

ANÁLISE DA RESISTÊNCIA MECÂNICA E PERMEABILIDADE DE UMA AREIA FINA ESTABILIZADA COM RESÍDUOS: CAL DE CARBURETO E CINZA DE CASCA DE ARROZ

Analysis of the mechanical resistance and permeability of fine sand stabilized with residues: carbide lime and rice husk ash

Cesar Alberto Ruver^a, Dionatta Willy de Quadros Fraga^a, Gabriel Melo Pacheco^a

^a Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.

RESUMO – O emprego de areias em obras geotécnicas passa a ser possível quando estabilizadas quimicamente com agentes ligantes, que conferem resistência e alteram a permeabilidade. Neste sentido, o objetivo deste trabalho é mostrar a influência na permeabilidade e no ganho de resistência de uma areia fina eólica estabilizada com resíduos: cal de carbureto (CC) e cinza de casca de arroz (CCA), produzidos em abundância no estado do Rio Grande do Sul, Brasil. Para o presente estudo, variou-se: (a) teor de CC+CCA (10% e 20%) em substituição da areia; (b) proporção de CC:CCA (1:1; 1,5:1; e 2:1); (c) peso volumétrico seco (15,5; 16,5 e 17,5 kN/m³); e (d) tempo de cura (7, 28 e 60 dias). O coeficiente de permeabilidade (mais influenciado pelo teor de ligantes) reduziu até 58 vezes em relação à areia *in natura* e a resistência à compressão uniaxial (mais influenciada pelo tempo de cura) chegou até 3 MPa.

ABSTRACT – Sand utilizations in geotechnical works becomes possible when it is chemically stabilized with cementing agents, which provide mechanical resistance and alter permeability. In this sense, the aim of this paper is to show the influence on the permeability and strength gain of fine eolic sand stabilized with residues: carbide lime (CC) and rice husk ash (CCA), produced in abundance in the State of Rio Grande do Sul, Brazil. For the present study, the following were varied: (a) CC+CCA content (10% and 20%) replacing sand; (b) CC:CCA ratio (1:1; 1.5:1; and 2:1); (c) dry specific weight (15.5, 16.5 and 17.5 kN/m³); and (d) curing time (7, 28 and 60 days). The permeability coefficient (more influenced by the cementing agents ratio) reduced up to 58 times in relation to natural sand and the simple compression resistance (more influenced by the curing time) reached up to 3 MPa.

Palavras Chave – aproveitamento de resíduos, permeabilidade, resistência mecânica.

Keywords – residues utilization, permeability, mechanical resistance.

1 – INTRODUÇÃO

O litoral brasileiro é composto por 10,9 mil km de extensão, abrangendo uma superfície de aproximadamente 251,3 mil km², que é essencialmente formada por areia sedimentar de origem eólica (IBGE, 2021). Estas apresentam propriedades inadequadas para serem usadas em diversas obras geotécnicas e ambientais, devido à baixa capacidade de carga e à baixa resistência ao

E-mails: cesar@ufrgs.br (C. Ruver), dionatta95@gmail.com (D. Fraga), melo22044@gmail.com (G. Pacheco)

ORCID: orcid.org/0000-0003-1520-1422 (C. Ruver), orcid.org/0009-0003-7744-1736 (D. Fraga), orcid.org/0009-0005-2505-1036 (G. Pacheco)

ISSN 0379-9522; e-ISSN 2184-8394 – Geotecnia n° 164 – julho/julio/july 2025 – pp. 43-64
: https://doi.org/10.14195/2184-8394_164_2 – © 2025 Sociedade Portuguesa de Geotecnia

cisalhamento (quando não confinadas), à elevada permeabilidade e à facilidade de erosão. Estes problemas podem ser contornados pela estabilização química, através da adição de agentes ligantes, tornando as areias um material consolidado (Jawad et al., 2014; Falah e Muteb, 2023; Anburuvel, 2024). Segundo os autores anteriormente citados, a estabilização química consiste na incorporação de aditivos ao solo, que podem reagir entre si e/ou com as partículas do solo, gerando produtos cimentantes que melhoram as propriedades dos solos, muitas vezes, tendo como foco o aumento da resistência mecânica. Na estabilização química de areia pode empregar-se a mistura de agentes ricos em silicatos e/ou aluminossilicatos amorfos em pó, tais como cinza de casca de arroz, metacaulim, escória de alto forno, entre outros; e outro agente alcalino, aquoso ou em pó, capaz de fornecer um meio com elevado pH, tais como, as cales (Eades e Grim, 1960; Davidivits, 1994; Palomo et al., 1999). Conforme descrito nos trabalhos de Fernández Jiménez et al. (2006) e Duxson et al. (2007), a adição de cal (como, a cal de carbureto, rica em óxido de cálcio), gera um meio alcalino, que faz solubilizar os silicatos (como, a cinza de casca de arroz, rica em sílica amorfa), cuja reação resultante final é o silicato de cálcio hidratado.

Tradicionalmente, na estabilização química são empregados o cimento Portland e a cal, cuja produção consome grandes quantidades de recursos naturais. Pesquisas recentes mostram-se promissoras na utilização de misturas de resíduos, cujos desempenhos podem ser iguais e até superiores à estabilização com os agentes ligantes tradicionais (Cristelo et al., 2011; Consoli et al., 2018; Consoli, et al. 2019; Miranda et al., 2020; Lotero et al., 2021; Servi et al., 2022; Silva et al., 2023; Anburuvel, 2024), bem como, apresentam menor impacto ambiental (Al Subari et al.; 2023; Saldanha et al., 2023). Entre os diversos resíduos estudados, pode dar-se destaque à cal de carbureto (CC) e à cinza de casca de arroz (CCA). Atualmente, o estado do Rio Grande do Sul, Brasil, 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, 2021). A cal de carbureto é um resíduo gerado da produção de gás acetileno. No Brasil são produzidas cerca de 6 mil toneladas ao ano, gerando cerca de 17 mil toneladas de cal de carbureto por ano (Du et al., 2011; Horpibulsuk et al., 2015; Market Research Store, 2015). Mais especificamente, em termos de região metropolitana de Porto Alegre, no sul do Brasil, uma planta industrial localizada na cidade de Esteio, produz 120 toneladas de acetileno por mês, gerando assim 342 toneladas de cal de carbureto mensais (Consoli et al., 2018). Assim, conforme citado por Servi et al. (2022), os elevados volumes gerados de cal de carbureto e cinza de casca de arroz, associados a elevados 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 arenosos e siltosos.

Diversos estudos mostram que a adição de cinza de casca de arroz e cales em areia e em solos arenosos faz aumentar a resistência (essencialmente, a resistência à compressão uniaxial) com o tempo de cura (Ruver et al.; 2013; Behak, 2016; Consoli et al., 2018; Consoli et al., 2019; Consoli et al., 2021, Eliaslankaran et al., 2021; Pelisser et al., 2023; Queiróz et al., 2023; Silva et al., 2023). Por outro lado, há um número bem menor de estudos que focam na permeabilidade (Osinubi, 1998). Por exemplo, os trabalhos de Ayininuola e Olaosebikan (2013) e Fathi-Moghaddam (2020), mostraram que ocorreu uma pequena redução da permeabilidade nas areias estabilizadas com cinzas e cales.

Desta forma, o objetivo principal deste trabalho é estudar a potencial redução na permeabilidade, através do coeficiente de permeabilidade, associada ao aumento da resistência à compressão uniaxial de uma areia fina sedimentar de origem eólica estabilizada com diferentes misturas de cal de carbureto e cinza de casca de arroz.

2 – PLANEJAMENTO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

Inicialmente, definiram-se os tipos e os valores das variáveis envolvidas no estudo: (a) variáveis dependentes (resposta): (a1) coeficiente de permeabilidade (no padrão de 20° C) – k_{20} e (a2) resistência à compressão uniaxial – q_u ; (b) variáveis independentes: (b1) peso volumétrico seco – γ_d

(15,5; 16,5; e 17,5 kN/m³), (b2) proporção de agentes ligantes, cal de carbureto – CC: cinza de casca de arroz – CCA (1:1; 1,5:1; e 2:1), (b3) teor de agentes ligantes, em substituição a areia – CC+CCA (10% e 20%) e (b4) tempo de cura – t (7 dias, 28 dias e 60 dias); (c) variáveis constantes: (c1) 12% de água em peso em adição aos materiais secos e (c2) temperatura (ambiente) de cura de 23+/-1° C. Os pesos volumétricos secos e o teor de água são os usuais empregados em diversas pesquisas do Laboratório de Engenharia Geotécnica e Geotecnologia Ambiental (LEGG/UFRGS), onde parte do trabalho foi desenvolvido, (Paula, 2016; Godoy, 2018; Winter, 2018; Queiróz et al., 2023), obtidos de ensaios de compactação. Já as proporções dos materiais e o percentual de mistura foram adotados com base no trabalho de Queiróz et al. (2023), que utilizou os mesmos materiais. Como as reações pozolânicas com estabilização com cal são lentas, escolheu-se um tempo de cura usual de 28 dias e 60 dias, além de 7 dias, para verificar o efeito, principalmente, no coeficiente de permeabilidade. A temperatura de 23° C corresponde a uma temperatura média anual na região sul do Brasil.

Considerando as variáveis independentes (k) e os níveis mínimo, médio e máximo (3) (exceto o teor de ligantes), chegou-se a um projeto fatorial do tipo 3^k incompleto, resultando em uma moldagem de 54 amostras. Porém, a partir dos primeiros resultados, verificou-se que a proporção de ligantes não se mostrou significativa, sendo o número de amostras para 60 dias de cura reduzido para 10 amostras, resultando ao final 46 amostras.

