



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ALISSON CABRAL BARRETO

DESEMPENHO TÉCNICO DE MISTURAS DE DIFERENTES TIPOS DE SOLOS
COM RCD PARA USO EM OBRAS DE PAVIMENTAÇÃO

NATAL/RN

2020

ALISSON CABRAL BARRETO

DESEMPENHO TÉCNICO DE MISTURAS DE DIFERENTES TIPOS DE SOLOS COM
RCD PARA USO EM OBRAS DE PAVIMENTAÇÃO

Dissertação apresentada ao curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito final à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Enio Fernandes Amorim.

NATAL/RN

2020

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Barreto, Alisson Cabral.

Desempenho técnico de misturas de diferentes tipos de solos com RCD para uso em obras de pavimentação / Alisson Cabral Barreto. - 2020.

109f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Natal, 2020.

Orientador: Dr. Enio Fernandes Amorim.

1. RCD - Dissertação. 2. CBR - Dissertação. 3. Pavimentação - Dissertação. I. Amorim, Enio Fernandes. II. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 625.85

ALISSON CABRAL BARRETO

DESEMPENHO TÉCNICO DE MISTURAS DE DIFERENTES TIPOS DE SOLOS COM
RCD PARA USO EM OBRAS DE PAVIMENTAÇÃO

Dissertação apresentada ao curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito final à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Enio Fernandes Amorim – Orientador (UFRN)

Prof. Dra. Maria Del Pilar Durante Inguza – Examinador Interno (UFRN)

Prof. Dr. Renato Samuel Barbosa de Araújo – Examinador Externo (IFRN)

Natal, 27 de março de 2020.

A minha avó Joana Dantas Sobrinho, que faleceu no período do mestrado deixando uma saudade inexplicável.

Dedico aos meus pais que sempre fizeram de tudo para que nunca faltasse acesso aos estudos. E ao meu sobrinho Arthur que apareceu na vida da minha família iluminando e alegrando os nossos dias.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente quero agradecer a Deus, por está sempre presente em todos os momentos da minha vida. Agradeço por me ajudar em todas as vezes que pensei em desistir, pensando que eu era incapaz de conseguir fazer qualquer coisa. Obrigado por ter me erguido todas as vezes que eu pensei ser impossível levantar.

Á minha família, que sempre está comigo em todos os momentos. Aos meus pais, Maria do Socorro Cabral Barreto e Armênio Bezerra Barreto, por todos os ensinamentos, pelo carinho, compreensão e, por me apoiarem em todas as minhas decisões. Aos meus irmãos, Arlen Cabral e Artênio Cabral, que estão sempre ao meu lado me incentivando.

Aos amigos da UFERSA que fizeram parte de um ciclo muito importante em minha vida, me ajudaram durante os cinco anos de graduação e me ajudam sempre que preciso, mesmo com o empecilho da distância. Em especial: Tarsila Cavalcante, Darlly Dayanne, Alyne Osterne, Milany Medeiros, Adriana Georgia, Ricardo Leandro, Marcelo Augusto e Deize Daiane.

Aos amigos que sempre estiveram presente na minha vida em todos os momentos, sejam eles bons ou ruins e, que tenho certeza que sempre vão me apoiar e me ajudar em todas as minhas decisões. Em especial: Isabelly Périco, Gabrielly Périco, Alice Périco, Dalyana Tavares e Layla Gabriely.

Aos alunos do IFRN, Ana Sarah e Eliana Silva, que me auxiliaram nos ensaios laboratoriais, em que a ajuda foi de importância significativa para a conclusão do trabalho. Ao técnico de laboratório do IFRN, Gian, por todo o suporte, apoio e disponibilidade em ajudar nos ensaios.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Enio Fernandes Amorim, inicialmente pela paciência e pela disponibilização de tempo em me ajudar, sempre que possível, com qualquer dúvida existente. Além do mais, pela confiança e por todos os ensinamentos que foram repassados. Lamento profundamente não ter sido seu aluno em sala de aula, mas tenho certeza que é excelente professor.

Aos participantes da banca, por estarem disponíveis a participar da banca examinadora, dedicando certo espaço de tempo para o estudo e avaliação deste trabalho.

Por fim, á todos que, de forma direta ou indireta, colaboraram para a realização desta dissertação de mestrado.

RESUMO

O crescimento do processo de urbanização das últimas décadas tem provocado um aumento nas atividades da indústria da construção civil e, conseqüentemente, o aumento na geração de resíduos oriundos deste processo. O resíduo de construção e demolição de obras civis (RCD) representa a maior parte do volume de resíduos que são gerados em grandes centros urbanos, sendo necessário que uma destinação adequada seja realizada para mitigar os impactos ambientais e os problemas sociais que eles provocam. Baseado nestes fatores, diversas pesquisas foram realizadas em diversas regiões do Brasil e do mundo com a finalidade de empregar este resíduo como material alternativo em obras de pavimentação. Diante deste contexto, este trabalho tem como objetivo analisar o uso do RCD associado a diferentes tipos de solos oriundos de três regiões do estado do Rio Grande do Norte, visando o seu emprego em obras de pavimentação. O programa experimental foi realizado a partir de amostras de RCD obtidas em uma empresa privada, e amostras de solos extraídas de três grandes regiões do estado do Rio Grande do Norte. Os métodos de investigação de laboratório basearam-se nos ensaios de caracterização física, compactação, CBR e análise de quebra dos grãos. Para isso, as porcentagens de RCD de 25%, 50% e 75%, em massa, foram adicionadas aos solos, para assim verificar o benefício que este incremento pode causar nas características dos materiais. Os resultados obtidos mostram que dependendo da porcentagem de resíduo e do tipo de solo, o incremento de RCD ao solo faz com que os valores do CBR se elevem e melhorem as propriedades das amostras. Deste modo, a substituição de parte do material natural por RCD é uma potencial alternativa para aplicação em obras de pavimentação.

Palavras-chave: RCD. CBR. Pavimentação.

ABSTRACT

The growth of the urbanization process in the last decades has caused an increase in the activities of the civil construction industry and, consequently, an increase in the generation of waste arising from this process. The waste from construction and demolition of civil works (CDW) represents the majority of the volume of waste that is generated in large urban centers, and it is necessary that an appropriate destination be carried out to mitigate the environmental impacts and the social problems that they cause. Based on these factors, several researches were carried out in different regions of Brazil and the world in order to use this residue as an alternative material in paving works. Given this context, this work aims to analyze the use of CDW associated with different types of soils from three regions of the state of Rio Grande do Norte, aiming at its use in paving works. The experimental program was carried out using CDW samples obtained from a private company, and soil samples extracted from three large regions in the state of Rio Grande do Norte. The laboratory investigation methods were based on physical characterization, compaction, CBR and grain break analysis tests. For that, the percentages of CDW of 25%, 50% and 75%, by mass, were added to the soils, in order to verify the benefit that this increase can cause in the characteristics of the materials. The results obtained show that depending on the percentage of residue and the type of soil, the increase of CDW to the soil causes the CBR values to rise and improve the properties of the samples. Thus, the replacement of part of the natural material by CDW is a potential alternative for application in paving works.

Keywords: CDW. CBR. Paving.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Exemplo de descarte irregular em locais públicos no município de São Paulo. .	25
Figura 2.2 – Usina recicladora da PMSP	32
Figura 2.3 – Exemplos de usina móvel e fixa	33
Figura 2.4 – Volume médio de agregado produzido por mês	35
Figura 2.5 – Curvas de distribuição de tamanho de partícula de agregados reciclados mistos.	41
Figura 2.6 – Curva granulométrica de misturas de agregados reciclados.....	42
Figura 2.7 – Curvas granulométricas para misturas de resíduos de concreto triturado com alvenaria triturada.	43
Figura 2.8 – Curvas granulométricas antes e após a compactação do MRA (alvenaria triturada).	44
Figura 2.9 – Relação do CBR com a adição do resíduo	50
Figura 3.1 – Localização das regiões do estado do RN	54
Figura 3.2 – a) Detalhe do Solo 01 oriundo da jazida da cidade de Caraúbas/RN, b) secagem prévia do Solo 01 em laboratório.....	55
Figura 3.3 – a) Coleta do Solo 02 próximo a um trecho da BR - 101, b) Detalhe ilustrativo entre a amostra seca e úmida do Solo 02.	55
Figura 3.4 – a) Jazida do solo 03 no município de Ipueira/RN, b) Secagem prévia da amostra em laboratório.....	56
Figura 3.5 – a) Local de coleta do RCD, b) Detalhe do material utilizado na pesquisa.	56
Figura 3.6 – Fluxograma das atividades realizadas.	58
Figura 3.7 – a) Quarteamento do solo 02, b) Repartidor de amostras.	59
Figura 3.8 – a) amostra seca depositada na máquina, b) massa do RCD após o ensaio.	60
Figura 3.9 – a) Ilustração do ensaio de LL, b) moldagem da amostra no ensaio de LP.	61
Figura 3.10 – a) homogeneização da amostra, b) aplicação dos golpes em cada camada, c) extração do corpo-de-prova do cilindro.	63
Figura 3.11 – a) Tanque com os CP imersos, b) prensa utilizada durante a penetração.....	64
Figura 4.1 – Curvas granulométricas do solo 01	65
Figura 4.2 – Limite da Faixa C e curvas granulométricas do solo 01	67
Figura 4.3 – Curvas granulométricas do solo 02	67
Figura 4.4 – Limite da Faixa F e curvas granulométricas do solo 02.....	69
Figura 4.5 – Curvas granulométricas do solo 03	70

