

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

KAMILA BAZONI LUNZ

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE APROVEITAMENTO GEOTÉCNICO DA
LAMA DE BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS EM CAMADAS
ESTRUTURAIS DE PAVIMENTOS**

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2021**

KAMILA BAZONI LUNZ

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE APROVEITAMENTO GEOTÉCNICO DA
LAMA DE BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS EM CAMADAS
ESTRUTURAIS DE PAVIMENTOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Heraldo Nunes Pitanga

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2021**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade Federal de
Viçosa - Campus Viçosa

T

L964a
2021
Lunz, Kamila Bazoni, 1996-
Avaliação do potencial de aproveitamento geotécnico da lama de
beneficiamento de rochas ornamentais em camadas estruturais de
pavimentos / Kamila Bazoni Lunz. - Viçosa, MG, 2021.
65 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Heraldo Nunes Pitanga.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa. Inclui
bibliografia.

1. Pavimentos. 2. Reaproveitamento (Sobras, refugos, etc.).
3. Rochas ornamentais - Propriedades mecânicas. 4. Construção civil -
Aspectos ambientais. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento
de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

CDD 22. ed. 625.8

Bibliotecário(a) responsável: Renata de Fatima Alves CRB6 287

KAMILA BAZONI LUNZ

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE APROVEITAMENTO GEOTÉCNICO DA
LAMA DE BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS EM CAMADAS
ESTRUTURAIS DE PAVIMENTOS**

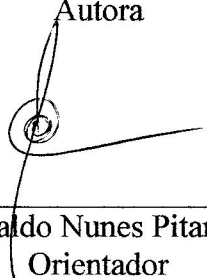
Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 11 de março de 2021.

Assentimento:


Kamila Bazoni Lunz

Autora


Heraldo Nunes Pitanga
Orientador

*Dedico este trabalho
à minha família, meu suporte
em todos os momentos.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por tudo o que Ele faz em minha vida, pela oportunidade de realizar esse mestrado na UFV e por concluí-lo com saúde, neste difícil momento de pandemia.

Aos meus pais, por serem meu suporte e não medirem esforços para me ajudar, por todo carinho, orientação, paciência e amor dedicados a mim. À minha irmã, por todas as brincadeiras, pelo apoio durante a escrita deste trabalho e por fazer o melhor café nos momentos de cansaço. Aos meus avós e familiares, por todas as orações.

Ao Professor Heraldo Nunes Pitanga, por ser mais uma vez meu orientador, pela sensibilidade e cuidado na condução dessa orientação, por toda exigência, disponibilidade e suporte nesses dois anos.

À Sara Reis Rodrigues, por ser uma parceira de laboratório imbatível, pela energia e disposição empregadas no desenvolvimento dessa pesquisa.

Ao Professor Klaus Henrique de Paula Rodrigues, pelos ensinamentos, orientações e por ser o responsável pelo retorno dos Ensaios de Módulo de Resiliência ao Laboratório de Engenharia Civil da UFV. Ao Professor Roberto Aguiar dos Santos, pela supervisão durante o estágio em ensino e a monitoria, por me permitir vivenciar as alegrias e os desafios de lecionar.

Ao Professor Paulo Sérgio de Almeida Barbosa, por todas as aulas, orientações, sugestões e conversas. Pela oportunidade de estagiar em sua disciplina e por me ensinar que a busca por novas alternativas e metodologias de ensino deve ser uma constante na vida dos professores.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFV, por todo o conhecimento transmitido, pelo empenho, disposição e brilho nos olhos ao ensinar.

A todos do Laboratório de Engenharia Civil e do Departamento de Engenharia Civil, em especial, Dr. Giovani, Dedé, Marcelo, Anderson e Carlos, pela solicitude e contribuição em diversos momentos desta pesquisa, pelas conversas e amizade.

Aos meus colegas da pós-graduação, em especial, Mateus Henrique, Déborah, Bruno e Géssica, por todo companheirismo, amizade e ajuda, fazendo os meus dias de laboratório muito mais fáceis e divertidos.

À Associação de Desenvolvimento Ambiental do Mármore e Granito, pelo fornecimento dos resíduos utilizados nesta pesquisa. Ao Departamento de Física, ao Departamento de Solos e ao Laboratório de Materiais de Construção, pela realização de parte dos ensaios propostos.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Civil, pela estrutura e ensino de excelência, que além de me tornar Engenheira Civil, me tornou mestre.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

LUNZ, Kamila Bazoni, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, março de 2020. **Avaliação do potencial de aproveitamento geotécnico da lama de beneficiamento de rochas ornamentais em camadas estruturais de pavimentos.** Orientador: Heraldo Nunes Pitanga.

Esta pesquisa teve como objetivo principal analisar o comportamento geotécnico da Lama de Beneficiamento de Rochas Ornamentais (LBRO) de origem granítica aplicada ao solo, avaliando-se o potencial de aproveitamento técnico desse resíduo na composição de camadas estruturais de pavimentos asfálticos, através da influência da porcentagem, em massa, do resíduo nas amostras e o efeito do tempo de cura em determinadas propriedades de engenharia. Para isso, foram estudados solos com características consideravelmente opostas, sendo um arenoso e outro argiloso. Dessa forma, foram realizados ensaios de caracterização geotécnica dos materiais, ensaios químicos, mineralógicos, morfológicos, ensaios de compactação e ensaios mecânicos. O Solo BR-120, argiloso, apresentou a maior massa específica das amostras estudadas, enquanto o Solo VILA, arenoso, a menor. O resíduo apresentou massa específica intermediária e as massas específicas das misturas se aproximam de uma ponderação das massas específicas dos solos de origem e da LBRO. A incorporação da LBRO nos solos implicou em queda nos índices de plasticidade, além de fazer com que as misturas de solo arenoso apresentassem granulometrias mais finas e as misturas de solo argiloso, frações granulares, segundo as porcentagens de resíduo. As análises químicas e mineralógicas apresentaram, para o Solo BR-120, quartzo, caulinita e illita. No solo VILA, destacou-se a presença de quartzo, bementita, muscovita e portlandita, enquanto na LBRO, notou-se a presença de quartzo e calcita. Na mistura 25% Solo BR + 75% LBRO, observou-se o consumo de caulinita, e na mistura 25% Solo VILA+ 75% LBRO, o mineral etringita destacou-se. Nos ensaios de Resistência à Compressão Simples (RCS) e Resistência à Tração por Compressão Diametral (RTCD) não foram verificados incrementos de resistência em relação aos solos puros apenas na amostra de 75% Solo BR-120 + 25% LBRO. No ensaio CBR, a amostra 50% Solo BR-120 + 50% LBRO foi a única, dentre as compostas por Solo BR-120, a apresentar aumento do índice CBR, enquanto todas as amostras de mistura do Solo VILA apresentaram desempenhos superiores ao do solo puro. Todas as misturas e solos puros apresentaram Expansão inferior a 1%, sendo viáveis apenas em camadas de reforço de subleito, enquanto a amostra de LBRO alcançou uma expansão superior a 3%, inviável em quaisquer camadas. Os ensaios de Módulo de Resiliência apresentaram resultados ligeiramente inferiores para as

misturas com 75% de LBRO, em relação aos solos, os quais podem ser considerados semelhantes, tendo em vista o benefício ambiental da substituição parcial do solo por um resíduo. Dessa forma, considera-se viável a substituição parcial do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais, aplicando-o à camada de reforço de subleito.

Palavras-chave: Lama de Beneficiamento de Rochas Ornamentais (LBRO). Aproveitamento de resíduos. Pavimento asfáltico. Propriedades mecânicas. Construção Civil sustentável.

ABSTRACT

LUNZ, Kamila Bazoni, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, March, 2020. **Evaluation of the potential of geotechnical use of Sludge from Ornamental Stones Processing in pavement structural layers.** Adviser: Heraldo Nunes Pitanga.

The main objective of this research was to analyze the geotechnical behavior of Sludge from Ornamental Stones Processing (SOSP) of granite origin applied to pure soil, evaluating the potential for technical utilization of this waste in the composition of structural layers of asphaltic pavements, through the influence of the percentage, by mass, of the waste in the samples and the effect of curing time on certain engineering properties. For this, soils with considerably opposite characteristics were studied: a sandy and a clayey. Thus, geotechnical characterization tests of the materials, chemical, mineralogical, morphological, compaction and mechanical tests were performed. The BR-120 soil, clayey, had the highest specific weight of the samples studied, while the VILA soil, sandy, had the lowest. The waste presented intermediate specific weight and the specific weights of the mixtures approximate a weighting of the specific weights of the original soils and the SOSP. The incorporation of SOSP into the soils implied a decrease in plasticity indexes. In addition, increasing the percentage of residue caused the sandy soil mixtures to have finer particle sizes and the clay soil mixtures to have granular fractions. The mineralogical analyses showed, for the BR-120 soil, quartz, kaolinite and illite. In the VILA soil, the presence of quartz, bementite, muscovite and portlandite stood out, while in the SOSP, the presence of quartz and calcite was noted. In the mixture 25% BR Soil + 75% SOSP, the consumption of kaolinite was observed, and in the mixture 25% VILA Soil + 75% SOSP, the ettringite mineral stood out. The pure soils showed acidic pH, while all samples with the presence of SOSP showed alkaline pH. In the compaction tests, the BR-120 soil mixtures showed higher moisture content and lower maximum dry unit weight, according to the increasing percentage of waste, while in the VILA soil mixtures, increasing percentages of SOSP showed the opposite. In the RCS and RTCD tests, there were no strength increments compared to the pure soils only in the 75% BR-120 Soil + 25% SOSP sample. In the CBR test, the sample 50% BR-120 Soil + 50% SOSP was the only one, among those composed of BR-120 Soil, to show an increase in the CBR index, while all the VILA Soil mixture samples showed better performances than the pure soil. All mixtures and pure soils showed an expansion lower than 1%, being viable only in subgrade layers reinforcement, while the SOSP sample reached an expansion higher than 3%, unfeasible in any layers. The Resilient Modulus tests

showed slightly lower results for the mixtures with 75% SOSP, compared to the soils, which can be considered similar, in view of the environmental benefit of the partial replacement of soil by waste. Thus, the partial replacement of the sludge from ornamental stones processing, applying it to the subgrade layer reinforcement, is considered feasible.

Keywords: Sludge from Ornamental Stones Processing (SOSP). Residue utilization. Asphalt Pavement. Mechanical properties. Sustainable Civil Construction.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

CAPÍTULO 2: PARÂMETROS MECÂNICOS DE DOIS TIPOS DISTINTOS DE SOLO MISTURADOS COM LAMA DE BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS

Figura 1 – Jazida do solo BR-120	23
Figura 2- Jazida do Solo VILA	23
Figura 3 – Vista aérea do aterro da ADAMAG.....	24
Figura 4 - Equipamento triaxial cíclico para ensaio MR.....	26
Figura 5 - Curvas granulométricas dos materiais investigados	27
Figura 6 - DRX das amostras de 100 %Solo BR-120, 100% LBRO e mistura 25% Solo BR-120 + 75% LBRO	29
Figura 7 - DRX das amostras de 100% Solo VILA, 100%LBRO e mistura de 25% Solo VILA+ 75% LBRO	30
Figura 8 - MEV das amostras avaliadas	31
Figura 9 - Curvas de compactação Proctor Normal de amostras dos materiais investigados ..	34
Figura 10 - Resultados de RCS das amostras com Solo BR-120	35
Figura 11 - Resultados de RCS das amostras com solo VILA	37
Figura 12 - Resultados de RTCD das amostras com solo BR-120.....	39
Figura 13 - Resultados de RTCD de amostras com solo VILA	41
Figura 14 - Resultados do ensaio CBR das amostras com solo BR-120.....	43
Figura 15 - Resultados do ensaio CBR das amostras com solo VILA	46
Figura 16 – Superfície de resposta do modelo composto para 100% BR-120.....	49
Figura 17 – Superfície de resposta do modelo composto para 25% BR-120 + 75% LBRO....	49
Figura 18 – Superfície de resposta do modelo composto para 100% VILA.....	51
Figura 19 – Superfície de resposta do modelo composto para mistura de 25% Solo VILA +75% LBRO	52

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO GERAL

Tabela 1 - Distribuição (por região e estados) da produção de rochas ornamentais no Brasil. 15

CAPÍTULO 2: PARÂMETROS MECÂNICOS DE DOIS TIPOS DISTINTOS DE SOLO MISTURADOS COM LAMA DE BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS

Tabela 1 - Proporções das amostras da pesquisa.....	24
Tabela 2 - Ensaio de caracterização geotécnica dos materiais e suas normas regulamentadoras	25
Tabela 3 - Ensaio mecânicos e respectivas normas	26
Tabela 4 - Dados da caracterização geotécnica das amostras dos materiais investigados	27
Tabela 5 - Classificação das amostras de materiais investigados.....	28
Tabela 6 - Resultados do ensaio FRX	32
Tabela 7 - Resultados do ensaio de pH.....	33
Tabela 8 - Resultados do ensaio de compactação Proctor Normal de amostras dos materiais investigados	33
Tabela 9 - Resultados de RCS das amostras com solo BR-120	35
Tabela 10 - Resultados de RCS das amostras com solo VILA	37
Tabela 11 - Resultados de RTCD das amostras com solo BR-120	39
Tabela 12 - Índices físicos das amostras com Solo BR-120.....	40
Tabela 13 - Resultados de RTCD para amostras com solo VILA.....	41
Tabela 14 - Índices físicos das amostras com solo VILA	42
Tabela 15 - Resultados do ensaio CBR para amostras com solo BR-120.....	43
Tabela 16 - Resultados do ensaio CBR para amostras com solo VILA	45
Tabela 17 - Resultados do ensaio MR para as amostras como solo BR-120	48
Tabela 18 - Parâmetros do modelo composto para as amostras com solo BR-120.....	48
Tabela 19 - Resultados do ensaio MR para as amostras com solo VILA	50
Tabela 20 - Parâmetros do modelo composto para as amostras com Solo VILA	51

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	INTRODUÇÃO GERAL	13
1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Considerações iniciais	13
1.2	Justificativa	15
2	OBJETIVOS	16
2.1	Objetivo principal.....	16
2.2	Objetivos específicos	16
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	17
CAPÍTULO 2	PARÂMETROS MECÂNICOS DE DOIS TIPOS DISTINTOS DE SOLO MISTURADOS COM LAMA DE BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS.....	20
1	INTRODUÇÃO	20
2	MATERIAIS E MÉTODOS	22
2.1	Materiais.....	22
2.1.1	Solos.....	22
2.1.2	Resíduo.....	23
2.2	Métodos.....	24
2.2.1	Considerações iniciais	24
2.2.2	Ensaio de caracterização geotécnica.....	25
2.2.3	Ensaio químicos, mineralógicos e morfológicos	25
2.2.4	Ensaio de compactação e mecânicos	25
3	RESULTADOS E DISCUSSÕES	27
3.1	Caracterização geotécnica dos materiais e misturas solo-resíduo.....	27
3.2	Ensaio químicos, mineralógicos e morfológicos	29
3.3	Ensaio de compactação.....	33
3.4	Ensaio de Resistência à Compressão Simples	35
3.4.1	Solo BR-120.....	35
3.4.2	Solo VILA	37
3.5	Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral	38
3.5.1	Solo BR-120.....	38
3.5.2	Solo VILA	40

3.6	Ensaio CBR	43
3.6.1	Solo BR-120.....	43
3.6.2	Solo VILA	45
3.7	Ensaio de Módulo de Resiliência	47
3.7.1	Solo BR-120.....	47
3.7.2	Solo Vila.....	50
4	CONCLUSÃO	53
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	54
CAPÍTULO 3 CONCLUSÕES GERAIS.....		61
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	65

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO GERAL

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

O transporte rodoviário compõe 61% da malha viária brasileira (CNT, 2017a). Em 2017, o Brasil contava com cerca de 1,7 milhões de quilômetros de estradas, dentre as quais apenas 12,4% eram pavimentadas, e dessas, 62,33% foram classificadas com base em seu estado geral como regular, ruim ou péssima (CNT, 2019a). Em relação aos outros países, nota-se que a densidade da malha rodoviária pavimentada do Brasil é baixa, sendo cerca de 15 vezes menor que a da China, 31 vezes menor que a dos EUA e 106 vezes menor que a do Japão (CNT, 2017b).

Segundo a Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2019b), apesar da baixa densidade de estradas e da qualidade que estas apresentam, o segmento rodoviário nacional é responsável pelo transporte de 61,1% do total de cargas que circulam no país, fazendo com que o Brasil planeje executar, até o ano de 2025, aproximadamente 7,8 mil km em obras rodoviárias, sendo cerca de 2,5 mil km em construção de novas estradas (EPL, 2018).

Na engenharia de pavimentação rodoviária, segundo Bernucci *et al.* (2008), existem dois tipos de pavimentos, os asfálticos e os rígidos. Os pavimentos asfálticos, predominantes no Brasil, são constituídos por materiais granulares e betuminosos divididos em diversas camadas que possuem um comportamento flexível uma vez que a camada superior é responsável por resistir diretamente às ações do tráfego e transmiti-las, de forma atenuada, às camadas inferiores. Já os pavimentos rígidos são caracterizados por possuírem uma laje de concreto de cimento Portland como camada de revestimento, a qual é responsável pela absorção de praticamente todos os esforços aos quais é submetida, fazendo com que as demais camadas desse pavimento sejam pouco exigidas pelas solicitações mecânicas devidas ao tráfego de veículos (DNIT, 2006).

Novos materiais têm sido estudados visando sua aplicação em camadas estruturais do pavimento, tais como escória de aciaria (COSTA, SANTOS, 2020), mistura de escória de aciaria e cinza volante (PHUMMIPHAN *et al.*, 2018), resíduos de construção e demolição (RCD) (SOUSA, BALDUINO, 2019), plástico reciclado de polietileno tereftalato (HAFEZ *et*

al., 2018) e mistura de solo, cimento e pó de pedra (GUIDELI *et al.*, 2018).

Outro material que tem sido alvo constante de novas pesquisas é a Lama de Beneficiamento de Rochas Ornamentais (LBRO), em virtude do grande volume anual gerado pelas indústrias do setor de rochas ornamentais, visando sua aplicação em camadas estruturais do pavimento (MENEGUETE, BATISTA, CESCINETTO JÚNIOR, 2018; SANTOS, 2019). Desses materiais, percebe-se que grande parte corresponde a resíduos provenientes de diversas atividades econômicas, e uma vez que o setor de pavimentação demanda grandes volumes de materiais, as obras viárias podem se tornar um destino favorável aos mesmos.

Segundo a Instrução Normativa Nº 11 do Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IEMA) (ESPÍRITO SANTO, 2016), a LBRO é um resíduo sólido decorrente do processo de beneficiamento de rochas ornamentais, classificado segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004) como não perigoso, Classe II, podendo ser não inerte (A) ou inerte (B).

O parque industrial brasileiro do setor de rochas ornamentais está distribuído em todas as regiões do país (Tabela 1) e é composto por cerca de dez mil empresas, responsáveis pela produção de 9 milhões de toneladas de rochas ornamentais em 2019, sendo o estado do Espírito Santo destaque nessa atividade, por contemplar 81% da capacidade de serragem nacional de rochas e ser responsável por cerca de 70% a 80% das exportações brasileiras (ABIROCHAS, 2018, 2019, 2020).

