

ANÁLISE DA ADIÇÃO DE RESÍDUO DE ROCHAS ORNAMENTAIS EM MISTURAS DE SOLO-CIMENTO

Carlos Henrique Diehl

Acadêmico do curso de Engenharia Civil Universidade do Vale do Taquari
cdiehl@universo.univates.br

Luciana da Silva Pontes

Acadêmica do curso de Engenharia Civil Universidade do Vale do Taquari
luciana.pontes@universo.univates.br

Samuel Taffarel Giacomolli

Acadêmico do curso de Engenharia Civil Universidade do Vale do Taquari
samueltaffarelg@universo.univates.br

João Rodrigo Guerreiro Mattos

Professor do curso de Engenharia Civil da Universidade do Vale do Taquari
joao.mattos@univates.br

Resumo. *Cada vez mais frequente a utilização de técnicas tradicionais da engenharia geotécnica depara-se com obstáculos de caráter econômico e ambiental. Grande parte dos resíduos gerados em processos industriais não possuem a correta destinação ambiental, um destes resíduos é o gerado no processo de beneficiamento das rochas ornamentais, dessa forma, o objetivo desta pesquisa é analisar o efeito da adição desse resíduo para a estabilização de um solo sedimentar arenoso. Nesse sentido, moldaram-se corpos de prova com os teores de 0%, 10%, 20% e 30% de resíduo e 6%, 8% e 10% de cimento, totalizando 12 dosagens diferentes. Os resultados mostraram que a adição de resíduo de rochas ornamentais resultou no aumento da resistência à compressão simples em relação à mistura solo-cimento. O ganho de resistência apresentado se justifica devido ao efeito de filler do resíduo adicionado nas misturas solo-cimento. Destaca-se que a melhor relação custo-benefício se deu com a adição de 30% de resíduo com 6% de cimento.*

Palavras-chave: *Estabilização de solo. Solo-cimento. Resíduo de rochas ornamentais.*

1. INTRODUÇÃO

As atividades de extração e beneficiamento de pedras ornamentais são fortemente exercidas no Brasil, tendo uma grande representação econômica, por gerar riqueza e desenvolvimento social ao país. Conforme a Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais (ABIROCHAS, 2013), o Brasil, no ano de 2011, tornou-se o quarto maior produtor e sétimo maior exportador mundial de rochas ornamentais em volume físico.

Contudo, a operação de extração e beneficiamento de rochas gera uma quantidade enorme de resíduos, além disto este resíduo gerado não possui uma aplicação prática definida, Desta forma, sendo descartado de maneira inadequada ao meio ambiente, resultando em impactos ambientais. (Almeida *et al.*, 2007).

Segundo Chiodi Filho *et al.* (2005), uma das diretrizes para o desenvolvimento e aprimoramento do setor de rochas no Brasil é a adequação ambiental (tratamento e aproveitamento de resíduos). Uma das práticas mais difundidas na literatura no últimos anos, na área de geotecnia é a adição de resíduos da

construção juntamente com cimento para a estabilização química de solos, desenvolvendo assim uma destinação correta dos resíduos, além deste, podendo ser empregado em novos projetos.

A utilização de cimento para a estabilização de solos, traz como principal vantagem o ganho de resistência em um período curto de tempo, além de ter reação cimentante com grande variedade de solos. De acordo com Schnaid *et al.* (2001), na mistura de areia e cimento é comprovada a presença de uma relação linear entre resistência à compressão e teores de cimento. Clough *et al.* (1981) *apud* Foppa (2005) complementam que este comportamento é justificado pelos teores de cimento, densidade da mistura, e arranjo dos grão.

Silva (2015) afirma que a qualidade da mistura solo-cimento depende de alguns fatores como as especificações do solo e os parâmetros do solo, o ganho de resistência está relacionado com a porcentagem de finos (argila e silte) maior ou igual a 20%, resultando numa maior coesão para a mistura solo-cimento deste modo melhorando a compactação do material.

