

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/469

## Influência do teor de umidade no comportamento mecânico de rejeito de minério de ferro com adição de cimento Portland

Camila da Silva Martinatto

Doutoranda, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil PPGEC/UFRGS, Porto Alegre, Brasil, camilamartinatto@hotmail.com

Maria Mariana de Sousa Rocha

Doutoranda, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil PPGEC/UFRGS, Porto Alegre, Brasil, mariamarianasousa1@gmail.com

Helena Portela Farenzena

Doutoranda, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil PPGEC/UFRGS, Porto Alegre, Brasil, helenapfarenzena@gmail.com

Guilherme Schmitt Medina

Doutorando, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil PPGEC/UFRGS, Porto Alegre, Brasil, guilhermemedina.sm@gmail.com

Nilo Cesar Consoli

Professor titular, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil PPGEC/UFRGS, Porto Alegre, Brasil, consoli@ufrgs.br

**RESUMO:** A indústria de extração mineral desempenha um papel crucial no desenvolvimento econômico, mas suas atividades geram volumes consideráveis de rejeitos que acabam sendo dispostos em barragem de contenção ou outras estruturas. Contudo, os rejeitos de mineração apresentam variabilidade geotécnicas quanto ao comportamento geomecânico. Assim, técnicas como a estabilização de solo podem auxiliar na melhoria e previsibilidade do comportamento geotécnico. Desta maneira, esta pesquisa tem como objetivo analisar a influência de diferentes condições de compactação (ótimo, ramo seco e ramo úmido referentes a curva de compactação) no comportamento geotécnico de rejeitos de minério de ferro cimentado com cimento Portland de alta resistência inicial (CPV - ARI) através de ensaios de Resistência à Compressão Simples (RCS). Os resultados mostram que é possível observar que o aumento do teor de cimento e a redução da porosidade resultaram em maiores valores de RCS. Ainda as amostras moldadas na condição ótima apresentaram os maiores valores, seguido por amostras moldadas no ramo seco e por último, no ramo úmido. Por fim, é possível selecionar de forma racional a melhor combinação de porosidade e teor de cimento para um projeto através da correlação entre a RCS e o teor volumétrico de cimento.

**PALAVRAS-CHAVE:** rejeito de minério de ferro, rejeitos cimentados, condições de compactação, teor de umidade

**ABSTRACT:** The mineral extraction industry plays a crucial role in economic development, but its activities generate considerable volumes of waste that end up being disposed of in containment dams or other structures. However, mining tailings present geotechnical variability in terms of geomechanical behavior. Thus, techniques such as soil stabilization can improve and predict geotechnical behavior. Therefore, this research aims to analyze the influence of different compaction conditions (optimal, dry side and wet side referring to the compaction curve) on the geotechnical behavior of iron ore tailings cemented with high initial strength Portland cement (CPV - ARI) through Unconfined Compressive Strength (UCS) tests. The results show that it is possible to observe that the increase in cement content and the reduction in porosity resulted in higher UCS values. Still, samples molded in the optimal condition presented the highest values, followed by samples molded in the dry side and finally, in the wet side. Finally, it is possible to rationally select the best combination

of porosity and cement content for a project through the correlation between the UCS and the volumetric cement content.

**KEYWORDS:** iron ore tailings, cemented tailings, compaction conditions, moisture content

## 1 INTRODUÇÃO

A indústria de extração mineral tem grande importância no desenvolvimento econômico de diversos países, bem como, tem papel fundamental no desenvolvimento da sociedade, tendo em vista que os produtos explorados são essenciais para uso cotidiano. Entretanto, tais atividades são responsáveis por um elevado impacto ambiental, consumindo recursos não renováveis e gerando milhões de metros cúbicos de resíduos anualmente. Neste cenário, faz-se necessário o desenvolvimento de novas soluções para uso de rejeitos de mineração, uma área potencial de aplicação é explorar sua utilização na construção civil. Isto porque existe um maior potencial neste setor, onde poderiam ser utilizados como materiais de construção. Yellishetty et al. (2008) relataram que compostos de ferro têm o potencial de acelerar a hidratação do cimento, e estes poderiam ser o principal fator para melhorar a resistência à compressão observada nos agregados de concreto contendo rejeitos de minério de ferro.