3 – PROCEDIMENTOS E MÉTODOS DE ENSAIO

3.1 – Preparação e moldagem dos corpos de prova

Para os ensaios de permeabilidade e resistência uniaxial foram moldados corpos de prova com 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, sendo utilizado o mesmo corpo de prova em ambos os ensaios. Primeiro era feito o ensaio de permeabilidade e, posteriormente, a ruptura na prensa. A moldagem era realizada por compactação estática, em três camadas de igual altura, em um molde metálico tripartido. Após definidas as dosagens, os materiais (areia fina, cinza de casca de arroz, cal de carbureto e água destilada) eram pesados em uma balança com resolução de 0,01 g, em quantidade suficiente para a moldagem de um corpo de prova, mais 10%, sendo este excedente utilizado para conferência do teor de água de moldagem. Em seguida, os materiais secos eram misturados até formar uma mistura homogênea. Depois era acrescentada a água (teor de 12%) e era feita a nova mistura até a homogeneização. Após eram separadas as quantidades para cada uma das camadas do corpo de prova (em três potes plásticos) e a sobra era colocada em três cápsulas metálicas que eram pesadas e levadas a estufa a 100°C para posteriormente determinar o teor de água real de moldagem. A seguir, com o molde já montado e untado, era feita a moldagem do corpo de prova na prensa. Após a compactação da primeira e da segunda camada era feita a escarificação da superfície para melhor aderência entre as camadas. Depois da moldagem, era feita a desmoldagem, sendo cada parte do molde removida pelo deslizamento ao longo das paredes do corpo de prova. Em seguida, era feito a pesagem do corpo de prova e eram realizadas três medidas de altura e de diâmetro, com paquímetro (resolução de décimos de milímetro). E por fim, o corpo de prova era ensacado e levado para a câmara úmida a uma temperatura de 23°C, onde aguardava o tempo de cura até a realização do ensaio. Transcorridas 24 horas (tempo suficiente para a evaporação de toda a água da mistura) da moldagem, as cápsulas com a mistura seca eram pesadas e era calculada o teor de água de moldagem médio. Se o corpo de prova apresentasse uma diferença de peso, de umidade, de dimensões (altura, diâmetro, volume) ou de peso volumétrico seco acima de 2%, era descartado e feita nova moldagem.

3.2 – Ensaio de permeabilidade

Para a realização dos ensaios de permeabilidade seguiram-se os procedimentos da norma americana ASTM D-5084-16 (ASTM, 2016). Os ensaios de permeabilidade foram realizados em um permeâmetro de parede flexível, empregando o método E (volume e carga constante)

(ASTM, 2016) (diagrama mostrado na Figura 1). O permeâmetro empregado no estudo (Figura 2a) é dotado de uma câmara de acrílico fixada entre base e topo metálicos que é preenchida com água e posteriormente pressurizada para aplicação da tensão confinante. O corpo de prova é confinado e isolado do fluido confinante no interior da câmara com uma membrana de látex e vedadas por anéis de borracha no pedestal da base e no topo. As tensões na base e no topo do corpo de prova, assim como a tensão confinante são aplicadas através de água pressurizada, por ar comprimido, sendo utilizados um sistema de interfase ar/água. As leituras das tensões eram realizadas por transdutor de pressão. Os ensaios foram realizados em três etapas: (a) percolação (inundação e remoção de parte do ar por circulação de água); (b) aplicação de contrapressão (dissolução das bolhas de ar remanescentes e saturação); (c) ensaio de permeabilidade, propriamente dito, a carga constante (circulação de água para determinação da vazão pelo deslocamento de uma coluna de mercúrio) (Figura 2b).

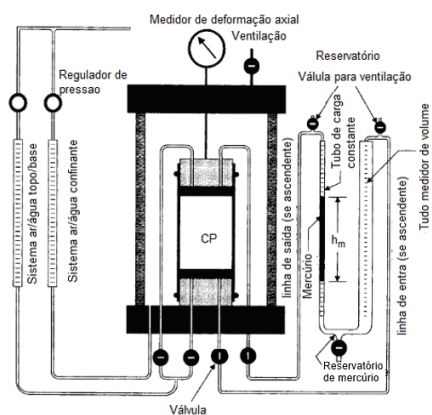


Fig. 1 – Diagrama do permeâmetro, tipo E (adaptado de ASTM, 2016).

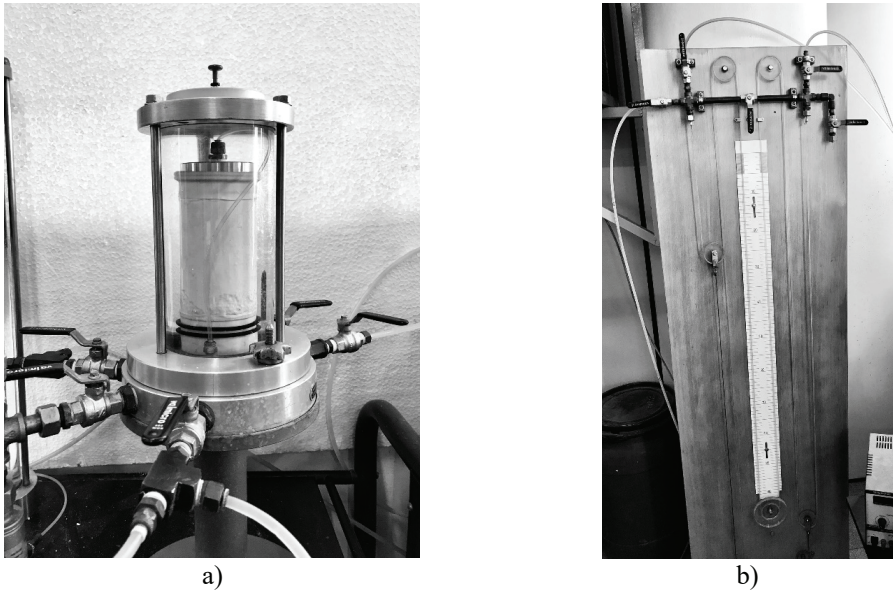


Fig. 2 – Fotografia (a) do permeâmetro utilizado nos ensaios de permeabilidade e (b) sistema de leitura de deslocamento da coluna de mercúrio.

Para o ensaio de permeabilidade, aguardava-se a cura em câmara com temperatura e umidade controlada até 2 dias antes de fechar o tempo de cura (5, 26 ou 58 dias). Então, colocava-se o corpo de prova no pedestal da base do permeâmetro, sendo antes colocada a pedra porosa e um papel filtro. No topo do corpo de prova era colocado outro papel filtro, outra pedra porosa e o topo metálico. Em seguida, revestia-se o corpo de prova com a membrana de látex, que vinha desde o pedestal até o topo. Após, eram inseridos dois anéis de borracha no pedestal e no topo metálico, de forma a isolar o corpo de prova do meio externo (tensão confinante). A seguir, era colocada a câmara de acrílico, que era preenchida com água destilada. Depois, era aplicada uma tensão confinante constante de 30 kPa. Após, era dado início a percolação, abrindo a válvula do topo para o ambiente externo (0 kPa de pressão) e a válvula da base, cuja mangueira era ligada a um reservatório de água destilada a uma tensão de 10 kPa. Neste ponto, o corpo de prova estava sujeito a uma tensão efetiva de 20 kPa (confinante de 30 kPa, menos a de base de 10 kPa) e uma diferença de carga com tensão de 10 kPa, com fluxo de água ascendente pelo corpo de prova. A etapa de percolação ocorria por 48 horas, até o fechamento do tempo de cura (7, 28 ou 60 dias), tempo suficiente para percolar o equivalente a pelo menos o volume de vazios do corpo de prova.

Depois da etapa de percolação, era realizada a fase de aplicação de contrapressão com o objetivo de saturar o corpo de prova pela dissolução das bolhas de ar remanescentes sob alta pressão. A tensão confinante e de topo era aumentada de 50 kPa em 50 kPa, até uma pressão de 520 kPa e 500 kPa, respectivamente, sempre mantendo uma tensão efetiva de 20 kPa. Inicialmente, aplicava-se o aumento da tensão confinante e em seguida era aplicado o aumento da tensão de topo e aguardava-se que o aumento da tensão chegasse na base. Embora a transferência de tensão ocorresse de forma rápida, para menores tensões (a metade), aguardava-se 30 minutos antes do próximo incremento. Para as maiores tensões, aguardava-se 15 minutos. Para os três últimos incrementos de tensão, determinava-se o parâmetro B, com o objetivo de monitorar a saturação, devendo este permanecer constante (atingiam-se valores da ordem de 0,9), segundo a ASTM (2016), por ser material cimentado (incompressível). Por ser um material cimentado (sem variação de volume), não se realizava a etapa de consolidação, passando-se para a realização do ensaio de permeabilidade.

O sistema de pressão de topo e de base era ligado ao mesmo sistema de interface ar/água, mantendo a mesma pressão de 500 kPa, em um sistema fechado (como pode ser visto no diagrama da Figura 1). Para o ensaio, propriamente dito, a diferença de carga, e consequentemente, a circulação de água pelo corpo de prova (em fluxo descendente), se dava pelo deslocamento, pela ação da gravidade, de uma coluna de mercúrio, devido a diferença de peso volumétrico em relação a água (Figuras 1 e 2b). No ensaio, a coluna de mercúrio era levada até uma certa altura em uma régua graduada. 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 compor 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, para, posteriormente, corrigir o coeficiente de permeabilidade para o padrão de 20° C (equação 2). Além da determinação do tempo e temperaturas da água, eram necessárias as dimensões do corpo de prova (diâmetro médio – D e altura média – H) e as temperaturas inicial e final do ensaio. O restante dos parâmetros já estava definido.

$$Q = 100. k. i. A \therefore k = 100. \frac{Q}{i. A} = 100. \frac{\left(\frac{a_t \cdot \Delta l}{t} \right)}{\left[\frac{H}{\left(\frac{\rho_m - \rho_w}{\rho_w} \right) \cdot h_m} \right] \cdot A} \quad (1)$$

onde: k = coeficiente de permeabilidade (m/s); i = gradiente hidráulico; A = área transversal do corpo de prova ($\sim 19,63 \text{ cm}^2$); a_t = área transversal do tubo por onde circula o mercúrio (0.0367 cm^2); 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 ($\sim 10 \text{ cm}$); ρ_w = massa específica da água ($0,998 \text{ g/cm}^3$); ρ_m = massa específica do mercúrio ($13,63 \text{ g/cm}^3$); h_m = altura da coluna de mercúrio (4 cm, utilizado estudo).

$$k_{20} = R_T \cdot k = \left[\frac{2,2902 \cdot (0,9842^t)}{T^{0,1702}} \right] \cdot k \tag{2}$$

onde: k_{20} = coeficiente de permeabilidade no padrão de 20°C (m/s); 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).