Dito isto, observou-se um grande número de trabalhos utilizando cimento para a estabilização de solos, desta forma o objetivo deste artigo é além de comprovar a importância da reutilização e reciclagem dos resíduos de beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO), é analisar uma possível aplicação prática deste resíduo, reduzindo os teores de cimento na estabilização do solo sedimentar arenoso de baixa resistência mecânica misturado com cimento. Para isso foram analisando o comportamento das misturas solo-cimento com adição de RBRO aos ensaios de compressão simples.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados no estudo resumem-se nas diferentes variações de dosagem de misturas solo-cimento com adição de RBRO. Com relação à metodologia aplicada no estudo, trata-se de um estudo quantitativo, descritivo e experimental.

2.1 Caracterização do materiais

Os materiais escolhidos para a estabilização do solo sedimentar arenoso, foram resíduos do processo de beneficiamento de pedras ornamentais e cimento CP V-ARI, a seguir discorre-se sobre os mesmo.

2.1.1 Cimento

Para a mistura solo-cimento foi utilizado o cimento CPV-ARI (cimento Portland de alta resistência inicial), escolhido devido a alta reatividade inicial de cura, além de obter uma grau de moagem maior depositando maior rendimento a mistura. O cimento utilizado possui, no máximo, 3,5%, 4,5% e 6,5% de resíduo insolúvel, SO₃ e MgO, respectivamente. Além de não conter escória e nem de material pozzolânico, podendo conter até 10% de filer calcário neste tipo de cimento.

2.1.2 Água

Neste estudo a água empregada é proveniente das redes de abastecimento pública do município de Lajeado/RS, sendo considerada potável. A quantidade de água em cada mistura foi calculada em função da umidade ótima do solo utilizado.

2.1.3 Solo

O solo utilizado para o estudo foi coletado na região de Osório/RS, com formação sedimentar proveniente dos depósitos marinhos, conforme Spinelli (1999), pertencem ao sistema Laguna-Barreira III. Para a caracterização deste solo, foram feitos os ensaios de granulometria, limites de Atterberg, massa específica

A análise granulométrica da areia de Osório foi realizada através do ensaio de peneiramento e sedimentação, conforme NBR 7181 (ABNT, 2016a). A Fig. 1 apresenta estas informações.

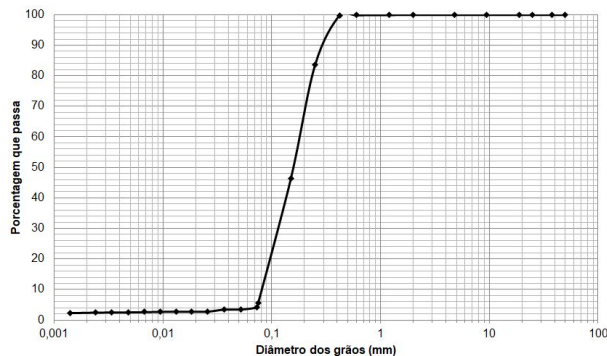


Figura 1. Curva granulométrica da areia Osório

Conforme os dados da Fig. 1, o solo estudado possui um coeficiente de curvatura (CC) de 0,72, e um coeficiente de não uniformidade (CNU) de 2,11. Sendo assim caracterizando-se como um solo não muito bem graduado, visto que a curva granulométrica demonstra uma descontinuação, pois o valor do CC é menor que 1, e o valor de CNU aproxima-se de 2, justificados pela falta de grãos com diâmetro maior.

Quanto à massa específica do solo, foram realizados 3 ensaios utilizando o picnômetro, conforme orientações da NBR 6458 (ABNT, 2017). Sendo assim, a ρ_s da areia de Osório vale $2,536 \text{ g/cm}^3$. Já para os limites de

liquidez e de plasticidade, não foi possível a realização dos ensaios devido ao material ser predominantemente granular. Portanto, o comportamento do solo foi caracterizado como não-plástico (NP), e classificado como pertencente ao grupo A-3 da *Highway Research Board* (HRB) e SP pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS). As duas classificações convergem para uma areia fina mal graduada.