Desta forma, o objetivo deste estudo é avaliar a resposta mecânica, a partir de ensaios de resistência à compressão simples de rejeito de minério de ferro estabilizado com cimento Portland de alta resistência inicial (CP V – ARI). Este tipo de cimento está associado a valores de resistência elevados em períodos reduzidos (desenvolvendo mais de 80% da resistência nos primeiros sete dias de cura). Isso é interessante do ponto de vista prático, pois problemas de engenharia tendem a precisar de soluções rápidas, principalmente no que diz respeito a indústria da mineração. Além disso, o emprego do cimento em solos era predominantemente baseado em experiências práticas (LATIFI et al., 2017). No entanto, Foppa (2005) e Consoli et al. (2007) propuseram uma abordagem mais fundamentada, introduzindo uma relação racional para a dosagem de solos cimentados que vincula a resistência à compressão simples ( $q_u$ ) a um parâmetro que considera a porosidade e o teor volumétrico de cimento ( $\eta/C_{iv}$ ). Essa relação estabelece uma conexão significativa entre os processos de compactação e a quantidade de cimento utilizada. Com essa abordagem, o projetista tem a flexibilidade de escolher entre uma alta energia de compactação e um maior teor de cimento para alcançar a mesma resistência desejada (CORTE et al., 2019; MARQUES; CONSOLI; FESTUGATO, 2019). Além disso, esse parâmetro pode ser aplicado no controle da compactação em campo, possibilitando a correção de deficiências na compactação por meio da adição de cimento (LEON, 2018).

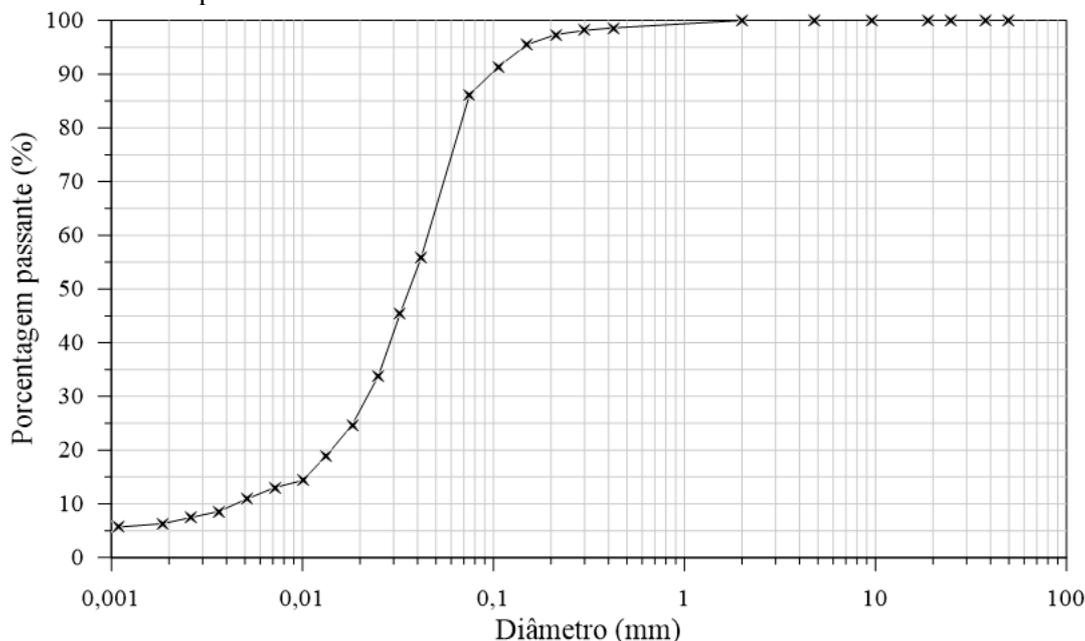
Uma vez que o esforço de compactação é um dos fatores mais importantes que influenciam a compactação de materiais geotécnicos, a pesquisa tem como objetivo investigar as variáveis de peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ) e teor de umidade ( $w$ ), sendo selecionados 03 (três) diferentes pontos de moldagem da curva de compactação Proctor normal, utilizando-se a dosagem de 1%, 3% e 5% de cimento. A principal premissa por trás dessa escolha foi estudar o comportamento na condição ótima de compactação ( $\gamma_{d,máximo}$  e  $w_{ótimo}$ ) e a variação do teor de umidade de modo a atingir um dos principais objetivos desta pesquisa: o efeito do teor de umidade de compactação. Os níveis foram escolhidos para abranger o ramo seco e o ramo úmido, bem como o aumento da porosidade com a redução do peso específico, mas mantendo-se o índice de vazios. O ensaio de resistência à compressão simples, ou compressão não confinada, vem sendo amplamente difundido em programas experimentais que abrangem a técnica de melhoramento de solos através de cimentação. Isto acontece devido ao fato de ser um ensaio simples, de fácil execução e com custo baixo. Desta forma, pode-se verificar o efeito da cimentação e avaliar diversos aspectos importantes sobre a resistência à compressão simples.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Rejeito Ultrafino de Mineração de Ferro