3.3 – Ensaio de compressão uniaxial

Logo após a realização do ensaio de permeabilidade, era realizado o ensaio de compressão uniaxial com o mesmo corpo de prova. Os procedimentos atenderam parcialmente a norma ASTM D-2166-16 (ASTM, 2016). Como o corpo de prova saía do permeâmetro e ia diretamente para a prensa, sem que houvesse necessidade de imersão em água, pois já saía saturado do permeâmetro. Para a compressão uniaxial era utilizada uma prensa automática, com movimentação constante de 1,14 mm/min, dotada de uma célula de carga de 10 kN, que registrava a carga aplicada com resolução de 0,001 N. O corpo de prova era inserido na base plana, sendo empurrado para acima, contra um topo (fixo) também plano, dotado de uma rótula. O sistema de aquisição digital fazia o registro da carga a cada segundo, até a ruptura total do corpo de prova (Figura 3), sendo também registrada a carga máxima aplicada. Com a carga máxima foi determinada a tensão de ruptura por compressão, efetuando-se a divisão da carga máxima pela seção real do corpo de prova (equação 3).

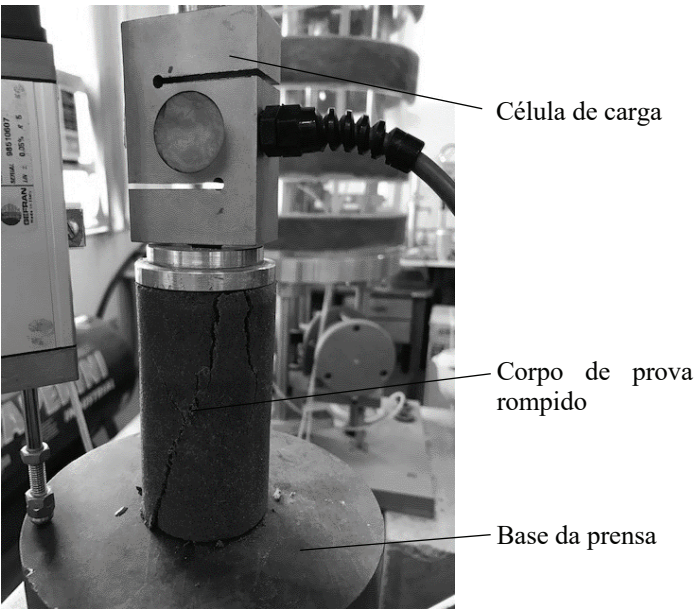


Fig. 3 – Corpo de prova após a ruptura na prensa.

$$q_u = 10 \cdot \frac{Q_{max}}{A} \quad (3)$$

onde: q_u = resistência a compressão uniaxial (kPa); Q_{max} = carga máxima registada na ruptura do corpo de provas (N); A = área transversal do corpo de prova ($\sim 19,63 \text{ cm}^2$).

4 – CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

4.1 – Areia

Como solo a ser estabilizado, empregou-se uma areia, de origem eólica, procedente de depósitos naturais de duna da cidade de Osório (litoral do estado do Rio Grande do Sul, Brasil). A Figura 4 apresenta a distribuição granulométrica e o Quadro 1 apresenta as características gerais. 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), norma ASTM D-2487-17 (ASTM, 2017), e pelo sistema AASHTO/HRB é classificada como A-3 (areia fina), norma ASTM D-3282-15 (ASTM, 2015). Pela curva granulométrica, verifica-se que é composta com grãos de tamanho de areia fina (entre 0,075 mm e 0,475 mm). A Figura 5 mostra as fotografias da areia realizada por microscopia eletrônica de varredura (MEV), mostrando a uniformidade dos grãos e o aspecto arredondado, típico de material transportado pelo vento e/ou água.

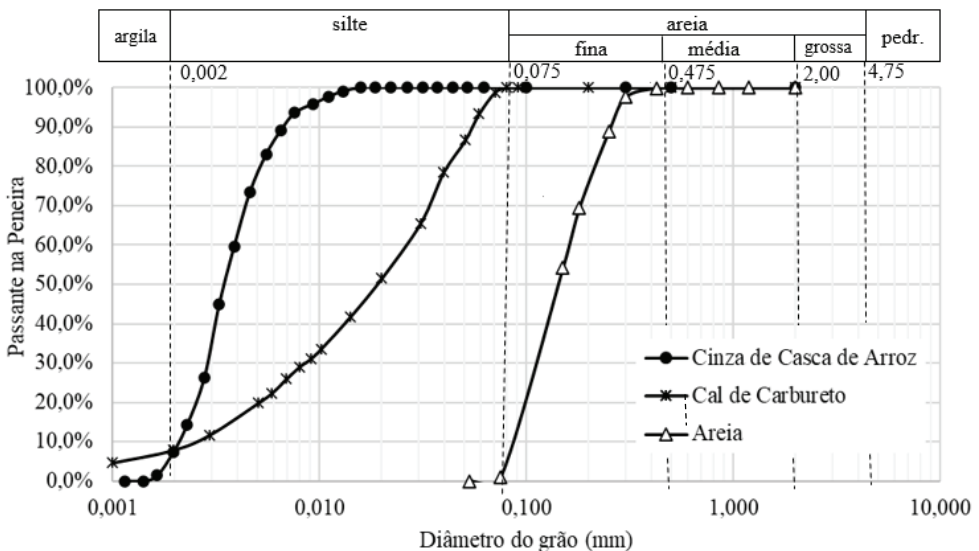


Fig. 4 – Curvas granulométricas dos materiais empregados na pesquisa.

4.2 – Cinza de casca de arroz (CCA)

A cinza de casca de arroz utilizada nesta pesquisa é produzida e comercializada por uma empresa da cidade de Alegrete (região produtora de arroz, no estado do Rio Grande do Sul, Brasil). A cinza da casca de arroz (CCA) é originária da queima controlada da casca de arroz, de modo a manter seu estado amorfo. Segundo a revisão apresentada por Nguyen et al. (2020), a queima da casca de arroz a uma temperatura entre 500°C e 800°C por 1 hora a 4 horas, já produz um material

pozolânico de alta reatividade. Embora seja um resíduo, possui valor comercial e é utilizado na construção civil, como adição em concretos e argamassas. A Figura 4 apresenta a distribuição granulométrica e o Quadro 1 apresenta as características gerais. É basicamente composta por partículas no tamanho silte. Não apresenta limite de liquidez e plasticidade. Verifica-se, pelo Quadro 1, que se apresenta uniforme e bem graduada. O Quadro 2 apresenta os resultados de espectrometria de fluorescência de raios-X (FR-X), mostrando a sua composição química, sendo basicamente, composta por 94,4% de sílica e pequenos teores de cálcio, potássio, ferro e alumínio. A Figura 6a mostra uma imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Quadro 1 – Caracterização geral dos materiais empregados na pesquisa.

Características	Areia	CCA	CC
Granulometria			
Areia fina	100,0%	0,0%	0,0%
Silte	0,0%	92,2%	92,6%
Argila	0,0%	7,8%	7,4%
D ₁₀	0,085	0,0025	0,0021
D ₃₀	0,110	0,0085	0,0029
D ₆₀	0,170	0,0265	0,0039
Coefficiente de uniformidade (c _u)	2,00	10,54	1,86
Coefficiente de curvatura (c _c)	0,87	1,09	1,02
Índice de vazio mínimo (e _{min})	0,55	-	-
Índice de vazio máximo (e _{max})	0,85	-	-
Peso volumétrico das partículas sólidas (kN/m ³)	26,5	21,6	22,4

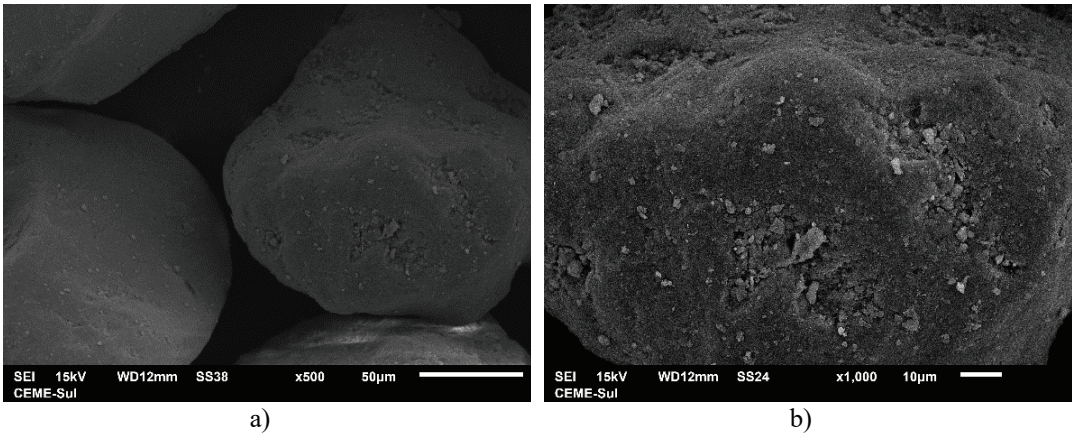


Fig. 5 – Imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) de partículas de areia com ampliação de (a) 500 x e (b) 1000x.

Quadro 2 – Composição química dos resíduos empregados como cimentantes (em %).

Material	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	MgO	MnO	P ₂ O ₅
CCA	94,4	1,1	0,1	0,7	0,7	1,8	0,1	0,7	0,4	0,6
CC	2,0	0,7	0,2	95,1	-	0,3	0,2	0,6	-	-

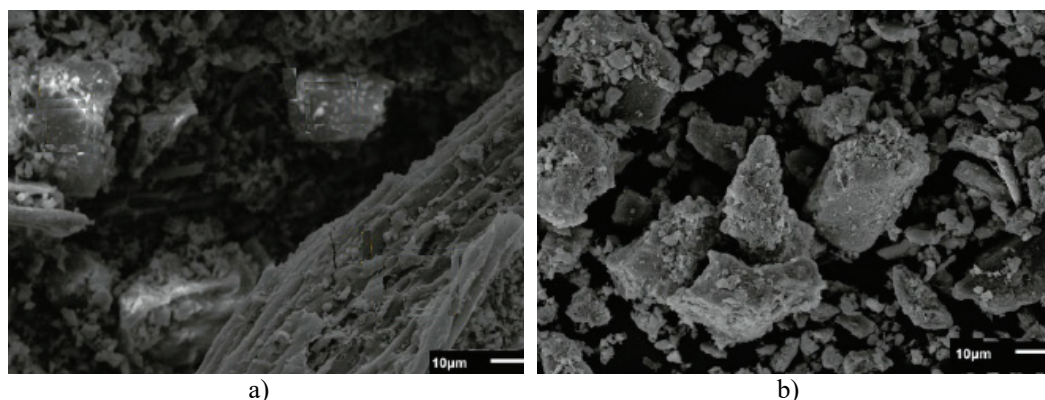


Fig. 6 – Imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) com ampliação de 1000x de partículas de (a) cinza de casca de arroz (CCA) e (b) cal de carbureto (CC).

