

Propriedades geotécnicas de misturas de um solo com RCD

Fábio Krueger da Silva

Docente, Instituto Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, fabio.krueger@ifsc.edu.br

Diogo Luiz Guesser

Discente, Instituto Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, guesserluizdiogo@gmail.com

Edlaine Balbino dos Santos

Discente, Instituto Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, edlaine.s@aluno.ifsc.edu.br

Rafaela Ganzo

Discente, Instituto Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, rafaela.g@aluno.ifsc.edu.br

Mariana Formento

Discente, Instituto Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, engmarianaformento@gmail.com

RESUMO: Os fenômenos climáticos extremos têm provocado destruições deixando cicatrizes no Brasil e no mundo. Os resíduos de construção gerados pelo colapso das estruturas e edificações reforçam a necessidade da reutilização desse material. A adição de resíduos de construção e demolição (RCD) em solos é uma alternativa sustentável para melhorar as propriedades geotécnicas dos materiais empregados em obras de engenharia (pavimentos, contenções, barragens, etc). Essa pesquisa analisou os resultados da incorporação de resíduos de bloco cerâmico e de concreto num solo residual de granito. Foram conduzidos os ensaios de granulometria, limites de consistência e massa específica das partículas do solo e, nos resíduos, os ensaios de granulometria, densidade aparente, absorção e índice de forma. Nas misturas de solo + RCD foram realizados os ensaios de compactação (energia intermediária) e Índice Suporte Califórnia (ISC). Foram testados 2 teores de misturas, sendo 70/30 e 60/40, respectivamente para cada tipo de RCD empregado nesta pesquisa. A compactação das misturas mostrou haver quebra dos agregados de RCD, especialmente no ramo seco. A adição de RCD provocou menor expansão nos ensaios de ISC e, em alguns teores, atingiu-se os valores mínimos normativos (20%) para emprego como material de sub-base de pavimentos. Indicando que essas misturas poderiam ser usadas para restauração e construção de pavimentos com reuso de entulhos de obras.

PALAVRAS-CHAVE: Ensaios de laboratório, Misturas de solos, Resíduos de construção, Sustentabilidade.

ABSTRACT: Extreme weather events have caused destruction leaving scars in Brazil and around the world. Construction waste generated by the collapse of structures and buildings enlarge the need to reuse this material. The addition of construction and demolition waste to soils is a sustainable alternative to improve the geotechnical properties of materials used in engineering works (pavements, retaining walls, dams, etc.). This research analyzed the results of incorporating clay brick and concrete waste into a residual granite soil. Tests were conducted on granulometry, Atterberg limits and specific gravity of soil particles, and on the construction waste, tests on granulometry, bulk density, absorption and shape index. Compaction (intermediate energy) and California Bearing Ratio tests were performed on the soil with construction waste. Two mixture contents were tested, 70/30 and 60/40, respectively, for each type of construction waste used in this research. The compaction of the mixtures showed that there was a breakage of the aggregates, especially in the dry section. The addition of construction waste caused less expansion in the CBR tests and, in some contents, the minimum values (20%) for use as a pavement sub-base material were reached. This indicates that these mixtures could be used for restoration and construction of pavements with the reuse of construction debris

KEYWORDS: Laboratory tests, Soil mixtures, Construction waste, Sustainability.

1 INTRODUÇÃO

Considerando o impacto de eventos climáticos extremos e, subsequente geração de resíduos da construção e demolição (RCD) a partir das estruturas afetadas, a necessidade de reutilização e reaproveitamento deste material torna-se cada vez mais evidente e urgente. Dentro deste contexto, a integração de RCD com solos naturais apresenta-se como uma alternativa eficaz e ambientalmente correta. Essa mistura demonstra grande potencial para aprimorar as propriedades geotécnicas dos materiais terrosos e, conseqüentemente, expandir suas aplicações em diversas obras, como a construção e restauração de pavimentos, em estruturas de contenção e barragens.

