

Análise da influência do Resíduo de Polimento Cerâmico (RPC) nas propriedades físico-químicas e mecânicas de misturas solo-resíduo-cal

Amanda Dalla Rosa Johann
Professora Adjunta, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil,
amandajohann@utfpr.edu.br

Leonardo Araújo de Lacerda
Engenheiro Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, leoarlac@gmail.com

João Luiz Rissardi
Engenheiro Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, luizrissardi@gmail.com

Igor Luiz Bertazo
Engenheiro Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, igorlbertazo@gmail.com

Roberth de Jesus Carvalho
Graduando do curso de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil,
roberth.carvalho@hotmail.com

RESUMO: O processo produtivo do cimento engloba impactos ambientais desde a extração da matéria prima até a sua produção. O solo-cimento é uma mistura homogênea de solo, água e cimento e é uma técnica utilizada na estabilização de solos há décadas, melhorando as propriedades mecânicas do solo através dos produtos de hidratação e das reações pozolânicas desenvolvidas. As reações pozolânicas no solo podem ser desenvolvidas através da adição de outros materiais além do cimento, entre eles resíduos e subprodutos com potencial pozolânico, materiais estes chamados de pozolanas, os quais são materiais de composição silicosa ou sílico-aluminosa e que podem ser identificados através da avaliação do seu potencial de pozolanicidade, a partir de ensaios de caracterização físico-química. Assim, esta pesquisa busca avaliar a influência do Resíduo de Polimento Cerâmico (RPC) no comportamento mecânico de um solo siltoso da formação Guabirotuba. Para a realização da pesquisa foram realizados ensaios de caracterização física e química das misturas solo-RPC e solo-RPC-cal, além de ensaios de resistência à compressão simples (qu) das misturas com 28 dias de cura. A partir dos resultados obtidos observa-se que tanto as misturas com RPC e cal quanto as misturas com somente o RPC proporcionaram um incremento na resistência mecânica do solo.

PALAVRAS-CHAVE: Caracterização Físico-química, Resíduo de Polimento Cerâmico, Resistência à Compressão Simples.

ABSTRACT: The cement production process covers environmental impacts from the extraction of the raw material to its production. Soil-cement is a homogeneous mixture of soil, water and cement and is a technique used to stabilize soils for decades, improving the mechanical properties of the soil through the hydration products and pozzolanic reactions developed. Pozzolanic reactions in the soil can be developed through the addition of materials other than cement, including wastes and byproducts with pozzolanic potential, materials called pozzolans, which are materials with a siliceous or silico-aluminous composition and can be identified through the evaluation of its pozzolanicity potential, based on physicochemical characterization tests. Thus, this research aims to evaluate the influence of Ceramic Polishing Residue (RPC) on the mechanical behavior of a silty soil from the Guabirotuba formation. To carry out the research, physical and chemical characterization tests were carried out on the soil-RPC and soil-RPC-lime mixtures, in addition to simple compressive strength tests (qu) of the mixtures after 28 days of curing. From the results obtained, it was

observed that both the mixtures with RPC and lime and the mixtures with only RPC provided an increase in the mechanical resistance of the soil.

KEYWORDS: Physicochemical Characterization, Ceramic Polishing Residue, Simple Compressive Strength

1 INTRODUÇÃO

A estabilização de solos é aplicada principalmente em pavimentações e aterros, em solos com baixa capacidade de suporte ou que apresentam baixa estabilidade volumétrica, mas também pode ser utilizada nas fundações de edificações. Sandroni e Consoli (2010) apresentam uma ampla revisão bibliográfica sobre a prática geotécnica quando da verificação da existência desses tipos de solos: evitação, deslocamento, substituição, aterros convencionais, sobrecarga, reforços com geossintéticos, mistura com aglomerante seco, entre outros. A escolha da técnica a ser utilizada irá depender do tipo de solo, do tipo de obra e da espessura de camada de baixa resistência.

