



CECILIA VIONE LUNARDI

**ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA DO USO DE RESÍDUOS
DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO EM CAMADAS
INFERIORES DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS**

CANOAS, 2020

CECILIA VIONE LUNARDI

**ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA DO USO DE RESÍDUOS
DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO EM CAMADAS
INFERIORES DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS**

Dissertação apresentada à Universidade LaSalle, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Avaliação de Impactos Ambientais para obtenção do título de Mestre.

Orientação: Prof. Dra. Fernanda Siqueira Souza

Coorientação: Prof. Dr. Rodrigo Malysz

CANOAS, 2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

L961e Lunardi, Cecilia Vione.

Estudo da viabilidade técnica do uso de resíduos de construção e demolição em camadas inferiores de pavimentos rodoviários [manuscrito] / Cecilia Vione Lunardi – 2020.

179 f.; 30 cm.

Dissertação (mestrado em Avaliação de Impactos Ambientais) – Universidade La Salle, Canoas, 2020.

“Orientação: Prof^a. Dra. Fernanda Siqueira Souza”.

“Coorientação: Prof. Dr. Rodrigo Malysz”.

1. Resíduo de construção e demolição. 2. Pavimento. 3. Base. 4. Sub-base. 5. Reforço do subleito. I. Souza, Fernanda Siqueira. II. Malysz, Rodrigo. III. Título.

CDU: 69.059.64

Bibliotecária responsável: Melissa Rodrigues Martins - CRB 10/1380

CECILIA VIONE LUNARDI

Dissertação aprovada para obtenção do título de mestre, pelo Programa de Pós-Graduação Avaliação de Impactos Ambientais, da Universidade La Salle.

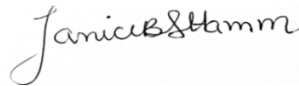
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Lucas Delongui
Universidade Federal de Santa Maria



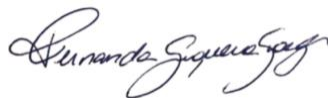
Prof. Dr. Alexandre Knop
Universidade La Salle



Prof.ª Dr.ª Janice Botelho Souza Hamm
Universidade La Salle



Prof. Dr. Rodrigo Malysz
Coorientador - Universidade do Vale do Rio dos Sinos



Prof.ª Dr.ª Fernanda Siqueira Souza
Orientadora e Presidente da Banca - Universidade La Salle

Área de concentração: Avaliação de Impactos Ambientais
Curso: Mestrado em Avaliação de Impactos Ambientais

Canoas, 15 de setembro de 2020.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Sydney Sabedot por sua orientação ao longo do tempo que permaneceu como orientador desta pesquisa. A Prof. Dr. Fernanda Siqueira Souza pelo suporte e orientação para conclusão do trabalho.

Agradeço a meu coorientador, Prof. Dr. Rodrigo Malysz, por todo conhecimento, paciência, dedicação e apoio destinado para elaboração desta pesquisa.

Agradeço a meu namorado André pelo incentivo, amor, apoio e companheirismo ao longo do curso e, principalmente, durante a elaboração desta dissertação.

Agradeço à minha mãe Solange, meu pai Carlos, meu irmão Pedro, minha irmã Grasiela, e às minhas sobrinhas Alice e Valentina, que foram compreensivos em relação aos momentos de ausência devido aos estudos.

Agradeço aos meus avós e minhas madrinhas que sempre acreditaram no meu potencial e nunca deixaram de enviar boas energias para o desenvolvimento dos meus projetos. A minha tia Claudia Lunardi que possui conselhos até para os momentos mais capciosos.

A minhas amigas Caroline e Virgínia que sempre estão ao meu lado para me apoiar e auxiliar em todas as decisões, mesmo quando a distância não permite estarmos próximas. A minhas amigas Isadora, Jenifer e Taísa que entenderam os momentos de ausência e estiveram presentes para escutar desabafos quando necessário.

Agradeço à Ecoplan Engenharia por possibilitar as condições necessárias para que eu realizasse este curso. Agradeço ao Eng. Armindo, Fábio, Clarissa, Janquiel, Helena, Juliana e à todos os colegas de empresa que me apoiaram ao longo do curso.

Agradeço à Prefeitura Municipal de Canoas, ao Eng. Maurício e Eng. Guilherme que possibilitaram a pesquisa e coleta do agregado reciclado no Aterro Jorge Lanner.

Aos professores Prof. Dr^a. Janice Botelho Souza Hamm, Prof. Dr. Alexandre Knopp e Prof. Dr. Lucas Delongui pela disponibilidade em participar da banca de defesa deste trabalho.

Agradeço à Unilasalle pelo suporte prestado ao longo do curso e pela bolsa institucional fornecida.

*“É preciso força pra sonhar e perceber
Que a estrada vai além do que se vê.”*

RESUMO

Conforme o país se desenvolve, o setor de construção civil acompanha este crescimento em todo o território e, conseqüentemente ocorre significativo aumento na geração de Resíduos de Construção e Demolição (RCD), gerando um passivo ambiental. Assim, esta pesquisa propõe a análise de viabilidade de utilização de agregados reciclados de Resíduo de Construção e Demolição em camadas de reforço do subleito, sub-base ou base de pavimentos rodoviários, em substituição aos agregados naturais. O resíduo reciclado estudado foi coletado na usina de reciclagem instalada no Aterro Jorge Lanner, no município de Canoas/RS. Para análise da viabilidade técnica para utilização deste material inicialmente procedeu-se com ensaios de caracterização física do agregado, através da granulometria, resistência à abrasão, análise da composição, limites de consistência e ensaio de durabilidade química. Utilizando uma composição deste resíduo em conjunto com pedra britada, procedeu-se à realização de ensaios de compactação para caracterização mecânica do material utilizando as três energias de compactação: normal, intermediária e modificada, como forma de analisar o comportamento do resíduo através da aplicação de energias diferentes. Além disto, foram elaboradas composições de preços para o fornecimento do agregado para execução de bases de pavimentos para comparação frente ao fornecimento de agregado natural. Foi identificado que o agregado reciclado necessitava estabilização granulométrica, além de possuir partículas lamelares e apresentar excessivo desgaste à sanidade. Em contrapartida, identificou-se que o RCD em questão apresenta um baixo teor de materiais indesejáveis e desgaste por abrasão Los Angeles dentro dos parâmetros. Em relação à caracterização mecânica, observou-se um comportamento satisfatório da mistura quando compactada com energia intermediária e modificada, com ISC de 95,8% e 127,2% respectivamente, o que também ocasionou quebra significativa nas partículas alterando a granulometria do corpo de prova. Também, foi possível identificar que o fornecimento de agregado reciclado possui, além de características técnicas adequadas, preços atrativos aos consumidores, sendo viável a sua utilização em camadas de base, sub-base e reforço do subleito.

Palavras-chave: Resíduo de Construção e Demolição. Pavimento. Base. Sub-base. Reforço do Subleito.

ABSTRACT

As long as occur the development of the country, the civil construction sector follow up this increase and, consequently this means an increase at the production of Construction and Demolition Waste (CDW), generating an environmental liability. This research proposes the analysis of viability of use recycling material of Construction and Demolition Waste in reinforcement layers of the subgrade, sub-base and base of highway constructions, in substitution of raw material. The recycled material studied was collected at the recycling plant in Aterro Jorge Lanner, at Canoas/RS city. To analyze the technical feasibility for using this material, we initially proceeded with physical characterization tests of the aggregate, through distribution of particle sizes, abrasion value, composition analysis, plastic and liquid limits and soundness of aggregate. Using a blend of this debris with crushed stone there was started the tests of compaction for mechanical characterization of the material using the three energy of compaction: normal, intermediate and modified, as the way for the analysis of the debris behavior with the application of different energy. In addition, a price composition was prepared for the supply of aggregate for the construction of pavement base for comparison with the supply of raw material. It was identified that recycled aggregate needed to be granulometric stabilized, also the material presents lamellar shape and excessive wear to sand. However, it was identified that the CDW contain low content of contaminant material and abrasion value by the use of Los Angeles machine inside the parameters. About the mechanical characterization, it was observed a satisfying behavior of the mixture when compacted using intermediate and modified energies, with consequent CBR of 95,8% and 127,2% respectively, what also caused significant fracture of the particles, modifying the specimen's granulometry. It was possible to identify that the supply of recycled aggregate presents, besides appropriate technical characteristics, attractive prices to consumers, being viable its use for highway pavement constructions.

Keywords: Construction and demolition waste. Pavement. Base. Sub-base. Subgrade reinforcement.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Descarte irregular em terreno baldio	29
Figura 2 - Esquema das camadas constituintes de um pavimento	44
Figura 3 - Corte esquemático de pavimento	45
Figura 4 - Classificação das bases e sub-bases flexíveis e semirrígidas	46
Figura 5 - Fluxograma metodologia de pesquisa	59
Figura 6 - RDC Reciclado.....	60
Figura 7 - Planta de Situação Aterro Jorge Lanner	62
Figura 8 - Britador instalado no Aterro Jorge Lanner	63
Figura 9 - Resíduo estocado	64
Figura 10 - Composição do resíduo recebido no Aterro Jorge Lanner	65
Figura 11 - Resíduo antes da triagem manual	66
Figura 12 - Máquina de abrasão “Los Angeles”	70
Figura 13 - Esquema do ensaio de Equivalente de Areia	75
Figura 14 - Compactação de corpo de prova	79
Figura 15 - Ensaio de expansão.....	80
Figura 16 - Ensaio de penetração	81
Figura 17 - Distribuição Granulométrica RCD	88
Figura 18 - Composição granulométrica – Faixa A	92
Figura 19 - Composição granulométrica – Faixa B	92
Figura 20 - Composição granulométrica – Faixa C	93
Figura 21 - Composição granulométrica – Faixa D	93
Figura 22 - Composição granulométrica – Faixa E	94
Figura 23 - Composição granulométrica – Faixa F.....	94
Figura 24 - Composição granulométrica – Faixa A	96
Figura 25 - Composição do agregado reciclado.....	97
Figura 26 - Ensaio Abrasão Los Angeles	99
Figura 27 - Materiais indesejáveis.....	102
Figura 28 - Resultado do ensaio de Equivalente de Areia	104
Figura 29 - Agregado após ser submetido ao ensaio de sanidade	106
Figura 30 - Curva de compactação	107
Figura 31 - Corpos de prova após compactação.....	110
Figura 32 - Curva granulométrica após aplicação de energia normal	111

Figura 33 - Curva granulométrica após aplicação de energia intermediária...	111
Figura 34 - Curva granulométrica após aplicação de energia modificada	112
Figura 35 - Curva granulométrica Amostra 1 após compactação – Faixa B...	113
Figura 36 - Curva granulométrica Amostra 2 após compactação – Faixa B...	113

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Quantidade de RCD gerados e reaproveitados em alguns países da União Europeia	38
Tabela 2 - Variação de preços entre agregado natural e reciclado	51
Tabela 3 - Valores de comercialização de agregado reciclado	51
Tabela 4 - Preço de base de pavimento executada pela PMSP (jan/2005)	52
Tabela 5 - Carga Abrasiva.....	70
Tabela 6 - Energias de Compactação	78
Tabela 7 - Cálculo do Índice de Suporte Califórnia (ISC).....	82
Tabela 8 - Granulometria do material.....	83
Tabela 9 - Coeficiente de Curvatura e Coeficiente de Uniformidade.....	88
Tabela 10 - Granulometria média do agregado reciclado	90
Tabela 11 - Composição granulométrica – Faixa A.....	96
Tabela 12 - Composição RCD Aterro Jorge Lanner	98
Tabela 13 - Índice de forma agregado reciclado	100
Tabela 14 - Resultado ensaio de Sanidade – Amostra 1	105
Tabela 15 - Resultado ensaio de Sanidade – Amostra 2	105
Tabela 16 - Valores de índice de compactação para RCD do Aterro Jorge Lanner	108
Tabela 17 - Valores de índice de compactação para diferentes agregados de RCD	109
Tabela 18 - Coeficiente de curvatura e coeficiente de uniformidade após compactação	114
Tabela 19 - Ensaio de Índice de Suporte Califórnia	115
Tabela 20 - Valores de ISC para diferentes agregados de RCD.....	116
Tabela 21 - Valores de expansão para diferentes agregados de RCD	117
Tabela 22 - Especificações para utilização de RCD em camadas de base ...	118
Tabela 23 - Especificações para utilização de RCD em camadas de sub-base	119
Tabela 24 - Especificações para utilização de RCD em camadas de reforço do subleito	119
Tabela 25 - Comparativo preços unitários para usinagem	121
Tabela 26 - Comparativo de preços unitários para fornecimento	123

Tabela 27 - Orçamento para fornecimento do agregado 124

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRECON	Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos de Construção Civil e Demolição
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
CBR	California Bearing Ratio
C_c	Coeficiente de Conformidade
CNT	Confederação Nacional dos Transportes
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CP	Corpo de Prova
CT	Centro de Tecnologia
CTRCD	Central de Triagem e Seleção de Resíduos Sólidos da Construção Civil e Demolição
C_u	Coeficiente de Uniformidade
DCP	Dynamic Cone Penetrometer
DMT	Distância Média de Transporte
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DPI	DCP Penetration Index
EA	Equivalente de Areia
EC	European Commission
EMDHAP	Empresa de Desenvolvimento Habitacional de Piracicaba
EPA	Environmental Protection Agency
FWD	Falling Weight Deflectometer
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IG	Índice de Grupo
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
ISC	Índice de Suporte Califórnia
Mm	Milímetro
MMA	Ministério do Meio Ambiente

MR	Módulo de Resiliência
ONU	Organização das Nações Unidas
PEV	Posto de Entrega Voluntária
pH	Potencial Hidrogênionico
PIB	Produto Interno Bruto
PLAMSAB	Plano Municipal de Saneamento Básico
PMC	Prefeitura Municipal de Canoas
PMGRIS	Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos
PMSP	Prefeitura Municipal de São Paulo
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PNSB	Pesquisa Nacional de Saneamento Básico
RCC	Resíduo de Construção Civil
RCD	Resíduo de Construção e Demolição
RCS	Resistência à Compressão Simples
Rpm	Rotação por minuto
RS	Rio Grande do Sul
RTCD	Resistência à Tração por Compressão Diametral
SICRO	Sistema de Custos e Referencias de Obras
SINAPI	Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
SNS	Secretaria Nacional de Saneamento
UE	União Europeia
UFCG	Universidade Federal de Campo Grande
USP	Universidade de São Paulo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	23
1.1 Tema	25
1.2 Problema e hipótese.....	25
1.3 Objetivos	26
1.3.1 Objetivo Geral	26
1.3.2 Objetivos Específicos	26
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	27
2.1 Resíduos de Construção e Demolição.....	27
2.1.1 Gerenciamento de RCD	31
2.1.2 Reciclagem de RCD.....	35
2.1.3 Legislação	40
2.2 Pavimentos Rodoviários	43
2.2.1 Pavimento	43
2.2.2 Bases e Sub-bases	45
2.2.3 Reforço do subleito	46
2.2.4 Pavimentação com Agregados Reciclados	48
2.3 Estudos de Casos.....	52
2.3.1 Caracterização física do RCD reciclado.....	52
2.3.2 Caracterização mecânica do RCD reciclado.....	54
2.3.3 Análise da influência da compactação no agregado reciclado.....	56
2.3.4 Análise da viabilidade técnica da aplicação de RCD em camadas de pavimento.....	57
3 MATERIAIS E MÉTODOS	59
3.1 Coleta de material	60
3.1.1 Aterro Jorge Lanner	61

3.2 Caracterização física do RCD.....	66
3.2.1 Distribuição granulométrica	66
3.2.1.1 Índice de Grupo	68
3.2.2 Composição.....	69
3.2.3 Resistência à abrasão	69
3.2.4 Índice de forma do agregado	71
3.2.5 Teor de materiais indesejáveis	72
3.2.6 Limite de Liquidez.....	72
3.2.7 Índice de Plasticidade.....	73
3.2.8 Equivalente de Areia.....	74
3.2.9 Sanidade	75
3.3 Caracterização mecânica das misturas com RCD	77
3.3.1 Compactação.....	77
3.3.2 Índice de Suporte Califórnia	80
3.4 Análise da viabilidade técnica.....	82
3.5 Análise da viabilidade econômica	84
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	87
4.1 Caracterização física do RCD.....	87
4.1.1 Distribuição granulométrica	87
4.1.2 Composição.....	97
4.1.3 Resistência à abrasão	98
4.1.4 Índice de forma do agregado	100
4.1.5 Teor de materiais indesejados.....	101
4.1.6 Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade	103
4.1.7 Equivalente de Areia.....	103
4.1.8 Sanidade	104
4.2 Caracterização mecânica das misturas com RCD	107

4.2.1 Compactação	107
4.2.2 Índice de Suporte Califórnia	115
4.3 Análise da viabilidade técnica	118
4.4 Análise da viabilidade econômica.....	121
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	127
5.1 Conclusões	127
5.2 Sugestões para pesquisas futuras.....	131
OBRAS CITADAS	133
ANEXO A – ENSAIOS REFERENTES À AMOSTRA 1	145
ANEXO B – ENSAIOS REFERENTES À AMOSTRA 2	157
ANEXO C – ENSAIOS REFERENTES AO AGREGADO PROVENIENTE DA BRITAGEM BOLOGNESI.....	169
ANEXO D – COMPOSIÇÃO DE PREÇO CENÁRIO 1	171
ANEXO E – COMPOSIÇÃO DE PREÇO CENÁRIO 2	173
ANEXO F – COMPOSIÇÃO DE PREÇO CENÁRIO 3	175
ANEXO G – COMPOSIÇÃO DE PREÇO TRANSPORTE.....	177
ANEXO H – PREÇOS DE INSUMOS SINAPI	179

1 INTRODUÇÃO

Conforme o desenvolvimento do País e os investimentos crescem, o número de obras de construção civil tem aumentado significativamente, causando impactos nos âmbitos sociais e ambientais (CORREIA, 2014). Do ponto de vista social, estas obras impactam no sentido de melhorar a qualidade de vida dos envolvidos nas obras e, também, nas famílias impactadas pelo empreendimento, pois usualmente há uma melhoria na infraestrutura local, além da geração de empregos e movimentação financeira na comunidade local. No âmbito ambiental, pode-se identificar impactos diversos, pois para que uma obra seja executada há a necessidade da exploração de recursos naturais, a alteração da paisagem original e a geração de resíduos.

A intensa geração de resíduos de construção civil tem sido motivo de preocupação em diversos países (GRABASCK, 2016). Segundo dados da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, o Brasil produziu 44,5 milhões de toneladas de Resíduos de Construção e Demolição em 2018 (ABRELPE, 2019), o que ainda se mantém abaixo da quantidade de resíduos gerados por outros países desenvolvidos. Em função disso, inúmeras pesquisas são desenvolvidas de forma a encontrar alternativas para a redução da geração destes resíduos e/ou o reaproveitamento dos mesmos pela sociedade.

A pavimentação tem como meta propiciar um tráfego confortável e seguro, com estruturas e materiais capazes de suportar os esforços decorrentes da ação do tráfego combinados com as condições climáticas, a um mínimo custo, ou seja, buscando, sempre que possível, o aproveitamento de materiais locais para as obras, garantindo um bom desempenho em termos de custos operacionais e de manutenção ao longo dos anos desta infraestrutura social (BALBO, 2007).

No Brasil, o modal rodoviário apresenta grande importância, uma vez que está presente em todas as regiões, promovendo a integração com os demais modais. No entanto, de acordo com os dados da pesquisa recente da Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2019), apenas 12,4% das rodovias brasileiras são pavimentadas.

Com o aumento do custo dos materiais de construção, a redução da disponibilidade de materiais naturais, aliado às novas exigências/limitações ambientais impostas na construção e manutenção de pavimentos, é imprescindível a busca por materiais que possam apresentar bom desempenho com custo

relativamente baixo (HIRSCH, 2007).

Em contrapartida, há uma necessidade crescente de destinar adequadamente os resíduos gerados pelas obras de infraestrutura, indústria e a construção civil em geral, de forma a reduzir ou mitigar seus impactos ao meio ambiente. No entanto, a reutilização e reciclagem destes materiais têm sua ampla adoção dificultada devido à heterogeneidade dos mesmos, em função da grande quantidade de técnicas e materiais originalmente utilizados na construção civil. Vários estudos são desenvolvidos sobre a utilização RCD como uma alternativa aos materiais convencionas para a pavimentação, conforme Delongui (2012), que realizou análise laboratorial dos resíduos sólidos produzidos no município de Santa Maria/RS para a utilização em camadas estruturais dos pavimentos, e Matuella (2017), com a análise da influência do material cerâmico no desempenho mecânico de RCD de concreto aplicado em pavimentos.

Em 2014, foi elaborado o Plano Municipal de Resíduos da Construção Civil de Canoas/RS, município da Região Metropolitana de Porto Alegre, com o intuito de auxiliar a cidade na gestão qualificada e sustentável destes resíduos. Com a elaboração deste plano espera-se que, por meio da melhoria dos serviços de limpeza pública, as áreas de disposição irregular de resíduos no município sejam extintas.

Segundo Jardim e Fofonka (2013), a Central de Triagem e Seleção de Resíduos Sólidos da Construção Civil e Demolição - CTRCD Niterói, do município de Canoas, é uma área pública apta a receber RCD, dispondo de aproximadamente 50.000 m² de área, ainda que haja uma utilização de apenas 20.000 m² do local. As atividades relacionadas ao CTRCD Niterói iniciaram-se na década de 80, com aterramento de resíduos para nivelamento de uma extensa área, por isso o nome popular Aterro Jorge Lanner.

Assim, faz-se necessário estudos da viabilidade do uso do RCD destinado a este local para valoração do resíduo e reinserção deste no ciclo produtivo. Portanto, devido à utilização de grandes quantidades de materiais em obras rodoviárias, a aplicação de RCD em camadas de pavimentos apresenta-se como uma proposta para reaproveitamento deste material.

Sendo assim, esta pesquisa visa estudar um determinado RCD sob a luz das normas técnicas aplicáveis como forma de avaliar a viabilidade técnica e econômica para utilização deste material em camadas inferiores de pavimento rodoviário.

1.1 Tema

O tema proposto para esta pesquisa é a análise da viabilidade técnico-econômica para a utilização do RCD em camadas inferiores de pavimentos rodoviários.

1.2 Problema e hipótese

Devido ao RCD não ser um material de uso corrente para execução de camadas de pavimento rodoviário, é necessário o estudo das características do mesmo para verificar se é apropriado para esta finalidade, pois a estrutura de um pavimento deve apresentar características necessárias para que a via/rodovia apresente vida útil adequada. Além disso, também é necessário verificar sua viabilidade econômica, de forma a torná-lo competitivo em relação aos materiais usualmente utilizados para este fim.

Conforme o Brasil se desenvolve é inevitável o aumento crescente de obras de construção civil no País, visto que este setor compõe parcela importante do PIB brasileiro (CUNHA, 2012). Desta forma, também ocorre o aumento crescente da geração de RCD que, segundo a resolução CONAMA n° 307/2002, deve ser corretamente descartado ou reinserido na sociedade por meio de processos diversos. Entretanto, além dos resíduos que não são corretamente destinados, apenas 72,44% dos municípios brasileiros possuem serviços de manejo dos RCD e apenas 9,7% apresentam algum tipo de processamento (IPEA, 2012).

É possível perceber que a quantidade de RCD processado e reinserido na sociedade ainda é incipiente perto do montante gerado anualmente no Brasil. Desta forma, faz-se necessária a criação de alternativas que sejam viáveis para reutilização deste material, como o uso de RCD para estrutura de base, sub-base e reforço de subleito de pavimentos rodoviários.

O uso de RCD para obras de infraestrutura pode contribuir para o reaproveitamento deste material inerte, que normalmente não é corretamente destinado devido aos custos envolvidos no processo, além de permitir a diminuição

da exploração dos recursos minerais naturais, utilizados para comporem a estrutura de pavimentos e obras de infraestrutura.

Neste contexto, é importante que haja estudos para a reutilização deste material, reinserindo-o de diversas formas na cadeia produtiva, pois, com a extensa malha rodoviária brasileira, a execução de estruturas de pavimento com RCD apresenta-se como uma alternativa interessante. Portanto, com o desenvolvimento da pesquisa em proposição, pretende-se dar continuidade aos estudos relacionados à compreensão do comportamento de estrutura de pavimentos construídos com RCD.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Analisar a viabilidade técnica e econômica de um determinado RCD como material na construção de camadas inferiores de pavimentos rodoviários.

1.3.2 Objetivos Específicos

- a) Realizar a caracterização física de duas amostras de RCD coletadas em um depósito e utilizadas na pesquisa;
- b) Avaliar a resistência à desintegração do agregado devido à ação do tempo através de ensaio químico utilizando solução saturada de sulfato;
- c) Analisar as propriedades mecânicas utilizadas atualmente para dimensionamento de pavimentos em corpos de prova com diferentes energias de compactação;
- d) Analisar se o RCD em estudo pode ser utilizado nas camadas de base, sub-base ou reforço do subleito;
- e) Efetuar a análise econômica confrontando os custos com o uso de agregados naturais e o de RCD.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Resíduos de Construção e Demolição

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) define RCD como os resíduos provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, gerados por pessoas físicas ou jurídicas, públicas ou privadas, responsáveis por empreendimentos que gerem estes resíduos.

A Resolução CONAMA nº 307/2002 estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para o gerenciamento de RCD de forma a reduzir os impactos gerados pelos mesmos, principalmente quando dispostos em locais inadequados. Esta Resolução prevê que os resíduos de Classe A, como cerâmicas, concreto e argamassa, entre outros, todos resíduos recicláveis e reutilizáveis, devem fazer parte de programas de incentivo à reinserção dos resíduos reutilizáveis ou reciclados no ciclo produtivo. O setor de construção civil apresenta-se como um grande gerador de resíduos e a quantidade destes é diretamente proporcional ao grau de desenvolvimento de uma cidade (SCHNEIDER, 2003).

Conforme Schwengber (2015), os Resíduos de Construção Civil são denominados RCC (Resíduos de Construção Civil) e RCD (Resíduos de Construção e Demolição). Para este trabalho está sendo adotado o termo RCD.

Os RCD apresentam características variáveis de acordo com a região onde são gerados, pois são produzidos em um setor onde há inúmeras técnicas e metodologias produtivas, que podem alterar a composição, granulometria e até a quantidade produzida de resíduo, dependendo do estágio de desenvolvimento da indústria de construção da região. Além disso, podem se apresentar em dimensões similares às de seus componentes, como areia e brita, em dimensões variadas e irregulares (CARNEIRO, CASSA, *et al.*, 2000).

O resíduo da construção é gerado em vários momentos do ciclo de vida das construções, sendo eles: fase de construção, fase de manutenção e reformas e a fase de demolição de edificações. Durante a fase da construção os resíduos são decorrentes das perdas dos processos construtivos, sendo o caso de argamassas de revestimento, concretos, etc. A geração de resíduo na fase de manutenção está

associada à correção de defeitos (patologias) e reformas da edificação, que normalmente exigem demolições parciais, e ao descarte de componentes que tenham atingido o limite de sua vida útil, sendo substituídos por novos (JOHN e AGOPYAN, 2011).

John e Agopyan (2011) também elucidam que, para que ocorra redução na geração de resíduos, são necessárias medidas de longo prazo, melhorando a qualidade das construções, diminuindo os defeitos nas edificações, estudos de novas tecnologias que promovam estruturas com vida útil maior e a criação de projetos flexíveis que permitam a montagem e desmontagem de estruturas, bem como a reutilização de seus componentes.

Em países desenvolvidos, os resíduos gerados pela construção de edifícios geram quantidade significativa de papel, plástico e madeira provenientes das embalagens dos materiais, enquanto que em países em desenvolvimento os resíduos gerados são compostos, principalmente, por grandes quantidades de concreto, argamassa e blocos cerâmicos, o que demonstra as altas perdas nos processos construtivos (CASSA, CARNEIRO e BRUM, 2001).

Na construção informal, como reformas, ampliações e pequenas obras é gerada uma quantidade menor de resíduos e, inexistindo soluções práticas e economicamente viáveis para a captação dos mesmos, seus geradores ou os pequenos coletores que os atendem procuram locais livres, como terrenos baldios e margens de córregos, nas proximidades da obra para realizar o descarte destes resíduos. Inevitavelmente essas áreas acabam por se firmar localmente como depósito dos resíduos, atraindo todo e qualquer tipo de resíduo para o qual não haja uma estrutura de descarte adequada e acessível (SCHWENGBER, 2015).

Nunes (2004) acrescenta, ainda, que grande parte dos RCD são resíduos inertes, cujos impactos ambientais consistem basicamente do expressivo volume gerado e da sua disposição ilegal em locais não adequados, tais como calçadas, terrenos baldios, leitos de córregos e áreas de preservação ambiental. Esta prática de disposição ilegal de resíduos ocorre, principalmente, nas médias e grandes cidades brasileiras.

Schwengber (2015) observou que apesar da publicação das Resoluções do CONAMA e das normas da ABNT em relação à temática, as medidas de controle da geração de RCD não possuem a efetividade esperada, sendo insuficientes para conter o dano ambiental. Ainda, como a execução de obras de infraestruturas urbanas e

conjuntos habitacionais cresceram significativamente em número, a consequência foi um aumento do consumo de matéria-prima e, também, um aumento considerável na geração de RCD. Por conseguinte, agravou os problemas resultantes da precária estrutura para destinação deste material, que acaba sendo descartado no meio ambiente.

Segundo Tavares (2007), o descarte clandestino de RCD ocorre em toda a malha urbana, porém apresenta-se com maior frequência em áreas periféricas, terrenos baldios, cursos d'água e ruas não pavimentadas, conforme ilustrado na Figura 1. Foi identificado que a ausência de locais de destinação adequada, bem como o fácil acesso a estes locais de disposição inadequada, são os fatores principais para a ocorrência destes descartes.

Figura 1 - Descarte irregular em terreno baldio



Fonte: Autoria própria (2020).

Conforme o Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil 2018/2019 (ABRELPE, 2019), em 2018 foram coletadas 122.012 toneladas/dia de RCD no País, o que representa 0,585 kg/habitante/dia. Como a responsabilidade de destinação dos resíduos é do gestor de cada obra, estes números refletem apenas o RCD descartado irregularmente em vias e logradouros públicos. De acordo com Silva (2014), mesmo com a remoção periódica do RCD descartado irregularmente pelos órgãos competentes, novos pontos de destinação clandestina surgem diariamente.

Com relação à disposição irregular, Inojosa (2010) comenta que quando a geração de resíduo é pequena é comum que ocorra o descarte de RCD em outras caçambas ou em áreas ilegais, como forma de evitar despesas referentes à coleta e ao transporte dos resíduos. Também, acrescenta a autora, as áreas de deposição clandestinas de entulho usualmente são áreas de várzea, córregos, taludes e áreas verdes, o que acarreta em contaminação do solo e da água devido a presença de produtos como solventes, tintas, lâmpadas fluorescentes, etc. Silva (2014) acrescenta que o acúmulo deste resíduo propicia condições adequadas para a proliferação de vetores como ratos e baratas, entre outros.

No município de Porto Alegre, Silva (2014) identificou em sua pesquisa 42 pontos de descarte de RCD, sendo apenas 4 destas áreas regularizadas junto à prefeitura. Para que seja sanado este problema, é necessário o engajamento do Poder Público, por meio de políticas públicas que ampliem o monitoramento e a fiscalização dos locais usualmente utilizados para este descarte. Também é importante que ocorra a participação dos geradores destes resíduos em favor de uma gestão mais efetiva do RCD gerado.

As pesquisas analisadas por Silva (2014) indicam que um dos principais problemas é o fato da maior parte das cidades brasileiras não possuírem áreas adequadas para o descarte de resíduos de construção e demolição. Ademais, apesar deste resíduo ser constituído por materiais nobres que apresentam alto potencial de reciclagem e reutilização, os municípios carecem de incentivos públicos para o beneficiamento do RCD.

Quando coletados de forma legal, por meio de uma estrutura própria para tal, os RCD são destinados aos aterros de materiais inertes, que apresentam altos custos de operação, tanto econômicos como ambientais. Além disso, devido ao grande volume de material, os RCD são um dos principais responsáveis pelo consumo e esgotamento das áreas de aterros (ANGULO, KAHN, *et al.*, 2003).

A reciclagem dos resíduos é uma forma de minimizar os problemas causados pela geração e acúmulo dos resíduos. Alguns países implementaram algumas alternativas viáveis como a utilização do RCD na execução de concretos, argamassas, pavimentos, solos reforçados, produção de novos agregados para substituição de agregados naturais, dentre outras. A reinserção dos resíduos de construção e demolição na cadeia produtiva, além de proporcionar melhorias do ponto de vista ambiental, pode se apresentar como uma alternativa economicamente vantajosa, pois

utiliza um novo material em detrimento da busca pela utilização de recursos naturais (FERREIRA e THOMÉ, 2011).

Schwengber (2015) entende que o desenvolvimento das cidades e de suas economias está diretamente ligado à geração de RCD, estando presentes na paisagem urbana em volume significativo. Desta forma, conclui que é de extrema importância que os municípios tenham uma gestão eficiente dos resíduos gerados pelas obras da construção civil.

2.1.1 Gerenciamento de RCD

Conforme informações apresentadas no relatório apresentado pela ONU em 2007, o *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2007), os resíduos sólidos e líquidos são responsáveis por 2,8% da emissão de gás carbônico, além de outros gases, que colaboram para o aumento do efeito estufa. A recomendação do referido relatório é que sejam implementadas políticas de gerenciamento destes resíduos, tanto para redução de sua geração como estimulando a reciclagem dos mesmos.

Segundo Pinto (1999) os países pioneiros no desenvolvimento de políticas para gerenciamento dos RCD foram países europeus, bem como o Japão, pois são países com alta densidade demográfica e áreas limitadas para disposição de resíduos. Apesar de haver registros de reutilização deste material para fabricação de outros componentes construtivos desde o século XIX, a reciclagem e reaproveitamento expressivo ocorreu após a Segunda Guerra Mundial, onde aliou-se a necessidade de reconstrução das cidades ao grande montante de resíduo de demolição das construções decorrente da guerra.

Em contrapartida, o Brasil possui um histórico de reciclagem mais recente deste resíduo, onde Pinto (1999) destaca que os primeiros estudos foram realizados em 1983. Também, na década de 80 popularizou-se o emprego de “maseiras-moinho” nas obras de edificações do país, onde eram moídos resíduos da própria obra para emprego no revestimento das construções. Entretanto, apenas a partir de 1991 alguns municípios brasileiros implantaram usinas de reciclagem de RCD.

Schwengber (2015) define as empresas da construção civil como as grandes geradoras de RCD, por meio da extração da matéria-prima, produção dos materiais

até a execução da construção, sendo seguidas pelas obras de pequeno porte realizadas por pequenas empresas ou pessoas físicas, sendo notório que a urbanização desordenada cria uma necessidade de reformas e modificações que acabam gerando mais resíduos.

Em geral, os RCD são considerados resíduos de baixa periculosidade, apresentando impacto maior devido ao grande volume que eles representam. Entretanto, nesses resíduos também pode haver presença de material orgânico, produtos químicos, produtos tóxicos e embalagens diversas que podem acumular água e favorecer a proliferação de insetos e outros vetores de doenças (MMA, 2012).

Segundo o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA, 2012), a ausência da cultura da separação dos resíduos e a falta de conhecimento da natureza dos mesmos são obstáculos ao gerenciamento adequado dos RCD. Portanto, o melhor caminho para a criação de um plano de gestão e gerenciamento dos RCD parte do diagnóstico dos resíduos gerados pela comunidade.

Neste âmbito, todos os Estados Membros da União Europeia (UE) e da Área Econômica Europeia estão submetidos aos princípios e metas introduzidos pela Diretiva de Resíduos 2008/98/EC, do Parlamento e do Conselho Europeu, de 19 de novembro de 2008. A Diretiva 2008/98/EC estabelece a estrutura para tratamento de resíduos na Comunidade Europeia, definindo os conceitos básicos relacionados com a gestão de resíduos. Entre os diversos conceitos, é apresentado o termo "*end-of-waste criteria*", traduzido literalmente como o fim do critério do desperdício, como o momento em que o resíduo se transforma, agrega um valor e passa a ser uma matéria-prima secundária (ABRELPE, 2013).

A ABRELPE (2013) também cita que a Diretiva de Resíduos 2008/98/RC apresenta o princípio de "poluidor pagador" e "responsabilidade estendida do produtor", incita disposições sobre resíduos perigosos, e exige que os Estados membros adotem planos de gestão de resíduos e programas de prevenção de geração de resíduos, estabelecendo duas metas de reciclagem e recuperação a serem alcançadas em 2020: 50% de reuso e reciclagem para certos resíduos domiciliares e similares, e 70% de reuso, reciclagem e outro tipo de recuperação para resíduos de construção e demolição.

Os RCD devem ter um gerenciamento adequado para evitar que sejam abandonados em locais inapropriados como terrenos baldios ou áreas de preservação ambiental. A disposição irregular desses resíduos, além de representar problemas de

origem estética, ambiental e de saúde pública, acaba sobrecarregando os sistemas municipais de limpeza pública. Segundo o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), o RCD pode representar 50% a 70% dos resíduos sólidos urbanos, sendo constituído majoritariamente por agregados naturais e solos (MMA, 2012).

Segundo a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB), de 2008, do total de 5.564 municípios brasileiros, 72,44% possuem serviço de manejo de resíduos de construção civil, sendo que 52,79% exercem o controle sobre os serviços de terceiros para os resíduos especiais e 55,26% dos municípios exercem o controle sobre o manejo de resíduos especiais executados por terceiros para manejo de RCD (IBGE, 2010).

Por meio da pesquisa do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), de 2018, a Secretaria Nacional de Saneamento (SNS, 2019) identificou que a soma das quantidades de RCD coletadas nos municípios participantes da pesquisa é cerca de 4.019.920 t/ano, dado que pode representar uma estimativa nacional de RCD de origem pública coletado. Entretanto, essas quantidades correspondem apenas ao total de material público gerado, não considerando a material recebido em unidades privadas e, tampouco, de material descartado inapropriadamente.

De acordo com IBGE (2010), apenas 7,04% dos municípios brasileiros possuem alguma forma de processamento dos RCD, onde 124 municípios adotam a triagem simples dos RCD reaproveitáveis, 34 realizam a triagem e trituração simples dos resíduos classe A, 79 fazem o reaproveitamento dos agregados produzidos na fabricação de componentes construtivos e 204 utilizam outras formas de processamento do material.

O Plano Nacional de Resíduos Sólidos, apresentado pelo Ministério do Meio Ambiente (2012) estabelece algumas metas para o gerenciamento e destinação dos RCD no País, sendo elas:

- a) Eliminação de 100% das áreas de disposição irregular até 2014 (Bota Foras);
- b) Implantação de Aterros Classe A (reservação de material para usos futuros) em 100% dos municípios atendidos por aterros de RCC até 2014;
- c) Implantação de PEVs, Áreas de Triagem e Transbordo em 100% dos municípios;
- d) Reutilização e Reciclagem de RCC em 100% dos municípios, encaminhando os RCC para instalações de recuperação;
- e) Elaboração de Planos de Gerenciamento de Resíduos da Construção, pelos grandes geradores, e implantação de sistema declaratório dos geradores, transportadores e áreas de destinação;

f) Elaboração de diagnóstico quantitativo e qualitativo da geração, coleta e destinação dos resíduos. (MMA, 2012).

Para que seja possível atingir as metas propostas, foram determinadas diretrizes e estratégias que visam propiciar condições para o alcance dos objetivos:

- a) Diretriz 1: Eliminar as áreas irregulares de disposição final de RCC (“bota-fora”) em todo o território nacional;
- b) Diretriz 2: Implantar áreas de transbordo e triagem, de reciclagem e de reservação adequada de RCC em todo o território nacional;
- c) Diretriz 3: Realização de Inventário de Resíduos de construção civil;
- d) Diretriz 4: Incremento das atividades de reutilização e reciclagem dos RCC nos empreendimentos públicos e privados em todo o território nacional;
- e) Diretriz 5: Fomento a medidas de redução da geração de rejeitos e resíduos de construção civil em empreendimentos em todo o território nacional. (MMA, 2012).

Neste âmbito, Nagalli (2014) afirma que é preciso diferenciar gestão e gerenciamento dos RCD, pois gestão é um processo amplo composto por políticas públicas, leis e regulamentos que balizam e direcionam a atuação dos agentes do setor, enquanto o gerenciamento, resumidamente, são as atividades operacionais cotidianas realizadas diretamente com os RCD. Desta forma, o gerenciamento compreende as ações desenvolvidas por construtores no sentido de diminuir, controlar, e o gerenciamento aborda as ações desenvolvidas por empreendedores e construtores no sentido de antever, controlar e gerir a manipulação dos resíduos de suas obras.

Quando os RCD são destinados corretamente, os mesmos são encaminhados para aterros de materiais inertes, correspondendo a até 70% dos resíduos sólidos urbanos conforme demonstrado por Pinto (1999). Também, segundo Ângulo *et al.* (2003), o resíduo de construção civil é o agente majoritário no esgotamento dos aterros municipais em cidades de médio e grande porte.

Em decorrência disto, o esgotamento dos aterros implica na necessidade de implantação de novos locais para destinação de resíduos, o que acarreta em dois problemas citados por Pinto (1999, *apud* Bodi *et al.* 1995): o primeiro é relacionado ao aumento da necessidade de desapropriações para criação de novos aterros, o que demanda gastos adicionais de recursos públicos, e o segundo problema identificado é que áreas livres muitas vezes são locais ambientalmente protegidos.

A sustentabilidade possui três dimensões: ambiental, social e econômica. Os RCD repercutem nestes três aspectos simultaneamente, seja pelo impacto ambiental negativo gerado, pelo envolvimento da comunidade local na cadeia de reciclagem do material, o que também gera emprego e renda, movimentando a economia local (NAGALLI, 2014).

Em sua pesquisa, Oliveira e Mendes (2018) concluíram que os RCD causam uma gama de problemas tão significativa à vida urbana e ao meio ambiente, que a melhor solução é que sejam aproveitados como fonte de materiais, podendo ser reutilizados na construção civil e pavimentação.