Para investigar este potencial, a presente pesquisa concentrou-se na análise de misturas específicas compostas por um solo residual de granito e resíduos de concreto e blocos cerâmicos, materiais estes caracterizados previamente em laboratório. A metodologia experimental incluiu a realização de ensaios de compactação (utilizando energia intermediária e amostras não trabalhadas) e ensaios de índice de suporte califórnia (CBR), avaliando o comportamento das misturas em diferentes teores (70/30 e 60/40). Assim, o objetivo geral desta pesquisa foi analisar os resultados obtidos a partir destes ensaios, buscando validar o desempenho geotécnico das misturas de solo com RCD para seu potencial emprego, notadamente como material de sub-base em pavimentos rodoviários, contribuindo para a gestão sustentável desses resíduos.

2 REVISÃO DE LITERATURA

A construção civil, embora essencial para o desenvolvimento econômico, é também uma das principais responsáveis pela produção de resíduos sólidos e pelos consequentes impactos ambientais. No Brasil, estima-se que o setor responda por mais da metade dos resíduos produzidos anualmente, o que evidencia a urgência de práticas eficazes de reaproveitamento e destinação desses materiais (LEAL, 2021).

A Resolução nº 307/2002 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) define os resíduos da construção civil como aqueles provenientes de obras, reformas, demolições e escavações, abrangendo materiais como tijolos, concreto, metais, plásticos, gesso e fiações elétricas (BRASIL, 2002). Esses resíduos, conhecidos como entulho, representam um desafio significativo para a sustentabilidade do setor, exigindo uma gestão adequada. Diante disso, surge a possibilidade de utilizar os resíduos de construção e demolição (RCD) como alternativa técnica e ambientalmente viável para a melhoria das propriedades geotécnicas de solos utilizados em obras civis.

Segundo Santana (2014), os agregados reciclados de RCD já são amplamente empregados na construção rodoviária, devido à sua disponibilidade e à facilidade de aplicação. Picanço (2012), destaca ainda que as misturas de solo e resíduo cerâmico apresentaram resultados satisfatórios quanto ao desempenho mecânico, evidenciando o potencial desse tipo de resíduo na melhoria de solos com baixa capacidade de suporte, com destaque para seu uso em estruturas de pavimentação. Freitas et al. (2022), testaram um solo argiloso laterítico da cidade Manaus para emprego em camada de sub-base de pavimentos. Nesta pesquisa usou-se um teor de 20% misturado ao solo. Os agregados usados foram RCD e Seixo rolado. Foram feitos ensaios de granulometria, compactação e CBR. Os resultados indicaram que houve diminuição da umidade ótima e aumento do peso específico seco quando comparado ao solo natural. Ainda mostrou que houve aumento no valor de CBR e diminuição da expansão. Contudo, a mistura neste teor não atingiu os valores mínimos para uso em camadas de sub-base.

3 MÉTODO DA PESQUISA

Todos os experimentos e ensaios desenvolvidos nesta pesquisa foram conduzidos no Laboratório de Geotécnica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina (IFSC), Campus Florianópolis. O material granular fino utilizado foi um solo residual classificado como uma argila arenosiltosa, com amostra deformada coletada em um talude no município de Biguaçu/SC a uma profundidade de 1,5 metros. A caracterização física e geotécnica detalhada do solo foi realizada previamente por Palma et al. (2024). Os RCDs empregados foram de duas naturezas distintas: resíduos de concreto e resíduos de blocos cerâmicos. Seguindo a norma rodoviária DNER-ME 083/98, ambos foram processados em laboratório por meio de britagem para atender a uma faixa granulométrica pré-estabelecida, variando entre 19,0 mm e 4,8 mm.

Posteriormente, foram caracterizados quanto à sua densidade aparente e absorção, por meio da norma rodoviária DNER-ME 081/98, e quanto ao índice de forma, a partir da norma DNIT 425/2020 - ME.