O Brasil é considerado o quinto maior gerador de LBRO, contribuindo com cerca de 5,4% da produção mundial desse resíduo, depois da China (32,2%), Índia (16,1%), Turquia (8,1%) e Irã (5,7%) (MONTANI, 2018), tendo, portanto, participação direta nas 152 Mt de rochas ornamentais produzidas, responsável pela movimentação de aproximadamente US\$ 20,6 bilhões (ABIROCHAS, 2018).

Os elementos que compõem a LBRO variam em razão do tipo de tear responsável pelo desdobramento dos blocos de rochas em chapas. O tear convencional, responsável por cerca de 56% da capacidade de produção nacional, gera resíduos compostos por água, pó de pedra, granalha de aço e cal, enquanto o tear diamantado, responsável pelos outros 44%, gera resíduos compostos apenas por água e pó de pedra (ABIROCHAS, 2019).

A Instrução Normativa Nº 11 do Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IEMA) (ESPÍRITO SANTO, 2016) estabelece critérios e procedimentos para a deposição da LBRO, a qual deve ser realizada em aterros específicos, de forma a possibilitar seu uso futuro, segundo princípios de engenharia. Entretanto, ainda é recorrente a destinação dos resíduos de maneira incorreta, sendo estocados em locais a céu aberto, lançados em rios ou lagoas de decantação, sem nenhum tipo de tratamento prévio.

Tabela 1 - Distribuição (por região e estados) da produção de rochas ornamentais no Brasil

Região	UF	Produção (t)	Tipo de Rocha
Sudeste	ES	3.100.000	Granito e mármore
	MG	1.900.000	Granito, pegmatito, ardósia, quartzito foliado, quartzito maciço pedra-sabão, pedra-talco, serpentinito, mármore e basalto
	RJ	200.000	Granito, mármore e pedra Paduana (gnaisse)
	SP	80.000	Granito, quartzito foliado
Sul	PR	200.000	Granito e mármore
	RS	140.000	Granito, basalto e quartzito
	SC	120.000	Granito, ardósia e mármore
Centro-Oeste	GO	200.000	Granito, quartzito foliado, serpentinito
	MT	50.000	Granito
	MS	60.000	Granito e mármore
Nordeste	BA	1.000.000	Granito, pegmatito, mármore, travertino, arenito e quartzito maciço
	CE	1.000.000	Granito, pegmatito, calcário e pedra Cariri (calcário plaqueado)
	PB	450.000	Granito e conglomerado
	PE	140.000	Granito e quartzito
	AL	160.000	Granito
	RN	200.000	Mármore e granito
	PI	100.000	Pedra Morisca (arenito arcossiano) e ardósia
Norte	RO	50.000	Granito
	RR	10.000	Granito anortosito
	PA	30.000	Granito
	TO	10.000	Granito, chert (quartzito) e serpentinito
Total Brasil		9.200.000	

Fonte: Adaptado de ABIROCHAS (2019)

Com o objetivo de dar vazão a esses resíduos, visto que a Lama de Beneficiamento de Rochas Ornamentais (LBRO) corresponde a cerca de 20% a 30% do volume inicial dos blocos rochosos (FREIRE, MOTTA, 1995; GONÇALVES, 2000; CAMPOS *et al.*, 2014), inúmeras pesquisas têm sido desenvolvidas. O setor de construção civil realiza pesquisas avaliando a utilização do resíduo incorporado à composição de materiais com base cimentícia (LOKESHWARI, JAGADISH, 2016; GAUTAM *et al.*, 2017; ASADI SHAMSABADI *et al.*, 2018; AMARAL *et al.*, 2020), a elementos de construção com base cerâmica (GADIOLI *et al.*, 2019; SANT'ANA *et al.*, 2019) e no processo de composição de materiais, como tintas PVA e vidros (LOPES *et al.*, 2019; GOMES *et al.*, 2020).

1.2 Justificativa

Segundo a Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais (ABIROCHAS, 2020), estima-se que o Brasil tenha gerado cerca de 3,38 milhões de toneladas desse resíduo em 2019, devido à sua importante participação nos mercados interno e externo. Concomitante

a essa realidade, Almeida *et al.* (2018) ressaltam o grande volume de material demandado nas obras de pavimentação, visto que, para uma estrutura típica de uma via urbana com 7,5 metros de largura, é necessário um volume superior a 2250 m³/km de material virgem para a execução de 30 cm de base de brita graduada compactada.

Associado ao planejamento de novas obras rodoviárias, o quantitativo de resíduos gerado anualmente e a demanda de material necessária nas obras de pavimentação convergem para a necessidade de estudar a utilização desses resíduos nas camadas estruturais do pavimento. No cenário ambiental, a viabilização da aplicação da LBRO em grande escala indicaria uma massiva redução do passivo ambiental gerado pelo setor de beneficiamento de rochas ornamentais, ao estimular o correto descarte do resíduo e reduzir a área de deposição do material em aterros.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo principal

O objetivo principal deste trabalho é analisar o comportamento geotécnico da Lama de Beneficiamento de Rochas Ornamentais (LBRO), visando avaliar o potencial de aproveitamento técnico desse resíduo na composição de camadas estruturais de pavimentos asfálticos.

2.2 Objetivos específicos

Com a finalidade de alcançar o objetivo principal, foram definidos os seguintes objetivos secundários:

- ✓ Verificar o efeito da percentagem em massa do resíduo LBRO em um dado conjunto de propriedades de engenharia, visando a aplicação em pavimentação, considerando seu emprego isolado ou em combinação com solos;
- ✓ Verificar o efeito do tempo de cura nas propriedades de engenharia dos materiais investigados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, J.; ROSA, F. D.; PANDOLFO, A.; BERTICELLI, R.; BRUM, E. M.; MARTINS, M. S. Estudo de viabilidade econômica do uso do agregado de RCD em pavimentação de vias urbanas. **Revista de Engenharia Civil**, Braga (Portugal), n. 54, p. 16-25, 26 mar. 2018. Disponível em: <http://www.civil.uminho.pt/revista/artigos/n54/Pag.16-25.pdf>. Acesso em: 09 jan. 2021.

AMARAL, L. F.; DELAQUA, G. C. G.; NICOLITE, M.; MARVILA, M. T.; AZEVEDO, A. R. G.; ALEXANDRE, J.; VIEIRA, C. M. F.; MONTEIRO, S. N. Eco-friendly mortars with addition of ornamental stone waste-A mathematical model approach for granulometric optimization. **Journal of Cleaner Production**, v. 248, p. 119283, 2020.

ASADI SHAMSABADI, E.; GHALEHNOVI, M.; BRITO, J.; KHODABAKHSHIAN, A. Performance of Concrete with Waste Granite Powder: The Effect of Superplasticizers. **Applied Sciences**, v.8, n. 10, p.1808, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS (ABIROCHAS). **Perfil das Atividades Setoriais no Brasil**. São Paulo. 2019. Disponível em: <http://abirochas.com.br>. Acesso em: 27 jun. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS (ABIROCHAS). **Cenário Mundial**. São Paulo. 2018. Disponível em: <http://abirochas.com.br>. Acesso em: 27 jun. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS (ABIROCHAS). **Síntese das Exportações e Importações Brasileiras de Rochas Ornamentais no 1º Trimestre de 2020**. São Paulo. 2020. Disponível em: <http://abirochas.com.br>. Acesso em: 27 jun. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Resíduos sólidos – Classificação**. Norma técnica NBR 10004. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 71 p.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica: Formação básica para Engenheiros**. Edição 01. Rio de Janeiro, 2008.

CAMPOS, A. R. de; RIBEIRO, R. C. C.; CASTRO, N. F.; AZEVEDO, H. C. A.; CATTABRIGA, L. Resíduos: tratamento e aplicações industriais. *In*: CAMPOS, A. R de; RIBEIRO, R. C. C; CASTRO, N. F; AZEVEDO, H. C. A.; CATTABRIGA, L. **Tecnologia de Rochas Ornamentais: Pesquisa, Lavra e Beneficiamento**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2014. cap. 9, p. 434-491. ISBN 434-491.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). **Anuário CNT do Transporte: estatísticas consolidadas**. Brasília: CNT, 2019a. 237 p.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). **Transporte em Números**. Brasília: CNT, 2019b. 29 p.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). **Transporte Rodoviário: desempenho do setor, infraestrutura e investimentos**. Brasília: CNT, 2017a. 67 p.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). **Transporte Rodoviário**: por que os pavimentos das rodovias do Brasil não duram? Brasília: CNT, 2017b. 160 p.

COSTA, S. N.; SANTOS, R. O. G. Utilização da escória de aciaria em combinação com solo para uso em camadas de pavimentação rodoviária. **Engineering Sciences**, v.8, n.1, p.57-66, 2020.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Manual de Pavimentação**. 3 ed. Rio de Janeiro, 2006. 274 p.

EMPRESA DE PLANEJAMENTO E LOGÍSTICA S.A. (EPL). **Planejamento Nacional de Logística - PNL 2025**. Brasília, 2018. Disponível em: <https://www.epl.gov.br/plano-nacional-de-logistica-pnl>. Acesso em: 24 jun. 2020.

ESPÍRITO SANTO, Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos - IEMA. **Instrução Normativa N°. 11 de 11 de outubro de 2016**. Disponível em: <https://iema.es.gov.br/Media/iema/CQAI/FIGURAS/CRSS/IN%20IEMA/IN%20N%C2%BA%2000011%202016.pdf>. Acesso em: 06 de jun. 2020.

FRANÇA, B. R.; AZEVEDO, A. R. G.; MONTEIRO, S. N.; GARCIA FILHO, F. C.; MARVILA, M. T.; ALEXANDRE, J.; ZANELATO, E. B. Durability of Soil-Cement Blocks with the Incorporation of Limestone Residues from the Processing of Marble. **Materials Research**, São Carlos, v. 21, n. 1, p.1-6, 2018.

FREIRE, A. S.; MOTTA, J. F. M. Potencialidades para o aproveitamento econômico do rejeito da serragem do granito. **Revista Rochas de Qualidade**. São Paulo. Ano XXV. Edição 123, p.98-108, jul./ago. 1995.

GADIOLI, M. C. B.; PONCIANO, V. M.; BESSA, B. H. R.; CAMARGO, J. L.; PIZETA, P. P. Characterization of Ornamental Stones Wastes for Use in Ceramic Materials. **Materials Science Forum**, Suíça, v. 958, p. 129-134, jun. 2019.

GAUTAM, P. K.; KALLA, P.; JETHOO, A. S.; HARSHWARDHAN, S. C. Dimensional Stone Waste Characterization in Rajasthan and Suggesting their possible Remedies. **International Journal On Emerging Technologies**. p. 40-42. jan. 2017.

GOMES, V. R.; BABISK, M. P.; VIEIRA, C. M. F.; SAMPAIO, J. A.; VIDAL, F. W. H.; GADIOLI, M. C. B. Ornamental stone wastes as an alternate raw material for soda-lime glass manufacturing. **Materials Letters**, v. 269, p. 127579-127581, jun. 2020.

GONÇALVES, J. P. **Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) como adição para produção de concretos**. 2000. 120f. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2000.

GUIDELI, L. C.; PERES, C. V. R.; ILDEFONSO, J. S.; LUKIANTCHUKI, J. A. Avaliação do Comportamento de Misturas Alternativas de Solo, Cimento e Pó de Pedra para Aplicação em Pavimentação. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, XIX, 2018, Salvador. **Anais eletrônicos...** Salvador: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos, 2018, p. 583–592. Disponível em: <https://www.abms.com.br/anais-cobramsegsbmrgeojovem/>. Acesso em: 26 jun. 2020.

HAFEZ M.; MOUSA R.; AWED A.; EL-BADAWY S. Soil Reinforcement Using Recycled

Plastic Waste for Sustainable Pavements. *In: International Congress and Exhibition "Sustainable Civil Infrastructures: Innovative Infrastructure Geotechnology"*. Springer, Cham, p. 7-20, 2018.

LOKESHWARI, M.; JAGADISH, K. S. Eco-friendly Use of Granite Fines Waste in Building Blocks. *Procedia Environmental Sciences*, v. 35, p. 618-623, 2016.

LOPES, M. M. S.; ALVARENGA, R. C. S. S.; PEDROTI, L. G.; RIBEIRO, J. C. L.; CARVALHO, A. F.; CARDOSO, F. P.; MENDES, B. C. Influence of the incorporation of granite waste on the hiding power and abrasion resistance of soil pigment-based paints. *Construction And Building Materials*, v. 205, p. 463-474, abr. 2019.

MENEGUETE, D. S.; BATISTA, L. C.; CESCINETTO JÚNIOR, W. A. Aproveitamento de resíduos gerados no corte de rochas ornamentais em pavimentação asfáltica para melhoramento de base. *Revista Mosaicum*, v. 27, p. 225-236, 2018.

MONTANI, C. *XXVIII Rapporto Marmo e Pietre nel Mondo 2018*. Aldus: Carrara (IT), 2018. 263 p.

PHUMMIPHAN, I.; HORPIBULSUK, S.; RACHAN, R.; ARULRAJAH, A.; SHEN, S.-L.; CHINDAPRASIRT, P. (2018). High calcium fly ash geopolymer stabilized lateritic soil and granulated blast furnace slag blends as a pavement base material. *Journal of Hazardous Materials*, v. 341, p. 257–267, 2018.

REIS, A. S.; DELLA-SAGRILLO, V. P.; VALENZUELA-DIAZ, F. R. Analysis of Dimension Stone Waste Addition to the Clayey Mass Used in Roof Tile Production. *Materials Research*, v. 18, p. 63-69, 2015.

SANT'ANA, M. A. K.; GADIOLI, M. C. B.; BABISK, M. P.; VIEIRA, C. M. F. Use of Waste of Ornamental Stone in Ceramic Mass Incorporation in Brazil. *Green Materials Engineering*, [s.l.], p. 283-291, 2019.

SANTOS, N. M. **Uso de rejeito do beneficiamento de granito para substituição parcial de um solo em camadas de pavimentação / Natália Medeiros dos Santos**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

SILVA, K. R.; CAMPOS, L. F. A.; SANTANA, L. N. L. Use of Experimental Design to Evaluate the Effect of the Incorporation of Quartzite Residues in Ceramic Mass for Porcelain Tile Production. *Materials Research*, São Carlos, v.22, n.1, p.1-11, 2019.

SOUSA, M. K. O.; BALDUINO, A. R. Aproveitamento do RCD como base e sub-base em pavimentações com baixo volume de tráfego no município de porto nacional. *Inventionis*, v.1, n.2, p.19-29, 2019.

CAPÍTULO 2

PARÂMETROS MECÂNICOS DE DOIS TIPOS DISTINTOS DE SOLO MISTURADOS COM LAMA DE BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS

1 INTRODUÇÃO

As rochas ornamentais como material de revestimento em construções são utilizadas em diversos países do mundo, tendo como principais importadores China, Estados Unidos e Coréia do Sul (MONTANI, 2020). Essas rochas são submetidas a diversos processos de beneficiamento desde sua extração, em seu estado bruto, até estarem aptas a serem utilizadas no setor de construção civil. Dentre esses processos, destaca-se o desdobramento ou corte, no qual os blocos de rochas são transformados em chapas com cerca de 2 cm de espessura (SILVEIRA, VIDAL, SOUZA, 2014).

Almeida e Pontes (2001), através de um estudo de caso, estimaram que a percentagem total de perda que acontece na lavra e beneficiamento das rochas atinge até 70%, sendo que o processo de desdobramento gera cerca de 20% a 30% de resíduos, também chamados de Lama de Beneficiamento de Rochas Ornamentais (LBRO), em relação ao volume inicial da rocha, os quais são compostos por água, cal, granalha de aço ou ferro fundido e rocha moída (ALVES *et al.*, 2015). Montani (2020) afirma ainda que, em 2019, a indústria desse setor produziu aproximadamente 154,5 Mt de rochas ornamentais, responsáveis pela geração de 63,35Mt de resíduos, em todo o processo de beneficiamento, sob a forma pulverulenta ou de grãos.

Esses resíduos correspondem à grande preocupação do setor industrial de rochas ornamentais, visto que a deposição da LBRO, muitas vezes, ainda é realizada de forma ambientalmente incorreta, em locais a céu aberto, diretamente no solo, sem qualquer preparo e próximos a recursos hídricos. Essas condições conduzem à possibilidade de os resíduos causarem problemas respiratórios, por serem compostos majoritariamente de materiais pulverulentos, e serem arrastados pela água de infiltração para o interior dos solos, com riscos de colmatagem dos vazios e alcance de lençóis freáticos (BASTOS, 2018). Nos casos em que a destinação é feita de maneira correta, os resíduos são depositados em aterros específicos e regulamentados, os quais demandam grandes áreas para sua instalação (REIS, ALVAREZ, 2007).

A intersecção do cenário ambiental com a grande geração de resíduos por esse setor econômico fez com que diversos estudos fossem realizados com o objetivo de viabilizar sua reutilização, em diversos segmentos industriais, como em concretos, cimentos, argamassas, vidros e correção de solos ácidos (GUPTA, VYAS, 2018; BASTOS, 2018; ZAINUDDIN *et al.*, 2019; OSTROWSKI *et al.*, 2020; ZAMARKI, HENTGES, FABRIS, 2020; ZULCÃO *et al.*, 2020; NASCIMENTO *et al.*, 2020). Entretanto, Vijayalakshmi, Sekar e Ganesh Prabhu (2013) afirmam que o volume de resíduos que é reutilizado ainda representa um valor ínfimo do que é gerado, necessitando, dessa forma, que sejam estudadas novas possibilidades de aplicação por meio de novas pesquisas.

Sivrikaya, K1yıldı e Karaca (2013) afirmam que, para a implantação de novas estradas, é essencial que se utilizem os resíduos gerados em grande escala como fontes de novos materiais de construção. Partindo dessa premissa, o resíduo de rochas ornamentais tem sido alvo de pesquisas no setor de pavimentação, a fim de identificar uma aplicação técnica compatível com o grande volume de resíduos gerados pelas indústrias de beneficiamento.

A busca pela utilização da LBRO na pavimentação se deve ao fato do resíduo possuir constituintes similares aos do cimento, cuja utilização como material para estabilização de solos já é consolidada na literatura (BRITO, PARANHOS, 2017). Petrucci (2005) afirma que os componentes mais importantes para as propriedades do cimento Portland são a cal (CaO), sílica (SiO₂), alumina (Al₂O₃) e óxido de ferro (Fe₂O₃), enquanto Lopes (2019), em seu estudo, destacou que o resíduo de granito apresenta percentagens de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ em sua composição. Dessa forma, a comparação entre as composições químicas apresentadas fomenta a possibilidade de utilização dos resíduos de granito como materiais de pavimentação.

Santos (2019) estudou a mistura de solos argilosos com o resíduo de granito visando a aplicação em camadas estruturais de pavimento, sem avaliar o tempo de cura, e obteve os melhores resultados mecânicos na energia Proctor modificada, enquanto Lunz *et al.* (2019) identificaram ganho de resistência da mistura de solo com resíduo de granito ao longo do tempo, nas energias Proctor normal e Proctor intermediária. Reehana e Sateesh Kumar (2018), Eltwati, Tarhuni e Elkaseh (2020), Eltwati *et al.* (2020) e Ahmed, Abdelhaffez e Ahmed (2020) também apresentaram suas considerações acerca do melhoramento das propriedades de engenharia dos solos estudados, após a adição de LBRO.