Entre as técnicas de estabilização de solos comumente utilizadas estão o solo-cal e o solo-cimento. Segundo Abrão (2019), além da grande influência nas emissões de CO₂, a produção de cimento requer um grande consumo de energia. Com o objetivo de diminuir estes impactos, a escória de alto forno e a cinza volante são os materiais mais utilizados como substituintes do clínquer, mas é necessário encontrar outros materiais que atendam a essa demanda, como é o caso das pozolanas naturais, naturais processadas ou artificiais e fillers.

Diversos autores tem estudado a inserção de resíduos industriais e da construção civil no tratamento de solos (Dalla Rosa, 2009; Consoli et al., 2011; Saldanha et al., 2017; Hondo e Mandira, 2021; Núñez et al., 2024), visando seu emprego como base para rodovias e como camada de suporte para fundações superficiais, sendo que os resultados demonstram melhoras significativas nos parâmetros geotécnicos estudados (aumento da capacidade de suporte e redução dos recalques).

A busca por novos resíduos que possam ser utilizados em substituição ao cimento na técnica de estabilização de solos proporciona benefícios sócio-econômicos e ambientais. Um dos principais problemas da construção civil é a geração em larga escala de resíduos. Estes resíduos de construção civil englobam desde os resíduos produzidos na fabricação de materiais e componentes até os resíduos gerados em obras de construção e demolição. O resíduo de polimento cerâmico (RPC) é um resíduo resultante da indústria de cerâmica, sendo considerado indiretamente um resíduo da construção civil, uma vez que ele é gerado para suprir as demandas da construção civil. De acordo com Barros e Costa (2016), este composto possui uma característica interessante para a construção civil, que é a reação pozolânica (cimentante).

Sendo assim, esta pesquisa tem como objetivo analisar a influência do resíduo de polimento cerâmico (RPC) nas propriedades físico-químicas e mecânicas de um solo característico da região de Curitiba/PR tratado com cal.

2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho foram estudados um solo característico da região de Curitiba/PR (solo de granulometria fina), resíduo de polimento cerâmico (RPC), cal hidratada CH-III e água destilada.

2.1.1 Solo

O solo objeto deste estudo pertence à Formação Geológica Guabirotuba, que após análise granulométrica, foi caracterizado pelo sistema TRB como solo argiloso (A-7-5), e pelo SUCS como um silte de alta compressibilidade (MH). O peso específico real dos grãos é de 2,373 g/cm³ e o índice de plasticidade do solo é de 11%. Para a caracterização do solo, e das misturas estudadas neste trabalho, foram utilizadas as

seguintes normas: NBR 7181 (ABNT, 2016); NBR 6508 (ABNT, 1984), NBR 7180 (ABNT, 2016) e NBR 6459 (ABNT, 2016). O pH obtido do solo foi de 4,6.

O peso específico aparente seco máximo do solo puro, pela energia de compactação normal (ABNT, 2016), foi de 14,70 kN/m³, cuja umidade ótima identificada foi de 27,8 %.

2.1.2 Resíduo de Polimento Cerâmico

A amostra do resíduo de polimento cerâmico (RPC) estudado neste trabalho é gerado em uma indústria de cerâmica no Sul do Brasil e possui pH de 9,5. O mesmo resíduo foi estudado por Barros e Costa (2016) que o caracterizaram. Os autores abordaram o RPC em dois estados, sendo eles:

- in natura – o RPC obtido conforme armazenamento na indústria, sem qualquer tratamento prévio, somente submetido a secagem em estufa a $100 \pm 5^\circ\text{C}$ para eliminação da umidade residual (37%), e;
- moído – o RPC que após a secagem foi submetido a moagem por 30 minutos em moinho cerâmico com esferas de diâmetros e massas distintas, e que após a moagem, o RPC foi peneirado em peneira de malha 150 μm e utilizada as partículas passantes nessa peneira.

Barros e Costa (2016) também discutem a composição química do RPC, relatando que o mesmo é constituído principalmente por sílica (65,78%) e alumina (18,93%), com pequena quantidade de sais solúveis (4,18%), conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Características químicas do RPC.