Por último, realizou-se o ensaio de compactação de acordo com os procedimentos da NBR 7182 (ABNT, 2016b). Na Fig. 2 é apresentada a curva de compactação da areia de Osório na energia normal.

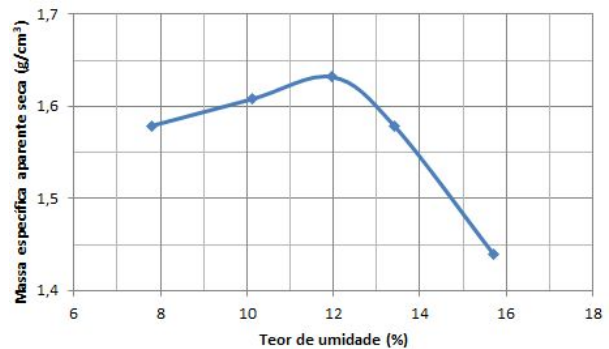


Figura 2. Curva de compactação da areia Osório

Tendo realizado a curva de compactação, pode-se identificar o teor de umidade ótimo (w_{ot}) de 12% e a massa específica aparente seca máxima ($\rho_{d,m\acute{a}x}$) de $1,630 \text{ g/cm}^3$. É importante destacar que com a adição de resíduo de pedras ornamentais e de cimento, estes valores tendem a sofrer uma pequena alteração. Contudo, para a presente pesquisa, optou-se por usar os parâmetros de compactação do solo puro para todas as dosagens analisadas.

2.1.4 Resíduos de pedras ornamentais

Para o desenvolvimento desta pesquisa, utilizou-se RBRO coletado em um tanque de

sedimentação de resíduos de uma empresa situada na cidade de Lajeado/RS. Foram desconsideradas outras fontes geradoras de resíduos na empresa, como a variação dos modelos de rochas utilizadas no processo, a água utilizada, abrasivos, pastilhas, entre outros insumos utilizados.

Dentre os processos de beneficiamento das pedras ornamentais, para o estudo foram coletados os resíduos de dois processos, corte e polimento, os quais utilizam a água como componente, gerando assim um resíduo pastoso conhecido como a Lama do Beneficiamento de Rochas Ornamentais (LBRO).

De acordo com Buzzi *et al.* (2006), o RBRO apresenta composição química variada em função da composição das rochas, do processo de beneficiamento, das propriedades dos insumos, entre outros fatores. A caracterização e a classificação das LBRO são de grande importância. Para a caracterização e composição da LBRO foi utilizada o estudo de Braga *et al.* (2010), que apresenta a caracterização ambiental deste resíduo como um não-perigoso, Classe II, corroborando com outros resultados encontrados na literatura.

Para a utilização da lama na estabilização do solo, fez-se necessário a secagem deste material. Assim, a amostra de lama foi submetida a 36 h numa estufa de secagem a uma temperatura de, aproximadamente, 105° C. Após esse processo, o material necessitou ser destorroado, para isso utilizou-se um moinho de bolas, onde foram colocadas amostras de 1 kg de material e 7,4 kg de massa de bolas, o material permaneceu no moinho até atingir 140 voltas a uma velocidade de 30 rpm. Ao final do processo, obteve-se um material seco e fino. Para a caracterização deste material foi realizado apenas o ensaio de granulometria, visto que o principal efeito dele nas misturas solo-cimento estudadas, deva ser o efeito de filler.

O ensaio de granulometria do material foi realizado através do peneiramento, de acordo com os procedimentos da NBR 7181 (ABNT, 2016b). A Fig. 3 apresenta a curva granulométrica do resíduo de rochas ornamentais.