Nesse contexto, nota-se a necessidade de estudos que busquem avaliar o potencial de aproveitamento técnico dos resíduos de rochas ornamentais em camadas estruturais do pavimento, visto que essa modalidade de obra civil demanda grandes volumes de material. Destaca-se, ainda, a necessidade de considerar o efeito, em determinadas propriedades de

engenharia essenciais aos projetos de pavimentação, causado pelo resíduo puro ou misturado, em diversas proporções, a diferentes tipos de solo. Outro fator que deve ser avaliado nas propriedades de engenharia está associado ao tempo de cura, uma vez que o processo de desdobramento de rochas em teares convencionais, que ainda representam cerca de 69% da indústria (ABIROCHAS, 2018), é responsável pela adição de cal ao resíduo, podendo o aproveitamento deste gerar ganhos de resistência ao longo do tempo nos solos em que é incorporado.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Para o desenvolvimento da pesquisa foram utilizados três tipos de materiais, sendo eles a Lama de Beneficiamento de Rochas Ornamentais (LBRO), decorrente do beneficiamento de rochas predominantemente graníticas, um solo com características argilosas e outro com características arenosas, a fim de verificar a interação do resíduo com solos cujas características geotécnicas são consideravelmente contrastantes entre si.

2.1.1 Solos

As amostras indeformadas do solo com características argilosas foram retiradas da jazida localizada às margens da BR 120 (Figura 1), que liga os municípios de Viçosa - MG e Ubá – MG. Já o solo com características arenosas foi proveniente da jazida localizada na Vila Secundino, dentro do perímetro do *campus* Viçosa da Universidade Federal de Viçosa (UFV) (Figura 2). Os solos foram denominados segundo a localização de cada jazida, ou seja, o solo com características argilosas foi identificado como “Solo BR-120” e o solo com características arenosas foi identificado como “Solo VILA”. As coletas foram realizadas de acordo com a norma DNER PRO 003 (DNER, 1994a).

Figura 1 – Jazida do solo BR-120



Fonte: Autora, 2019

Figura 2- Jazida do Solo VILA



Fonte: Autora, 2019

2.1.2 Resíduo

A Lama de Beneficiamento de Rochas Ornamentais (LBRO), resultante do processo de beneficiamento de rochas graníticas, foi coletada no aterro de rochas ornamentais (Figura 3) gerenciado pela Associação de Desenvolvimento Ambiental do Mármore e Granito (ADAMAG), na cidade de Cachoeiro de Itapemirim-ES, de acordo com a NBR 10007 (ABNT, 2004).

Figura 3 – Vista aérea do aterro da ADAMAG



Fonte: Google Earth, 2020

A fim de ampliar o horizonte da pesquisa, foram propostas misturas entre os materiais apresentados, assumindo a premissa de que cada mistura fosse elaborada com dois componentes (misturas solo-resíduo), com proporções em massa seca pré-estabelecidas. Sendo assim, as amostras estudadas estão apresentadas na Tabela 1, bem como suas respectivas proporções.

Tabela 1 - Proporções das amostras da pesquisa

Amostras
100% BR-120
75% Solo BR-120 + 25% LBRO
50% Solo BR-120 + 50% LBRO
25% Solo BR-120 + 75% LBRO
100% LBRO
25% Solo VILA + 75% LBRO
50% Solo VILA + 50% LBRO
75% Solo VILA + 25% LBRO
100% Solo VILA

2.2 Métodos

2.2.1 Considerações iniciais

Para compor esta pesquisa, foram realizados ensaios de caracterização geotécnica, ensaios mecânicos com cargas estática e dinâmica e ensaios químicos, mineralógicos e morfológicos.

Todos os ensaios que compõem essa pesquisa foram realizados em laboratórios da Universidade Federal de Viçosa (UFV), *campus* Viçosa. Os ensaios de caracterização geotécnica foram realizados no Laboratório de Geotecnia, os ensaios mecânicos foram

realizados no Laboratório de Pavimentação e o ensaio de pH, pelo Laboratório de Materiais de Construção (LMC), todos do Departamento de Engenharia Civil (DEC). Os ensaios mineralógicos e morfológicos foram realizados pelo Departamento de Física, enquanto os ensaios químicos e de caracterização do resíduo foram realizados pelo Departamento de Solos.

2.2.2 Ensaios de caracterização geotécnica

Os ensaios de caracterização geotécnica apresentados na Tabela 2 foram realizados com todas as amostras em estudo, tendo como objetivo associar suas características às tendências de comportamento estabelecidas pela literatura para solos com características semelhantes.

Tabela 2 - Ensaios de caracterização geotécnica dos materiais e suas normas regulamentadoras

Ensaios	Normas
Granulometria Conjunta	NBR 7181 (ABNT, 2016a)
Limite de Liquidez	NBR 6459 (ABNT, 2016b)
Limite de Plasticidade	NBR 7180 (ABNT, 2016c)
Massa Específica dos Grãos	NBR 6458 (ABNT, 2016d)

2.2.3 Ensaios químicos, mineralógicos e morfológicos

A morfologia foi avaliada a partir de imagens obtidas através da técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) para as amostras de solos e resíduo puros e para as misturas solo-resíduo com cura de 60 dias. As misturas selecionadas, uma composta com solo “BR 120” e a outra com solo “VILA”, corresponderam àquelas de melhor desempenho mecânico, considerando os ensaios de RCS, RTCD e CBR. Tais amostras foram ainda submetidas ao ensaio de pH, a fim de determinar tendências à acidez ou basicidade de cada uma delas, conforme a NBR 9252 (ABNT, 2016e).

A caracterização química foi realizada a partir da técnica de Fluorescência de Raios-X (FRX), enquanto a mineralogia das amostras foi estudada através da técnica de Difração de Raios-X (DRX), para as amostras descritas acima.

2.2.4 Ensaios de compactação e mecânicos

Os materiais investigados (solos, resíduo e misturas solo-resíduo) foram compactados na energia do Proctor Normal, segundo as normas NBR 7182 (ABNT, 2016f) e NBR 12023 (ABNT, 2012a), visando à determinação dos respectivos parâmetros de ótimo da curva de

compactação. Corpos de prova moldados segundo os parâmetros de ótimo foram submetidos aos ensaios mecânicos listados na Tabela 3.

Tabela 3 - Ensaios mecânicos e respectivas normas

Ensaios	Normas
Ensaio de Resistência à Compressão Simples (RCS)	NBR 12025 (ABNT, 2012b)
Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral (RTCD)	ME 181/94 (DNER, 1994b)
Ensaio <i>California Bearing Ratio</i> (CBR)	NBR 9895 (ABNT, 2016g)
Ensaio de Módulo de Resiliência (MR)	ME 134/18 (DNIT, 2018)

Os ensaios de compactação foram realizados considerando a energia Proctor Normal por ser considerada pela NBR 12023 (ABNT, 2012a) tecnicamente a mais adequada para materiais que possuam propriedades cimentícias. Uma vez que o resíduo pode possuir características cimentícias, foram realizados ensaios buscando avaliar o comportamento das amostras com LBRO em sua composição após 60 dias de cura. As amostras compactadas compostas apenas por solo puro, tanto arenoso quanto argiloso, foram avaliadas apenas a 0 dias. Foram consideradas, para cada ensaio, três determinações, com coeficiente de variação máximo admissível de 10%.

Os ensaios de Módulo de Resiliência foram realizados através do equipamento triaxial cíclico (Figura 4), utilizando os solos puros e com as amostras de mistura solo-resíduo que possuíram o melhor desempenho mecânico nos demais ensaios (RCS, RTCD e CBR). Os dados dos ensaios de MR foram ajustados segundo o modelo composto proposto por Macêdo (1996), que considera a influência simultânea das tensões confinante e desvio sobre o MR para qualquer material.

Figura 4 - Equipamento triaxial cíclico para ensaio MR



Fonte: Autora, 2020

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Caracterização geotécnica dos materiais e misturas solo-resíduo

A caracterização geotécnica das amostras foi realizada para os materiais em seu estado puro, bem como para as misturas solo-resíduo, nas proporções pré-estabelecidas. Na Figura 5 estão apresentadas as curvas granulométricas das amostras, e a Tabela 4 apresenta dados sobre a distribuição granulométrica, os parâmetros de consistência (LL, LP, IP) e o Peso Específico dos Sólidos (γ_s) de cada uma delas.

Figura 5 - Curvas granulométricas dos materiais investigados

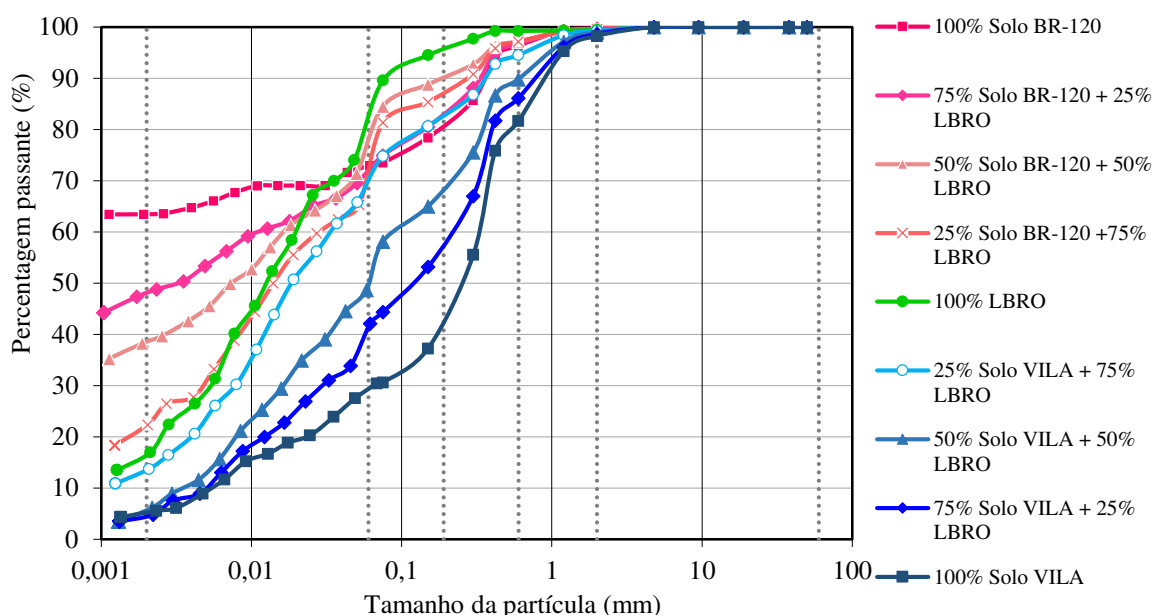


Tabela 4 - Dados da caracterização geotécnica das amostras dos materiais investigados

Amostras	Distribuição granulométrica (%) (ABNT, 2016a)				LL ¹ (%)	LP ² (%)	IP ³ (%)	γ_s (kN/m ³)
	Argila	Silte	Areia	Pedregulho				
100% Solo BR-120	63%	9%	28%	0%	66	36	30	27,59
75% Solo BR-120 + 25% LBRO	48%	24%	28%	0%	44	28	16	27,44
50% Solo BR-120 + 50% LBRO	38%	38%	24%	0%	33	22	11	27,28
25% Solo BR-120 + 75% LBRO	23%	49%	28%	0%	22	20	2	27,23
100% LBRO	16%	66%	17%	1%	-	-	NP	27,02
25% Solo VILA + 75% LBRO	13%	56%	30%	1%	-	-	NP	26,85
50% Solo VILA + 50% LBRO	6%	44%	49%	1%	-	-	NP	26,39
75% Solo VILA + 25% LBRO	6%	35%	57%	2%	26	18	8	26,12
100% Solo VILA	5%	24%	68%	3%	28	18	10	26,07

¹ Limite de Liquidez; ² Limite de Plasticidade; ³ Índice de Plasticidade

Como base nesses dados, nota-se que os resultados das caracterizações geotécnicas obtidos para as misturas solo-resíduo correspondem à uma combinação dos valores encontrados para as amostras de material puro (solo e LBRO), conforme as proporções entre os mesmos. É possível identificar que o caráter intrinsecamente não plástico (NP) do resíduo é predominante nas misturas com o solo arenoso (Solo VILA), sendo possível determinar a plasticidade apenas na mistura na qual ele está presente em menor quantidade (75% Solo VILA + 25% LBRO). O comportamento não plástico dessas misturas pode ser justificado pelo aumento percentual da fração argila com baixa atividade advinda do resíduo LBRO.

Nas misturas com o solo argiloso, verifica-se uma clara tendência de redução da plasticidade com o incremento da quantidade de resíduo, reforçando a capacidade do resíduo de influenciar a plasticidade dos materiais com os quais se combina, mesmo quando estes são notadamente plásticos como o Solo BR-120.

Com base nesses resultados, as amostras dos materiais investigados foram classificadas segundo o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) e a *Transportation Research Board* (TRB), conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 - Classificação das amostras de materiais investigados

Amostras	Sistema de classificação	
	SUCS	TRB
100% Solo BR-120	Argila com areia muito plástica	A-7-5 (20)
75% Solo BR-120 + 25% LBRO	Argila com areia pouco plástica	A-7-5 (11)
50% Solo BR-120 + 50% LBRO	Argila com areia pouco plástica	A-6 (8)
25% Solo BR-120 + 75% LBRO	Silte com areia	A-4 (8)
100% LBRO	Silte com areia	A-4 (8)
25% Solo VILA + 75% LBRO	Silte com areia	A-4 (8)
50% Solo VILA + 50% LBRO	Silte arenoso	A-4 (5)
75% Solo VILA + 25% LBRO	Areia siltosa	A-4 (2)
100% Solo VILA	Areia argilosa	A-2-4 (0)

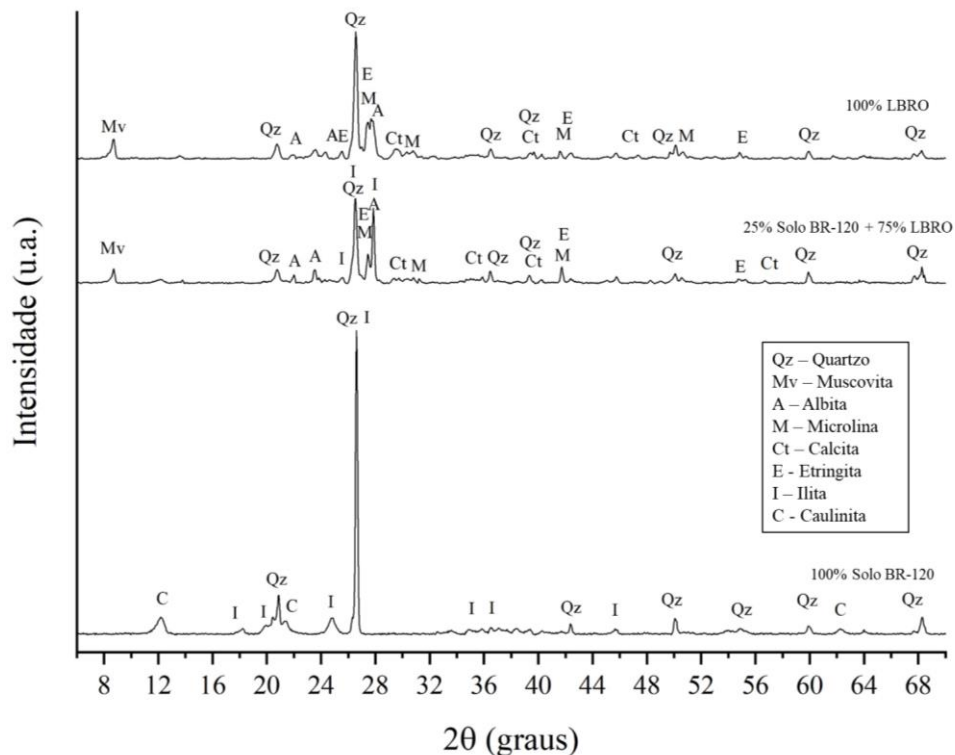
A adição dos resíduos de granito atuou de formas diferentes em cada solo estudado. O solo BR-120 foi classificado, segundo a TRB, como um solo A-7-5, que pode, de acordo com DNIT (2006), ser altamente elástico e sujeito a elevadas mudanças de volume. Com a adição da LBRO, classificada como A-4, as misturas foram perdendo as características provenientes do solo puro e adquirindo características não plásticas, tornando-se menos elásticas, apesar de todas as amostras contendo solo BR-120 terem seu comportamento como subleito considerado sofrível a mau.

Já o solo VILA, em seu estado puro, é classificado pelo TRB como A-2-4, cujo comportamento possui um desempenho excelente a bom quando utilizado como camada de subleito, porém, com a substituição parcial do solo por resíduo, em todas as percentagens, as amostras de misturas passam a ter seu comportamento como subleito classificado como sofrível a mau. A variação progressiva de ambos os solos com a adição do resíduo indica uma tendência das misturas de tornarem-se bem graduadas, visto que, para o solo argiloso, o resíduo proporciona aumento das frações silte e areia, enquanto para a areia argilosa, o resíduo contribui com a fração silte.

3.2 Ensaios químicos, mineralógicos e morfológicos

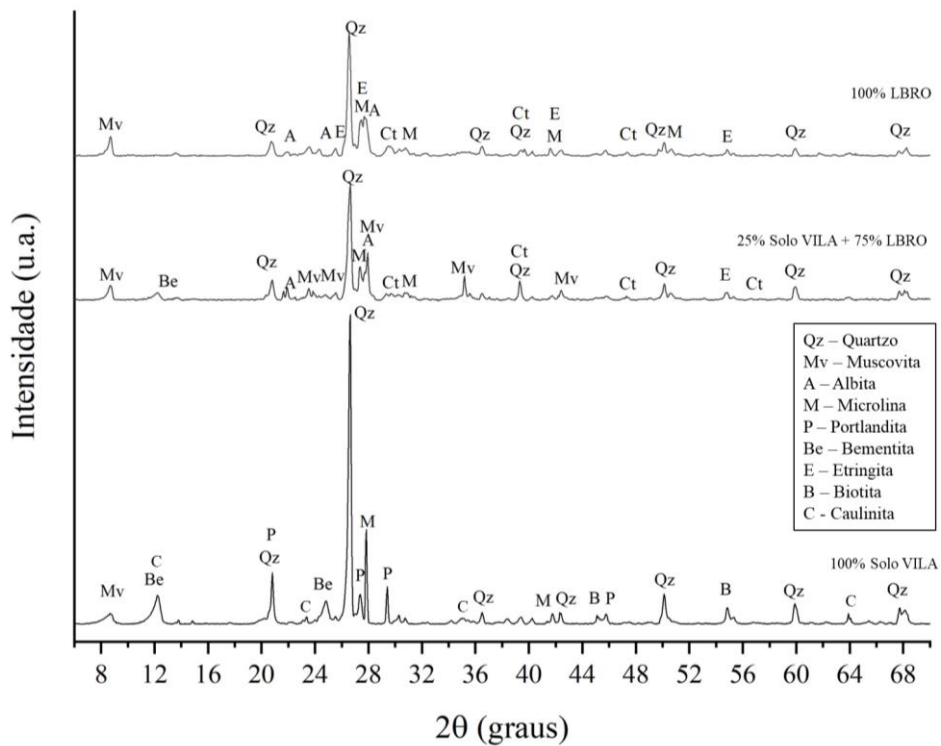
Os ensaios mineralógicos de Difração de Raios-X (DRX) foram realizados através do difratômetro *Bruker D8-Discover* (radiação $\text{CuK}\alpha$, 40kV, 30mA, $\lambda = 1,5418\text{\AA}$, com medidas θ - 2θ , na faixa de 5° a 80° , $0,02^\circ/\text{passo}$, $1\text{s}/\text{passo}$) para os materiais puros, isto é, 100% Solo BR-120, 100% Solo VILA e 100% LBRO, sem avaliação do tempo de cura, e para as misturas de 25% Solo BR-120 + 75% LBRO e 25% Solo VILA + 75% LBRO, com avaliação da cura de 60 dias (Figuras 6 e 7).