Figura 4.6 – Limite da Faixa F e curvas granulométricas do solo 03.....	71
Figura 4.7 – Curvas de compactação do solo 01 nas três energias.....	71
Figura 4.8 – Curvas de compactação do solo 02 nas três energias.....	73
Figura 4.9 – Curvas de compactação do solo 03 nas três energias.....	74
Figura 4.10 – Curva Granulométrica do RCD.....	75
Figura 4.11 – Curva Granulométrica das misturas solo/RCD do solo 01.....	77
Figura 4.12 – Curva Granulométrica das misturas solo/RCD do solo 02.....	78
Figura 4.13 – Curva Granulométrica das misturas solo/RCD do solo 03.....	78
Figura 4.14 – Misturas do solo 01/ RCD dentro do Limite da Faixa A.....	79
Figura 4.15 – Misturas Solo/RCD dentro do Limite da Faixa D.....	80
Figura 4.16 – Misturas Solo/RCD dentro do Limite da Faixa A.....	80
Figura 4.17 – Mudança do comportamento do material no decorrer do ensaio de compactação	83
Figura 4.18 – Variação do $\gamma_{dm\acute{a}x}$ com a porcentagem de RCD para as misturas do solo 01	84
Figura 4.19 – Variação do CBR com a energia de compactação para as misturas do solo 01.	84
Figura 4.20 – Variação do CBR com a porcentagem de RCD para as misturas do solo 01	85
Figura 4.21 – Variação do $\gamma_{dm\acute{a}x}$ com a porcentagem de RCD para as misturas do solo 02	86
Figura 4.22 – Variação do CBR com o incremento de RCD para as misturas do solo 02	87
Figura 4.23 – Variação do $\gamma_{dm\acute{a}x}$ com a porcentagem de RCD para as misturas do solo 03	89
Figura 4.24 – Variação da umidade ótima com a porcentagem de RCD para as misturas do solo 03	89
Figura 4.25 – Variação do CBR com o incremento de RCD para as misturas do solo 03	90
Figura 4.26 – Variação da expansão com o incremento de RCD para as misturas do solo 03	91
Figura 4.27 – Curvas granulométricas após CBR da mistura 75/25 do solo 01.....	92
Figura 4.28 – Curvas granulométricas após CBR da mistura 50/50 do solo 01.....	93
Figura 4.29 – Curvas granulométricas após CBR da mistura 25/75 do solo 01.....	93
Figura 4.30 – Curvas granulométricas após CBR da mistura 75/25 do solo 02.....	94
Figura 4.31 – Curvas granulométricas após CBR da mistura 50/50 do solo 02.....	94
Figura 4.32 – Curvas granulométricas após CBR da mistura 25/75 do solo 02.....	95
Figura 4.33 – Curvas granulométricas após CBR da mistura 75/25 do solo 03.....	95
Figura 4.34 – Curvas granulométricas após CBR da mistura 50/50 do solo 03.....	96
Figura 4.35 – Curvas granulométricas após CBR da mistura 25/75 do solo 03.....	96
Figura 4.36 – Curvas granulométricas 25% do solo 01 dentro da Faixa C após CBR	97
Figura 4.37 – Curvas granulométricas 25% do solo 02 dentro da Faixa C após CBR	98

Figura 4.38 – Curvas granulométricas 50% do solo 03 dentro da Faixa D após CBR..... 98

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Categorias dos agregados de RCD	28
Quadro 2.2 – Normas técnicas para o uso do RCD	29
Quadro 3.1 – Quantificação dos ensaios realizados na pesquisa	59
Quadro 3.2 – Verificação das amostras	62
Quadro 4.1 – Classificação das misturas solo/RCD	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Especificações para agregados reciclados de RCD em pavimentação	30
Tabela 2.2 – Resultados da literatura sobre o RCD em questão.....	52
Tabela 3.1 – Nomenclatura adotada para as diversas amostras da pesquisa	57
Tabela 3.2 – Normas adotadas para cada ensaio da pesquisa	58
Tabela 3.3 – Tipos de energias utilizadas no ensaio de compactação	61
Tabela 4.1 – valores de caracterização do solo 01.....	65
Tabela 4.2 – valores de caracterização do solo 02.....	68
Tabela 4.3 – Valores de caracterização do solo 03.....	69
Tabela 4.4 – Resultados da compactação e CBR do solo 01	71
Tabela 4.5 – Resultados da compactação e CBR do solo 02	73
Tabela 4.6 – Resultados da compactação e CBR do solo 03	74
Tabela 4.7 – Resultados da Caracterização do RCD	76
Tabela 4.8 – Valores de absorção de diversos RCD	76
Tabela 4.9 – Valores do peso específico dos grãos das misturas	81
Tabela 4.10 – Parâmetros de compactação e CBR do solo 01/RCD	82
Tabela 4.11 – Parâmetros de compactação e CBR do solo 02/RCD	86
Tabela 4.12 – Parâmetros de compactação e CBR do solo 03/RCD	88

LISTA DE SIGLAS

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
AN	Agregado Natural
AR	Agregado Reciclado
CBR	California Bearing Ratio
CC	Coefficiente de Curvatura
CDRA	Agregado Reciclado para Construção e Demolição
CONAMA	Conselho Nacional do meio Ambiente
CNT	Confederação Nacional de Transportes
CNU	Coefficiente de Não Uniformidade
CP	Corpo-de-prova
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes
EUA	Estados Unidos da América
FRG	Vidro Reciclado Fino
HRB	Highway Research Board
IFRN	Instituto Federal do Rio Grande do Norte
IP	Índice de Plasticidade
LAA	Abrasão de Los Angeles
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
MR	Módulo de Resiliência
MRA	Agregado Reciclado Misto
MRG	Vidro Reciclado Médio
NBR	Norma Brasileira
PMSP	Prefeitura Municipal de São Paulo
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RAP	Pavimento de Asfalto Recuperado

RCA	Agregado de Concreto Reciclado
RCD	Resíduos de Construção e Demolição
RMA	Agregado de Alvenaria Triturada
RN	Rio Grande do Norte
SP	São Paulo
SUCS	Sistema Unificado de Classificação de Solos
UFRN	Universidade Federal do Rio Grande do Norte
WR	Resíduo de Rocha de Escavação

LISTA DE ABREVIATURAS

cm	Centímetro
cm ²	Centímetro quadrado
cm ³	Centímetro cúbico
g	Gramma
hab	Habitante
kg	Quilograma
km	Quilometro
kN	QuiloNewton
kPa	QuiloPascal
m	Metro
m ²	Metro quadrado
m ³	Metro cúbico
mg	Miligramma
mm	Milímetro
MPa	MegaPascal
rpm	Rotações por minuto

LISTA DE SÍMBOLOS

e	Índice de vazios
n	Porosidade
γ	Peso específico natural
$\gamma_{dm\acute{a}x}$	Peso específico aparente seco máximo
γ_s	Peso específico dos grãos
$W_{\acute{o}tima}$	Umidade ótima
S_r	Grau de saturação

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	19
1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA	21
1.1.1 Objetivo geral.....	21
1.1.2 Objetivos específicos.....	21
2 REVISÃO DE LITERATURA	22
2.1 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	22
2.1.1 Introdução	22
2.1.2 Aspectos ambientais	24
2.1.3 Classificação do RCD	27
2.1.4 Especificações das Normas Aplicadas do Uso de RCD.....	29
2.1.5 Materiais Constituintes do RCD	31
2.1.6 Reciclagem.....	32
2.1.7 Propriedades do RCD	36
2.2 RCD APLICADO À PAVIMENTAÇÃO.....	37
2.2.1 Comportamento do RCD em Ensaios de Laboratório.....	40
2.2.1.1 Mudança nas características físicas após a compactação	41
2.2.1.2 Características após compactação e CBR.....	45
2.2.2 Outras Pesquisas com RCD Destinados a Obras de Pavimentação	46
2.2.3 Pesquisas com o RCD no estado do Rio Grande do Norte.....	52
3 MATERIAIS E MÉTODOS	54
3.1 MATERIAIS.....	54
3.1.1 Solo.....	54
3.1.2 RCD.....	56
3.1.3 Misturas de solo-RCD	56
3.2 MÉTODOS	57
3.2.1 Ensaios de laboratório	57
3.2.1.1 Caracterização física dos materiais	59
3.2.1.2 Ensaio de compactação Proctor	61
3.2.1.3 Ensaio de Índice de Suporte Califórnia (CBR).....	63
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	65
4.1 SOLOS NATURAIS	65
4.1.1 Caracterização física.....	65