4.3 – Cal de carbureto (CC)

A cal de carbureto (CC), empregada no estudo, é um resíduo proveniente da produção do gás acetileno e foi obtida de uma empresa localizada na cidade de Esteio (estado do Rio Grande do Sul, Brasil). A cal é fornecida no formato de pasta com alto teor de umidade. Para utilização, foi realizada a secagem em uma estufa a 60° C por cerca de 48 horas, até a constância de massa. Após, foi destorroada e peneirada na peneira de abertura de 0,075 mm. Por fim, foi armazenada em saco plástico duplo, ambos vedados, para minimizar a carbonatação. A Figura 4 apresenta a distribuição granulométrica e o Quadro 1 apresenta as características gerais. Como pode ser visto, é composta de 92,6 % de partículas com tamanho de silte e o restante argila. O Quadro 2 apresenta o resultado de espectrometria de fluorescência de raios-X (FR-X). Em termos de composição química, verifica-se um alto teor de óxido de cálcio (95,1%), seguido de 2% de sílica e baixos teores de óxido de ferro e alumínio (menos de 1%). A Figura 6b mostra uma imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura (MEV).

5 – RESULTADOS DOS ENSAIOS E ANÁLISES

As Figuras 7 e 8 mostram os gráficos da média da resistência a compressão uniaxial (q_u) e média do coeficiente de permeabilidade (k_{20}), respectivamente, pelas combinações das variáveis independentes (tempo de cura – t , peso volumétrico seco – γ_d , teor de ligantes – CC+CCA, e proporção de ligantes - CC/CCA). Para a resistência a compressão uniaxial (q_u), verifica-se um aumento, com aumento do tempo de cura (t), aumento do teor de ligantes (CC+CCA), e aumento do peso volumétrico seco (γ_d), mas há pouca relação com a proporção de ligantes (CC/CCA). Como as reações pozolânicas, responsáveis pela resistência, com cal são lentas, a Figura 9 apresenta a resistência à compressão uniaxial ao longo dos tempos de cura (entre 7 e 60 dias), mostrando o aumento da resistência com o tempo de cura, numa relação logarítmica. Pela Figura 8, verifica-se que o coeficiente de permeabilidade (k_{20}) reduz, com o aumento do teor de ligantes (CC+CCA), e aumento do peso volumétrico seco (γ_d), mas pouca relação com a variação da proporção de ligantes (CC/CCA) e tempo de cura (t). A Figura 10, mostra o coeficiente de permeabilidade (k_{20}) em função da evolução do tempo de cura (t), mostrando haver um pequeno aumento de 7 para 28 dias, porém, quase sem variação entre os 28 e 60 dias.

A norma brasileira de solo-cimento, NBR 12253 (ABNT, 2012), exige que o teor de cimento Portland a ser adicionado ao solo deve ser tal que se atinja uma resistência à compressão uniaxial de 2,1 MPa para uso como base de pavimento. Tomando como referência esta norma, embora seja

aplicada a adição de cimento Portland, verifica-se que para este estudo, para 7 dias de cura, o valor máximo atingido foi da ordem de 395 kPa. Para 28 dias de cura, somente as dosagens correspondentes a um peso volumétrico seco (γ_d) de 17,5 kN/m³ e teor de ligantes (CC+CCA) de 20%, apresentaram valores acima de 2,1 MPa. Já 60 dias de cura, para teor de ligantes de 10%, somente o peso volumétrico seco de 17,5 kN/m³ superou o valor de 2,1 MPa. Para os teores de 20%, no tempo de cura de 60 dias, todas as dosagens chegaram próximas e ultrapassaram o valor de 2,1 MPa.

Em termos de valores absolutos de coeficiente de permeabilidade (k_{20}), obteve-se o menor valor de 1×10^{-6} m/s (7 dias de cura, $\gamma_d = 17,5$ kN/m³, CC/CCA = 2:1 e CC+CCA = 20%) e o maior $1,5 \times 10^{-5}$ m/s (28 dias de cura, $\gamma_d = 15,5$ kN/m³, CC/CCA = 1:1 e CC+CCA = 10%), correspondendo uma diferença de 15 vezes. O valor do coeficiente de permeabilidade da areia *in natura* é de $5,8 \times 10^{-5}$ m/s, para um peso volumétrico seco de 16,3 kN/m³, que corresponda um valor de 3,9 e 58 vezes maior, respectivamente, que o maior e menor valor obtido na areia estabilizada. Menger et al. (2020), estabilizaram a mesma areia com 3%, 5% e 7% de cimento Portland, com pesos volumétricos secos de 15 kN/m³ e 16 kN/m³, obtendo um valor médio de coeficiente de permeabilidade de $1,38 \times 10^{-5}$ m/s (entre 1,3 e $1,5 \times 10^{-5}$ m/s, para os pesos volumétricos secos de 16 kN/m³ e 15 kN/m³, respectivamente, e sem diferença em função do teor de cimento), que corresponde a uma redução média de 4 vezes em relação à areia *in natura*.

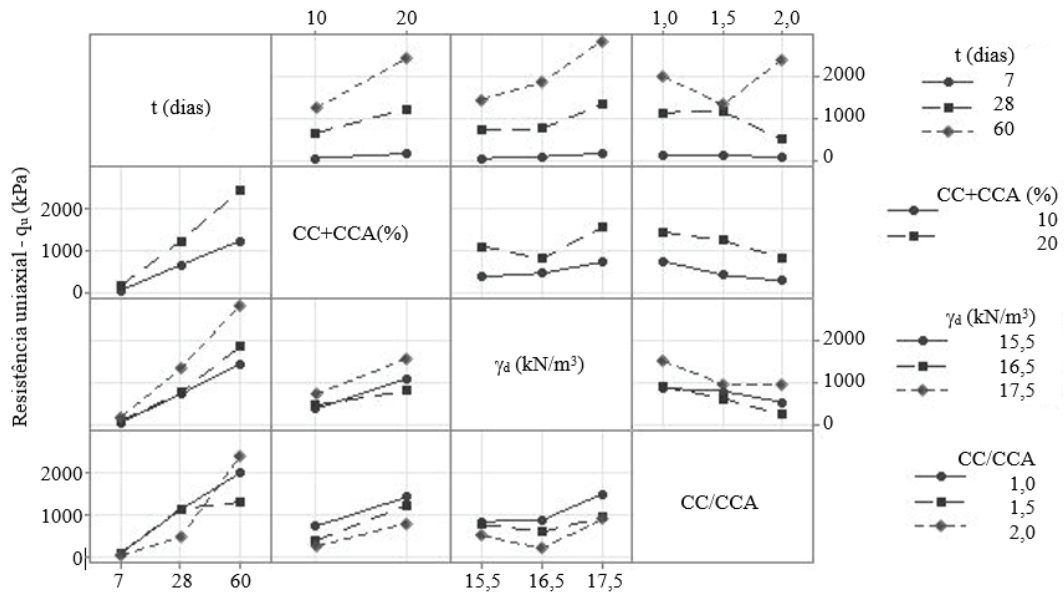


Fig. 7 – Gráfico de combinação das variáveis independentes para a resistência à compressão uniaxial - q_u (kPa) considerando a média.

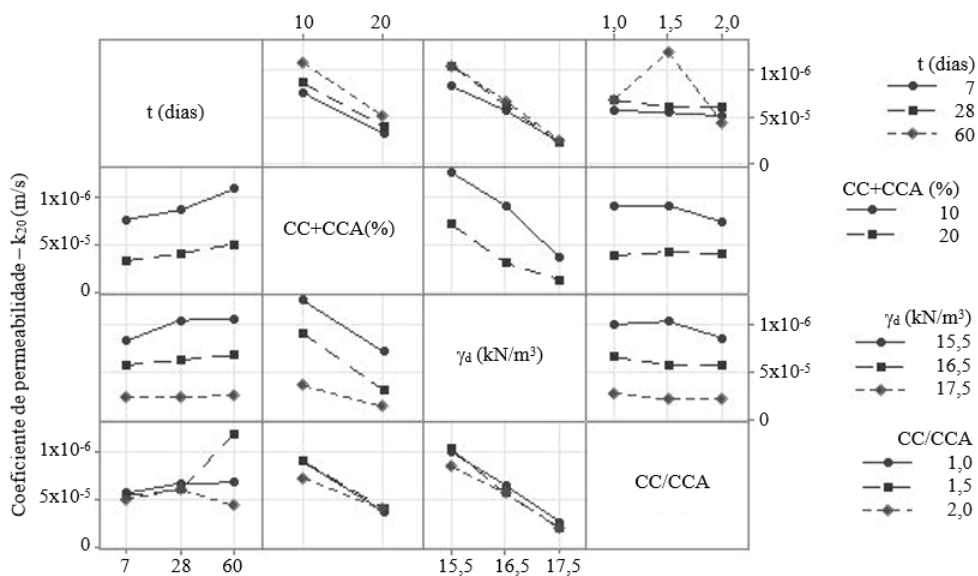
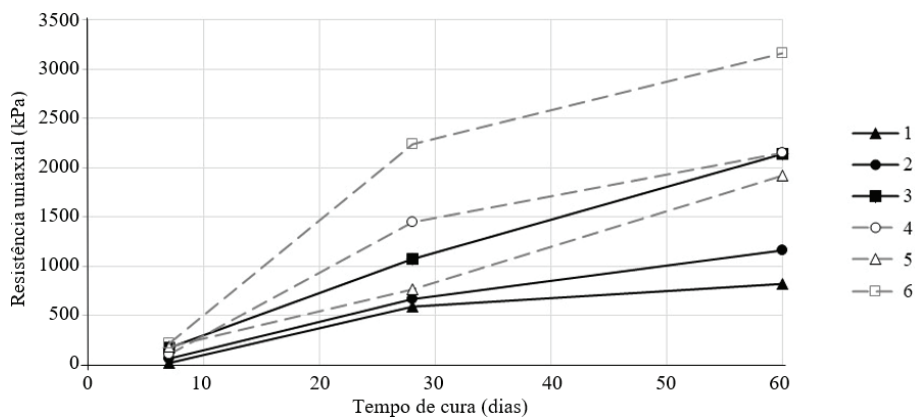


Fig. 8 – Gráfico de combinação das variáveis independentes para o coeficiente de permeabilidade - k_{20} (m/s) considerando a média.