Figura 6 - DRX das amostras de 100 %Solo BR-120, 100% LBRO e mistura 25% Solo BR-120 + 75% LBRO



Os resultados DRX indicam que o resíduo de granito apresenta picos intensos de quartzo (SiO_2) e microlina ($\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$), enquanto calcita (CaCO_3), muscovita ($\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$), albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) e etringita ($\text{C}_6\text{ASH}_{32}$) se apresentam em picos mais baixos. O Solo BR-120 possui sua mineralogia formada por picos intensos de quartzo e ilita ($((\text{K},\text{H}_3\text{O})(\text{Al},\text{Mg},\text{Fe})_2(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}[(\text{OH})_2,(\text{H}_2\text{O})])$) e picos menos intensos de caulinita ($((\text{Al},\text{Mg},\text{Fe})_4(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_8)$). Já a mistura de 25% Solo BR-120 + 75% LBRO se mostra como uma composição de ambos os materiais puros, apresentando picos maiores de quartzo e ilita e picos menores de calcita, muscovita, microlina e etringita.

Figura 7 - DRX das amostras de 100% Solo VILA, 100%LBRO e mistura de 25% Solo VILA+ 75% LBRO

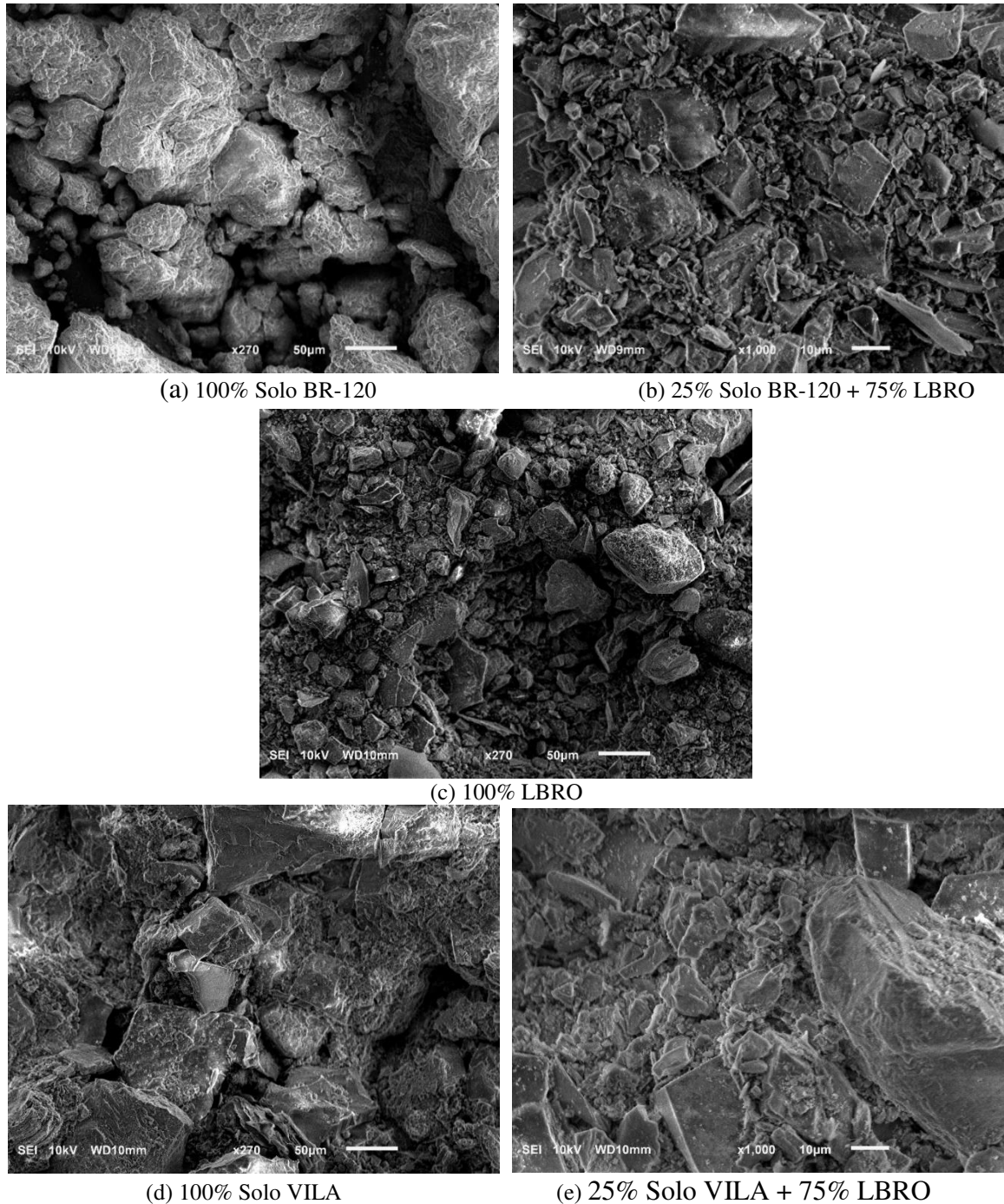


Em relação ao Solo VILA (Figura 7), notam-se picos intensos de quartzo, microlina e portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), enquanto muscovita, caulinita, bementita ($\text{Mn}_7\text{Si}_6\text{O}_{15}(\text{OH})_8$) e biotita ($\text{K}(\text{Mg}, \text{Fe})_3(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{F},\text{OH})_2$) compõem os picos de menor intensidade. Na mineralogia da mistura 25% Solo VILA + 75% LBRO também se destacam as presenças de quartzo e muscovita, além de picos menores de bementita, albita e etringita, sendo todos estes presentes nos materiais de origem da mistura.

Verificou-se a morfologia das amostras através do ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), no qual foi utilizado o equipamento *JOEL JSM-6010LA* com resolução de

4nm, feixe de 20kV, magnificação de 8X a 300.000X e voltagem de aceleração de 500V a 20kV, cujas microfotografias são apresentadas na Figura 8.

Figura 8 - MEV das amostras avaliadas



O Solo BR-120 é composto por partículas de diâmetro muito pequeno, que podem ser associadas às ilitas, as quais cobrem a superfície de partículas maiores, possivelmente, o quartzo. A amostra de LBRO apresenta distribuição variada de diâmetro, com partículas irregulares que, segundo Lopes (2019), devem-se ao processo de corte dos blocos de rochas ornamentais. O Solo VILA é composto por partículas de grandes dimensões, como os cristais

de quartzo, que se destacam em sua composição. A mistura de 25% Solo BR-120 + 75% LBRO apresenta uma distribuição de partículas que se assemelha mais à morfologia do resíduo, porém nota-se um aumento considerável das partículas de menor tamanho, enquanto a mistura de 25% Solo VILA + 75% LBRO apresenta partículas de grandes dimensões, como o solo puro, e uma presença considerável de partículas angulosas, características do resíduo.

Na Tabela 6 são apresentados os resultados das análises químicas obtidas pelo ensaio de Fluorescência de Raios-X (FRX), realizado com o equipamento *PANalytical Epsilon3x*, para as amostras de solo puro, resíduo e misturas solo-resíduo, através do equipamento micro-EDX-1300.

Tabela 6 - Resultados do ensaio FRX

Amostras	Al₂O₃ (%)	CaO (%)	Fe₂O₃ (%)	K₂O (%)	MgO (%)	Na₂O (%)	SiO₂ (%)	TiO₂ (%)	Outros (%)
100% Solo BR-120	22,97	0,02	11,59	0,02	1,52	1,88	43,20	2,05	0,62
25% Solo BR-120 + 75% LBRO	17,00	3,66	6,63	3,17	1,11	1,47	59,46	1,01	0,84
100% LBRO	9,51	3,30	3,63	2,91	0,99	1,12	46,01	0,48	0,36
25% Solo VILA + 75% LBRO	14,07	3,40	4,46	3,68	1,18	1,67	61,10	0,55	0,85
100% Solo VILA	19,32	0,43	1,91	3,66	1,73	1,86	64,82	0,22	0,45

Com base nas análises químicas e mineralógicas do resíduo, nota-se que as percentagens de SiO₂ são decorrentes da presença de quartzo, as percentagens de Al₂O₃, Fe₂O₃, K₂O são provenientes da presença de muscovita, albita e microlina, enquanto as percentagens de CaO estão ligadas à presença de calcita. O Solo BR-120 possui as percentagens de SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ em função dos minerais quartzo, caulinita e ilita, sendo que a contribuição do quartzo está ligada exclusivamente à percentagem de SiO₂. No Solo VILA, os minerais quartzo, bementita, muscovita, microlina e biotita contribuem para as porcentagens de SiO₂, enquanto Al₂O₃ e K₂O estão relacionados apenas aos três últimos minerais. Estima-se que a percentagem de CaO esteja relacionada com a presença de portlandita.

Os minerais que compõem cada material e seus compostos químicos podem influenciar diretamente o valor do pH de cada mistura. Dessa forma, são apresentados na Tabela 7 os valores de pH para os solos, a LBRO e as misturas solo-resíduo que contêm 75% de LBRO em sua composição.

Tabela 7 - Resultados do ensaio de pH

pH	0 dias	60 dias
100% BR-120	5,02	-
25% BR-120	7,24	8,11
100% LBRO	8,26	-
25% VILA	7,60	8,29
100% VILA	5,36	-

Segundo Bigarella, Becker e Santos (1994), os solos puros podem ser classificados como ácidos, por possuírem $\text{pH} < 5,5$, enquanto o resíduo e as misturas são classificados como alcalinos, uma vez que seu $\text{pH} > 7,0$. Observa-se que o pH das amostras com 75% LBRO corresponde a um valor intermediário e proporcional aos materiais que as compõem na mistura. Entretanto, nota-se um aumento nesses valores, após a cura de 60 dias das amostras, alcançando, na mistura de 25% Solo BR-120, um valor superior aos pHs do solo e do resíduo. Segundo Raji (2008), uma das maneiras de corrigir o pH do solo é realizando o processo de calagem, comumente realizada com CaCO_3 , mineral encontrado no resíduo de granito (LBRO). Portanto, assume-se que o aumento dos valores de pH está diretamente relacionado com a presença do mineral calcita.

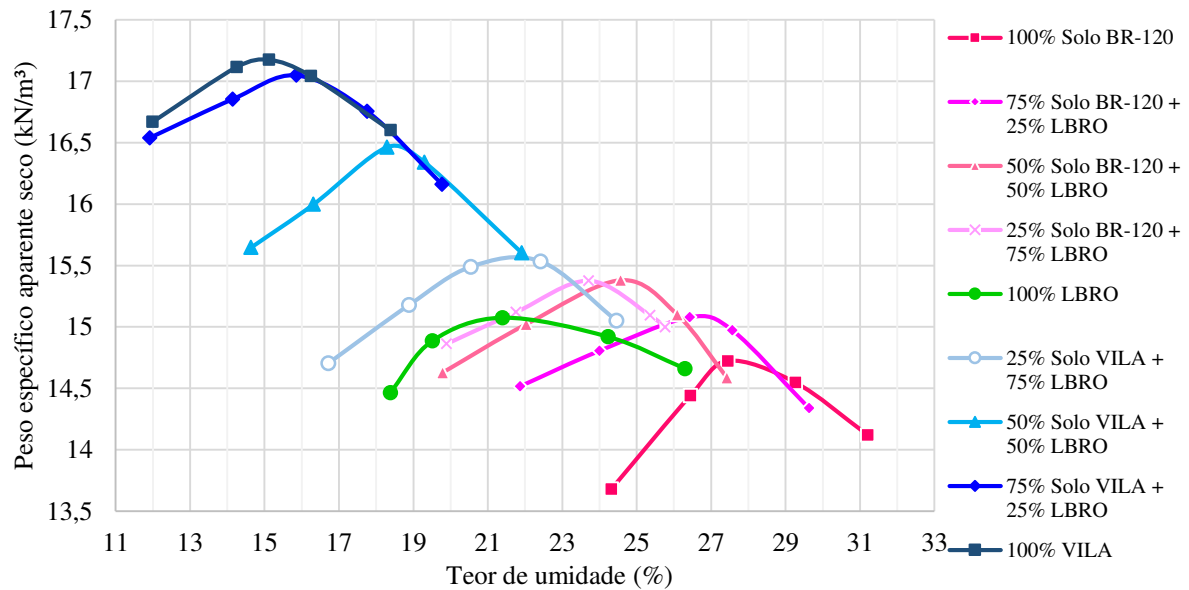
3.3 Ensaio de compactação

A fim de identificar a umidade ótima e o peso específico aparente seco máximo ($\gamma_{\text{dmáx}}$) referentes a cada amostra, realizou-se o ensaio de compactação Proctor Normal, cujos resultados estão apresentados na Tabela 8, enquanto as respectivas curvas de compactação estão apresentadas na Figura 9.

Tabela 8 - Resultados do ensaio de compactação Proctor Normal de amostras dos materiais investigados

Amostras	Umidade ótima (%)	$\gamma_{\text{dmáx}}$ (kN/m ³)
100% Solo BR-120	27,5	14,72
75% Solo BR-120 + 25% LBRO	26,7	15,08
50% Solo BR-120 + 50% LBRO	24,7	15,38
25% Solo BR-120 + 75% LBRO	23,7	15,37
100% LBRO	21,4	15,08
25% Solo VILA + 75% LBRO	21,8	15,57
50% Solo VILA + 50% LBRO	18,5	16,47
75% Solo VILA + 25% LBRO	15,8	17,05
100% Solo VILA	15,0	17,17

Figura 9 - Curvas de compactação Proctor Normal de amostras dos materiais investigados



Com base nos resultados obtidos, pode-se observar que, nas misturas contendo solo BR-120, ocorre um aumento do peso específico aparente seco máximo e uma redução da umidade ótima em relação ao solo puro (curvas de compactação deslocadas para cima e para a esquerda), ocasionados pelo aumento da proporção de resíduo nas misturas. Em relação à granulometria característica do solo BR-120, o aumento do percentual de grãos de dimensões maiores, particularmente da fração silte, e a redução do percentual da fração argila conferem às misturas solo BR-120-resíduo características granulométricas gradativamente mais granulares com o incremento da quantidade de resíduo, justificando essa tendência de comportamento quanto à compactabilidade das misturas típica de materiais mais grossos.

Já nas misturas contendo o solo VILA, observa-se uma redução do peso específico aparente seco máximo e um aumento da umidade ótima em relação ao solo puro (curvas de compactação deslocadas para baixo e para a direita), à medida em que se aumenta a percentagem de resíduo em substituição ao solo. Em relação à granulometria característica do solo VILA, o aumento do percentual de grãos de dimensões menores, particularmente da fração silte, mas também da fração argila, confere às misturas solo VILA-resíduo características granulométricas gradativamente mais finas com o incremento da quantidade de resíduo, justificando essa tendência de comportamento quanto à compactabilidade das misturas típica de materiais mais coesivos.

3.4 Ensaios de Resistência à Compressão Simples

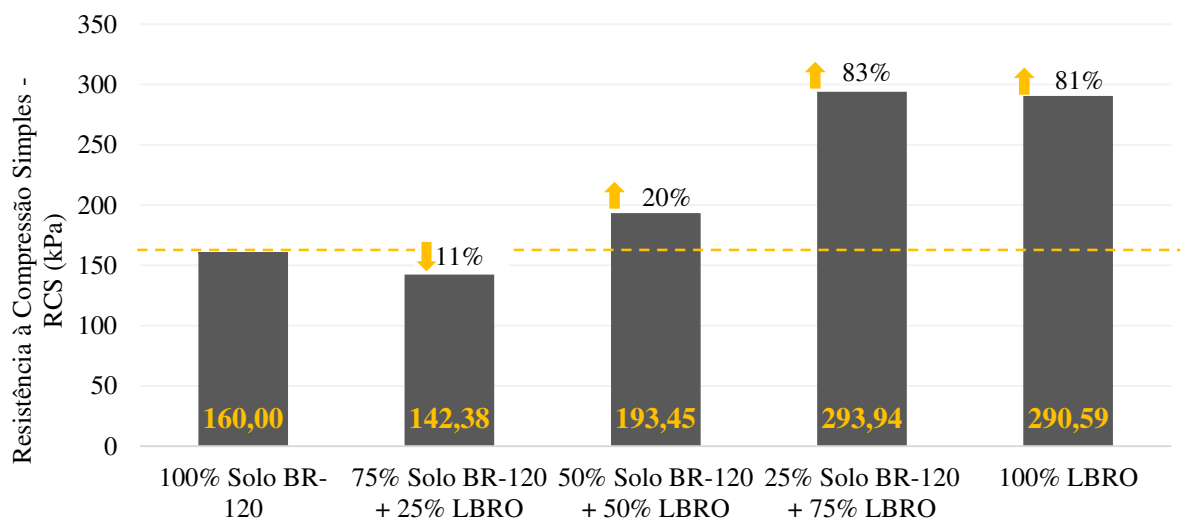
3.4.1 Solo BR-120

Os resultados de Resistência à Compressão Simples (RCS) das amostras compactadas nas respectivas umidades ótimas do solo BR-120 e das misturas solo BR-120-resíduo LBRO, nas proporções previamente estabelecidas, estão apresentados na Tabela 9 e na Figura 10. As variações percentuais de RCS em relação ao solo BR-120 também estão apresentadas na Figura 10.

Tabela 9 - Resultados de RCS das amostras com solo BR-120

Amostras	Idade (dias)	Determinações	RCS (kPa)	RCS MÉDIA (kPa)	Desvio padrão (kPa)	Coefficiente de Variação (%)
100% Solo BR-120	0	1	176,98	160,68	15,92	9,91
		2	145,18			
		3	157,88			
75% Solo BR-120 + 25% LBRO	60	1	142,06	142,38	1,50	1,05
		2	141,08			
		3	144,01			
50% Solo BR-120 + 50% LBRO	60	1	200,98	193,45	9,06	4,68
		2	183,40			
		3	195,96			
25% Solo BR-120 + 75% LBRO	60	1	300,22	293,94	6,99	2,38
		2	295,20			
		3	286,40			
100% LBRO	60	1	295,20	290,59	5,08	1,75
		2	285,15			
		3	291,43			

Figura 10 - Resultados de RCS das amostras com Solo BR-120



Apesar da granulometria das misturas variar de maneira progressiva nas amostras de Solo VILA, quando submetidas a percentagens crescentes de resíduo, infere-se que a composição granulométrica formada na mistura de 75% Solo BR-120 + 25% LBRO não seja favorável ao desempenho mecânico. Silva *et al.* (2016) afirmam que o intertravamento do solo é inversamente proporcional à quantidade de finos do solo, sendo que um maior intertravamento conduz ao aumento do atrito entre os grãos e, conseqüentemente, da resistência. Assim, infere-se que as composições granulométricas observadas nas demais misturas sejam responsáveis por um maior atrito entre as partículas, em virtude de uma considerável substituição das partículas de argila por partículas de silte, conferindo, portanto, maiores valores de resistência.