2.1.2 Reciclagem de RCD

As pressões de legislações ambientais vêm aumentando gradativamente, evidenciando a necessidade crescente de fontes alternativas de matérias-primas. No entanto, a grande heterogeneidade dos resíduos e a consequente dificuldade de classificação tornam mais difícil o seu reaproveitamento. Segundo Nagalli (2014), tal variabilidade é em função não somente ao local de geração desse resíduo - que pode suscitar variações composicionais em razão da oferta de materiais de construção - mas, também, à associação de diferentes processos construtivos, treinamento das equipes executoras e cronogramas de obra, entre outros.

Com o aumento da urbanização das áreas, acarretando quantidades maiores de obras de construção civil e infraestrutura, a quantidade de resíduos gerados torna-se cada vez mais elevada. Para evitar que o descarte deste material ocorra em locais inadequados, como terrenos baldios, cursos d'água ou áreas periféricas, é necessário que este crescimento venha acompanhado de medidas das administrações públicas locais, pois estas práticas, além de serem extremamente prejudiciais ao meio ambiente, acarretam em desperdício de materiais nobres que poderiam ser reciclados e/ou reutilizados (CARNEIRO, CASSA, *et al.*, 2000). “Quanto mais bem selecionados os resíduos, maiores serão as chances de produzir um agregado de qualidade” (BLUMENSCHHEIN, 2004). Assim, há a necessidade de normas de classificação que direcionem o manejo e a reutilização desse material.

Os RCD são classificados, segundo a ABNT NBR 10004 (2004), como resíduos inertes, entretanto, se submetidos a análises criteriosas, os RCD típicos não estariam

classificados como tal, especialmente devido ao seu pH e à qualidade da água absorvida, que em alguns casos pode conter contaminações importantes oriundas da fase de uso da construção ou do manuseio posterior dos resíduos. Estes contaminantes podem afetar tanto a qualidade técnica do produto contendo o reciclado, quanto significar riscos ambientais. Como exemplo, John e Agopyan (2000) citam as obras expostas à atmosfera marinha, que podem estar contaminadas por sais que podem levar à corrosão de metais. Portanto, RCD provenientes deste tipo de obra devem ser evitados em concreto armado.

Há diversos modos de classificação dos resíduos, levando em conta suas características de acondicionamento e estado físico, entre outros. A norma ABNT NBR 10004 (2004) os classifica quanto aos riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública: Classe I (perigosos, inflamáveis, tóxicos, reativos e corrosivos), Classe IIA (não-inertes, biodegradáveis, combustíveis e solúveis em água) e Classe IIB (inertes e os seus constituintes não solubilizam). É uma norma bastante referenciada no meio industrial, por adotar critérios como inflamabilidade, corrosividade e toxicidade.

No entanto, para serem utilizados como agregados, Daminieli (2007) instrui que a fração mineral dos RCD ainda deve passar por um processo seletivo, descrito a seguir:

- a) triagem na chegada dos resíduos à central de reciclagem para separação de RCD minerais com predominância de materiais cinzas (elementos de origem cimentícia) ou vermelhos (elementos de origem cerâmica), [...];
- b) catação manual para retirada de elementos não-minerais e contaminantes dos montantes totais de RCD de origem mineral, cinzas ou vermelhos;
- c) britagem dos RCD por compressão (britador de mandíbula) ou impacto (britador de impacto), gerando agregados reciclados, [...];
- d) eventual retirada de resíduos metálicos dos agregados com separador magnético;
- e) peneiramento dos agregados gerados, que são divididos em faixas granulométricas [...]. (DAMINIELI, 2007).

Ainda de acordo com a Resolução CONAMA nº 307/2002, os demais resíduos de construção civil (Classes B, C e D) não são passíveis de reciclagem para a produção de agregados. Segundo a citada Resolução, os resíduos de Classe B, tais como plásticos, papel, papelão, metais, vidros e madeiras são possíveis de serem

absorvidos por processos de reciclagem por indústrias fora da construção civil; no entanto, os de Classe C e D são não recicláveis; o primeiro, por não haver tecnologias ou aplicações economicamente viáveis; já os de Classe D, que enquadram tintas, solventes e produtos radiológicos, entre outros, são considerados como perigosos.

De acordo com John e Agopyan (2000), do ponto de vista técnico as possibilidades de reciclagem dos resíduos variam de acordo com a suas composições: a fração cerâmica pode ser beneficiada como agregado com diferentes aplicações dependendo de sua composição específica, enquanto as frações compostas por concreto e rochas naturais podem ser reutilizadas para a produção de concreto estrutural, quando não estão presentes as fases mais porosas e de menor resistência mecânica, como argamassas. Desta forma, agregados mistos têm sua aplicação limitada a concretos de menor resistência, como blocos de concreto e camadas drenantes.

Segundo John (2000), há dois tipos básicos de reciclagem: reciclagem primária e reciclagem secundária. A reciclagem primária ocorre quando o resíduo é reciclado dentro do mesmo processo que o originou, enquanto que a reciclagem secundária acontece quando este resíduo é reciclado por um processo diferente de sua origem.

A *Environmental Protection Agency* (EPA, 1998) apresenta os seguintes benefícios da reinserção dos RCD no ciclo produtivo:

- Redução dos impactos ambientais da extração, transporte e processamento de recursos naturais;
- Redução dos custos de construção, através de menores custos com disposição de RCC, da menor necessidade de aquisição de materiais e da obtenção de receitas com a venda dos materiais recuperados;
- Apoio às comunidades, aos construtores e aos incorporadores no alcance da conformidade com políticas e normas ambientais nacionais e locais, já em vigor ou a serem implantadas em breve, tais como: resolução CONAMA sobre resíduos da construção civil, normas da ABNT e normas institucionais de empresas de limpeza urbana;
- Melhora a imagem pública de empresas e de organizações que reduzem a quantidade gerada de resíduos;
- Reduz a necessidade de disposição de RCC em aterros sanitários, aumentando a vida útil dos aterros. (EPA, 1998).

Segundo dados apresentados pela EPA (2018), no ano de 2017 os Estados Unidos geraram em torno de 569 milhões de toneladas de RCD. No mesmo ano, o país gerou em torno de 230.000 empregos em atividades relacionadas à reciclagem de RCD, criando uma receita de, aproximadamente, 2 bilhões de dólares.

Foram as grandes catástrofes que aceleraram a prática da reciclagem em locais com grandes volumes de resíduos e grande necessidade de reconstrução de edificações e infraestrutura, a exemplo das guerras e terremotos (LIMA, 1999). No período compreendido entre a Segunda Guerra Mundial e o ano de 1955 foram reciclados aproximadamente 115 milhões de m³ de RCD na Alemanha, utilizados na construção de aproximadamente 175 mil unidades habitacionais (LIMA, 1999 *apud* DE PAW & LAURITZEN, 1994).

Alguns fatores importantes que também contribuíram para a iniciativa de reciclagem dos resíduos, principalmente nas últimas décadas, são: superexploração de jazidas naturais, causando prejuízos ao meio ambiente com a extração de agregados e a disposição dos resíduos e sobrecarga de aterros (LIMA, 1999 *apud* CUR, 1986). Em contrapartida há a necessidade de diminuir a destinação de resíduos aos aterros de inertes, como forma de diminuir os custos de aterramento, colaborar com a preservação ambiental, e minimizar o crescimento do volume de resíduos e a possibilidade de lixiviação de elementos danosos ao meio ambiente (LIMA, 1999 *apud* PERA, 1997).

A União Europeia pratica desde 1996 uma política de gerenciamento de resíduos de construção e demolição, por estes constituírem uma alta parcela nos resíduos totais gerados. Estima-se que em 2016 foram produzidos na Europa cerca de 923 milhões de toneladas destes resíduos (EC, 2016). Não são todos os países membros que adotam métodos de gerenciamentos para seus RCD, mas os países que introduziram este sistema atingem hoje consideráveis níveis de reaproveitamento e reciclagem, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1- Quantidade de RCD gerados e reaproveitados em alguns países da União Europeia

País	RCD gerado (x 10 ⁶ t/ano)	RCD reaproveitado ou reciclado (x 10 ⁶ t/ano) ¹
Holanda	98,55	19,37

País	RCD gerado (x 10 ⁶ t/ano)	RCD reaproveitado ou reciclado (x 10 ⁶ t/ano) ¹
Bélgica	19,57	0,39
Dinamarca	12,22	3,10
Reino Unido	136,20	57,19
Itália	54,58	33,19
Áustria	44,91	8,64
Polônia	18,89	2,59
Alemanha	220,50	70,17
França	224,35	40,72
Irlanda	1,52	0,19
Espanha	35,83	6,45
Portugal	1,71	0,36

Fonte: EC (2016).

¹ Resíduo mineral reciclado proveniente de RCD.

Conforme pode-se verificar pela Tabela 1, apesar da quantidade de resíduos reciclados na UE serem consideráveis, ainda há países onde o número não é expressivo. Levantamentos indicam que 46% dos RCD produzidos na Europa são reciclados (EC, 2011).

Segundo Von Stein (2000), a aplicação de resíduos de construção civil aconteceu em larga escala após a Segunda Guerra Mundial na Europa e no Japão, pois durante a reconstrução das cidades era necessária a remoção do entulho gerado pela guerra e, também, suprir a necessidade de matéria-prima para a construção civil. Naquela época, foi dada prioridade para a reconstrução do sistema viário europeu, em especial na Alemanha e França, que se tornaram pioneiras no desenvolvimento de reciclagem de RCD para utilização em pavimentos.

No Brasil já ocorrem algumas experiências de reciclagem e reinserção desses RCD no ciclo produtivo. As centrais de reciclagem em operação são operadas, predominantemente, pelas Prefeituras Municipais, e os agregados provenientes desta reciclagem são empregados, predominantemente, em obras de pavimentação e na produção de pequenos componentes de concreto, como blocos intertravados para pavimentação (JOHN e AGOPYAN, 2000).

Nos municípios onde o agregado proveniente de RCD já está inserido na cadeia produtiva, Lima (1999) cita que os mesmos estão sendo utilizados em serviços simplificados como, por exemplo, a cobertura primária de vias, sub-bases de

pavimentos asfálticos e na produção de concreto de baixa resistência, argamassa e fabricação de componentes para alvenaria e infraestrutura urbana, como meios-fios.

Os agregados reciclados apresentam grande variação em suas propriedades, dependendo da composição do resíduo processado, dos equipamentos usados, do teor de impurezas, da granulometria, etc. Suas propriedades também são diferentes das propriedades dos agregados convencionais, o que impõe algumas limitações quanto à sua utilização (LIMA, 1999).

Conforme Motta (2005, *apud* UTS 1999), há três diferenças principais entre o agregado reciclado e o agregado natural: (a) forma do grão e textura, pois no agregado reciclado tendem a ser mais irregulares; (b) densidade, que normalmente é menor no material reciclado devido à sua alta porosidade; (c) absorção de água, sendo esta a principal diferença entre ambos, em relação às propriedades físicas.

Analisando os aspectos referentes à produção do agregado reciclado, Delongui (2012) esclarece que alguns fatores, como equipamentos utilizados e/ou falha humana acarretam em uma dificuldade em manter uma produção de agregado de RCD uniforme e com uma boa distribuição granulométrica. Diversos fatores influenciam na composição destes agregados, como a região geográfica da obra, modo de coleta e destinação e o método construtivo da obra geradora dos resíduos. A composição do resíduo processado influencia diretamente na granulometria do agregado reciclado, que também depende das características dos equipamentos de britagem e do sistema de peneiramento utilizado (LIMA, 1999).

Entretanto, o processo de produção simplificado em relação à exploração de jazidas naturais, além da redução de custos com transporte, coleta, despejos e manutenção, são fatores que contribuem para a redução de custos para o fornecimento de agregado reciclado de RCD, o que o torna competitivo economicamente frente aos agregados naturais (CUNHA, 2007).

2.1.3 Legislação

Ao longo dos anos, diversos países têm adotado legislações que visam reduzir e reciclar os resíduos sólidos urbanos. Devido ao RCD constituir grande parte deste resíduo, estão sendo implementadas diretrizes e leis específicas em relação à sua geração e destinação deste material.

Tomando como exemplo alguns países do Hemisfério Norte, é possível destacar que os instrumentos legais possibilitam a abertura de mercados para os produtos reciclados. Nos Estados Unidos foram instituídas leis na década de 1990 que regulamentaram a disposição dos resíduos de construção e demolição, incentivando o investimento de mineradoras no mercado de reciclagem. O resultado positivo do mercado de reciclagem de resíduos nos países do Hemisfério Norte é consequência de legislações implementadas e de uma fiscalização eficaz (CUNHA, 2007 *apud* ZORDAN, 1997).

Em Vancouver, Canadá, estima-se que 40% dos resíduos sólidos são decorrentes de RCD, o que acarretou na necessidade de estabelecer legislações e diretrizes específicas como forma de atingir, até o ano 2040, a meta de “Desperdício Zero” estabelecida. Desta forma, a cidade adotou a chamada “Lei da Demolição Verde”, que estabelece taxas para todos os empreendimentos que gerarem resíduos, além de estabelecer que resíduos como concreto e asfalto não podem ser destinados à aterro, devendo ser encaminhados à usinas de reciclagem (CITY OF VANCOUVER, 2018).

Neste mesmo sentido, o Estado da Califórnia, Estados Unidos, também instituiu o chamado “Código Legislativo de Construções Verdes da Califórnia”, por meio do Artigo 24, parte 11, da Constituição da Califórnia. De acordo com as seções 4.408, 5.408, 301.1.1 e 301.3, todas as obras de construção e/ou demolição devem destinar 65% de seus resíduos para reciclagem ou reutilização (CALRECYCLE, 2020).

Em 2008 foi instituída pela União Europeia a diretiva “The Waste Framework Directive/2008/98/EC”, que versava sobre as orientações aos países constituintes sobre os resíduos gerados nos mesmos. Dentre os objetivos apresentados, foi definido que até 2020 a reciclagem de resíduos de construção e demolição deve atingir um mínimo de 70% (EC, 2019).

Neste âmbito, Portugal estabeleceu a Lei nº 73/2011, na qual foi definida a meta para alcançar 70% em peso para reutilização, reciclagem e outras formas de valorização do RCD, até 2020. Também, determinou-se a obrigatoriedade de utilização de, pelo menos, 5% de materiais reciclados em construções ou manutenções de infraestrutura, desde que tecnicamente exequível (PORTUGAL, 2011).

Em geral, a legislação europeia em relação ao RCD varia de acordo com cada país membro, alguns possuindo legislações mais rígidas, ao passo de outros que carecem de legislação e ações concretas para promover a reciclagem deste resíduo.

No âmbito nacional, considerando a necessidade de implementação de diretrizes para minimizar os impactos ambientais relacionados aos resíduos de construção civil, e considerando que a produção e utilização de materiais reciclados de RCD é viável tecnicamente e economicamente, a Resolução CONAMA nº 307/2002 estabeleceu diretrizes, critérios e procedimentos para o gerenciamento de RCD, principalmente quando dispostos em locais inadequados.

Neste mesmo sentido, em 2010 foi implementada em âmbito nacional a Lei nº 12.305/2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Apresenta-se a seguir os conceitos de gerenciamento de resíduos sólidos e gestão integrada de resíduos sólidos, onde é reiterado o conceito de que os resíduos sólidos impactam em diversos aspectos da sociedade, como economia, política e cultura (BRASIL, 2010):

X - gerenciamento de resíduos sólidos: conjunto de ações exercidas, direta ou indiretamente, nas etapas de coleta, transporte, transbordo, tratamento e destinação final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, de acordo com plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos ou com plano de gerenciamento de resíduos sólidos, exigidos na forma desta Lei;

XI - gestão integrada de resíduos sólidos: conjunto de ações voltadas para a busca de soluções para os resíduos sólidos, de forma a considerar as dimensões política, econômica, ambiental, cultural e social, com controle social e sob a premissa do desenvolvimento sustentável; (BRASIL, 2010).

A Lei nº 12.305/2010, por meio da PNRS, reconhece o resíduo sólido como um bem econômico e de valor social, pois gera trabalho e renda à uma parcela da sociedade, promovendo a cidadania. O objetivo da referida lei é promover o incentivo à reciclagem e tratamento do resíduo, adotando medidas para minimizar o impacto ambiental gerado e incentivando a indústria da reciclagem. Como forma de implementação destas medidas, a contratação de produtos reciclados deve ser priorizada pelo governo.

Em 19 de Janeiro de 2012 foi instituída a Resolução CONAMA nº 448/2012, que alterou alguns artigos da resolução nº 307/2002 relacionados ao gerenciamento e disposição do RCD. A referida resolução indica que o resíduo de construção e demolição após triagem deve ser reutilizado e reciclado na forma de agregados ou, em caso de impossibilidade deste, encaminhados à aterros de resíduo para reservação deste material para uso futuro (CONAMA, 2012).

A Lei Estadual do Rio Grande do Sul nº 14.528, de 16 de Abril de 2014, institui a Política Estadual de Resíduos Sólidos, a qual reúne os princípios, objetivos,

instrumentos, diretrizes, metas e ações adotadas pelo Estado, em conjunto com municípios ou particulares em relação à gestão integrada e ao gerenciamento adequado dos resíduos sólidos. A referida Lei explicita que todas as empresas de construção civil estão sujeitas à elaboração de um Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos, nos quais devem apresentar os locais de destino de seus resíduos gerados (RIO GRANDE DO SUL, 2014).

Em 29 de Agosto de 2018, o município de Canoas publicou a Lei Municipal nº 6188, que institui o Plano Municipal de Saneamento Básico (PLAMSAB), a qual, como anexo, apresenta o Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGRIS). Em relação ao descarte de RCD no município, “embora a disposição irregular de resíduos seja proibida, conforme o art. 34 da Lei nº 1.214, 26 de novembro de 1968, são encontradas diversas áreas com pontos de descarte de resíduos de construção civil e até mesmo domiciliares”. Foram identificados 85 pontos de descarte irregular em Canoas, segundo o PMGIRS (CANOAS, 2018).

Como forma de remediar este problema, a Prefeitura Municipal instituiu Ecopontos, que visam a coleta de RCD provenientes de pequenos geradores, e que destina este material à Central de Resíduos de Construção Civil (CTRCD) Niterói, popularmente chamada de Aterro Jorge Lanner.

Como forma de melhorar a gestão deste resíduo, em 2018, por meio da Lei nº 6189, a Prefeitura Municipal de Canoas institui o Plano Municipal de Gestão de Resíduos de Construção Civil e o Sistema de Gestão Sustentável de Resíduos da Construção Civil e Resíduos Volumosos, que apresentam um plano de reestruturação do Aterro Jorge Lanner, prevendo a otimização da triagem, implantação de aterro de inertes e a valoração do resíduo (CANOAS, 2018).

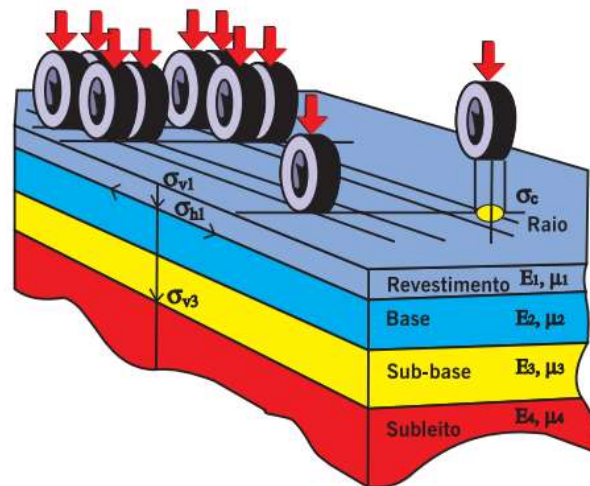
2.2 Pavimentos Rodoviários

2.2.1 Pavimento

Pavimento é definido, segundo Balbo (2007), Bernucci *et al.* (2006) e Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2006), como uma estrutura composta por camadas sobrepostas de diferentes materiais compactados a partir do subleito do corpo estradal, adequada para atender estrutural e

operacionalmente ao tráfego. Cada camada do pavimento possui funções específicas, que devem oferecer condições adequadas de rolamento e suporte em qualquer condição climática. A Figura 2 apresenta um esquema das camadas constituintes de um pavimento.

Figura 2 - Esquema das camadas constituintes de um pavimento



Fonte: Bernucci *et al.* (2006)

Cada camada do pavimento desempenha certas funções, seja agindo individualmente ou em conjunto. As camadas de base e sub-base compõem a estrutura do pavimento, que resistem aos esforços atuantes na estrutura (BALBO, 2007).

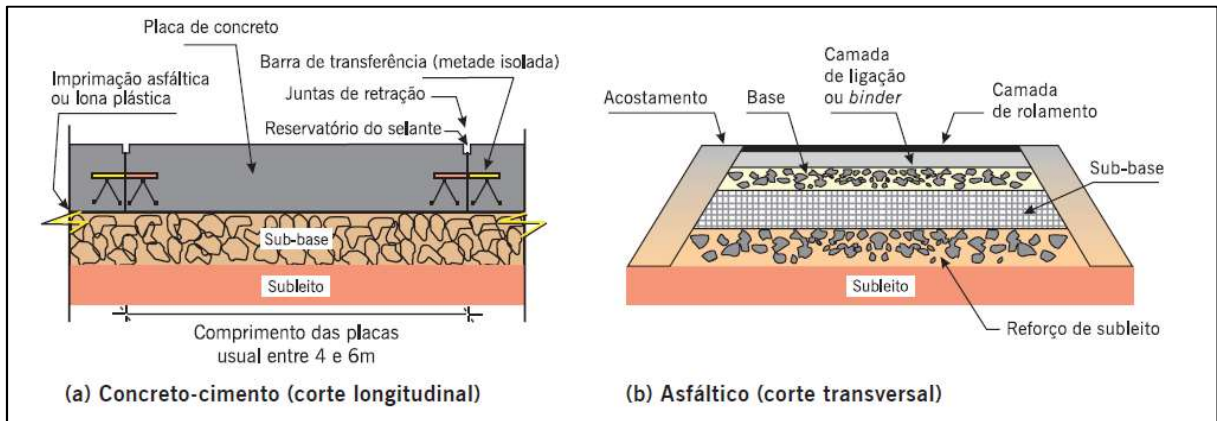
De modo geral, o Departamento Nacional de Infraestruturas de Transportes (DNIT, 2006) classifica os pavimentos em rígidos, semirrígidos e flexíveis:

- a) Rígidos: o material que compõe o revestimento possui uma rigidez elevada se comparada às demais camadas, absorvendo grande parte das tensões causadas pelo carregamento aplicado;
- b) Semirrígido: caracteriza-se por uma base cimentada com algum aglutinante que possui propriedades cimentícias;
- c) Flexíveis: neste pavimento todas as camadas sofrem deformações elásticas consideráveis à um carregamento, distribuindo os esforços de forma equivalente por todos os materiais.

Segundo Bernucci *et al.* (2006), os pavimentos flexíveis asfálticos são compostos usualmente por quatro camadas principais: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito, sendo que o revestimento asfáltico também pode ser

composto por camada de rolamento e por camadas intermediárias ou de ligação, conforme ilustrado na Figura 3, dependendo da necessidade da via.

Figura 3 - Corte esquemático de pavimento



Fonte: Bernucci *et al.* (2006).

A estrutura do pavimento é composta por camadas que serão construídas após a terraplanagem do local. Esta estrutura, que se encontra acima do subleito, funciona como a fundação do sistema que irá receber os esforços do tráfego absorvidos pelo pavimento (ROSSI, 2017).

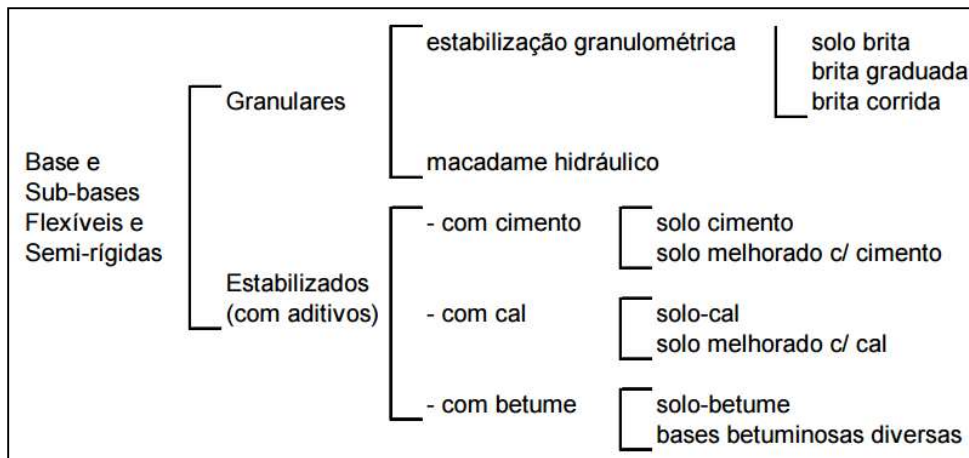
2.2.2 Bases e Sub-bases

Base é a camada localizada imediatamente abaixo do revestimento do pavimento, sendo considerada a camada mais importante da estrutura do pavimento, responsável pelo suporte estrutural do pavimento, dissipando as cargas oriundas do tráfego para as próximas camadas. Caso a camada base não atenda às diretrizes previstas nas Normas Técnicas e não apresente boa execução, e conseqüente boa qualidade, é provável que aconteçam danos estruturais ao pavimento (SENÇO, 2007).

Segundo Senço (2007), um pavimento pode ser composto apenas por revestimento e base, podendo esta ser complementada por sub-base e pelo reforço do subleito. Conforme Massenli (2020), o desempenho do pavimento é determinado pelo tipo de material empregado na camada de base.

O Manual de Pavimentação (DNIT, 2006) classifica as bases e sub-bases flexíveis nos tipos mostrados na Figura 4.

Figura 4 - Classificação das bases e sub-bases flexíveis e semirrígidas



Fonte: DNIT (2006).

Sub-base é uma camada complementar à base quando não for viável, economicamente ou tecnicamente, construir a base sobre a regularização ou reforço do subleito. Conforme a regra geral, o material constituinte da sub-base deverá apresentar qualidade superior à do material de reforço e, por sua vez, o material da base deve apresentar características técnicas melhores que o material da sub-base (BALBO, 2007).

Segundo a especificação DNIT 141/2010-ES, os materiais, ou misturas de materiais, quando utilizados em camadas de base do pavimento devem apresentar as seguintes propriedades geotécnicas: expansão máxima de 0,5% e capacidade de suporte, ISC, superior ou igual a 80% para rodovias com $N > 5 \times 10^6$ e, quando $N \leq 5 \times 10^6$, superior ou igual a 60% (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2010).

Para a utilização de solos, solos estabilizados quimicamente, materiais pétreos ou mistura de solos, a especificação DNIT-139/2010-ES recomenda que, quando utilizados em camadas de sub-base, estes devem apresentar capacidade de suporte, ISC, superior ou igual a 20% e, também, expansão máxima de 1% (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2010).

2.2.3 Reforço do subleito

Conforme DNIT (2010), a camada de reforço do subleito é destinada a minimizar a espessura da camada de sub-base quando, porventura, a camada de

subleito possuir baixa capacidade de suporte. Devido à sua nomenclatura, Senço (2007) comenta que esta camada é, às vezes, associada à fundação do pavimento. Entretanto, reitera que esta camada é parte constituinte do pavimento, sendo um complemento à camada de sub-base, como forma de resistir e distribuir esforços decorrentes do tráfego.

Segundo Balbo (2007), quando a camada de subleito é executada com um material cujas propriedades não atingem o desempenho necessário, é necessário executar uma camada acima que possa melhorar as propriedades da camada anterior. A utilização da camada de reforço do subleito não é indispensável, visto que maiores espessuras das camadas de sub-base e base poderiam aliviar as pressões sobre um subleito cujo desempenho não é satisfatório. Entretanto esta solução em alguns pavimentos tornaria a obra mais onerosa e, assim, opta-se pelo emprego da camada de reforço mencionada. Deste modo, o reforço do subleito resistirá a maiores solicitações do tráfego, permitindo a execução de camadas de base e sub-base menores, o que proporcionará uma economia à obra devido à natureza dos materiais empregados em cada camada.

O reforço do subleito também é definido pela norma DNIT 138/2010-ES como uma camada estabilizada granulometricamente, executada sobre o subleito com baixa capacidade de suporte, com a finalidade de reduzir as camadas de base e sub-base da estrutura do pavimento. O material empregado deve ter qualidade superior ao utilizado na execução do subleito, e expansão menor ou igual a 1%, determinado por meio do ensaio de Índice de Suporte Califórnia. A estabilização granulométrica do material contribui para promover uma camada com as propriedades adequadas de estabilidade e durabilidade (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2010).

A camada de reforço do subleito, além de aumentar a resistência estrutural do pavimento, também assume função de homogeneização e melhoria da drenagem e, por conseguinte acarretando em menores custos para manutenção do pavimento (MASSELI, 2020, apud BRABET, 2012).

Segundo Massenli (2020), as camadas de suporte, além de comporem partes integrantes do pavimento, são necessárias para promover a vida útil do pavimento tanto em curto quanto a longo prazo, pois usualmente um pavimento flexível que apresente um subleito com baixa resistência irá apresentar deflexões iniciais altas, o que irá ocasionar a deflexão limite do pavimento em um tempo inferior a 10 anos,

sendo necessário realizar um reparo precoce no pavimento. Desta forma, utilizar a camada de reforço do subleito é uma solução que promove sustentabilidade e economia à rodovia.

2.2.4 Pavimentação com Agregados Reciclados

Segundo Souza Junior (2011), as estradas são obras de engenharia que consomem grandes quantidades de materiais, pois apesar de terem espessuras de pavimento relativamente pequenas, têm grandes extensões longitudinais. Desta forma, causam expressivos impactos ambientais tanto em seus locais de implantação quanto nas jazidas e locais de empréstimos utilizados para sua construção. Portanto, os relatórios técnicos-ambientais elaborados para conquistar as licenças ambientais de cada empreendimento rodoviário têm foco na mitigação dos impactos ambientais, principalmente em relação às jazidas exploradas.

Como foi visto anteriormente, em função da grande demanda de infraestrutura, abre-se espaço para o emprego de materiais alternativos, destacando sua utilização como agregados. Balbo (2007) destaca o uso de RCD como material para camada de reforço, sub-base e base de pavimentos, bem como para concretos compactados com rolo. Entende-se por base e a camada subjacente a ela, a sub-base, como estruturas destinadas a absorver os esforços verticais devido aos veículos com carga.

Segundo Leite (2007 *apud* BODI *et al.*, 1995), a primeira via pavimentada no país utilizando RCD foi em 1984, no município de São Paulo. Na ocasião, foi utilizado o resíduo nas camadas de reforço do subleito e sub-base, e a construção passou por um controle tecnológico completo por meio de parceria entre a Prefeitura Municipal e o Instituto de Pesquisas Tecnológicas. Na época, o desempenho do pavimento executado foi considerado satisfatório para a via, que apresentava baixo volume de tráfego.

Ainda, em 1989 ocorreu um dos primeiros estudos referentes à aplicação de agregados de RCD em camadas de pavimentos rodoviários, sendo estes realizados pela Prefeitura Municipal de São Paulo. Os resultados obtidos apontaram a viabilidade de obtenção de capacidade de suporte quando misturado ao solo usualmente utilizado (PINTO, 1999).

Além de São Paulo, pode-se afirmar que o município de Belo Horizonte se destaca como pioneiro na utilização de agregados reciclados de RCD em camadas

de pavimento rodoviário, tendo empregado o material em camadas de reforço do subleito, sub-base, base e revestimento primário de pavimentos. No período de 1996 a 2001 o município executou, aproximadamente, 400km de vias utilizando em torno de 137 mil toneladas de RCD (DIAS, 2004).

A Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos de Construção Civil e Demolição (ABRECON, 2015) destaca as vantagens do uso dos RCD em pavimentação na forma de brita corrida – diâmetro máximo de 63 mm – ou, em misturas do agregado reciclado com solo:

- a) é a forma de reciclagem que exige menor utilização de tecnologia o que implica menor custo do processo;
- b) permite a utilização de todos os componentes minerais do entulho (tijolos, argamassas, materiais cerâmicos, areia, pedras, etc.), sem a necessidade de separação de nenhum deles;
- c) economia de energia no processo de moagem do entulho (em relação à sua utilização em argamassas), uma vez que, usando-o no concreto, parte do material permanece em granulometrias graúdas;
- d) possibilidade de utilização de uma maior parcela do entulho produzido, como o proveniente de demolições e de pequenas obras que não suportam o investimento em equipamentos de moagem/trituração;
- e) maior eficiência do resíduo quando adicionado aos solos saprolíticos em relação a mesma adição feita com brita. Enquanto a adição de 20% de entulho reciclado ao solo saprolítico gera um aumento de 100% do CBR, nas adições de brita natural o aumento do CBR só é perceptível com dosagens a partir de 40%. (ABRECON, 2015).

No entanto, para serem usados em pavimentação, os agregados – sejam naturais ou artificiais – devem possuir várias propriedades que garantam bom desempenho e, assim, cumprir aos requisitos das normas de desempenho. “A utilização desses agregados artificiais na produção de bases granulares, concretos e de misturas asfálticas é condicionada ao atendimento das mesmas especificações básicas para os agregados naturais, além de outras exigências específicas” (BALBO, 2007).

O resíduo de construção civil é um material que, usualmente, apresenta resistência aliada com baixa expansão, portanto é considerado um material nobre do ponto de vista de engenharia, apresentando potencial para reciclagem e utilização

como agregado em pavimentação. Desta forma, desde a década de 80 este material tem sido tema de estudos analisando suas propriedades, tanto físicas quanto químicas e mecânicas para utilização em pavimentos (MOTTA, 2005).

Ressalta-se, também, que como o material é heterogêneo e não é fornecido com uma característica constante, durante a execução do pavimento podem ser necessárias adaptações no projeto. Portanto, quando se utiliza um material reciclado é primordial a realização de um controle tecnológico completo durante a fase de projeto e execução da obra (BENNERT, PAPP, *et al.*, 2000).

Na década de 90 foi implementado um programa de reciclagem de RCD para utilização em pavimentação no município de São Paulo/SP onde, por meio de ensaios laboratoriais concluiu-se que a utilização de agregado reciclado de RCD era uma alternativa viável e interessante para utilização em pavimentação das vias urbanas (PINTO, 1999 *apud* BODI *et al.*, 1995).

Há inúmeras vantagens para a utilização de agregado proveniente de RCD em pavimentação, dentre elas pode-se destacar a diminuição dos custos de pavimentação, diminuição dos custos de operação dos aterros sanitários, devido à menor quantidade de resíduo envolvido, economia de jazidas minerais naturais e, por fim, o potencial de auto-cimentação do agregado em função da presença de atividade pozolânica (LEITE, 2007).

Segundo Sardá (2003), o município de Belo Horizonte possui um modelo de aplicação de RCD que apresenta bons resultados, produzindo agregados com custo até 83% inferior ao preço médio dos agregados convencionais comercializados no município. Desta forma, a utilização do agregado reciclado representa uma economia de 22% na execução de pavimentação asfáltica.

De acordo com Lima (1999), a pavimentação é uma das aplicações onde o RCD apresenta melhores resultados, havendo conhecimento do meio técnico para a aplicação do reciclado neste serviço com qualidade e segurança.

2.2.4.1 Aspecto econômico

Frasson (2017) realizou uma pesquisa de mercado na cidade de São Paulo, com o intuito de verificar a viabilidade financeira de aquisição de agregados reciclados em relação aos naturais. Desta forma, foram levantados os preços comerciais dos agregados comumente utilizados em obras em pedreiras e usinas localizadas na

Região Metropolitana de São Paulo. Conforme observado na Tabela 2, o preço médio do agregado reciclado é inferior para todos os agregados, representando uma economia média de 38,8% do agregado reciclado frente ao agregado natural, demonstrando uma vantagem financeira de utilização destes em uma obra.

Tabela 2 - Variação de preços entre agregado natural e reciclado

Agregado	Preço médio natural (R\$)	Preço médio reciclado (R\$)	Variação (%)
Bica corrida	48,5	30,0	38,1
Brita 1	48,5	30,0	38,1
Brita 2	48,5	30,0	38,1
Brita 3	48,5	30,5	37,1
Rachãozinho	48,1	30,0	37,6
Rachão	48,1	27,1	43,7

Fonte: (FRASSON, 2017)

Moresco (2017) realizou pesquisas de mercado para análise dos fatores que influenciam os aspectos financeiros referentes à implantação e operação de uma usina de reciclagem de RCD. Foram analisados os preços praticados para comercialização do agregado reciclado nos municípios de Porto Alegre e São Leopoldo, conforme a Tabela 3, onde o preço médio encontrado foi de R\$ 23,00.

Tabela 3 - Valores de comercialização de agregado reciclado

Agregado reciclado	São Leopoldo (m ³)	Porto Alegre (m ³)	Preço médio (m ³)
Areia	R\$25,00	R\$22,00	R\$22,00
Pedrisco	R\$25,00	R\$22,00	R\$23,50
Brita 1	R\$25,00	R\$22,00	R\$23,50
Brita 2	R\$25,00	R\$22,00	R\$23,50
Brita 3	R\$25,00	R\$22,00	R\$21,50
Bica corrida	R\$29,00	R\$22,00	R\$23,00

Fonte: (MORESCO, 2017)

Conforme a pesquisa de Motta (2005), inicialmente o principal atrativo do agregado reciclado é a sua competitividade econômica frente ao agregado natural, pois o primeiro tem sido vendido por preços inferiores aos dos materiais

tradicionalmente utilizados na pavimentação. Como exemplo, cita a Prefeitura do Município de São Paulo/SP que executa um metro cúbico de base com agregado reciclado com um custo 18% inferior à uma base utilizando brita graduada simples, conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 - Preço de base de pavimento executada pela PMSP (jan/2005)

Material empregado	Preço (R\$/m ³)
Brita graduada	52,74
Brita corrida comum	45,03
Agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil	43,50 ¹

Fonte: (MOTTA, 2005).

¹ Não é especificado se o preço se refere à agregados mistos ou de concreto. Sabe-se somente que o preço engloba o fornecimento de material e o serviço para uma distância de transporte de até 8,00 km

Em relação ao município de Blumenau, Sardá (2003) simulou a realização das obras executadas no município no ano de 2002, e concluiu que, caso houvesse uma substituição dos agregados naturais por agregados reciclados, haveria uma economia de 61% na despesa referente à aquisição desta matéria-prima.

2.3 Estudos de Casos

Ao longo dos anos foram desenvolvidas inúmeras pesquisas no âmbito do reaproveitamento de RCD em camadas de pavimentos rodoviários em todo o país. Assim, destaca-se a seguir aspectos importantes de pesquisas correlatas à esta que auxiliaram no embasamento teórico e técnico para o desenvolvimento deste trabalho.

2.3.1 Caracterização física do RCD reciclado

O objetivo do trabalho de Silva e Arnosti Jr. (2006) foi determinar as propriedades físicas e químicas do RCD reciclado na Empresa de Desenvolvimento Habitacional de Piracicaba (EMDHAP) e suas respectivas variabilidades observadas em uma escala temporal de seis quinzenas e, ainda, identificar os possíveis contaminantes ambientais presentes no resíduo reciclado, visando classifica-lo de

acordo com a Norma ABNT NBR 10004 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004).

O RCD reciclado, apesar de ser heterogêneo, apresentou granulometria com baixa variabilidade entre os lotes estudados. Segundo Ângulo e Ulsen *et al.* (2002), a redução da variabilidade da composição e de outras propriedades pela tendência de média de valores é fundamental para a produção em larga escala. Os resultados apresentados mostram a baixa variabilidade neste material para os limites de consistência, ressaltando a qualidade do RCD reciclado para aplicação em obras de pavimentação em larga escala.

O RCD reciclado estudado por Silva e Arnosti Jr. (2006), apesar de ser heterogêneo, apresentou granulometria com baixa variabilidade entre os lotes estudados. Segundo Ângulo e Ulsen *et al.* (2002), a redução da variabilidade da composição e de outras propriedades pela tendência de média de valores é fundamental para a produção em larga escala. Os resultados apresentados mostram a baixa variabilidade neste material para os limites de consistência, ressaltando a qualidade do RCD reciclado para aplicação em obras de pavimentação em larga escala.

Em todas as propriedades físicas resultantes na pesquisa de Silva e Arnosti Jr. (2006), houve baixa variabilidade entre os lotes, pois as amostras foram obtidas após a etapa de homogeneização de cada lote, o que minimiza a heterogeneidade original de resíduos provenientes de construção civil, fato este que melhora a qualidade das propriedades físicas para o uso deste resíduo em blocos de concreto para vedação, base e sub-base de pavimentos.

Na pesquisa de Motta (2005), foi realizada a caracterização física do agregado, por meio dos seguintes ensaios: (a) natureza dos materiais constituintes; (b) distribuição granulométrica; (c) absorção de água; (d) atividades pozolânica; (e) resistência ao desgaste; (f) forma dos grãos; e (g) teor de materiais indesejáveis.

Dentre os resultados encontrados por Motta (2005), pode-se destacar que em relação ao ensaio de Abrasão Los Angeles o agregado atingiu um índice de 50%, considerado alto. Entretanto, este resultado não significa que o reciclado não possa ser considerado para o uso em pavimentação, pois os experimentos mecânicos apresentam resultados mais coerentes com o comportamento do agregado quando utilizado em pavimentação, pois um agregado que atenda à especificação Los

Angeles poderá estar sujeito à alteração granulométrica frente ao seu desempenho em relação à ação das cargas (DIAS, 2004).

Durante a execução da pavimentação, Leite (2007) coletou amostra do agregado de RCD proveniente da usina de Santo André para caracterização em laboratório. Foram determinados seis aspectos físicos do material, sendo eles: composição, materiais indesejáveis, massa específica dos grãos, absorção de água, distribuição granulométrica e forma dos grãos.

Em relação à granulometria de agregados reciclados, Delongui (2012) analisou a curva granulométrica de três amostras coletadas em épocas distintas de um mesmo local, identificando que houve pouca variação entre as três curvas elaboradas, todas apresentando-se desuniformes e bem graduadas. O RCD em estudo apresentou predominância de partículas cerâmicas e resultou em um elevado percentual de abrasividade do resíduo, em torno de 48%.