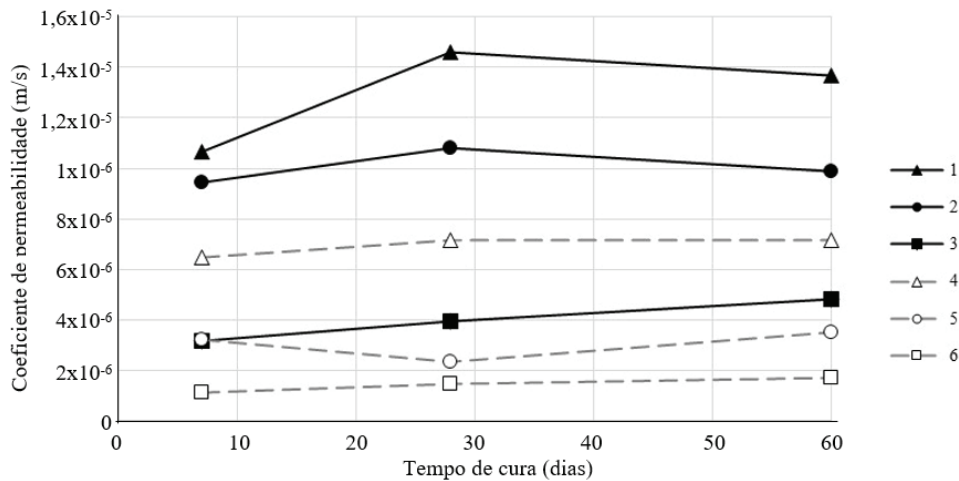


Sendo: 1 ($\gamma_d = 15,5$ kN/m³, CC+CCA = 10%), 2 ($\gamma_d = 16,5$ kN/m³, CC+CCA = 10%), 3 ($\gamma_d = 17,5$ kN/m³, CC+CCA = 10%), 4 ($\gamma_d = 15,5$ kN/m³, CC+CCA = 20%), 5 ($\gamma_d = 16,5$ kN/m³, CC+CCA = 20%), 6 ($\gamma_d = 17,5$ kN/m³, CC+CCA = 20%)

Fig. 9 – Gráfico da variação da resistência à compressão uniaxial (q_u) pelo tempo de cura (t) para diferentes teores de cal e cal de carbureto e peso volumétrico seco (γ_d) para CC/CCA de 1:1.

Para verificar a influência de cada umas das variáveis independentes na resposta da resistência à compressão uniaxial (q_u) e coeficiente de permeabilidade (k_{20}), fez-se a análise estatística a partir da análise de variância (ANOVA). As Figuras 11 e 12 mostram os gráficos de pareto, com 95% de confiança ($\alpha = 0,05$), onde é possível verificar quais as variáveis significantes, bem como, a combinação de segunda e de terceira ordem que também são significantes. A Figura 11a mostra que as variáveis mais significantes na resistência à compressão uniaxial (q_u) são o tempo de cura (t), seguido do teor de ligantes (CC+CCA) e do peso volumétrico seco (γ_d), bem como, a sua combinação

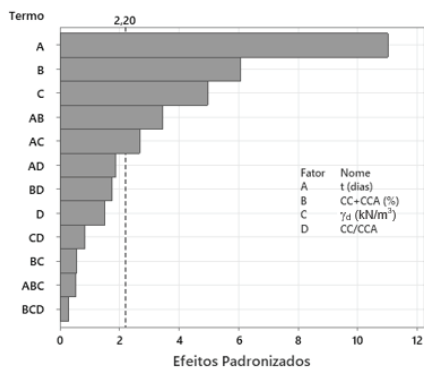
de segunda ordem, se for levado em consideração todo período de cura (7 dias aos 60 dias). Como há uma pequena redução na taxa de crescimento da resistência entre os 28 e os 60 dias (Figura 9), fez-se uma análise de variância considerando este intervalo de tempo (Figura 11b), que demonstra que o tempo de cura continua sendo a variável mais influente. O estudo de Basumajumdar et al. (2005) realizado com misturas de diferentes tipos de cinza volante e cal, mostra que o consumo de óxido de cálcio livre (CaO) reduz, exponencialmente, com o tempo de cura, até um certo tempo de cura (entre 50 e 55 dias), passando para uma relação linear de consumo. Isso comprova que embora possa haver um crescimento que tende a ser linear até certo tempo de cura, para maiores tempos de cura há uma tendência de redução da taxa de aumento da resistência. Já a variação da proporção de ligantes (CC/CCA) não se mostra significativa, para as proporções utilizadas neste estudo. Para o coeficiente de permeabilidade (k_{20}), o teor de ligantes (CC+CCA), quando considerado todo o intervalo de tempo de cura (Figura 12a), mostra-se mais significativo, seguido peso volumétrico seco (γ_d) e tempo de cura (t). O trabalho de Ayininuola e Olaosebikan (2013) mostrou que o aumento do teor de cinza de casca de arroz, apresentou maior redução do coeficiente de permeabilidade para os solos com maior teor de areia, corroborando com os resultados deste trabalho. Quando se faz a análise de variância, considerando um intervalo de tempo de cura de 28 a 60 dias (Figura 12b), verifica-se que o tempo de cura passa a não ser significativo, o que pode ser corroborado pela Figura 10.



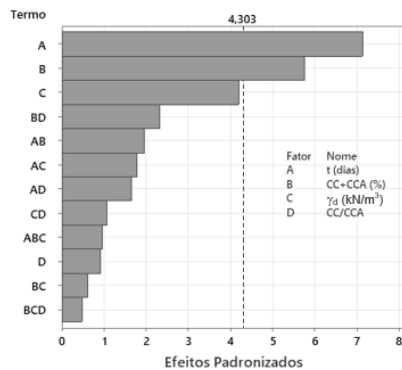
Sendo: 1 ($\gamma_d = 15,5 \text{ kN/m}^3$, CC+CCA = 10%), 2 ($\gamma_d = 16,5 \text{ kN/m}^3$, CC+CCA = 10%), 3 ($\gamma_d = 17,5 \text{ kN/m}^3$, CC+CCA = 10%), 4 ($\gamma_d = 15,5 \text{ kN/m}^3$, CC+CCA = 20%), 5 ($\gamma_d = 16,5 \text{ kN/m}^3$, CC+CCA = 20%), 6 ($\gamma_d = 17,5 \text{ kN/m}^3$, CC+CCA = 20%)

Fig. 10 – Gráfico da variação do coeficiente de permeabilidade (k_{20}) tempo de cura para diferentes teores de cal e cal de carbureto e peso volumétrico seco.

As Figuras 13 e 14 mostram os resultados das médias ajustadas de resistência à compressão uniaxial (q_u) e coeficiente de permeabilidade (k_{20}), respectivamente, pelos efeitos principais das variáveis independentes. Para enfatizar a influência das duas variáveis mais significativas, nas respostas da resistência à compressão uniaxial (q_u) e coeficiente de permeabilidade (k_{20}), as Figuras 15 e 16, respectivamente, mostram os gráficos de superfície de resposta. Pela Figura 13, é possível verificar que o aumento da resistência à compressão uniaxial (q_u), simultaneamente, com o aumento do tempo de cura (t) e teor de ligantes (CC+CCA). Já para o coeficiente de permeabilidade (k_{20}), ocorre o contrário, ou seja, diminuição, com o aumento simultâneo do peso volumétrico seco (γ_d) e teor de ligantes (CC+CCA) (Figura 14).

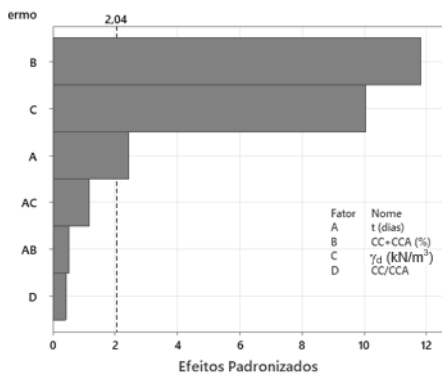


a)

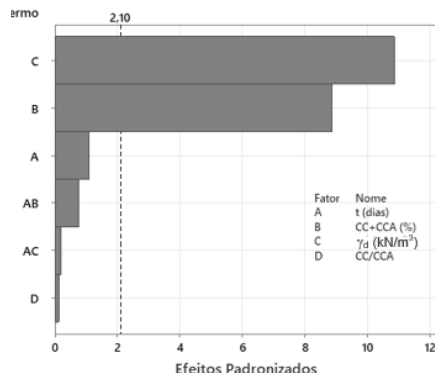


b)

Fig. 11 – Gráfico de pareto dos efeitos padronizados ($\alpha = 0,05$) até a terceira ordem para a resistência a compressão uniaxial (q_u), considerando (a) 7, 28 e 60 dias de cura e (b) 28 e 60 dias de cura.



a)



b)

Fig. 12 – Gráfico de pareto dos efeitos padronizados ($\alpha = 0,05$) até a segunda ordem para o coeficiente de permeabilidade (k_{20}), considerando (a) 7, 28 e 60 dias de cura e (b) 28 e 60 dias de cura.