Outro fator importante é a estabilização química dos solos, que se inicia com a troca catiônica entre os íons fornecidos pelo agente estabilizante e os íons trocáveis do solo. As superfícies dos argilominerais possuem cargas negativas, fazendo com que moléculas de água e os cátions sejam atraídos em direção a elas, resultando em uma separação difusa das duas superfícies carregadas, comumente chamada de “camada dupla” (PRUSINSKI e BHATTACHARJA, 1999).

O mineral calcita (CaCO_3), identificado no resíduo de granito, em presença de água, sofre dissolução contínua, liberando Ca^{2+} e CO_3^{2-} (PETRÓ, PIVEL e COIMBRA, 2016). A disposição desses íons induz a ocorrência do processo de troca catiônica que, de acordo com Grim (1953), funciona segundo a série liotrópica $\text{Na}^+ < \text{K}^+ < \text{Ca}^{2+} < \text{Mg}^{2+} < \text{Al}^{3+}$, na qual os cátions multivalentes substituem os monovalentes, desde que estejam em concentrações iguais no meio. Loch (2013) afirma que os principais cátions que formam a dupla camada são os cátions monovalentes Na^+ e K^+ , os quais, segundo a série liotrópica, são facilmente trocados por Ca^{2+} .

Essas reações de trocas catiônicas resultam na redução do tamanho da camada difusa de água, fazendo com que as partículas se aproximem mais umas das outras (TRB, 1987), tendo como consequência os processos de floculação e agregação, onde as partículas de argila do solo alteram a sua estrutura paralela para uma orientação mais aleatória (PRUSINSKI e BHATTACHARJA, 1999). Os três processos apresentados, isto é, reações de trocas catiônicas, floculação e aglomeração, são responsáveis pela redução da plasticidade, melhoria da trabalhabilidade e aumento de resistência em curto prazo.

Nesse contexto, infere-se que, na amostra de 75% Solo BR-120 + 25% LBRO, que sofreu uma redução de 11% na RCS, a quantidade de CaCO_3 disponível no meio não foi suficiente para que os cátions livres de Ca^{2+} realizassem trocas catiônicas com o solo, enquanto nas misturas de 50% Solo BR-120 + 50% LBRO e 25% Solo BR-120 + 75% LBRO estima-se

que os processos de troca catiônica, floculação e agregação foram responsáveis pelo aumento da RCS.

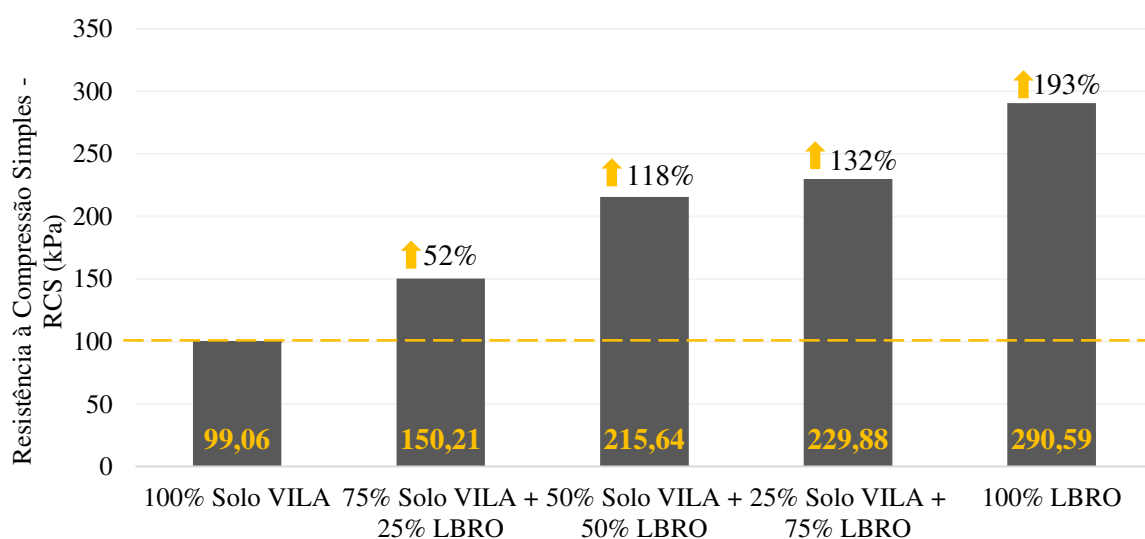
3.4.2 Solo VILA

Os resultados de RCS das amostras compactadas nas respectivas umidades ótimas do solo VILA e das misturas solo VILA-resíduo LBRO, nas proporções previamente estabelecidas, estão apresentados na Tabela 10 e na Figura 11. As variações percentuais de RCS em relação ao solo VILA também estão apresentadas na mesma figura.

Tabela 10 - Resultados de RCS das amostras com solo VILA

Amostras	Idade (Dias)	Determinações	RCS (kPa)	RCS MÉDIA (kPa)	Desvio padrão (kPa)	Coefficiente de Variação (%)
100% Solo VILA	0	1	92,40	99,06	6,28	6,34
		2	104,88			
		3	99,89			
75% Solo VILA + 25% LBRO	60	1	157,02	159,11	2,61	1,64
		2	162,04			
		3	158,28			
50% Solo VILA + 50% LBRO	60	1	218,57	215,64	7,36	3,41
		2	207,27			
		3	221,08			
25% Solo VILA + 75% LBRO	60	1	231,13	229,88	2,18	0,95
		2	227,36			
		3	231,13			
100% LBRO	60	1	295,20	290,59	5,08	1,75
		2	285,15			
		3	291,43			

Figura 11 - Resultados de RCS das amostras com solo VILA



A granulometria do Solo VILA permite identificá-lo como uma areia argilosa, cuja fração fina foi identificada como sendo composta pelo argilomineral caulinita $((Al,Mg,Fe)_4(Si_4O_{10})(OH)_8)$. Já o resíduo apresenta a calcita ($CaCO_3$) em sua mineralogia. Notam-se, nos resultados das amostras de misturas, consideráveis ganhos de resistência em relação à amostra de referência, os quais estima-se serem decorrentes de processos cimentantes, possivelmente em decorrência da combinação desses minerais.

Apesar de compostos silicatados decorrentes de reações pozolânicas, como C-S-H ou C-A-H, não serem identificados no ensaio DRX, Metha (1986) afirma que a ocorrência de $CaCO_3$, identificado no Solo VILA sob a forma do mineral portlandita, pode mascarar o C-S-H devido ao seu caráter pouco cristalino. Mexias (2004) ressalta ainda que o não aparecimento desses compostos pode estar relacionado à sua baixa concentração, uma vez que concentrações inferiores à 5% não serão identificadas no ensaio DRX.

Ormsby e Kinter (1973) identificaram que a presença de compostos cimentantes que não são identificados através da Difração de Raios-X, mas se refletem no aumento da resistência, sugere a ocorrência de um processo de estabilização através da formação de géis pouco organizados.

3.5 Ensaios de Resistência à Tração por Compressão Diametral

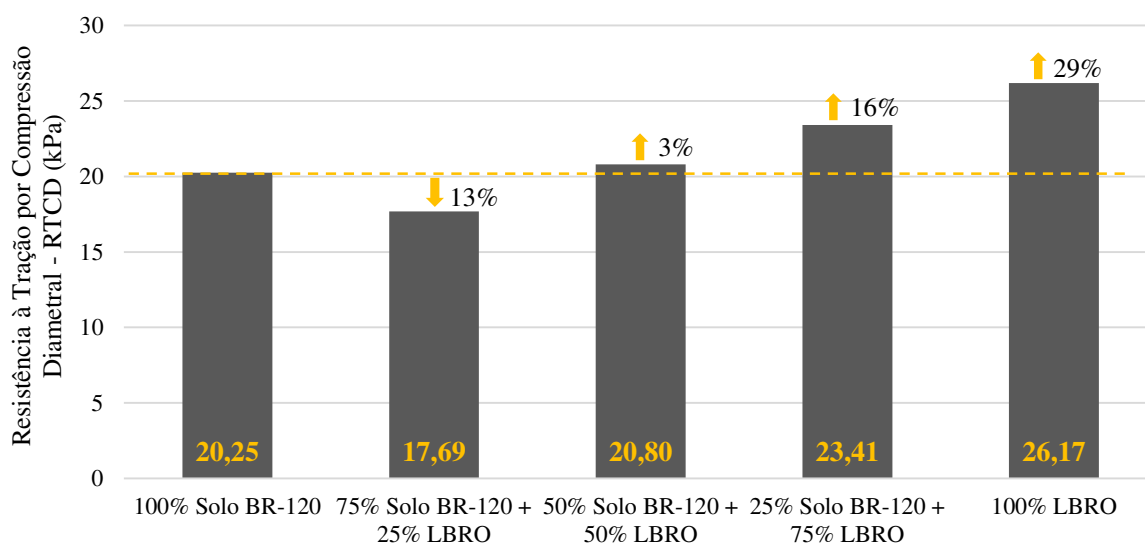
3.5.1 Solo BR-120

Os resultados de Resistência à Tração por Compressão Diametral (RTCD) das amostras compactadas nas respectivas umidades ótimas do solo BR-120 e das misturas solo BR-120-resíduo LBRO, nas proporções previamente estabelecidas, estão apresentados na Tabela 11 e na Figura 12. As variações percentuais de RTCD em relação ao solo BR-120 também estão apresentadas na Figura 12.

Tabela 11 - Resultados de RTCD das amostras com solo BR-120

Amostras	Idade (Dias)	Determinações	RTCD (kPa)	RTCD MÉDIA (kPa)	Desvio Padrão (kPa)	Coefficiente de Variação (%)
100% Solo BR-120	0	1	19,11	20,25	1,57	7,78
		2	19,60			
		3	22,04			
75% Solo BR-120 + 25% LBRO	60	1	18,69	17,69	1,70	9,63
		2	15,72			
		3	18,65			
50% Solo BR-120 + 50% LBRO	60	1	19,16	20,80	1,50	7,22
		2	22,11			
		3	21,13			
25% Solo BR-120 + 75% LBRO	60	1	21,57	23,41	1,69	7,22
		2	24,88			
		3	23,78			
100% LBRO	60	1	28,20	26,17	2,23	8,54
		2	26,54			
		3	23,78			

Figura 12 - Resultados de RTCD das amostras com solo BR-120



Os resultados de Resistência à Tração por Compressão Diametral apresentam uma redução da resistência na mistura de 75% Solo BR-120 + 25% LBRO e aumento nas demais misturas e no resíduo puro, em relação à amostra de 100% Solo BR-120. Dessa forma, estima-se que, na mistura de 75% Solo BR-120 + 25% LBRO, a quantidade de resíduo incorporado ao solo não seja suficiente para garantir a ocorrência de trocas catiônicas, floculação e aglutinação, não gerando, portanto, ganhos de resistência.

Presume-se que a estabilização granulométrica gerada pela adição da LBRO nas misturas de 50% Solo BR-120 + 50% LBRO e 25% Solo BR-120 + 75% LBRO tenha efeitos positivos no aumento do atrito entre as partículas e da resistência à tração, à exemplo do observado nos resultados de RCS. Assume-se que a substituição de parte da fração argila pela fração de silte na mistura 75% Solo BR-120 + 25% LBRO não tenha sido suficiente para gerar ganhos expressivos de resistência à tração.

Barzegar, Rengasamy e Oades (1995) afirmam ainda que a resistência à tração dos solos é influenciada pelo tipo e quantidade de argilomineral presente, pelo tamanho da fração argila e pela quantidade de argila em estado disperso. Portanto, assume-se que, na mistura 75% Solo BR-120 + 25% LBRO, a substituição parcial do solo, com presença de minerais illita e caulinita, por um resíduo que não possui tais minerais em sua composição pode ter prejudicado a resistência à tração da amostra em relação à amostra de referência, isto é, composta integralmente por solo rico em argilominerais.

Como pode-se observar na Tabela 12, a resistência à tração aumenta com a redução da porosidade de cada mistura, com exceção da amostra de 75% Solo BR-120 + 25% LBRO. Para Chang e Woods (1992), quanto maior o número de contatos entre partículas nos solos com materiais cimentícios, condição associada à menor porosidade, existe uma maior possibilidade de cimentação dos grãos. Nesse contexto, nota-se que a resistência à tração das amostras varia de forma diretamente proporcional à porcentagem de resíduo incorporado e inversamente proporcional aos teores de porosidade gerados nas amostras.

Tabela 12 - Índices físicos das amostras com Solo BR-120

Amostras	γ_s (g/cm ³)	γ_d (g/cm ³)	e	n (%)
100% Solo BR-120	2,81	1,47	0,908	47,58
75% Solo BR-120 + 25% LBRO	2,80	1,51	0,856	46,12
50% Solo BR-120 + 50% LBRO	2,78	1,55	0,798	44,38
25% Solo BR-120 + 75% LBRO	2,78	1,57	0,772	43,56
100% LBRO	2,75	1,61	0,709	41,48

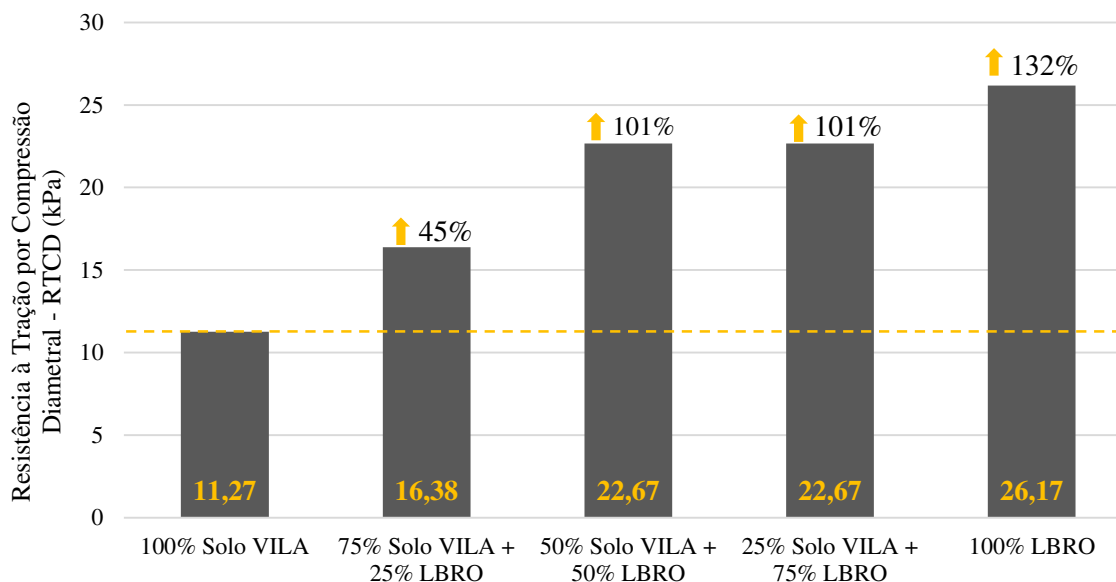
3.5.2 Solo VILA

Os resultados de RTCD das amostras compactadas nas respectivas umidades ótimas do solo VILA e das misturas solo VILA-resíduo LBRO, nas proporções previamente estabelecidas, estão apresentados na Tabela 13 e na Figura 13. As variações percentuais de RTCD em relação ao solo VILA também estão apresentadas na Figura 13.

Tabela 13 - Resultados de RTCD para amostras com solo VILA

Amostras	Idade (Dias)	Determinações	RTCD (kPa)	RTCD MÉDIA (kPa)	Desvio Padrão (kPa)	Coefficiente de Variação (%)
100% Solo VILA	0	1	11,78	11,27	0,85	7,53
		2	10,29			
		3	11,74			
75% Solo VILA + 25% LBRO	60	1	15,72	16,38	0,57	3,47
		2	16,69			
		3	16,72			
50% Solo VILA + 50% LBRO	60	1	22,70	22,67	0,03	0,13
		2	22,64			
		3	22,67			
25% Solo VILA + 75% LBRO	60	1	23,20	22,67	0,96	4,22
		2	21,57			
		3	23,25			
100% LBRO	60	1	28,20	26,17	2,23	8,54
		2	26,54			
		3	23,78			

Figura 13 - Resultados de RTCD de amostras com solo VILA



Os resultados obtidos nos ensaios de Resistência à Tração por Compressão Diametral apresentam um comportamento similar ao observado nos ensaios de Resistência à Compressão Simples. Parente, Parreira e Soares (2002) afirmam que comportamentos semelhantes nesses ensaios indicam que ambos são influenciados, de forma preponderante, pelos mesmos mecanismos, ainda que apresentem diferenças numéricas.

Aluko e Koolen (2000) afirmam que a resistência à tração dos solos é derivada de duas fontes, as ligações entre os agregados e aquelas internas a estes agregados, sendo a resistência à tração um reflexo da força necessária para quebrar estas ligações. As ligações entre agregados estão associadas a forças de sucção, que apresentam influência direta na coesão aparente dos solos em decorrência do fenômeno de capilaridade, e as forças internas estão associadas ao processo de desenvolvimento de reações pozolânicas.

Percebe-se que a adição de LBRO no Solo VILA implica em um aumento dos teores de umidade ótimos das amostras, causando, segundo Rodrigues (1997), redução da sucção e, conseqüentemente, da resistência à tração. As ligações internas, por sua vez, se desenvolvem segundo o processo de estabilização química, responsável pela formação de géis pouco organizados, com tendências cimentantes, conforme observado no ensaio de RCS. Dessa forma, pode-se assumir que os incrementos observados nos valores de RTCD, em relação à amostra de 100% Solo VILA, ocorrem, de forma preponderante, em decorrência da formação dos compostos cimentantes pouco organizados, visto que seus efeitos positivos na resistência são superiores aos efeitos negativos decorrentes da perda de sucção.

Deve-se ressaltar que os valores de resistência semelhantes das misturas de 50% Solo VILA + 50% LBRO e 25% Solo VILA + 75% LBRO podem estar associados a um ponto de equilíbrio entre os efeitos decorrentes dos compostos cimentantes e da força de sucção. Dessa forma, infere-se que a mistura com 25% Solo VILA + 75% LBRO tem maior influência da cimentação do que das forças de sucção, enquanto na mistura com 50% Solo VILA + 50% LBRO o ganho de resistência ocorre de forma inversa.

Em suas pesquisas, Villar, Campos e Zornberg (2007) identificaram que o ponto correspondente a um grau de saturação em torno de 85% equivale justamente ao ponto onde a curva de sucção total do solo apresenta sua curvatura máxima. Nota-se, observando os resultados dos ensaios de resistência à tração, que as amostras que apresentaram as maiores resistências estão variando justamente entre 82,38% e 85,34%, como apresentado na Tabela 14, indicando, portanto, ação das forças de sucção nos ganhos de resistência observados.