Quando analisada a durabilidade do agregado reciclado de RCD, Delongui (2012) observou um percentual de desgaste da ordem de 11%, o que atende às recomendações normativas para aplicação do material em camadas de pavimentos rodoviários. Em relação à forma das partículas, verificou que os grãos apresentavam predominância de partículas lamelares e alongadas.

2.3.2 Caracterização mecânica do RCD reciclado

Para a análise da compactação do material, Motta (2005) optou pela não utilização da energia modificada, pois como o agregado reciclado demonstrou ser muito abrasivo, tal energia de compactação poderia impor uma quebra aos grãos muito significativa. Desta forma, optou-se pela utilização das energias normal e intermediária para o estudo em questão.

Comparando os resultados obtidos com o agregado reciclado em relação à uma brita graduada simples, Motta (2005) identificou-se que os valores de ISC do agregado reciclado apresentaram-se mais satisfatórios, com resultados maiores, pois o agregado reciclado em sua condição *in natura* sofreu aumento do ISC com o tempo de cura a ponto de se tornar maior que o da brita graduada compactada em energia mais elevada.

Apesar da curva granulométrica apresentar-se semelhante em ambas as energias de compactação, conforme já esperado por Motta (2005), os corpos de prova

moldados com a energia de compactação intermediária apresentaram Índice de Suporte Califórnia expressivamente elevados em relação à Normal, 84% frente a 36%.

Motta (2005) indicou que a utilização de cal e cimento Portland na pesquisa ocorre devido ao potencial aglomerante destas substâncias, capaz de proporcionar alterações das propriedades mecânicas do agregado reciclado, por meio do aumento de resistência do material, devido à ocorrência de reação pozolânica. Considerando a cura do material, todos os CPs, inclusive os *in natura*, foram submetidos ao mesmo período de cura, para avaliar se as partículas não inertes contidas no RCD promoveriam, também, reações pozolânicas.

O ensaio MR registrou um aumento de 66% do Módulo de Resiliência dos 0 aos 28 dias, de 25% dos 28 aos 90 dias e de 8% dos 90 dias aos 180 dias de cura, o que demonstra que ocorreram reações pozolânicas no RCD, indicando que o material não é totalmente inerte (MOTTA, 2005).

O objetivo da pesquisa de Leite (2007) é estudar o comportamento mecânico de agregado de RCD em laboratório e em campo para emprego em camadas de pavimentação de vias de baixo volume de tráfego. A autora realizou um acompanhamento *in situ* na estrutura, realizando controle tecnológico durante a construção do pavimento e após a sua conclusão. Também foram realizados ensaios laboratoriais do agregado utilizado, sendo as amostras coletadas em campo durante a execução do pavimento de uma via de baixo volume de tráfego no campus da USP.

Para a análise mecânica, Leite (2007) optou pela utilização da compactação nas energias intermediária e modificada, além da realização de ensaios de Módulo de Resiliência e deformação permanente. Também foram analisadas a granulometria e a forma do material após a compactação, pois durante a moldagem dos corpos de prova verificou-se que conforme aumentava a energia de compactação aumentava a quebra das partículas do agregado reciclado. Para a execução dos controles tecnológicos durante a construção do pavimento, foram realizados os ensaios preconizados pela Norma ABNT NBR 15115 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004), por meio do controle dos insumos e controle de execução.

Em relação ao ensaio de Índice de Suporte Califórnia, Leite (2007) obteve médias de 73% e 117% para a energia intermediária e modificada, entretanto os dados obtidos apresentam alto desvio padrão em função da heterogeneidade do material estudado. Em relação aos limites recomendados pela Norma ABNT NBR 15115

(ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004), os valores médios encontrados satisfazem o mínimo exigido para o emprego do material em camadas de reforço do subleito, sub-base e base.

Em comparação com outros trabalhos, Leite (2007) conclui que os valores de ISC obtidos em sua pesquisa são semelhantes a valores verificados para agregados mistos. Também, o material reciclado de Santo André não apresentou expansão em presença de água durante o ensaio.

Para análise do comportamento mecânico do agregado reciclado de RCD, Delongui (2012) utilizou as energias de compactação normal e intermediária, enquadrando o material nas faixas A, C e E conforme a especificação DNIT-ES 141/2010 (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2010). Assim, para todas as faixas de trabalho foi possível observar que com o aumento do grau de compactação ocorreu um aumento da massa específica do corpo de prova, bem como a diminuição da umidade ótima. Salienta-se que como a granulometria da Faixa E apresenta-se predominantemente miúda, esta necessitou de maior quantidade de água para promover a melhor compactação, porém também apresentou maior coesão entre as partículas quando comparada às demais.

Em relação à capacidade de suporte do material reciclado de RCD, Delongui (2012) observou que as amostras com maior intertravamento apresentam valores superiores no ensaio de Índice de Suporte Califórnia e, assim, quando aplicada energia normal a amostra ensaiada utilizando a Faixa C apresentou resultados superiores às demais. Entretanto, quando aplicada energia intermediária de compactação, esta promoveu maiores quebras nas partículas da amostra de Faixa A, o que promoveu um maior intertravamento entre os agregados e, conseqüentemente, resultou em capacidade de suporte 8% superior do que a Faixa C. Também, é importante destacar que as amostras ensaiadas com a Faixa E apresentaram resultados semelhantes à capacidade de suporte de solos.

2.3.3 Análise da influência da compactação no agregado reciclado

Motta (2005) realizou estudo referente à alteração da granulometria da amostra após as compactações com ambas as energias, o que demonstrou que houve significativa mudança no diâmetro nominal do agregado em relação à curva inicial

para ambas as energias. Entretanto, apesar da energia de compactação ser significativamente maior na Intermediária, as curvas granulométricas após a compactação apresentaram configurações semelhantes.

Para avaliar a influência da compactação no agregado reciclado, Leite (2007) realizou a moldagem de dois corpos de prova, sendo um na energia intermediária e outro na energia modificada. Desta forma, foi possível observar que ocorreram variações na granulometria em todas as peneiras utilizadas para o ensaio para a utilização de ambas as energias, porém a aplicação de energia modificada promoveu maiores quebras e variações granulométricas, em especial na peneira #200, cuja porcentagem passante dobrou após a compactação. Também, após a compactação observou-se um ligeiro aumento de partículas cúbicas nas amostras.

Delongui (2012) também observou as variações granulométricas sofridas em corpos de prova de resíduo de construção e demolição após a aplicação de energia de compactação normal e intermediária. Ainda, foi analisada esta influência através da utilização das faixas granulométricas A, C e E da especificação DNIT-ES 141/2010 (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2010).

Assim, Delongui (2012) identificou que a aplicação de energia de compactação intermediária promove maiores quebras nas partículas quando comparada à variação decorrente da aplicação da energia normal. Também, verificou que por apresentar predominância de fração graúda, os corpos de prova moldados segundo a Faixa granulométrica A apresentaram maiores quebras em suas partículas quando comparada à faixa E, que apresenta uma predominância de grãos miúdos.

Analisando o índice de forma e lamelaridade das partículas após a compactação, Delongui (2012) também observou variabilidade quando comparado aos ensaios realizado nas amostras antes da compactação. Identificou-se que a aplicação de energia de compactação promove quebras nas partículas lamelares e alongadas, de forma à aumentar a cubicidade das amostras e reduzir o índice de lamelaridade de 29,08% para 17,19%.

2.3.4 Análise da viabilidade técnica da aplicação de RCD em camadas de pavimento

A pesquisa de Leite (2007) demonstrou que os agregados de RCD apresentam um comportamento mais satisfatório quando compactados com maior energia, sendo indispensável o uso da energia modificada para possibilitar um melhor desempenho

do material quando utilizado em estrutura de pavimentos. Para utilização em camadas de base, a autora recomendou que o tráfego seja conhecido e que seja verificada em campo a deformação permanente após a execução do pavimento.

Em relação ao controle tecnológico realizado em campo, Leite (2007) analisou oito amostras diferentes coletadas em campo, as quais apresentaram grande variabilidade em relação à granulometria, reforçando a importância do controle tecnológico na utilização de agregado reciclado.

Com sua pesquisa, Motta (2005) concluiu que o uso de agregado de RCD é passível de uso para a construção de bases e sub-bases, além de reforço do subleito, em vias de baixo tráfego, em substituição aos materiais convencionais. Porém, alerta que devido à heterogeneidade do agregado, é necessário um controle rigoroso de caracterização do material para assegurar as condições do projeto.

Delongui (2012) observou em sua pesquisa que a com relação à caracterização do agregado reciclado de RCD, este apresenta características que atendem à todas as especificações técnicas adotadas em sua pesquisa, atendendo aos parâmetros de granulometria, abrasão, durabilidade e capacidade de suporte. Também verificou que a aplicação de uma energia maior de compactação promove quebra nas partículas de forma à resultar em uma parcela maior de material fino, acarretando em um maior intertravamento entre os grãos, o que colabora para aumentar a capacidade de suporte.

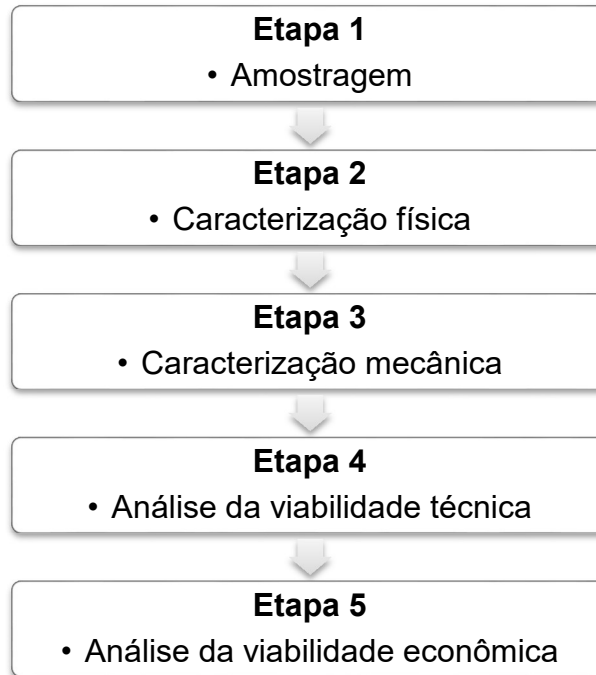
O estudo de Delongui (2012) também indica que a produção e qualidade do agregado reciclado é decorrente de um modelo de gestão adequado empregado na cidade cujo material foi objeto de seu estudo. Assim, para que este material seja produzido e fornecido para obras rodoviárias é necessário que sejam implementados modelos de mesma eficácia nos demais locais, onde haja uma triagem apropriada do material antes do processo de britagem.

As pesquisas citadas corroboram para a indicação da utilização de agregados reciclados de RCD em pavimentos rodoviários, demonstrando que possuem características técnicas aceitáveis para sua aplicação. A literatura indica que este material é viável para aplicação desde que sejam respeitadas as condicionantes normatizadas, envolvendo um rigoroso processo de triagem deste material para evitar a contaminação deste.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A presente pesquisa foi estruturada em 5 etapas, conforme apresentado na Figura 5.

Figura 5 - Fluxograma metodologia de pesquisa



Fonte: Autoria própria (2020).

A etapa 1 consistiu na coleta de 2 amostras de agregado reciclado de RCD; a etapa 2 compreendeu ensaios laboratoriais para caracterização física das 2 amostras de agregado coletado; a etapa 3 consistiu em ensaios laboratoriais para caracterização do comportamento mecânico do agregado reciclado; a etapa 4 da metodologia proposta baseou-se na análise da viabilidade técnica para utilização do agregado em camadas de pavimentos rodoviários baseado nos resultados obtidos através das etapas 2 e 3 desta pesquisa; por fim, a etapa 5 compreendeu a análise de viabilidade econômica para o fornecimento do agregado reciclado de RCD para emprego em obras de pavimentação rodoviária.

3.1 Coleta de material

A coleta de resíduo reciclado de RCD para a realização da pesquisa ocorreu no Aterro de Inertes Jorge Lanner, local da instalação CTRCD, bairro Niterói, Município de Canoas/RS.

Devido à composição do material estocado no aterro variar conforme os resíduos coletados diariamente na cidade, para esta pesquisa foram coletadas 2 amostras, cada uma destas compostas com aproximadamente 180kg de RCD. A primeira amostra foi coletada em Outubro/2019, ao passo que coletou-se a segunda amostra em Maio/2020. De acordo com a metodologia adotada, foi coletado material depositado recentemente (Figura 6), pois o material depositado no local há mais tempo pode sofrer reações de matéria orgânica, o que deve ser evitado, conforme a Norma ABNT NBR 15115/2004 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004).

Figura 6 - RDC Reciclado



Fonte: Autoria própria (2020).

Após a coleta, o material foi destinado ao Laboratório da empresa Ecoplan Engenharia, localizado no Município de Porto Alegre/RS, onde permaneceu estocado em baldes de plástico até sua devida utilização nos ensaios necessários, citados a seguir. Destaca-se que os ensaios referentes à granulometria, Índice de Plasticidade, Limite de Liquidez, Equivalente de Areia, Composição e Teor de materiais

indesejáveis foram realizados no laboratório da empresa Ecoplan Engenharia, ao passo que os demais ensaios foram realizados pela empresa MV PAV Engenharia.

Assim, a amostra coletada em Outubro/2019 foi denominada Amostra 1, ao passo que o material coletado em Maio/2020 foi denominado Amostra 2. Esta terminologia foi adotada durante a realização de todos os ensaios laboratoriais, bem como para a apresentação dos resultados ao longo deste trabalho.

Para a estabilização granulométrica do material, também foi necessária coleta de agregado natural proveniente da Britagem Bolognesi, que é uma pedra comercial localizada no município de Eldorado do Sul. Foi coletado aproximadamente 150kg de material, sendo 75kg de Pó de Pedra e 75kg de brita 3/8" proveniente da referida pedra comercial. O material foi destinado ao laboratório da empresa Ecoplan Engenharia para estocagem até utilização.

3.1.1 Aterro Jorge Lanner

Conforme o Plano Municipal de Gestão de Resíduos da Construção Civil de Canoas/RS (2018), a Central de Triagem de Resíduos de Construção e Demolição (CTRCD) Niterói, popularmente chamada de Aterro Jorge Lanner, está localizada na região sudeste do município de Canoas (RS), local onde historicamente há atividades relacionadas à RCD. As atividades no local iniciaram-se na década de 80, com a execução de um aterro na área com a utilização de resíduos sem a ocorrência de segregação dos mesmos, sendo aterrados resíduos Classe II B, inertes, e resíduos Classe II A, não inertes.

A prática de aterramento do RCD sem segregação está em desconformidade com as leis e normas técnicas vigentes, que prezam pela reutilização e reinserção deste material no ciclo produtivo. Portanto, devido aos impactos ambientais causados esta prática deve ser eliminada o quanto antes (CANOAS, 2018).

O Município de Canoas apresenta, atualmente, cerca de 85 pontos de descartes irregulares de resíduos, os quais são periodicamente coletados pela Prefeitura Municipal e levados para o Aterro Municipal Jorge Lanner. Grande parte dos resíduos públicos e privados gerados no município são destinados a este aterro, sem que ocorra algum tipo de separação entre os mesmos, o que gera um passivo ambiental à cidade de Canoas (CANOAS, 2018).

O Plano Municipal de Gestão de Resíduos de Construção Civil apresenta um plano para Reestruturação do CTRCD Jorge Lanner, o qual tem por objetivo principal a valoração dos RCD e materiais volumosos recebidos na Central. Esta valoração deve considerar as características de cada material, beneficiando-os conforme seus potenciais específicos, e ampliando a reutilização e reciclagem destes resíduos.

Como forma de valoração destes resíduos, uma alternativa apresentada é a instalação de uma Usina de Reciclagem, a qual transformará o RCD em agregados reciclados, que poderão ser reinseridos no ciclo produtivo. Neste sentido, a Prefeitura Municipal de Canoas realizou a contratação da empresa SBR – Soluções em Britagem de Resíduos para a Implantação da Gestão Integrada e Manejo de Resíduos da Construção Civil, Demolição e Volumosos, o que implica, também, na implantação da Central de Triagem e Beneficiamento dos Resíduos da Construção Civil, Demolição e Volumosos.

Por meio da Figura 7, fornecida pela Prefeitura Municipal de Canoas (PMC), é possível identificar a disposição futura das instalações no Aterro Jorge Lanner, inicialmente por meio da instalação da usina de reciclagem de RCD. Conforme a PMC, a instalação desta usina, bem como a recuperação do passivo ambiental já existente no local, é apenas o início de um projeto para tornar o município de Canoas referência nacional em reciclagem de resíduos.

Figura 7 - Planta de Situação Aterro Jorge Lanner



Fonte: Prefeitura Municipal de Canoas (2019).

Desta forma, futuramente a PMC prevê a instalação de uma usina de asfalto e uma fábrica de artefatos no local, ambos com a utilização do agregado de RCD produzido no local. Até a publicação do presente trabalho, estão instalados no local a central de triagem de resíduos e os equipamentos para realização da britagem do RCD, conforme Figura 8.

Figura 8 - Britador instalado no Aterro Jorge Lanner



Fonte: Autoria própria (2020).

Assim, alguns dos objetivos citados pela Prefeitura Municipal de Canoas no Termo de Referência adotado para a contratação da referida empresa são (CANOAS, 2019):

- a) A redução significativa dos descartes clandestinos que ocorrem hoje no Município; (...)
- e) A transformação de um problema crônico (descarte incorreto de entulho) em uma solução sustentável; (...)
- h) A redução dos gastos com agregados (brita) utilizados pelo Poder Executivo na medida em que, conforme item 3.7, os materiais reciclados produzidos são destinados ao Município;
- i) A eventual inserção no mercado de construção civil de novos produtos originários do material reciclado;
- j) A inibição do descarte irregular de resíduos, através da implantação de fiscalização constante dos pontos na cidade. (CANOAS, 2019).

Portanto, em relação ao RCD, é de responsabilidade da empresa contratada a instalação de uma linha de triagem, linha de britagem e linha de peneiramento para

realização do beneficiamento deste resíduo em agregados. A capacidade mínima da estrutura instalada é referente ao processamento de 90 m³/hora, produzindo os seguintes produtos: terra, areia reciclada, pedrisco reciclado, pedra britada n° 1 reciclada, pedra britada n° 2 reciclada e pedra britada n° 3 reciclada.

Atualmente, a gestão e o processamento do resíduo destinado ao aterro em questão são executados pela empresa SBR – Soluções em Britagem de Resíduos, contratada pela Prefeitura Municipal de Canoas. No contrato entre as partes está previsto o beneficiamento do resíduo sólido municipal destinado ao aterro em questão, conforme a Figura 9.

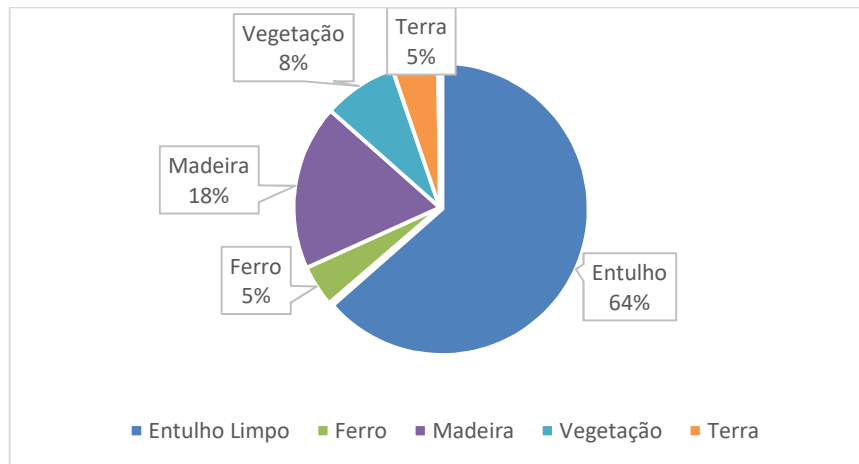
Figura 9 - Resíduo estocado



Fonte: Autoria própria (2020).

Conforme dados fornecidos pela Prefeitura Municipal de Canoas, em média, o CTRCD Niterói recebe mensalmente 30,5 mil m³ em resíduos e, destes, aproximadamente 20 mil m³ são compostos por entulho. Entretanto, do montante de entulho apenas 1,4 mil m³ são considerados entulho “limpo”, sem a presença de resíduos diversos. Através da Figura 10 apresenta-se o gráfico demonstrando os diversos materiais destinados ao local, com exceção dos materiais classificados como “entulho sujo” e “volumosos”, cuja parcela não é representativa frente ao volume total de resíduos recebidos no local.

Figura 10 - Composição do resíduo recebido no Aterro Jorge Lanner

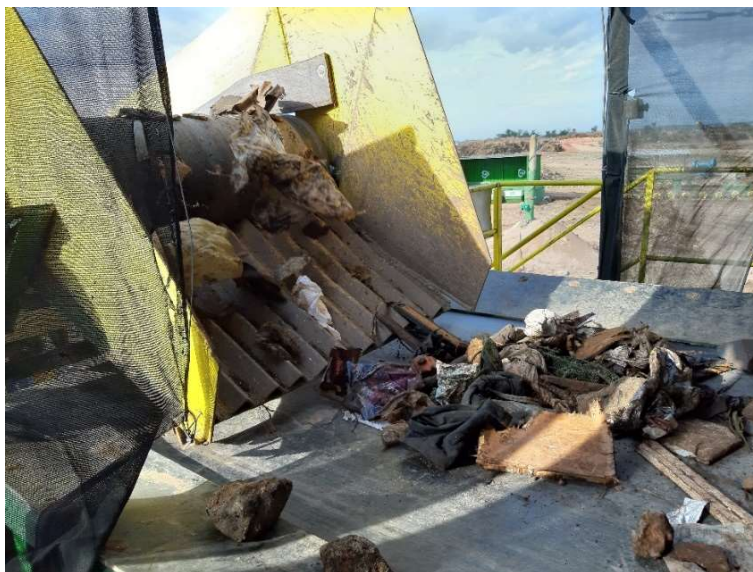


Fonte: Dados fornecidos pela Prefeitura Municipal de Canoas (2020).

Em relação ao material destinado e beneficiado no local, inicialmente este passa por diversos processos de triagem e separação dos materiais. A primeira triagem realizada acontece por meio de equipamentos como escavadeiras, que realizam uma separação primária entre os resíduos. Isto é necessário pois os diversos pontos de coleta de materiais distribuídos no município são depósitos não apenas do RCD, pois a população acaba destinando a estes pontos resíduos diversos como, por exemplo, madeira e galhos provenientes de poda.

Desta forma, após passar por esta triagem mecânica, o resíduo é direcionado (Figura 11) à uma segunda triagem, manual, onde serão removidas partículas menores que estejam misturadas ao RCD, como plástico, metal ou resíduos orgânicos. Por fim, o resíduo é destinado ao britador, onde está instalado um separador magnético para remover qualquer resíduo metálico remanescente.

Figura 11 - Resíduo antes da triagem manual



Fonte: Autoria própria (2020).

3.2 Caracterização física do RCD

3.2.1 Distribuição granulométrica

A granulometria do material, representada pela curva de distribuição granulométrica, é a característica que promove a estabilidade das camadas, devido ao atrito interno obtido pelo entrosamento das partículas devido à sua distribuição granulométrica (DNIT, 2006). O ensaio de distribuição granulométrica referente ao agregado reciclado utilizado nesta pesquisa foi executado segundo a Norma DNER-ME 080/94 (DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, 1994). Para a análise de distribuição granulométrica do agregado reciclado foi ensaiada uma amostra referente à cada coleta realizada no Aterro Jorge Lanner, sendo identificadas nesta pesquisa como Amostra 1 ou Amostra 2.

Inicialmente, cada amostra foi pesada em balança da marca Balmak, modelo ELC-25, antes do início do ensaio na temperatura ambiente. Após, a amostra foi passada na peneira com abertura de 2,0 mm, destorroando-se os eventuais torrões encontrados. A parte retida na peneira de 2,0 mm passou pelo processo de lavagem e secagem em estufa à temperatura de 60°C e, posteriormente, foi utilizada no peneiramento grosso.

As aberturas das peneiras utilizadas para o peneiramento são: 50 mm, 38 mm, 25 mm, 19 mm, 12,5mm, 9,5 mm, 4,8 mm e 2,0 mm. Para o peneiramento fino foram utilizadas as seguintes aberturas de peneiras: 9,5 mm, 4,75 mm, 2,00 mm, 0,425 mm e 0,075 mm.

Os resultados obtidos estão apresentados no Capítulo 4 através de uma curva granulométrica indicando as porcentagens passantes referente aos diâmetros do material ensaiado no eixo das ordenadas e as aberturas das peneiras apresentadas nos eixos das ordenadas. A amostra também foi classificada como bem graduada, mal graduada ou uniformemente graduada dependendo do formado da curva granulométrica (DNIT, 2006).

Esta classificação, segundo Leite (2007), é baseada conforme a proporção entre a fração grossa e a fração fina do material, por meio do cálculo do Coeficiente de Curvatura (C_c) e do Coeficiente de Uniformidade (C_u). A uniformidade granulométrica do material é determinada pelo C_u , pois quanto menor o valor deste coeficiente, maior a uniformidade do agregado. Desta forma, é desejável que o material apresente valores altos em relação à este coeficiente, demonstrando que tem uma boa graduação. Em relação ao coeficiente C_c , é desejável que seu valor esteja entre 1 e 3, indicando que o agregado é bem graduado (LEITE, 2007).

Os coeficientes acima citados são expressos pelas Equações (1) e (2).

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (1)$$

$$C_c = \frac{(d_{30})^2}{d_{60} \times d_{10}} \quad (2)$$

Onde:

C_u : coeficiente de uniformidade;

C_c : coeficiente de curvatura;

d_{10} : diâmetro correspondente à 10% da porcentagem passante, em *mm*;

d_{30} : diâmetro correspondente à 30% da porcentagem passante, em *mm*;

d_{60} : diâmetro correspondente à 60% da porcentagem passante, em *mm*.

A Norma ABNT NBR 15115 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004) não determina limites em relação ao coeficiente C_c , porém

estabelece que o C_u seja maior ou igual à 10 e, também, que a porcentagem de material que passa na peneira n° 40 deve estar entre 10% e 40%.

Desta forma, para este trabalho, foram calculados estes parâmetros para as duas amostras coletadas no Aterro Jorge Lanner. Ao não atingir os parâmetros necessários para utilização em camadas de pavimento, foi necessário estabilizar granulometricamente o material com agregado proveniente da Britagem Bolognesi, localizada no município de Eldorado do Sul, cujos ensaios de caracterização física do agregado são apresentados em anexo.

3.2.1.1 Índice de Grupo

Segundo Carneiros, Burgos e Alberte (2001), Índice de Grupo é um parâmetro utilizado em conjunto com a curva granulométrica para avaliar a aplicabilidade de solos e agregados. Este método também é conhecido como método empírico da HRB (Highway Research Board), sendo baseado na granulometria, limite de liquidez e índice de plasticidade dos materiais.

O Índice de Grupo é um valor numérico, entre 0 e 20, que retrata o duplo aspecto da plasticidade e graduação das partículas do solo. O cálculo do IG para o agregado de RCD foi realizado através da Equação (3), conforme DNIT (2006):

$$IG = 0,2a + 0,005ac + 0,01bd \quad (3)$$

onde:

a = % de material que passa na peneira n° 200, menos 35. Se a % obtida nesta diferença for maior que 75, adota-se 75; se for menor que 35, adota-se 35. (a varia de 0 a 40);

b = % de material que passa na peneira n° 200, menos 15. Se a % obtida nesta diferença for maior que 55, adota-se 55; se for menor que 15, adota-se 15. (b varia de 0 a 40);

c = Valor do Limite de Liquidez menos 40. Se o Limite de Liquidez for maior que 60, adota-se 60 se for menor que 40, adota-se 40 (c varia de 0 a 20);

d = Valor de Índice de Plasticidade menos 10. Se o Índice de Plasticidade for maior que 30, adota-se 30; se for menor que 10, adota-se 10 (d varia de 0 a 20).

Assim, após a realização da caracterização física através de ensaios de granulometria, Limite de Liquidez e Índice de Plasticidade, foi calculado o Índice de Grupo para ambas as amostras coletadas. O resultado obtido foi apresentado e discutido em conjunto com os demais ensaios e parâmetros de caracterização física do agregado reciclado de RCD.

3.2.2 Composição

Segundo Leite (2007), a determinação da composição do agregado de resíduo reciclado é uma etapa importante para a compreensão do comportamento do mesmo agregado. Assim, para a análise da composição do agregado reciclado em estudo, foi adotada a orientação preconizada pelo Anexo A da Norma NBR 15116 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004).

Para a determinação de quais materiais compõem as amostras em estudo foram analisados aproximadamente 10kg de cada amostra, pesado em balança da marca Balmak, modelo ELC-25. Inicialmente foram separados apenas o material retido na peneira com abertura de 4,8mm, pois o material passante apresenta partículas pequenas cuja distinção visual é difícil. Após esta separação, o material foi analisado de forma visual, separando-o conforme as seguintes características: cimentícia, cerâmica, rochosa, material indesejável.

Os resultados foram expressos no Capítulo 4 através de porcentagem em relação ao peso total da amostra em análise, o que indicará qual o material predominante do agregado reciclado proveniente do Aterro Jorge Lanner.

3.2.3 Resistência à abrasão

O ensaio de resistência à abrasão determina o desgaste sofrido pelo agregado quando colocado no equipamento "Los Angeles", conforme Figura 12, juntamente com uma carga abrasiva. Este ensaio foi executado seguindo os procedimentos da Norma DNER-ME 035/98 (DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, 1998).

Figura 12 - Máquina de abrasão “Los Angeles”



Fonte: Autoria própria (2020).

Foram ensaiadas duas amostras, que inicialmente foram lavadas, secas em estufa em temperatura de 105°C até atingir a constância de peso e pesadas em balança da marca Balmak, modelo ELC-25. A carga abrasiva utilizada para o ensaio consiste de esferas metálicas, determinada conforme a granulometria do agregado e conforme a Tabela 5.

Tabela 5 - Carga Abrasiva

Graduação	Número de esferas	Massa de carga (g)
A	12	5.000 ± 25
B	11	4.584 ± 25
C	8	3.330 ± 20
D	6	2.500 ± 15
E	12	5.000 ± 25
F	12	5.000 ± 25
G	12	5.000 ± 25

Fonte: DNIT (1998).

Para realização deste ensaio, inicialmente foi realizada classificação conforme a granulometria do material em estudo. O agregado de RCD do Aterro Jorge Lanner

foi classificado na graduação B, de acordo com as graduações indicadas na referida norma. Assim, o material foi colocado no tambor juntamente com a carga abrasiva, girando com rotação de 30 a 33 rpm, até completar o número de rotações necessárias, definido também pela faixa granulométrica. Após, a amostra retirada do tambor e é passada pela peneira de abertura 1,7 mm, descartando-se o material passante. O material retido na peneira é lavado e seco em estufa, para posterior pesagem.

Com a massa do material antes e depois do ensaio, é possível calcular a Abrasão Los Angeles do agregado, expressa em percentagem.

3.2.4 Índice de forma do agregado

Segundo Bernucci *et al.* (2006), a forma das partículas influencia na trabalhabilidade, resistência ao cisalhamento e energia de compactação necessária para se alcançar certa densidade do pavimento. O intertravamento entre as partículas é favorecido quando o material é composto por partículas irregulares ou com forma angular. Desta forma, quanto maior cúbicas forem os grãos e afilados suas arestas, melhor o desempenho do agregado no momento da compactação.

O índice de forma permite avaliar um agregado em relação ao formato de suas partículas. Quando este índice se encontra próximo à 1, significa que o agregado apresenta partículas cúbicas, consideradas ótimas para o intertravamento dos agregados quando compactados. Assim, quanto maior este índice, mais lamelar é o material analisado.

O ensaio de índice de forma do agregado, realizado para análise da geometria predominante dos agregados graúdos da mistura, conforme preconiza a Norma ABNT NBR 7809/2019 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019).

Para a verificação da lamelalidade, foi desprezada a fração da amostra passante na peneira com abertura de 9,5 mm e as frações que representassem menos de 5% da massa total da amostra. Este ensaio consiste em realizar medidas das dimensões de 200 "grãos" utilizando um paquímetro, onde basicamente se realizam quatro leituras por "grão" de sua maior e sua menor dimensão. Para a obtenção do número de grãos para cada tamanho do agregado, deve-se utilizar os dados obtidos na granulometria, de forma a ensaiar um número de agregados tal qual represente a curva granulométrica encontrada.

Após a medição de comprimento e espessura de todas as partículas de ambas as amostras, procedeu-se com o cálculo do índice de forma, conforme a equação (4).

$$I = \frac{c_{\text{médio}}}{e_{\text{médio}}} \quad (4)$$

Onde:

I: índice de forma do agregado;

$c_{\text{médio}}$: comprimento médio, expresso em milímetros (mm) dos 200 grãos;

$e_{\text{médio}}$: espessura média, expresso em milímetros (mm) dos 200 grãos;

O índice de forma do agregado de RCD foi calculado por meio de uma média ponderada das relações entre comprimento e espessura de todos os grãos medidos.

3.2.5 Teor de materiais indesejáveis

De acordo com a Norma ABNT NBR 15115/2004, o teor de materiais indesejáveis não deve ultrapassar 3%, quando compostos de materiais distintos, e 2% caso seja composto de apenas um material indesejável (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004).

Para verificar se o RCD coletado no Aterro Jorge Lanner atende este requisito, ensaiou-se duas amostras de, aproximadamente, 10 kg cada, que foram pesadas em balança da marca Balmak, modelo ELC-25. Esta amostra foi passada pela peneira com abertura de 4,8 mm, da marca Solotest, sendo o material retido analisado visualmente, retirando por meio de separação manual o que for considerado indesejável, como plásticos, vidros, etc.

O resultado obtido é analisado em porcentagem de material indesejável em relação à massa total de cada amostra analisada, considerando também a parcela de materiais finos.

3.2.6 Limite de Liquidez

Segundo Senço (2007), apenas a granulometria de um material não é fator determinante para avaliar a influência da fração fina neste, pois ele não indica a noção

exata do comportamento do conjunto de partículas. Assim, é importante a realização de outros ensaios para analisar outras propriedades que também possam interessar ao estudo.

Conforme Jimenez (2011), os limites de Atterberg descrevem a consistência dos solos finos granulares segundo a variação do teor de umidade neste, definindo assim o limite de contração, limite de plasticidade e limite de liquidez. O limite de liquidez (LL) reflete a quantidade e tipo de argila presente no material, expressando o volume de água que pode ser absorvida pela fração miúda do solo e, quanto maior este limite, mais compressível será o solo (VENDRONI e CARVALHO, 2008).

Assim, apesar da literatura, a exemplo de Silva (2012) e Dias (2004), indicarem que materiais reciclados de RCD apresentam comportamento Não Líquido e Não Plástico devido à baixa porcentagem de fração argila nestes materiais, optou-se por realizar estes ensaios no agregado reciclado do Aterro Jorge Lanner, agregando à caracterização física deste material.

O ensaio do Limite de Liquidez de um define o teor de umidade que delimita a fronteira entre o estado Líquido e o estado Plástico deste material. O ensaio utilizou duas amostras, cada uma com aproximadamente 100 g, e conforme a Norma ABNT NBR 6459/2016 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016).

Para o ensaio, a amostra seca foi preparada utilizando-se água destilada objetivando formar uma pasta homogênea, sendo uma parte transferida para uma concha que foi dividida em duas partes, abrindo uma ranhura em sua parte central. A concha foi colocada no aparelho e golpeada até que as bordas inferiores desta pasta se unam em, aproximadamente, 13 mm. O número de golpes foi registrado e uma parte da pasta foi empregue para a determinação da umidade da mistura, realizado em, pelo menos, quatro pontos de ensaio com umidades diferentes. Sabe-se que o Limite de Liquidez do material é determinado pelo teor de umidade correspondente a 25 golpes.

3.2.7 Índice de Plasticidade

Índice de Plasticidade é o valor de umidade correspondente ao limite onde o solo, ou o material em questão, passa do estado plástico para o estado semissólido. Para a realização deste ensaio utilizou-se duas amostras, ensaiadas conforme a

Norma ABNT NBR 7180:2016 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016).

Cada amostra compõe-se pelo material passante na peneira nº 40, da marca Solotest, e será inicialmente seca em estufa para, posteriormente, passar pelos procedimentos necessários ao ensaio. A amostra foi colocada em um recipiente de porcelana, onde adicionou-se água destilada, obtendo uma pasta homogênea. Cerca de 10 g da amostra foi tomada, formando uma pequena bola e rolando-a sobre uma superfície de vidro, tomando a forma de um cilindro.

Quando este cilindro se fragmenta com diâmetro de 3 mm e comprimento aproximado de 100 mm, esta amostra deve ter a sua umidade aferida imediatamente. Esta operação deve ser repetida pelo menos três vezes, obtendo três teores de umidade diferentes, cuja média resulta no valor do Limite de Plasticidade do material.

3.2.8 Equivalente de Areia

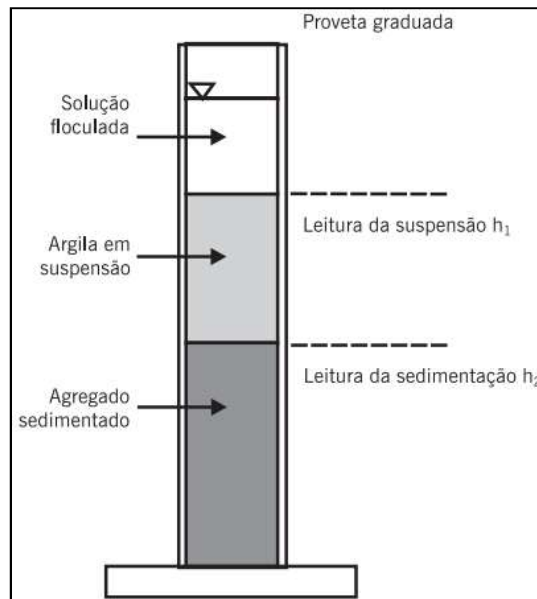
O ensaio de Equivalente de Areia, normatizado pela Norma DNER-ME 054/97 (DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, 1997), tem a função de determinar a proporção de materiais argilosos ou pulverulentos em amostras de agregados miúdos. A amostra deve ser composta de material com tamanho de partículas menores de 4,8 mm.

O ensaio de Equivalente de Areia foi realizado utilizando um kit da marca Engetotus, que compreende a solução utilizada para o ensaio, uma proveta demarcada com 2 traços de referência, sendo um à 10cm da base e outro à 38cm. Inicialmente é vertido para a proveta a solução de trabalho até que esta atinja a referência de 10cm da base.

Em seguida a amostra, com aproximadamente 110 g de material solto, foi colocada na proveta contendo a solução de trabalho de forma a umedecer toda a amostra com a solução, mantida em repouso de 10 minutos. Após, foi agitada através de 90 ciclos de “vai e vem” em um período de 30 segundos.

As paredes da proveta devem foram lavadas com água destilada, até que o líquido atingisse a marca superior da proveta, a 38cm da base. Após esta etapa, a amostra foi novamente colocada em repouso por 20 minutos. Ao seu final, foi possível determinar a altura do material argiloso em suspensão, conforme a Figura 13.

Figura 13 - Esquema do ensaio de Equivalente de Areia



Fonte: Bernucci et. al. (2006).

De acordo com as leituras realizadas, o Equivalente de Areia é determinado por meio da equação (5).

$$EA = \frac{\text{Leitura no topo da areia}}{\text{Leitura no topo da argila}} \times 100 \quad (5)$$

3.2.9 Sanidade

Os pavimentos rodoviários estão permanentemente expostos ao meio ambiente e, conseqüentemente, sujeitos às intempéries. Assim, os materiais utilizados nas camadas dos pavimentos são expostos às condições ambientais e possuem contato com substâncias corrosivas, o que pode afetar sua resistência e desempenho ao longo do tempo.

Segundo Delongui (2016), através dos ciclos de molhagem e secagem a solução de sulfato de sódio penetra nos interstícios da rocha, exercendo pressões nos poros e microfissuras, o que promove a desintegração do agregado. O resíduo de RCD é um material heterogêneo, sendo um de seus principais constituintes os derivados cimentícios e, por isto, torna-se importante avaliar o desgaste que este

material sofre com a ação dos sulfatos pois, além da desintegração usual poderá ocorrer uma reação química entre os compostos.

O ensaio de durabilidade química, denominado neste trabalho como sanidade, preconizado através da especificação DNER-ME 089/94 (DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, 1994), determina a resistência do agregado à desintegração acarretada pela ação do tempo, através do ataque de soluções saturadas de sulfato de sódio ou magnésio.

Inicialmente cada amostra foi peneirada e separada conforme as faixas granulométricas determinadas pela especificação, lavadas e devidamente secas em estufa para, em seguida, serem pesadas antes do início do ensaio. Após, foram submersas em uma solução de água e sulfato de sódio anidro, da marca Dinâmica, em uma concentração de 0,35mg/ml por um período de 16 a 18h, conforme orientações da norma DNER-ME 089/94 (DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, 1994). Decorrido este período, são retiradas da solução, drenadas por 15 minutos e colocadas para secagem em estufa, com temperatura de 105°C, até a constância de peso. Após, foram resfriadas até a temperatura ambiente.

O processo de submersão das amostras, secagem em estufa e resfriamento desta constituiu 1 ciclo do ensaio, que deve ser repetido por 5 ciclos. Concluído o ensaio, após os 5 ciclos necessários, cada amostra foi lavada, para que fique livre do excesso de sulfato de sódio, e novamente levadas à estufa para secagem. A etapa seguinte do ensaio consistiu no peneiramento de cada amostra para análise da perda sofrida através do desgaste, além de uma análise qualitativa nos agregados.