O material principal utilizado na pesquisa é o Rejeito de Minério de Ferro Ultrafino (Lama) produzido em uma planta de beneficiamento na região do Quadrilátero Ferrífero, centro sul do estado de Minas Gerais – BR. O material coletado foi transportado para a Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) em sacos com aproximadamente 20 kg. A caracterização física do rejeito de minério de ferro (Figura 1e Tabela 1) foi avaliada

determinando sua distribuição granulométrica conforme a NBR 7181 (ABNT, 2018), limites de consistência NBR 6459 (ABNT, 2017) e NBR 7180 (ABNT, 2016a) e peso específico dos grãos NBR 6458 (ABNT, 2016b). O rejeito de minério de ferro apresentou comportamento não plástico e, com base na distribuição granulométrica, foi classificado como Silte Arenoso, de acordo com NBR 7181 (ABNT, 2018). Para o Sistema Unificado de Classificação D2487 (ASTM, 2020), enquadrou-se como Areia Siltosa (SM). A distribuição granulométrica apresentada para o rejeito de minério de ferro desta pesquisa está dentro dos limites encontrados na literatura para este material.



Para a moldagem dos corpos dos ensaios de RCS foram confeccionados corpos de prova de 5 cm de diâmetro por 10 cm de altura, compactados em 3 camadas, utilizando-se o molde de metal cilíndrico tripartido. As amostras foram consideradas aptas para ensaio se atendessem aos seguintes critérios: grau de compactação  $\pm 1\%$ ; teor de umidade  $\pm 0,5\%$ ; diâmetro  $\pm 0,5$  mm; e altura  $\pm 1$  mm. Quando o tempo de cura estabelecido se aproxima, no dia anterior os corpos de provas são imersos em água por um período de 24 horas, de forma que se minimize os efeitos de sucção. A ruptura do corpo de prova ocorre devido à aplicação da tensão axial no corpo de prova. O ensaio seguiu as diretrizes propostas pela NBR 12025 (ABNT, 2012), utilizando-se uma prensa automática com velocidade de deslocamento de 1,14mm/min e uma célula de carga, devidamente calibrada, com capacidade de 20 kN.

### 2.3.1 Variáveis fixas e controláveis- ensaios de Resistência à Compressão Simples

Para o ensaio de Resistência à Compressão Simples (RCS), as variáveis controláveis foram: peso específico aparente seco, teor de umidade e teor de cimento. Foram selecionados 03 (três) diferentes pontos de moldagem da curva de compactação Proctor normal, utilizando-se a dosagem de 1%, 3% e 5% de cimento. A Figura 2 apresenta a curva de compactação com a indicação dos pontos de moldagem, e a Tabela 2 apresenta um resumo das variáveis controláveis para este ensaio.