Tabela 14 - Índices físicos das amostras com solo VILA

Amostras	γ_s (g/cm ³)	e	w _{méd} (%)	Sr (%)
100% Solo VILA	2,66	0,508	14,45	75,60
75% Solo VILA + 25% LBRO	2,66	0,567	16,35	76,75
50% Solo VILA + 50% LBRO	2,69	0,601	19,06	85,34
25% Solo VILA + 75% LBRO	2,74	0,633	19,05	82,38
100% LBRO	2,75	0,709	21,67	84,18

3.6 Ensaios CBR

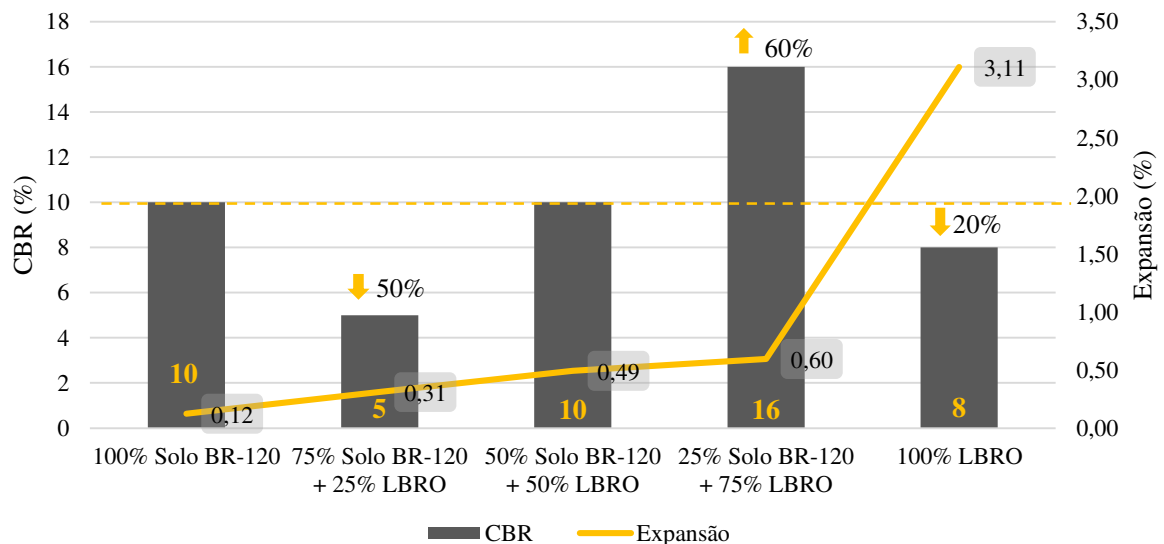
3.6.1 Solo BR-120

Os resultados do índice CBR e da Expansão das amostras compactadas nas respectivas umidades ótimas do solo BR-120 e das misturas solo BR-120-resíduo LBRO, nas proporções previamente estabelecidas, estão apresentados na Tabela 15 e na Figura 14, sendo apresentada nesta, também as variações percentuais do CBR em relação ao solo BR-120.

Tabela 15 - Resultados do ensaio CBR para amostras com solo BR-120

Amostras	Idade (dias)	Determ.	Expansão (%)	CBR (%)	Expansão MÉDIA (%)	CBR MÉDIO (%)	Desvio Padrão CBR (%)	Coefficiente de Variação CBR (%)
100% Solo BR-120	0	1	0,11	10,88	0,12	10	0,47	4,65
		2	0,14	10,83				
		3	0,12	10,05				
75% Solo BR-120 + 25% LBRO	60	1	0,27	5,56	0,31	5	0,28	5,55
		2	0,31	5,17				
		3	0,35	5,02				
50% Solo BR-120 + 50% LBRO	60	1	0,45	10,93	0,49	10	0,25	2,50
		2	0,53	10,44				
		3	0,50	10,78				
25% Solo BR-120 + 75% LBRO	60	1	0,67	15,90	0,60	16	1,22	7,63
		2	0,47	16,07				
		3	0,65	18,10				
100% LBRO	60	1	4,92	8,63	3,11	8	0,10	1,22
		2	2,65	8,73				
		3	1,76	8,54				

Figura 14 - Resultados do ensaio CBR das amostras com solo BR-120



Corteleti (2013) afirma que uma mistura com pH de 12,4 apresenta cal suficiente para toda a fase rápida de estabilização do solo e para dar início às reações pozolânicas, responsáveis por um consumo maior de CaO. Medeiros (2017) ressalta, ainda, que a manutenção da resistência, mesmo após a imersão em água, evidencia a cimentação em decorrência de reações pozolânicas, enquanto que amostras com baixos teores de cal, ao serem imersas em água, perdem sua resistência. Dentre os resultados obtidos nas misturas de Solo BR-120, a mistura de 25% Solo BR-120 + 75% LBRO é a que apresenta o maior valor de pH (8,36), portanto, assume-se que sua disponibilidade de CaO seja superior à das demais misturas, por conter maior porcentagem de LBRO, possibilitando, mesmo que de forma incompleta, o desenvolvimento de reações pozolânicas.

Em contrapartida, por haver, nas composições das demais misturas, uma porcentagem menor de resíduo, a disponibilidade dos elementos cimentantes não é suficiente para garantir a ocorrência de reações pozolânicas. Ademais, a imersão prévia dos corpos de prova proporciona um aumento do teor de umidade nas amostras que, segundo Lambe (1958), causa uma expansão da dupla camada difusa e uma conseqüente redução nas forças de atração entre as partículas. Nesse contexto, infere-se que as demais misturas, além de não desenvolverem reações pozolânicas, perderam os incrementos de resistência gerados pelas fases iniciais da estabilização dos solos após sua imersão.

A expansão do resíduo puro é a que mais se destaca, por alcançar o valor de 3,11%, valor este cinco vezes superior ao das demais amostras. A mineralogia do resíduo apresenta em sua composição o mineral etringita que, segundo pesquisadores (DERMATAS, 1995; TALLURI, 2013; MIGUEL, 2020), corresponde a um mineral altamente expansivo, sendo, portanto, considerado o principal responsável pela expansão acentuada da LBRO, inviabilizando sua aplicação na condição não combinada em quaisquer camadas do pavimento.

A amostra de Solo 100% BR-120 conta com a presença do argilomineral ilita que, segundo Grim (1962), é constituído por uma folha octaédrica intercalada a duas folhas tetraédricas, sendo as camadas estruturais ligadas por cátions monovalentes, normalmente K^+ . Nesse contexto, Olphen (1963) afirma que os minerais ilita não apresentam expansibilidade intracristalina devido à forte ligação iônica gerada pelos íons K^+ entre as camadas estruturais. Dessa forma, as misturas de Solo BR-120 e LBRO apresentam expansão diretamente proporcional ao aumento da porcentagem de resíduo, mas, em virtude da baixa presença de etringita nas misturas e à característica não expansiva dos minerais do solo, todas apresentam Expansão inferior a 1%.

Dessa forma, segundo a norma ES 139 (DNIT, 2010a), para a aplicação em sub-base é necessário que os materiais tenham $CBR \geq 20\%$ e $Expansão \leq 1\%$. Apesar de todas as amostras, com exceção do resíduo, apresentarem expansão inferior a 1%, em nenhuma delas a capacidade de suporte se apresenta satisfatória para aplicação nessa camada. Já a norma ES 138 (DNIT, 2010b) estabelece os critérios para aplicação de materiais como reforço de subleito, exigindo uma Expansão inferior a 2%, CBR superior ao do subleito e índice de grupo (IG) no máximo igual ao do solo da camada inferior. Dessa forma, ao avaliar isoladamente as propriedades das amostras, apenas a amostra 100% LBRO não foi satisfatória para aplicação nessa camada, em virtude de seu valor de Expansão.

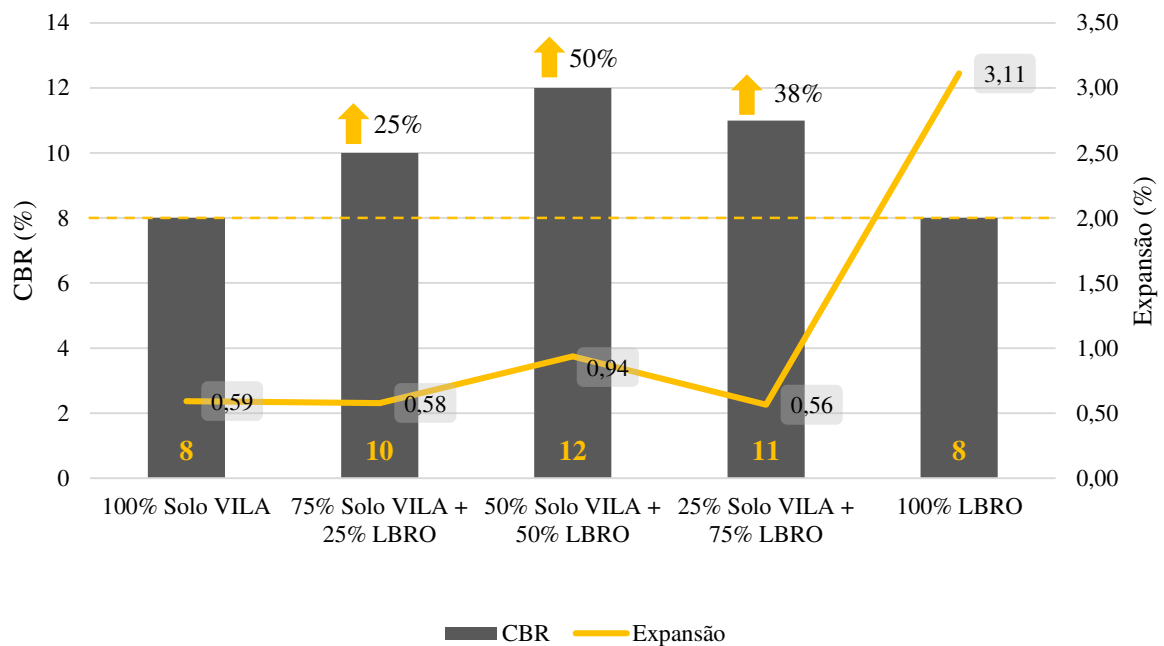
3.6.2 Solo VILA

Os resultados do índice CBR e da Expansão das amostras compactadas nas respectivas umidades ótimas do solo VILA e das misturas solo VILA-resíduo LBRO, nas proporções previamente estabelecidas, estão apresentados na Tabela 16 e na Figura 15. As variações percentuais de CBR, em relação ao solo VILA, também se encontram na Figura 15.

Tabela 16 - Resultados do ensaio CBR para amostras com solo VILA

Amostras	Determ.	Expansão (%)	CBR (%)	Expansão MÉDIA (%)	CBR MÉDIO (%)	Desvio Padrão CBR (%)	Coefficiente de Variação CBR (%)
100% Solo VILA	1	0,75	8,83				
	2	0,67	7,95	0,59	8	0,59	7,38
	3	0,35	9,07				
75% Solo VILA + 25% LBRO	1	0,62	10,63				
	2	0,49	10,78	0,58	10	0,25	2,50
	3	0,62	10,29				
50% Solo VILA + 50% LBRO	1	0,85	12,34				
	2	1,14	12,63	0,94	12	0,29	2,44
	3	0,82	12,05				
25% Solo VILA + 75% LBRO	1	0,32	11,17				
	2	0,57	12,10	0,56	11	0,60	5,45
	3	0,81	12,29				
100% LBRO	1	4,92	8,63				
	2	2,65	8,73	3,11	8	0,10	1,22
	3	1,76	8,54				

Figura 15 - Resultados do ensaio CBR das amostras com solo VILA



Os resultados do ensaio CBR indicam que as amostras de 100% Solo VILA e 100% LBRO apresentam a mesma capacidade de suporte. Entretanto, as três amostras compostas por esses materiais, em diferentes proporções, geram resultados superiores aos obtidos para seus componentes de origem.

Com o aumento da percentagem de LBRO, as misturas de Solo VILA e LBRO apresentaram, em sua granulometria, uma redução da fração grossa e um aumento na fração fina, fazendo com que os desempenhos das misturas fossem classificados como inferiores ao do solo puro, segundo o TRB, quando aplicados em camadas de subleito. Entretanto, observa-se que as três misturas apresentam índices CBR superiores ao do solo VILA, resultados que vão de encontro ao especificado pela classificação TRB, possivelmente em razão do processo de estabilização granulométrica, que se mostra mais eficiente na amostra 50% Solo VILA + 50% LBRO.

A etapa de imersão, inerente ao ensaio em questão, garante a entrada de água nos corpos de prova, aproximando-os de um estado saturado, no qual as forças de sucção podem ser consideradas desprezíveis. Dessa forma, infere-se que os aumentos de capacidade de suporte observados nas misturas sejam provenientes do processo de cimentação, visto que a entrada de água não gera redução de resistência em comparação ao solo puro, e ao processo de estabilização granulométrica.

Considerando a mineralogia observada na amostra 25% Solo VILA + 75% LBRO, observa-se a presença do mineral etringita, o qual possui influência direta na capacidade

expansiva do material e, segundo Taylor (1997), está relacionado com o processo de cimentação. Assim, infere-se que a amostra de 50% Solo VILA + 50% LBRO possui uma maior capacidade de cimentação de suas partículas e, conseqüentemente, uma maior presença do mineral etringita em sua composição, uma vez que apresenta o maior índice CBR e a maior Expansão dentre as misturas.

Nesse contexto, considerando os valores de CBR, suas respectivas Expansões e os critérios estabelecidos pelo DNIT (2006), todas as misturas encontram-se aptas a serem aplicadas em camadas de reforço de subleito, desde que o CBR da camada de subleito seja inferior ao das misturas.

3.7 Ensaios de Módulo de Resiliência

Considerando os ensaios mecânicos previamente apresentados (RCS, RTCD e CBR), pode-se destacar o desempenho da mistura 25% BR-120 + 75% LBRO, visto que apresentou os valores mais elevados em cada ensaio. Em relação ao solo VILA, notam-se desempenhos muito semelhantes entre as misturas de 50% Solo VILA e 25% Solo VILA. Nesse contexto, optou-se pela realização do ensaio de Módulo de Resiliência (MR) com as misturas de 25% BR-120 + 75% LBRO e 25% Solo VILA + 75% LBRO, por apresentarem melhores desempenhos mecânicos e conter uma maior percentagem de resíduo. Foram submetidas ainda ao ensaio MR as amostras de 100% Solo VILA e 100% Solo BR-120.

Para avaliar os resultados obtidos nos ensaios MR, foi utilizado o modelo composto, por considerar, simultaneamente, a influência das tensões desvio (σ_3) e confinante (σ_a), além de fornecer uma boa previsão dos valores de MR, independente da granulometria das amostras.

3.7.1 Solo BR-120

Na Tabela 17 são apresentados os resultados de MR para as amostras de 100% Solo BR-120 e de 25% Solo BR-120 + 75% LBRO. A análise através do modelo composto forneceu os parâmetros k_1 , k_2 e k_3 bem como os coeficientes de correlação (R^2) apresentados na Tabela 18.

Tabela 17 - Resultados do ensaio MR para as amostras como solo BR-120

σ_3 (MPa)	σ_d (MPa)	MR (MPa)	
		100% BR-120	25% BR-120 +75% LBRO
0,020	0,020	38,94	30,03
0,020	0,040	34,58	26,25
0,020	0,060	31,89	26,99
0,035	0,035	36,39	27,55
0,035	0,070	36,22	30,65
0,035	0,105	35,24	34,04
0,050	0,050	40,53	31,39
0,050	0,100	37,48	35,93
0,050	0,150	35,06	36,78
0,070	0,070	44,28	36,15
0,070	0,140	38,60	41,14
0,070	0,210	39,95	40,09

Tabela 18 - Parâmetros do modelo composto para as amostras com solo BR-120

Modelo composto	Amostras	k_1	k_2	k_3	R^2
$MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3}$	100% BR-120	58,873	0,231	-0,110	0,795
	25% BR-120 +75% LBRO	77,858	0,189	0,097	0,858

Na amostra 100% BR-120, a variação positiva do Módulo de Resiliência está condicionada ao fato de que o ganho causado pela tensão confinante ($k_2 > 0$) deve ser superior à redução causada pela tensão desvio ($k_3 < 0$), conforme mostrado pela Figura 16. Na região em vermelho, ocorre, em decorrência do aumento do valor da tensão confinante e da redução da tensão desvio, uma condição que potencializa os ganhos e minimiza as reduções nos valores de MR, enquanto a região em azul, a qual identifica os menores valores de Módulo de Resiliência, está associada a valores mais baixos de tensão confinante e aos mais elevados de tensão desvio.

Já para a amostra 25% BR-120 +75% LBRO, o aumento das tensões confinante e desvio gera uma variação positiva no Módulo de Resiliência ($k_2 > 0$; $k_3 > 0$), conforme apresentado pela Figura 17, na qual a região em vermelho, que indica os maiores valores de MR, está associada aos maiores valores de tensões desvio e confinante, enquanto a região em azul, que indica os menores valores de Módulo de Resiliência, relaciona os menores valores das tensões.

Figura 16 – Superfície de resposta do modelo composto para 100% BR-120

$$MR = 58,873 \cdot \sigma_3^{0,231} \cdot \sigma_d^{-0,110}$$

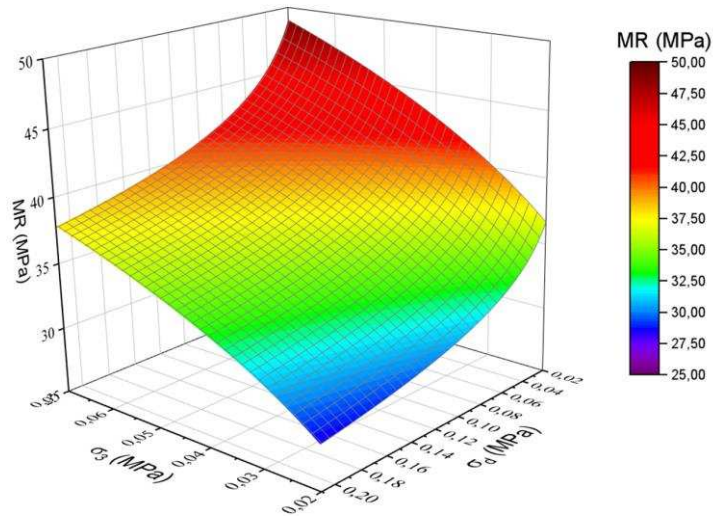
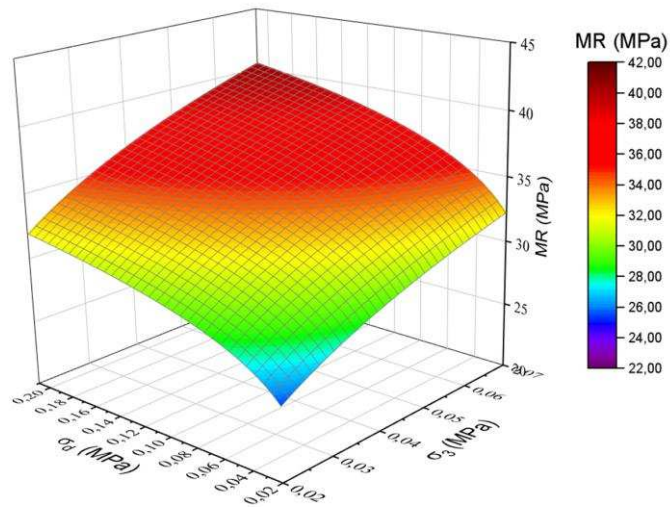


Figura 17 – Superfície de resposta do modelo composto para 25% BR-120 + 75% LBRO

$$MR = 77,858 \cdot \sigma_3^{0,189} \cdot \sigma_d^{0,097}$$



A caracterização geotécnica das amostras indicou que a incorporação do resíduo ao solo gerou uma queda considerável no índice de plasticidade da amostra 25% Solo BR-120 + 75% LBRO, tornando-a praticamente não plástica (IP=2%). Os ensaios de compactação, por sua vez, mostraram que a adição da LBRO ao solo causou um aumento da massa específica seca das amostras. Drumm, Boateng-Poku e Pierce (1990) definiram, em sua pesquisa, que a variação do Módulo de Resiliência é diretamente proporcional ao índice de plasticidade da amostra, enquanto a massa específica seca interfere de forma inversamente proporcional nos resultados.