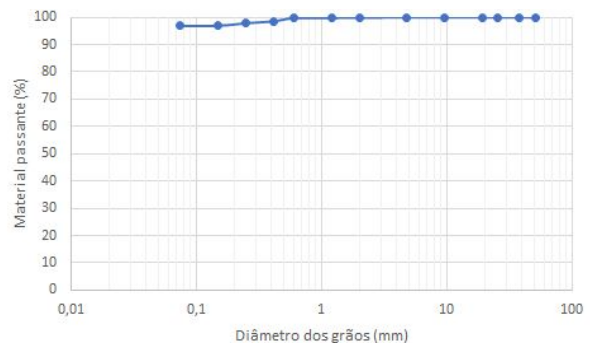


Figura 3. Curva granulométrica do RBRO

Conforme o gráfico de granulometria apresentado na Fig. 3, pode-se observar que, aproximadamente, 97% do material possui grãos com tamanhos menores que 0,075 mm, caracterizando-se como um material fino, com potencial para atuar como filler.

2.2 Programa experimental

O programa experimental foi desenvolvido para a avaliação técnica da estabilização de um solo sedimentar arenoso misturado com cimento e RBRO.

2.2.1 Dosagem

Para as misturas, foram feitas dosagens variando o teor de RBRO e de cimento, para as quais as porcentagens de cimento foram definidas a partir da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 1986), que indica a utilização de teores em função da classificação HRB, de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1. Teor de cimento recomendado em função da classificação HRB

Classificação HRB	Teor de cimento (%)
A-1-a	5
A-1-b	6
A-2	7
A-3	8
A-4	10
A-5	10
A-6	12
A-7	13

Fonte: ABCP (1986)

Visto que o solo em estudo foi classificado como A-3, o teor de cimento indicado é 8% em relação à massa. Entretanto, utilizaram-se os teores de 6%, 8% e 10%, para ter um percentual abaixo e um acima do indicado.

Para os teores de RBRO não foram encontradas indicações na literatura, sendo assim optou-se pelos teores de 0%, 10%, 20% e 30% em relação à massa de solo. Esses teores resultaram em doze variações de dosagens, sendo que para cada dosagem foram moldados 3 corpos de provas (CPs). Portanto, foram moldados, ao total, 36 CPs para a realização desta pesquisa. Dessa forma, será possível avaliar o efeito da adição de RBRO nas misturas de solo-cimento.

2.2.2 Moldagem dos corpos de prova

A moldagem dos CPs foi feita de acordo com os procedimentos da NBR 12024, na qual utilizou-se um corpo de prova cilíndrico tripartido de 50 mm de diâmetro por 100 mm de altura, passando pelos processos de pesagem, mistura, compactação e desmoldagem.

Inicialmente, pesaram-se os materiais em uma balança com precisão de 0,01 g, após, misturou-se a areia com o RBRO e, depois,

com o cimento, estando a mistura bem homogênea acrescentou-se a água. Essa mistura foi dividida em 3 partes iguais, para cada parte foi feita a compactação estática com prensa hidráulica.

Após a compactação, o CP foi desmoldado, pesado e medidas as suas dimensões de altura e diâmetro, estes parâmetros foram utilizados para o controle de densidade da amostra. Além da quantidade de material para a moldagem do CP, obteve-se uma sobra da mistura usada para o controle da umidade da amostra durante a compactação.

No processo, foram admitidos as tolerâncias propostas por Dalla Rosa (2009), que compreende: grau de compactação de 99% e 101% em relação a $\rho_{d,máx}$ do solo, dimensões com tolerância de $\pm 1,0$ mm na altura e $\pm 0,5$ mm no diâmetro. Além disso, aceitou-se uma variação de ± 2 % em relação à $w_{ót}$ do solo. Todos os CPs que não se enquadraram nos critérios de aceitação previamente definidos, foram remoldados, diminuindo assim a dispersão dos resultados.