Para a análise comparativa, foram definidas quatro misturas de solo-RCD, além do solo natural utilizado como controle, totalizando cinco grupos experimentais: 1) Solo Puro; 2) 70% Solo + 30% RCD de Concreto; 3) 60% Solo + 40% RCD de Concreto; 4) 70% Solo + 30% RCD de Blocos Cerâmicos; e 5) 60% Solo + 40% RCD de Blocos Cerâmicos. Todas as composições foram submetidas ao ensaio de compactação Proctor, utilizando a norma ABNT NBR 7182:2025, com a energia intermediária. O ensaio de compactação das misturas foi feito com amostras não trabalhadas, para garantir que não houvesse dano acumulado, conforme a DNIT 164/2013-ME. A partir do ensaio, foram determinados os valores de peso específico aparente seco máximo e umidade ótima. Adicionalmente, para avaliar a degradação dos agregados, foi realizada uma análise da quebra de partículas após a compactação. Para isso, foram selecionados corpos de prova representativos do ramo seco e do ramo úmido do ensaio de compactação. Os agregados de RCD foram separados da fração de solo por meio de lavagem em água sobre a peneira de malha 2,36 mm. Posteriormente, o agregado recuperado foi seco em estufa a 110° C por 24 horas, e sua curva granulométrica foi refeita. A análise consistiu na comparação da curva granulométrica dos agregados recuperados com a curva granulométrica original.

Para avaliar a capacidade de suporte, foi realizado o ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC) ou comumente conhecido como ensaio de CBR, seguindo a ABNT NBR 9895:2016. Para cada composição, foram moldados dois corpos de prova, compactados na umidade ótima de cada mistura. Os corpos de prova foram então submersos em água por um período de quatro dias, durante o qual se mediu a expansão, e posteriormente submetidos à ruptura para determinação do Índice de Suporte Califórnia (Figura 1).



Figura 1. Etapas da pesquisa (britagem, compactação, remoção de solo e CBR).

4 RESULTADOS

Com a condução desta pesquisa foi possível extrair informações importantes quanto ao emprego de misturas de solo e RCD em obras rodoviárias. Como exposto anteriormente após a coleta das amostras de solo residual foram realizados os ensaios laboratoriais. O solo desta pesquisa já foi estudado anteriormente e, a caracterização física do material foi feita por Palma et. al (2024). Na tabela 1 são mostrados os resultados dos ensaios que indicam o solo como uma argila areno-siltosa com plasticidade média.

Tabela 1. Propriedades física do solo residual. Fonte: Palma et. al (2024).

Parâmetros geotécnicos	Solo residual		
Massa específica dos grãos (g/cm^3)	2,611		
Granulometria (%)	Argila	Silte	Areia
	53	18	29
Limite de Liquidez (%)	52		
Índice de Plasticidade	14		

No caso dos resíduos de concreto e bloco cerâmico, após a britagem e redução do tamanho das partículas foram feitos os ensaios de caracterização dos agregados. Para possibilitar as análises comparativas foram definidas as faixas granulométricas que os agregados deveriam ter antes de serem misturados nos devidos teores com o solo. Assim, a curva de granulometria original dos agregados de RCD deveria ter um tamanho de partículas variando entre 19,0mm e 4,8mm. A densidade aparente do concreto e dos blocos cerâmicos foram compatíveis aos encontrados na literatura. Sendo que a densidade aparente do concreto é 30% maior que a densidade aparente do bloco cerâmico. Ainda, a absorção do agregado de bloco cerâmico foi três vezes maior que a do concreto. Os valores de índice de forma ficaram abaixo de 2,0, indicando que ambos os agregados tinham um formato mais cúbico.

Tabela 2. Propriedades físicas dos agregados de RCD.