Dessa forma, percebe-se, pelas Figuras 16 e 17, que a amostra 100% Solo BR-120 apresenta valores mínimos e máximos de Módulo de Resiliência, para os pares de tensão observados, superiores aos da amostra 25% Solo BR-120 + 75% LBRO, refletindo as tendências de comportamento observadas por Drumm, Boateng-Poku e Pierce (1990).

Nesse contexto, a redução dos valores de MR da mistura, em comparação com o solo puro, se mostra pouco significativa, já que a ordem de grandeza dos resultados se mantém. Dessa forma, pode-se considerar tecnicamente viável a substituição de 75% do solo natural pela LBRO.

3.7.2 Solo Vila

Na Tabela 19 são apresentados os resultados de MR para as amostras de 100% Solo VILA e de 25% Solo Vila + 75% LBRO. A análise através do modelo composto forneceu os parâmetros k_1 , k_2 e k_3 bem como os coeficientes de correlação (R^2) apresentados na Tabela 20.

Nota-se que os coeficientes de correlação para o modelo composto apresentam valores elevados para ambas as amostras, indicando particularmente um ajuste aceitável dos resultados da mistura, ao apresentar um R^2 de 0,979. O parâmetro k_2 está relacionado com a tensão confinante, indicando que, para ambas as amostras, a variação do MR é diretamente proporcional à variação da tensão confinante.

Tabela 19 - Resultados do ensaio MR para as amostras com solo VILA

σ_3 (MPa)	σ_d (MPa)	MR (MPa)	
		100% VILA	25% VILA +75% LBRO
0,020	0,020	17,62	20,89
0,020	0,040	19,58	19,54
0,020	0,060	21,25	20,86
0,035	0,035	28,22	23,14
0,035	0,070	26,11	25,82
0,035	0,105	23,14	27,56
0,050	0,050	30,50	26,96
0,050	0,100	32,67	30,46
0,050	0,150	28,15	30,99
0,070	0,070	35,30	31,36
0,070	0,140	37,31	34,68
0,070	0,210	30,18	36,41

Tabela 20 - Parâmetros do modelo composto para as amostras com Solo VILA

Modelo composto	Amostras	k_1	k_2	k_3	R^2
$MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3}$	100% VILA	118,306	0,516	-0,071	0,883
	25% VILA +75% LBRO	95,141	0,294	0,120	0,979

Já os parâmetros k_3 , associados à tensão desvio, estão relacionados com a variação causada aos valores de MR de formas opostas em cada amostra. Para a amostra composta apenas por solo, o parâmetro k_3 , por ser negativo, causa uma redução nos valores de MR, a cada par de tensão, que variam em função do aumento da tensão desvio à qual a amostra foi submetida. Para a amostra com resíduo em sua composição, k_3 atua com incrementos positivos no valor de MR, indicando uma relação direta com as variações de tensão desvio.

Na Figura 18, pode-se notar a grande influência da tensão confinante nos valores de MR do solo, identificada pela considerável inclinação da superfície com o aumento dessa tensão e pela evolução gradual das cores no eixo de σ_3 . Já para o aumento da tensão desvio, percebe-se uma suave queda nos valores de MR, reforçada pela predominância das cores roxo e azul ao longo desse eixo. Já para a mistura 25% Solo VILA + 75% LBRO, o fato dos coeficientes k_1 e k_2 serem positivos faz com que a superfície de resposta apresentada na Figura 19 possua um comportamento que tende à simetria, na qual é possível perceber inclinações consideráveis em ambos os eixos, sendo a inclinação associada à tensão confinante superior à da tensão desvio, além de uma evolução similar e gradual das cores em ambos os eixos.

Figura 18 – Superfície de resposta do modelo composto para 100% VILA

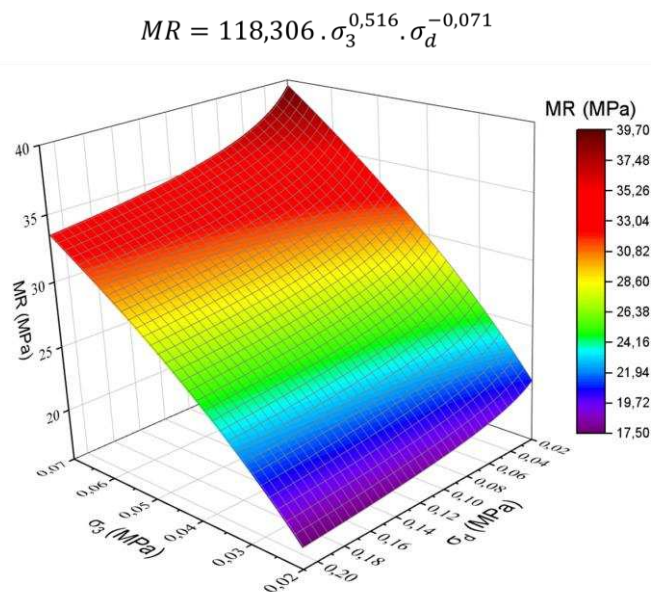
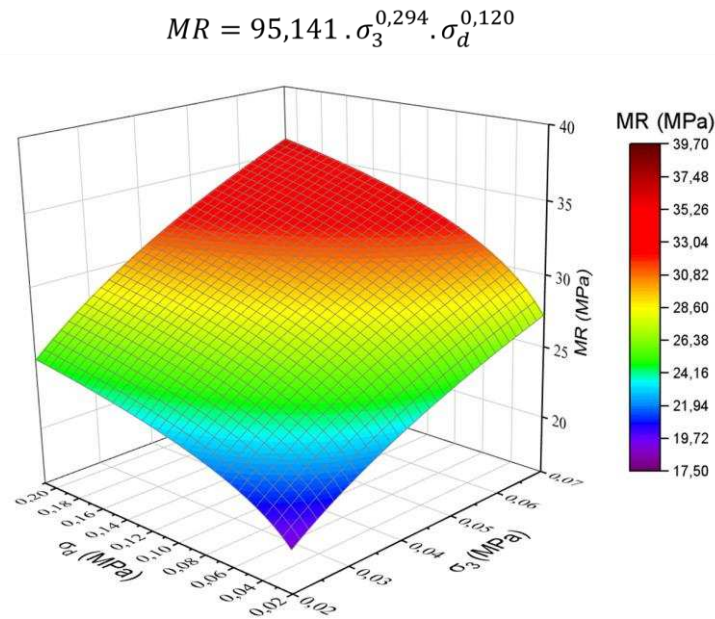


Figura 19 – Superfície de resposta do modelo composto para mistura de 25% Solo VILA +75% LBRO



Carmo (1998) afirma que, para solos puramente arenosos, o valor do Módulo de Resiliência depende majoritariamente do nível de confinamento ao qual o material é submetido, sendo pequena a influência de outras variáveis. Sant'Anna (2003) defende que a adição de CaO e o tempo de cura são fatores que exercem forte influência sobre os valores de k_1 e k_2 e, conseqüentemente, para os valores de MR. Dessa forma, nota-se que ocorre uma variação significativa nos valores de k_1 e k_2 , provavelmente em razão da formação de géis cimentícios.

Hicks (1970) afirma que a tensão confinante aplicada no ensaio de Módulo de Resiliência gera maior influência sobre os solos arenosos. Entretanto, ao misturar o solo arenoso com o resíduo, ele adquire uma granulometria que pode ser associada a um silte arenoso, fazendo com que o Módulo de Resiliência da amostra sofra influência das tensões confinante e desvio de formas similares.

Segundo Rodrigues (1997), solos com IP maiores apresentam Módulos de Resiliência superiores, justificando os valores de MR obtidos na amostra 100% Solo VILA superiores ao da mistura avaliada. Contudo, com o avanço do ensaio e a aplicação de pares de tensão com maior sollicitação, a mistura passa a apresentar melhor desempenho, tanto em razão dos compostos cimentantes quanto em razão do aumento da fração fina do solo, a qual, segundo Svenson (1980), associa os valores de MR com a tensão desvio.

Dessa forma, por apresentar uma tendência contínua de crescimento nos valores de MR, considerando o aumento das tensões aplicadas ao sistema, e valores muito próximos ao do solo,

a substituição parcial de solo por resíduo reflete a viabilidade mecânica necessária para aplicar a mistura em substituição ao solo natural tradicionalmente usado.

4 CONCLUSÃO

O objetivo da pesquisa foi avaliar os comportamentos geotécnico e de engenharia das misturas de solo e resíduo sólido decorrente do processo de beneficiamento de rochas ornamentais (LBRO) em diferentes proporções para a sua aplicação em camadas estruturais do pavimento. A viabilização da substituição parcial do solo por resíduo possibilita uma redução no impacto ambiental provocado pela movimentação de solo, processo tradicional em obras relacionadas à pavimentação, além de fornecer uma solução sustentável para a aplicação do resíduo. Dessa forma, a partir dos resultados obtidos para amostras com cura de 60 dias para aquelas que possuem LBRO em sua composição, em câmara úmida, e sem cura para os solos puros compactadas na energia Proctor normal, é possível concluir que:

- ✓ Nos ensaios de Resistência à Compressão Simples (RCS) e Resistência à Tração por Compressão Diametral (RTCD), considerando-se todas as misturas de LBRO com Solo BR-120 e Solo VILA avaliadas nesta pesquisa, o resíduo foi responsável por incremento na resistência em todas as amostras, com exceção da amostra de 25% Solo BR-120 + 75% LBRO;
- ✓ No ensaio de RTCD, as percentagens de 50% Solo VILA + 50% LBRO e 75% Solo VILA + 25% LBRO apresentam o mesmo valor de resistência. Para as demais misturas, o aumento da resistência é diretamente proporcional à percentagem de LBRO, tanto para o ensaio RTCD quanto para o ensaio RCS;
- ✓ Para o resíduo LBRO, o valor de Expansão observado inviabiliza sua implementação em quaisquer camadas estruturais de pavimento asfáltico segundo as exigências do DNIT (2006);
- ✓ As misturas de solo BR-120 e LBRO, nas três proporções avaliadas, apresentam valores satisfatórios de Expansão, os quais se enquadram nas exigências do DNIT (2006) para aplicação em quaisquer camadas estruturais, com exceção da mistura de 25% Solo BR-120 + 75% LBRO, cuja expansão é indicada apenas para camadas de sub-base e reforço de subleito. No entanto, todas as misturas têm sua aplicação restringida pelo índice CBR apenas à camada de reforço de subleito, desde que o CBR das misturas seja superior ao da camada de subleito;

- ✓ Na mistura contendo solo VILA, todas as amostras apresentaram um aumento na capacidade de suporte em relação ao solo puro, no entanto os valores de índice CBR ainda são inferiores ao exigido pelo DNIT (2006) em certas camadas estruturais de pavimento asfáltico, restringindo o seu uso apenas em camadas de reforço de subleito. As Expansões CBR apresentadas são inferiores a 1%, em todas as misturas, o que é compatível com a exigência relativa a esse parâmetro para a camada de reforço de subleito;
- ✓ O modelo matemático composto foi o que melhor se ajustou aos resultados do ensaio de Módulo de Resiliência (MR) e indicou, para as misturas de 25% Solo BR-120 + 75% LBRO e 25% Solo VILA + 75% LBRO, uma tendência de variação dos valores de MR proporcional à variação das tensões confinante e desvio. Essa tendência foi distinta da apresentada pelas amostras de solos puros, as quais apresentaram variação inversamente proporcional entre os resultados do MR e os valores de tensão desvio aplicados;
- ✓ Logo, as misturas solo-resíduo investigadas, submetidas à energia Proctor normal, apresentam resultados que podem viabilizar a sua implementação na camada de reforço de subleito, oferecendo uma alternativa sustentável para a destinação da Lama de Beneficiamento de Rochas Ornamentais (LBRO) e redução do impacto da movimentação de solo em jazidas naturais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMED, H. M.; ABDELHAFFEZ, G. S.; AHMED, A. A. Potential use of marble and granite solid wastes as environmentally friendly coarse particulate in civil constructions. **International Journal Of Environmental Science And Technology**, nov. 2020. Springer Science and Business Media LLC.

ALMEIDA, S. L. M; PONTES, I. F. **Aproveitamento de Rejeitos de Pedreiras e Finos de Serrarias de Rochas Ornamentais Brasileiras**. In: III Simpósio Brasileiro de Rochas Ornamentais do Nordeste, 2001, p. 89-100.

ALUKO, O. B.; KOOLEN, A.J. The essential mechanics of capillary crumbling of structured agricultural soils. **Soil And Tillage Research**, v. 55, n. 3-4, p. 117-126, jun. 2000.

ALVES, J. O.; JUNCA, E.; ESPINOSA, D. C. R.; TENÓRIO, J. A. S. Resíduo do corte de granito: inovação tecnológica para a destinação final. **Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineração**, v. 12, n. 2, p. 123-128, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS (ABIROCHAS). **O Setor Brasileiro de Rochas Ornamentais**. São Paulo. 2018. Disponível em: <http://abirochas.com.br>. Acesso em: 06 fev. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Amostragem de resíduos sólidos**. Norma técnica NBR 10007. Rio de Janeiro: ABNT, 2004a. 71 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Ensaio de compactação**. Norma técnica NBR 7182. Rio de Janeiro: ABNT, 2016f. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água**. Norma técnica NBR 6458. Rio de Janeiro: ABNT, 2016d. 10 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Índice de Suporte Califórnia**. Norma técnica NBR 9895. Rio de Janeiro: ABNT, 2016g. 14 p.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Solo - Determinação do grau de acidez**. Norma técnica NBR 9252. Rio de Janeiro: ABNT, 2016e. 2p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Solo – Determinação do limite de liquidez**. Norma técnica NBR 6459. Rio de Janeiro: ABNT, 2016b. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Solo – Determinação do limite de plasticidade**. Norma técnica NBR 7180. Rio de Janeiro: ABNT, 2016c. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Solo-cimento - Ensaio de compactação**. Norma técnica NBR 12023. Rio de Janeiro: ABNT, 2012a. 7 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Solo-cimento – Ensaio de compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos**. Norma técnica NBR 12025 – MB 3361/1990. Rio de Janeiro: ABNT, 2012b. 2 p.

BARZEGAR, A. R.; RENGASAMY, P.; OADES, J. M. Effects of clay type and rate of wetting on the mellowing of compacted soils. **Geoderma**, v. 68, n. 1-2, p. 39-49, set. 1995.

BASTOS, I. A. **Utilização de resíduos de rochas ornamentais na fabricação de vidros sodocálcicos**. 2018. 86 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia e Desenvolvimento Sustentável, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2018.

BIGARELLA, J. J.; BECKER, R. D.; SANTOS, G. F. dos. **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais: Fundamentos geológico-geográficos, alteração química e física das rochas**. Ed. da Universidade Federal de Santa Catarina, 1994.

BRITO, L. C.; PARANHOS, H. da S. Estabilização de Solos. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**. Edição 06. Ano 02, Vol. 01. pp 425-438, Setembro de 2017. ISSN:2448-0959.

CHANG, T. S.; WOODS, R. D. Effect of particle contact bond on shear modulus. **Journal of Geotechnical Engineering**, New York: ASCE, v. 107, n. 6, p. 799-817, Aug. 1992.

CARMO, C. A. T. do. **A avaliação do módulo de resiliência através de ensaios triaxiais dinâmicos de dois solos compactados e a sua estimativa a partir de ensaios rotineiros**. 1998. 131 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

CORTELETI, E. J. B. **Melhoramento do solo residual de lajeado com a adição de cal**. 2013. 57 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro Universitário UNIVATES, Lajeado, 2013.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **Coleta de amostras deformadas de solos**. PRO 003/94. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro - RJ, 4p. 1994a.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER. **Solos estabilizados com cinza volante e cal hidratada – Determinação da resistência à tração por compressão diametral**. DNER-ME 181/94. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro - RJ, 7p. 1994b.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Manual de Pavimentação**. 3 ed. Rio de Janeiro, 2006. 274 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Pavimentação–Reforço do subleito - Especificação de serviço**. DNIT 138. Rio de Janeiro, 2010b. 7 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio**. DNIT 134. Rio de Janeiro, 2018. 18 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Pavimentação–Sub-base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço**. DNIT 139. Rio de Janeiro, 2010a. 8 p.

DERMATAS, D. Ettringite-induced swelling in soils: State-of-the-art. **Applied Mechanics Review**, v. 48, n. 10, p. 659-673, 1995.

DRUMM, E. C.; BOATENG-POKU, Y.; PIERCE, T. J. Estimation of Subgrade Resilient Modulus from Standard Tests. **Journal of Geotechnical Engineering**, v.116, n.5, p.774-789.1990.

ELTWATI, A. S.; TARHUNI, F.; ELKASEH, A. Engineering properties of clayey soil stabilized with waste granite dust. **Journal Of Critical Reviews**, v. 7, n. 16, p. 794-802, jun. 2020.

ELTWATI, A.; ELKASEH, A.; TARHUNI, F.; BUAGELA, S. A. Potential of granite dust to improve the engineering properties of soft soils for road construction. **Science Proceedings Series**, v. 2, n. 1, p. 55-61, abr. 2020.

GALLIPOLI, D.; WHEELER, S. J.; KARSTUNEN, M. Modelling the variation of degree of saturation in a deformable unsaturated soil. **Géotechnique**, 53, p.105-112. 2003.

GRIM, R. E. **Clay Mineralogy**. 1. ed. New York, US: McGraw Hill, 1953.

GRIM, R. E. Clay Mineralogy: The clay mineral composition of soils and clays is providing an understanding of their properties. **Science**, v.135, n.3507, p.890–898, 1962.

GUPTA, L. K.; VYAS, A. K. Impact on mechanical properties of cement sand mortar containing waste granite powder. **Construction And Building Materials**, v. 191, p. 155-164, dez. 2018.

HICKS, R. G. **Factores Influencing the Resilient Properties of Granular Materials**. 1970. Tese de PhD - Universidade da Califórnia, Berkeley, 1970.

KLINSKY, L. M. G.; BARDINI, V. S. dos S.; FABBRI, G. T. P. Efeito da adição de areia de fundição residual e cal a solos argilosos no módulo de resiliência. **Transportes**, v. 22, n. 2, p. 1-10, 2014.