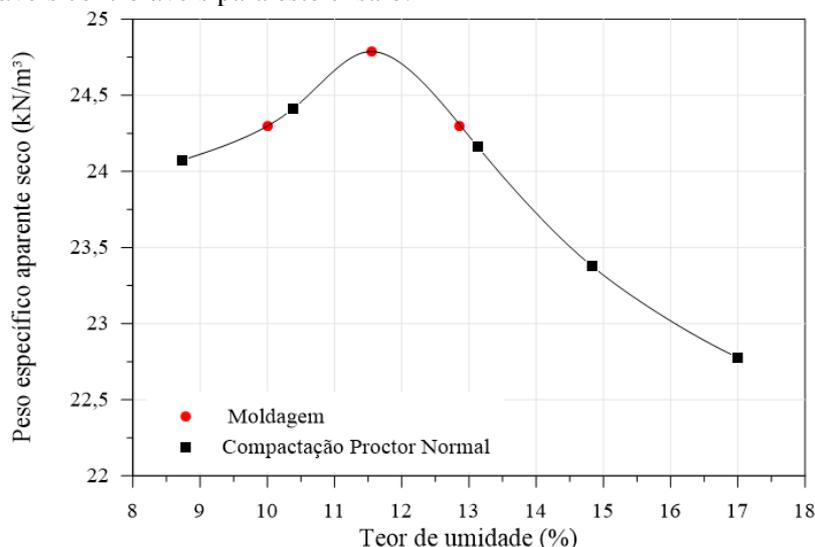


Figura 2 - Curva de compactação e definição dos pontos analisados

Tabela 2 - Variáveis controláveis para os ensaios de resistência à compressão simples

Compactação	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	teor de umidade (%)	Teor de cimento (%)
Ótimo	24,80	11,50	1, 3 e 5
Ramo Seco	24,30	10,00	
Ramo Úmido	24,30	12,80	

Para os ensaios de resistência à compressão simples, as variáveis fixas foram: energia de compactação normal, tipo de cimento, tempo de cura e temperatura de cura. O cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V - ARI) foi escolhido como agente estabilizador. O período de 7 dias foi escolhido como o tempo de cura da pesquisa, considerando que o cimento Portland CP V - ARI foi utilizado para o programa experimental, assim, este período de cura pode ser considerado como a escolha mais vantajosa. Por fim, optou-se por definir a temperatura de cura desta pesquisa em 23°C, representando uma temperatura ambiente média.

## 3 RESULTADOS

Conforme as variáveis definidas na Tabela 2, realizou-se o ensaio de resistência à compressão simples para as amostras estabilizadas com cimento Portland, os resultados obtidos encontram-se na Figura 3 e resumidos na Tabela 3.