Parâmetros físicos	Resíduos de construção e demolição							
	Concreto				Bloco cerâmico			
	19mm	12,5mm	6,3mm	4,8mm	19mm	12,5mm	6,3mm	4,8mm
Granulometria (%)	25	25	25	25	25	25	25	25
Densidade aparente (g/cm^3)	2,152				1,648			
Absorção (%)	8,37				23,98			
Índice de forma	1,89				1,71			

Posteriormente, foram realizadas as misturas de solo com os dois tipos de RCDs. Definiu-se assim quatro misturas, sendo solo + RCD_{CONCRETO} com teores, respetivamente, de 70% de solo e 30% de RCD e 60% de solo com 40% de RCD. E misturas de solo + RCD_{BLOCO CERÂMICO} também com teores de 70/30 e 60/40. Na sequência as misturas foram submetidas ao ensaio de compactação Proctor na energia intermediária. Paralelamente, para efeitos de análises também foi necessário realizar o ensaio de compactação no solo natural. As curvas de compactação obtidas neste estudo são apresentadas na Figura 2.

Observa-se que as curvas de compactação das misturas de solo com RCD de concreto, em relação a curva do solo natural, apresentaram aumento do peso específico aparente seco máximo e diminuição da umidade ótima, corroborando com resultados obtidos em outras pesquisas similares. Ou seja, devido a maior densidade dos agregados de concreto era esperado um aumento no peso específico e, com incremento de partículas maiores há diminuição na superfície específica resultando em queda nos valores de umidade ótima. Nas curvas de solo com RCD de bloco cerâmico, pelos mesmos motivos expostos, também se percebeu a diminuição nos valores de umidade ótima, contudo, devido a menor densidade dos agregados de alvenaria em relação as partículas de solo, ocorreu uma pequena diminuição no peso específico aparente seco máximo. Os dados de peso específico aparente seco máximo e, respectivas umidades ótimas são mostradas na Tabela 3.

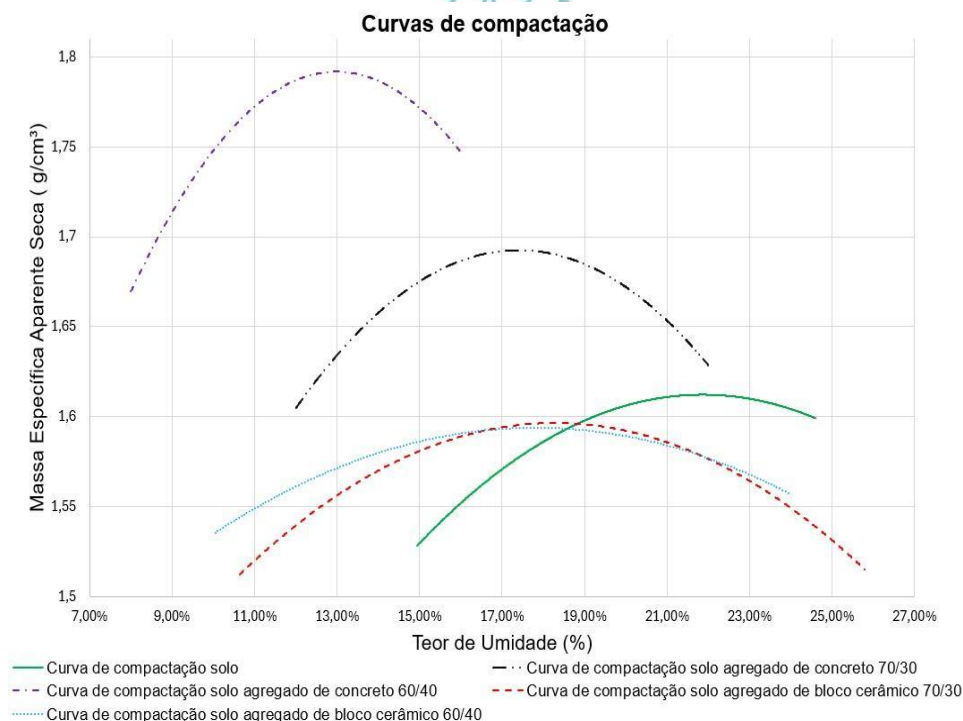


Figura 2. Curvas de compactação do solo natural e das misturas de solo + RCD.