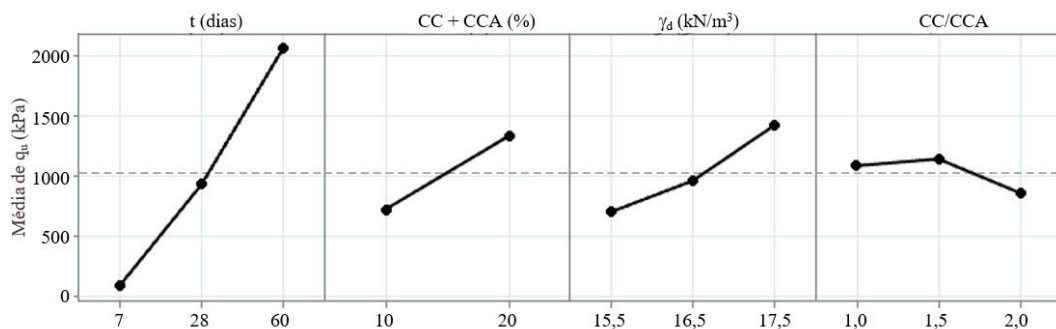


Fig. 13 – Gráfico dos efeitos principais, considerando a média ajustada para a resistência a compressão uniaxial (q_u).

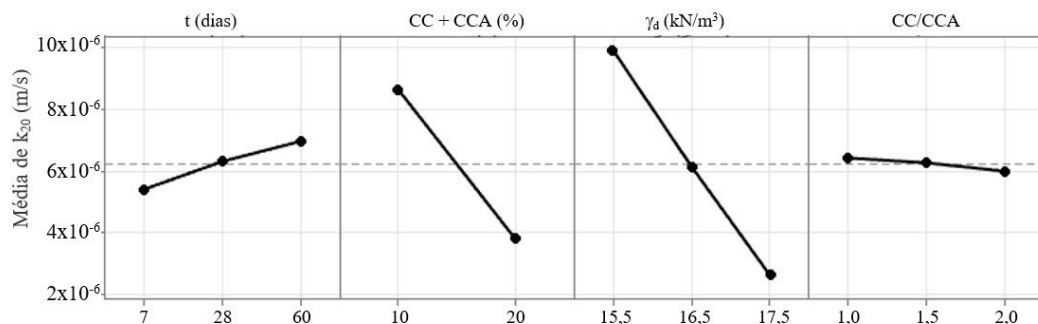


Fig. 14 – Gráfico dos efeitos principais, considerando a média ajustadas para o coeficiente de permeabilidade (k_{20}).

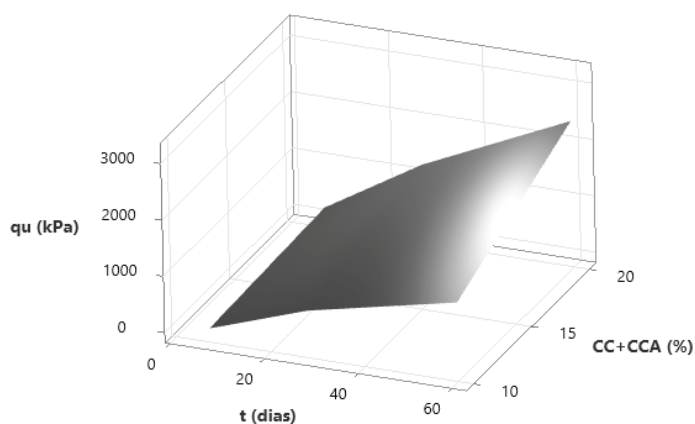


Fig. 15 – Gráfico de superfície de resposta da resistência a compressão uniaxial (q_u) pelos fatores mais significativos (tempo de cura – t e proporção de ligantes – $CC + CCA$).

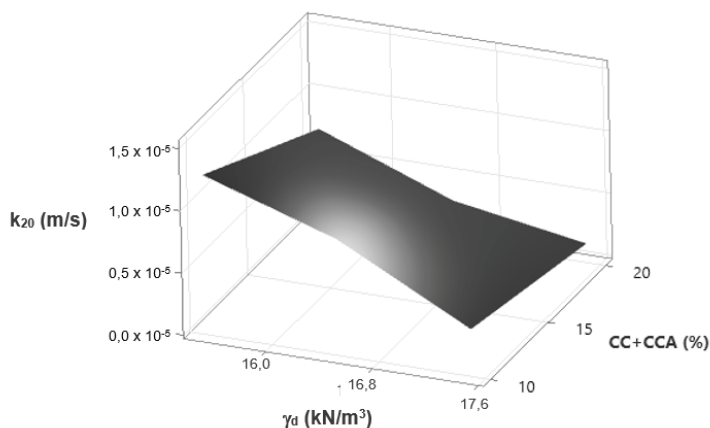


Fig. 16 – Gráfico de superfície de resposta da resistência a compressão uniaxial (q_u) pelos fatores mais significativos (peso volumétrico seco – γ_d e proporção de ligantes – $CC + CCA$).

As Figuras 17 a 19 mostram as fotografias de algumas misturas obtidas em microscópio eletrônico de varredura (MEV), para mostrar as estruturas formadas durante o processo de cura. O primeiro aspecto que pode ser analisado é que os agentes ligantes não envolvem totalmente os grãos de areia, mas sim, unem os pontos de contato dos grãos. A Figura 17 exemplifica a evolução do tempo de cura da mistura de 7 dias para 28 dias, contendo um teor de ligantes de 10% (CC+CCA), para a proporção de ligantes de 2:1 (CC/CCA), para o peso volumétrico seco de 16,5 kN/m³. Aos 7 dias de cura verifica-se uma estrutura mais floculada, em relação aos 28 dias de cura, ou seja, para o primeiro tem-se um volume maior de preenchimento dos macros vazios em relação ao segundo. Neste sentido, aos 28 dias de cura há mais vazios para a percolação de água, favorecendo o aumento da percolação de água, e consequentemente, o aumento do coeficiente de permeabilidade, o que pode ser verificado nos resultados das Figuras 9 e 10(a). Já na Figura 18, mostra-se um exemplo de evolução do tempo de cura de 28 dias para 60 dias da mistura contendo um teor de ligantes de 10% (CC+CCA), para a proporção de ligantes de 1:1 (CC/CCA), para o peso volumétrico seco de 17,5 kN/m³. Diferentemente, do que ocorre para poucos dias de cura (de 7 dias para 28 dias), para maiores tempos de cura (de 28 dias para 60 dias), o aspecto na mistura se mantém inalterado, não afetando os vazios e, consequentemente, não alterando o coeficiente de permeabilidade, o que é demonstrado estatisticamente pelas Figuras 10 e 12(b). O aspecto microscópico, observado nas Figuras 17 e 18, pode ser analisado pelas reações químicas que ocorrem e regem a estabilização. Eades e Grim (1960) verificaram que a estabilização química de solo com cal é regida por dois tipos de fases. Na primeira fase, ocorre a troca catiônica e a carbonatação, responsável pela floculação (aumento do volume), podendo demorar horas até poucos dias. Na segunda fase, que pode demorar meses a anos, ocorrem as reações pozolânicas, responsáveis pela resistência, sendo que nesta fase ocorre a redução das forças de repulsão entre os cátions e ânions e a consequente redução da camada de água difusa. E por fim, a Figura 19 mostra a estrutura de uma mesma mistura (teor de 10% de CC+CCA e proporção de CC/CCA = 1:1), para 60 dias de cura, com diferentes pesos volumétricos secos. Verifica-se que para um menor peso volumétrico seco a estrutura é mais aberta em relação à estrutura apresentada para um maior peso volumétrico seco. Com isso, pode-se comprovar que menores pesos volumétricos secos geram maiores coeficientes de permeabilidade.

A Figura 20 mostra um exemplo de difração de raio-x (DRX) realizado em um equipamento um espectrômetro X'pert, Phillips MDP, com radiação Cu K α , 40mV-40mA, para a mistura com peso volumétrico seco de 17,5 kN/m³ (γ d), teor de agentes cimentantes de 20% (CC+CCA) e proporção de agentes cimentantes de 2:1 (CC/CCA), para tempos de cura de 7 dias e 60 dias. Para a microscopia é possível verificar que em 7 dias de cura há uma concentração de sílica - SiO₂ (14 pontos) e hidróxido de cálcio - Ca(OH)₂ (16 pontos), correspondentes a cinza de casca de arroz e cal de carbureto, respectivamente. Para 60 dias, verifica-se que esta concentração de SiO₂ (8 pontos) e Ca(OH)₂ (11 pontos) reduz significativamente, mostrando que há consumo dos agentes cimentantes, o que se reflete no ganho expressivo da resistência passando de 110,7 kPa em 7 dias para 3.169,3 kPa aos 60 dias de cura. Como ainda, há concentrações de agentes cimentantes, pode verificar-se que ainda há potencial de ganho de resistência para maiores tempo de cura (acima de 60 dias).

6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resíduos empregados neste estudo - cal de carbureto e cinza de casca de arroz - e produzidos em abundância no estado do Rio Grande do Sul, extremo sul do Brasil, quando combinados mostram-se ótimos agentes ligantes, pois o primeiro é rico em sílica amorfa (94,4%) e o segundo em óxido de cálcio (95,1%).

O primeiro aspecto a ser observado foi o ganho de resistência (q_u) com o aumento do tempo de cura, do peso volumétrico seco e do teor de agentes ligantes. Por outro lado, a proporção de agentes ligantes não se mostrou significativa, neste estudo.

Para o coeficiente de permeabilidade (k_{20}) houve uma variação entre o maior ($1,46 \times 10^{-5}$ m/s) e o menor ($1,0 \times 10^{-6}$ m/s) da ordem de quinze vezes, onde se pode verificar que a redução foi verificada com o aumento do peso volumétrico seco e do teor de agentes ligantes. Já a proporção de agentes ligantes também não se mostrou significativa, como na resistência à compressão uniaxial. Já o tempo mostrou-se pouco influente de 7 a 28 dias de cura, não sendo significativo para maiores tempos de cura.

Por fim, verifica-se que não há uma relação intrínseca entre a resistência à compressão uniaxial e o coeficiente de permeabilidade, pois quando se trata de solos (especialmente, areias) estabilizados, os agentes ligantes não necessariamente fecham a matriz por completo, podendo deixar uma matriz porosa macro e micro estruturalmente, pois o aumento da resistência se dá pela cimentação dos pontos de contato entre os grãos e a permeabilidade ocorre pelo fechamento da matriz.