Para o exame qualitativo deve ser observado nas partículas maiores de 19mm a ocorrência de desintegração, fendilhamento, esmagamento, quebra ou laminagem destas, além da contagem do número de partículas afetadas. Em relação ao exame quantitativo, deve-se calcular a porcentagem em peso de cada fração da amostra que, após o ensaio, passe através da peneira na qual a fração originalmente foi retida. Por fim, calculou-se a média ponderada em função da porcentagem de perda de cada fração, obtendo-se a % de perda para os materiais passantes na peneira de 9,5mm e, também, na peneira de 4,8mm.

3.3 Caracterização mecânica das misturas com RCD

3.3.1 Compactação

Compactação é um método de estabilização de solos que ocorre por meio da aplicação de alguma forma de energia, que tem como efeito a diminuição dos vazios, permeabilidade e compressibilidade do material, aumentando seu peso específico e resistência ao cisalhamento. Um ensaio de compactação pode ser realizado utilizando-se diversos tipos de energia: normal, intermediária e modificada.

Segundo Müller (2015), por meio deste ensaio é possível correlacionar o teor de umidade e o peso específico seco de um solo através da aplicação de energia de compactação e, desta forma, obter o melhor índice de compactação para um determinado material.

O ensaio de compactação da mistura de agregados foi realizado de acordo com a Norma ABNT NBR 7182/2016 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016). De acordo com a Norma ABNT NBR 15116/2004 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004), a energia de compactação que deve ser empregada para o ensaio é a Intermediária, para utilização do material em bases e sub-bases de pavimento, entretanto, para fins de análise da energia necessária para compactação deste material, para esta pesquisa foram utilizadas os três tipos de energia, sendo elas: normal, intermediária e modificada, sendo moldados 15 corpos de prova no total para cada amostra coletada no Aterro Jorge Lanner.

O ensaio de compactação consiste na divisão de amostras em cinco porções, onde a primeira deve estar com teor de umidade em torno de 5% abaixo da umidade ótima presumível, a segunda com um teor 2% maior à anterior, e assim por diante. Após a homogeneização do material, foi realizada a compactação seguindo as premissas de utilização do soquete, número de camadas e número de golpes conforme a Tabela 6.

Tabela 6 - Energias de Compactação

Cilindro	Características inerentes a cada energia de compactação	Energia		
		Normal	Intermediária	Modificada
Pequeno	Soquete	Pequeno	Grande	Grande
	Número de camadas	3	3	5
	Número de golpes por camada	26	21	27
Grande	Soquete	Grande	Grande	Grande
	Número de camadas	5	5	5
	Número de golpes por camada	12	26	55
	Altura do disco espaçador mm	63,5	63,5	63,5

Fonte: (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016).

Após a compactação da última camada, o conjunto Cilindro/Amostra Compactada foi pesado e, por subtração da massa do cilindro, obtém-se a massa úmida do solo compactado, que foi utilizada para calcular a massa específica aparente seca. Assim, foi possível elaborar a curva de compactação relacionando os teores de umidade com as massas específicas aparente secas. Esta curva apresenta a umidade ótima do material.

O ensaio de compactação contemplou as três energias de compactação, sendo elas normal, intermediária e modificada para ambas as amostras coletadas no Aterro Jorge Lanner. Optou-se por utilizar as três energias de compactação para identificar o comportamento do agregado de RCD frente às diferentes energias de compactação empregadas. Para a compactação de todas as amostras foi utilizado o cilindro e soquete grandes (Figura 14), conforme apresentado na Tabela 6.

Figura 14 - Compactação de corpo de prova



Fonte: Autoria própria (2020).

3.3.1.1 Análise da Influência da compactação na granulometria

A exemplo das pesquisas de Leite (2007) e Delongui (2016), nesta pesquisa está sendo analisada a influência de cada energia de compactação sobre a granulometria do agregado reciclado. Leite (2007) identificou em sua pesquisa que a aplicação de uma grande energia de compactação acarretava na quebra de partículas do agregado.

Para a realização desta análise, foram compactados seis corpos de prova, sendo dois para cada energia de compactação, utilizando a umidade ótima obtida previamente. Após a compactação, os corpos de prova, estes foram destorroados separadamente e, após, levados à estufa, marca DMG com capacidade de 100l, para secagem em temperatura de 60°C até a constância de peso.

Em seguida foi realizado o ensaio de granulometria de cada amostra, seguindo as orientações da Norma DNER-ME 080/94 (DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, 1994) e utilizando as mesmas peneiras da etapa de caracterização física do resíduo. Desta forma, serão avaliados os mesmos parâmetros adotados inicialmente, sendo estes os coeficientes C_u e C_c e a porcentagem de agregado passante na peneira n° 40.

Sendo assim, o objetivo desta análise é proporcionar uma percepção acerca dos efeitos de cada energia de compactação adotada sobre o agregado de RCD,

verificando o efeito destas sobre a quebra dos agregados e, conseqüentemente, sobre a granulometria da amostra empregada.

3.3.2 Índice de Suporte Califórnia

O ensaio de Índice de Suporte Califórnia do agregado foi executado segundo a Norma ABNT NBR 9895/2016 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2017). Para a realização deste ensaio foram moldados um corpo de prova para cada energia empregada, sendo elas modificada, intermediária e normal, totalizando 3 corpos de prova para cada amostra coletada, conforme as orientações do ensaio de compactação, apresentado na Norma ABNT NBR 7182/2016 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016).

Após a moldagem dos corpos de prova, os mesmos foram submetidos ao ensaio de expansão, que consiste em fixar os moldes com os corpos de prova em pratos-base perfurados e acoplar uma haste de expansão, juntamente com um deflectômetro. Após anotada a leitura inicial deste deflectômetro, cada corpo de prova foi submerso em um tanque com água por cinco dias onde, a cada 24 horas, sendo realizadas novas leituras do deflectômetro, conforme Figura 15.

Figura 15 - Ensaio de expansão



Fonte: Autoria própria (2020).

Concluído o ensaio de expansão, os corpos de prova foram retirados da submersão e escoados a água por 15 minutos. Após este período, o corpo de prova foi submetido ao ensaio de penetração, que é realizado numa prensa onde é aplicada uma carga de aproximadamente 45 N a uma velocidade de 1,27 mm/min, conforme Figura 16.

Figura 16 - Ensaio de penetração



Fonte: Autoria própria (2020).

Conforme a carga é aplicada, cada leitura é função da penetração do pistão no solo e do tempo do ensaio. As leituras realizadas no deflectômetro medem o encurtamento diametral proveniente da atuação das cargas.

Para o cálculo da expansão de cada corpo de prova, foi utilizada a equação (6):

$$\text{Expansão (\%)} = \frac{\text{leitura final} - \text{leitura inicial do deflectômetro}}{\text{altura inicial do corpo de prova}} \times 100 \quad (6)$$

O Índice de Suporte Califórnia foi calculado para cada corpo de prova em função da pressão aplicada e da penetração do pistão, conforme equação (7), e apontados seus resultados conforme a Tabela 7:

$$ISC = \frac{\text{pressão calculada ou pressão corrigida}}{\text{pressão padrão}} \times 100 \quad (7)$$

Tabela 7 - Cálculo do Índice de Suporte Califórnia (ISC)

Penetração (mm)	Pressão (Mpa)		ISC %
	Calculada	Corrigida Padrão	
2,54		6,9	
5,08		10,35	

Fonte: ABNT (2016).

3.4 Análise da viabilidade técnica

Para a análise da viabilidade técnica da utilização de RCD como base e sub-base e reforço de subleito de pavimento, após a conclusão dos ensaios de caracterização do agregado de RCD e da mistura proposta, os dados foram analisados por meio das Normas DNIT 138/2010-ES – Pavimentação – Reforço do Subleito – Especificação de Serviço (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2010), DNIT139/2010-ES - Pavimentação - Sub-base estabilizada granulometricamente - Especificação de Serviço (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2010), DNIT 141/2010-ES - Pavimentação - Base estabilizada granulometricamente - Especificação de Serviço (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2010), que apresentam os requisitos básicos para a execução destas camadas.

Assim, para que um material possa ser utilizado em camada de reforço do subleito, deve atender às seguintes especificações:

- a) Deve ser constituído por solos ou mistura de solos de qualidade superior à do subleito;
- b) O Índice de Grupo deverá ser, no máximo, igual ao do subleito;
- c) Índice de Suporte Califórnia igual ou maior que a indicação de projeto, e expansão $\leq 1\%$.

Em resumo, para que um material seja adequado para utilização em sub-base de pavimento, deve apresentar as seguintes características:

- a) Ser constituído por solos, mistura de solos, mistura de solos e materiais britados;
- b) A fração retida na peneira nº 10 deve ser composta por partículas duras, sem substâncias prejudiciais;

- c) Ser o Índice de Suporte Califórnia > 20% e ter Expansão < 1%, compactado na energia intermediária ou superior.

Para que o material possa ser utilizado em camadas de bases de pavimento, deve apresentar as seguintes características, conforme a Norma DNIT 141/2010-ES:

- a) Ser constituído por solos, mistura de solos, mistura de solos e materiais britados;
b) Apresentar composição granulométrica satisfazendo a uma das faixas da Tabela 8:

Tabela 8 - Granulometria do material

Tipos Peneiras	Para N > 5 x 10 ⁶				Para N < 5 x 10 ⁶		Tolerâncias da faixa de projeto
	A	B	C	D	E	F	
	% em peso passando						
2"	100	100	-	-	-	-	±7
1"	-	75-90	100	100	100	100	±7
3/8"	30-65	40-75	50-85	60-100	-	-	±7
nº 4	25-55	30-60	35-65	50-85	55-100	10-100	±5
nº 10	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100	55-100	±5
nº 40	08-20	15-30	15-30	25-45	20-50	30-70	±2
nº 200	02-08	5-15	5-15	10-25	06-25	08-25	±2

Fonte: (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2010)

- c) A porcentagem do material que passa na peneira nº 200 não deve ultrapassar 2/3 da porcentagem que passa na peneira nº 40;
- d) O material passante na peneira nº 40 deve apresentar limite de liquidez igual ou inferior a 25% e índice de plasticidade inferior ou igual a 6%. Caso estes limites sejam ultrapassados, o equivalente de areia deve ser maior do que 30%;
- e) Índice de Suporte Califórnia ≥ 60% para Número N ≤ 5 x 10⁶, ISC ≥ 80% para Número N > 5 x 10⁶ e Expansão < 0,5%, compactado na energia modificada;
- f) Fração retida na peneira nº 10 deve ser composta por partículas duras, sem substâncias prejudiciais;
- g) Quando submetidos ao ensaio de Abrasão Los Angeles, não devem apresentar desgaste superior a 55%.

3.5 Análise da viabilidade econômica

Para a análise da viabilidade econômica, caso o agregado oriundo de RCD se prove tecnicamente viável, a mesma é realizada de forma comparativa. Para a comparação foram elaborados orçamentos referente à usinagem de brita graduada para camadas de base, sub-base e reforço do subleito de ambos os materiais propostos.

Para este orçamento comparativo, foi considerado uma pedra comercial da região como fornecedora do material usualmente utilizado em pavimentos, em comparação ao fornecimento de uma possível recicladora de RCD no Aterro de Inertes Jorge Lanner. Este orçamento é composto do valor comercial do material, desconsiderando os custos envolvidos com o transporte do mesmo até o local da obra em questão. É importante salientar que os valores de execução das camadas propostas não foram orçados.

Desta forma, para a realização da análise de viabilidade econômica da utilização de RCD em camadas de pavimentos rodoviários foram comparados três cenários de fornecimento dos agregados para construção de um pavimento. Devido à necessidade de estabilização granulométrica do agregado em questão, os cenários adotados para fins de orçamentação são:

- Cenário 1: Utilização de agregado natural;
- Cenário 2: Utilização de RCD;
- Cenário 3: Utilização da composição entre RCD e agregado natural.

Para a realização da composição orçamentária do Cenário 3 foi adotada a composição granulométrica utilizada para fins de caracterização mecânica do RCD. A pedra utilizada para análise de preços e Distância Média de Transporte (DMT) é a Britagem Bolognesi, localizada no Município de Eldorado do Sul. O agregado proveniente desta pedra também foi utilizado para a composição de estabilização granulométrica do RCD realizada nesta pesquisa.

A metodologia adotada foi a composição de preços por meio do Sistema de Custos e Referências de Obras (SICRO), utilizando data-base Janeiro/2020 (DNIT, 2020). Foram elaboradas composições de preços sintéticos para o fornecimento de agregado para as camadas de base, sub-base e reforço do subleito considerando os três cenários apresentados.

Como agregado reciclado produzido no Aterro Jorge Lanner ainda não está sendo comercializado, o manual do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices (SINAPI, 2020) foi utilizado para referência do preço unitário do agregado reciclado, pois este insumo não consta no sistema SICRO. O sistema SINAPI, em utilização desde 1969, é fruto de uma parceria entre a Caixa e o IBGE, sendo hoje uma referência em análise de custos de obras habitacionais (CAIXA ECONÔMICA FEDERAL, 2020).

Além da análise comparativa entre as composições de preços propostas, também foi avaliada até qual Distância Média de Transporte deste agregado, em relação ao material fornecido pela Britagem Bolognesi, este se torna economicamente vantajoso para a utilização nas camadas propostas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No presente capítulo são apresentados os resultados obtidos por meio do programa experimental proposto, considerando os ensaios de laboratório realizados. Os resultados apresentados também são confrontados com pesquisas semelhantes realizadas anteriormente por outros pesquisadores, como forma de verificar a similaridade entre os resultados obtidos com amostras de RCD provenientes de outros locais.

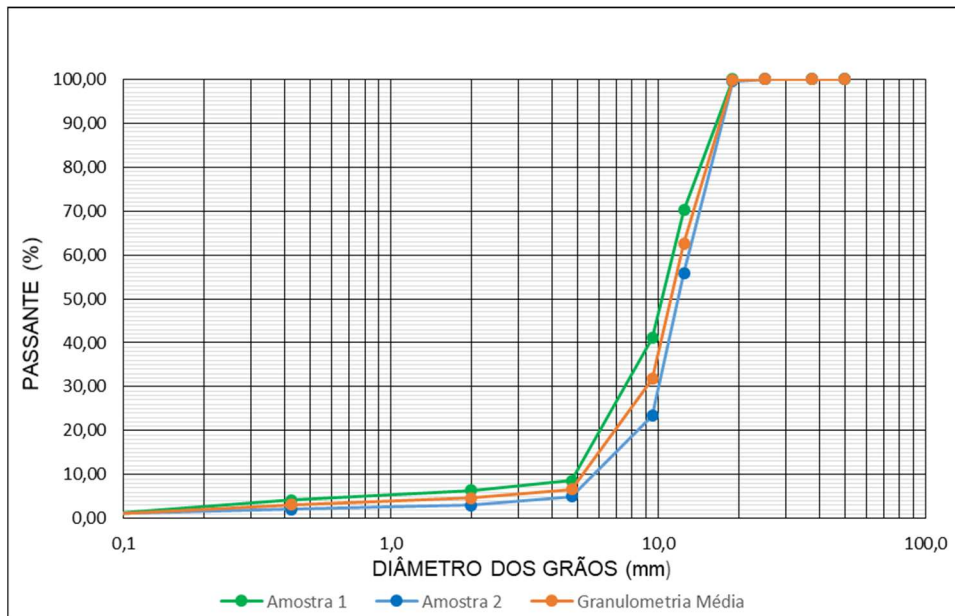
4.1 Caracterização física do RCD

Em relação à composição dos agregados, John e Agopyan (2000) expressaram a necessidade de aprimoramento no manejo dos RCD no canteiro de obras onde são gerados, de forma que estes cheguem à usina de reciclagem já classificados conforme sua natureza. Esta classificação, além de poder viabilizar utilizações mais nobres a este resíduo, auxilia na triagem do RCD, reduzindo os custos da operação na central de reciclagem.

4.1.1 Distribuição granulométrica

Conforme explanado no item *3.2.1 Distribuição granulométrica*, o ensaio de granulometria foi realizado para 2 amostras, denominadas Amostra 1 e Amostra 2. Assim, em relação ao RCD, objeto desta pesquisa, apresenta-se na Figura 17 as respectivas curvas granulométricas obtidas, bem como uma curva granulométrica média entre ambas.

Figura 17 - Distribuição Granulométrica RCD



Fonte: Autoria própria (2020).

Em relação ao gráfico acima apresentado, verifica-se que apesar das amostragens terem ocorrido em um espaço de tempo de 7 meses, ambas as amostras apresentam curva granulométrica semelhante, indicando uma parcela pequena de material fino em ambas amostras coletadas.

Para análise de distribuição granulométrica do agregado também foram calculados os Coeficientes de Uniformidade e Coeficiente de Curvatura, conforme apresentado na Tabela 9.

Tabela 9 - Coeficiente de Curvatura e Coeficiente de Uniformidade

	Cc	Cu
NBR 15115 (ABNT, 2014)	Não consta	≥ 10
Amostra 1	1,12	2,26
Amostra 2	1,29	2,17

Fonte: Autoria própria (2020).

Verifica-se, quando confrontados os resultados obtidos aos limites estabelecidos pela Norma ABNT NBR 15115 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004), que o agregado reciclado não atende ao Coeficiente de Uniformidade, indicando que o agregado em questão apresenta uma distribuição

granulométrica uniforme. A referida Norma não apresenta parâmetros para o índice Coeficiente de Curvatura e, portanto, Leite (2007) utilizou em sua pesquisa os parâmetros apresentados pela Prefeitura Municipal de São Paulo, que indica que este deve apresentar valor entre 1 e 3. Desta forma, o agregado reciclado proveniente do Aterro Jorge Lanner atende a este critério, apresentando uma curva bem distribuída.

Conforme Bernucci *et al.* (2006), uma das principais características dos agregados é sua distribuição granulométrica, que é determinada através de peneiramento. A curva granulométrica de um agregado pode apresentar-se sob duas formas típicas: granulometria contínua e granulometria descontínua. (CARNEIRO, BURGOS e ALBERTE, 2001). Segundo Carneiro, Burgos e Alberte (2001), materiais com característica granulométrica contínua apresentam todos os tamanhos de partículas de um determinado intervalo granulométrico, o que permite que os grãos menores do material se encaixem nos vazios intragranulares, constituindo um material bem compactado, mais resistente e menos deformável.

Em contrapartida, a granulometria descontínua caracteriza uniformidade no tamanho dos grãos, o que impossibilita o encaixe adequado do material, proporcionando um material mal graduado. Em relação ao agregado reciclado de RCD proveniente do Aterro Jorge Lanner, verificou-se que este apresenta granulometria descontínua, indicando a necessidade de adição de material como forma de melhorar sua distribuição granulométrica.

Para a aplicação de agregados em camadas de sub-base, a Norma DNIT 139/2010-ES (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2010) não indica faixas granulométricas específicas onde o agregado deve ser enquadrado, porém define que o Índice de Grupo (IG) deve ser igual à zero. Em camadas de reforço do subleito, a Norma DNIT 138/2010-ES (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2010) estabelece que o IG do material deve ser, no máximo, igual ao do subleito indicado no projeto.

Portanto, devido aos resultados apresentados em relação ao ensaio de granulometria, Limite de Plasticidade e Limite de Liquidez, o Índice de Grupo para o agregado reciclado de RCD utilizado nesta pesquisa é 0. Assim, em relação à distribuição granulométrica do agregado, define-se que este pode ser utilizado em camadas de sub-base e reforço do subleito.

A Norma DNIT 141/2010-ES apresenta as faixas granulométricas indicadas para utilização em camadas de base, conforme apresentado anteriormente na Tabela 8 (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2010). Comparando a granulometria do agregado reciclado de RCD com os limites estabelecidos, identificou-se que a granulometria do agregado reciclado não se enquadra em nenhuma faixa granulométrica estabelecida pelo DNIT.

Também, a Norma ABNT 15115 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004) exige que a porcentagem de agregado reciclado passante na peneira n° 40 apresente valor entre 10% e 40%. O agregado de RCD proveniente do Aterro Jorge Lanner apresentou, em média, 3,10% de agregado passante nesta peneira, conforme Tabela 10.

Tabela 10 - Granulometria média do agregado reciclado

Peneira	Amostra 1 (%)	Amostra 2 (%)	Granulometria média (%)
2"	100,00	100,00	100,00
1 1/2"	100,00	100,00	100,00
1"	100,00	100,00	100,00
3/4"	100,00	99,54	99,76
1/2"	70,17	55,84	62,58
3/8"	41,11	23,41	31,74
N° 4	8,61	5,02	6,71
N° 10	6,42	3,05	4,64
N° 40	4,18	2,15	3,10
N° 200	0,80	0,94	0,87
Peso			
Amostra	7472,5	8409,7	15882,2

Fonte: Autoria própria (2020).

Assim, o agregado de RCD em estudo, por si só não está apto para ser aplicado em camadas de pavimento. Portanto, para que seja possível a utilização deste material em camadas de bases de pavimentos rodoviários, é necessário que este seja estabilizado granulometricamente em uma mistura com a utilização de outro agregado. O DNIT (2010) define estabilização granulométrica como um processo de melhoria resistente de materiais "in natura" ou mistura de materiais, utilizando energia de compactação adequada, com a finalidade de obtenção de uma camada de pavimento que apresente estabilidade e durabilidade.

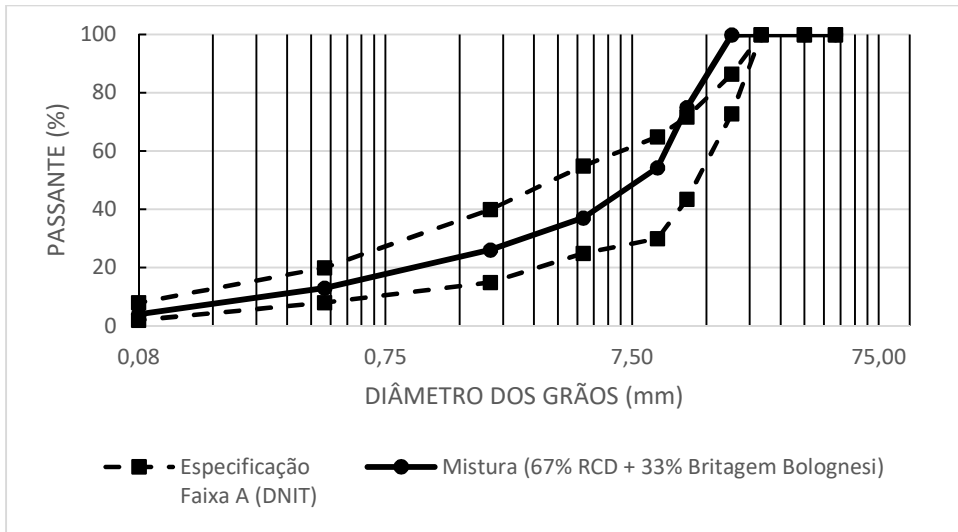
Müller (2015) obteve resultado semelhante em sua pesquisa, identificando que o RCD e a brita corrida não apresentaram resultados satisfatórios em relação à granulometria para que fossem aplicados diretamente como base estabilizada granulometricamente em qualquer tipo de obra. Sendo assim, é necessário realizar a correção da granulometria previamente à sua utilização como base.

Desta forma, para dar continuidade à esta pesquisa, optou-se por realizar a estabilização granulométrica do agregado reciclado, através da utilização do agregado proveniente da Britagem Bolognesi, localizada no município de Eldorado do Sul. Para a elaboração da composição granulométrica foi utilizada uma granulometria média entre as duas amostras de agregado RCD ensaiadas, conforme apresentado na Tabela 10.

Portanto, utilizando a granulometria média entre ambas as amostras, foram realizadas simulações de estabilização granulométrica do agregado reciclado de RCD utilizando o pó de pedra e/ou a brita 3/8" provenientes da Britagem Bolognesi para todas as faixas granulométricas definidas pela Norma DNIT 141/2010-ES (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2010) para camada de base. As faixas de trabalho A, B, C, D, E; e F foram apresentadas na Tabela 8, anteriormente neste trabalho.

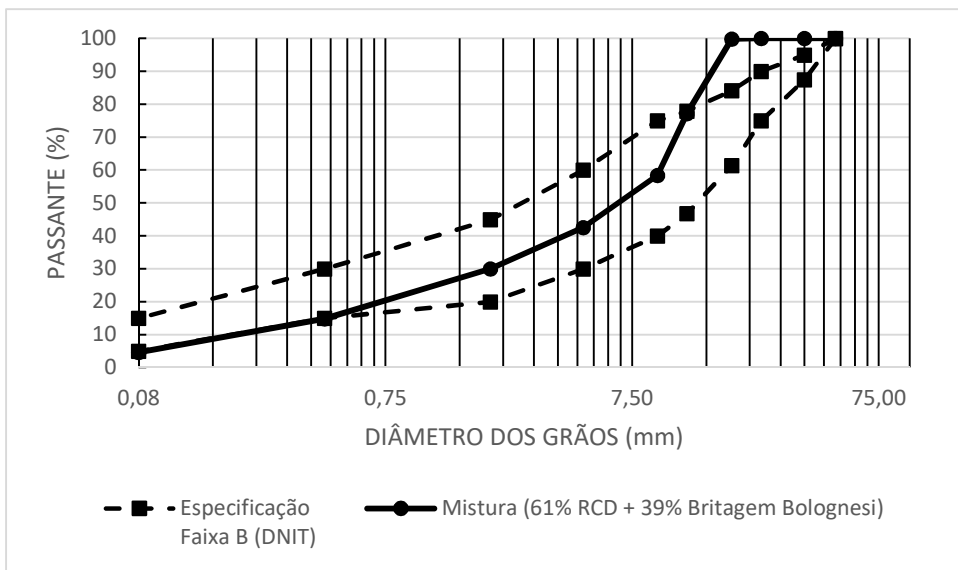
As simulações foram realizadas variando as porcentagens da mistura entre os agregados, como forma de tentar enquadrar a curva granulométrica da mistura nos limites propostos pela norma utilizada. Assim, apresenta-se na Figura 18 à Figura 23 os gráficos referentes às composições granulométricas elaboradas, indicando na legenda de cada gráfico a porcentagem necessária de cada material para estabilização granulométrica de forma a atender a faixa de trabalho em questão.

Figura 18 - Composição granulométrica – Faixa A



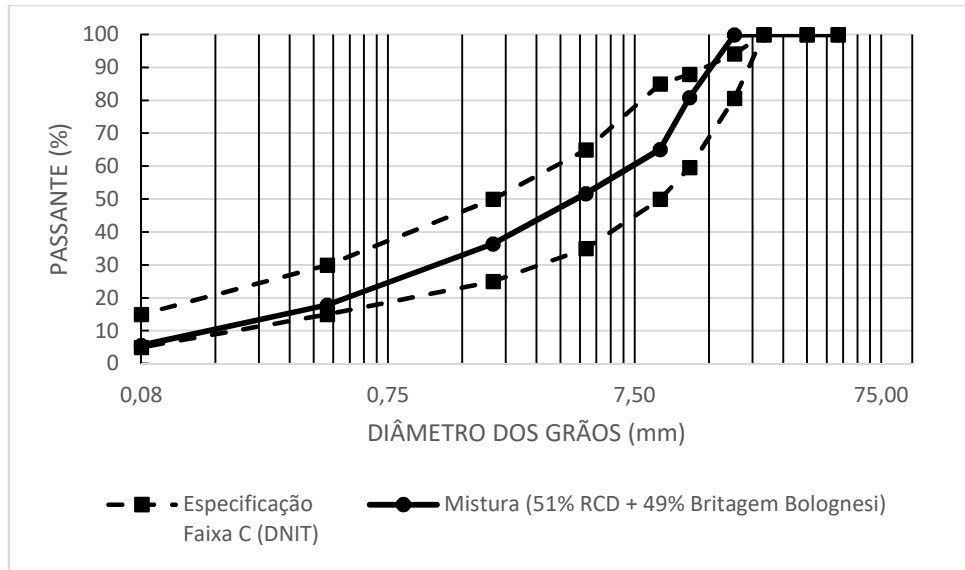
Fonte: Autoria própria (2020).

Figura 19 - Composição granulométrica – Faixa B



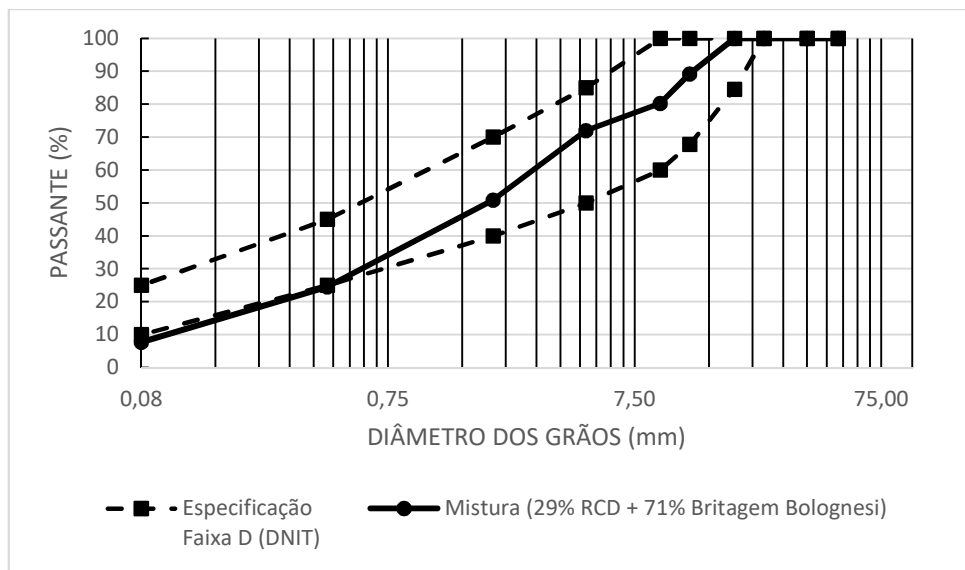
Fonte: Autoria própria (2020).

Figura 20 - Composição granulométrica – Faixa C



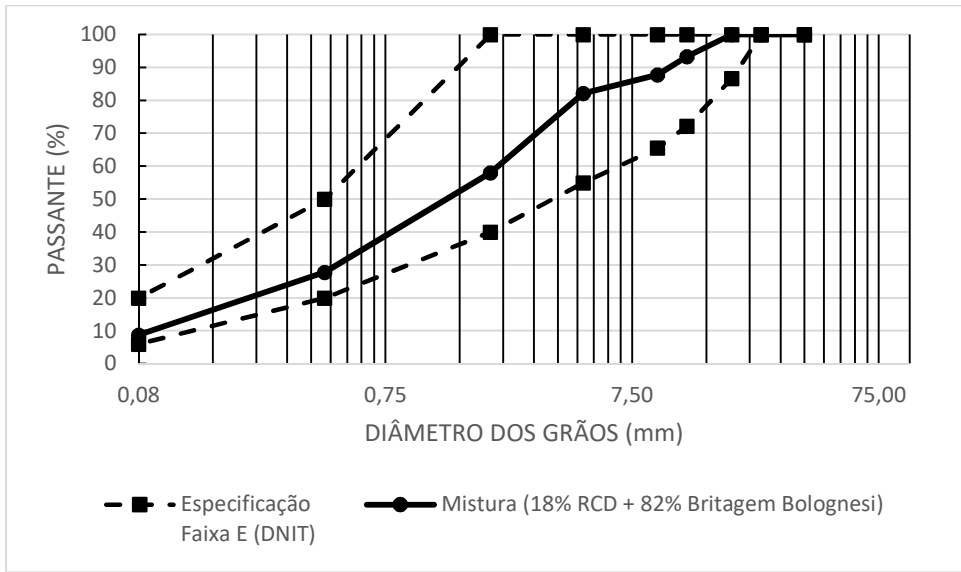
Fonte: Autoria própria (2020).

Figura 21 - Composição granulométrica – Faixa D



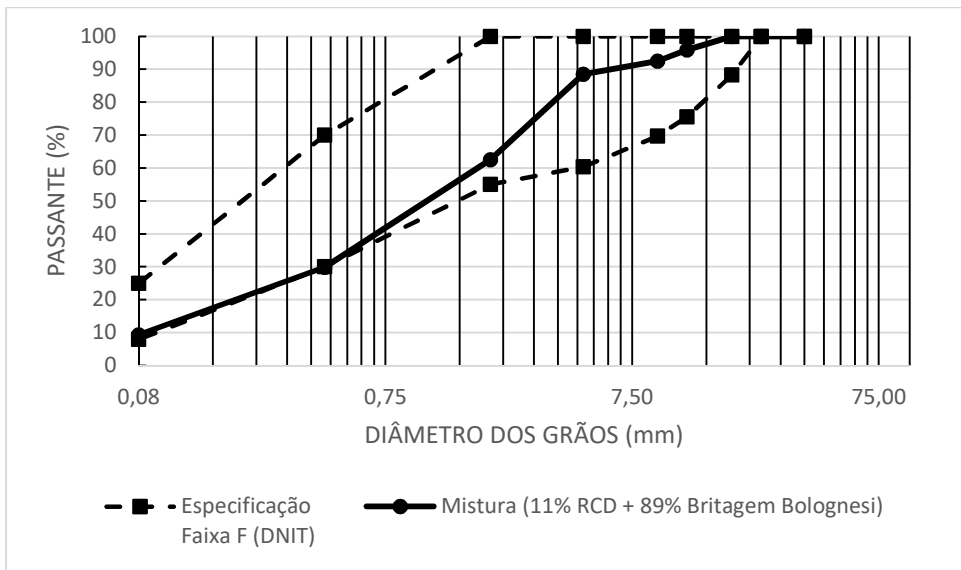
Fonte: Autoria própria (2020).

Figura 22 - Composição granulométrica – Faixa E



Fonte: Autoria própria (2020).

Figura 23 - Composição granulométrica – Faixa F



Fonte: Autoria própria (2020).

Verifica-se que em relação às composições apresentadas na Figura 18, Figura 19 e Figura 20, todas resultaram em uma parcela significativa do agregado reciclado em relação à utilização do agregado proveniente da Britagem Bolognesi, sendo a parcela de RCD superior à 50%.

Também, percebe-se que todas apresentaram um comportamento semelhante em relação aos limites estabelecidos pela Norma DNIT 141/2010-ES, onde identifica-se uma porcentagem maior de agregados graúdos, especificamente entre as peneiras

3/4" e 1/2". Ademais, em relação às faixas B e C percebe-se que a mistura tangencia o limite inferior estabelecido em relação aos finos, o que representa material mal distribuído, não satisfazendo as condições de entrosamento e preenchimento que se prevê para a camada (SENÇO, 2007).

Em relação às composições granulométricas adotadas para as faixas D e F, apresentados na Figura 21 e Figura 23, percebe-se que ambas apresentam deficiência na parcela fina da mistura, tangenciando o limite inferior estabelecido, em situação semelhante à verificada para as faixas granulométricas B e C. Em contrapartida, a composição da mistura para a Faixa E demonstra uma curva granulométrica bem distribuída quando comparada aos limites superior e inferior.

Entretanto, observa-se que para as faixas D, E e F a utilização do agregado reciclado na mistura é inferior à 30%. Sendo o objetivo desta pesquisa a reinserção do RCD no ciclo produtivo, optou-se pela utilização de uma parcela mais significativa do agregado reciclado na mistura, através da utilização da mistura de 67% de agregado de RCD e 33% de agregado proveniente da Britagem Bolognesi, de forma à atender a Faixa A.

É importante destacar que, para a realização destas simulações, foram adotadas as peneiras utilizadas no ensaio de granulometria do agregado reciclado, conforme apresentado na Tabela 10. Entretanto, a especificação do DNIT (2010) indica limites apenas para as peneiras 2", 3/8", n° 4, n°10, n° 40 e n° 200, conforme apresentado anteriormente na Tabela 8. Desta forma, inicialmente foi realizada a interpolação entre os limites especificados para as peneiras citadas, de forma a obter a faixa de trabalho também para as peneiras 1", 3/4" e 1/2".

A mistura composta entre os dois agregados, de forma a atender os limites estabelecidos na Faixa A, apresentou-se fora da faixa granulométrica em relação às porcentagens de agregado passante nas peneiras 3/4" e 1/2", porém estas peneiras não compõem originalmente a faixa granulométrica estipulada pela Norma. Desta forma, suprimiu-se os resultados decorrentes da interpolação realizada, considerando apenas as peneiras determinadas por norma.

Assim, a Tabela 11 apresenta a composição adotada entre ambos os materiais, como forma de enquadrar este na Faixa A, de acordo com os limites estabelecidos pela Norma DNIT 141/2010-ES (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2010) para as peneiras indicadas na

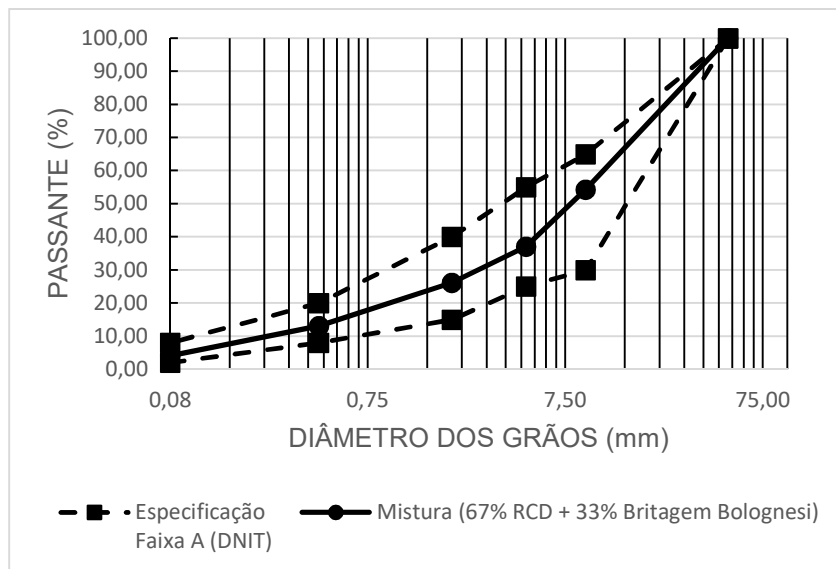
referida Norma. O gráfico apresentando a granulometria após a estabilização granulométrica é apresentado na Figura 24.

Tabela 11 - Composição granulométrica – Faixa A

Peneiras		Pó de pedra Britagem Bolognesi	Brita 3/8" RCD	Mistura	Especificação Faixa A (DNIT)	
Pol	mm	33%	67%	100%	Limite Inferior	Limite Superior
2"	50,0	100,00	100,00	100,0	100,00	100,00
3/8"	9,50	100	31,74	54,3	30,00	65,00
Nº 4	4,75	98,6	6,71	37,0	25,00	55,00
Nº 10	2,00	69,7	4,64	26,1	15,00	40,00
Nº 40	0,425	33,2	3,10	13,0	8,00	20,00
Nº 200	0,075	10,4	0,87	4,0	2,00	8,00

Fonte: Autoria própria (2020).

Figura 24 - Composição granulométrica – Faixa A



Fonte: Autoria própria (2020).

Portanto, através da Figura 24 verifica-se que a mistura proposta, utilizando 67% de agregado reciclado de RCD e 33% de agregado proveniente da Britagem Bolognesi atende à Norma DNIT 141/2010-ES (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2010) no que tange à granulometria.

Entretanto, é importante ressaltar que em uma análise mais rigorosa da curva granulométrica, utilizando peneiras intermediárias às estabelecidas pela Norma, a

mistura proposta apresenta pontos onde a porcentagem passante de agregados graúdos é maior do que o ideal, indicando que a mistura apresenta uma parcela menor de partículas maiores do que o ideal para esta faixa granulométrica.

Devido às características abrasivas do agregado reciclado de RCD, entende-se que também é importante avaliar a distribuição granulométrica do material após a aplicação da energia de compactação, que pode promover quebras significativas nas partículas. Assim, apresenta-se esta análise no item “4.2.1 – Influência da compactação na granulometria”.

4.1.2 Composição

Para investigação da composição do agregado reciclado em questão realizou-se o processo de catação na amostra, separando as frações cerâmicas, cimentícias e rochosas manualmente. Este processo foi realizado na fração graúda da amostra, executada nos agregados retidos nas peneiras 1/2” (12,5 mm), 3/8” (9,5 mm) e #4 (4,75 mm), a exemplo da Figura 25. As partículas com dimensão menor de 4,75mm não foram separadas em grupos devido à dificuldade de identificação de sua natureza à olho nu.

Figura 25 - Composição do agregado reciclado



(a) Cimentício



(b) Brita



(c) Cerâmica

Fonte: Autoria própria (2020).

A análise de composição do agregado proveniente do RCD do Aterro Jorge Lanner demonstrou composições semelhantes nas duas amostras ensaiadas, todas apresentando predominância de materiais cimentícios, conforme apresentado na Tabela 12.

Tabela 12 - Composição RCD Aterro Jorge Lanner

Material	Amostra 1	Amostra 2
Cerâmica (%)	19,30%	15,79%
Cimentícios (%)	59,30%	64,36%
Brita (%)	21,40%	19,85%

Fonte: Autoria própria (2020).

Conforme Müller (2015) um agregado é considerado misto quando apresenta, em sua parcela grávida, menos de 90% em materiais cimentício e/ou rochas. Sendo assim, o agregado reciclado de RCD do Aterro Jorge Lanner é considerado um agregado misto, pois a fração composta por resíduos cerâmicos representa mais de 10% do material analisado.

Identifica-se que, apesar de ser um material heterogêneo que apresenta variabilidade em sua composição de acordo com as obras geradoras destes resíduos, há uma similaridade nas composições das duas amostras coletadas.

4.1.3 Resistência à abrasão

Os resultados de ensaios de perda de massa por abrasão Los Angeles dão indicações da resistência mecânica das partículas do agregado. Para esta pesquisa foram obtidos resultados semelhantes para a abrasão das duas amostras em estudo: a Amostra 1 apresentou uma perda de 45,61% em massa, ao passo que a Amostra 2 obteve uma perda por abrasão de 44,61%. Através da Figura 26 é possível identificar visualmente o desgaste sofrido pelo agregado reciclado de RCD após a execução do ensaio de Abrasão Los Angeles.

Figura 26 - Ensaio Abrasão Los Angeles



(a) Antes do ensaio

(b) Após ensaio

Fonte: Autoria própria (2020).