Após as elaborações das curvas de compactação foram moldados os corpos de prova para o ensaio de Índice Suporte Califórnia (CBR). Foram moldados dois corpos de prova para cada tipo de mistura e também para o solo natural. Os cilindros com os materiais compactados na umidade ótima foram submersos por quatro dias e, posteriormente, levados para a ruptura na prensa do ensaio CBR. Nota-se que as expansões das misturas de solo com RCD tiveram poucas variações em relação à expansão do solo natural. Sendo que a menor expansão foi de 0,43%, ocorrendo na mistura de solo com RCD de concreto na proporção de 70/30. Em relação aos valores de CBR, todas as misturas ensaiadas indicaram melhorias nas propriedades de resistência. Contudo, os piores resultados foram obtidos na mistura de solo com RCD de concreto na proporção de 60/40, com um CBR de 14% e uma expansão de 1,65%, ou seja, valores muito próximos daqueles obtidos no solo natural. A melhor mistura ensaiada nesta pesquisa foi de solo com RCD de bloco cerâmico na proporção de 60/40. Essa mistura apresentou uma expansão de apenas 1% e um valor de CBR de 27%, atendendo os valores mínimos aceitáveis indicados pelas normativas para emprego do material em camadas de sub-base de rodovias.

Tabela 3. Resultados obtidos após os ensaios de compactação e CBR.

Tabela 5: Resultados obtidos após os ensaios de compactação e CBR.					
Dados	Misturas				Solo Natural
	Concreto		Bloco cerâmico		
	70/30	60/40	70/30	60/40	
Massa específica seca máxima (g/cm ³)	1,73	1,84	1,59	1,58	1,62
Umidade ótima (%)	17,2	12,4	18	17,8	21,8
CBR (%)	19,5	14,0	18,5	27,0	13,0
Expansão (%)	0,43	1,65	1,1	1,0	1,43

Buscando extrair maiores informações com os resultados obtidos foi feito uma análise da quebra de partículas dos agregados de RCD após o ensaio de compactação. Como dito anteriormente, cada ponto da curva de compactação foi obtido usando um corpo de prova distinto (amostra não trabalhada) garantindo assim que não ocorra um dano acumulado com a reuso do RCD na determinação de outros pontos da curva de compactação. A separação dos agregados de RCD do solo natural após a compactação foi realizada com auxílio de água e lavagem na peneira 2,36mm. Para ampliar as análises foram selecionados corpos de prova no ramo seco e úmido das curvas. Na Figura 3 são expostos gráficos que expõem a redução do tamanho dos agregados após a compactação em relação a granulometria original (antes da compactação).