Óxidos (%)	RPC
Al ₂ O ₃	18,93
SiO ₂	65,78
Fe ₂ O ₃	1,27
CaO	1,26
MgO	2,25
SO ₃	-
TiO ₂	0,49
ZrO ₂	0,49
P ₂ O ₅	0,10
BaO	0,06
ZnO	0,13
CaO livre	-
Perda ao fogo	3,80
Resíduo insolúvel	-
Equivalente alcalino*	4,18

*Equivalente alcalino em $\text{Na}_2\text{O} = \% \text{Na}_2\text{O} + 0,658 \times \% \text{K}_2\text{O}$

Fonte: Elaborado a partir de Barros e Costa (2016)

Barros e Costa (2016) realizaram o ensaio de granulometria do RPC in natura por meio de peneiramento mecânico, conforme recomendações da NBR NM 248 (ABNT, 2003) e a das partículas do RPC moído por difração a laser devido ao tamanho das partículas. Para tal, foi utilizado o equipamento Malvern Mastersizer 2000, com acessório Scirocco 2000 realizado via seca. Os autores comparam a granulometria do RPC com a granulometria do cimento CP-ARI que também foi obtido por difração a laser. As curvas granulométricas do RPC nos 2 estados e do cimento CP-ARI estão apresentadas na Figura 1.

Além da granulometria do RPC, a massa específica do material foi determinada de acordo com a NBR NM 23 (ABNT, 2001), sendo o valor de 2,56 g/cm³ (Barros e Costa, 2016).

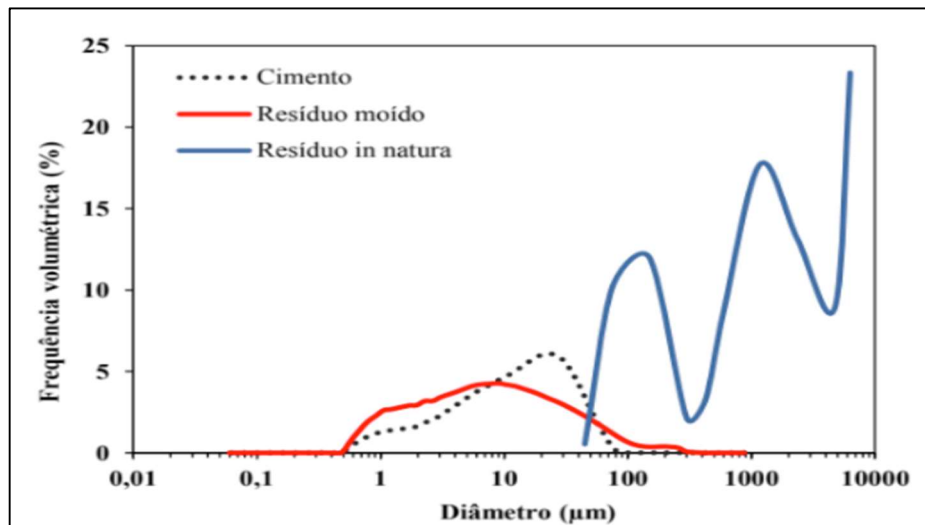


Figura 1. Curvas granulométricas do RPC e cimento CP-ARI
 Fonte: Barros e Costa (2016).

2.1.3 Cal

A cal escolhida para esta pesquisa foi produzida na região de Curitiba/PR, sendo comercializada como cal hidratada CH-III. A massa específica deste material é de 2,40 g/cm³ (ABNT, 2001). O pH obtido da cal foi de 12,6.

2.1.4 Água

No experimento foi utilizado água destilada com intuito de evitar reações químicas indesejadas, como reações dos sais e/ou impurezas da água com a cal e o RPC. A mesma foi empregada nos ensaios de caracterização (solicitada pelas normas) e moldagem dos corpos de prova.