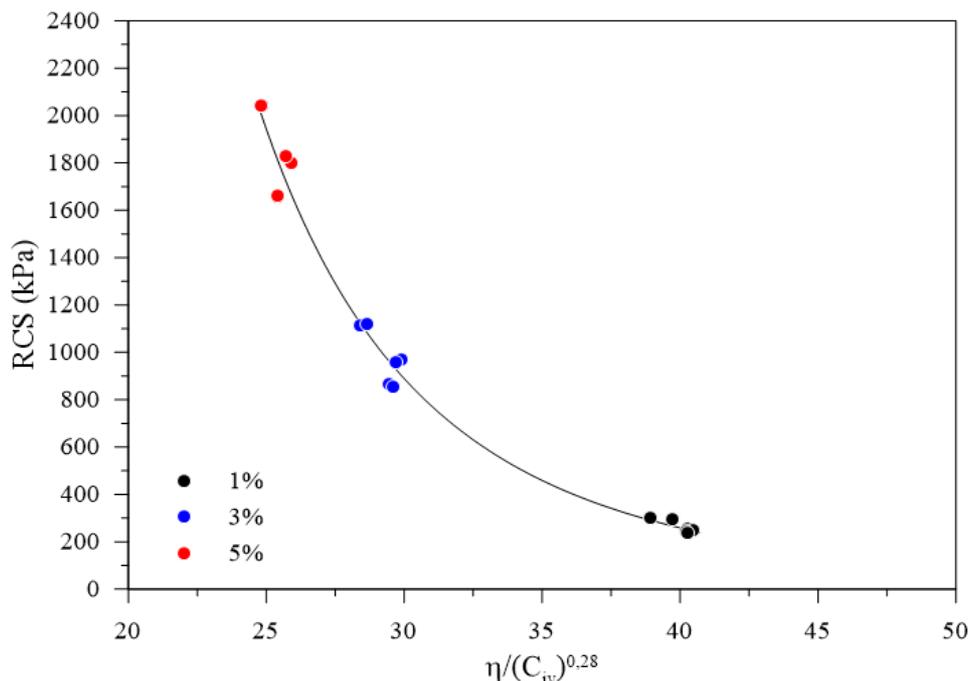


Figura 3 - Resistência à compressão simples em função do teor de umidade de moldagem.

Tabela 3 - Resumo dos resultados obtidos para o ensaio de RCS

Compactação	Teor de cimento (%)	$\frac{\eta}{(C_{iv})^{0,28}}$	RCS (kPa)
Ótimo	1	39,33	298,02
Ramo Seco		40,36	252,10
Ramo Úmido		40,24	240,22
Ótimo	3	28,52	1117,50
Ramo Seco		29,81	965,00
Ramo Úmido		29,50	860,59
Ótimo	5	24,85	2042,49
Ramo Seco		25,81	1814,37
Ramo Úmido		25,42	1659,78

Para solos artificialmente cimentados há uma relação entre a porosidade ( $\eta$ ) e o teor volumétrico de cimento ( $C_{iv}$ ), proposta por Consoli et al. (2007) em que é possível obter uma curva que ajuste a resistência à compressão simples em função deste índice, bem como uma única equação que represente o comportamento do material. Esta metodologia consiste na obtenção da curva porosidade/teor volumétrico de cimento ( $\eta/C_{iv}$ ) em relação a resistência à compressão simples, denominada curva de dosagem. A partir desta curva, é possível definir qual a resistência pretendida conforme solicitações de projeto, e então pode-se obter qual o teor volumétrico de cimento e porosidade necessárias para atingir a resistência alvo.

De modo geral, é possível observar que o aumento do teor de cimento e a redução da porosidade resultaram em maiores valores de RCS. A redução da porosidade é proporcional a uma maior área de contato entre as partículas, intensificando o intertravamento das partículas e mobilizando o atrito, o que aumenta a resistência. Já o aumento do teor de cimento está ligado ao aumento das reações cimentícias, contribuindo também para o desenvolvimento da resistência. Este fenômeno físico-químico também foi evidenciado em

diversos materiais geotécnicos cimentados, como solos estabilizados com cimento Portland (CONSOLI et al., 2007; CONSOLI et al., 2020; VELOSO MARQUES; CONSOLI; ALMEIDA E SOUSA, 2014), solos estabilizados com agentes cimentantes alternativos (CONSOLI et al., 2018a, 2019; MARTINATTO, 2021), rejeitos de mineração estabilizados com cimento Portland (BRUSCHI, 2023; CONSOLI et al., 2018b; SERVI, 2022) e rejeitos de mineração estabilizados com agentes cimentantes alternativos (BRUSCHI et al., 2021; PEREIRA DOS SANTOS et al., 2022).