4.1.1.1 Solo 01	65
4.1.1.2 Solo 02.....	67
4.1.1.3 Solo 03.....	69
4.1.2 Compactação e Índice de Suporte Califórnia (CBR)	71
4.2 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO DE OBRAS – RCD.....	75
4.2.1 Caracterização física do RCD.....	75
4.3 MISTURAS DE SOLO-RCD.....	77
4.3.1 Composição Granulométrica	77
4.3.2 Compactação e Índice de Suporte Califórnia (CBR) das misturas	81
4.3.2.1 Misturas do Solo 01.....	82
4.3.2.2 Misturas do Solo 02.....	85
4.3.2.3 Misturas do Solo 03.....	88
4.3.3 Análise da quebra dos grãos após o ensaio de CBR	92
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	99
5.1 CONCLUSÕES	99
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	101

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, o modal rodoviário é o mais utilizado para movimentação de mercadorias e transporte de passageiros. Atualmente, de acordo com a pesquisa da confederação nacional dos transportes (CNT, 2019), somente 213.453 quilômetros de rodovias são pavimentadas, correspondendo a 12,4% da extensão total. A malha não pavimentada representa 78,5% do total da malha rodoviária brasileira, enquanto 9,1% corresponde às rodovias planejadas. Ainda de acordo com a CNT (2019), em 10 anos, no período entre 2009 e 2019, as rodovias federais pavimentadas passaram por um crescimento de apenas 6,7% da extensão. Esses dados evidenciam que, embora o modal rodoviário seja importante para o país, existem, relativamente, poucos trechos pavimentados. Deste modo, é necessário que ocorram investimentos em pavimentação de rodovias, como também em manutenções das mesmas. No entanto, a manutenção e recuperação de rodovias requer a adição de novos materiais, provocando a exploração de recursos naturais e elevando os custos das obras.

Considerando o aumento na busca por fonte de recursos naturais não renováveis, diversas pesquisas têm sido realizadas com o objetivo de estudar materiais alternativos para execução de pavimentos flexíveis. Além dos fatores ambientais, a procura por materiais alternativos também é motivada por fatores econômicos, para assim conseguir diminuir as distâncias de transporte das jazidas e reaproveitar diversos materiais que são descartados pelas indústrias no meio ambiente.

A extração de recursos naturais não renováveis e a geração de resíduos estão relacionadas com o rápido processo de urbanização que ocorre em todo o mundo. A indústria da construção civil é responsável por grande parte do volume de resíduos sólidos que é gerado e descartado no meio ambiente. Esses resíduos, denominados por Resíduos de Construção e Demolição (RCD), são oriundos de obras de demolição, reformas, reparos e de desperdícios durante a execução de obras. Estes resíduos geralmente são depositados em locais inadequados originando diversos problemas sócio-ambientais, tais como: o assoreamento de córregos e rios, o esgotamento da capacidade de aterros sanitários, a ocupação irregular de áreas urbanas, a proliferação de vetores de doenças e a degradação da paisagem de áreas urbanas e rurais.

Tendo em vista os problemas que a geração dos resíduos de construção podem causar, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) estabeleceu por meio da resolução N° 307, de julho de 2002 (CONAMA, 2002), que os agentes geradores de resíduos são responsáveis por oferecerem uma destinação adequada a eles. Dessa forma, a reciclagem

do RCD se torna uma maneira viável e adequada para que os responsáveis por obras de construção civil destinem seus resíduos, minimizando os problemas provenientes do descarte inadequado. Os agregados provenientes do RCD podem ser utilizados em diversos setores da construção como produção de argamassas, fabricação de blocos, confecção de peças pré-moldadas, dentre outros. No entanto, é oportuno destacar que a utilização em pavimentação tem sido a mais adequada até o momento.

O reaproveitamento de resíduos da construção civil é uma prática difundida mundialmente há bastante tempo, ainda assim, de acordo com Petkovic *et al.* (2004), foi apenas a partir da década de 1980 que houve um impulso no processo de reciclagem desses materiais, principalmente em países europeus. Este crescimento se deve ao fato da escassez de recursos naturais e a procura por novas alternativas para mitigar os impactos ambientais.

A maioria das pesquisas relacionadas ao uso do RCD em obras de pavimentação avalia o seu uso em subleito e em todas as camadas do pavimento, até mesmo em camadas de base, que requer materiais com propriedades superiores. O uso do RCD como material em camadas de pavimento de rodovias submetidas a baixo volume de tráfego é uma das alternativas mais benéficas. Contudo, esses resíduos também podem ser utilizados em rodovias de médio e alto volume de tráfego, dependendo de suas propriedades e da análise do seu comportamento mecânico. Deste modo, é necessária a realização de estudos comparativos do uso do material natural com a mistura desses com o RCD, para poder verificar o comportamento mecânico e o seu desempenho. Assim, a utilização do resíduo proveniente de construção civil pode promover um aumento na oferta de vias pavimentadas no Brasil, uma vez que se torna uma alternativa interessante aos materiais convencionalmente utilizados. Além do aspecto ambiental, um dos principais atrativos dessa alternativa é o aspecto econômico, visto que geralmente os preços desses materiais são inferiores aos materiais convencionais.

Consubstanciado nestes fatos, este trabalho visa contribuir com uma destinação mais adequada para os resíduos de construção e demolição, considerando sua utilização em obras de pavimentação. Isso será possível através de uma avaliação do comportamento técnico em misturas de solo com o RCD, analisando os possíveis benefícios que serão originados. Além do mais, é de suma importância verificar qual camada do pavimento é a mais adequada para a utilização desse resíduo.

1.1 Objetivos da Pesquisa

1.1.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo analisar o desempenho de misturas de diferentes tipos de solos associados ao RCD e, verificar a sua viabilidade como material alternativo para o uso em camadas de pavimento rodoviário. Para isso, foram realizadas análises do comportamento mecânico das misturas propostas e do solo natural.

1.1.2 Objetivos específicos

Apresentar os benefícios que são gerados ao adicionar porcentagens de RCD ao solo, principalmente em casos de solos de baixa capacidade de suporte, para o uso em camadas de pavimentos. Para isso, diversas porcentagens foram analisadas para definir qual percentual de RCD é o mais adequado para cada tipo de solo. Além disso, a influência da energia de compactação empregada durante o ensaio de cada mistura. Visa também ampliar o número de informações relacionadas ao uso de RCD associado ao solo e, incentivar o uso desses materiais como material alternativo em obras de pavimentação.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Resíduos de Construção e Demolição

2.1.1 Introdução

Segundo a Resolução n.º 307, de 05 de julho de 2002, do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, os resíduos sólidos da construção civil, conhecido pela sigla RCD (resíduos de construção e demolição), são os materiais derivados de construções, reparos, reformas, demolições de obras de construção civil, e, os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: blocos cerâmicos, tijolos, concreto em geral, rochas, solos, metais, tintas, resinas, colas, madeiras e compensados, argamassa, telhas, gesso, pavimento asfáltico, plásticos, vidros, fiação elétrica, tubulações, dentre outros, rotineiramente chamados de entulhos de obra, caliça ou metralha.

De acordo com Souza (2015), analisando as definições de RCD é notório que este resíduo se trata de um material com composição extremamente heterogênea que é diretamente dependente da fonte geradora do resíduo. No caso da utilização deste resíduo em obras de pavimentação ocorrem algumas restrições de materiais que devem ser evitados, como: madeira, solo, fiação elétrica, plásticos, vidros, gesso, tubulações, papéis ou quaisquer materiais orgânicos ou não inertes.

O setor da construção civil é o grande responsável pela geração de resíduos e diversos países têm buscado alternativas para a sua destinação. De forma geral, este setor remove 50% de materiais da natureza originando 50% da totalidade de resíduos (Arulrajah *et al.*, 2012).

De acordo com dados do Eurostat (2014, *apud* Cardoso *et al.*, 2016), no ano de 2010 a união Europeia gerou um total de 2,51 bilhões de toneladas de resíduos. Dentre os principais geradores estão os serviços de construção e demolição e a execução de serviços de mineração e pedreira, correspondentes, respectivamente, a 34% e 27% do total de resíduos. Os resíduos gerados por esses dois setores em sua maioria são resíduos minerais ou solo (97% do total).