A Norma ABNT NBR 15116 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004) não apresenta especificações sobre abrasão máxima que os agregados devem possuir para utilização em camadas inferiores de pavimento. Entretanto, a especificação DNIT 141/2010-ES (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2010) indica que o desgaste máximo do agregado, quando submetido ao ensaio abrasão Los Angeles, é 55%. São admitidos valores superiores a este quando o material houver apresentado desempenho satisfatório em situação anterior.

Delongui (2016) identificou em sua pesquisa que os valores de abrasão do agregado reciclado são altos, em torno de 55% a 60%. Este comportamento é devido à composição majoritária de cerâmica e argamassa do resíduo analisado. Em contrapartida, Tseng (2010) obteve resultados ligeiramente inferiores para o ensaio de abrasão, entre 32% e 43% para o agregado reciclado.

Segundo Lima (1999), a perda de massa em agregados reciclados de concreto é maior para as parcelas mais finas, devido ao maior teor de argamassa no resíduo. Quanto maior a resistência do concreto original, menor a perda de massa nos ensaios de abrasão. Em contrapartida, resíduos com alto teor de alvenaria apresentam maior desgaste por abrasão.

O tamanho do agregado reciclado possui influência no índice de abrasão do material reciclado, pois agregados com diâmetros inferiores possuem uma quantidade maior de pasta de cimento aderida à partícula, o que acarreta em um índice de abrasão maior neste material. Desta forma, este ensaio pode ser considerado um bom

indicador da qualidade do agregado, por indicar se o teor de pasta aderida é alto (TSENG *apud* JUAN, 2010).

Conforme Delongui (2016), a alta abrasividade do material pode acarretar em mudanças no esqueleto mineral das distribuições após a compactação, o que ocorre devido à quebra das partículas quando empregada a energia de compactação. O aumento da fração miúda pode auxiliar no preenchimento dos vazios na camada e/ou prejudicar o intertravamento da mesma, causando instabilidade ao conjunto.

Assim, o resultado obtido no ensaio de Abrasão Los Angeles indica que, mesmo atendendo às especificações, o agregado reciclado de RCD pode sofrer significativa quebra das partículas quando empregada a energia de compactação.

4.1.4 Índice de forma do agregado

A Norma ABNT 15115 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004) recomenda que, para a utilização de agregado reciclado em camadas de pavimentos rodoviários, o agregado apresente uma parcela máxima de 30% de grãos lamelares.

Analisando o índice de forma do agregado reciclado de RCD do Aterro Jorge Lanner, conforme apresentado na Tabela 13, pode-se identificar que há uma predominância de agregados lamelares em ambas as amostras coletadas, não atendendo ao limite estabelecido na Norma ABNT NBR 15116 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004). A Norma em questão estabelece que para a aplicação de agregados reciclados em pavimentação o índice de forma do agregado graúdo deve ser menor ou igual à 3 (três).

Tabela 13 - Índice de forma agregado reciclado

	Amostra 1	Amostra 2
Índice de forma	3,16	3,29
Grãos com Índice de forma >3	58,00%	70,00%
Grãos com Índice de forma >5	17,00%	27,00%

Fonte: Autoria própria (2020).

Em geral grãos de forma cúbica são, em sua maioria, de natureza cimentícia ou rochosa, enquanto partículas de natureza cerâmica produzem agregados predominantemente lamelares (LEITE, 2007; MÜLLER, 2015). Entretanto, nesta

pesquisa identificou-se que os agregados de RCD proveniente do Aterro Jorge Lanner apresentam agregados lamelares independentemente de sua composição predominantemente cimentícia. Desta forma, podemos atribuir a forma do agregado ao tipo de britagem utilizada no RCD, que utiliza um britador de mandíbulas.

Delongui (2016) identificou em sua pesquisa que, apesar da utilização do britador de mandíbulas ser considerada a mais viável para o processamento do RCD, este tipo de britagem produz agregados mais lamelares, o que apresenta uma probabilidade maior para que ocorram quebras das partículas durante os processos mecânicos.

Conforme Abdou e Bernucci (2007) os agregados lamelares não são apropriados para utilização em camadas de pavimentação devido à sua suscetibilidade à quebra durante a compactação, o que pode influenciar no entrosamento entre as partículas e, conseqüentemente, diminuição da resistência. Em contrapartida, Leite *et al.* (2011) identificou que devido à aplicação de carga durante a compactação dos corpos de prova as partículas lamelares e alongadas sofrem quebras, aumentando ligeiramente a cubicidade do material reciclado.

4.1.5 Teor de materiais indesejados

A análise do teor de materiais indesejados consiste em inspecionar visualmente a amostra, removendo as partículas retidas na peneira de abertura 4,8 mm que não se classificam como: (a) cimentícias; (b) rochosas; (c) cerâmicas. Após a separação dos materiais considerados indesejáveis, estes foram pesados para verificação da porcentagem em relação à amostra analisada.

O teor de materiais indesejáveis obtidos para as amostras foi baixo, representando 0,58% em peso da Amostra 1 e apenas 0,29% em peso da Amostra 2. Os contaminantes identificados nas amostras são, em suma, compostos de plástico, papel, tecido/fibras, madeira e restos vegetais (Figura 27). Verifica-se que a quantidade total de materiais contaminantes é inferior à 3% em todas as amostras ensaiadas, portanto o agregado reciclado de RCD do Aterro Jorge Lanner atende às especificações da Norma ABNT NBR 15115 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004).

Figura 27 - Materiais indesejáveis



Fonte: Autoria própria (2020).

Em pesquisas semelhantes, Leite (2007) identificou que o teor de materiais contaminantes na amostra de agregado reciclado de Santo André é 1,6%. Também, Müller (2015) observou um teor de 4,13% de materiais considerados impróprios no agregado de RCD proveniente da Usina de Reciclagem do PROSINOS.

Em contrapartida, Silva (2012) identificou uma quantidade total em massa de materiais contaminantes de 0,28% no RCD proveniente da demolição do bloco CT na UFCG – CAMPUS I. Destaca-se que o agregado utilizado por Silva (2012) foi coletado diretamente na referida obra, não havendo passado pelos processos de transporte e transbordo até uma usina de reciclagem, o que pode ter influência na menor contaminação deste agregado em comparação ao utilizado por Leite (2007) e Müller (2015).

Em relação ao RCD proveniente do Aterro Jorge Lanner, observa-se que o teor de materiais indesejáveis se aproxima do valor apresentado por Silva (2012), cujo material foi coletado diretamente no canteiro de obras. Portanto, pode-se destacar a eficácia do processo de triagem adotado pela usina de reciclagem, que consiste em triagem mecânica e manual, além de ímãs para separação de metais.

4.1.6 Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade

O agregado reciclado apresentou comportamento não líquido e não plástico para as duas amostras ensaiadas, demonstrando comportamento semelhante ao de solos arenosos. Ambos os ensaios de Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade não puderam ser concluídos, devido ao comportamento do material.

Silva (2012) estudou o comportamento de RCD proveniente de uma reforma no bloco CT da UFCG – CAMPUS I, que foi coletado diretamente do canteiro de obras, tendo passado pelo processo de triagem e britagem em laboratório. Em sua pesquisa a autora observou resultados semelhantes para o LL e LP.

Os resultados obtidos corroboram dados apresentados na literatura, que indicam que Resíduos de Construção e Demolição não apresentam comportamento líquido e plástico. Isto ocorre devido às partículas de composição grosseira e que já passaram por reações químicas.

Considerando as recomendações normativas da norma DNIT 141/2010-ES (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2010), que indica um limite máximo para o limite de liquidez de 25% e para o limite de plasticidade de 6%, verifica-se que o agregado de RCD do Aterro Jorge Lanner atende aos parâmetros. Assim, pode-se afirmar que a umidade causada pela infiltração de água no pavimento não acarretará em perda de suporte e expansão excessiva da camada.

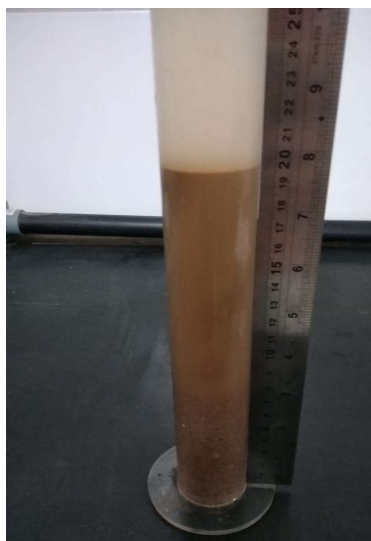
4.1.7 Equivalente de Areia

O ensaio de Equivalente de Areia (EA) tem o objetivo de indicar a proporção do teor de areia em relação à fração de argila presente em um material, sendo a relação entre a altura do nível superior da areia e o nível superior da suspensão argilosa em uma proveta, nas condições previstas pelo ensaio. Para este ensaio utiliza-se a porção fina do agregado, passante na peneira n°4 (SENÇO, 2007).

Segundo a Norma DNIT 141/2010-ES (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2010), caso o agregado em estudo para utilização em camada de base apresente limite de liquidez igual ou inferior à 25% e limite de plasticidade inferior ou igual à 6%, o EA deve ser maior do que 30%.

Para o agregado reciclado de RCD, o material foi caracterizado como Não Líquido e Não Plástico, portanto não era obrigatória a execução do ensaio para averiguação do EA. Porém, com o intuito de enriquecer as informações referentes às características físicas do agregado reciclado optou-se por realizar o ensaio, conforme ilustrado na Figura 28. Assim, obteve-se um resultado de Equivalente de Areia de 33,2% para o agregado referente à Amostra 1 e 38,5% para o agregado referente à Amostra 2.

Figura 28 - Resultado do ensaio de Equivalente de Areia



Fonte: Autoria própria (2020).

4.1.8 Sanidade

A avaliação de durabilidade química do agregado proveniente de RCD do Aterro Jorge Lanner foi realizada para as duas amostras coletadas utilizando a norma DNER-ME 089/94. Segundo a Norma DAER-ES-P 04/91, um agregado deve apresentar sanidade de até 12% para utilização em camada de sub-base e, para a utilização em base é definido pela Norma DAER-ES-P 08/91 o limite de 10% (DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS DE RODAGEM, 1998).

Apresenta-se na Tabela 14 e Tabela 15 os resultados obtidos para o ensaio de sanidade de ambas as amostras coletadas no Aterro Jorge Lanner.

Tabela 14 - Resultado ensaio de Sanidade – Amostra 1

Composição granulométrica da amostra original		%	Massa de cada fração antes do ensaio (g)	Massa de cada fração após ensaio (g)	Perda (%)	Média ponderada da perda (%)
Passando (mm)	Retido (mm)					
19	12,7	36,06%	673,1	427,9	36,43%	13,14%
12,7	9,5	18,18%	339,3	212,9	37,25%	6,77%
9,5	4,8	16,12%	300,9	135,3	55,03%	8,87%
4,8	2,4	5,96%	111,3	55,3	50,31%	3,00%
2,4	1,2	5,94%	110,8	20,2	81,77%	4,85%
1,2	0,6	5,89%	110	29,7	73,00%	4,30%
0,6	0,3	5,93%	110,6	50,4	54,43%	3,23%
		5,92%	110,5	70,4	36,29%	2,15%
						46,31%

Fonte: Autoria própria (2020).

Tabela 15 - Resultado ensaio de Sanidade – Amostra 2

Composição granulométrica da amostra original		%	Massa de cada fração antes do ensaio (g)	Massa de cada fração após ensaio (g)	Perda (%)	Média ponderada da perda (%)
Passando (mm)	Retido (mm)					
19	12,7	32,96%	658,70	289,30	56,08%	18,49%
12,7	9,5	17,04%	340,50	110,00	67,69%	11,53%
9,5	4,8	17,62%	352,20	136,80	61,16%	10,78%
4,8	2,4	6,56%	131,00	32,90	74,89%	4,91%
2,4	1,2	6,64%	132,60	45,00	66,06%	4,38%
1,2	0,6	5,83%	116,50	49,40	57,60%	3,36%
0,6	0,3	5,60%	111,90	59,80	46,56%	2,61%
		7,75%	154,90	110,70	28,53%	2,21%
						58,27%

Fonte: Autoria própria (2020).

Em sua pesquisa, Delongui (2016) também avaliou os efeitos do ensaio de sanidade em agregados oriundos de RCD, todavia sua pesquisa buscou qualificar e quantificar quais as frações teriam um desgaste maior com a ação destes agentes. Assim, observou que derivados de revestimento asfáltico, de concreto e argamassa apresentaram desagregação em grande parte de seu volume, comportamento oposto ao apresentado pelos agregados minerais. Em contrapartida, cada fração cerâmica

apresentou comportamento distinto entre si, onde agregados compostos por tijolos sofreram maior desagregação que blocos.

Os resultados de sanidade do RCD estudado nesta pesquisa apresentaram resultados superiores aos material estudado por Delongui (2016), que identificou um desgaste de 44,1% em sua pesquisa. Em ambas as amostras do resíduo proveniente do Aterro Jorge Lanner ensaiadas a sanidade apresentou-se muito superior à recomendada pelas normas para utilização em camadas de base e sub-base. Observou-se que o agregado graúdo apresentou fissuras e fendilhamento em suas partículas, conforme Figura 29.

Figura 29 - Agregado após ser submetido ao ensaio de sanidade



Fonte: Autoria própria (2020).

Entretanto, Retore (2005) comenta que o ensaio de sanidade, que visa simular ciclos de gelo e degelo, talvez não seja apropriado para avaliar a durabilidade de agregados em regiões com o clima subtropical e temperado, pois este ensaio simula condições muito mais rigorosas do que à real situação em campo, inviabilizando materiais que porventura pudessem apresentar bom desempenho.

Como não há parâmetro definido pelas normas utilizadas nesta pesquisa para análise de viabilidade técnica referente à sanidade do material reciclado de RCD para aplicação em camadas de base, sub-base ou reforço do subleito, entende-se que não é fator determinante para a eliminação deste material como opção para a utilização em pavimentação. Desta forma, por apresentar desgaste alto quando submetido à

ação de agentes agressivos, sugere-se que as condições do tráfego da via e local de aplicação deste agregado sejam avaliadas antes da execução do pavimento.

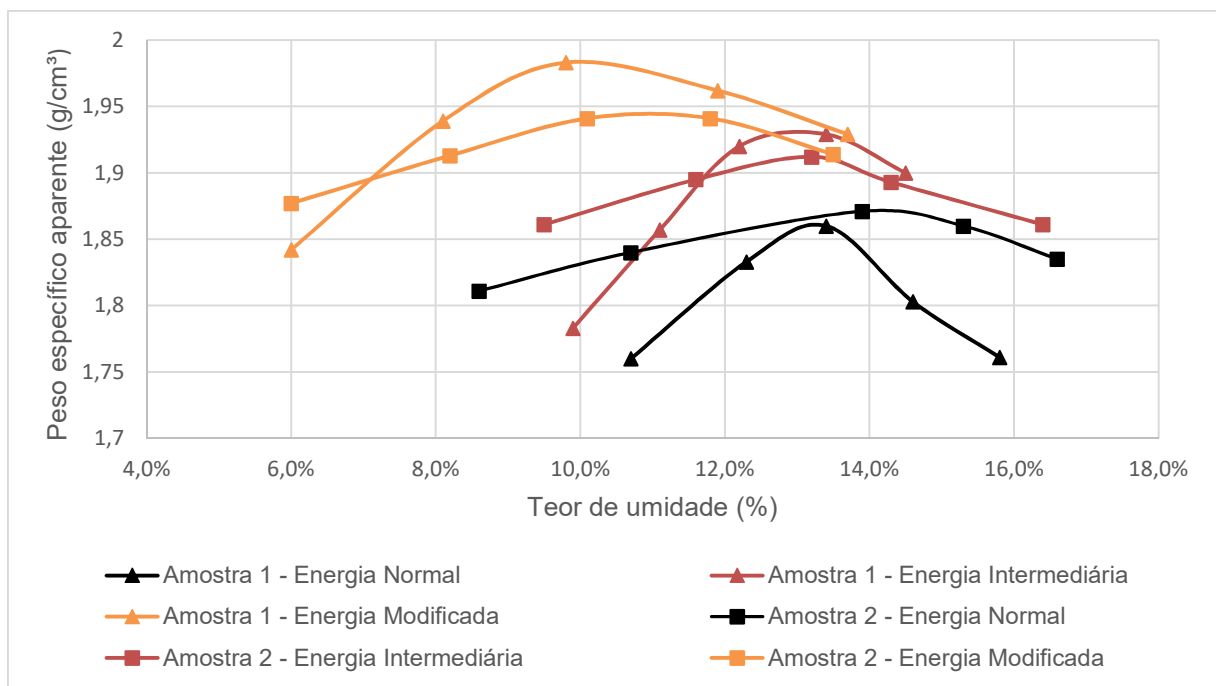
4.2 Caracterização mecânica das misturas com RCD

4.2.1 Compactação

O objetivo do ensaio de compactação é reduzir o número de vazios entre as partículas do agregado, aumentando a estabilidade do conjunto e, conseqüentemente, a resistência. Para este ensaio foi adotada a mistura entre o agregado de RCD do Aterro Jorge Lanner e o agregado proveniente da Britagem Bolognesi, conforme mistura apresentada no capítulo 4.1.1 deste trabalho, de forma à enquadrar a mistura na Faixa A.

Desta forma, foram geradas três curvas de compactação para cada uma das duas amostras ensaiadas, conforme verifica-se através da Figura 30, onde pode-se perceber que as amostras, quando submetidas à mesma aplicação de energia de compactação, demonstram comportamentos distintos entre si.

Figura 30 - Curva de compactação



Fonte: Autoria própria (2020).

Em relação à Amostra 1, percebe-se que suas curvas de compactação para as três energias empregadas apresentam uma curva em forma de “sino”, característica de curvas de compactação de agregados naturais. Em contrapartida, as curvas elaboradas para a Amostra 2 apresentam uma curva suave, demonstrando que a variação de umidade entre os corpos de prova não produz grande variação no peso específico aparente do material.

Do gráfico acima obtém-se os valores de umidade ótima e peso específico aparente máximo obtidos para ambas as amostras em decorrência da aplicação das diferentes energias de compactação, conforme apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 - Valores de índice de compactação para RCD do Aterro Jorge Lanner

Energia	Umidade ótima (%)		Peso específico aparente máximo (kN/m ³)	
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 1	Amostra 2
Normal	13,3	14,2	1,860	1,871
Intermediária	13,0	13,3	1,930	1,912
Modificada	10,0	10,9	1,983	1,944

Fonte: Autoria própria (2020).

Em relação à compactação, apesar do gráfico elaborado demonstrar um comportamento diferente entre as amostras frente à aplicação de energia de compactação, percebe-se que os resultados relacionados à Umidade ótima apresentam similaridade, principalmente quando adotada a energia intermediária.

Destaca-se, também, o comportamento do peso específico aparente máximo das amostras frente à aplicação de energia de compactação, pois pode-se perceber que conforme se aumenta a energia aplicada no corpo de prova, o peso específico também é incrementado. Este aumento do peso específico aparente da amostra ocorre pois a aplicação de maiores energias de compactação ocasiona uma quebra maior das partículas, aumentando a parcela fina do agregado e, também, promovendo um intertravamento maior entre as partículas.

Motta (2005) afirma que o uso de alta energia de compactação é sempre recomendável, entretanto pode impor uma quebra de grãos muito significativa quando o material é composto por RCD, devido à alta abrasividade deste material. Também,

Delongui (2012) observou em sua pesquisa que as amostras compactadas na faixa A necessitam um menor teor de água para atingir a umidade ótima, o que acarretou em uma baixa trabalhabilidade de seu material e, por consequência, causou um alto índice de vazios entre as partículas.

Quando comparados os resultados obtidos com dados apresentados em outras pesquisas da literatura, identifica-se que, em geral, o agregado reciclado proveniente do Aterro Jorge Lanner apresenta uma umidade ótima ligeiramente abaixo das demais encontradas, além de peso específico aparente máximo superior às demais, conforme apresentado na Tabela 17.

Tabela 17 - Valores de índice de compactação para diferentes agregados de RCD

Local	Energia de compactação	Umidade ótima (%)	Peso específico aparente máximo (kN/m ³)	Autor
	Normal	13,75	1,866	
Canoas/RS	Intermediária	13,15	1,921	Esta pesquisa
	Modificada	10,45	1,964	
Santo André/SP	Intermediária	14,60	1,760	Leite (2007)
	Modificada	13,50	1,820	
São Leopoldo/RS	Intermediária	13,61	1,823	Müller (2015)
São Paulo/SP	Intermediária	11,00	1,830	Motta (2005)
Santa Maria/RS	Normal	15,50	1,840	Delongui (2012)
	Intermediária	12,05	1,859	
Campina Grande/PB	Intermediária	16,00	1,712	Silva (2012)
	Modificada	16,04	1,716	

Fonte: Autoria própria (2020).

Também, analisando o comportamento da amostra quando submetidas à diferentes energias de compactação percebe-se um comportamento similar à pesquisa de Leite (2007) e Delongui (2012), onde a aplicação de maiores energias de compactação resultou em uma diminuição do teor ótimo de umidade e um aumento no peso específico.

4.2.1.1 Influência da compactação na granulometria

Para esta análise foram submetidos ao ensaio de granulometria o agregado após a realização da compactação utilizando a umidade ótima encontrada para cada energia, totalizando 3 ensaios para cada amostra coletada (Figura 31). O objetivo é verificar a forma como cada energia de compactação influencia no comportamento das partículas, analisando a curva granulométrica da amostra após sua compactação.

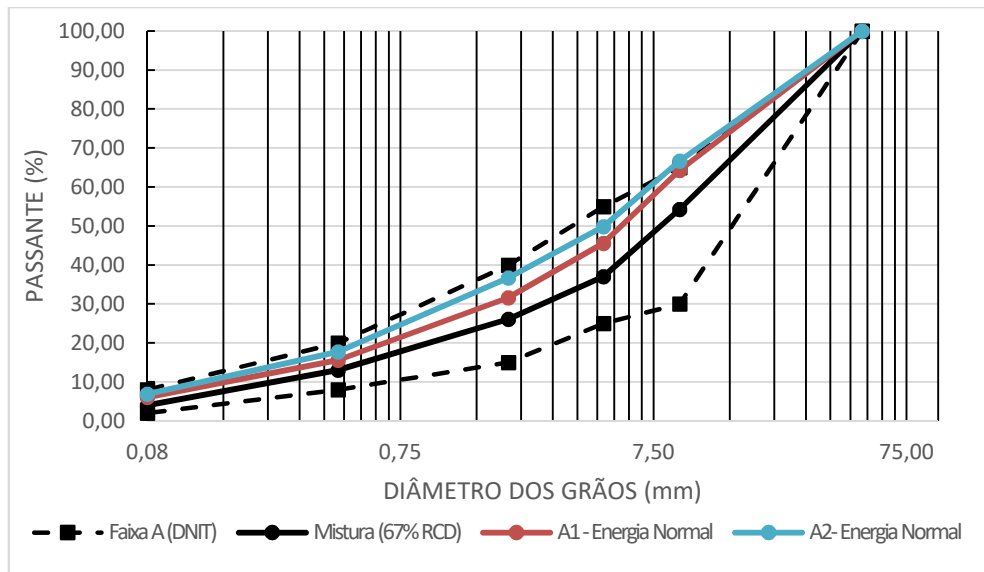
Figura 31 - Corpos de prova após compactação



Fonte: Autoria própria (2020).

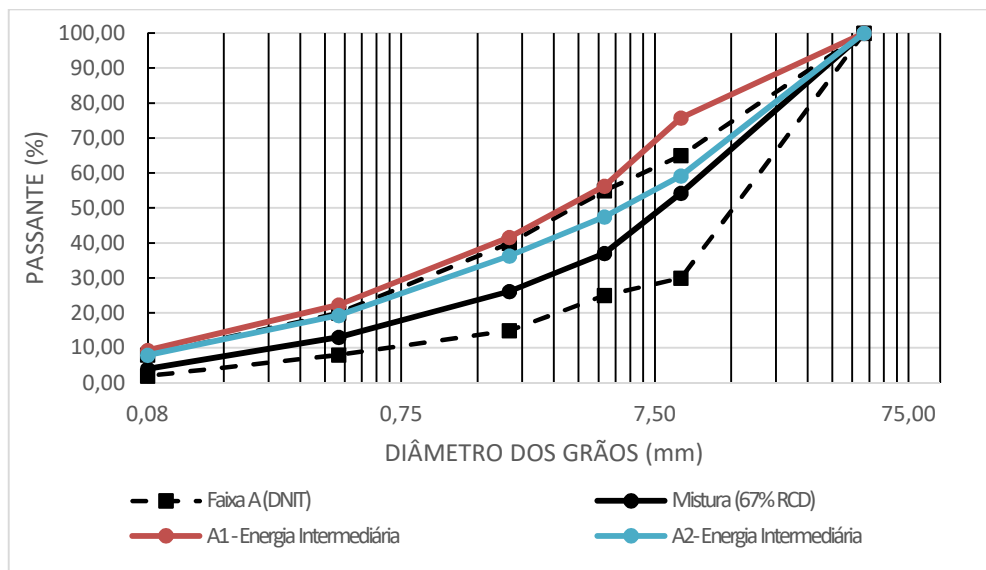
Assim, conforme apresentado na Figura 32 e Figura 33, verifica-se que ambas amostras apresentaram significativa quebra em suas partículas, acarretando em um grande aumento da porcentagem de material fino do corpo de prova.

Figura 32 - Curva granulométrica após aplicação de energia normal



Fonte: Autoria própria (2020).

Figura 33 - Curva granulométrica após aplicação de energia intermediária



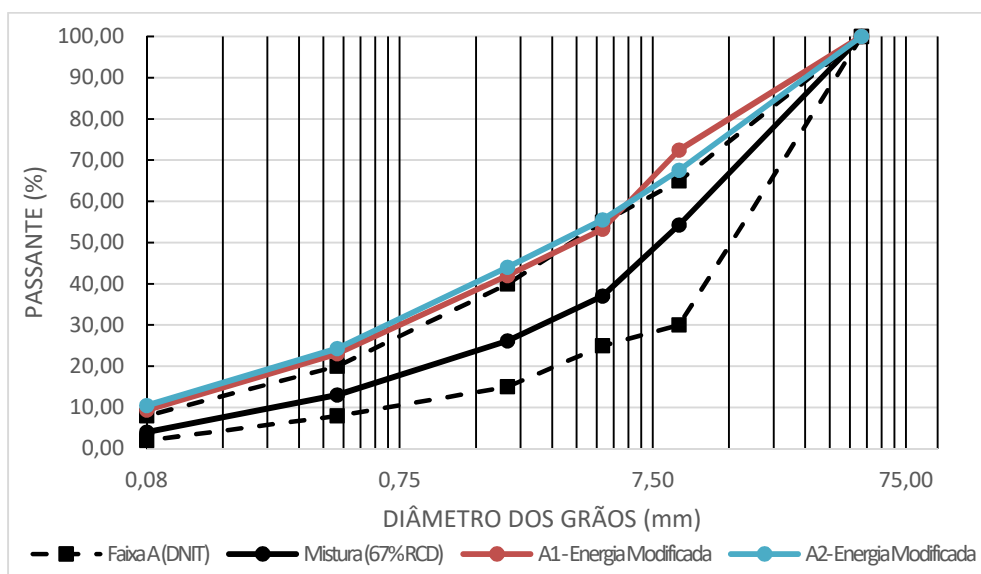
Fonte: Autoria própria (2020).

É possível identificar que ocorreram comportamentos semelhantes quando aplicada a energia normal, ocorrendo uma parcela menor de quebra das partículas. Em contrapartida, quando aplicada a energia intermediária as amostras comportaram-se de forma distinta, com a amostra A1 apresentando uma quebra maior do agregado.

O aumento de energia de compactação, através da energia modificada, propiciou a continuidade da quebra do agregado, demonstrando novamente

similaridade entre as duas amostras, conforme indicado na Figura 34. Nas duas situações a porcentagem de agregado fino, passante na peneira n° 200, apresentou um acréscimo maior de 100% em relação à porcentagem indicada na mistura de projeto. Acredita-se que dois fatores contribuíram para este comportamento do agregado proveniente de RCD: seu formato predominantemente lamelar e a abrasividade do material.

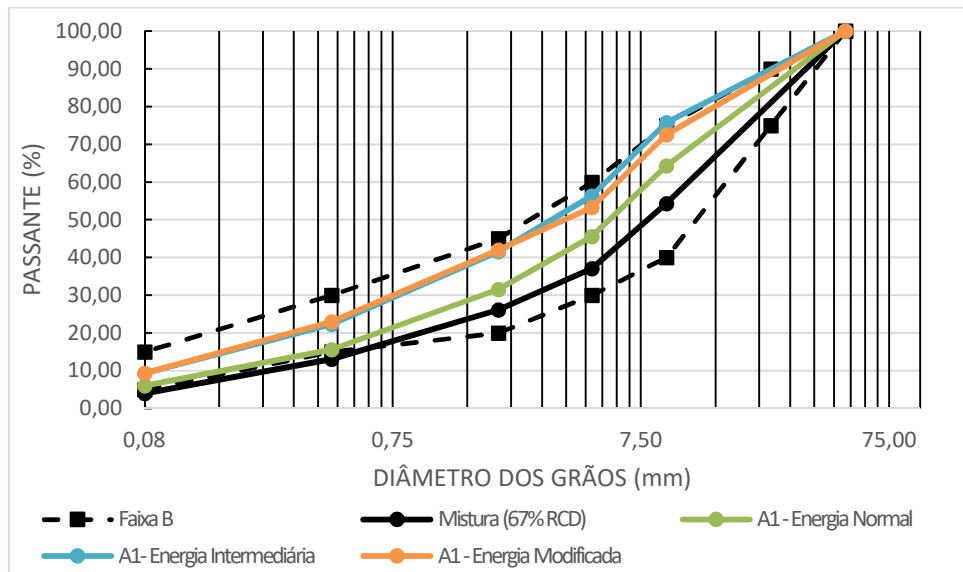
Figura 34 - Curva granulométrica após aplicação de energia modificada



Fonte: Autoria própria (2020).

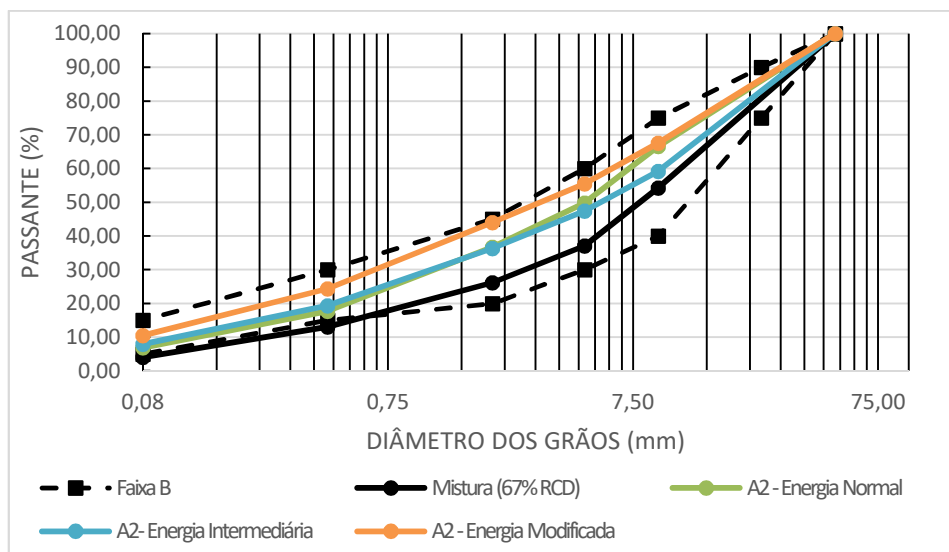
Em decorrência das quebras sofridas pelas partículas, a modificação da curva granulométrica é maior após a aplicação de energia intermediária ou modificada, resultando em curvas granulométricas fora dos limites estabelecidos para a Faixa A do DNIT, adotada para esta pesquisa. Em vista disso, identificou-se que as curvas granulométricas resultantes da compactação do material atendem os limites da Faixa B, conforme demonstrado através da Figura 35 e Figura 36.

Figura 35 - Curva granulométrica Amostra 1 após compactação – Faixa B



Fonte: Autoria própria (2020).

Figura 36 - Curva granulométrica Amostra 2 após compactação – Faixa B



Fonte: Autoria própria (2020).

Silva (2012) identificou que ocorrem deslocamentos nas curvas granulométricas quando aplicada energia intermediária e modificada, sobretudo quando utilizada energia modificada na compactação. Esta variação na granulometria ocorre pois o RCD não possui materiais com resistência suficiente para suportar a energia de compactação.

Após a realização do ensaio de granulometria em todos os corpos de prova compactados, identificou-se resultado semelhante ao de Silva (2012), ocorrendo deslocamentos em todas as curvas granulométricas em decorrência da quebra das partículas quando aplicada energia. Devido ao agregado ter-se apresentado predominantemente lamelar, era esperado que ocorressem quebras das partículas durante a compactação.

Com os dados da granulometria das amostras após a compactação, pode-se observar que todos os corpos de prova, independentemente da energia aplicada, atenderam à especificação da Norma DNIT 141/2010 (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2010), que indica que a quantidade de material passante na peneira de abertura de 0,425mm deve estar entre 10% e 40%. Também, conforme observado na Tabela 18, verifica-se que após a compactação o corpo de prova obteve resultados satisfatórios no âmbito do coeficiente de curvatura e coeficiente de uniformidade.

Tabela 18 - Coeficiente de curvatura e coeficiente de uniformidade após compactação

NBR 15115 (ABNT, 2014)		Cc	Cu
		não consta	≥10
Amostra 1	Normal	1,83	38,27
	Intermediária	2,1	60,43
	Modificada	1,72	70,39
Amostra 2	Normal	1,56	43,37
	Intermediária	1,39	74,46
	Modificada	1,86	102,58

Fonte: Autoria própria (2020).

Com isto, em se tratando de agregados reciclados de RCD, verifica-se que um material que inicialmente não atende às faixas granulométricas propostas pelas normativas pode sofrer quebras durante o processo de compactação que resultem em uma curva granulométrica não uniforme e bem graduada. Desta forma, um agregado reciclado não pode ter sua utilização em camadas de pavimento inviabilizada apenas por sua granulometria inicial. Além disto, é importante destacar que maiores energias

de compactação implicam em maiores quebras destes agregados, diminuindo o desgaste posterior ocasionado pelo tráfego.

Motta (2005) expõe que em relação à deformação permanente a quebra dos grãos deve ser induzida na compactação, para que esta não ocorra por decorrência da ação do tráfego, e permita a formação de deformação permanente, com conseqüente alteração da estrutura do pavimento. Também em relação à quebra dos grãos, sugere-se que o agregado reciclado seja utilizado em vias com baixo volume de tráfego, pois o tráfego elevado poderia aumentar a quebra dos grãos.

4.2.2 Índice de Suporte Califórnia

Com relação ao ensaio de Índice de Suporte Califórnia, apresenta-se na Tabela 19 os resultados obtidos para esta pesquisa, onde os corpos de prova foram moldados utilizando a mistura definida para estabilização granulométrica do material, através da utilização de 67% de agregado reciclado de RCD proveniente do Aterro Jorge Lanner e 33% do agregado natural da Britagem Bolognesi. Foram moldados 3 corpos de prova para cada amostra de agregado reciclado coletado, sendo 1 para cada energia de compactação, e utilizando as umidades ótimas obtidas anteriormente.

Tabela 19 - Ensaio de Índice de Suporte Califórnia

Energia de compactação	Amostra 1		Amostra 2	
	ISC (%)	Expansão (mm)	ISC (%)	Expansão (mm)
Normal	56,9	0,09	48,4	0,00
Intermediária	76,9	0,00	114,6	0,44
Modificada	121,5	0,00	132,9	0,00

Fonte: Autoria própria (2020).

A aplicação de energia normal nos corpos de prova apresentou resultados inferiores referentes ao suporte do corpo de prova, corroborando a orientação da Norma ABNT 15116 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004) relacionada à utilização de energias de compactação intermediária e modificada quando utilizado agregados reciclados de RCD em camadas de pavimentação.

Em relação à expansibilidade do material, observou-se que este apresenta-se não expansivo, demonstrando expansão nula em praticamente todos os corpos de prova de ambas as amostras. Para a expansão apresentada pelo corpo de prova moldado na energia intermediária da Amostra 2, onde obteve-se leitura de 0,44m, optou-se por desconsiderar este resultado pois o comportamento dos demais corpos de prova utilizando agregado da mesma amostra indicou expansão nula. Assim, entende-se que pode ter ocorrido falha humana durante o manuseio do equipamento.

Destaca-se, ainda, que o corpo de prova referente à Amostra 1 e compactado utilizando energia modificada foi ensaiado até o limite da prensa utilizada para o ensaio, o que indica que a capacidade de suporte da mistura proposta pode apresentar resultado superior ao expresso no boletim de ensaio.

Através da Tabela 20 faz-se um breve compilado de dados apresentados na literatura acerca do Índice de Suporte Califórnia para diferentes agregados de resíduos reciclados de RCD.

Tabela 20 - Valores de ISC para diferentes agregados de RCD

Local	Energia de compactação	Umidade ótima (%)	ISC (%)	Autor
	Normal	13,8	52,7	
Canoas/RS	Intermediária	13,2	95,8	Esta pesquisa
	Modificada	10,5	127,2	
Santo André/SP	Intermediária	14,6	73,0	Leite (2007)
	Modificada	13,5	117,0	
São Leopoldo/RS	Intermediária	13,6	76,9	Müller (2015)
	Normal	11,0	36,0	
São Paulo/SP	Intermediária	11,0	84,0	Motta (2005)
	Normal	15,5	75,0	Delongui
Santa Maria/RS	Intermediária	12,1	108,5	(2012)
	Intermediária	16,0	49,1	
Campina Grande/PB	Modificada	16,0	80,0	Silva (2012)

Fonte: Autoria própria (2020).

Delongui (2012) observou que a granulometria predominantemente graúda da Faixa A acarreta em amostras instáveis durante a realização do ensaio quando utilizada a energia normal, pois alguns agregados graúdos não apresentam intertravamento satisfatório, permanecendo alguns soltos. Assim, por não estarem

devidamente confinados, o puncionamento do pistão ocasiona a quebra de algumas partículas, implicando em variabilidade no ensaio. Porém, quando aplicada a energia de compactação intermediária ocorre a quebra de algumas destas partículas, de forma à aumentar a compacidade da amostra e, conseqüentemente diminuir a variabilidade dos resultados obtidos.

Em contrapartida, Motta (2005) ressaltou em sua pesquisa que, mesmo com a dificuldade de obter alta repetibilidade do ensaio de ISC, os resultados obtidos em sua pesquisa demonstram a importância da energia de compactação para estes materiais.

Analisando a expansão obtida para o agregado de RCD do Aterro Jorge Lanner pode-se perceber que o material não apresenta substâncias expansivas em sua composição, apresentando resultados inexpressivos ou nulos neste âmbito. Através da Tabela 21 é possível perceber que em diversas pesquisas utilizando RCD, outros autores encontraram resultados semelhantes.

Tabela 21 - Valores de expansão para diferentes agregados de RCD

Local	Energia de compactação	Expansão (%)	Autor
Canoas/RS	Normal	0,04	Esta pesquisa
	Intermediária	0,00	
	Modificada	0,00	
Santo André/SP	Intermediária	0,00	Leite (2007)
	Modificada	0,00	
São Leopoldo/RS	Intermediária	0,48	Müller (2015)
Santa Maria/RS	Normal	0,02	Delongui (2012)
	Intermediária	0,01	
Campina Grande/PB	Intermediária	0,04	Silva (2012)
	Modificada	0,04	

Fonte: Autoria própria (2020).

Leite (2007) também observou uma expansibilidade nula em relação ao RCD de Santo André, e Müller (2015) observou uma expansão de, apenas, 0,48%; o que representa uma baixa expansibilidade do RCD na presença de água.

Assim, em relação à capacidade de suporte e expansibilidade o agregado reciclado de RCD proveniente do Aterro Jorge Lanner, considera-se que este atende às condicionantes impostas pela Norma NBR 15116 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004), podendo ser aplicado em camadas de reforço do

subleito, sub-base ou, no caso de vias com baixo volume de tráfego, em camadas de base.

4.3 Análise da viabilidade técnica

Por meio dos ensaios realizados para caracterização física do agregado identificou-se que este é composto predominantemente de partículas cimentícias, proveniente de argamassas e concretos, além de uma parcela significativa de agregados cerâmicos. Em relação à parcela de materiais indesejados, verificou-se que esta não é representativa em relação às amostras ensaiadas, estando abaixo do valor máximo estipulado pelas Normas.

Observa-se através da Tabela 22, Tabela 23 e Tabela 24 que o agregado proveniente do Aterro Jorge Lanner atende às especificações das Normas em relação às características físicas de abrasividade Los Angeles, Limite de Liquidez, Índice de Plasticidade, Equivalente de Areia e Dimensão máxima característica. Porém, o agregado reciclado possui forma predominantemente lamelar, não estando dentro dos limites aceitáveis para utilização em camadas de pavimentos rodoviários.

Tabela 22 - Especificações para utilização de RCD em camadas de base

Característica	DNIT	NBR 15116	Amostra 1	Amostra 2
	141/2010-ES	(2004)		
Limite de Liquidez	≤ 25%	-	0	0
Índice de Plasticidade	≤ 6%	-	0	0
Equivalente de areia	> 30%	-	33,20%	38,50%
ISC (Energia Intermediária ou Modificada)	≥ 60%	≥ 60%	76,90%	114,60%
Expansão	≤ 0,5%	≤ 0,5%	0,00%	0,00%
Abrasão Los Angeles	≤ 55%	-	45,10%	44,61%
Cu	-	>10	2,26	2,17
Dimensão máxima característica	-	63mm	12,5	19,0
Índice de forma	-	≤ 3	3,16	3,29
Teor de material passante na peneira de 0,42 mm	-	Entre 10% e 40%	4,18	2,15
Contaminantes	-	< 3%	0,58	0,29

Fonte: Autoria própria (2020).