Quanto à magnitude dos valores obtidos, as amostras moldadas na condição ótima apresentaram os maiores valores, seguido por amostras moldadas no ramo seco e por último, no ramo úmido. Este comportamento mostra que existe uma relação única conferida pela compactação em sua maior densidade e a umidade ótima, os quais afetam o comportamento geotécnico. Ao comparar o ramo úmido e o ramo seco, pode-se concluir que o teor de umidade e a densidade de compactação, também afetam as amostras analisadas. O teor de umidade está relacionado diretamente ao desenvolvimento das reações cimentícias, uma vez que mudanças na quantidade de água têm grande efeito no desenvolvimento da cinética das reações e na precipitação dos produtos formados, os quais desencadeiam microestruturas diferentes e, conseqüentemente alteram a performance mecânica do sistema.

Por outro lado, de acordo com LAMBE; WHITMAN (1969) para solos não cimentados, no ramo seco têm-se baixo grau de saturação, e o método de compactação empregado pouco interfere na estrutura pois a atração face-aresta das partículas não é vencida pela energia aplicada, e geralmente origina-se estruturas floculadas com arranjo desordenado das partículas. Para maiores teores de umidade, no ramo úmido, ocorre maior repulsão entre as partículas e a compactação as orienta, sendo que o método de compactação empregado influencia na estrutura final originando estruturas dispersas. O estudo de Consoli et al. (2007) para um solo estabilizado com diversos teores de cimento e mesmo índice de vazios, mostra que o aumento na RCS é observado com o aumento do teor de umidade, atingindo um patamar máximo no ponto de compactação ótimo, e logo após a RCS passa a reduzir, sendo que os autores atribuem o comportamento a estrutura criada durante o processo de moldagem e a quantidade de adição a água tem um papel fundamental na formação da estrutura. Desta forma, a Equação 1 representa o comportamento da RCS em função do índice ( $\eta/C_{iv}$ ).

$$q_u(kPa) = 2 \times 10^9 \left[ \frac{\eta}{(C_{iv})^{0,28}} \right]^{-4,26} \quad (1)$$

#### 4 CONCLUSÕES

Diante das variáveis estabelecidas e dos ensaios de resistência à compressão simples realizados para as amostras estabilizadas com cimento Portland, os resultados revelam uma relação entre a porosidade ( $\eta$ ), o teor volumétrico de cimento ( $C_{iv}$ ) e a resistência à compressão simples (RCS), conforme proposto por Consoli et al. (2007). Esta abordagem permite a obtenção de uma curva de dosagem que relaciona a porosidade/teor volumétrico de cimento à resistência, possibilitando a definição da resistência desejada para atender às demandas específicas do projeto.

De forma geral, observa-se que o aumento do teor de cimento e a redução da porosidade resultam em valores mais elevados de RCS. A diminuição da porosidade implica em uma maior área de contato entre as partículas, intensificando o intertravamento e mobilizando o atrito, contribuindo para o aumento da resistência. O aumento do teor de cimento está associado ao incremento das reações cimentícias, também contribuindo para o desenvolvimento da resistência. Esse fenômeno físico-químico, comprovado em diversos materiais geotécnicos cimentados, incluindo solos estabilizados com cimento Portland, reforça a consistência dos resultados obtidos neste estudo.

Quanto à magnitude dos valores, as amostras moldadas na condição ótima apresentaram as maiores RCS, seguidas pelas amostras moldadas no ramo seco e, por último, no ramo úmido. Esse comportamento evidencia a influência da compactação em sua maior densidade e da umidade ótima, fatores que impactam o comportamento geotécnico. A comparação entre o ramo úmido e o ramo seco revela que o teor de umidade e a densidade de compactação também afetam as amostras analisadas. A relação direta entre o teor de umidade e o desenvolvimento das reações cimentícias destaca a importância da água na cinética dessas reações, resultando em microestruturas distintas e alterando a performance mecânica do sistema.