Conforme Hongping Yuan (2011, *apud* Li *et al.*, 2017), na China os resíduos de construção e demolição são responsáveis por 30% à 40% da totalidade de resíduos sólidos gerados anualmente. O aumento destes resíduos podem ser explicados pelo rápido desenvolvimento da indústria de construção, resultando na demolição de inúmeros prédios antigos nas áreas urbanas. A cada 1m² de demolição de prédios é gerado de 0,5 à 1,0 m³ de

resíduos e, cada 10 mil m² de processo de construção resultará em 500 à 600 toneladas de resíduos. Entre os anos de 2003 e 2013 a China gerou aproximadamente 2,36 bilhões de toneladas de RCD.

Na Austrália, anualmente cerca de 8,7 milhões de toneladas de agregado de concreto reciclado, 1,2 milhões de toneladas de pavimento de asfalto reciclado e 1,3 milhões de toneladas de tijolo triturado são armazenados em depósitos ilegais (Mohammadiniaa *et al.*, 2017).

Segundo Leite *et al.* (2011), a grande produção de RCD, juntamente com a sua deposição ilegal, tem gerado sérios problemas para o Brasil. A grande quantidade desses resíduos são gerados em cidades de médio e grande porte.

Conforme Schneider (2003), na cidade de São Paulo/SP foi produzido diariamente, no ano de 2003, em torno de 16 mil toneladas de resíduos sólidos de construção e demolição. De acordo com a PMSP (2014, *apud* Frasson e Paschoalin Filho, 2017), o Plano de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos da cidade de São Paulo (PGIRS) estima que o município produza entre 18,5 e 24,6 mil toneladas de resíduos diariamente, sendo em média 520 kg/hab./ano.

De acordo com uma pesquisa setorial realizada pela Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos de Construção Civil e Demolição (ABRECON, 2015), 50% dos municípios brasileiros ainda destinam os resíduos para locais irregulares e, não realizam a reciclagem para utilizá-los em obras de construção civil.

Em um estudo realizado pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2011), para coletar dados e obter um panorama dos resíduos sólidos no Brasil, foi constatado que os resíduos de construção civil são cerca de 50% do total de resíduos que são gerados em todo o país. Neto e Schalch (2010) relatam que a produção e disposição final dos entulhos de obra se tornaram um dos principais problemas para os municípios brasileiros.

A grande quantidade de resíduos que é gerada no canteiro de obras está relacionada ao baixo controle tecnológico e à execução de serviços de forma precária nas fases de construção, manutenção e demolição. De acordo com John e Agopyan (2000), durante a fase de construção, a geração de resíduos é resultado das perdas do processo construtivo e de possíveis vícios de execução de forma arcaica. Na fase de manutenção, a geração de entulhos está associada a diversos fatores, como: correção de defeitos e imperfeições (manifestação patológica); reformas ou modernização de edifícios ou de partes dos mesmos, podendo gerar demolições parciais; descarte de componentes que necessitem ser substituídos devido a sua

degradação ou por ter atingido o final da vida útil. Na demolição, a redução da geração de resíduos depende do prolongamento da vida útil e de tecnologias de projeto e demolição que permitam a reutilização dos componentes.

Perina e Trannin (2019) realizaram uma avaliação dos principais resíduos que são gerados em determinado canteiro de obra, no município de Pindamonhangaba (SP), e, verificaram que com a execução de alvenaria estrutural a maioria destes resíduos são oriundos de restos de concreto e de blocos, correspondentes a 51% do volume total. Quanto a execução do revestimento, a predominância dos materiais é da argamassa (38%), gesso (26%), solo (13%) e areia (23%). No geral, concreto, bloco e argamassa, correspondem a 67% da quantidade total de resíduos que são gerados, sendo estas frações possíveis de serem recicladas e transformadas em agregados reciclados.

De acordo com Van Niekerk (2002, *apud* Xuan, 2015), em alguns países, todo o agregado reciclado com resquícios de concreto e alvenaria pode ser utilizado como material de base para estradas. No entanto, a aplicação deste resíduo pode ser limitada devido à alta absorção de água e baixa resistência de alvenaria reciclada. Ainda de acordo com esse estudo, na Holanda, este agregado corresponde a mais de 80% do material utilizado em bases de estradas, sendo sugerido que o teor de alvenaria reciclada seja inferior à 50%.

Segundo Ellis *et al.* (2014, *apud* Gautam *et al.*, 2018), nos Estados Unidos é permitido o uso do Pavimento de Asfalto Reciclado (RAP) em obras, desde que a sua proporção esteja em torno de 15 a 20%. A utilização deste resíduo vai depender do estado em que este está sendo usado, como exemplo, no estado da Virgínia é permitido o uso de 30% de RAP como material de base e sub-base, desde que satisfaça a classificação e a distribuição do tamanho das partículas que são permitidas no projeto. No estado da Flórida, o Departamento de Transporte permite o uso do RAP e também do agregado de concreto reciclado e outros resíduos de construção e demolição para serem utilizados como material em camadas de base e no subleito.

2.1.2 Aspectos ambientais

De acordo com Trannin *et al.* (2019), os principais materiais utilizados em todas as obras de construção civil do Brasil são os agregados, sendo estes recursos não renováveis derivados de técnicas de extração que provocam impacto ao meio ambiente. Os impactos gerados pelos agregados naturais utilizados no setor da construção civil são: a exploração descontrolada de recursos naturais não renováveis, a emissão de gás carbônico na atmosfera

devido à fabricação de cimento, e a poluição do ar devido o transporte até os grandes centros (SANTOS, 2007).

O setor da construção civil colabora de forma significativa nos impactos ambientais, devido à necessidade da extração dos materiais naturais, a mudança de paisagem original e a geração de resíduos sólidos. Os resíduos sólidos de construção e demolição originam problemas devido a grande quantidade produzida e a sua disposição final, sendo geralmente depositados em locais inadequados (Novais *et al.*, 2017). A Figura 2.1 apresenta um exemplo da deposição de resíduos em vias, rios, córregos, terrenos baldios e áreas de mananciais.

Figura 2.1 – Exemplo de descarte irregular em locais públicos no município de São Paulo.



Fonte: Frasson (2017).

Mohammadiniaa *et al.* (2017), relatam que na maioria das pesquisas referentes ao uso de resíduos de construção, as emissões de CO₂ e o consumo de energia primária são os fatores de impacto ambiental mais relevantes. Estas pesquisas relataram que a substituição de agregados naturais por materiais residuais reduz em 10 vezes o impacto ambiental equivalente à emissão de CO₂, além de gerar um grande potencial de economia de energia.

De acordo com Gautam *et al.* (2018), diversos materiais não renováveis, como betume, cimento, cal, agregados, são utilizados durante o processo de construção e manutenção de estradas e rodovias. A extração em abundância desses materiais causam diversos impactos ambientais, provocando o esgotamento dos recursos e o aumento no custo dos materiais. No entanto, é necessário que os recursos alternativos mantenham a integridade estrutural do pavimento, e, conjuntamente, proporcionem um aspecto sustentável ao mesmo.

De acordo com Arulrajah *et al.* (2012), diversos autores realizaram pesquisas avaliando a sustentabilidade dos resíduos de construção e demolição e, com isso muitos países tem utilizado esses materiais em aplicações de engenharia. A ampla utilização do resíduo em

obras de pavimentação podem preservar os recursos naturais e reduzir o problema de armazenamento do resíduo.

De acordo com Arulrajah *et al.* (2012), atualmente a reutilização sustentável de RCD em obras de engenharia geotécnica tem ganhado grande relevância em termos de desenvolvimento global dos conceitos de sustentabilidade. Segundo Cardoso *et al.* (2016), a utilização de agregados reciclados na construção civil pode originar a exploração de novas oportunidades de mercado e, colaborar de forma significativa para o desenvolvimento sustentável.

Os agregados reciclados dos RCD de Classe A, considerando o ponto de vista econômico e o desenvolvimento sustentável, são importantes potenciais para diminuir o consumo de recursos naturais não renováveis, os impactos ambientais associados à emissão de CO₂ e os custos com a exploração de novos depósitos minerais (GHANBARI; ABBASI; RAVANSHADNIA, 2017).

Cardoso *et al.* (2006) mencionam que em algumas situações, o uso de agregado reciclado, ao invés do agregado natural, pode não ser uma adequada solução devido a diversos fatores, como: alta variabilidade da composição dos agregados reciclados. De acordo com esses autores, em relação ao aspecto econômico, o agregado natural, em algumas situações, é mais fácil de ser encontrado, enquanto que o agregado reciclado necessita de transporte até o local da obra. Além disso, a utilização dos resíduos requer uma investigação prévia em laboratório e em campo, onde os mesmos devem ser submetidos a procedimentos de seleção rigorosos, demorados e de alto custo.