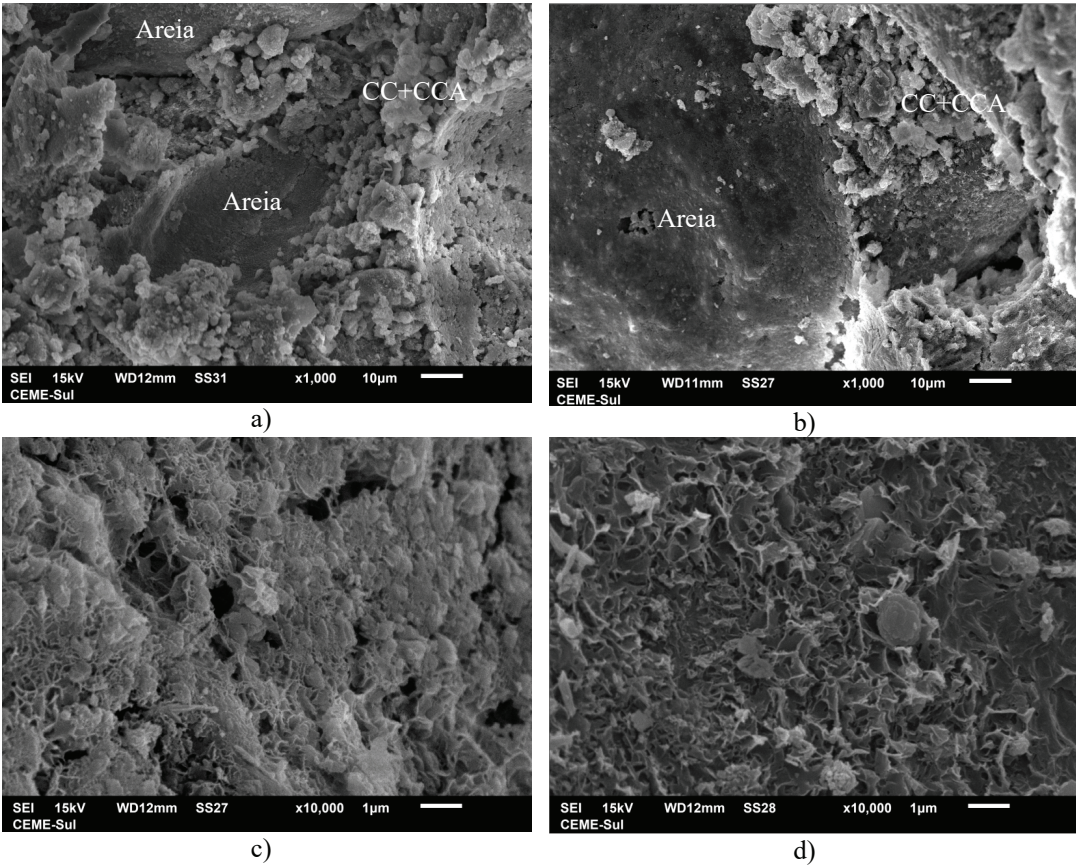


Fig. 17 – Fotografias de microscopia eletrônica de varredura (MEV), mostrando o efeito do tempo de cura, para 7 dias de cura em 1000× (a) e em 10000x (b), e para 28 dias de cura em 1000× (c) e em 10000× (d) para a mistura de $\gamma_d = 16,5$ kN/m³, 10% de CC+CCA e CC/CCA = 2:1.

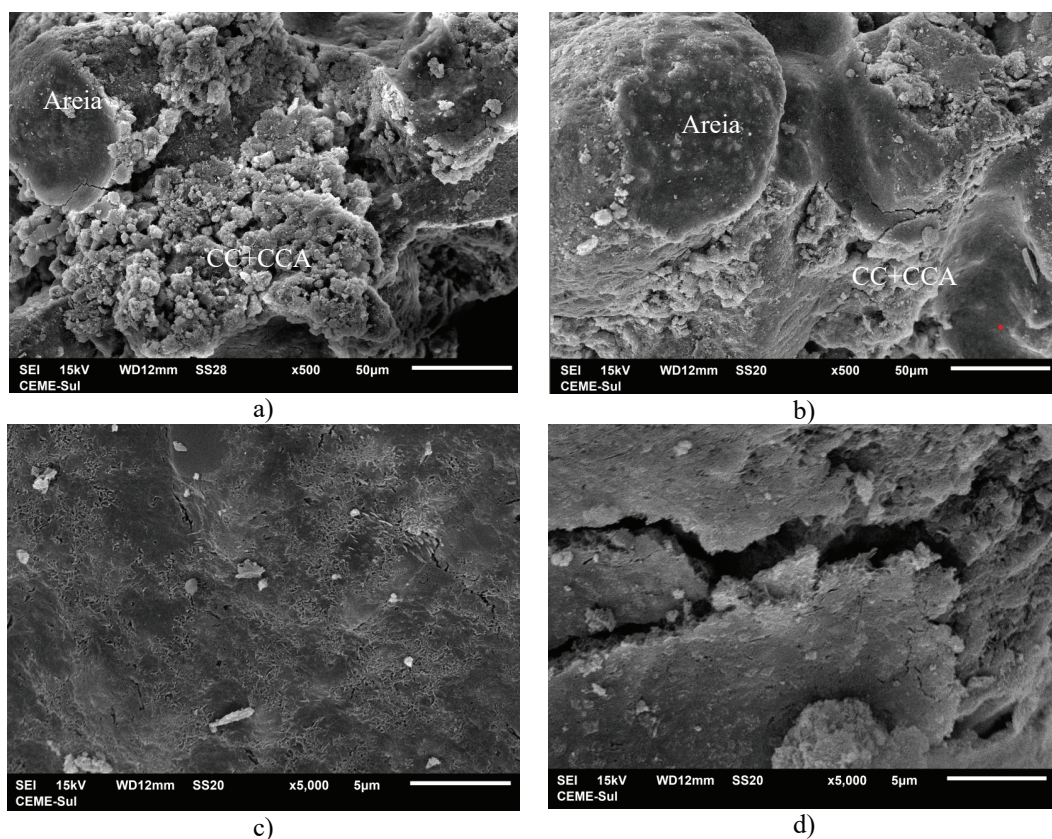


Fig. 18 – Fotografias de microscopia eletrônica de varredura (MEV) com aumento de 500x, mostrando o efeito do tempo de cura para 28 dias de cura em 500x (a) e em 10000x (b), e para 60 dias de cura em 500x (c) e em 10000x (d), para a mistura de $\gamma_d = 17,5 \text{ kN/m}^3$, 10% de CC+CCA e CC/CCA = 1:1.

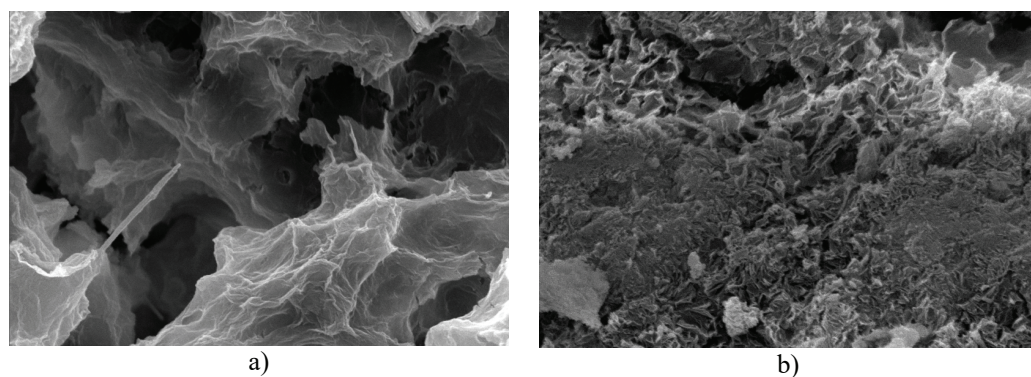


Fig. 19 – Fotografias de microscopia eletrônica de varredura (MEV) com aumento de 10000x, para o efeito de peso volumétrico seco, para 60 dias de cura para a mistura de (a) $\gamma_d = 15,5 \text{ kN/m}^3$ e (b) $\gamma_d = 17,5 \text{ kN/m}^3$, 10% de CC+CCA e CC/CCA = 1:1.

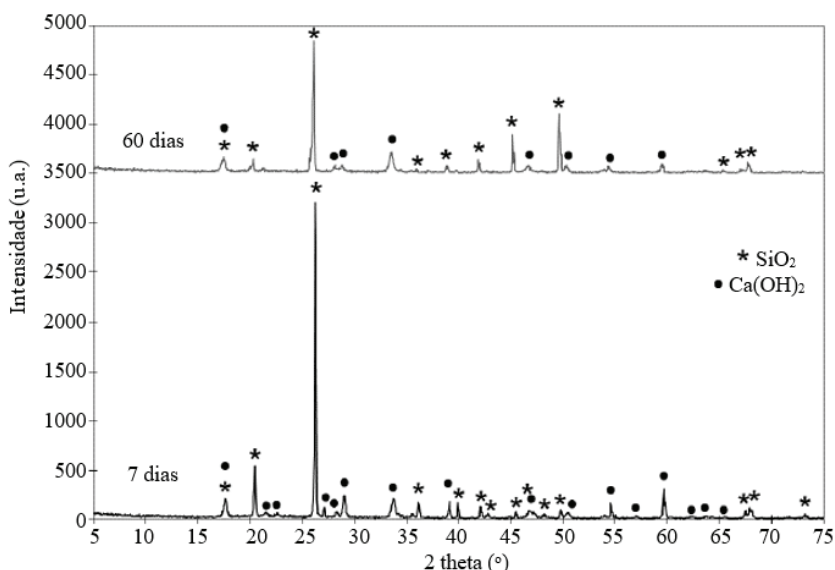


Fig. 20 – Difração de raio-x (DRX) para a mistura de $\gamma_d = 17,5 \text{ kN/m}^3$, 20% de CC+CCA e CC/CCA = 2:1 para 7 dias e 60 dias de cura.