Tabela 23 - Especificações para utilização de RCD em camadas de sub-base

Característica	DNIT 138/2010-ES	NBR 15116 (2004)	Amostra 1	Amostra 2
Índice de Grupo	0	-	0	0
ISC (Energia intermediária)	≥ 20%	≥ 20%	76,90%	114,60%
Expansão	≤ 1,0%	≤ 1,0%	0,00%	0,00%
Cu	-	>10	2,26	2,17
Dimensão máxima característica	-	63mm	12,5	19,0
Índice de forma	-	≤ 3	3,16	3,29
Teor de material passante na peneira de 0,42 mm	-	Entre 10% e 40%	4,18	2,15
Contaminantes	-	< 3%	0,58	0,29

Fonte: Autoria própria (2020).

Tabela 24 - Especificações para utilização de RCD em camadas de reforço do subleito

Característica	DNIT 139/2010-ES	NBR 15116 (2004)	Amostra 1	Amostra 2
Índice de Grupo	Máximo igual ao do subleito	-	0	0
ISC	≥ 12%	≥ 12%	76,90%	114,60%
Expansão	≤ 1,0%	≤ 1,0%	0,00%	0,00%
Cu	-	>10	2,26	2,17
Dimensão máxima característica	-	63mm	12,5	19,0
Índice de forma	-	≤ 3	3,16	3,29
Teor de material passante na peneira de 0,42 mm	-	Entre 10% e 40%	4,18	2,15
Contaminantes	-	< 3%	0,58	0,29

Fonte: Autoria própria (2020).

Em relação à granulometria do agregado reciclado, identificou-se que este não apresenta uma parcela adequada de teor de material passante na peneira de 0,42mm, resultante de um material com pouca presença de finos. Também, o RCD demonstrou uma distribuição granulométrica uniforme, indicando a necessidade de estabilização granulométrica do material para possibilitar sua utilização em camadas de pavimentos rodoviários. Desta forma, para realização da caracterização mecânica proposta nesta pesquisa, foi adotada a estabilização granulométrica utilizando 33% de pó de pedra

proveniente da Britagem Bolognesi, como forma de enquadrar a mistura na Faixa A do DNIT.

Através dos ensaios de caracterização mecânica identificou-se um comportamento característico de quebra das partículas conforme o aumento da energia de compactação, o que promoveu um melhor intertravamento entre as partículas, resultando em excelentes resultados de Índice de Suporte Califórnia quando aplicadas energia de compactação Intermediária e Modificada.

Assim, recomenda-se que para a execução de camadas de pavimentos utilizando agregados reciclados seja sempre utilizada alta energia de compactação, promovendo a máxima quebra das partículas neste momento, objetivando atingir maior intertravamento entre os agregados e minimizar deformações à longo prazo no pavimento.

Também, através da aplicação de diferentes energias nos corpos de prova não foi observada variabilidade na expansão, corroborando o fato do agregado reciclado se tratar de materiais inertes. Portanto, pode-se afirmar que o agregado reciclado de RCD do Aterro Jorge Lanner, quando estabilizado granulométricamente, apresenta comportamento satisfatório em relação à expansão e ISC, atendendo às condicionantes estabelecidas nas Normas.

Entretanto, salienta-se que por norma a aplicação do agregado reciclado em camadas de base deve ser condicionada à aplicação de energia intermediária ou modificada, conforme recomendação das normas específicas anteriormente citadas. Também, para aplicação deste agregado em camadas de sub-base a compactação do agregado reciclado deve ser realizada empregando energia intermediária. Por fim, considerando a estabilização granulométrica do material, considerou-se que o agregado reciclado de RCD atende às prerrogativas para aplicação em camadas de reforço do subleito quando, por ventura, houver necessidade de execução de camadas com alta capacidade de suporte.

Assim, considera-se, do ponto de vista técnico, que este agregado pode ser aplicado em camadas de base, sub-base e reforço do subleito em pavimentos.

4.4 Análise da viabilidade econômica

Nesta pesquisa, foi elaborada a composição de preços unitários para a atividade de usinagem de brita graduada com a utilização de brita comercial. Os dados utilizados para as composições são referentes ao SICRO para o Estado do Rio Grande do Sul, no período de janeiro/2020. Entretanto, o referido sistema não possui dados referentes a insumos reciclados de RCD e, portanto, foi necessário adotar para este insumo o preço sugerido pelo sistema SINAPI (2020), também para a data-base de janeiro/2020.

Desta forma, após a elaboração das composições de preço para os três cenários propostos, conforme apresentado em anexo, identificou-se que a usinagem de brita graduada utilizando RCD para utilização em camadas de base e sub-base apresenta vantagem econômica frente à usinagem de brita graduada utilizando o agregado convencional (Tabela 25), isto se deve ao preço inferior apresentado pelo agregado de RCD, conforme aferido pelo SINAPI (2020). As composições de preço elaboradas encontram-se dispostas nos Anexos D, E e F.

Tabela 25 - Comparativo preços unitários para usinagem

Cenário 1			
Item	Descrição	unidade	Preço Unitário
6416040	Usinagem de brita graduada com brita comercial em usina de 300 t/h	m ³	R\$ 104,14
Cenário 2			
Item	Descrição	unidade	Preço Unitário
	Usinagem de brita graduada com agregado reciclado de RCD	m ³	R\$ 57,27
Cenário 3			
Item	Descrição	unidade	Preço Unitário
	Usinagem de brita graduada com brita produzida em usina de 300 t/h e agregado reciclado de RCD - Caminhão basculante 10 m ³	m ³	R\$ 76,33

Fonte: Autoria própria (2020).

Em uma análise preliminar identifica-se que os dois cenários propostos com utilização de agregado de RCD apresentam preços unitários inferiores à utilização apenas de agregado convencional. Entretanto, apesar do preço unitário referente à usinagem da brita graduada com agregado proveniente de RCD ser 45% inferior à usinagem utilizando agregado convencional, deve-se destacar que estes preços

consideram apenas as atividades referentes à usinagem, sem considerar as respectivas DMTs.

No Cenário 3, onde foi realizada a composição de preços para a usinagem de brita graduada “mista”, por meio da mistura entre agregado natural e agregado de RCD, apresentou um preço unitário de R\$ 76,33, representando um valor 26,70% inferior à usinagem com brita comercial.

Desta forma, entende-se que a utilização do agregado de RCD proveniente do Aterro Jorge Lanner é economicamente viável. Entretanto, da mesma forma como os demais insumos utilizados em obras rodoviárias, está condicionada ao local de sua aplicação e de usinagem, pois distâncias de transporte altas podem inviabilizar a utilização deste material.

Tendo em vista que no Aterro Jorge Lanner atualmente não há uma usina misturadora de solos instalada para viabilizar a usinagem da brita graduada, foi necessário também avaliar a influência da distância de transporte do agregado reciclado de RCD até a usina misturadora de solos. Para esta análise foi considerada a utilização da usina existente na Britagem Bolognesi, considerando que a estabilização granulométrica proposta utilizou-se do agregado proveniente deste local. Assim, apresenta-se na Tabela 26 o orçamento para usinagem de brita graduada considerando a DMT entre o Aterro Jorge Lanner e a Britagem Bolognesi de, aproximadamente, 64,3km.

Tabela 26 - Comparativo de preços unitários para fornecimento

Cenário 1					
Item	Descrição	unidade	Preço Unitário	Quantidade	Preço
6416040	Usinagem de brita graduada com brita comercial em usina de 300 t/h	m ³	R\$ 104,14	1,00	R\$ 104,14
5914389	Transporte com caminhão basculante de 10m ³ - rodovia pavimentada	t.km	R\$ 0,42	0,00	R\$ -
Total					R\$ 104,14
Adotada DMT = 0km					
Cenário 2					
Item	Descrição	unidade	Preço Unitário	Quantidade	Preço
	Usinagem de brita graduada com agregado reciclado de RCD	m ³	R\$ 57,27	1,00	R\$ 57,27
5914389	Transporte com caminhão basculante de 10m ³ - rodovia pavimentada	t.km	R\$ 0,42	144,68	R\$ 60,76
Total					R\$ 118,03
Adotada DMT = 64,30km					
Cenário 3					
Item	Descrição	unidade	Preço Unitário	Quantidade	Preço
	Usinagem de brita graduada com brita produzida em usina de 300 t/h e agregado reciclado de RCD - Caminhão basculante 10 m ³	m ³	R\$ 76,33	1,00	R\$ 76,33
5914389	Transporte com caminhão basculante de 10m ³ - rodovia pavimentada	t.km	R\$ 0,42	96,93	R\$ 40,71
Total					R\$ 117,04
Adotada DMT = 64,30km					

Fonte: Autoria própria (2020).

Através da Tabela 26 é possível identificar que o momento de transporte entre o beneficiamento do agregado reciclado e a usina misturadora apresenta grande influência sobre o preço unitário para fornecimento de brita graduada. Assim, o emprego de resíduo de RCD não apresentou vantagem econômica para o caso da utilização do agregado proveniente da Britagem Bolognesi para estabilização e usinagem dos agregados.

Porém, considerando que as obras viárias são executadas em locais diversos e, também, que há diversas pedreiras comerciais localizadas nos municípios da Região Metropolitana de Porto Alegre, as DMTs associadas ao fornecimento de cada material proposto modificam-se conforme altera-se uma destas variáveis.

Desta forma, foi realizado um orçamento comparativo para o fornecimento de agregados considerando os 3 cenários adotados inicialmente para diferentes DMTs, até que se obtivesse os mesmos preços de fornecimento para todos, conforme

apresentado na Tabela 27. O objetivo desta análise é identificar o “limite” máximo de DMT que pode ser associada aos cenários 2 e 3 frente ao cenário 1, onde os 2 primeiros mantivessem sua competitividade econômica frente à utilização de brita graduada comercial.

Tabela 27 - Orçamento para fornecimento do agregado

Cenário 1					
Item	Descrição	unidade	Preço Unitário	Quantidade	Preço
6416040	Usinagem de brita graduada com brita comercial em usina de 300 t/h	m ³	R\$ 104,14	1,00	R\$ 104,14
5914389	Transporte com caminhão basculante de 10m ³ - rodovia pavimentada	t.km	R\$ 0,42	0,00	R\$ -
Total					R\$ 104,14
Adotada DMT = 0km					
Cenário 2					
Item	Descrição	unidade	Preço Unitário	Quantidade	Preço
	Usinagem de brita graduada com agregado reciclado de RCD	m ³	R\$ 57,27	1,00	R\$ 57,27
5914389	Transporte com caminhão basculante de 10m ³ - rodovia pavimentada	t.km	R\$ 0,42	111,60	R\$ 46,87
Total					R\$ 104,14
Adotada DMT = 49,6km					
Cenário 3					
Item	Descrição	unidade	Preço Unitário	Quantidade	Preço
	Usinagem de brita graduada com brita produzida em usina de 300 t/h e agregado reciclado de RCD - Caminhão basculante 10 m ³	m ³	R\$ 76,33	1,00	R\$ 76,33
5914389	Transporte com caminhão basculante de 10m ³ - rodovia pavimentada	t.km	R\$ 0,42	66,21	R\$ 27,81
Total					R\$ 104,14
Adotada DMT = 43,92km					

Fonte: Autoria própria (2020).

Através dos preços obtidos, identifica-se que uma diferença entre a distância média de transporte de 49,6km entre os cenários 1 e 2 mantém a competitividade econômica para o fornecimento de agregado reciclado de RCD em relação ao fornecimento de agregado natural. Quando comparado os cenários 1 e 3, esta diferença entre a distância média de transporte diminui para 43,92km, mantendo a competitividade econômica para um fornecimento de agregado reciclado de RCD estabilizado com agregado natural, conforme estudado nesta pesquisa.

Entretanto, é importante acrescentar que para a composição de preço elaborada foi considerada apenas a DMT entre a pedreira e a usina de reciclagem. Portanto, destaca-se a importância da escolha da pedreira para fornecimento do agregado natural do Cenário 3 próxima à usina de reciclagem, como forma de manter a competitividade econômica frente ao Cenário 1, concordando com as conclusões de John e Agopyan (2000), que dizem que um dos aspectos que afeta diretamente a competitividade do produto é a localização das centrais de reciclagem, sendo necessária a localização das centrais de entrega de RCD em pontos que diminuam as DMTs para a captação destes resíduos. Assim, é necessário que estas centrais estejam localizadas em zonas urbanas, próximas dos pontos de geração destes resíduos e, também, aos possíveis compradores do agregado reciclado.

Desta forma, é possível afirmar que a utilização de agregado reciclado de RCD apresenta viabilidade econômica para comercialização frente ao fornecimento de agregados naturais para obras de pavimentação. Neste sentido, o resíduo produzido no Aterro Jorge Lanner possui alta competitividade, visto que está inserido na Região Metropolitana de Porto Alegre e possui fácil acesso às principais rodovias da região. Apesar de estar inserido na zona urbana do Município de Canoas, o mesmo encontra-se localizado na zona industrial e já possui licença ambiental para operação.

Assim, é possível identificar que o agregado reciclado, em geral, apresenta competitividade econômica frente à utilização de agregados minerais naturais quanto ao fornecimento de ambos para obras rodoviárias. Entretanto, conforme a necessidade de estabilização granulométrica do agregado reciclado através da utilização de outro material a competitividade econômica frente à utilização de agregado natural será menor. Além deste aspecto, também é importante considerar que a alta energia de compactação necessária para promover o melhor desempenho do agregado reciclado de RCD implica em maiores passadas de rolo compactador nas camadas, aspecto que também deve ser considerado pelo consumidor para escolha do material.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusões

São apresentadas neste capítulo as considerações e conclusões acerca dos resultados obtidos na presente pesquisa a partir dos resultados laboratoriais, como forma de avaliar a viabilidade de aplicação do resíduo reciclado de RCD proveniente do Aterro Jorge Lanner em camadas de pavimentos rodoviários.

Para aplicação do material em camadas de pavimento rodoviário é necessário que o agregado apresente comportamento semelhante ao longo do fornecimento deste, para que seja viável sua aplicação em larga escala à exemplo da exploração de jazidas naturais para fornecimento de agregados.

Assim, destaca-se que, apesar das coletas no Aterro Jorge Lanner terem ocorrido em épocas distintas como forma de avaliar o comportamento do material frente à heterogeneidade de sua composição, observou-se através dos ensaios que ambas as amostras apresentaram comportamentos semelhantes em relação à caracterização física e mecânica. Observa-se que a qualidade nos processos produtivos do agregado na usina de reciclagem implementada no local é extremamente importante para garantir a manutenção desta baixa variabilidade, demonstrando a qualidade do material para que seja possível aumentar sua aceitação no mercado.

Em relação às características físicas do agregado reciclado de RCD do Aterro Jorge Lanner identificou-se que o mesmo apresenta distribuição granulométrica uniforme, bem como partículas alongadas e lamelares. A composição do agregado apresenta predominância de partículas cimentícias e baixo teor de materiais indesejáveis, em torno de 0,58% e 0,29% para ambas as amostras coletadas. Em relação à abrasividade do agregado, quando submetido ao ensaio de Abrasão Los Angeles este apresentou resultados satisfatórios, em torno de 45%, entretanto o agregado reciclado apresentou desgaste excessivo quando submetido ao ensaio de sanidade, demonstrando desgastes da ordem de 46% e 58%.

Devido à granulometria do agregado em estudo não satisfazer os limites granulométricos apresentados para emprego em camadas de pavimentos, procedeu-se à estabilização granulométrica do agregado utilizando agregado natural proveniente de uma jazida comercial da região. Assim, para a realização dos ensaios

de caracterização mecânica foi adotada uma composição utilizando 67% de agregado reciclado de RCD e 33% de agregado natural proveniente da Britagem Bolognesi.

Tendo em vista que foram moldados corpos de prova através da utilização de energia normal, intermediária e modificada, foi possível identificar que o emprego de maiores energias promove um aumento na massa específica do corpo de prova, bem como uma diminuição da umidade ótima de compactação. A aplicação de energia normal resultou em peso específico aparente de $1,866\text{kN/m}^3$ e umidade ótima de 13,75% em média, a compactação com energia intermediária resultou em peso específico aparente de $1,921\text{kN/m}^3$ e umidade ótima de 13,15% e, por fim, a utilização de energia modificada acarretou em peso específico aparente de $1,964\text{kN/m}^2$ e umidade ótima de 10,45% em média.

Através da moldagem de corpos de prova utilizando os parâmetros de umidade ótima para cada energia, observou-se que quando empregada maior energia de compactação aumenta-se a capacidade de suporte do corpo de prova. Quando aplicada energia normal de compactação o ISC resultou em 52,7%, através da compactação com energia intermediária observou-se capacidade de suporte de 95,8% e, por fim, quando utilizada energia modificada de compactação a capacidade de suporte da mistura resultou em 127,2%. Salienta-se, também, que as amostras ensaiadas foram consideradas não expansivas.

Quando analisada a granulometria dos agregados de cada corpo de prova moldado, observa-se que a aplicação de maior energia de compactação acarreta em maiores quebras das partículas, aumentando a parcela de material fino da mistura, o que ocasiona um maior intertravamento entre as partículas e, conseqüentemente, promove um aumento na capacidade de suporte, conforme observado.

Confrontando os resultados obtidos na pesquisa com as normas técnicas aplicáveis para utilização de agregado reciclado de RCD em camadas de base, sub-base e reforço do subleito de pavimentos, identificou-se que em relação às características físicas do agregado como Índice de Plasticidade, Limite de Liquidez, Índice de Grupo, Equivalente de Areia, Abrasão Los Angeles, Teor de Contaminantes e Dimensão máxima do agregado, o material reciclado atende aos limites recomendados.

Porém, em relação à forma e distribuição granulométrica o agregado reciclado de RCD não apresentou resultados satisfatórios. O Índice de Forma das partículas apresentou um índice médio de 3,22; valor acima do especificado pelas normas de

referência. Também, os parâmetros relacionados à granulometria como Coeficiente de Uniformidade resultou, em média, 2,21; representando um valor significativamente inferior ao valor de referência das normas, considerado 10.

Ademais, o teor de material passante na peneira 42mm resultou em 4,18% e 2,15% para ambas as amostras estudadas quando, para utilização em camadas de pavimento, seria necessário apresentar um teor entre 10% e 40%. Desta forma, identificou-se a necessidade de estabilização granulométrica do agregado de RCD para realização dos ensaios de caracterização mecânica.

Por fim, para que a aplicação de agregado reciclado de RCD seja viável tecnicamente, é necessário que a mistura proposta apresente Índice de Suporte Califórnia acima de 60% para aplicação em camadas de base, acima de 20% para aplicação em sub-base e, também acima de 12% para utilização em reforço do subleito. Ademais, é necessário que o material seja classificado como não expansivo. Considerando os resultados obtidos nesta pesquisa, observa-se que para a utilização de energia intermediária e modificada, conforme recomendado para materiais reciclados, a capacidade de suporte do material atende às recomendações das normas aplicáveis.

Considerando que em relação aos aspectos técnicos o agregado reciclado não atende apenas aos itens referentes à forma e granulometria das amostras, considerando que foi realizada a estabilização granulométrica do material e, por fim, considerando que a aplicação de altas energias de compactação promove significativa quebra das partículas, promovendo um melhor intertravamento entre estas e resultando em resultados satisfatórios referentes à capacidade de suporte, entende-se que a utilização de agregado reciclado de RCD é tecnicamente viável. Entretanto, recomenda-se que este seja aplicado através da utilização de energia de compactação modificada, de forma à promover maior quebra dos agregados e, também, é recomendada a sua aplicação em pavimentos de vias com baixo volume de tráfego como, por exemplo, vias urbanas ou rodovias vicinais.

Em relação ao desgaste sofrido pelo resíduo de RCD quando submetido ao ensaio de sanidade, observa-se que apesar do material ter apresentado alto valor de desgaste químico, destaca-se que este parâmetro não é impeditivo para sua utilização em camadas de base, sub-base e reforço do subleito. Porém, entende-se que devido à alta suscetibilidade do material à meios agressivos, é recomendável que este não

seja utilizado em obras de pavimentação em ambientes agressivos como, por exemplo, ambiente litorâneo.

Para a análise de viabilidade econômica para utilização de agregado reciclado frente à utilização de brita comercial foram elaboradas composições de preços para as atividades. Através das composições elaboradas para usinagem de brita graduada, foi identificado que o preço unitário para usinagem de 1m³ utilizando brita comercial é R\$ 104,14. Em contrapartida, a usinagem utilizando apenas agregado reciclado de RCD possui um preço de R\$ 57,27 para cada metro cúbico usinado. Quando adotada a mistura proposta para estabilização granulométrica, utilizando 67% de agregado reciclado de RCD e 33% de agregado natural, a usinagem apresentou preço unitário de R\$ 76,33.

Entretanto, as composições de preços unitárias elaboradas não consideraram inicialmente a Distância Média de Transporte entre a usina recicladora e a usina misturadora de solos, necessária para usinagem da brita graduada. Quando considerado este parâmetro, a utilização apenas de agregado reciclado de RCD para usinagem de brita graduada apresenta preço inferior à usinagem utilizando brita comercial até o limite máximo de 49,6km para a DMT mencionada. Para a usinagem de brita graduada utilizando a mistura entre RCD e brita comercial proposta, considerando a DMT entre a usina recicladora e a usina misturadora de solos, esta apresenta preços inferiores à usinagem de brita comercial até um limite máximo de 43,92km.

Por fim, a análise econômica realizada nesta pesquisa demonstrou que o fornecimento de agregados reciclados é economicamente atrativo, mesmo quando este necessita ser estabilizado granulometricamente. Desta forma, além da comercialização, o agregado reciclado pode ser utilizado pela Prefeitura Municipal de Canoas em obras viárias do município pois, além do ganho ambiental associado, permite a redução global dos custos das obras.

É importante destacar, também, que o adequado gerenciamento do Aterro Jorge Lanner, e dos resíduos destinados ao local, é de fundamental importância para garantir a manutenção das condições adequadas de produtividade e qualidade do RCD em questão. Desta forma, reiteramos a qualidade e eficácia do processo de triagem ao qual o resíduo é submetido no local, o que promove a geração de um agregado praticamente livre de materiais indesejáveis, o que é atrativo ao mercado

consumidor. Entretanto, sugere-se que sejam analisadas novas alternativas para britagem do material, de forma à produzir agregados de forma mais cúbica.

Assim, conclui-se que a aplicação do resíduo reciclado de RCD em camadas inferiores de pavimentos rodoviários é tecnicamente e economicamente viável. Porém, atualmente a inserção do agregado reciclado de RCD no ciclo produtivo é incipiente em decorrência de falta de informação ou preconceito associado à utilização de um material reciclado em detrimento à agregados naturais. Portanto, é necessário que sejam ampliadas e divulgadas pesquisas e aplicações para a reinserção deste resíduo no ciclo produtivo como, por exemplo, em camadas inferiores de obras de pavimentos rodoviários.

5.2 Sugestões para pesquisas futuras

Embora ao longo dos últimos anos hajam pesquisas no âmbito do reaproveitamento de resíduos reciclados de RCD, este tópico carece de estudos e pesquisas de forma à difundir e popularizar sua utilização. Assim, destacam-se algumas sugestões para pesquisas futuras relacionadas ao tema de reciclagem de resíduos:

- a) Análise do comportamento do RCD frente à aplicação de energia: Nesta pesquisa verificou-se que a aplicação de energias de compactação resulta em uma quebra significativa dos agregados reciclados. Assim, se sugere que sejam analisadas as variações granulométricas e de índice de forma deste resíduo quando compactado, sem que tenha ocorrido prévia estabilização granulométrica do material;
- b) Execução e monitoramento de uma pista experimental: Realizar o acompanhamento executivo da construção de um trecho experimental, acompanhando as características do agregado quando produzido e fornecido em larga escala. Também, sugere-se monitorar o desempenho do trecho ao longo do tempo, acompanhando as deflexões, deformações e ocorrência de patologias;
- c) Estudos referente à viabilidade para novas aplicações do agregado reciclado de RCD: Sugere-se elaborar estudo para análise da viabilidade da aplicação do agregado reciclado proveniente do Aterro Jorge Lanner em outros segmentos como, por exemplo, fabricação de peças de concreto não estrutural;

- d) Análise de viabilidade para reaproveitamento de outros resíduos destinados ao Aterro Jorge Lanner: Além do Resíduo de Construção e Demolição destinados ao local, o Aterro é ponto de descarte de diversos outros materiais, como madeira e vegetação e, atualmente não há alternativas à remediação deste passivo ambiental. Assim, é importante que sejam estudadas alternativas para reaproveitamento e valoração deste material, à exemplo do estudo realizado com RCD para reaproveitamento em camadas de pavimento;
- e) Diagnóstico ambiental do Aterro Jorge Lanner: Historicamente o local era destino de descarte de resíduos variados dos municípios da Região Metropolitana de Porto Alegre, o que acarretou em um passivo ambiental para o município de Canoas/RS. Propõe-se a execução de um estudo quantitativo e qualitativo do material aterrado irregularmente no local, de forma à realizar um diagnóstico ambiental do passivo e a elaboração de medidas de remediação deste;
- f) Análise detalhada da viabilidade econômica: Realizar uma análise aprofundada referente à viabilidade econômica considerando a execução de um trecho experimental, englobando parâmetros como energias de compactação das camadas e tipo de equipamento utilizado.

REFERÊNCIAS

ABDOU, M. R.; BERNUCCI, L. L. B. Pavimento ecológico: uma opção para a pavimentação de vias das grandes. **Sinal de Trânsito**, São Paulo, 2007. Disponível em:

<https://www.researchgate.net/profile/Liedi_Bernucci2/publication/267206528_PAVIMENTO_ECOLOGICO_UMA_OPCAO_PARA_A_PAVIMENTACAO_DE_VIAS_DAS_GRANDES_CIDADES/links/584e86f608aeb989252b42b6.pdf>. Acesso em: 09 Agosto 2020.

ABRECON. Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos de Construção Civil e Demolição. **Relatório Anual 2015**, São Paulo, 2015. Disponível em: <https://issuu.com/nephilus/docs/relatorio_anual_2015>. Acesso em: 15 setembro 2018.

ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Resíduos Sólidos: Manual para Boas Práticas no Planejamento**, São Paulo, 2013.

ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**. ABRELPE. São Paulo, p. 73. 2017. (ISSN 2179-8303).

ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2018/2019**, 2019. ISSN 2179-8303. Disponível em: <<http://abrelpe.org.br/panorama/>>. Acesso em: 08 julho 2020.

ÂNGULO, S. C. et al. Desenvolvimento de novos mercados para a reciclagem massiva de RCD. **Seminário de desenvolvimento sustentável e a reciclagem na construção civil - IBRACON**, São Paulo, 2002. 293-208.

ANGULO, S. C. et al. **Metodologia de caracterização de resíduos de construção e demolição**. Instituto Brasileiro do Concreto - CT 206 - Meio Ambiente. São Paulo. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10004: Resíduos sólidos - Classificação**. Rio de Janeiro. 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15115: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Execução de camadas de pavimentação - Procedimentos**. Rio de Janeiro. 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15116: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - Requisitos.** Rio de Janeiro. 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6459: Solo - Determinação do limite de liquidez.** Rio de Janeiro. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7180: Solo - Determinação do limite de plasticidade.** Rio de Janeiro. 2016.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9895:2016 Versão Corrigida 2017: Solo - Índice de Suporte Califórnia (ISC) - Método de ensaio.** ABNT. Rio de Janeiro. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7809:2019 Versão Corrigida 2008: Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio.** Rio de Janeiro. 2019.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica - materiais, projeto e restauração.** 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BENNERT, T. J. et al. **Utilization of construction and demolition debris under traffic-type loading in base and subbase applications.** Transportation Research Record. Piscataway: [s.n.]. 2000. p. 33-39.

BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação asfáltica - Formação básica para engenheiros.** 3. ed. Rio de Janeiro: Petrobras: Abeda, 2006.

BLUMENSCHHEIN, R. N. **A sustentabilidade na cadeia produtiva da indústria da construção.** Universidade de Brasília. Brasília, p. 263. 2004.

BRASIL. Presidência da República. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010,** Brasília, 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 05 julho 2020.

CAIXA ECONÔMICA FEDERAL. SINAPI. **Metodologias e Conceitos: Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil,** 2020. Disponível em: <http://www.caixa.gov.br/Downloads/sinapi-manual-de-metodologias-e-conceitos/Livro1_SINAPI_Metodologias_e_Conceitos_8_Edicao.pdf>. Acesso em: 12 Julho 2020.

CALRECYCLE. **Construction and Demolition (C&D) Diversion Informational Guide**, 2020. Disponível em: <<https://www.calrecycle.ca.gov/LGCentral/Library/CandDModel/>>. Acesso em: 25 Junho 2020.

CANOAS. Prefeitura Municipal de Canoas. **Lei Ordinária nº 6188/2018**, 29 Agosto 2018. Disponível em: <<https://leismunicipais.com.br/a1/rs/c/canoas/lei-ordinaria/2018/619/6188/lei-ordinaria-n-6188-2018-institui-o-plano-municipal-de-saneamento-basico-plamsab-revisao-2014-em-seus-componentes-plano-municipal-de-gestao-integrada-de-residuos-solidos-plano-mun>>. Acesso em: 24 Junho 2020.

CANOAS. Prefeitura Municipal de Canoas. **Lei Ordinária nº 6189/2018**, 25 Setembro 2018. Disponível em: <<https://leismunicipais.com.br/a1/rs/c/canoas/lei-ordinaria/2018/619/6189/lei-ordinaria-n-6189-2018-institui-o-plano-municipal-de-gestao-de-residuos-da-construcao-civil-e-o-sistema-de-gestao-sustentavel-de-residuos-da-construcao-civil-e-residuos-volumos>>. Acesso em: 24 Junho 2020.

CANOAS. 025/2018 Edital nº 500/2018 – RCC Resíduos de Construção Civil. **Anexo-VII-Termo de Referência**, 2019. Disponível em: <<https://www.canoas.rs.gov.br/licitacoes/025-2018-edital-no-500-2018-rcc-residuos-da-construcao-civil/>>. Acesso em: 24 Junho 2020.

CARNEIRO, A. P. et al. **Caracterização do entulho de salvador visando a produção de agregado reciclado**, Salvador, 2000. Disponível em: <http://www.infohab.org.br/entac2014/2000/Artigos/ENTAC2000_029.pdf>. Acesso em: 25 Junho 2020.

CARNEIRO, A. P.; BURGOS, P. C.; ALBERTE, E. P. V. Uso do agregado em camadas de base e sub-base de pavimentos. In: CAIXA ECONÔMICA FEDERAL **Projeto Entulho Bom**. Salvador: EDUFBA, 2001. p. 190-227.

CASSA, J. C. D. S.; CARNEIRO, A. P.; BRUM, I. A. S. D. **Reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção**. 1. ed. Salvador: EDUFBA, 2001.

CITY OF VANCOUVER. **Administrative Report**, 2018. Disponível em: <<https://council.vancouver.ca/20180516/documents/pspc2c.pdf>>. Acesso em: 25 Junho 2020.

CNT. Confederação Nacional dos Transportes. **Pesquisa CNT de Rodovias 2019**, Brasília, p. 236, 2019. Disponível em: <<https://pesquisarodovias.cnt.org.br/downloads/ultimaversao/gerencial.pdf>>. Acesso em: 26 Junho 2020.

CONAMA. **Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002**. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=307>>. Acesso em: 26 Junho 2020.

CONAMA. **Resolução CONAMA nº 448/2012**, 2012. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=672>>. Acesso em: 21 Agosto 2020.

CORREIA, R. D. S. **Estudo de viabilidade econômica para o uso de resíduos de construção e demolição em camadas de base e sub-base de pavimentos**. Projeto de graduação apresentado ao curso de Engenharia Civil da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro. Rio de Janeiro, p. 43. 2014.

CUNHA, G. D. C. **A importância do setor de construção civil para o desenvolvimento da economia brasileira e as alternativas complementares para o funding do crédito imobiliário no Brasil**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 81. 2012.

CUNHA, N. A. **Resíduos da construção civil - análise de usinas de reciclagem**. Dissertação apresentada à Comissão de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Civil Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Campinas, p. 166. 2007.

DAMINELI, B. L. **Estudo de métodos para caracterização de propriedades físicas de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 107. 2007.

DELONGUI, L. **Caracterização e adequação dos resíduos da construção civil produzidos no município de Santa Maria-RS para aplicação em pavimentação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, p. 220. 2012.

DELONGUI, L. **Determinação de parâmetros mecânicos para dimensionamento de pavimentos com resíduos de construção e demolição**. Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia. Porto Alegre, p. 244. 2016.

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Especificações Gerais**. DAER. Porto Alegre, p. 421. 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 080/94 - Solos - análise granulométrica**. DNER. Rio de Janeiro. 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 089/94 - Agregados - Avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou magnésio**. DNER. Rio de Janeiro, p. 06. 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 054/97: Equivalente de Areia**. DNER. Rio de Janeiro. 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 035/98: Agregados - determinação da abrasão "Los Angeles"**. DNER. Rio de Janeiro. 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 138/2010-ES: Pavimentação – Reforço do subleito - Especificação de serviço**. DNIT. Rio de Janeiro. 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 139/2010-ES: Pavimentação - Sub-base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço**. DNIT. Rio de Janeiro. 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 141/2010-ES: Pavimentação - Base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço**. DNIT. Rio de Janeiro. 2010.

DIAS, J. F. **Avaliação de resíduos de fabricação de telhas cerâmicas como contribuição para seu emprego em camadas de pavimento de baixo custo**. Texto apresentado à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para a obtenção do Título de Doutor em Engenharia. São Paulo, p. 251. 2004.

DNIT. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Pavimentação**, Rio de Janeiro, 2006.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Sistema de Custos Referenciais de Obras - Outubro/2019**, 2020. Disponível em: <<https://www.dnit.gov.br/custos-e-pagamentos/sicro/sul/rio-grande-do-sul/2019-1/outubro/outubro-2019>>. Acesso em: 05 Julho 2020.

EC. European Commission. **Service contract on management of construction and demolition waste - SR1**, Paris, p. 240, 2011. Disponível em:

<https://ec.europa.eu/environment/waste/pdf/2011_CDW_Report.pdf>. Acesso em: 26 Junho 2020.

EC. Eurostat. **Generation of waste by waste category, hazardousness and NACE Rev. 2 activity[env_wasgen]**, 2016. Disponível em: <<https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/submitViewTableAction.do>>. Acesso em: 19 Agosto 2020.

EC. European Commission. **Directive 2008/98/EC on waste (Waste Framework Directive)**, 2019. Disponível em: <https://ec.europa.eu/environment/waste/framework/framework_directive.htm>. Acesso em: 26 Junho 2020.

EPA. Environmental Protection Agency. **Characterization of Building-Related Construction and Demolition Debris in The United States**, 1998. ISSN EPA530-R-98-010. Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-03/documents/charact_bulding_related_cd.pdf>. Acesso em: 26 Junho 2020.

EPA. Environmental Protection Agency. **Sustainable Management of Construction and Demolition Materials**, 2018. Disponível em: <<https://www.epa.gov/smm/sustainable-management-construction-and-demolition-materials>>. Acesso em: 24 Junho 2020.

FERREIRA, M. D. C.; THOMÉ, A. Utilização de resíduo da construção e demolição como reforço de um solo residual de basalto, servindo como base de fundações superficiais. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, Rio Grande, v. 11, n. 18, p. 1-12, Novembro 2011. ISSN 1677-3047.

FRASSON, S. A. **Usinas de reciclagem de entulho como agentes de valoração dos resíduos gerados pela construção civil**. XIX Encontro Internacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente. São Paulo: [s.n.]. 2017. p. 16.

GRABASCK, J. R. **Aspectos e impactos ambientais decorrentes da extração de agregado natural e produção de agregado reciclado: estudo de caso no RS**. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. São Leopoldo, p. 168. 2016.

HIRSCH, F. **Estudo do comportamento de misturas asfálticas preparadas com diferentes tipos de ligantes**. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Civil) - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. Ijuí, p. 130. 2007.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa nacional de saneamento básico**: 2008, Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv45351.pdf>>. Acesso em: 26 Junho 2020.

INOJOSA, F. C. P. **Gestão de resíduos de construção e demolição: a resolução CONAMA 307/2002 no Distrito Federal**. Dissertação de Mestrado submetida ao Centro de Desenvolvimento Sustentável da Universidade de Brasília, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Desenvolvimento Sustentável. Brasília, p. 225. 2010.

IPCC. The Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2007: Synthesis Report**, Genebra, p. 104, 2007. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4_syr_full_report.pdf>. Acesso em: 24 Junho 2020.

IPEA. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos da Construção Civil**, 2012. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/120911_relatorio_construcao_civil.pdf>. Acesso em: 26 Junho 2020.

JARDIM, V. L.; FOFONKA, L. Revista Educação Ambiental em Ação. **Educação ambiental e gestão dos resíduos sólidos da construção e demolição no município de Canoas/RS**, São Paulo, Maio 2013. Disponível em: <<http://www.revistaeea.org/artigo.php?idartigo=1485>>. Acesso em: 24 Junho 2020.

JIMÉNEZ, A. M. G. **Estudo experimental de um resíduo de construção e demolição (RCD) para utilização em pavimentação**. Dissertação de mestrado submetida ao departamento de Engenharia Civil da Universidade de Brasília como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de mestre. Brasília, p. 123. 2011.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil – contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. Tese (livre docência) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 102. 2000.

JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. **Reciclagem de resíduos da construção**. Seminário Nacional Sobre Reciclagem de Resíduos Sólidos Domiciliares. São Paulo: [s.n.]. 2000.

JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. **O desafio da sustentabilidade na construção civil**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2011.

LEITE, F. D. C. **Comportamento mecânico de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil em camadas de base e sub-base em pavimentos.**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes. São Paulo, p. 185. 2007.

LEITE, F. D. C. et al. Laboratory evaluation of recycled construction and demolition waste for pavements. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 6, p. 2972–2979, 13 Janeiro 2011.

LIMA, J. A. R. D. **Proposição de diretrizes para produção e normalização de resíduo de construção reciclado e de suas aplicações em argamassas e concretos.** Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção de título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo. São Carlos, p. 222. 1999.

MASSELI, G. S. R. **Critérios para definição da espessura da camada de reforço do subleito para garantir a durabilidade em pavimentos asfálticos brasileiros.**

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp. Campinas, p. 206. 2020.

MATUELLA, M. F. **Efeitos da composição de resíduos de construção e demolição em seu comportamento mecânico para utilização em pavimentação.**

Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 172. 2017.

MMA. Ministério do Meio Ambiente. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos**, 2012.

Disponível em:

<https://sinir.gov.br/images/sinir/Arquivos_diversos_do_portal/PNRS_Revisao_Decreto_280812.pdf>. Acesso em: 26 Junho 2020.

MORESCO, J. M. **Análise de fatores que influenciam aspectos financeiros de implantação e operação de usinas de reciclagem de RCD.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. São Leopoldo, p. 134. 2017.

MOTTA, R. D. S. **Estudo laboratorial de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil para aplicação em pavimentação de baixo volume de tráfego.**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Transportes. São Paulo, p. 134. 2005.

MÜLLER, W. M. **Utilização de resíduos de construção e demolição em camadas granulares de pavimentos intertravados**. Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de graduado em Engenharia Civil, pelo Curso de Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS. São Leopoldo, p. 77. 2015.

NAGALLI, A. **Gerenciamento de Resíduos Sólidos na Construção Civil**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.

NUNES, K. R. A. **Avaliação de Investimentos e de Desempenho de Centrais de Reciclagem para Resíduos Sólidos de Construção e Demolição**. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 297. 2004.

OLIVEIRA, E. G. D.; MENDES, O. **Gerenciamento de resíduos da construção civil e demolição: estudo de caso da resolução 307 do CONAMA**. Goiânia, p. 14. 2018.

PINTO, T. D. P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Engenharia. São Paulo, p. 190. 1999.

PORTUGAL. Diário da República. **Lei nº 73/2011**, Lisboa, p. 3251-3275, 17 Junho 2011. Disponível em: <<https://dre.pt/application/conteudo/670034>>. Acesso em: 25 Junho 2020.

RETORE, T. S. **Comportamento mecânico de agregados de basaltos alterados para pavimentação, rejeitos de garimpo de ametista**. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia. Porto Alegre, p. 127. 2005.

RIO GRANDE DO SUL. Diário Oficial. **Lei nº 14528 de 16 de Abril de 2014**, 17 Abril 2014. Disponível em: <http://ww1.sema.rs.gov.br/upload/2014_Lei%2014528_Institui%20a%20Politica%20Estadual%20de%20Residuos%20Solidos_17_04.pdf>. Acesso em: 28 Julho 2019.

ROSSI, A. C. **Etapas de uma obra de pavimentação e dimensionamento de pavimento para uma via na Ilha do Fundão**. Trabalho de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro. Rio de Janeiro, p. 63. 2017.

SARDÁ, M. C. **Diagnóstico do resíduo da construção civil gerado no município de Blumenau-SC. Potencialidade de uso em obras públicas.** Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial exigido pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Florianópolis, p. 129. 2003.

SCHNEIDER, D. M. **Deposições irregulares de resíduos da construção civil na cidade de São Paulo.** Dissertação (Mestrado em Saúde Pública) - Universidade de São Paulo – Faculdade de Saúde Pública. São Paulo, p. 131. 2003.

SCHWENGBER, E. R. **Resíduos da construção civil.** Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Especialização em Direito Ambiental Nacional e Internacional, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), como requisito parcial para a obtenção de título de Especialista em Direito Ambiental. Porto Alegre, p. 82. 2015.

SENÇO, W. D. **Manual de técnicas de pavimentação.** 2. ed. São Paulo: PINI, v. I, 2007.

SILVA, C. S. D. S. D. **Diagnóstico ambiental de áreas de disposição de resíduos de construção e demolição em Porto Alegre.** Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale dos Sinos - UNISINOS como requisito parcial para a obtenção de título de Mestre em Engenharia Civil. São Leopoldo, p. 115. 2014.

SILVA, R. W. C.; ARNOSTI JR, S. Caracterização do resíduo de construção e demolição (RCD) reciclado. **HOLOS Environment**, São Paulo, 18 Abril 2006. 137-151.

SILVA, V. C. D. **Estudo da aplicação de resíduos da construção e demolição na Universidade Federal de Campina Grande em pavimentos.** Dissertação apresentada ao Centro de Tecnologia e Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental. Campina Grande, p. 105. 2012.