Em alguns países e em certas aplicações, como em barragens de terra e rocha, o uso de agregados reciclados ainda não são permitidos, em razão das regras de projeto para a sua utilização ser muito restritas. Ademais, a incorporação de resíduos aos agregados naturais, em alguns casos, pode causar um impacto negativo na resistência e rigidez do solo (CARDOSO *et al.*, 2016) .

De acordo com Triches & Kryckyj (1999), a realização da reciclagem dos resíduos representa diversas vantagens econômicas, tais como: diminuição dos custos com a remoção do material depositado em encostas, cursos d'água e ao longo de vias públicas; Redução da necessidade de novas áreas para aterros sanitários devido ao aumento da vida útil dos existentes; Diminuição dos custos de operação dos aterros sanitários; Diminuição nos custos de obras de pavimentação.

2.1.3 Classificação do RCD

De acordo com a Associação Brasileira de Normas técnicas (ABNT) por meio da NBR 10004 (2004f), a classificação de resíduos sólidos está relacionada à identificação da atividade ou processo que os originou, de suas características e constituintes, e a comparação destes constituintes com substâncias e resíduos em que é conhecido o impacto à saúde e ao meio ambiente. Para a identificação dos constituintes é necessário que seja estabelecido, de acordo com as matérias-primas, os insumos e o processo que lhe deu origem.

A NBR 10004 (2004f) relata que os resíduos podem ser classificados em: classe I, que são os resíduos perigosos; e em classe II, onde abrange os resíduos não perigosos e é subdividida em classe II A – não inertes e, classe II B – inertes.

Classe I – Perigosos: São os resíduos que podem apresentar periculosidade à saúde pública ou ao meio ambiente em função de suas propriedades físicas, químicas e infectocontagiosas. São também, aqueles que são característicos por serem inflamáveis, reativos, corrosivos, tóxicos ou patogênicos.

Classe II – Não perigosos:

Classe II A – Não inertes: Os resíduos dessa classe podem apresentar as seguintes propriedades: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água. Estes não se enquadram nas classes I e II B.

Classe II B – Inertes: São aqueles que, quando testados de acordo com o ensaio de solubilidade da Norma NBR 10006 não oferecem concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, com exceção de aspecto, cor, turbidez, sabor e dureza.

De acordo com Cardoso *et al.* (2016), os resíduos de construção e demolição (RCD) e reformas de estradas geram diversos materiais, em que quatro são os principais: alvenaria triturada, concreto triturado, detritos mistos de demolição, e, detritos gerados com o planejamento de estradas. Estes materiais passam por trituração e beneficiamento, gerando um agregado possível de ser atribuído a uma das cinco categorias apresentadas no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 – Categorias dos agregados de RCD

Categoria	Origem	Composição
Agregados de alvenaria reciclada (RMA)	Alvenaria triturada	Apresentam no mínimo 90%, em massa, do somatório de vários materiais, tais como: tijolos cerâmicos, tijolos e blocos de escória de alto-forno, blocos de concreto aerados e leves, telhas cerâmicas e, tijolos de areia e cal.
Agregado de concreto reciclado (RCA)	Concreto triturado	De acordo com diversas normas estes agregados devem compor de no mínimo 90%, em massa, de materiais à base de cimento Portland e agregado natural.
Agregados reciclados mistos (MRA)	Detritos mistos de demolição	Em sua composição apresentam menos de 90%, em massa, de materiais à base de cimento Portland e agregado natural.
Pavimento de asfalto recuperado (RAP)	Detritos de estradas	Composto principalmente de materiais à base de asfalto, correspondente a mais de 90%, em massa.

Fonte: Cardoso *et al.* (2016).

Por outro lado, a Resolução 307 de 2002 do CONAMA (CONAMA, 2002) classifica os resíduos de construção civil de acordo com as possibilidades de reciclagem. Assim, esses resíduos se enquadram em quatro classes:

Classe A: Abrange os resíduos que são recicláveis ou reutilizáveis como agregados, tais como:

- a) de construção, demolição, reformas e, reparos de pavimentação e de diversas outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem;
- b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, telhas, blocos, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto;
- c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (tubos, blocos, meios-fios etc.) produzidas nos canteiros de obras;

Classe B: Abrange os resíduos que são recicláveis para outras finalidades, tais como: papel, papelão, plástico, gesso, metais, madeira e vidros;

Classe C: São aqueles resíduos em que ainda não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua recuperação ou reciclagem.

Classe D: São os resíduos provenientes do processo de construção que são perigosos, tais como: solventes, tintas, óleos e outros, ou aqueles contaminados provenientes de demolição, reparo e reformas de clínicas radiológicas, instalação industrial e outros. O amianto também foi incluído na classe de resíduos perigosos em 16 de agosto de 2004, através da Resolução nº 348 do CONAMA.

2.1.4 Especificações das Normas Aplicadas do Uso de RCD

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) elaborou algumas normas para a utilização do agregado reciclado, devido à elevada deficiência na gestão e manejo correto dos resíduos de construção. Como exemplo pode-se citar a NBR 15115/2004 e a NBR 15116/2004, que abordam o uso de agregados reciclados em pavimentos e preparo de concreto sem função estrutural. Para a utilização destes agregados em pavimentação, além de atender às normas da ABNT, é necessário que sigam aos padrões instituídos pelas normas do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT 141/2010 (TRANNIN *et al.*, 2019). O Quadro 2.2 apresenta algumas normas Brasileiras voltadas para a utilização de resíduos de construção e demolição na construção civil.

Quadro 2.2 – Normas técnicas para o uso do RCD

Norma	Descrição
NBR 15112/2004	Resíduos da construção civil e resíduos volumosos – Áreas de transbordo e triagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação.
NBR 15113/2004	Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação.
NBR 15114/2004	Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Área de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação.
NBR 15115/2004	Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos.
NBR 15116/2004	Agregados reciclados de resíduos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos.

Fonte: Adaptado de ABNT (2004).

Em seguida, através da Lei 12.305/2010, foi decretada a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), em que incentiva a diminuição na geração de resíduos e tem o objetivo de aumentar a prática de reciclagem destes. Além do mais, determina o comprometimento, do setor público e privado, com a elaboração de planos de gestão de resíduos.

Em relação à utilização do RCD em obras de pavimentação, a primeira norma brasileira foi desenvolvida pela prefeitura de São Paulo, a norma PMSP/ SP – 001 de 2003. Outra norma para esta finalidade é a ABNT NBR 15115 de 2004 que especifica o emprego de agregado reciclado de RCD em camadas de base, sub-base e reforço do subleito de pavimentos. A Tabela 2.1 apresenta limites e exigências para a utilização do RCD de acordo com as normas supracitadas.

Tabela 2.1 - Especificações para agregados reciclados de RCD em pavimentação

Parâmetros	PMSP/SP ETS-001 (2003)	NBR 15115 (2004d)
Dimensão Máxima características (mm)	50,0	63,5
Passante na Peneira 0,42mm (%)	$10 \leq a \leq 30$	$10 \leq a \leq 40$
Coefficiente de Uniformidade	≥ 10	≥ 10
Coefficiente de Curvatura	$1 \leq a \leq 3$	não consta
% de Materiais Indesejáveis	Mesmo grupo	não consta
	Grupos distintos	não consta
Forma dos Grãos (% de grãos lamelares)	não consta	máximo 30%
CBR (%)	Base	$\geq 60^{(b)}$
	Sub-base	≥ 20
	Ref. de subleito	≥ 12
Expansão (%)	Base	$\leq 0,5$
	Sub-base	$\leq 1,0$
	Ref. de subleito	$\leq 1,0$

(a) É permitido o uso de agregado reciclado em camada de base para vias de tráfego com $N \leq 106$ repetições do eixo-padrão de 80 kN no período do projeto.

(b) É permitido o uso de agregado reciclado em camada de base para vias de tráfego com $N \leq 105$ repetições do eixo-padrão de 80 kN no período do projeto.

Fonte: Souza (2015).

De acordo com as normas NBR 15115/2004 e NBR 15116/2004, para a utilização do agregado reciclado em pavimentação é imprescindível que este seja proveniente de material classe A e que obedeça á diversas condições, tais como: dimensão máxima dos grãos de 63,5 mm, restringida a 2/3 da espessura da camada compactada e, material que passa na peneira de 0,42 mm entre 10% á 40%; Composição granulométrica não uniforme e bem graduada, com Coeficiente de uniformidade (CU) maior ou igual a 10 (TRANNIN *et al.*, 2019).