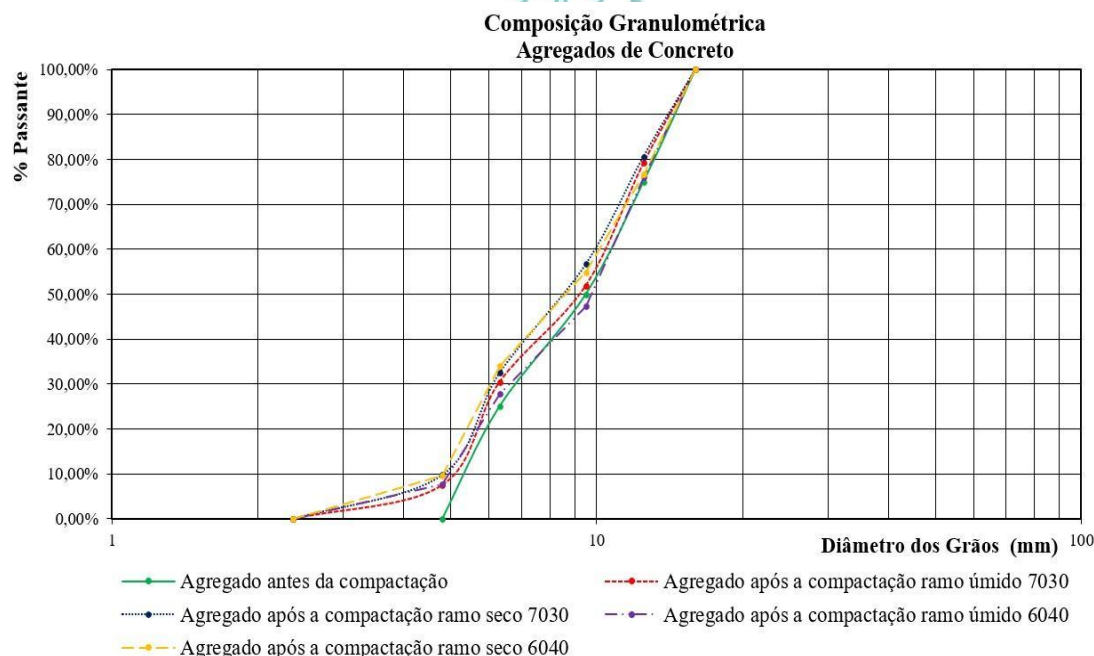


Figura 3. Curvas granulométricas do RCD de concreto (antes e após a compactação) no ramo seco e ramo úmido.

O deslocamento das curvas à esquerda indica uma redução no tamanho das partículas onde nota-se que em todas as misturas ocorreu quebra dos agregados de RCD. A análise da quebra de grãos é verificada com aumento do percentual passante em cada faixa da peneira. Observe que na mistura de 70/30 agregado de concreto os agregados menores que 9,5mm, tiveram aumento dos percentuais passantes para cada respectiva peneira usada, indicando que os RCD sofreram mais quebras. Parece existir uma tendência de quanto menor a partícula, maior o grau de fragmentação. Outro aspecto relevante é que a maior fragmentação das partículas ocorreu no ramo seco da curva de compactação, em comparação ao ramo úmido.

Analisando os dados das misturas 60/40 esperava-se que uma maior quantidade de agregado de RCD resultasse em maior fragmentação das partículas. Contudo, apesar de haver diminuição da granulometria, nota-se que houve menos quebra de partículas em relação ao teor anteriormente apresentado. Possivelmente, uma quantidade maior de agregados resulte num arranjo estrutural com contatos grãos a grãos que acaba por dissipar as tensões de compactação resultando em menos quebras. As partículas com diâmetros maiores que 9,5mm não tiveram variação significativa. No entanto, novamente os agregados menores, no ramo seco, tiveram uma quebra relevante. Neste teor de mistura, percebe-se que no ramo úmido, o excesso de água também contribuiu para absorver as tensões de compactação reduzindo a fragmentação dos agregados de concreto.

Na Figura 4, são mostrados os resultados da mistura com 70/30 com agregado de bloco cerâmico. Fica nítido que devido a menor resistência aos golpes do ensaio de compactação ocorreu uma maior fragmentação dos blocos cerâmicos. Em algumas peneiras, por exemplo, malha 6,3mm do ramo seco, o material resultante da fragmentação provocou um aumento de quase 20% do material passante na respectiva peneira em relação ao tamanho do agregado original. Também ocorreu maior quebra de agregado no ramo seco em relação ao ramo úmido.

Por fim, analisa-se a mistura de 60/40, obteve-se a mesma tendência de menor fragmentação, quando comparado ao teor 70/30, corroborando com os dados obtidos com os agregados de concreto no mesmo teor, ou seja, as misturas de solo + RCD usadas nestas pesquisas. Indicando assim que um maior percentual de RCD, promove menos quebra deste agregado. Julga-se que uma maior quantidade de agregado graúdo deva dissipar as tensões de compactação resultando em menos quebras de partículas. Novamente, observou-se maior fragmentação no ramo seco, destacando a intensidade das forças de compactação no estado seco em comparação ao úmido (Figura 4).