2.2.3 Cura dos corpos de prova

O tempo de cura dos CPs foi definido em função do tipo de cimento utilizado, neste caso como foi utilizado para a mistura o CPV-ARI, o tempo de cura foi de 7 dias. A cura deve ocorrer em um ambiente com temperatura e umidade controlada, para não haver interferência nas reações químicas, para isso foi ajustada a câmara úmida para uma temperatura de 23° C com variação de 2° C e umidade relativa de 95 %.

Antes do rompimento os CPs, as últimas 24h do final do tempo de cura foram feitas com eles submersos na água. Esse procedimento aproxima a mistura à condição de saturada, desconsiderando assim a contribuição da sucção na resistência das misturas de solo-cimento.

2.2.4 Ruptura dos corpos de prova

Para a análise do desempenho mecânico das misturas, o mesmo foi analisado por meio do rompimento dos CPs à compressão simples. Os CPs foram rompidos em uma prensa universal automática com capacidade de 50kN. A velocidade adotada para o ensaio foi de 1,14 mm/min. A resistência à compressão simples (q_u) é identificada pela maior tensão axial que o CP suporta antes da sua ruptura.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a desmoldagem dos CPs, pode-se identificar visualmente que as amostras sem adição de RBRO apresentaram maior porosidade em relação às amostras com adição de resíduo. Isso se explica devido a granulometria uniforme da areia utilizada nesta pesquisa.

A Tabela 2 apresenta os resultados da q_u obtida para os diferentes teores de RBRO e cimento, com o período de cura de 7 dias.

Tabela 2: Resultados de q_u (em MPa)

Teor de cimento (%)	Teor de resíduo (%)			
	0	10	20	30
6	0.56	0.37	0.79	1.42
6	0.63	0.51	0.64	1.45
6	0.46	0.58	0.73	1.25
8	0.54	0.96	1.06	1.00
8	0.68	1.02	1.09	1.02
8	0.56	0.81	1.16	1.14
10	0.72	1.44	1.58	1.19
10	0.94	1.00	1.42	1.14
10	0.85	1.21	1.31	1.14

Fonte: Dos autores

A Fig. 4 apresenta o gráfico de ensaio de compressão simples para cada dosagem analisada. Para cada percentual de resíduo, verificou-se que a linha de tendência da

resistência à compressão simples em função do teor de cimento da mistura era linear.

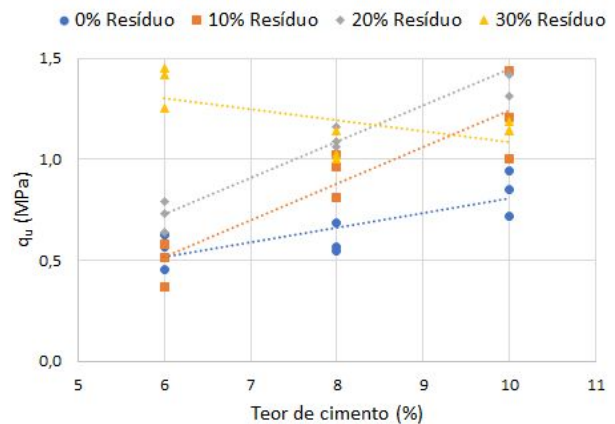


Figura 4. Resultados da resistência à compressão simples

Pode-se observar, através da Fig. 4, que para os teores de 0% de RBRO o ganho de resistência com o aumento do teor de cimento é relativamente baixo, já nas misturas com a adição de RBRO nos teores de 10% e 20% observou-se um ganho de resistência mais acentuado, demonstrando que realmente ocorreu o efeito de filer nessas misturas. Já para o teor de 30% de material, a adição de cimento não contribuiu para o ganho de resistência, este fato pode ser explicado pelo excesso de material fino na mistura, uma vez que para os teores mais baixos obteve-se ganhos mais acentuados de resistência.