2.1.5 Materiais Constituintes do RCD

A proporção de materiais presentes no agregado reciclado é muito diversa e pode ser diferenciada dependendo da usina de reciclagem e do país em que está sendo usado. No entanto, pesquisas apontam que a maior porção do agregado reciclado é composta por concreto e alvenaria. Assim, em certos casos, em que o teor de alvenaria é muito elevado, não é recomendado que o agregado reciclado seja utilizado como base de estradas (XUAN, 2015).

A diversidade de materiais em cada região pode ser explicada devido a cada país ter sua cultura, assim apresentar grande diversidade de materiais e tecnologias empregadas. Como exemplo, nas construções americanas e japonesas, a madeira é um material muito empregado, enquanto em construções brasileiras e europeias a presença desse material é menos significativa (AMADEI *et al.*, 2011).

De acordo com John e Agopyan (2000), os resíduos de construção civil são formados por uma grande diversidade de produtos, tais como: materiais cerâmicos (concretos, argamassa, rochas naturais); materiais metálicos; e materiais orgânicos (como madeira, plásticos, tintas, restos de vegetais etc.).

Amorim (2013) disserta que em um RCD, a triagem das frações de materiais potencialmente reaproveitadas está diretamente relacionada ao tipo de destino final pretendido para esse resíduo. A proporção de materiais presentes no resíduo de construção é muito variável e depende diretamente de sua origem. Por exemplo, os resíduos produzidos por manutenção de obras de pavimentação são constituídos especialmente de asfaltos (John e Agopyan, 2000).

Ainda de acordo com John e Agopyan (2000), as possibilidades de reciclar os resíduos de construção variam conforme a sua composição. RCD com predominância de fração cerâmica pode ser utilizado como agregado em diferentes aplicações. No entanto, a presença de produtos de gesso, que são solúveis em água, é um limitador da reciclagem da fração cerâmica. Todavia, a reciclagem do gesso em si é bastante simples. Assim, frações constituídas de solo misturado a materiais cerâmicos e baixos teores de gesso podem ser recicladas e utilizadas em camadas de sub-base e base de pavimentos.

De acordo com Ahmed (2013), no Japão o gesso é causador de sérios problemas devido a sua disposição em aterros sanitários, ser muito cara. Além do mais, o descarte de resíduos de gesso pode provocar diversos problemas ambientais, sobretudo em ambientes úmidos, podendo aumentar a emissão de gás sulfídrico. Assim, diversos pesquisadores começaram a utilizar bassanita reciclada, produzida a partir de resíduos de gesso, como

material estabilizador aplicado para melhorias de solo. O gesso utilizado como material estabilizador tem potencial de desenvolver um endurecimento adequado e rápido entre as partículas do solo, principalmente em ambientes secos, melhorando as qualidades de resistência do solo. No entanto, esta aplicação ainda é muito limitada.

2.1.6 Reciclagem

O reaproveitamento de resíduos oriundos da construção civil é uma prática realizada há muito tempo, no entanto as grandes catástrofes, como as guerras do século XX e terremotos, impulsionaram a utilização de materiais reciclados (LIMA, 1999).

De acordo com Petkovic *et al.* (2004), na Europa, a partir da década de 1980 houve um aumento na reciclagem de materiais de construção civil. Entre os países europeus, destacam-se a Noruega e a Holanda, uma vez que esses países apresentavam parte de seus recursos naturais escassos e dificuldade para estocagem de resíduos em aterros sanitários.

Mohammadiniaa *et al.* (2017) relatam que, de acordo com uma estimativa da Agência de Proteção Ambiental, aproximadamente 73 milhões de toneladas de asfalto são recicladas a cada ano nos Estados Unidos. Estes mesmos autores comentam que a reciclagem proporciona benefícios econômicos e ambientais, sobretudo quando a classificação eficiente dos materiais do RCD é realizada e quando ocorre o gerenciamento adequado dos custos de transporte.

De acordo com Carneiro *et al.* (2001, *apud* Motta, 2005), a primeira usina recicladora do Brasil foi implantada pela Prefeitura do Município de São Paulo no ano de 1991, em Itatinga. Esta usina tinha a finalidade de produzir agregados reciclados para sub-base de pavimentos. A Figura 2.2 apresenta a usina de Itatinga.

Figura 2.2 – Usina recicladora da PMSP



Fonte: Motta (2005).

No ano de 2002, cerca de 80% das usinas brasileiras pertenciam ao poder público, no entanto, após a Resolução CONAMA 307 de 2004 houve aumento no incentivo de usinas privadas, e atualmente correspondem a 84% das usinas brasileiras de reciclagem (ABRECON, 2015). Houve também um aumento na quantidade de usinas móveis no ano de 2015, devido a sua flexibilidade, sendo transportadas para o local da obra e, devido à baixa necessidade de mão de obra. No entanto, a quantidade de usinas fixas ainda é superior. A Figura 2.3 apresenta os dois tipos de usinas

Figura 2.3 – Exemplos de usina móvel e fixa



Fonte: ABRECON (2015).

De acordo com Lima e Lima (2011), a reciclagem de resíduos é uma atividade que deve ser prioritariamente realizada no próprio canteiro. O adequado seria que a reciclagem e a reutilização dos RCD no canteiro de obra fossem incorporadas ao planejamento e execução das obras de construção civil.

De acordo com Miranda *et al.* (2009), o processo de reciclagem implantado no canteiro de obras reduz a variabilidade do agregado reciclado. Assim, em 2004 a ABNT publicou normas técnicas referentes ao processo de reciclagem do RCD em canteiros.

A prática de reciclagem dos RCD no Brasil e no mundo aumentou devido ao aumento da conscientização com as questões ambientais. Segundo Lima e Lima (2011), o gerenciamento de RCD dentro de canteiro de obras proporciona inúmeras vantagens para uma empresa, tais como:

- Redução do volume de resíduos que serão rejeitados;
- Redução do consumo de recursos naturais;
- Proporciona obras mais organizadas e limpas, reduzindo o número de acidentes de trabalho;
- Melhoria na produtividade com a redução do número de caçambas retiradas da obra;

- Atendimento aos requisitos ambientais em programas como PBQP-H, QualiHab e ISO 14.000;
- Não responsabilidade por passivos ambientais.

Cardoso *et al.* (2016), descreve que é amplamente discutido na literatura sobre os avanços nas usinas de reciclagem, em que progrediram ao ponto de minimizar o teor de contaminantes, sendo esses materiais submetidos a diversas técnicas de processamento que são desenvolvidas para essa finalidade. Contudo, os contaminantes podem ser diversos, tais como: madeira, vidro, plástico, asfalto, metal, solo e, o uso desse termo depende da aplicação pretendida do agregado reciclado que o contém.

As usinas de reciclagem de RCD apresentam muitas semelhanças quando comparadas com as usinas que produzem agregado natural triturado, produzindo agregados reciclados de alta qualidade. Basicamente, na maioria das usinas, o método utilizado para reciclar os RCD é triturar os detritos, produzindo um produto granular de um determinado tamanho de partícula. Na maioria das recicladoras o processo de remoção dos contaminantes é realizado de forma precária, tendo em vista que geralmente trata-se de um produto misto com dificuldade de identificação dos contaminantes. Além do mais, alguns contaminantes não podem ser removidos por processos mecânicos, uma vez que suas características são análogas às do agregado reciclado, sendo assim, necessária a inclusão da separação manual especializada na reciclagem (CARDOSO *et al.*, 2016).

A dificuldade em produzir agregado reciclado de boa qualidade está relacionada à quantidade de argamassa antiga. Realizar dois ou mais estágios de britagem pode auxiliar na diminuição dessa argamassa, além de produzir partículas mais arredondadas. Caso o agregado seja submetido a apenas um processo de britagem primária, esses poderão apresentar altos índices de forma (BARBUDO *et al.*, 2012, apud CARDOSO *et al.*, 2016).

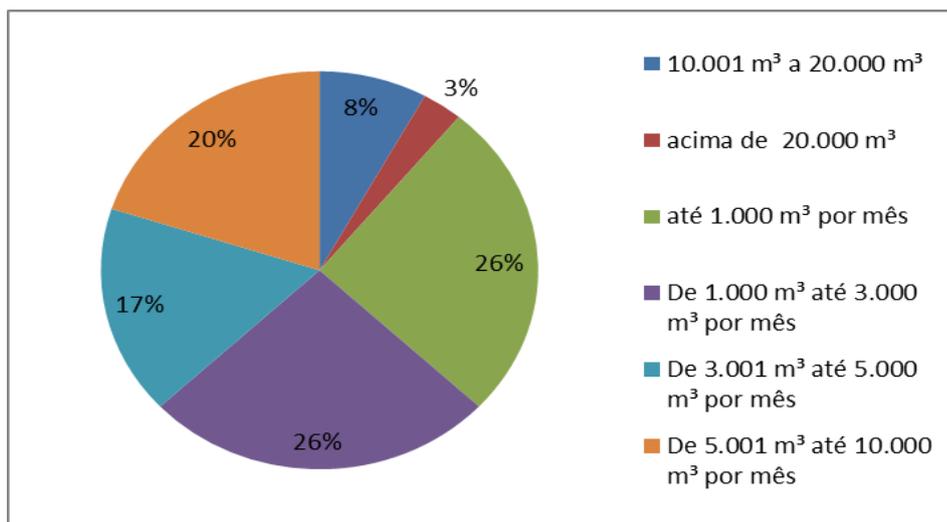
Segundo Miranda *et al.* (2009), após a Resolução CONAMA 307 houve aumento na quantidade de usinas, no entanto o sistema de reciclagem utilizado ainda era simples. Mesmo com o crescimento das usinas, a capacidade de produção de agregados reciclados no Brasil é inferior à geração de RCD no país.

