- ASTM (2015) ‘ASTM D3282 - Standard Practice for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes’, *American Society for Testing and Materials*. Pensilvânia/EUA, pp. 1–6.
- ASTM (2016a) ‘D2166: Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil. ’, *American Society for Testing and Materials (ASTM)*. Filadélfia/EUA: American Society for Testing and Materials (ASTM), p. 7.
- ASTM (2016b) ‘D5084: Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter’, *American Society for Testing and Materials (ASTM)*. Filadélfia/EUA: American Society for Testing and Materials (ASTM), p. 24.
- ASTM (2017) ‘ASTM DD2487 - Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)’, *American Society for Testing and Materials*. Pensilvânia/EUA, pp. 1–10.

Consoli, N.C. *et al.* (2019) ‘The effects of curing time and temperature on stiffness, strength and durability of sand-environment friendly binder blends’, *Soils and Foundations*, 59(5), pp. 1428–1439. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2019.06.007>.

Cristelo, N., Glendinning, S. and Teixeira Pinto, A. (2011) ‘Deep soft soil improvement by alkaline activation’, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement*, 164(2), pp. 73–82. Available at: <https://doi.org/10.1680/grim.900032>.

Cruz, R.C. (2004) *Condutividade hidráulica em solos contaminados encapsulados*. Dissertação de Mestrado. UFRGS.

Davidovits, J. (1994) ‘Method for Obtaining a Geopolymeric Binder Allowing to Stabilize, Solidify and Consolidate Toxic or Waste Materials’. EUA: Patente nº 5.349.118.

Du, Y.J., Zhang, Y.Y. and Liu, S.Y. (2011) ‘Investigation of Strength and California Bearing Ratio Properties of Natural Soils Treated by Calcium Carbide Residue’, in *Geo-Frontiers 2011*. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, pp. 1237–1244. Available at: [https://doi.org/10.1061/41165\(397\)127](https://doi.org/10.1061/41165(397)127).

Duxson, P. *et al.* (2007) ‘Geopolymer technology: the current state of the art’, *Journal of Materials Science*, 42(9), pp. 2917–2933. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0637-z>.

Fernández-Jiménez, A. *et al.* (2006) ‘The role played by the reactive alumina content in the alkaline activation of fly ashes’, *Microporous and Mesoporous Materials*, 91(1–3), pp. 111–119. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2005.11.015>.

Godoy, V.B. (2018) *Desempenho de misturas de distintos materiais com cinza volante e cal submetidas a condições climáticas severas*. Dissertação de Mestrado. UFRGS.

Horpibulsuk, S. *et al.* (2015) ‘Calcium Carbide Residue: A Cementing Agent for Sustainable Soil Stabilization’, *Geotechnical Engineering, Journal of the SEAGS & AGSSEA*, 46, pp. 22–27.

IBGE (2022) *PAM – Produção Agrícola Municipal: Quantidade produzida (Tonelada) – Rio Grande do Sul*, <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9117-producao-agricola-municipal-culturas-temporarias-e-permanentes.html>.

ICTA/UFRGS (2021) *Terra de Arroz*, https://www.ufrgs.br/alimentus1/terraearroz/grao/gr_casca.htm.

Jangde, H. and Khan, F. (2023) ‘Experimental Investigation on Interrelation Between Hydraulic Conductivity and Compressive Strength of Soft Soil Using Metakaolin as Stabilizer’, *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering* [Preprint]. Available at: <https://doi.org/10.1007/s40996-023-01323-3>.

Lotero, A. *et al.* (2021) ‘Mechanical Properties of Alkali-Activated Ground Waste Glass–Carbide Lime Blends for Geotechnical Uses’, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 33(10). Available at: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003918](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003918).

Market Research Store (2015) *Acetylene Gas Market for Chemical Production, Welding & Cutting and Other Applications: global industry perspective, comprehensive analysis and forecast, 2014-2020*.

Menger, E. da S. *et al.* (2020) ‘Hydraulic Conductivity and Compressive Strength of Cemented Soils’, *Geotechnical and Geological Engineering*, 38(6), pp. 6031–6039. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01411-5>.

Miranda, T. *et al.* (2020) ‘Application of alkali-activated industrial wastes for the stabilisation of a full-scale (sub)base layer’, *Journal of Cleaner Production*, 242, p. 118427. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118427>.

Osinubi, K.J. (1998) ‘Permeability of Lime-Treated Lateritic Soil’, *Journal of Transportation Engineering*, 124(5), pp. 465–469.

Palomo, A., Grutzeck, M.W. and Blanco, M.T. (1999) ‘Alkali-activated fly ashes’, *Cement and Concrete Research*, 29(8), pp. 1323–1329. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00243-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00243-9).

Paula, T.M. (2016) *Misturas de Cinza Volante e Cal de Carbureto: Comportamento da Resistência à Compressão Simples Frente à Moagem da Cinza Volante*. Dissertação de Mestrado. UFRGS.

Queiróz, L.C. *et al.* (2022) ‘Macro–Micro Characterization of Green Stabilized Alkali-Activated Sand’, *Geotechnical and Geological Engineering*, 40(7), pp. 3763–3778. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10706-022-02130-9>.

Servi, S. *et al.* (2022) ‘Mechanical response of filtered and compacted iron ore tailings with different cementing agents: Focus on tailings-binder mixtures disposal by stacking’, *Construction and Building Materials*, 349, p. 128770. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128770>.

Winter, D. (2018) *Resistência, Rigidez e Durabilidade para Solos Arenosos Estabilizados com Materiais mais Sustentáveis*. Tese de Doutorado. UFRGS.