7 – AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer pelas bolsas recebidas: BIC/UFRGS (PROPESQ/UFRGS) e PET Engenharia Civil (FNDE/MEC); e aos laboratórios LEGG/UFRGS e LAGEOTEC/UFRGS. Também, a FAPERGS – Fundação de Amparo à Pesquisa do Rio Grande do Sul, pelo recurso cedido ao projeto nº 22/2551-0000594-2, Edital nº 10/2021.

8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (2012). NBR 12253 – *Solo-cimento — Dosagem para emprego como camada de pavimento — Procedimento*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 7 p.
- Al Subari, L.; Hilal, A.; Ekinici, E. (2023). *Life cycle assessment of soil stabilization using cement and waste additives*. Construction and Building Materials, 403, pp. 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133045>
- Anburuvel, A. (2024). *The engineering behind soil stabilization with additives: a state-of-the-art review*. Geotechnical and Geological Engineering, 42, pp. 1-42. <https://doi.org/10.1007/s10706-023-02554-x>
- ASTM D-2166-16 (2016). *Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil*. 7p.
- ASTM D-2487-17 (2017). *Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System)*. 10p.
- ASTM D-3282-15 (2015). *Standard practice for classification of soils and soil-aggregate mixtures for highway construction purposes*. 6p.
- ASTM D-5084-16 (2016). *Standard test methods for measurement of hydraulic conductivity of saturated porous materials using a flexible wall permeameter*. 24p.

- Ayininuola, G. M.; Olaosebikan, O. I. (2013). *Influence of rice husk ash on soil permeability*. Transnational Journal of Science and Technology, vol 3, pp. 29-33.
- Basumajumdar, A.; Das, A. K.; Bandyopadhyay, N.; Maitra, S. (2005). *Some studies on the reaction between fly ash and lime*. Bull. Mater. Sci., Vol. 28, No. 2, April 2005, pp. 131–136.
- Behak, L. (2016). *Soil Stabilization with Rice Husk Ash*. Capitulo 3, Rice - Technology and Production. <https://www.intechopen.com/chapters/53281>
- Consoli, N. C.; Daassi-gli, C. A. P.; Ruver, C. A.; Lotero, A.; Scheuermann Filho, H.C.; Moncaleano, C. J.; Lourenço, D. E. (2021). *Lime-ground glass-sodium hydroxide as an enhanced sustainable binder stabilizing silica sand*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 147 (10). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002624](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002624)
- Consoli, N. C.; Leon, H. B.; Carretta, M. S.; Daronco, J. L. V.; Lourenço, D. E (2019). *The effects of curing time and temperature on stiffness, strength and durability of dand-environment friendly bender blends*. Soils and Foundations, 59 (5), pp. 1428-1439. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2019.06.007>
- Consoli, N. C.; Winter, D.; Leon, H. B.; Scheuermann Filho, H. C. (2018). *Durability, strength, and stiffness of green stabilized sand*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 144(9). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001928](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001928)
- Cristelo, N.; Glendinning, S.; Pinto, A. T. (2011). *Deep soft soil improvement by alkaline activation*. Ground Improvement, 164: 12, pp. 73–82. <https://doi.org/10.1680/grim.900032>
- Davidovits, J. (1994). *Method for obtaining a geopolymeric binder allowing to stabilize, solidify and consolidate toxic or waste materials*. Registro de Patente nº 5.349.118, United States Patent, pp. 1-11.
- Du, Y. J.; Zhang, Y. Y.; Liu, S. Y. (2011) *Investigation of strength and california bearing ratio properties of natural soils treated by calcium carbide residue*. Geo-Frontiers 2011: Advances in Geotechnical Engineering. [https://doi.org/10.1061/41165\(397\)127](https://doi.org/10.1061/41165(397)127)
- Duxon, P.; Fernández-Jiménez, A.; Provis, J. L.; Luckey, G. C; Palomo, A.; Van Deventer, J. S. J. (2007). *Geopolymer technology: the current state of the art*. Advances in Geopolymer Science & Technology, 42, pp. 2917–2933. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0637-z>
- Eades, J. L.; Grim, R. E. (1960). *Reaction of hydrated lime with pure clay minerals in soil stabilization*. Highway Res. Board Bull., 262, pp. 51-53.
- Eliaslankaran, Z.; Daud, N. N. N.; Yusoff, Z. M.; Rostami, V. (2021). *Evaluation of the effects of cement and lime with rice Husk ash as an additive on strength behavior of coastal soil*. Materials (Basel), 14 (5): 1140, pp. 1-15. <https://doi.org/10.3390/ma14051140>
- Falah, M. W.; Muteb, H. (2023). *Applying different soil stabilization mechanisms: a review*. archives of civil engineering. Polish Academy of Science, Vol. LXIX, pp. 339–358. <https://doi.org/10.24425/ace.2023.147663>
- Fathi-Moghaddam, M; Tavakol-Sadrabadi, M.; Tajbakhsh, M. (2020). *Effect of lime and rice husk ash on horizontal saturated hydraulic conductivity of sandy loam soils*. Geotechnical and Geological Engineering, 38, pp. 2027-2037. <https://doi.org/10.1007/s10706-019-01146-y>
- Fernández-Jiménez, A.; Palomo, A.; Sobrados, I.; Sanz, J. (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.

- Godoy, V. B. (2018). *Desempenho de misturas de distintos materiais com cinza volante e cal submetidas a condições climáticas severas*. Dissertação (Mestrado em engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.
- Horpibulsuk, S.; Kampala, A.; Phetchuay, C.; Udomchai, A.; Arulrajah, A. (2015) *Calcium carbide residue: a cementing agent for sustainable soil stabilization*. Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA. 46, pp. 22-27.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (2021). *IBGE atualiza municípios de fronteira e defrontantes com o mar devido a mudanças de limites*. <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/31090-ibge-atualiza-municipios-de-fronteira-e-defrontantes-com-o-mar-devido-a-mudancas-de-limites> (acesso em 20/09/2024).
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (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> (acesso em 20/09/2024).
- Instituto de Ciência e Tecnologia de Alimentos (ICTA/UFRGS) (2021). *Terra de Arroz*. https://www.ufrgs.br/alimentus1/terradearroz/grao/gr_casca.htm (acesso em 20/09/2024).
- Jawad, I. T.; Taha, M. R.; Majeed, Z. H.; Kahn, T. A. (2014). *Soil stabilization using lime: advantages, disadvantages and proposing a potential alternative*. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 8 (4), pp. 510-520.
- Lotero, A.; Consoli, N. C.; Moncaleano, C.J.; Tebechrani Neto, A.; Koester, E. (2021). *Mechanical properties of alkali-activated ground waste glass-carbide lime blends for geotechnical uses*. Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, 33:10. [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*. Market Research Store Report. 110 p. <https://www.businesswire.com/news/home/20160912006320/en/Acetylene-Gas-Market-for-Chemical-Production-Welding-Cutting-and-Other-Applications-Global-Forecast-2014---2020---Research-and-Markets> (acesso em 20/09/2024).
- Menger, E. da S.; Benetti, M.; Festugato, L.; Ibeiro, L. da S.; Luza, R. D. (2020). *Hydraulic conductivity and compressive strength of cemented soils*. Geotechnical and Geological Engineering, 38, pp. 6031-6039. <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01411-5>
- Miranda, T; Leitão, D; Oliveira, J.; Corrêa-Silva, M.; N. Araújo, Coelho, J.; Fernández-Jiménez, A.; Cristelo, N. (2020) *Application of alkali-activated industrial wastes for the stabilisation of a full-scale (bub)base layer*. Journal of Cleaner Production, 242 (2), pp. 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118427>
- Nguyen, D. T; Nguyen, N. T.; Pham, H. N. T.; Phung, H. H. P.; Nguyen, H. (2020). *Rice husk ash and its utilization in soil improvement: An overview*. Journal of Mining and Earth Sciences Vol. 61, Issue 3, pp. 1-11. [https://doi.org/10.46326/JMES.2020.61\(3\).01](https://doi.org/10.46326/JMES.2020.61(3).01)
- Osinubi, K. J. (1998). *Permeability of lime-treated lateritic soil*. Journal of Transportation Engineering, 124(5), pp. 465-469.
- Palomo, A.; Grutzeck, M. W.; Blanco, M. T. (1999). *Alkali-activated fly ashes*. Cement and Concrete Research, 29, 8, pp. 1323-1329. [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 uniaxial frente à moagem da cinza Volante*. Dissertação (Mestrado em engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.
- Pelisser, G.; Ferrazzo, S. T.; Mota, J. D.; Santos, C. P. dos; Pelisser, C.; Dalla Rosa, F.; Korf, E. P. (2023). *Rice husk ash-carbide lime as an alternative binder for waste foundry sand stabilization*. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, pp. 42176-42191. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-25117-8>
- Queiróz, L. C.; Batista, L. L. S.; Souza, L. M. P.; Lima, M. D.; Danieli, S.; Bruschi, G. J.; Bergmann, C. P. (2023). *Alkali-activated system of carbide lime and rice husk for granular soil stabilisation*. *Ground Improvement*, 176:5, pp. 279-294. <https://doi.org/10.1680/jgrim.21.00048>
- Ruver, C. A.; Machado, C. R.; Bastos, C. A. B.; Dias, C. R. R. (2013). *Viabilidade técnico-econômica da areia eólica estabilizada com agentes aglomerantes para emprego em pavimentação*. *Teoria e Prática na Engenharia Civil*, 21, pp. 13-24.
- Saldanha, R. B.; Caicedo, A. M. L.; Araújo, M. T. de; Scheuermann Filho, H. C.; Monceleano, C. J.; Silva, J. P. S.; Consoli, N. C. (2023). *Potential use of iron ore tailings for binder production: a life cycle assessment*. *Construction and Building Materials*, 365, pp. 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130008>
- Servi, S.; Lotero, A.; Silva, J. P. S.; Bastos, C. A.; Consoli, N. C. (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, pp. 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128770>
- Silva, J. D. J.; Santos Junior, O. F.; Paiva, W. de. (2023). *Compressive and tensile strength of aeolian sand stabilized with porcelain polishing waste and hydrated lime*. *Soil and Rocks*, 46(1), pp. 1-15. <https://doi.org/10.28927/SR.2023.002322>
- Winter, D. (2018) *Resistência, rigidez e durabilidade para solos arenosos estabilizados com materiais mais sustentáveis*. Tese (Doutorado em engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre. 166 p.