2.1.5 Dosagem e moldagem dos corpos-de-prova

As dosagens definidas para as misturas estão descritas na Tabela 2. Os teores de RPC e de cal são em relação a massa do solo seco e foram estabelecidos com base em pesquisas anteriores (Barros e Costa, 2016; Bertazo e Dalla Rosa Johann, 2018; Hondo e Dalla Rosa Johann, 2018).

Tabela 2. Dosagem das Misturas Solo-RPC e Solo-RPC-cal

Mistura	Teor	
	RPC	Cal
0R0C	0%	0%
5R0C	5%	0%
10R0C	10%	0%
15R0C	15%	0%
0R5C	0%	5%
5R5C	5%	5%
10R5C	10%	5%
15R5C	15%	5%

Tendo como base os parâmetros obtidos no ensaio pela energia de compactação normal, moldaram-se corpos de prova cilíndricos com 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura. Após a pesagem dos materiais, o solo seco e os aditivos (RPC e cal) foram misturados até o conjunto adquirir consistência uniforme. Em seguida a

água foi adicionada, continuando o processo de mistura até que fosse obtida a homogeneidade. Após o processo de mistura, a composição foi armazenada em recipiente fechado para evitar perda de umidade para o ambiente antes da moldagem. Três amostras de cada mistura foram retiradas para verificação da umidade.

O processo de moldagem foi realizado em prensa hidráulica manual, de forma estática, em três camadas de igual massa, com escarificação manual entre camadas. Foram moldados 5 corpos de prova para cada traço. Após o processo de moldagem, os corpos de prova foram imediatamente extraídos do molde, e seus respectivos pesos, diâmetros e alturas medidos novamente para a verificação dos parâmetros desejados para esta pesquisa. Os corpos de prova foram armazenados em sacos plásticos individuais e dispostos em câmara úmida durante o período de 28 dias de cura.

2.1.6 Ensaio de Resistência à Compressão Simples

O ensaio de resistência à compressão simples, também conhecido por ensaio de compressão não confinada ou ensaio de compressão axial, foi realizado com base na NBR 12770 (ABNT, 1992). Para este ensaio foi utilizada uma prensa hidráulica universal, da marca EMIC, modelo DL30, com capacidade máxima de 30 toneladas.

A resistência à compressão simples de cada ensaio foi obtida através da divisão da força aplicada pelo equipamento pela área da seção transversal do corpo de prova cilíndrico. Para cada mistura foram rompidos cinco corpos de prova, e obtida a resistência à compressão simples através da média aritmética entre os resultados obtidos. A prensa empregada no ensaio possui deformação controlada.

3 RESULTADOS

2.1 Influência do RPC no índice de plasticidade das misturas

A influência do RPC no índice de plasticidade (IP) está apresentada na Figura 2. Conforme a classificação da plasticidade de solos sugerida por Jenkins (Caputo, 1987), o solo natural (0R0C) é medianamente plástico ($7 < IP \leq 15$), enquanto as demais misturas são fracamente plásticas ($1 < IP \leq 7$). A diminuição da plasticidade do solo era esperada com a adição da cal, pois a primeira resposta da mistura solo-cal é a diminuição da plasticidade e a melhora da trabalhabilidade do solo (Ingles e Metcalf, 1972).