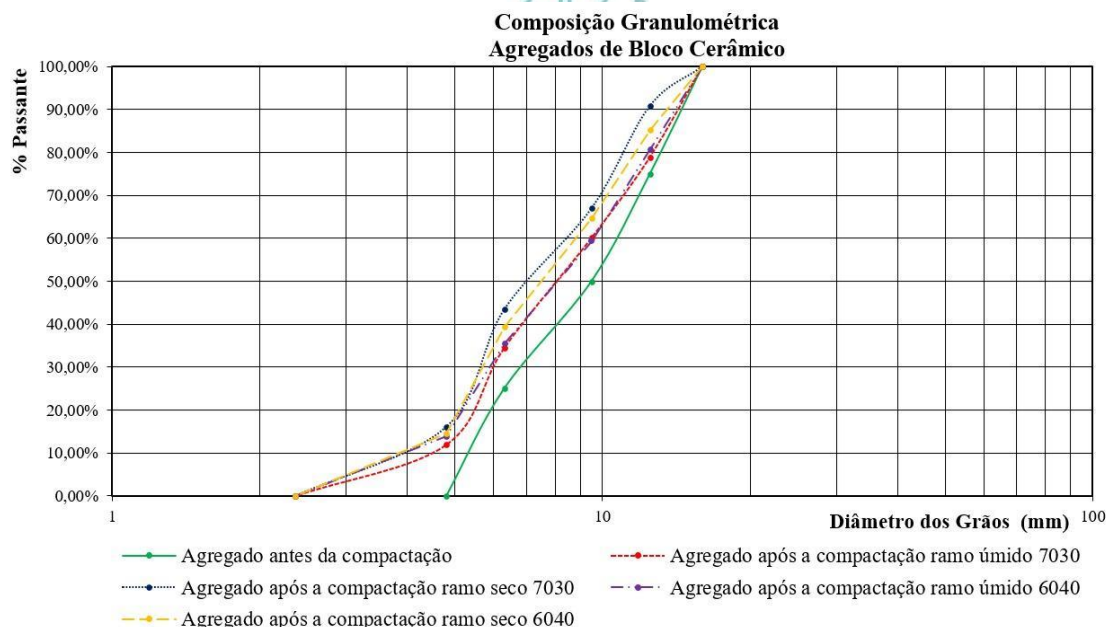


Figura 4. Curvas granulométricas do RCD de bloco cerâmico (antes e após a compactação) no ramo seco e ramo úmido.

5 CONCLUSÕES

Os acúmulos de resíduos provenientes de construção e demolição (RCD) é certamente um dos problemas ambientais mais graves enfrentados nos últimos anos. A reutilização deste material é essencial na busca de um mundo mais sustentável. Neste sentido, a substituição do agregado natural e o reaproveitamento do RCD misturado com o solo têm se mostrado uma alternativa eficaz e ambientalmente correta para emprego em obras rodoviárias.

Com a condução deste trabalho foi possível dirimir que o emprego de resíduos de bloco cerâmico e de concreto promovem melhorias nas propriedades de resistência quando adicionados ao solo. Em relação a caracterização física, o solo residual de granito apresentou valores típicos aos obtidos em outras pesquisas (Freitas et al., 2022). A densidade aparente do concreto e dos blocos cerâmicos foram compatíveis aos encontrados na literatura (Barreto & Amorim, 2020, Picanço, 2012). Sendo que a densidade aparente do concreto é 30% maior que a densidade aparente do bloco cerâmico. Ainda, a absorção do agregado de bloco cerâmico foi três vezes maior que a do concreto. Os valores de índice de forma ficaram abaixo de 2.0, indicando que ambos os agregados tinham um formato mais cúbico.