SINAPI. **Relatório de Insumos e Composições - 3º quadrimestre/2019 - Versões PDF e Excel,** 2020. Disponível em: <http://www.caixa.gov.br/site/Paginas/downloads.aspx#categoria_660>. Acesso em: 12 Julho 2020.

SNS. Secretaria Nacional de Saneamento. **Diagnóstico do manejo de resíduos sólidos urbanos - 2018,** 2019. Disponível em:

<http://www.snis.gov.br/downloads/diagnosticos/rs/2018/Diagnostico_RS2018.pdf>.

Acesso em: 24 Junho 2020.

SOUZA JÚNIOR, T. A. T. D. **Respostas estruturais em pavimentos flexíveis via utilização de equações de módulos de resiliência de solos de subleito e camada de reforço**. Dissertação apresentada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa (UFV), como requisito parcial para a obtenção de título de Magister Scientiae. Viçosa, p. 87. 2011.

TAVARES, L. D. P. M. **Levantamento e análise da deposição e destinação dos resíduos da construção civil em Ituiutaba, M.G.** Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil na Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Uberlândia, p. 139. 2007.

TSENG, E. **Reciclagem total de pavimentos de concreto como agregados para construção de novos pavimentos de concreto: o caso do rodoanel metropolitano Mário Covas**. Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia. São Paulo, p. 220. 2010.

VENDRONI, W. J.; CARVALHO, D. D. Estudo de caso da utilização do RCD (Resíduos de Construção e Demolição) na reparação de ruas e avenidas de Piracicaba-SP. **HOLOS Environment**, São Paulo, 04 Abril 2008. 149-165.

VON STEIN, EDWARD L.. Construction and demolition debris. In: LUND, H. F. **The McGraw-Hill Recycling Handbook**. 2. ed. New York: McGraw-Hill Professional, 2000. Cap. 20, p. 976.

ANEXO A – Ensaios referentes à Amostra 1

ECOPLAN ENGENHARIA				ECOPLAN ENGENHARIA LTDA.				
				LABORATÓRIO DE SOLOS				
ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAMENTO - DNER-ME 080/94								
PROCEDENCIA		MATERIAL			APLICAÇÃO			
ATERRO JORGE LANNER		RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO			-			
COLETA		DATA		OPERADOR		REGISTRO		
19/10/2019		21/05/2020		RAFAELJEAN		-		
PENEIRAS		Peso da Amostra (g)			7472,5		Faixa Especificada	
mm	Pol.	Peso Retido Acumul. (g)	% Retida Acumulada	% Que Passa		MÍNIMO	MÁXIMO	
50,0	2"	0	0,00	100,00				
37,5	1 1/2"	0	0,00	100,00				
25,0	1"	0	0,00	100,00				
19,0	3/4"	0	0,00	100,00				
12,5	1/2"	2228,7	29,83	70,17				
9,50	3/8"	4400,4	58,89	41,11				
4,75	Nº 4	6829,3	91,39	8,61				
2,00	Nº 10	6992,9	93,58	6,42				
0,425	Nº 40	7160,4	95,82	4,18				
0,075	Nº 200	7413	99,20	0,80				

DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

DÍAMETRO DOS GRÃOS (mm)

PASSANTE (%)

Daniel Pinheiro Fernandes
Chefe de Laboratório



ENSAIO DE COMPACTAÇÃO DE SOLOS (NBR 7182/2016)

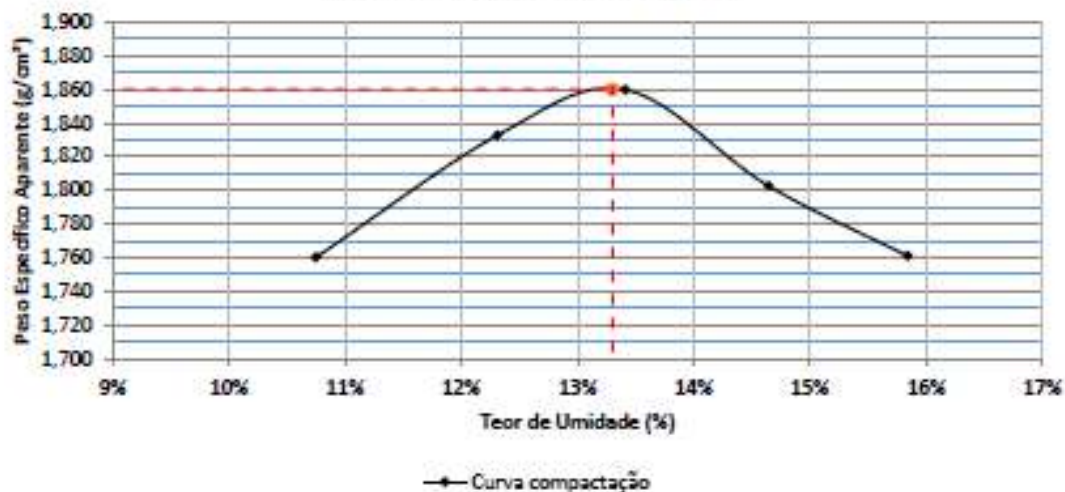
MATERIAL	BASE ESTABILIZADA - COLETA 1
OPERADOR	VINÍCIUS ALVES
DATA	26/07/2020

Diâmetro molde (cm):	15,30	Soquete	GRANDE
Altura molde (cm):	11,50	Camadas	5
Vol. Molde (cm ³):	2114,32	Nº de golpes	12
P. molde (g):	4727,00	Energia de compactação	NORMAL

AMOSTRA 1					
umidade (arbitrado) (%)	11,0%	13,0%	14,0%	15,0%	16,0%
P. solo seco (g)	6000	6000	6000	6000	6000
P. água (g)	660	780	840	900	960
P. molde+solo (g)	8848,5	9079,2	9186,6	9096,6	9040
Peso corpo de prova (g)	4121,5	4352,2	4459,6	4369,6	4313,0
Peso esp. Apar. (g/cm ²)	1,760	1,833	1,860	1,803	1,761
PEASM (g/cm ²)	1,860				
Umidade Ótima (%)	13,3%				

UMIDADE					
Identificação	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5
Peso Cápsula (g)	5,2	5,3	5,2	5,3	5,3
Peso Cáps+mat. Úm. (g)	698,6	787,9	510	598	700
Peso Cáps+mat. seco (g)	631,3	702,1	450,3	522,3	605
umidade (%)	10,7%	12,3%	13,4%	14,6%	15,8%

PROCTOR (NBR 7182/86)

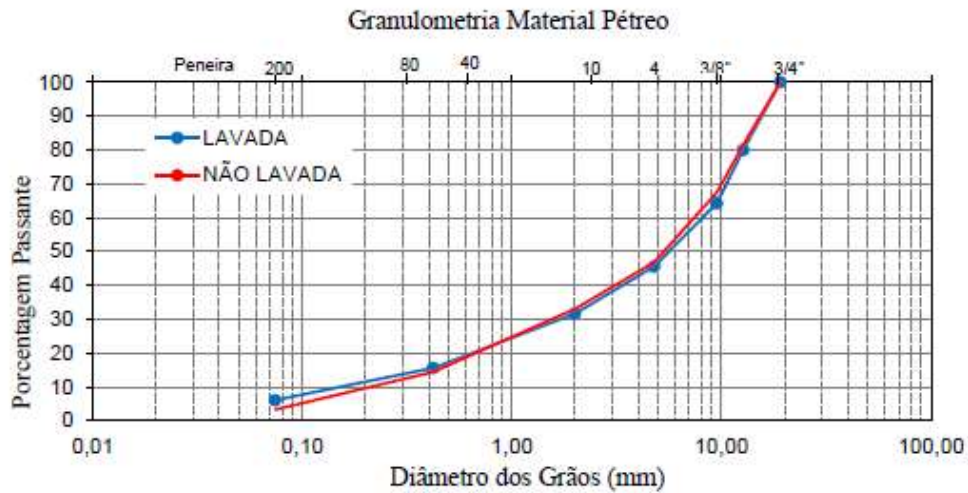




ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAMENTO DNER-ME 080/94

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAMENTO DNER-ME 080/94

NORMAL COLETA 1		APÓS CURVA DE COMPACTAÇÃO - TEOR ÓTIMO			
		LAVADA		NÃO LAVADA	
PENEIRA	mm	Am 1 (g)	1370,9	Am 1 (g)	1607,1
		Ret. Acum.	% Pass	Ret. Acum.	% Pass
2"	19,10	0,00	100,00	0,00	100,00
1/2"	12,70	274,40	79,98	297,20	81,51
3/8"	9,50	490,10	64,25	524,20	67,38
n 4	4,76	746,30	45,56	855,20	46,79
n 10	2,00	937,90	31,59	1076,20	33,03
n 40	0,42	1157,50	15,57	1375,70	14,40
n 200	0,07	1287,80	6,06	1554,80	3,25

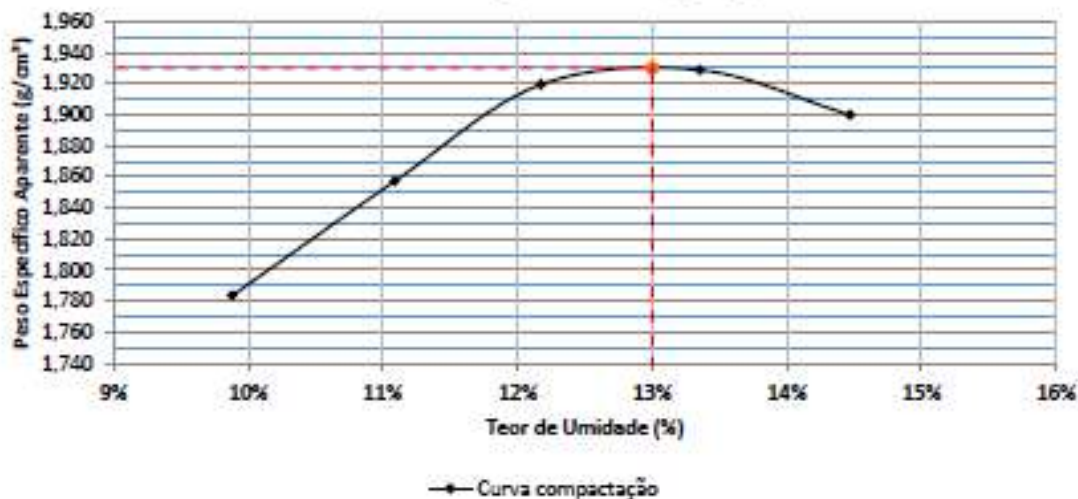




ENSAIO DE COMPACTAÇÃO DE SOLOS (NBR 7182/2016)

MATERIAL	BASE ESTABILIZADA - COLETA 1				
OPERADOR	VINÍCIUS ALVES				
DATA	26/07/2020				
Diâmetro molde (cm):	15,30	Soquete		GRANDE	
Altura molde (cm):	11,50	Camadas		5	
Vol. Molde (cm ³):	2114,32	N° de golpes		26	
P. molde (g):	4727,00	Energia de compactação		INTERMEDIÁRIA	
AMOSTRA 1					
umidade (arbitrada) (%)	10,0%	11,0%	12,0%	13,0%	14,0%
P. solo seco (g)	6000	6000	6000	6000	6000
P. água (g)	600	660	720	780	840
P. molde+solo (g)	8870,5	9069,3	9279,5	9349,7	9325,2
Peso corpo de prova (g)	4143,5	4362,3	4552,5	4622,7	4598,2
Peso esp. Apar. (g/cm ³)	1,783	1,857	1,920	1,929	1,900
PEASM (g/cm ³)	1,930				
Umidade Ótima (%)	13,0%				
UMIDADE					
Identificação	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5
Peso Cápsula (g)	5,2	5,3	5,1	5	5,1
Peso Cáps+mat. Úm. (g)	450	391	542,3	378,5	539,9
Peso Cáps+mat. seco (g)	410	352,5	484	334,5	472,3
umidade (%)	9,9%	11,1%	12,2%	13,4%	14,5%

PROCTOR (NBR 7182/86)



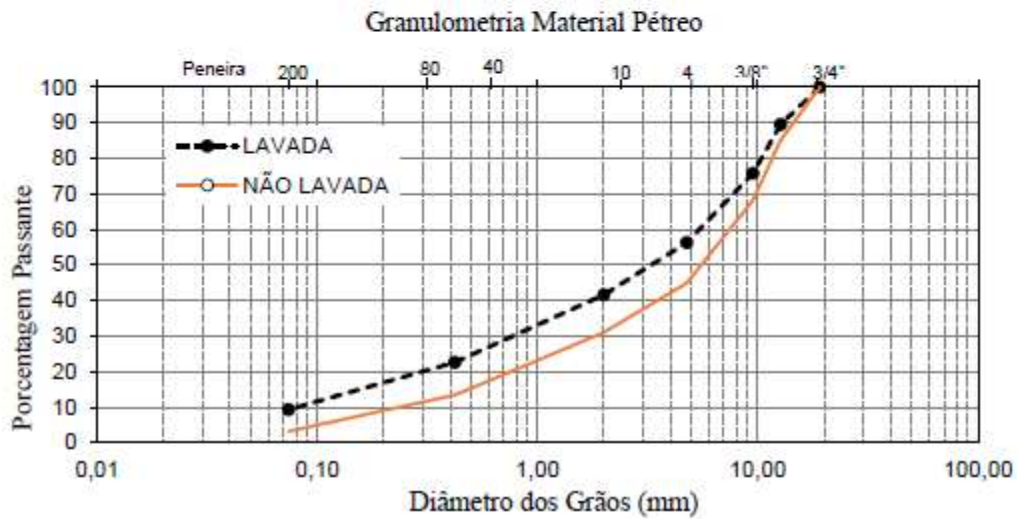


ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAMENTO DNER-ME 080/94

CLASSIFICAÇÃO DO SOLO - HRB ADOTADA PELA AASHTO

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAMENTO DNER-ME 080/94

INTERM. COLETA 1		APÓS CURVA DE COMPACTAÇÃO - TEOR ÓTIMO			
		LAVADA		NÃO LAVADA	
PENEIRA	mm	Am 1 (g)	% Pass	Am 1 (g)	% Pass
2"	19,10	0,00	100,00	0,00	100,00
1/2"	12,70	139,10	89,51	299,30	85,07
3/8"	9,50	322,00	75,72	638,20	68,17
n 4	4,76	579,70	56,29	1104,70	44,91
n 10	2,00	774,80	41,58	1383,20	31,02
n 40	0,42	1026,60	22,59	1737,10	13,37
n 200	0,07	1202,70	9,31	1941,30	3,19





ENSAIO DE COMPACTAÇÃO DE SOLOS (NBR 7182/2016)

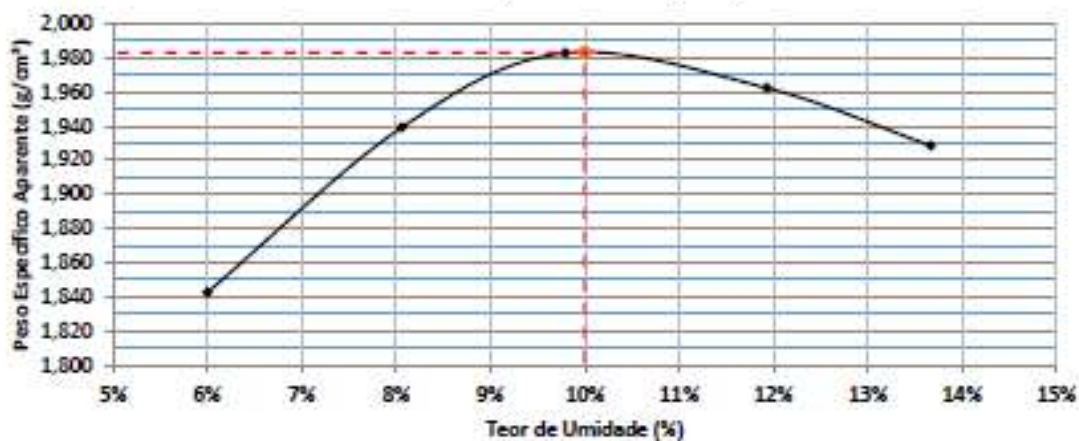
MATERIAL	BASE ESTABILIZADA - COLETA 1		
OPERADOR	VINÍCIUS ALVES		
DATA	26/07/2020		

Diâmetro molde (cm):	15,30	Soquete	GRANDE
Altura molde (cm):	11,50	Camadas	5
Vol. Molde (cm ³):	2114,32	Nº de golpes	55
P. molde (g):	4727,00	Energia de compactação	MODIFICADA

AMOSTRA 1					
umidade (arbitrada) (%)	6,0%	8,0%	10,0%	12,0%	14,0%
P. solo seco (g)	6000	6000	6000	6000	6000
P. água (g)	360	480	600	720	840
P. molde+solo (g)	8856,2	9157,5	9329,8	9370,9	9361,9
Peso corpo de prova (g)	4129,2	4430,5	4602,8	4643,9	4634,9
Peso esp. Apar. (g/cm ²)	1,842	1,939	1,983	1,962	1,929
PEASM (g/cm ³)	1,983				
Umidade Ótima (%)	10,0%				

UMIDADE					
Identificação	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5
Peso Cápsula (g)	5,2	5,2	5,4	5,2	5,2
Peso Cáps+mat. Úm. (g)	500	576,3	528,9	373,9	498,3
Peso Cáps+mat. seco (g)	472	533,7	482,2	334,6	439
umidade (%)	6,0%	8,1%	9,8%	11,9%	13,7%

PROCTOR (NBR 7182/86)



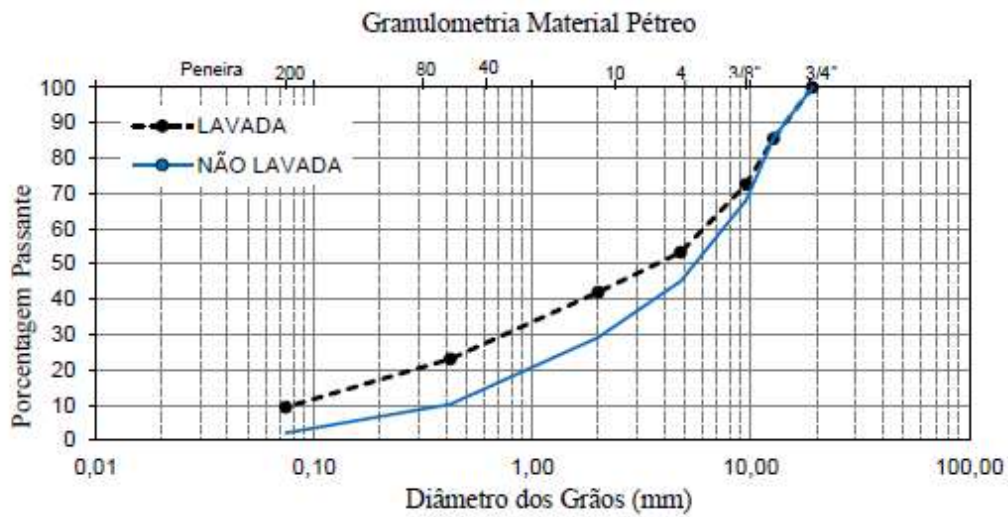
← Curva compactação




ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAMENTO DNER-ME 080/94

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAMENTO DNER-ME 080/94

MODIF. COLETA 1		APÓS CURVA DE COMPACTAÇÃO - TEOR ÓTIMO			
		LAVADA		NÃO LAVADA	
		Am 1 (g)	1534,4	Am 1 (g)	2007,6
PENEIRA	mm	Ret. Acum.	% Pass	Ret. Acum.	% Pass
2"	19,10	0,00	100,00	0,00	100,00
1/2"	12,70	223,10	85,46	288,20	85,64
3/8"	9,50	422,20	72,48	643,40	67,95
n 4	4,76	717,20	53,26	1103,30	45,04
n 10	2,00	889,90	42,00	1422,80	29,13
n 40	0,42	1181,10	23,03	1802,90	10,20
n 200	0,07	1390,60	9,37	1965,90	2,08



		ÍNDICE DE FORMA PELO MÉTODO DO PAQUÍMETRO - NBR 7809/2019					
		SOLICITANTE			CECILIA		
		AMOSTRA			RCD - COLETA 1		
		DATA			20/07/2020		
		OPERADOR			VINÍCIUS ALVES		
		ÍNDICE DE FORMA PELO MÉTODO DO PAQUÍMETRO - NBR 7809/2019					
PESO DA AMOSTRA SECA (g)		7472,5					
PENEIRAS		PESO (g)	PESO ACUMULADO (g)	PESO PASSANTE ACUMULADO	% PASSANTE DA AMOSTRA TOTAL	% INDIVIDUAL	% RETIDA ACUMULADA
POLEGADAS	mm						
1"	25,4	0,00	0,00	7472,50	100,00	0,00	0,00
3/4"	19,1	0,00	0,00	7472,50	100,00	0,00	0,00
1/2"	12,7	2228,70	2228,70	5243,80	70,17	29,83	29,83
3/8"	9,5	2171,70	4400,40	3072,10	41,11	29,06	58,89
1/4"	6,3	1555,60	5956,00	1516,50	20,29	20,82	79,71
CÁLCULO NÚMERO DE PEDRAS							
NBR 7809/2019 - DESPREZAR PARTÍCULAS PASS. #9,5mm E CUJAS % EM MASSA, INDIVIDUAIS SEJAM ≤ A 5%							
FRAÇÕES		PONDERAÇÃO P/ 200 PEDRAS (%)			Nº DE PEDRAS		
#1" - 25,4mm (3,48%) < 5% (DESCARTADA)		#1"	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
#3/4" - 19,1mm (57,52%)		#3/4"	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
#1/2" - 12,7mm (22,15%)		#1/2"	50,65	101,3	101		
#3/8" - 9,5mm (12,22%)		#3/8"	49,35	98,7	99		
#1/4" - 6,3mm (3,31%) < #9,5mm (DESCARTADA)		#1/4"	0,00	0,0	0		
MEDIÇÕES REALIZADAS COM O PAQUÍMETRO							
FRAÇÕES		MÉDIA "c"	MÉDIA "e"	c/e			
12,7mm		3,27	1,05	3,11			
9,5mm		1,96	0,61	3,21			
SOMATÓRIO DAS FRAÇÕES				6,33			
ÍNDICE DE FORMA 19,1mm (RCD - COLETA 1)				3,16			
GRÃOS COM RELAÇÃO "c/e" > 3				58,00%			
GRÃOS COM RELAÇÃO "c/e" > 5				17,00%			



Laboratório de Pavimentação - Controle Tecnológico de Pavimentos
 Telefone: +55 51 32581546. Cel: +55 51 996584133
 www.mvpavengenharia.com - mvpavengenharia@gmail.com

AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE PELO EMPREGO DE SULFATO DE SÓDIO
 PROCEDIMENTO DE ENSAIO - DNER-ME 089/94

Solicitante:	CECILIA - MESTRADO
Identificação:	RCD COLETA 1
Procedência	
Operador:	Vinicius Alves
Data:	05/12/2017

	FRAÇÃO	MALHA DE CORTE	MASSA INICIAL (g)	MASSA FINAL (g)	% DE PERDA	MÉDIA PONDERADA
3/4"	19 mm - 12,7 mm	8mm	673,1	427,9	36,43	13,14
	12,7 mm - 9,5 mm	8mm	339,3	212,9	37,25	6,77
3/8"	9,5 mm - 4,8 mm	4,8 mm	300,9	135,3	55,03	8,87
	9,5 mm - 4,8 mm	4,8 mm	111,3	55,3	50,31	3,00
Pó de Pedra	4,8 mm - 2,4 mm	2,4 mm	110,8	20,2	81,77	4,85
	2,4 mm - 1,2 mm	1,2 mm	110	29,7	73,00	4,30
	1,2 mm - 0,6 mm	0,6 mm	110,6	50,4	54,43	3,23
	0,6 mm - 0,3 mm	0,3 mm	110,5	70,4	36,29	2,15
RESULTADO MÉDIA PERDA (%)						46,31

ABRASÃO - LOS ANGELES DNER-ME 035/98 (RCD COLETA 1)

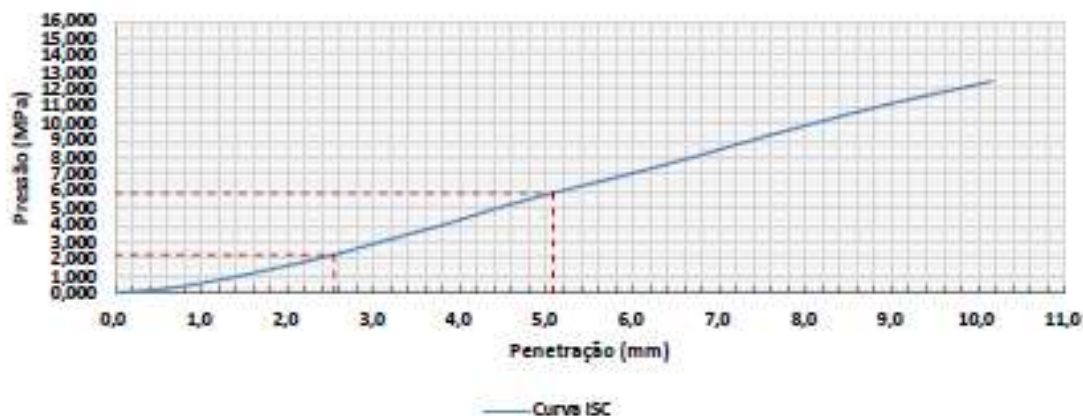
ESPECIFICAÇÃO	GRADUAÇÃO	MASSA INICIAL (g)	MASSA FINAL (g)	PERDA EM MASSA (%)
≤ 50%	B	4992,7	2715,5	45,61%



ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA (NBR 9895/87)

EXPANSÃO (NBR 9895/87)			UMIDADE MOLDAGEM		DENSIDADE APAR. SECA	
Tempo	Leit. (mm)	Dif. Leit. (mm)	CAPSULA Nº	1	VOL. CILINDRO	2067,6
Início	0,00	0,00	P. ÚMIDO + TARA	552,0	MOLDE + AM. + H ₂ O	8503,2
1 ^o dia	0,01	0,01	P. SECO + TARA	488,6	PESO DO MOLDE	4189,3
2 ^o dia	0,01	0,00	TARA	5,2	P. SOLO + H ₂ O	4313,9
3 ^o dia	0,01	0,00	% DE UMIDADE	13,12	DENS. ÚMIDA	2,086
4 ^o dia	0,01	0,00	UMIDADE MÉDIA	13,12	PEASM (g/cm ³)	1,845
Alt. CP (mm)	11,4		AMOSTRA COLETA 1 ENERGIA NORMAL			
EXPANSÃO	0,088					
PENETRAÇÃO (NBR 9895/87)						
Tempo (min)	Pen. (mm)	Leitura (mm)	Pressão (MPa)			ISC (%)
			Calc.	Corr.	Padrão	
0	0	0	0,00			
0,5	0,63	23	0,29			
1	1,27	66	0,83			
1,5	1,9	120	1,50			
2	p1 2,54	180	2,26	2,255	6,9	32,7
	p1' = p + c					
2,5	3,17	251	3,15			
3	3,81	321	4,02			
3,5	4,44	400	5,01			
4	p2 5,08	470	5,89	5,889	10,35	56,9
	p2' = p + c					
5	6,35	600	7,52			
6	7,62	745	9,33			
7	8,89	880	11,03			
8	10,16	995	12,47			
9	11,43	1100	0,00			
10	12,7		0,00			
					CONSTANTE PRENSA	
					0,125	

ISC - NBR 9895/87



EXPANSÃO (NBR 9895/87)		UMIDADE MOLDAGEM			DENSIDADE APAR. SECA		
Tempo	Leit. (mm)	Dif. Leit. (mm)	CAPSULA Nº	1		VOL. CILINDRO	
Início	0,0	0,0	P. UMIDO + TARA	568,3		MOLDE + AM. + H ₂ O	2049,4
1º dia	0,0	0,0	P. SECO + TARA	504,8		PESO DO MOLDE	4119,2
2º dia	0,0	0,0	TARA	5,2		P. SOLO + H ₂ O	4441,8
3º dia	0,0	0,0	% DE UMIDADE	12,71		DENS. ÚMIDA	2,167
4º dia	0,0	0,0	UMIDADE MÉDIA	12,71		PEASM (g/cm ³)	1,923
Alt. CP (mm)	11,3		AMOSTRA COLETA 1 ENERGIA INTERMEDIÁRIA				
EXPANSÃO	0						
PENETRAÇÃO (NBR 9895/87)							
Tempo (min)		Pen. (mm)	Leitura (mm)	Pressão (MPa)			ISC (%)
				Calc.	Corr.	Padrão	
0		0	0	0,00			
0,5		0,63	22	0,28			
1		1,27	71	0,89			
1,5		1,9	150	1,88			
2	p1	2,54	237	2,97	2,970	6,9	43,0
	p1' = p + c						
2,5		3,17	327	4,10			
3		3,81	429	5,38			
3,5		4,44	530	6,64			
4	p2	5,08	635	7,96	7,957	10,35	76,9
	p2' = p + c						
5		6,35	810	10,15			
6		7,62	960	12,03			
7		8,89	1095	13,72			
8		10,16		0,00	CONSTANTE PRENSA		
9		11,43		0,00	0,125		
10		12,7		0,00			

ISC - NBR 9895/87

— Cuna ISC

UMIDADE HIGROSCÓPICA			UMIDADE MOLDAGEM		DENSIDADE APAR. SECA		
Tempo	Leit. (mm)	Dif. Leit. (mm)	CAPSULA Nº	1	VOL. CILINDRO	2067,6	
Início	0,0	0,0	P. ÚMIDO + TARA	589,4	MOLDE + AM. + H ₂ O	8578	
1 ^º dia	0,0	0,0	P. SECO + TARA	537,9	PESO DO MOLDE	4099,2	
2 ^º dia	0,0	0,0	TARA	5,2	P. SOLO + H ₂ O	4478,8	
3 ^º dia	0,0	0,0	% DE UMIDADE	9,67	DENS. ÚMIDA	2,166	
4 ^º dia	0,0	0,0	UMIDADE MÉDIA	9,67	PEASM (g/cm ³)	1,975	
Alt. CP (mm)	11,4		AMOSTRA COLETA 1 ENERGIA MODIFICADA				
EXPANSÃO	0						
PENETRAÇÃO (NBR 9895/87)							
Tempo (min)		Pen. (mm)	Leitura (mm)	Pressão (MPa)			ISC (%)
				Calc.	Corr.	Padrão	
0		0	0	0,00			
0,5		0,63	61	0,76			
1		1,27	203	2,54			
1,5		1,9	430	5,39			
2	p1	2,54	669	8,38	8,383	6,9	121,5
	p1' = p + c						
2,5		3,17	894	11,20			
3		3,81	1100	13,78			
3,5		4,44		0,00			
4	p2	5,08		0,00	0,000	10,35	0,0
	p2' = p + c						
5		6,35		0,00			
6		7,62		0,00			
7		8,89		0,00			
8		10,16		0,00			
9		11,43		0,00			
10		12,7		0,00			
					CONSTANTE PRENSA		
					0,125		

ISC - NBR 9895/87

Pressão (MPa)

Penetração (mm)

— Curva ISC


ANEXO B – Ensaios referentes à Amostra 2

ECOPLAN ENGENHARIA		ECOPLAN ENGENHARIA LTDA.			
		LABORATÓRIO DE SOLOS			
ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAMENTO - DNER-ME 080/94					
PROCEDÊNCIA		MATERIAL		APLICAÇÃO	
ATERRO JORGE LANNER		RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO		-	
COLETA		DATA	OPERADOR	REGISTRO	
19/05/2020		06/07/2020	RAFAEL JEAN	-	
PENEIRAS		Peso da Amostra (g)		8409,7	Faixa Especificada
mm	Pol.	Peso Retido Acumul. (g)	% Retida Acumulada	% Que Passa	MÍNIMO MÁXIMO
50,0	2"	0	0,00	100,00	
37,5	1 1/2"	0	0,00	100,00	
25,0	1"	0	0,00	100,00	
19,0	3/4"	38,8	0,46	99,54	
12,5	1/2"	3713,7	44,16	55,84	
9,50	3/8"	6441,1	76,59	23,41	
4,75	Nº 4	7987,9	94,98	5,02	
2,00	Nº 10	8153	96,95	3,05	
0,425	Nº 40	8228,9	97,85	2,15	
0,075	Nº 200	8330,3	99,06	0,94	

DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

DÍAMETRO DOS GRÃOS (mm)

PASSANTE (%)


 Daniel Pinheiro Fernandes
 Chefe de Laboratório



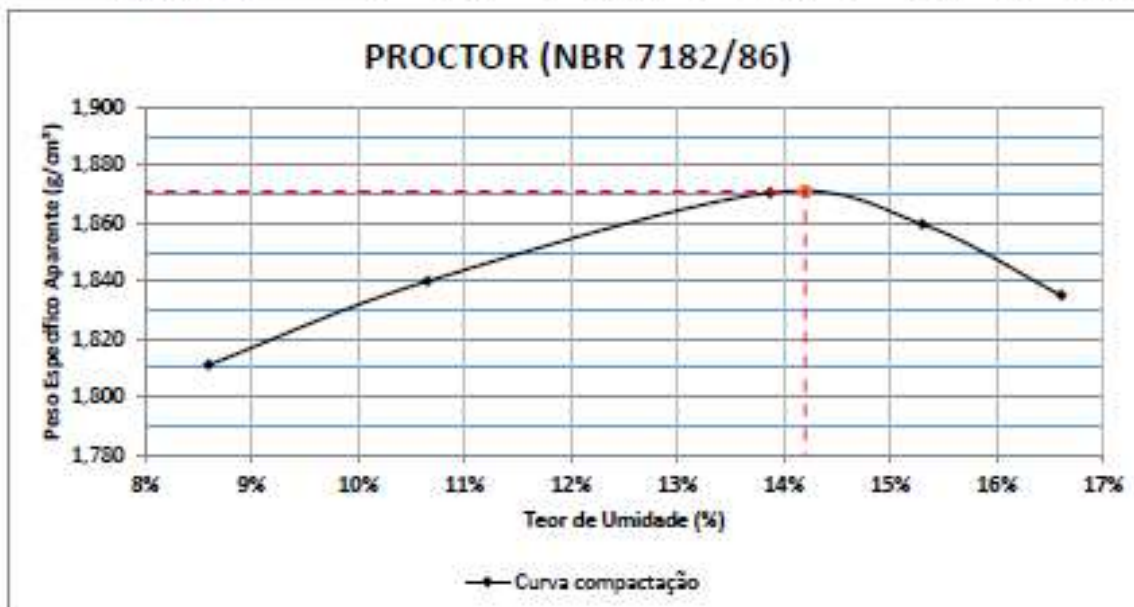
ENSAIO DE COMPACTAÇÃO DE SOLOS (NBR 7182/2016)

MATERIAL	BASE ESTABILIZADA - COLETA 2		
OPERADOR	VINÍCIUS ALVES		
DATA	26/07/2020		

Diâmetro molde (cm):	15,30	Soquete	GRANDE
Altura molde (cm):	11,50	Camadas	5
Vol. Molde (cm ³):	2114,32	Nº de golpes	12
P. molde (g):	4727,00	Energia de compactação	NORMAL

AMOSTRA 1					
umidade (arbitrada) (%)	9,0%	11,0%	13,0%	15,0%	16,5%
P. solo seco (g)	6000	6000	6000	6000	6000
P. água (g)	540	660	780	900	990
P. molde+solo (g)	8885,2	9031,5	9230,5	9260,6	9251,3
Peso corpo de prova (g)	4158,2	4304,5	4503,5	4533,6	4524,3
Peso esp. Apar. (g/cm ³)	1,811	1,840	1,871	1,860	1,835
PEASM (g/cm ³)	1,871				
Umidade Ótima (%)	14,2%				

UMIDADE					
Identificação	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5
Peso Cápsula (g)	5,2	5,3	5,2	5,3	5,2
Peso Cáps+mat. Úm. (g)	514,3	517,5	533,9	541,1	513,6
Peso Cáps+mat. seco (g)	474	468,2	469,5	470	441,2
umidade (%)	8,6%	10,7%	13,9%	15,3%	16,6%

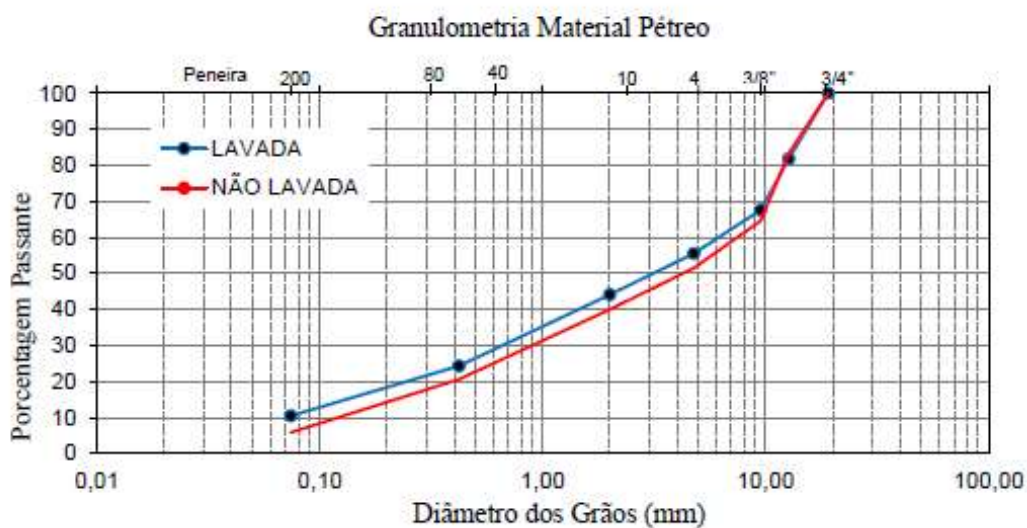




ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAMENTO DNER-ME 080/94

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAMENTO DNER-ME 080/94

		APÓS CURVA DE COMPACTAÇÃO - TEOR ÓTIMO			
		LAVADA		NÃO LAVADA	
NORMAL COLETA 2		Am 1 (g)	1179,5	Am 2 (g)	986,0
PENEIRA	mm	Ret. Acum.	% Pass	Ret. Acum.	% Pass
3/4"	19,10	0,00	100,00	0,00	100,00
1/2"	12,70	215,20	81,75	164,90	83,28
3/8"	9,50	383,00	67,53	349,90	64,51
n 4	4,76	524,90	55,50	478,50	51,47
n 10	2,00	660,30	44,02	591,80	39,98
n 40	0,42	892,90	24,30	783,00	20,59
n 200	0,07	1056,30	10,45	928,70	5,81





ENSAIO DE COMPACTAÇÃO DE SOLOS (NBR 7182/2016)

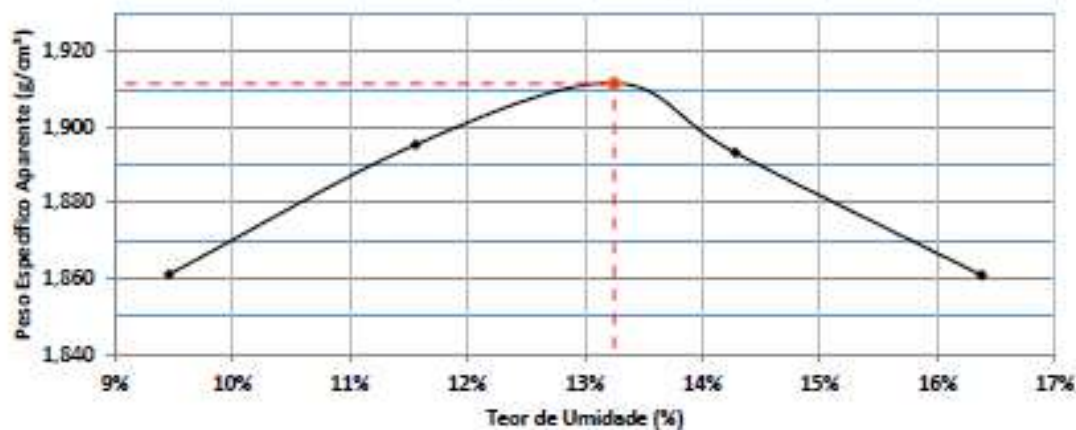
MATERIAL	BASE ESTABILIZADA - COLETA 2		
OPERADOR	VINÍCIUS ALVES		
DATA	26/07/2020		

Diâmetro molde (cm):	15,30	Soquete	GRANDE
Altura molde (cm):	11,50	Camadas	5
Vol. Molde (cm ³):	2114,32	N° de golpes	26
P. molde (g):	4727,00	Energia de compactação	INTERMEDIÁRIA