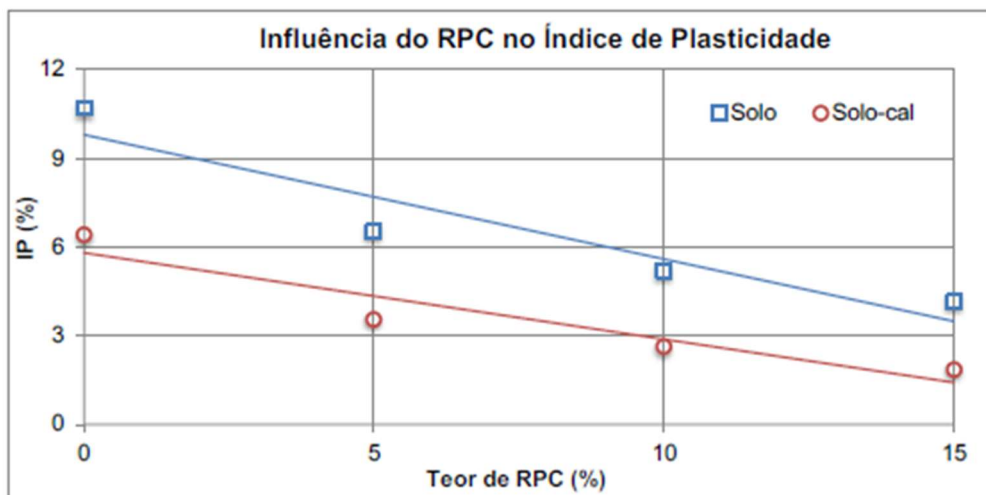


Figura 2. Influência do RPC no IP.

Ao comparar a mistura 0R0C com a mistura 0R5C, nota-se que a adição da cal foi o suficiente para a diminuição da plasticidade do solo (de plasticidade média para plasticidade fraca). A incorporação do RPC apresentou um efeito similar da cal (decréscimo do índice de plasticidade). Tais decréscimos observados foram proporcionais aos teores de RPC adicionados nas misturas (Figura 2).

2.2 Influência do RPC no pH das misturas

A Figura 3 apresenta a variação do pH das misturas em relação à quantidade de RPC e de cal adicionada. Observa-se o aumento do pH tanto para adições de cal quanto para adições de RPC, uma vez que o solo estudado apresenta PH ácido ($\text{pH} < 7$) e ambas as adições apresentam PH alcalino ($\text{pH} > 7$). A água utilizada, por sua vez, apresentou PH alcalino (7,1) mesmo após o processo de destilação.

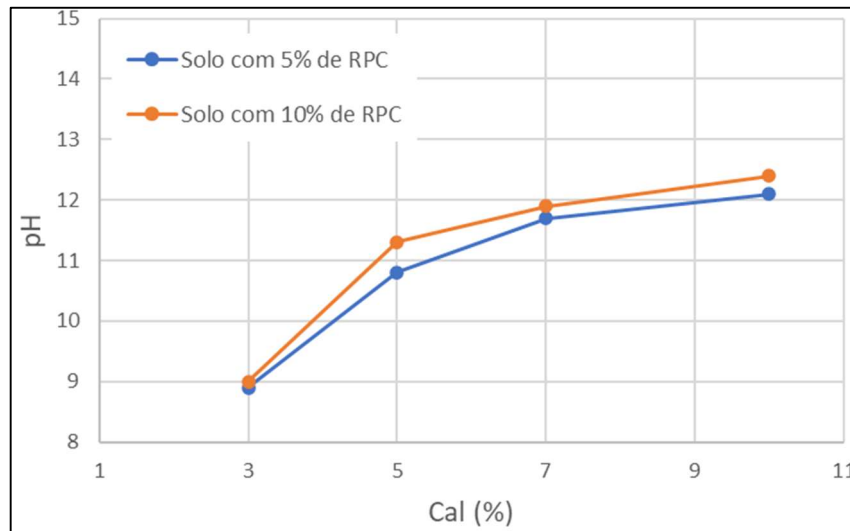


Figura 3. Influência do RPC no pH das misturas.

O aumento do pH nas misturas era esperado, devido aos materiais cal e RPC apresentarem pH alcalino. O aumento do pH favorece as reações químicas de floculação e aglomeração. As reações de floculação e aglomeração são alguns dos fenômenos que ocorrem na etapa inicial rápida da estabilização química do solo com a cal (Castro, 1995).