De acordo com o Relatório de Pesquisa Setorial 2017/2018 realizado pela Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos de Construção Civil e Demolição – ABRECON, as usinas de reciclagem de resíduos no Brasil ainda passam por certa resistência, por parte dos consumidores, quanto ao uso de agregados reciclados. Estimou-se que até o final de 2018 a quantidade de usinas de reciclagem de escombros no país seria em torno de 400 unidades (ABRECON, 2018).

De acordo com Frasson e Paschoalin Filho (2017), através de uma pesquisa de opinião, a resistência ao emprego de agregados reciclados pode ser explicado por diversos fatores, tais como: ausência de incentivos fiscais; ausência de conhecimento do público alvo sobre o assunto, principalmente devido à falta de divulgação das diversas vantagens da utilização destes materiais; carência no controle de qualidade eficiente das usinas de reciclagem e; deficiência em especificações para projetos executados por engenheiros e projetistas. Para a resolução destes problemas, os autores destacam que as usinas de reciclagem são fundamentais na produção de agregados com especificações que atendam aos requisitos instituídos nas normas técnicas, já os engenheiros e técnicos são responsáveis por pesquisar as vantagens do uso do agregado em obras de construção e ampliar o seu conhecimento técnico. A ABRECON é responsável pela divulgação das funções e vantagens do agregado reciclado em função do agregado natural e, por estimular o setor público a usar o agregado reciclado em suas obras de construção.

A geração anual de resíduos de construção e demolição no Brasil é de 84 milhões de metros cúbicos, no entanto apenas 17 milhões de metros cúbicos são reciclados pelas usinas. Mesmo assim, houve um aumento de 2% na reciclagem desse material entre os anos de 2013 e 2015, crescendo de 19% para 21%. A Figura 2.4 apresenta um gráfico relacionado ao volume médio de agregado reciclado produzido por mês.

Figura 2.4 – Volume médio de agregado produzido por mês



Fonte: ABRECON (2015).

Ainda de acordo com a pesquisa realizada pela ABRECON (2015), o setor de reciclagem de RCD teve um alto crescimento entre os anos de 2010 e 2014 tendendo, nos anos seguintes, a ocorrer aumento de novas usinas e maior rigor no controle e na geração de

resíduos. A maior concentração de usinas instaladas no país encontra-se no estado de São Paulo, com 54%, seguido dos estados do Rio de Janeiro e do Paraná, cada um com 7% das recicladoras.

De acordo com a ABRECON (2018), a estimativa para o ano de 2019 era que o agregado reciclado atingisse uma quantidade em torno de 5% da totalidade de agregados que são comercializados no mercado da construção civil, em que o valor comercializado é cerca de 10% menor que o do agregado natural.

Conforme Paschoalin Filho *et al.* (2016), a reciclagem dos RCD instaura no setor da construção civil o conceito de economia circular. Assim, as usinas de reciclagem não devem ser consideradas como uma situação para destinação final dos resíduos, mas como o lugar onde esses são reinseridos nas práticas de construção, dando origem a uma cadeia produtiva cíclica.

2.1.7 Propriedades do RCD

O resíduo de construção e demolição é definido como um material heterogêneo e que suas propriedades podem variar de acordo com a sua fonte de origem. No entanto, alguns autores apresentaram características semelhantes entre seus estudos para diferentes materiais de RCD. Motta (2005) realizou uma pesquisa com RCD em que, a maior parte do agregado reciclado é composta por materiais cimentícios e materiais naturais britados. Verificou-se que o agregado reciclado absorve muita água, se comparado aos materiais pétreos convencionais, certamente devido à sua alta porosidade, provocando a necessidade de maior quantidade de água por ocasião da compactação. Este aumento de água pode promover significativa alteração na granulometria do agregado reciclado, provocando alteração do material ao longo de todo o processo.

De acordo com Souza (2015), o valor de absorção do material é uma das questões mais importantes descritas em inúmeras pesquisas, uma vez que o teor de água a ser adicionado na compactação é influenciado diretamente pelo alto valor de absorção do material. Isto provoca consequências na trabalhabilidade do material em campo, dificultando o controle dos parâmetros de compactação.

Ainda conforme Souza (2015) o agregado reciclado tem boa resistência ao desgaste e boa cubicidade, uma vez que o material estudado atende aos limites das especificações brasileiras em relação ao desgaste a abrasão de materiais utilizados em base e revestimento. De acordo com Ron *et al.* (2008, apud Fujii, 2012) o RCD possui maior cubicidade, se

comparado ao agregado convencional, provocando melhor intertravamento entre os grãos compactados.

Leite *et al.* (2011) relatam que a porcentagem de grãos cúbicos aumenta devido à distribuição dos grãos serem bastante alterado no processo de compactação. Este fato provoca aumento na capacidade de carga e na resistência à deformação permanente. Assim, a predominância de partículas cúbicas pode contribuir para a melhor densidade e no aumento da resistência ao cisalhamento.

Arulrajah *et al.* (2014) concluíram em seu estudo que, a coesão para o material analisado é zero e que a capacidade de carga e a resistência ao cisalhamento do RCD são influenciadas pelo arranjo das partículas e pelas forças interpartículas.

A composição química dos resíduos de construção e demolição está diretamente relacionada à sua fração granulométrica. Em relação à natureza de origem do RCD, independente do conteúdo de cerâmica vermelha presente, a composição química dos materiais são semelhantes (ULSEN *et al.*, 2010).

De acordo com Souza (2015), realizando uma comparação entre os valores da caracterização física do RCD com os valores citados na literatura pra agregados naturais, nota-se que o agregado reciclado apresenta valores análogos ou superiores aos mínimos exigidos pelas normas de materiais para obras de pavimentação. Leite *et al.* (2011) consideram o RCD uma adequada opção para materiais de base e sub-base devido à sua alta resistência e comportamento não expansivo.

2.2 RCD aplicado à pavimentação

De acordo com Cardoso *et al.* (2016), os resíduos de construção e demolição começaram a ser utilizados em aplicações geotécnicas, como em camadas de base, sub-base e revestimento, devido à sua distribuição de tamanho reportar a do solo natural.

Em países europeus, na Austrália e nos Estado Unidos, o emprego de agregados reciclados em obras de pavimentação é um método muito disseminado. A utilização do RCD em pavimentação nestes países é principalmente devido às boas propriedades e ao baixo custo de produção e execução da obra, gerando adequadas bases granulares e estabilizadas, além de possuir potencial para ser aplicado em misturas de concreto asfáltico à quente (AMADEI *et al.*, 2011).

De acordo com EC (1999, *apud* Motta, 2005), na construção de pavimentos de países da União Europeia, além dos agregados reciclados de concreto também são utilizadas as frações derivadas de alvenaria em aplicação nas camadas de sub-base.

De acordo com Arisha *et al.* (2016) no Egito e em todo o mundo tem crescido a necessidade de se realizar estudos para avaliar a utilização de resíduos de construção e demolição na construção de pavimentos. Este crescimento se deve principalmente aos benefícios econômicos e ambientais provenientes da utilização de RCD.

Blankenagel e Guthrie (2006, *apud* Souza, 2015) relatam que nos Estados Unidos, o agregado reciclado proveniente do resíduo de construção e demolição apresenta custo inferior se comparado com a brita graduada simples. A diferença do custo entre os agregados é em torno de 30%, assim, a substituição do agregado natural pelo agregado reciclado tem ganhado maiores proporções.

No Brasil, os agregados reciclados são utilizados nos mais variados tipos, tais como: componente de revestimento primário, de base, sub-base e reforço do subleito, proporcionando excelentes resultados no produto final. Segundo Leite *et al.* (2011), diversos estudos admitem que os resíduos de construção e demolição são adequados para ser utilizados como agregados na construção de pavimentos. Dentre esses estudos estão Motta (2005), C.S. Poon, D. Chan (2006), T. Bennert *et al.* (2000), O'Mahony MM (1997).