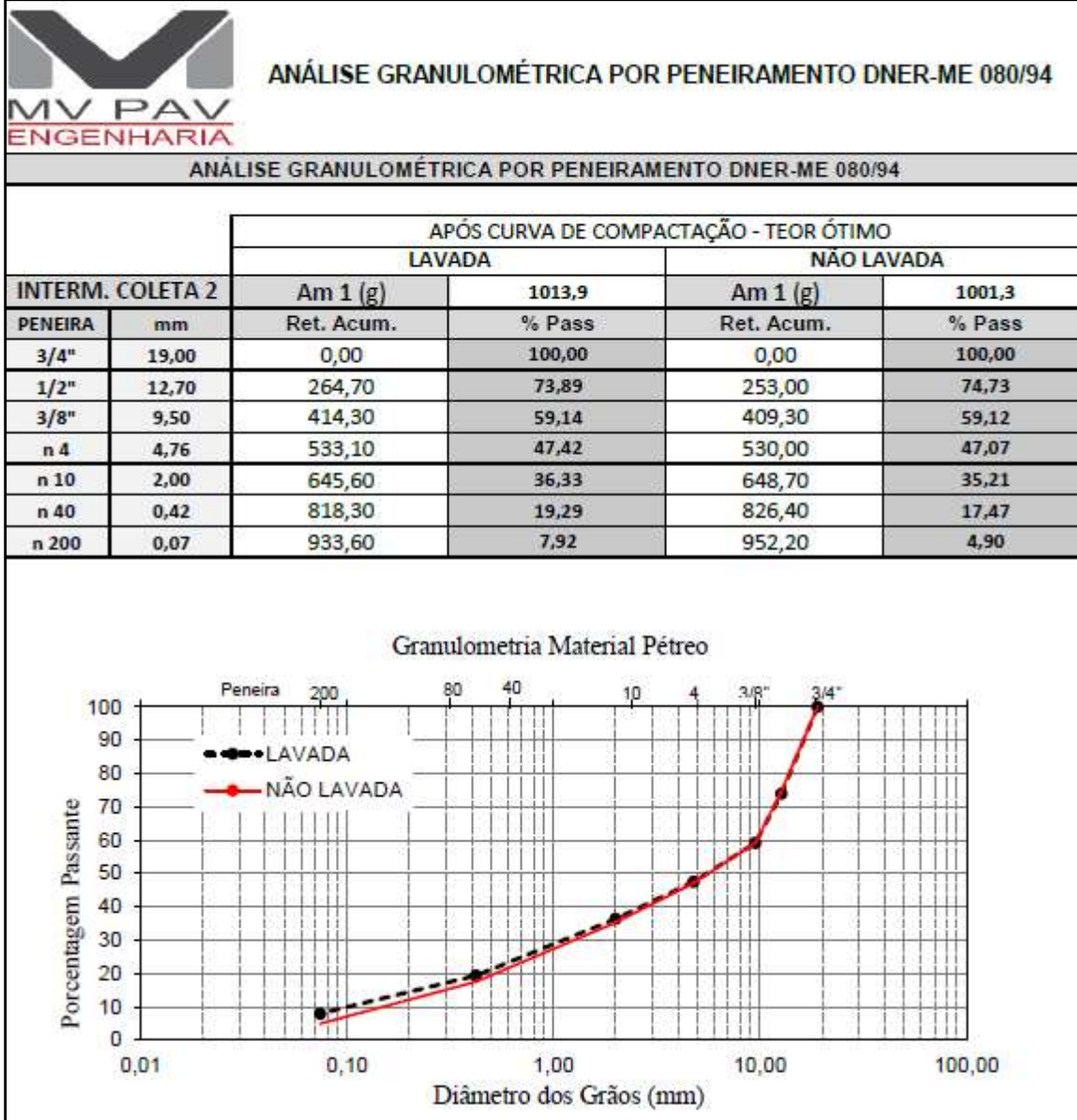
AMOSTRA 1					
umidade (arbitrada) (%)	10,0%	11,5%	13,0%	14,5%	16,5%
P. solo seco (g)	6000	6000	6000	6000	6000
P. água (g)	600	690	780	870	990
P. molde+solo (g)	9034,2	9197,9	9304,2	9301,6	9305,8
Peso corpo de prova (g)	4307,2	4470,9	4577,2	4574,6	4578,8
Peso esp. Apar. (g/cm ³)	1,861	1,895	1,912	1,893	1,861
PEASM (g/cm ³)	1,912				
Umidade Ótima (%)	13,3%				

UMIDADE					
Identificação	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5
Peso Cápsula (g)	5,1	5,1	5,4	5,1	5,2
Peso Cáps+mat. Úm. (g)	552,3	569,5	540,6	592,5	552,3
Peso Cáps+mat. seco (g)	505	511	478	519,1	475,3
umidade (%)	9,5%	11,6%	13,2%	14,3%	16,4%

PROCTOR (NBR 7182/86)



—•— Curva compactação





ENSAIO DE COMPACTAÇÃO DE SOLOS (NBR 7182/2016)

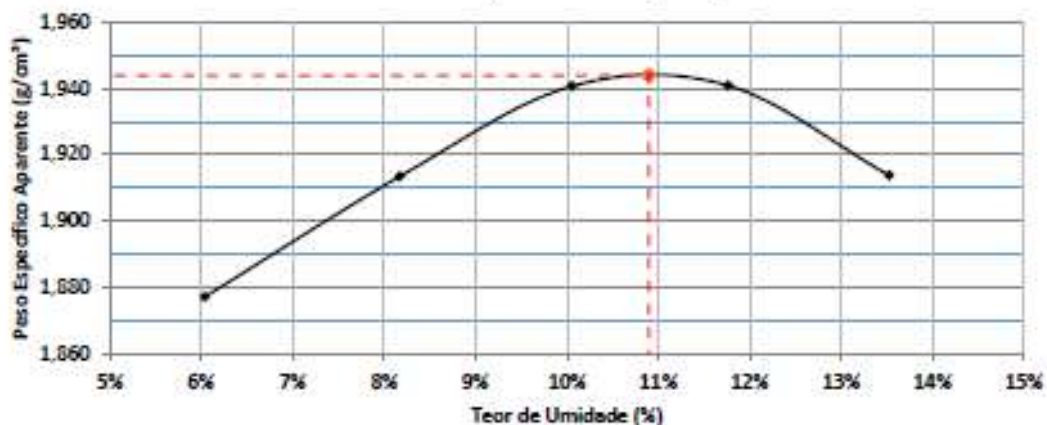
MATERIAL	BASE RCD ESTABILIZADA PEDRA BOLOGNESI - COLETA 2		
OPERADOR	VINÍCIUS ALVES		
DATA	26/07/2020		

Diâmetro molde (cm):	15,30	Soquete	GRANDE
Altura molde (cm):	11,50	Camadas	5
Vol. Molde (cm ³):	2114,32	Nº de golpes	55
P. molde (g):	4727,00	Energia de compactação	MODIFICADA

AMOSTRA 1					
umidade (arbitrada) (%)	6,0%	8,0%	10,0%	12,0%	14,0%
P. solo seco (g)	6000	6000	6000	6000	6000
P. água (g)	360	480	600	720	840
P. molde+solo (g)	8935,2	9103	9242,7	9313,4	9320,6
Peso corpo de prova (g)	4208,2	4376,0	4515,7	4586,4	4593,6
Peso esp. Apar. (g/cm ³)	1,877	1,913	1,941	1,941	1,914
PEASM (g/cm ³)	1,944				
Umidade Ótima (%)	10,9%				

UMIDADE					
Identificação	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5
Peso Cápsula (g)	5,1	5,1	5,1	5,1	5,2
Peso Cáps+mat. Úm. (g)	486,3	391,7	415,6	580,8	542,3
Peso Cáps+mat. seco (g)	458,9	362,5	378,1	520,2	478,3
umidade (%)	6,0%	8,2%	10,1%	11,8%	13,5%

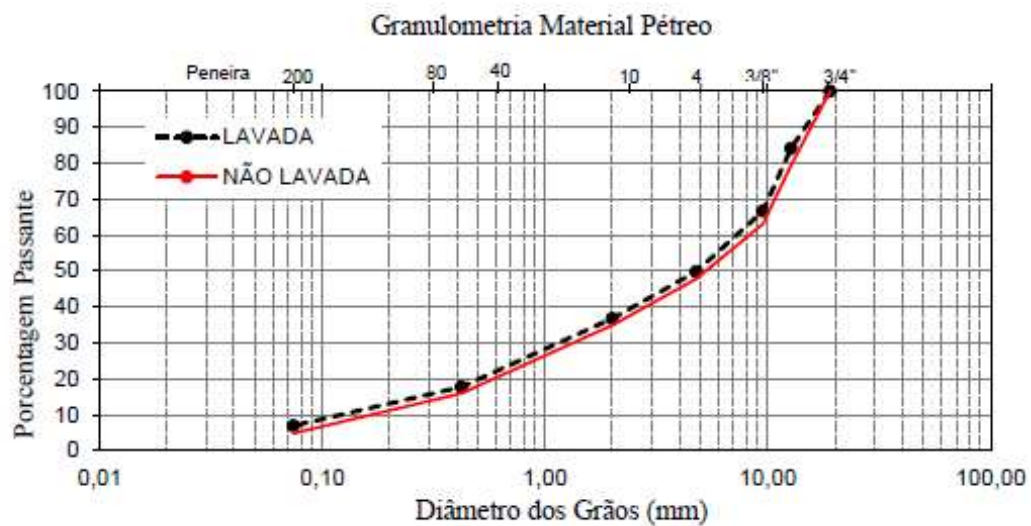
PROCTOR (NBR 7182/86)





→ Curva compactação


ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAMENTO DNER-ME 080/94
ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAMENTO DNER-ME 080/94

		TEOR ÓTIMO APÓS CURVA COMPACTAÇÃO			
		LAVADA		NÃO LAVADA	
MODIF. COLETA 2		Am 1 (g)	960,2	Am 1 (g)	950
PENEIRA	mm	Ret. Acum.	% Pass	Ret. Acum.	% Pass
3/4"	19,00	0,00	100,00	0,00	100,00
1/2"	12,70	153,20	84,04	195,90	79,38
3/8"	9,50	320,50	66,62	350,90	63,06
n 4	4,76	482,20	49,78	496,30	47,76
n 10	2,00	607,80	36,70	619,10	34,83
n 40	0,42	790,50	17,67	798,40	15,96
n 200	0,07	894,00	6,89	904,40	4,80



		ÍNDICE DE FORMA PELO MÉTODO DO PAQUÍMETRO - NBR 7809/2019					
		SOLICITANTE			CECILIA		
		AMOSTRA			RCD - COLETA 2		
		DATA			31/07/2020		
		OPERADOR			VINÍCIUS ALVES		
ÍNDICE DE FORMA PELO MÉTODO DO PAQUÍMETRO - NBR 7809/2019							
PESO DA AMOSTRA SECA (g)				7472,5			
PENEIRAS		PESO (g)	PESO ACUMULADO (g)	PESO PASSANTE ACUMULADO	% PASSANTE DA AMOSTRA TOTAL	% INDIVIDUAL	% RETIDA ACUMULADA
POLEGADAS	mm						
1"	25,4	0,00	0,00	7472,50	100,00	0,00	0,00
3/4"	19,1	0,00	0,00	7472,50	100,00	0,00	0,00
1/2"	12,7	2228,70	2228,70	5243,80	70,17	29,83	29,83
3/8"	9,5	2171,70	4400,40	3072,10	41,11	29,06	58,89
1/4"	6,3	1555,60	5956,00	1516,50	20,29	20,82	79,71
CÁLCULO NÚMERO DE PEDRAS							
NBR 7809/2019 - DESPREZAR PARTÍCULAS PASS. #9,5mm E CUJAS % EM MASSA, INDIVIDUAIS SEJAM ≤ A 5%							
FRAÇÕES				ONDERAÇÃO P/ 200 PEDRAS (Nº DE PEDRAS	
#1" - 25,4mm (3,48%) < 5% (DESCARTADA)				#1"	0,0	0,0	0,0
#3/4" - 19,1mm (57,52%)				#3/4"	0,0	0,0	0,0
#1/2" - 12,7mm (22,15%)				#1/2"	50,65	101,3	101
#3/8" - 9,5mm (12,22%)				#3/8"	49,35	98,7	99
#1/4" - 6,3mm (3,31%) < #9,5mm (DESCARTADA)				#1/4"	0,00	0,0	0
MEDIÇÕES REALIZADAS COM O PAQUÍMETRO							
FRAÇÕES				MÉDIA "c"	MÉDIA "e"	c / e	
12,7mm				3,27	1,05	3,11	
9,5mm				2,08	0,60	3,47	
SOMATÓRIO DAS FRAÇÕES						6,58	
ÍNDICE DE FORMA 19,1mm (RCD - COLETA 2)						3,29	
GRÃOS COM RELAÇÃO "c/e" > 3						70,00%	
GRÃOS COM RELAÇÃO "c/e" > 5						27,00%	

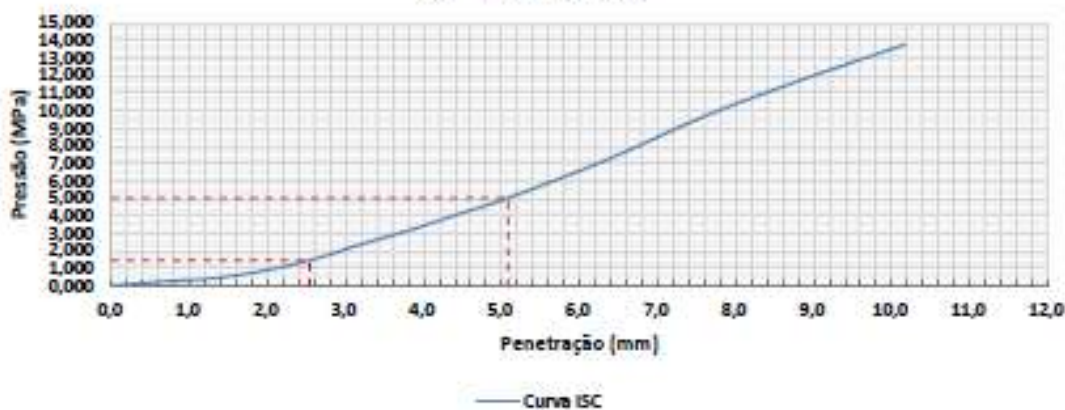
		Laboratório de Pavimentação - Controle Tecnológico de Pavimentos Telefone: +55 51 32581546. Cel: +55 51 996584133 www.mvpavengenharia.com - mvpavengenharia@gmail.com																																																																					
AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE PELO EMPREGO DE SULFATO DE SÓDIO PROCEDIMENTO DE ENSAIO - DNER-ME 089/94																																																																							
Solicitante:	CECILIA - MESTRADO																																																																						
Identificação:	RCD COLETA 2																																																																						
Procedência																																																																							
Operador:	Vinícius Alves																																																																						
Data:	05/08/2020																																																																						
<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>FRAÇÃO</th> <th>MALHA DE CORTE</th> <th>MASSA INICIAL (g)</th> <th>MASSA FINAL (g)</th> <th>% DE PERDA</th> <th>MÉDIA PONDERADA</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2">3/4"</td> <td>19 mm - 12,7 mm</td> <td>8mm</td> <td>658,7</td> <td>289,3</td> <td>56,08</td> <td>18,49</td> </tr> <tr> <td>12,7 mm - 9,5 mm</td> <td>8mm</td> <td>340,5</td> <td>110,0</td> <td>67,69</td> <td>11,53</td> </tr> <tr> <td>3/8"</td> <td>9,5 mm - 4,8 mm</td> <td>4,8 mm</td> <td>352,2</td> <td>136,8</td> <td>61,16</td> <td>10,78</td> </tr> <tr> <td rowspan="5">Pó de Pedra</td> <td>9,5 mm - 4,8 mm</td> <td>4,8 mm</td> <td>131,0</td> <td>32,9</td> <td>74,89</td> <td>4,91</td> </tr> <tr> <td>4,8 mm - 2,4 mm</td> <td>2,4 mm</td> <td>132,6</td> <td>45,0</td> <td>66,06</td> <td>4,38</td> </tr> <tr> <td>2,4 mm - 1,2 mm</td> <td>1,2 mm</td> <td>116,5</td> <td>49,4</td> <td>57,60</td> <td>3,36</td> </tr> <tr> <td>1,2 mm - 0,6 mm</td> <td>0,6 mm</td> <td>111,9</td> <td>59,8</td> <td>46,56</td> <td>2,61</td> </tr> <tr> <td>0,6 mm - 0,3 mm</td> <td>0,3 mm</td> <td>154,9</td> <td>110,7</td> <td>28,53</td> <td>2,21</td> </tr> <tr> <td colspan="6" style="text-align: center;">RESULTADO MÉDIA PERDA (%)</td> <td>58,27</td> </tr> </tbody> </table>								FRAÇÃO	MALHA DE CORTE	MASSA INICIAL (g)	MASSA FINAL (g)	% DE PERDA	MÉDIA PONDERADA	3/4"	19 mm - 12,7 mm	8mm	658,7	289,3	56,08	18,49	12,7 mm - 9,5 mm	8mm	340,5	110,0	67,69	11,53	3/8"	9,5 mm - 4,8 mm	4,8 mm	352,2	136,8	61,16	10,78	Pó de Pedra	9,5 mm - 4,8 mm	4,8 mm	131,0	32,9	74,89	4,91	4,8 mm - 2,4 mm	2,4 mm	132,6	45,0	66,06	4,38	2,4 mm - 1,2 mm	1,2 mm	116,5	49,4	57,60	3,36	1,2 mm - 0,6 mm	0,6 mm	111,9	59,8	46,56	2,61	0,6 mm - 0,3 mm	0,3 mm	154,9	110,7	28,53	2,21	RESULTADO MÉDIA PERDA (%)						58,27
	FRAÇÃO	MALHA DE CORTE	MASSA INICIAL (g)	MASSA FINAL (g)	% DE PERDA	MÉDIA PONDERADA																																																																	
3/4"	19 mm - 12,7 mm	8mm	658,7	289,3	56,08	18,49																																																																	
	12,7 mm - 9,5 mm	8mm	340,5	110,0	67,69	11,53																																																																	
3/8"	9,5 mm - 4,8 mm	4,8 mm	352,2	136,8	61,16	10,78																																																																	
Pó de Pedra	9,5 mm - 4,8 mm	4,8 mm	131,0	32,9	74,89	4,91																																																																	
	4,8 mm - 2,4 mm	2,4 mm	132,6	45,0	66,06	4,38																																																																	
	2,4 mm - 1,2 mm	1,2 mm	116,5	49,4	57,60	3,36																																																																	
	1,2 mm - 0,6 mm	0,6 mm	111,9	59,8	46,56	2,61																																																																	
	0,6 mm - 0,3 mm	0,3 mm	154,9	110,7	28,53	2,21																																																																	
RESULTADO MÉDIA PERDA (%)						58,27																																																																	
ABRASÃO - LOS ANGELES DNER-ME 035/98 (RCD COLETA 1)																																																																							
ESPECIFICAÇÃO	GRADUAÇÃO	MASSA INICIAL (g)	MASSA FINAL (g)	PERDA EM MASSA (%)																																																																			
≤ 50%	B	5000,2	2789,7	44,61%																																																																			



ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA (NBR 9895/87)

UMIDADE HIGROSCÓPICA			UMIDADE MOLDAGEM		DENSIDADE APAR. SECA		
Tempo	Leit. (mm)	Dif. Leit. (mm)	CAPSULA Nº	1	VOL. CILINDRO		2067,6
Início	0,0	0,0	P. ÚMIDO + TARA	489,3	MOLDE + AM. + H ₂ O		8579
1º dia	0,0	0,0	P. SECO + TARA	427,6	PESO DO MOLDE		4173,2
2º dia	0,0	0,0	TARA	5,2	P. SOLO + H ₂ O		4405,8
3º dia	0,0	0,0	% DE UMIDADE	14,61	DENS. ÚMIDA		2,131
4º dia	0,0	0,0	UMIDADE MÉDIA	14,61	REASM (g/cm ³)		1,859
Alt. CP (mm)	11,4		AMOSTRA COLETA 2 ENERGIA NORMAL				
EXPANSÃO	0						
PENETRAÇÃO (NBR 9895/87)							
Tempo (min)	Pen. (mm)	Leitura (mm)	Pressão (MPa)			ISC (%)	
			Calc.	Corr.	Padrão		
0		0	0	0,00			
0,5		0,63	18	0,23			
1		1,27	32	0,40			
1,5		1,9	65	0,81			
2	p1	2,54	115	1,44	1,441	6,9	20,9
	p1' = p + c						
2,5		3,17	186	2,33			
3		3,81	252	3,16			
3,5		4,44	326	4,08			
4	p2	5,08	400	5,01	5,012	10,35	48,4
	p2' = p + c						
5		6,35	575	7,20			
6		7,62	776	9,72			
7		8,89	945	11,84			
8		10,16	1099	13,77			
9		11,43		0,00			
10		12,7		0,00			
					CONSTANTE PRENSA		
					0,125		

ISC - NBR 9895/87



UMIDADE HIGROSCÓPICA		UMIDADE MOLDAGEM		DENSIDADE APAR. SECA			
Tempo	Leit. (mm)	Dif. Leit. (mm)	CAPSULA Nº	1	VOL. CLINDRÔ	2049,4	
Início	0,0	0,0	P. ÚMIDO + TARA	587,2	MOLDE + AM. + H ₂ O	8651,3	
1 ^º dia	0,05	0,05	P. SECO + TARA	519,3	PESO DO MOLDE	4249,3	
2 ^º dia	0,05	0,00	TARA	5,2	P. SOLO + H ₂ O	4402	
3 ^º dia	0,05	0,00	% DE UMIDADE	13,21	DENS. ÚMIDA	2,148	
4 ^º dia	0,05	0,00	UMIDADE MÉDIA	13,21	PEASM (g/cm ³)	1,897	
Alt. CP (mm)	11,3		AMOSTRA COLETA 2 ENERGIA INTERMEDIÁRIA				
EXPANSÃO	0,44						
PENETRAÇÃO (NBR 9895/87)							
Tempo (min)		Pen. (mm)	Leitura (mm)	Pressão (MPa)			ISC (%)
				Calc.	Corr.	Padrão	
0		0	0	0,00			
0,5		0,63	110	1,38			
1		1,27	235	2,94			
1,5		1,9	360	4,51			
2	p1	2,54	471	5,90	5,902	6,9	85,5
	p1' = p + c						
2,5		3,17	590	7,39			
3		3,81	715	8,96			
3,5		4,44	830	10,40			
4	p2	5,08	947	11,87	11,866	10,35	114,6
	p2' = p + c						
5		6,35	1100	13,78			
6		7,62		0,00			
7		8,89		0,00			
8		10,16		0,00			
9		11,43		0,00			
10		12,7		0,00			
						CONSTANTE PRENSA	
						0,125	

ISC - NBR 9895/87	
Pressão (MPa)	Penetração (mm)
16,000	10,0
15,000	9,0
14,000	8,0
13,000	7,0
12,000	6,0
11,000	5,0
10,000	4,0
9,000	3,0
8,000	2,0
7,000	1,0
6,000	0,0
5,000	
4,000	
3,000	
2,000	
1,000	
0,000	

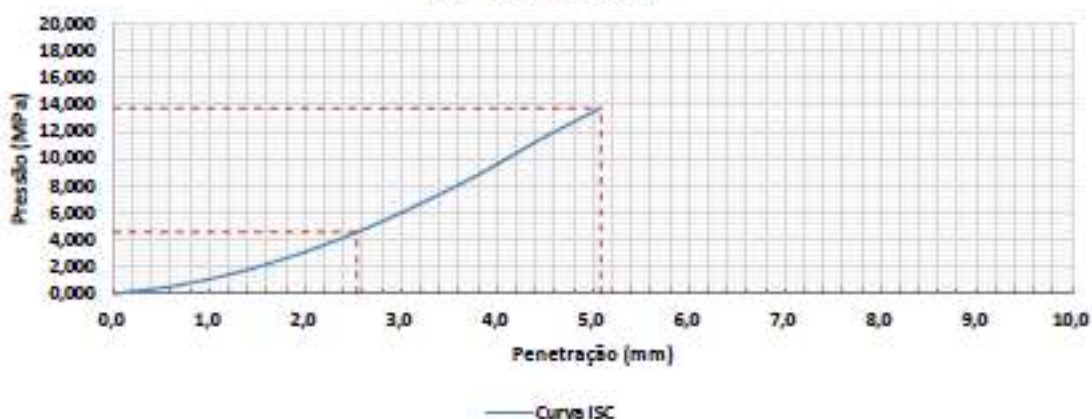
— Curve ISC



ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA (NBR 9895/87)

UMIDADE HIGROSCÓPICA			UMIDADE MOLDAGEM		DENSIDADE APAR. SECA	
Tempo	Leit. (mm)	Dif. Leit. (mm)	CAPSULA Nº	1	VOL. CEINDRO	2094,9
Início	0,0	0,0	P. ÚMIDO + TARA	512,9	MOLDE + AM. + H ₂ O	8692,1
1 ^º dia	0,0	0,0	P. SECO + TARA	463,3	PESO DO MOLDE	4232,1
2 ^º dia	0,0	0,0	TARA	5,1	P. SOLO + H ₂ O	4460
3 ^º dia	0,0	0,0	% DE UMIDADE	10,82	DENS. ÚMIDA	2,129
4 ^º dia	0,0	0,0	UMIDADE MÉDIA	10,82	PLASM (g/cm ³)	1,921
Alt. CP (mm)	11,4		AMOSTRA COLETA 2 ENERGIA MODIFICADA			
EXPANSÃO	0					
PENETRAÇÃO (NBR 9895/87)						
Tempo (min)	Pen. (mm)	Leitura (mm)	Pressão (MPa)			ISC (%)
			Calc.	Corr.	Padrão	
0	0	0	0,00			
0,5	0,63	47	0,59			
1	1,27	124	1,55			
1,5	1,9	230	2,88			
2	p1 2,54	365	4,57	4,573	6,9	66,3
	p1' = p + c					
2,5	3,17	525	6,58			
3	3,81	706	8,85			
3,5	4,44	909	11,39			
4	p2 5,08	1098	13,76	13,758	10,35	132,9
	p2'' = p + c					
5	6,35		0,00			
6	7,62		0,00	CONSTANTE PRENSA		
7	8,89		0,00			
8	10,16		0,00	0,125		
9	11,43		0,00			
10	12,7		0,00			

ISC - NBR 9895/87



ANEXO C – Ensaios referentes ao agregado proveniente da Britagem Bolognesi

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAMENTO - DNER-ME 080/94							
OBRA		MATERIAL			APLICAÇÃO		
		GRANITO			MESTRADO		
PROCEDÊNCIA				LOCAL		DATA	
BRITAGEM BOLOGNESI				ELDORADO DO SUL		20/06/2020	
PENEIRAS		Peso da Amostra (g)		6126,5		Faixa Especificada	
mm	Pol.	Peso Retido Acumul. (g)	% Retida Acumulada	% Que Passa	Faixa Especificada		
					MÍNIMO	MÁXIMO	
75,0	3"	0	0,00	100,00			
63,0	2 1/2"	0	0,00	100,00			
50,0	2"	0	0,00	100,00			
37,5	1 1/2"	0	0,00	100,00			
25,0	1"	0	0,00	100,00			
19,0	3/4"	0	0,00	100,00			
12,5	1/2"	0	0,00	100,00			
9,50	3/8"	0,0	0,00	100,00			
4,75	Nº 4	85,8	1,40	98,60			
2,00	Nº 10	1856,3	30,30	69,70			
0,425	Nº 40	4092,5	66,80	33,20			
0,075	Nº 200	5489,3	89,60	10,40			

DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA	
	<p>DIÂMETRO DOS GRÃOS (mm)</p>



Av. Bento Gonçalves, 9500. Prédio 43.816 Bairro Agronomia. CEP 91501-970.
Laboratório de Pavimentação - Área de Testes e Pesquisas de Pavimentos
Telefones: +55 51 3308-7049. Fax: +55 51 3308-3999. lapav1@cpgec.ufrgs.br

ABRASÃO LOS ANGELES	
Solicitante:	Bolognesi
Material:	Material granular - Pedreira Bolognesi
Operador:	Rodrigo
Data:	20/06/2018
Norma:	DNER-ME 035/98

Amostra	Gradação	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Perda de massa (%)	Especificação - DNIT 031/2006
1	B	5424,2	4423,7	18%	≤ 50%



Av. Bento Gonçalves, 9500. Prédio 43.816 Bairro Agronomia. CEP 91501-900.
Laboratório de Pavimentação
Telefones: +55 51 3308-7049/3308-7944. lapav@ufrgs.br

ÍNDICE DE FORMA										
Solicitante:	Bolognesi Infraestrutura Ltda									
Material:	Material granular									
Operador:	Matheus, Livia e Ezequiel									
Data:	25/06/2019									
Norma:	DNER-ME 086/1994									
Gradação	Circular		Peso amostra (g)	Total Inicial (g)	Crivo I			Crivo II		
	Passante	Retido			Abertura (mm)	Retido (g)	% Retida	Abertura (mm)	Retido (g)	% Retida
A	76,0	63,5	3000		38			25,0		
	63,5	50,0	3000		32			21,0		
	50,0	38,0	3000		25			17,0		
	38,0	32,0	3000		19			12,7		
Índice de Forma										
B	32,0	25,0	2000		16			10,5		
	25,0	19,0	2000		12,7			8,5		
	19,0	16,0	2000		9,5			6,3		
Índice de Forma										
C	19,0	16,0	2000	2055,5	9,5	1632,3	79,41	6,3	384,2	18,69
	16,0	12,7	2000	2008,3	8,0	1487,2	74,05	5,3	474,5	23,63
	12,7	9,5	2000	2007,8	6,3	969,1	48,27	4,2	1000,1	49,81
Índice de Forma										
D	12,7	9,5	1000		6,3			4,2		
	9,5	6,3	1000		4,8			3,2		
Índice de Forma										
0,8										

ANEXO D – Composição de preço Cenário 1

CGCIT		DNIT	
SISTEMA DE CUSTOS REFERENCIAIS DE OBRAS - SICRO			
Custo Unitário de Referência		Janeiro/2020	Produção da equipe 113,18 m³
6416040 Usinagem de brita graduada com brita comercial em usina de 300 t/h			Valores em reais (R\$)
A - EQUIPAMENTOS		Utilização	Custo Horário
	Quantidade	Operativa	Produtivo
		Improdutiva	Improdutivo
			Custo Horário Total
E9511 Carregadeira de pneus com capacidade de 3,3 m³ - 213 kW	1,00000	0,79	216,5934
E9779 Grupo gerador - 100/110 KVA	1,00000	0,00	59,3117
E9615 Usina misturadora de solos com capacidade de 300 t/h	1,00000	0,00	123,7189
			80,3065
			Custo horário total de equipamentos
			374,0816
B - MAO DE OBRA		Quantidade	Custo Horário
		Unidade	Custo Horário Total
P9824 Servente	5,00000	h	17,5336
			Custo horário total de mão de obra
			87,6680
			Custo horário total de execução
			461,7496
			Custo unitário de execução
			4,0798
			Custo do FIC
			-
			Custo do FIT
			-
C - MATERIAL		Quantidade	Preço Unitário
		Unidade	Custo Unitário
M0005 Brita 0	0,54000	m³	72,5837
M0191 Brita 1	0,00000	m³	63,4600
M0192 Brita 2	0,96000	m³	61,2530
			Custo unitário total de material
			97,9981
D - ATIVIDADES AUXILIARES		Quantidade	Custo Unitário
		Unidade	Custo Unitário
			Custo total de atividades auxiliares
			102,0779
E - TEMPO FIXO		Código	Quantidade
		Unidade	Custo Unitário
			Custo Unitário
M0005 Brita 0 - Caminhão basculante 10 m³	5914647	0,81000	0,9200
M0191 Brita 1 - Caminhão basculante 10 m³	5914647	0,00000	0,9200
M0192 Brita 2 - Caminhão basculante 10 m³	5914647	1,44000	0,9200
			Custo unitário total de tempo fixo
			2,0700
F - MOMENTO DE TRANSPORTE		Quantidade	DMT
		Unidade	LN
			RP
			P
			Custo Unitário
M0005 Brita 0 - Caminhão basculante 10 m³	0,81000	tkm	5914374
M0191 Brita 1 - Caminhão basculante 10 m³	0,00000	tkm	5914374
M0192 Brita 2 - Caminhão basculante 10 m³	1,44000	tkm	5914374
			Custo unitário total de transporte
			104,14

ANEXO E – Composição de preço Cenário 2

CGCIT		DNIT									
SISTEMA DE CUSTOS REFERENCIAIS DE OBRAS - SICRO											
Custo Unitário de Referência		Janeiro/2020		Produção da equipe		113,18 m ³		Valores em reais (R\$)			
6416039 Usinagem de brita graduada com agregado reciclado de RCD											
A - EQUIPAMENTOS	Quantidade	Utilização		Custo Horário		Custo Horário Total					
		Operativa	Improdutiva	Produtivo	Improdutivo	Horário Total					
E9511	Carregadeira de pneus com capacidade de 3,3 m ³ - 213 kW	1,00000	0,79	0,21	216,5934	94,9629	191,0510				
E9779	Grupo gerador - 100/110 KVA	1,00000	1,00	0,00	59,3117	3,1504	59,3117				
E9615	Usina misturadora de solos com capacidade de 300 t/h	1,00000	1,00	0,00	123,7189	80,3065	123,7189				
					Custo horário total de equipamentos		374,0816				
B - MÃO DE OBRA	Quantidade	Unidade	Custo Horário		Custo Horário Total						
P9824	Servente	5,00000	h	17,5336	87,6680	87,6680					
				Custo horário total de mão de obra	87,6680	87,6680					
				Custo horário total de execução	461,7496	461,7496					
				Custo unitário de execução	4,0798	4,0798					
				Custo do FIC	-	-					
				Custo do FIT	-	-					
C - MATERIAL	Quantidade	Unidade	Preço Unitário		Custo Unitário						
	Agregado reciclado, tipo rachão reciclado cinza, Classe A	1,50000	m ³	34,0800	51,1200	51,1200					
				Custo unitário total de material	51,1200	51,1200					
D - ATIVIDADES AUXILIARES	Quantidade	Unidade	Custo Unitário		Custo Unitário						
				Custo total de atividades auxiliares	55,1998	55,1998					
E - TEMPO FIXO	Código	Quantidade	Unidade	Custo Unitário		Custo Unitário					
	Agregado reciclado, tipo rachão reciclado cinza, Classe A	5914647	t	0,9200	2,0700	2,0700					
				Custo unitário total de tempo fixo	2,0700	2,0700					
F - MOMENTO DE TRANSPORTE	Quantidade	Unidade	DMT		Custo Unitário						
	Agregado reciclado, tipo rachão reciclado cinza, Classe A	2,25000	ftm	LN	RP	P					
				5914359	5914374	5914389					
				Custo unitário total de transporte	57,27	57,27					
				Custo unitário direto total	57,27	57,27					

Obs. Foi adotada a composição de preços do sistema SINAPI para custo unitário referente ao item "Agregado reciclado, tipo rachão reciclado cinza, Classe A".

ANEXO F – Composição de preço Cenário 3

CGC/IT		DNIT	
SISTEMA DE CUSTOS REFERENCIAIS DE OBRAS - SICRO			
Custo Unitário de Referência		Produção da equipe 113,18 m³	
6416039 Usinagem de brita graduada com brita produzida em usina de 300 t/h e agregado reciclado		Valores em reais (R\$)	
- Janeiro/2020			
A - EQUIPAMENTOS		Custo Horário	
Quantidade	Utilização	Produtivo	Improdutivo
Operativa	Improdutiva		
E9511 Carregadeira de pneus com capacidade de 3,3 m³ - 213 kW	0,79	216,5934	94,9629
E9779 Grupo gerador - 100/110 kVA	1,00	59,3117	3,1504
E9615 Usina misturadora de solos com capacidade de 300 t/h	1,00	123,7189	80,3065
		Custo horário total de equipamentos	
			374,0816
B - MÃO DE OBRA		Custo Horário Total	
Quantidade	Unidade		
P9824 Servente	h	17,5336	87,6680
		Custo horário total de mão de obra	
			87,6680
		Custo horário total de execução	
			461,7496
		Custo unitário de execução	
			4,0798
		Custo do FIC	
			-
		Custo do FIT	
			-
C - MATERIAL		Preço Unitário	
Quantidade	Unidade		
M0005 Brita 0	m³	72,5837	35,9289
		34,0800	34,2504
		Custo unitário total de material	
			70,1793
D - ATIVIDADES AUXILIARES		Custo Unitário	
Quantidade	Unidade		
Custo total de atividades auxiliares			
			74,2591
E - TEMPO FIXO		Subtotal	
Código	Quantidade	Unidade	Custo Unitário
M0005 Brita 0	0,7425	t	0,9200
			0,9200
		Custo unitário total de tempo fixo	
			2,0700
F - MOMENTO DE TRANSPORTE		DMT	
Quantidade	Unidade	LN	RP
M0005 Brita 0	0,7425	tkm	5914374
			5914389
		tkm	5914374
			5914389
		Custo unitário total de transporte	
			76,33
		Custo unitário direto total	
			76,33

Obs. Foi adotada a composição de preços do sistema SINAPI para custo unitário referente ao item "Agregado reciclado, tipo rachão reciclado cinza, Classe A".

ANEXO G – Composição de preço Transporte

CGCIT		DNIT											
SISTEMA DE CUSTOS REFERENCIAIS DE OBRAS - SICRO													
Custo Unitário de Referência		Janeiro/2020		Produção da equipe		373,50 tkm		Valores em reais (R\$)					
5914389 Transporte com caminhão basculante de 10 m ³ - rodovia pavimentada													
A - EQUIPAMENTOS		Quantidade		Utilização		Custo Horário		Custo					
E9579 Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW		1,00000		Operativa 1,00		Improdutiva 0,00		Produtivo 159,4760		Improdutivo 45,7229		Horário Total 159,4760	
B - MÃO DE OBRA		Quantidade		Unidade		Custo Horário		Custo Horário Total					
						Custo horário total de mão de obra		Custo horário total de execução		Custo do FIC		Custo do FIT	
C - MATERIAL		Quantidade		Unidade		Preço Unitário		Custo Unitário					
D - ATIVIDADES AUXILIARES		Quantidade		Unidade		Custo Unitário total de material		Custo Unitário					
E - TEMPO FIXO		Código		Quantidade		Unidade		Custo total de atividades auxiliares		Subtotal		Custo Unitário	
										0,4270			
F - MOMENTO DE TRANSPORTE		Quantidade		Unidade		Custo Unitário total de tempo fixo		Custo Unitário					
				LN		DMT		RP		P		Custo Unitário	
						Custo unitário total de transporte		Custo unitário direto total				0,42	
Obs.													

ANEXO H – Preços de insumos SINAPI



PREÇOS DE INSUMOS

Página: 5 / 139

Indicação da origem do preço:

- C – para preço coletado pelo IBGE
- CR – para preço obtido por meio do coeficiente de representatividade do insumo (ver Manual de Metodologia e Conceitos);
- AS – para preço atribuído com base no preço do insumo para a localidade de São Paulo.
- RE – para preço de coleta Regional.

Mês de Coleta: 01/2020

Pesquisa: BANCO NACIONAL

Localidade: PORTO ALEGRE

Encargos Sociais (%) Horista: 110,61

Mensalista: 68,86

Código	Descrição do Insumo	Unid	Origem de Preço	Preço Mediano (R\$)
00000157	ADESIVO ESTRUTURAL A BASE DE RESINA EPOXI PARA INJECAO EM TRINCAS, BICOMPONENTE, BAIXA VISCOSIDADE	KG	CR	107,20
00000158	ADESIVO ESTRUTURAL A BASE DE RESINA EPOXI, BICOMPONENTE, FLUIDO	KG	CR	38,17
00000131	ADESIVO ESTRUTURAL A BASE DE RESINA EPOXI, BICOMPONENTE, PASTOSO (TIXOTROPICO)	KG	CR	32,84
00039719	ADESIVO LIQUIDO A BASE DE RESINAS PARA COLAGEM DE ESPUMA DE ISOLAMENTO TERMICO FLEXIVEL	L	CR	74,53
00021114	ADESIVO PARA TUBOS CPVC, *75* G	UN	CR	15,98
00000119	ADESIVO PLASTICO PARA PVC, BSNAGA COM 75 GR	UN	C	8,30
00020080	ADESIVO PLASTICO PARA PVC, FRASCO COM 175 GR	UN	CR	18,06
00000122	ADESIVO PLASTICO PARA PVC, FRASCO COM 850 GR	UN	CR	58,91
00003410	ADESIVO/COLA PARA EPS (ISOPOR) E OUTROS MATERIAIS	KG	CR	24,28
00000124	ADITIVO ACELERADOR DE PEGA E ENDURECIMENTO PARA ARGAMASSAS E CONCRETOS, LIQUIDO E ISENTO DE CLORETOS	L	CR	12,59
00007334	ADITIVO ADESIVO LIQUIDO PARA ARGAMASSAS DE REVESTIMENTOS CIMENTICIOS	L	CR	10,57
00000132	ADITIVO PLASTIFICANTE RETARDADOR DE PEGA E REDUTOR DE AGUA PARA CONCRETO, LIQUIDO E ISENTO DE CLORETOS	L	CR	5,29
00043618	ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE DE PEGA NORMAL PARA CONCRETO, LIQUIDO E ISENTO DE CLORETOS	KG	CR	13,32
00037476	ADUELA/GALERIA DE CONCRETO ARMADO, SECAO RETANGULAR 1.50 X 1.50 M (L X A), C = 1.00 M, E = 20 CM	UN	CR	1.594,21
00037478	ADUELA/GALERIA DE CONCRETO ARMADO, SECAO RETANGULAR 2.00 X 2.00 M (L X A), C = 1.00 M, E = 20 CM	UN	CR	2.255,39
00037477	ADUELA/GALERIA DE CONCRETO ARMADO, SECAO RETANGULAR 2.50 X 2.50 M (L X A), C = 1.00 M, E = 20 CM	UN	CR	2.759,80
00037479	ADUELA/GALERIA DE CONCRETO ARMADO, SECAO RETANGULAR 3.00 X 3.00 M (L X A), C = 1.00 M, E = 20 CM	UN	CR	3.450,82
00004310	AFASTADOR PARA TELHA DE FIBROCIMENTO CANALETE 90 OU KALHETAO	UN	CR	0,83
00042409	AGENTE DE CURA, PROTETOR DA EVAPORACAO DA AGUA DE HIDRATAÇÃO DO CONCRETO	KG	CR	8,39
00040553	AGREGADO RECICLADO, TIPO RACHAO RECICLADO CINZA, CLASSE A	M3	AS	34,08
00013003	AGUA SANITARIA	L	CR	3,00
00008114	AJUDANTE DE ARMADOR	H	CR	11,01
00040912	AJUDANTE DE ARMADOR (MENSALISTA)	MES	CR	1.943,56
00000247	AJUDANTE DE ELETRICISTA	H	CR	12,38
00040919	AJUDANTE DE ELETRICISTA (MENSALISTA)	MES	CR	2.187,27
00025958	AJUDANTE DE ESTRUTURAS METALICAS	H	CR	12,95
00040984	AJUDANTE DE ESTRUTURAS METALICAS (MENSALISTA)	MES	CR	2.286,68
00000248	AJUDANTE DE OPERACAO EM GERAL	H	CR	11,39
00041086	AJUDANTE DE OPERACAO EM GERAL (MENSALISTA)	MES	CR	2.011,13