2.3 Desempenho mecânico

A influência do RPC no solo natural e na mistura solo-cal estão representadas na Figura 4. Nota-se que a incorporação do RPC no solo natural proporcionou um aumento da resistência à compressão simples (q_u) de até 63%, como observado na mistura 15R0C. Já na mistura 0R5C, observa-se que somente a adição da cal no solo fez com que a resistência à compressão do solo dobrasse. Além disso, a combinação do RPC com a cal proporcionou um aumento de aproximadamente 5 vezes o valor de q_u do solo natural, conforme o valor de q_u da mistura 15R5C.

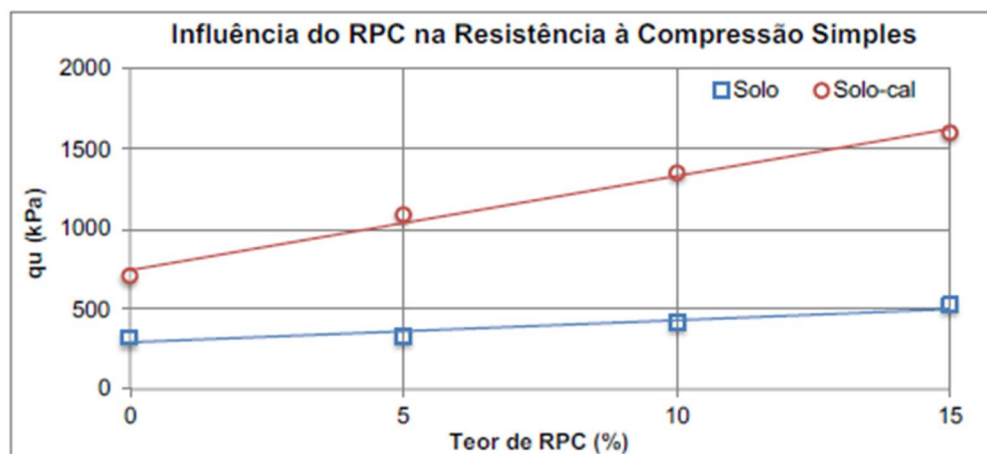


Figura 4. Influência dos RPC nos valores de q_u .

Além disso, observa-se que as misturas de combinação do RPC com a cal apresentaram valores mais significativos de q_u em relação às misturas apenas com cal. Os acréscimos dos valores de q_u foram proporcionais aos teores de RPC incorporados nas misturas. Pode-se inferir que o RPC maximizou o efeito cimentante da cal no solo.

As tendências de q_u encontradas para o intervalo de 0 a 15% de adição de RPC nos materiais (solo natural e mistura solo-cal) estão expressas na Tabela 3.

Tabela 3. – Tendências de q_u no intervalo das misturas estudadas

Material	Equação	R^2
Solo	$q_u = 293,48 + 13,793 \cdot (\text{Teor de RPC})$	0,8969
Solo-cal	$q_u = 744,07 + 58,879 \cdot (\text{Teor de RPC})$	0,9881

4 CONCLUSÕES

As principais conclusões obtidas através da realização desta pesquisa foram:

- A cal e o RPC apresentaram efeitos semelhantes nas propriedades das misturas, tais como a redução do IP e aumento do pH das misturas. Tais acréscimos e decréscimos observados nas propriedades foram proporcionais aos teores de RPC empregados nas misturas.
- A incorporação do RPC no solo natural e na mistura solo-cal proporcionou ganhos nos valores de resistência à compressão simples. No solo natural o aumento foi de mais de 60% observado na mistura 15R0C e na mistura solo-cal o ganho foi de aproximadamente 400% conforme visto na mistura 15R5C.
- O tempo de cura foi suficiente para que ocorressem reações pozolânicas no solo, pois todas as misturas apresentaram desempenho mecânico maior em relação ao solo natural (0R0C).
- Do ponto de vista técnico, a utilização do RPC como material alternativo na estabilização de solos finos é viável, pois todos as misturas apresentaram comportamento mecânico superiores ao solo natural.
- Do ponto de vista ambiental, a viabilidade de se utilizar o solo *in situ* e o RPC reduzem alguns impactos ambientais, pois evitam a exploração de jazidas naturais e deposição de resíduos em aterros.