LAMBE, T. W. The structure of compacted clay. **Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division**. v.84, n.2, p. 1-34, 1958.

LOCH, F. C. **Barreiras de solos estabilizados com cal e cimento para proteção ambiental**. (Dissertação de Mestrado) p. 241. Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos. 2013.

LOPES, M. M. S.; ALVARENGA, R. C. S. S.; PEDROTI, L. G.; RIBEIRO, J. C. L.; CARVALHO, A. F.; CARDOSO, F. P.; MENDES, B. C. Influence of the incorporation of granite waste on the hiding power and abrasion resistance of soil pigment-based paints. **Construction And Building Materials**, v. 205, p. 463-474, abr. 2019.

LUCENA, D. V.; AMORIM, L. V.; LIRA, H. L. Análise da reatividade de folhelhos do Recôncavo Baiano. **Cerâmica**, v. 62, n. 362, p. 163-169, jun. 2016.

LUNZ, K. B.; PINHEIRO, J. L. M.; SANTOS, K. M.; RODRIGUES, K. H. P.; FERRAZ, R. L.; PITANGA, H. N. **Avaliação do potencial de aproveitamento geotécnico de resíduos de desdobramento de rochas graníticas**. In: IX CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL E VIII CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOSINTÉTICOS, 2019, São Carlos. p. 73 – 80.

MACÊDO, J. A. G. **Interpretação de ensaios deflectométricos para avaliação estrutural de pavimentos flexíveis**. 1996. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro.

MEDEIROS, A. A. de L. **Contribuição ao estudo da dosagem de cal para a estabilização de um solo de comportamento laterítico e um não laterítico**. 2017. 104 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

MEHTA, P. K. **Concrete: structure, properties and materials**. New Jersey: Prentice-Hall, 1986

MEXIAS, A. S. **Comunicação verbal**. Laboratório de Difractometria de Raios-X, UFRGS. Porto Alegre, 2004.

MIGUEL, G. D. **Desempenho e Comportamento Mecânico de Um Solo Dispersivo e Sulfatado Tratado com uma Pozolana Artificial, Cal de Carbureto e Reforçado com Fibras de Vidro**. 2020. 250 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

MONTANI, C. XXXI Rapporto Marmo e Pietre nel Mondo 2020. Aldus: Carrara (IT), 2020. 263 p.

NASCIMENTO, A. S.; SANTOS, C. P. dos; MELO, F. M. C. de; OLIVEIRA, V. G. A.; OLIVEIRA, R. M. P. B.; MACEDO, Z. S.; OLIVEIRA, H. A. de. Production of plaster mortar with incorporation of granite cutting wastes. **Journal Of Cleaner Production**, v. 265, n. 121808, p. 1-7, ago. 2020.

OLPHEN, H. V. **An introduction to clay colloid chemistry**. Willey Interscience, New York. 1963.

ORMSBY, W. C.; KINTER, E. B. Effects of Dolomitic and Calcitic Limes on Strength Development in Mixtures with Two Clay Minerals. **Public Roads**. v.37, n.4, p.149-160. 1973.

OSTROWSKI, K.; STEFANIUK, D.; SADOWSKI, Ł. Z; KRZYWIŃSKI, K.; GICALA, M.; RÓŚAŃSKA, M. Potential use of granite waste sourced from rock processing for the application as coarse aggregate in high-performance self-compacting concrete. **Construction And Building Materials**, v. 238, n. 117794, p. 1-14, mar. 2020.

PARENTE, E. B.; PARREIRA, A. B.; SOARES, J. B. **Avaliação do comportamento mecânico de um solo laterítico e de outro não laterítico estabilizados com cimento**. In Anais: Panorama Nacional de Pesquisa em Transportes. Rio de Janeiro: ANPET, 2002.

PETRÓ, S. M.; PIVEL, M. A. G.; COIMBRA, J. C. Implicações da dissolução de carbonato de cálcio pelágico em reconstruções paleoceanográficas do Quaternário. **Quaternary And Environmental Geosciences**, v. 7, n. 1-2, p. 14-25, 2016.

PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de cimento Portland**. São Paulo: Globo, 2005.

PRUSINSKI, J. R.; BHATTACHARJA, S. Effectiveness of Portland Cement and Lime in Stabilizing Clay Soils. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 1652, n. 1, p. 215-227, jan. 1999.

- RAIJ, B. V. **Gesso na agricultura**. Campinas: Instituto Agronômico, 2008. 233p.
- REEHANA, S.; SATEESH KUMAR, K. Effect of Granite Dust in Improving Engineering Properties of Black Cotton Soil. **International Journal Of Scientific Engineering And Technology Research**, v. 7, n. 9, p. 1735-1739, set. 2018.
- REIS, A. S.; ALVAREZ, C. E. **A sustentabilidade e o resíduo gerado no beneficiamento das rochas ornamentais**. In: IV Encontro Nacional e II Encontro Latino-americano sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis, 2007, p. 511 -520.
- RODRIGUES, M. R. de. **Influência da sucção no módulo de resiliência de solos típicos de subleito de pavimentos do rio grande do sul**. 1997. 106 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.
- SANT'ANNA, G. L.; MACHADO, C. C.; CARVALHO, C. A. B. de; LIMA, D. C. de; MINETTI, L. J. Módulo de resiliência de um solo arenoso e de suas misturas com alcatrão fracionado e cal. **Revista Árvore**, v. 27, n. 4, p. 527-534, ago. 2003.
- SANTOS, N. M. **Uso de rejeito do beneficiamento de granito para substituição parcial de um solo em camadas de pavimentação / Natália Medeiros dos Santos**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.
- SILVA, A. M.; LUCENA, L. C. F. L.; LUCENA, A. E. F. L.; MARINHO FILHO, P. G. T.; COSTA, L. F.; FERREIRA, J.. Evaluation of a Soil in Terms of Resistance to Simple Compression, Tensile Strength for Diametral Compression and Resilience Module, Considering Results of Different Types of Compactation. **Anuário do Instituto de Geociências - Ufrj**, v. 39, n. 3, p. 41-47, set. 2016.
- SILVEIRA L. L. L.; VIDAL F. W. H.; SOUZA J. C. **Beneficiamento de rochas ornamentais**. CETEM/MCTI, Rio de Janeiro, 2014.
- SIVRIKAYA, O.; KÖRÜK, K. R.; KARACA, Z. Recycling waste from natural stone processing plants to stabilise clayey soil. **Environmental Earth Sciences**, v. 71, n. 10, p. 4397-4407, 4 out. 2013. Springer Science and Business Media LLC.
- SVENSON, M. **Ensaio triaxiais dinâmicos de solos argilosos**. 1980. 135 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1980.
- TALLURI, N. **Stabilization of high sulfate soils**. Doctoral Dissertation (Doctor of Philosophy) - Faculty of the Graduate School, University of Texas at Arlington (UT Arlington), Arlington, US, 2013.
- TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry**. Telford, 1997.
- TOWNER, G. D. The mechanics of cracking of drying clay. **Journal of Agricultural Engineering**, 36, 115-124. 1987.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. **Lime Stabilization, reactions, properties, design and construction.** Washington: TRB, 1987. 58p.

VILLAR, L. F. S.; CAMPOS, T. M. P. de; ZORNBERG, J. G. **Relação Entre a Resistência a Tração Obtida via Ensaio Brasileiro, a Sucção e Índices Físicos de um Solo.** *In: VI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS*, 2007, Salvador, p. 421 – 432.

VIJAYALAKSHMI, M.; SEKAR, A. S. S.; GANESH PRABHU, G. Strength and durability properties of concrete made with granite industry waste. **Construction And Building Materials**, v. 46, p. 1-7, set. 2013.

WHEELER, S. J.; KARUBE, D. **Constitutive modeling.** *In: 1st Conference on Unsaturated Soils*, Paris. Balkema, 3, 1323-1356. 1996.

ZAINUDDIN, N.; YUNUS, N. Z. M.; AL-BARED, M. A. M.; MARTO, A.; HARAHAP, I. S. H.; RASHID, A. S. A. Measuring the engineering properties of marine clay treated with disposed granite waste. **Measurement**, v. 131, n. 0, p. 50-60, jan. 2019.

ZAMARKI, B. C.; HENTGES, T. I.; FABRIS, B. R. Desempenho técnico de blocos de concreto para pavimentação fabricados com incorporação parcial de resíduo de granito. **Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental**, Florianópolis, v. 9, p. 441-457, mai. 2020.

ZULCÃO, R.; CALMON, J. L.; REBELLO, T. A.; VIEIRA, D. R. Life cycle assessment of the ornamental stone processing waste use in cement-based building materials. **Construction And Building Materials**, v. 257, n. 119523, p. 1-14, out. 2020.

CAPÍTULO 3

CONCLUSÕES GERAIS

A proposta dessa pesquisa foi de analisar o comportamento geotécnico da Lama de Beneficiamento de Rochas Ornamentais (LBRO) de origem granítica aplicada ao solo puro, buscando avaliar o potencial de aproveitamento técnico desse resíduo na composição de camadas estruturais de pavimentos asfálticos. Com esse objetivo, verificou-se a influência da percentagem, em massa, do resíduo nas amostras e o efeito do tempo de cura em determinadas propriedades de engenharia. Dessa forma, foram realizados ensaios de caracterização geotécnica dos materiais, ensaios químicos, mineralógicos, morfológicos, ensaios de compactação e ensaios mecânicos.

O resíduo promoveu alterações nas características geotécnicas dos solos, as quais foram responsáveis por variações nas propriedades de engenharia de cada amostra solo-resíduo investigada comparativamente ao material geológico original. O Solo BR-120 apresentou a maior massa específica dentre as amostras estudadas, já o Solo VILA teve os valores mais baixos, enquanto a LBRO apresentou valores de massa específica intermediários a ambos os solos. Assim, as misturas com Solo BR-120 apresentaram massas específicas decrescentes com o aumento da percentagem de LBRO, ao passo que as misturas com Solo VILA apresentaram valores crescentes com o aumento da percentagem.

As misturas do Solo BR-120 apresentaram queda nos valores de massa específica, a partir da qual poderia se concluir pela não ocorrência de estabilização granulométrica, entretanto o fato da granulometria da LBRO ser mais grossa que a do Solo BR-120 faz com que as partículas de solo, com menor diâmetro, se organizem nos vazios existentes no resíduo, fazendo com que a queda no valor da massa específica esteja relacionada com a substituição parcial do solo por um material com menor peso específico.

Nas misturas de Solo VILA, apesar da adição do resíduo também gerar uma tendência de estabilização granulométrica, neste caso são as partículas finas do resíduo que preenchem os vazios do solo, composto por partículas grosseiras, fazendo com que as misturas se aproximem de uma granulometria bem graduada.

Essa alteração de granulometria fez com que todas as amostras de Solo BR-120 melhorassem sua classificação segundo o TRB, visando a aplicação em pavimentação, enquanto o Solo VILA apresentou uma piora na classificação das amostras, em relação ao solo puro. Outra alteração importante foi a redução dos índices de plasticidade com o aumento do

teor de LBRO na composição da amostra, indicando que o caráter não plástico do resíduo é dominante em uma mistura.

As amostras foram submetidas também a ensaios de análise química e mineralógica, nos quais identificou-se que a amostra de 100% Solo BR-120 possui teores elevados de SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 em função dos minerais quartzo, caulinita e ilita. A amostra de 100% Solo VILA apresenta minerais como quartzo e bementita, os quais contribuem para as porcentagens de SiO_2 , as presenças de muscovita, microlina e biotita contribuem para Al_2O_3 e K_2O , além de SiO_2 , enquanto a porcentagem de CaO foi atribuída à presença de portlandita. No ensaio de pH, ambos os solos foram classificados como ácidos, fator comum em solos tropicais.

Já na LBRO, identifica-se que o quartzo está associado ao SiO_2 , o CaO à presença de calcita, enquanto Al_2O_3 , Fe_2O_3 , K_2O são provenientes da presença de muscovita, albita e microlina. Nas misturas, notou-se uma composição dos minerais presentes nos materiais de origem, sendo notável a presença de etringita na mistura com Solo VILA e o consumo do argilomineral na mistura com Solo BR-120. Todas essas amostras foram classificadas como alcalinas, segundo seu pH. A tendência alcalina dessas amostras foi intensificada pelo processo de cura, o que se assume ter sido impulsionado por tendências cimentantes das misturas.

Nos ensaios de compactação, observa-se também a interveniência das alterações geotécnicas proporcionadas pelo resíduo sobre a compactabilidade das misturas solo-resíduo. As curvas de compactação das misturas com Solo BR-120 foram deslocadas para a esquerda e para cima à medida que se adiciona o resíduo, indicando uma redução do teor de umidade ótimo das amostras e um aumento no valor do peso específico aparente seco máximo ($\gamma_{\text{dmáx}}$). Em relação ao Solo VILA, o comportamento é inverso, uma vez que as curvas de compactação das misturas se deslocam para a direita e para baixo, comportamento associado à redução do $\gamma_{\text{dmáx}}$ e ao aumento do teor de umidade ótimo das amostras.

No ensaio de RCS, a amostra de 75% Solo BR-120 + 25% LBRO apresentou queda de resistência em relação ao solo, fenômeno atribuído ao fato de que a calcita disponível no meio não foi suficiente para liberar cátions de Ca^{2+} e realizar as trocas catiônicas necessárias, enquanto nas demais misturas as ocorrências de trocas catiônicas, floculação e agregação foram suficientes para gerar incrementos de resistência. Já no Solo VILA, o incremento ocorreu em todas as misturas, sugerindo a ocorrência de um processo de estabilização através da formação de géis cimentantes pouco organizados, uma vez que não foram identificados minerais decorrentes do processo de cimentação no ensaio DRX.

No ensaio de RTCD, verificou-se, novamente, uma queda de resistência na amostra 75% Solo BR-120 + 25% LBRO, possivelmente em razão da substituição parcial do solo rico em

mineral caulinita pela LBRO, que não possui argilominerais em sua composição, prejudicando, assim, o ganho de resistência. Inferiu-se, ainda, que a quantidade de resíduo incorporado ao solo não foi suficiente para garantir o início dos processos pozolânicos, não gerando, portanto, ganhos de resistência. Ademais, assume-se que a substituição da fração argila pela fração silte, decorrente da adição de LBRO ao solo, não tenha sido suficiente para gerar ganhos expressivos de resistência à tração, ao contrário do que ocorreu nas misturas de 50% Solo BR-120 + 50% LBRO e 25% Solo BR-120 + 75% LBRO. Em relação ao Solo VILA, pode-se assumir que os incrementos observados nos valores de RTCD das misturas ocorrem, de forma preponderante, em decorrência da formação de compostos cimentantes pouco organizados, visto que seus efeitos positivos na resistência são superiores aos efeitos negativos decorrentes da perda de sucção.

Já no ensaio CBR, a única mistura com Solo BR-120 que apresentou incremento na capacidade de suporte foi 25% Solo BR-120 + 75% LBRO, na qual assumiu-se que a maior disponibilidade de CaO, em virtude de seu pH, fez com que surgissem reações pozolânicas, mesmo que de maneira incompleta. Em relação às demais misturas, por conter uma percentagem menor de LBRO, as reações pozolânicas se desenvolveram de maneira muito sutil, tornando-se irrisórias diante da imersão dos corpos de prova e a consequente redução das forças de atração das partículas, em virtude da expansão da dupla camada difusa com o aumento do teor de umidade.

Para o Solo VILA, a mistura de 50% Solo VILA + 50% LBRO apresentou os maiores valores de CBR, os quais podem estar associados exclusivamente a um processo de cimentação, no qual a entrada de água não gera redução de resistência, mas é responsável pelo aumento de volume do solo, causando sua expansão. É notório ressaltar que, apesar da adição do resíduo ao solo arenoso ter feito com que as misturas fossem classificadas pelo sistema de classificação TRB, segundo sua granulometria, como materiais com baixo desempenho quando utilizados em subleitos, todas as misturas, após o tempo de cura, apresentaram desempenhos superiores ao solo puro, que, originalmente, foi classificado como um material cujo desempenho varia de excelente a bom, quando aplicado no subleito.

O resíduo se destacou quanto ao valor de sua Expansão, que alcançou o valor de 3,11%, muito superior às exigências que o DNIT (2006) estabelece para aplicação em camadas estruturais. Considerou-se que essa expansão está associada à presença do mineral etringita, identificado no resíduo pelo ensaio DRX. As expansões nas misturas de Solo BR-120 diminuem segundo a redução do teor de resíduo, visto que o solo puro apresenta em sua composição um argilomineral pouco expansivo.

Sendo assim, com exceção da amostra composta puramente por LBRO, todas as amostras apresentaram propriedades de engenharia que viabilizam, segundo o DNIT (2006), sua aplicação em camadas de reforço de subleito, em substituição parcial do solo.

Além das alterações nos valores de resistências (RCS, RTCD, CBR) e Expansão, o resíduo apresentou variações nos resultados do ensaio de Módulo de Resiliência, no qual os corpos de prova foram submetidos a carregamentos cíclicos. Para a mistura de Solo BR-120 avaliada, a adição de LBRO gera um aumento de rigidez da amostra em relação à tensão desvio, causando menores deformações, em função de leves reações pozolânicas, fazendo com que, segundo o modelo composto, os valores de MR aumentassem segundo o aumento dos pares de tensão. Já para o Solo VILA, o acréscimo de resíduo fez com que o solo deixasse de sofrer forte influência apenas da tensão confinante e passasse a sofrer influência tanto da tensão confinante quanto da tensão desvio de forma equilibrada.

Diante das diversas alterações nas propriedades de engenharia observadas nos ensaios realizados nessa pesquisa e nos resultados obtidos, é possível dizer que existe perspectiva de viabilidade técnica para a substituição parcial do solo, proveniente de jazidas naturais, por resíduos de beneficiamento de rochas ornamentais, tendo em vista tanto os incrementos de resistência e capacidade de suporte proporcionados pelo resíduo, quanto a alteração de propriedades geotécnicas que trazem benefícios à mistura, como a redução do índice de plasticidade. Ademais, considera-se ainda a importância ambiental da substituição, mesmo que parcialmente, de solos empregados em pavimentação, contribuindo para a preservação de jazidas naturais de empréstimos dos mesmos, além de contribuir para a redução do volume de resíduos destinados a aterros de contenção de resíduos, garantindo uma maior vida útil desses, que demandam grandes áreas para sua implantação.

Nesse contexto, é importante que futuras pesquisas busquem formas de maximizar o uso da LBRO e minimizar a utilização dos solos. Como o resíduo de granito puro apresentou valores de resistência consideravelmente superiores aos do solo, é viável desenvolver pesquisas, visando a melhora de sua capacidade de suporte, bem como a redução de sua expansão com lama de beneficiamento de rochas ornamentais proveniente de mármore, tendo em vista sua origem calcária, que pode se aproximar do efeito gerado pela estabilização com cal.

Deve-se ainda pensar na utilização de outras energias de compactação, outras percentagens, estudos químicos e mineralógicos de diversas percentagens, a fim de traçar uma tendência de comportamento dos solos quando parcialmente substituídos por LBRO.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Manual de Pavimentação**. 3 ed. Rio de Janeiro, 2006. 274 p.