É válido destacar a consistência dos resultados obtidos ao correlacionar RCS e o índice ( $\eta/C_{iv}$ ) com um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,98. Essa elevada correlação valida a aplicabilidade do índice para prever o comportamento da resistência à compressão simples em rejeitos de mineração cimentados. Essa conclusão reforça achados anteriores de outros estudos, consolidando a confiabilidade do índice como uma ferramenta eficaz na predição do comportamento mecânico desses materiais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). D 2487 -17: Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System), 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6458: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm — Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6459: Solo - Determinação do Limite de Liquidez, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7180: Solo - Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7181: Solo - Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR-12025: Solo-Cimento - Ensaio de Compressão Simples CP Cilindrico. Rio de Janeiro, 2012.
- BRUSCHI, G. J. et al. Green Stabilization of Bauxite Tailings: Mechanical Study on Alkali-Activated Materials. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 33, n. 11, nov. 2021.
- BRUSCHI, G. J. Molding conditions effect on the geomechanical behavior of uncemented and cemented iron ore tailings under low and high confining stresses. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2023.
- CONSOLI, N. C. et al. Durability Assessment of Soil-Pozzolan-Lime Blends through Ultrasonic-Pulse Velocity Test. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 32, n. 8, ago. 2020.
- CONSOLI, N. C. et al. Durability, strength, and stiffness of compacted gold tailings – cement mixes. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 55, n. 4, p. 486–494, abr. 2018a.
- CONSOLI, N. C. et al. Durability, Strength, and Stiffness of Green Stabilized Sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 144, n. 9, set. 2018b.
- CONSOLI, N. C. et al. Key Parameters for Strength Control of Artificially Cemented Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 133, n. 2, p. 197–205, fev. 2007a.
- CONSOLI, N. C. et al. Key Parameters for Strength Control of Artificially Cemented Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 133, n. 2, p. 197–205, fev. 2007b.
- CONSOLI, N. C. et al. The effects of curing time and temperature on stiffness, strength and durability of sand-environment friendly binder blends. *Soils and Foundations*, v. 59, n. 5, p. 1428–1439, out. 2019.
- CORTE, M. B. et al. Stiffness of lightly cemented sand under multiaxial loading. *E3S Web of Conferences*, v. 92, p. 11008, 25 jun. 2019.
- FILIFE VELOSO MARQUES, S.; CESAR CONSOLI, N.; FESTUGATO, L. Effects of curing stress on the stiffness of a cement-mixed sand. *E3S Web of Conferences*, v. 92, p. 04006, 25 jun. 2019.

- FOPPA, D. Análise de variáveis-chave no controle da resistência mecânica de solos artificialmente cimentados. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/7845> . Acesso em: 13 jun. 2022.
- LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. Soil Mechanics. New York: John Wiley & Sons, 1969.
- LATIFI, N. et al. Tropical residual soil stabilization: A powder form material for increasing soil strength. *Construction and Building Materials*, v. 147, p. 827–836, ago. 2017.
- LEON, H. B. O índice porosidade/teor volumétrico de cimento ( $\eta/Civ$ ) como um parâmetro de estado para areias cimentadas. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/174407> . Acesso em: 12 jun. 2022.
- MARTINATTO, C. S. Comportamento de um solo arenoso estabilizado com álcali ativação visando a pavimentação. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.
- PEREIRA DOS SANTOS, C. et al. Stabilization of gold mining tailings with alkali-activated carbide lime and sugarcane bagasse ash. *Transportation Geotechnics*, v. 32, p. 100704, jan. 2022.
- SERVI, S. P. Comportamento mecânico de resíduo de minério de ferro estabilizado com agentes aglomerantes. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.
- VELOSO MARQUES, S. F.; CONSOLI, N. C.; ALMEIDA E SOUSA, J. Testing Cement Improved Residual Soil Layers. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 26, n. 3, p. 544–550, mar. 2014.
- YELLISHETTY, M., KARPE, V., REDDY, E. H., SUBHASH, K. N., e RANJITH, P. G., 2008, “Reuse of iron ore mineral wastes in civil engineering constructions: A case study”, *Resources, Conservation and Recycling*, 52(11), 1283–1289.