Analizando os resultados encontrados no ensaio de compactação notou-se que o incremento de RCDs provocou diminuição da umidade ótima em todas as misturas. No caso dos resíduos de blocos cerâmicos, devido a densidade deste material e aos teores empregados, houve uma pequena queda no valor do peso específico seco, em relação ao solo natural compactado. No caso do agregado de concreto houve aumento do peso específico seco obtido com o ensaio de compactação. Mostrou-se também que acontece uma quebra relevante de partículas após a compactação na energia intermediária. A fragmentação das partículas é maior no ramo seco indicando que o excesso de água influencia na propagação da energia de compactação. Ademais, as análises das curvas granulométricas indicaram que um maior percentual de RCD, promoveu menos quebra deste agregado. Julga-se que o arranjo estrutural com uma maior quantidade de agregado graúdo deva dissipar as tensões de compactação resultando em menos quebras de partículas. Dessa forma, a variação da granulometria deve ser considerada nos projetos geotécnicos.

Para o emprego das misturas de solo + RCD em obras de pavimentação, a mistura de solo com bloco cerâmico no teor de 60/40 foi a que apresentou melhor desempenho mecânico para reaproveitamento em sub-base de rodovias. A expansão obtida foi de 1% e o valor do CBR de 27%, indicando uma excelente alternativa sustentável e ambientalmente correta para reutilização de resíduos de construção e demolição em obras de engenharia.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pelos recursos disponibilizados para aquisição de equipamentos e pagamento de bolsas para os estudantes através do Edital 02/2024 PROP II Universal. Estende-se os agradecimentos a toda equipe do Laboratório de Geotecnia do Instituto Federal de Santa Catarina/Campus Florianópolis pelo suporte técnico e infraestrutura mobilizada.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2025). NBR 7182 - *Solo – Ensaio de compactação*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 9895 - *Solo — Ensaio de Índice de Suporte Califórnia (CBR)*. Rio de Janeiro.
- Brasil. (2002). *CONAMA: Resolução N°307*. Disponível em: <https://conama.mma.gov>. Acesso em abril 2025.
- Barreto, A.C., Amorim, E.F. (2020). *Avaliação do desempenho técnico de misturas com RCD para uso em obras de pavimentação*. Revista *HOLOS*, Ano 36, v.7, 1-20.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1998). DNER-ME 081: *Agregado graúdo -Determinação da densidade e da absorção*. Rio de Janeiro.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1998). DNER-ME 083: *Agregados - Análise granulométrica*. Rio de Janeiro.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2013). DNIT 164/2013-ME: *Solos – Compactação utilizando amostras não trabalhadas*. Rio de Janeiro.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2020). DNIT 425/2020-ME: *Agregados - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro*. Rio de Janeiro.
- Freitas, H.S., Pinheiro, I.F., Silva, F.W.L., Ferreira, M.R.P. (2022). *Estudo comparativo entre misturas de solo-RCD e solo-seixo para aplicação na pavimentação da cidade de Manaus*. *Brazilian Journal of Development*, Curitiba, v.8, n.11, p. 74040-74055.
- Leal, A. 2021. *Resíduos da Construção Civil: Uma revisão sobre as possibilidades de Aplicação*. Disponível em: <https://periodicorease.pro.br/rease/article/view/1385/601>. Acesso em maio de 2025.
- Palma, J.V.M., Silva, A.K.S., Silva, F.K, Schuch, F.S. (2024). *Alterações provocadas pela adição de cal e fibra PET num solo argiloso quanto à: resistência à compressão, tração e compressibilidade*. XXI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Balneário Camboriú/SC.
- Picanço, H.M. (2012). *Incorporação de resíduo cerâmico a um solo argiloso superficial de Manaus visando seu emprego em pavimentos*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Amazonas. Disponível em: <https://tede.ufam.edu.br/handle/tede/2364>. Acesso em maio de 2025.
- Santana, F. 2014. *Estudos sobre misturas de agregados reciclados de resíduos da construção civil com solos para utilização em pavimentos* Disponível em: <https://ri.ufs.br/handle/riufs/5004>. Acesso em maio de 2025.