AGRADECIMENTOS

Os autores demonstram agradecimento ao suporte da UTFPR, aos colaboradores do Laboratório de Materiais e do Laboratório de Mecânica dos Solos da UTFPR, à Fundação Araucária e à Superintendência de Ciência, Tecnologia e Ensino Superior do Paraná (SETI).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abrão, P. C. R. A. (2019) *O uso de pozolanas como materiais cimentícios suplementares: disponibilidade, reatividade, demanda de água e indicadores ambientais*. Dissertação de Mestrado em Ciências, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 144 p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 6459: *Solo - Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2014). NBR 6508: *Solo - Grãos de Solos que passam na peneira de 4,8mm - Determinação de massa específica*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 7180: *Solo - Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 7181. *Solo – Análise granulométrica*. Rio de Janeiro.

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). *NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1992). *NBR 12770. Solo coesivo – Determinação da resistência à compressão não confinada*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2001). *NBR NM 23. Cimento Portland e outros materiais em pó – determinação de massa específica*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2003). *NBR NM 248. Agregados – Determinação da composição granulométrica*. Rio de Janeiro.
- Barros, B. P.; Costa, E. B. C. (2016) *Avaliação do uso de finos de polimento de placas cerâmicas em matrizes cimentícias*. Relatório final de iniciação científica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, PR. 9 p.
- Bertazo, I. L.; Dalla Rosa Johann, A. (2018) *Estudo dos parâmetros-chave no controle do comportamento mecânico de misturas solo-resíduo-cal*. Relatório final de iniciação científica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba. 12 p.
- Caputo, H. P. (1987) *Mecânica dos solos e suas aplicações*. 6. ed. [s.l.] LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. 244 p.
- Castro, F. J. C. O. (1995) *Contribuição ao conhecimento e à determinação da reatividade de solos sesquioxídicos utilizando o hidróxido de cálcio: aplicação ao processo de geopolimerização (estabilização)*. Tese de Doutorado em Ciências, Programa de PósGraduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE. 344 p.
- Consoli, N. C.; Dalla Rosa, A.; Saldanha, R.B. (2011) Variables governing strength of compacted soil-fly ash-lime mixtures. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, New York: ASCE, v.23, p.432-440.
- Dalla Rosa, A. (2009) *Estudo dos Parâmetros-chave no Controle da Resistência de Misturas SoloCinza-Cal*. Dissertação de Mestrado em Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 198 p.
- Hondo, K. A.; Dalla Rosa Johann, A. (2018) *Análise do Comportamento Geotécnico de um Solo Característico de Curitiba/PR Tratado com Resíduo de Cerâmica Vermelha e Cal*. Relatório final de iniciação científica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba. 12 p.
- Hondo, K. A.; Mandira, T., 2021; (2021) *Melhoramento de solos para pavimentação através da técnica de estabilização por aditivos químicos: resíduo de cerâmica vermelha e cal*. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curso de Engenharia Civil, Curitiba. 70 p.
- Ingles, O. G.; Metcalf, J. B. (1972) *Soil stabilization: principles and practices*. Sydney: Butterworths, 1972. 374 p.
- Núñez, V.; Lotero, A.; Bastos, C. A.; Sargent, P.; Consoli, N. C. (2024) Mechanical and microstructure analysis of mass stabilized organic clay thermally cured using a ternary binder. *Acta Geotechnica*, p. 741-762.
- Saldanha, R. B.; Scheuermann Filho, H. C.; Ribeiro, J. L. D.; Consoli, N. C. (2017) Modelling the influence of density, curing time, amounts of lime and sodium chloride on the durability of compacted geopolymers monolithic walls. *Construction and Building Materials*, v. 136, p. 65-72.
- Sandroni, S.S.; Consoli, N.C. (2010) Sobre a Prática da Engenharia Geotécnica com dois Solos Difíceis: os extremamente Moles e os Expansivos. In: XV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Anais [...] ABMS: Gramado. p. 97-186.