Mesmo assim, vale destacar que a mistura que apresentou a melhor relação custo-benefício foi a com adição de 30% de RBRO e 6% de cimento. Visto que com ela atingiram-se valores de resistência muito semelhantes às misturas empregando 10% de cimento.

4. CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos nesta pesquisa, verificou-se que com a adição de RBRO na mistura de solo-cimento adquire-se

uma maior resistência à compressão, quando comparado a mistura sem adições. Atribui-se que o ganho de resistência obtido com a adição do resíduo seja devido ao efeito de atuar como filer, ajudando no melhor travamento entre os grãos.

Observou-se que o teor de maior ganho de resistência foram nas misturas compostas com 20% de resíduo. Já nas misturas com 30% de resíduo, percebeu-se que um decréscimo da resistência com maiores teores de cimento. Entretanto, a melhor relação custo-benefício foi obtida com a mistura contendo 30% de resíduo e 6% de cimento.

Portanto, pode-se concluir que o resíduo de rochas ornamentais pode ser utilizado como adição para a estabilização de solo, em conjunto com cimento. Mostrando que essa é uma destinação adequada para o material, que inicialmente era descartado no meio ambiente. Tornando-se, assim, um produto comercial para as indústrias e contribuindo para o desenvolvimento sustentável.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ROCHAS ORNAMENTAIS - ABIROCHAS (2013) **Síntese das Exportações e Importações Brasileiras de Rochas Ornamentais e de Revestimento no Período Janeiro a Agosto de 2013**. Informe 14/2013. São Paulo – SP.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Dosagem das Misturas de Solo-Cimento**: Normas de Dosagem e Métodos de Ensaio. Estudo Técnico 35. São Paulo: ABCP, 1986. 54p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2016a. 12 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**: Solo - Ensaio de compactação. Rio de Janeiro: ABNT, 2016b. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **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: ABNT, 2016 versão corrigida 2: 2017. 1

ALMEIDA, N.; Branco, F.; Santos, J. R. (2007) **Recycling of stone slurry in industrial activities**: Application to concrete mixtures. Building and Environment, vol. 42. 810- 819p.

BRAGA, F.S. et al. **Caracterização ambiental de lamas de beneficiamento de rochas ornamentais** Eng Sanit Ambient | v.15 n.3 | jul/set 2010 | 237-244

BUZZI, D.C. et al. **Caracterização segundo a NBR 10004/2004 de resíduos gerados no beneficiamento de granitos**. In: SIMPÓSIO ÍTALO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 8, Anais... Fortaleza, ABES, 2006. CD-ROM.

CHIODI, F. C. (2005) **Situação do setor de rochas ornamentais e de revestimento no Brasil – mercados interno e externo**. IN: SIMPÓSIO DE ROCHAS ORNAMENTAIS DO NORDESTE, 5. Anais... Recife: Deminas, DAU, PPGEMinas, SBG, SINDIPEDRAS. 28p.

DALLA ROSA, A. **Estudo dos parâmetros-chave no controle da resistência de misturas solo-cinza-cal**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - Programa de Pós-Graduação em Engenharia

Civil): Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.

FOPPA, D. **Análise de variáveis-chave o controle da resistência mecânica de solos artificialmente cimentados.** 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil): Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.

SCHNAID, F.; PRIETTO, P. D. M.; CONSOLI, N. C. Characterization of cement sand in triaxial compression. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental.** New York, V.127, p. 857-868, 2001.

SILVA, A. D. B. **Estudo de misturas solo cimento agregado reciclado de telhas cerâmicas para fabricação de blocos para alvenaria.** 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Departamento de Engenharia Civil): Universidade Federal de Uberlândia, MG, 2015.

SPINELLI, L. F. **Comportamento de Fundações Superficiais em Solos Cimentados.** 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil): Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1999.