Conforme Motta (2005), as primeiras experiências referentes ao uso de agregados reciclados em pavimentação no Brasil começaram a ser realizadas em meados da década de 1980. De acordo com O'Mahony MM (1997), a utilização de agregados reciclados em preenchimentos de estradas é um meio de reduzir a quantidade de agregado natural necessária na construção civil e, utilizar materiais secundários em circunstâncias menos exigentes.

O material reciclado utilizado em obras de construção deve ser submetido a testes análogos aos do material natural. O agregado reciclado deve atender a resistência mínima, estabilidade, durabilidade, entre outras especificações, necessárias a qualquer aplicação geotécnica. Além disso, o material não deve apresentar, em sua composição, contaminantes, componentes perigosos e impurezas orgânicas (Gautam *et al.*, 2018).

O agregado reciclado é um material alternativo na aplicação em bases e sub-bases, no entanto a sua utilização proporciona resultados satisfatórios devido a seu comportamento não expansivo e da sua alta resistência. De acordo com Trichês e Kryckyj (2000), os agregados reciclados apresentam características geotécnicas compatíveis para a utilização na construção de obras de pavimentação. Estes agregados são considerados materiais não

plásticos, podendo ser utilizados em regiões com presença de água, devido à possibilidade de causar lama ser praticamente nula.

O uso de agregados reciclados de RCD em camada de base de pavimento é uma alternativa tecnológica bastante consolidada. As vantagens da utilização do RCD na pavimentação, de acordo com Ângulo *et al.* (2002) são:

- Menor custo do processo de reciclagem devido a ser a forma de reciclagem que exige menor utilização de tecnologia;
- Admite a utilização de todos os componentes minerais do entulho (argamassas, tijolos, materiais cerâmicos, areia, etc.), sem necessitar realizar a separação deles;
- Economia de energia no processo de moagem do entulho;
- Possibilidade de utilizar uma maior parcela do entulho produzido;
- A adição do resíduo aos solos saprolíticos proporciona maior eficiência em relação à mesma adição feita com brita. Ao adicionar 20% de RCD ao solo ocorre um aumento de 100% do CBR, enquanto nas adições de brita natural o aumento do CBR só é perceptível com dosagens a partir de 40%.

Na mistura de RCD com agregados naturais é necessário definir os níveis de substituição mais adequados, de acordo com as características do agregado reciclado e do agregado natural. Além disso, a incorporação deste resíduo pode provocar um impacto negativo na rigidez e resistência do solo (CARDOSO, *et al.*, 2016).

A qualidade dos materiais RCD sofre variações consideráveis sendo difícil de ser controladas. De acordo com Forster (1997, apud Behiry, 2013), para utilizar o agregado de concreto reciclado em camadas de base e sub-base é necessário considerar sua graduação, angularidade, solidez e solubilidade. A graduação do agregado varia caso a base seja drenável ou densa, devido em bases drenáveis as graduações determinarem manuseio adicional de resíduos finos para evitar entupimento. Em relação à angularidade do agregado reciclado, ela pode aumentar o esforço necessário para compactar o material granular. A solidez deve ser discernida com precisão garantindo que o agregado atenda aos requisitos de carga da estrutura do pavimento. Em relação à solubilidade, alguns agregados reciclados de concreto podem ser dissolvidos na água passando pelo sistema de pavimentação, podendo aumentar o pH das águas subterrâneas.

Conforme Cardoso *et al.* (2016), é necessário definir a camada em que será incorporado o agregado reciclado (AR), para assim, definir as propriedades que são relevantes para o bom desempenho do pavimento, bem como qual AR é mais apropriado.

2.2.1 Comportamento do RCD em Ensaios de Laboratório

Para a utilização de agregados em obras de pavimentação, sejam estes naturais ou reciclados, é necessário a realização de diversos ensaios de laboratório, tais como: ensaios de caracterização, compactação, Califórnia Bearing Ratio (CBR), dentre outros. O ensaio de compactação, de acordo com Machado e Machado (2009), consegue melhorar as características do solo através de processo mecânico, promovendo aumento de resistência e diminuição da compressibilidade, assim, tornando-o mais estável e adequando o uso do solo local a obras de pavimentação.

O CBR é um ensaio difundido mundialmente e o valor obtido é utilizado como embasamento para projetos de pavimentação, uma vez que serve como medida de resistência para analisar o comportamento das camadas do pavimento (PREUSSLER, 2007). Diversos fatores podem influenciar o resultado obtido neste ensaio, tais como: tipo de solo, limites de Atterberg, permeabilidade, densidade específica seca máxima, umidade ótima, dentre outros (TALUKDAR, 2014).

As condições de compactação e o comportamento do material compactado estão diretamente relacionados às propriedades dos agregados. Assim, é necessário analisar e comparar a eficiência do agregado reciclado em relação ao agregado natural no comportamento do material compactado. De acordo com Cardoso *et al.* (2016), ao compactar um agregado reciclado suas propriedades podem sofrer alterações, assim, é necessário que a quantidade de testes experimentais para estes agregados seja maior do que a quantidade de testes para agregados naturais. Além do mais, a compactação deve ser realizada de acordo com a variabilidade dos agregados reciclados.

Existem diversos tipos de materiais que compõem os agregados reciclados. Dentre estes, o concreto reciclado é recomendado na aplicação em pavimentos de alto desempenho, uma vez que os agregados compostos por materiais de alvenaria triturada (RMA) podem ser aplicados em camadas de pavimento que exigem menores condições de resistência e tamanho. O pavimento de asfalto recuperado (RAP) é um material, que quando compactado, necessita de menor quantidade de água, quando comparado com o RCA e o RMA. Essa diferença de teor de água entre os tipos de agregados se deve ao fato de que, a porosidade e as propriedades de absorção são distintas para cada tipo (CARDOSO, *et al.*, 2016).

Conforme Vegas *et al.* (2011), ao analisar certos agregados reciclados foi verificado que a maior fração destes materiais é composta por concreto e material cerâmico. A

porcentagem de gesso presente nos agregados é inferior a 1% e a quantidade de matéria orgânica, como madeira, papel e plástico, é inferior a 0,8%.

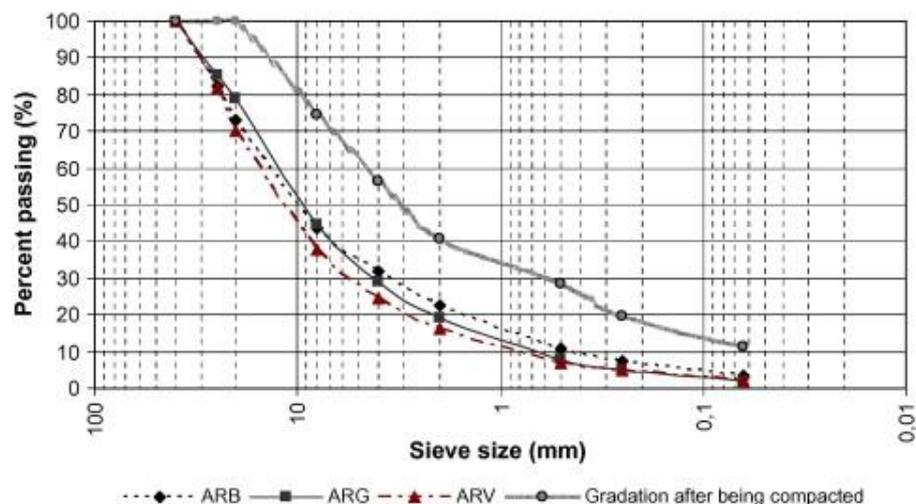
De acordo com Arulrajah *et al.* (2012), diversos autores discutiram sobre a aplicação geotécnica de agregados de concreto reciclado e recomendam que este agregado pode ser utilizado, sem causar danos, em sub-bases de pavimentos. No entanto, conforme Arulrajah *et al.* (2011), caso seja utilizado o tijolo triturado reciclado em obras rodoviárias, é necessário que se obtenha baixos níveis de umidade para assim, proporcionar desempenho satisfatório.

2.2.1.1 Mudança nas características físicas após a compactação

De acordo com Leite *et al.* (2011), as características físicas do agregado reciclado são afetadas pela composição e pela energia de compactação utilizada. Energias de compactação intermediária e modificada podem promover esmagamento e quebra parciais do RCD e, após a compactação, ocorrer mudança na distribuição do tamanho das partículas e aumento dos grãos cúbicos.

Conforme Vegas *et al.* (2011), os agregados reciclados apresentam distribuição de tamanho contínua, em que a porcentagem de partículas finas é inferior a 30%. No entanto, durante o processo de compactação a distribuição granulométrica inicial deste material é alterada, havendo acréscimo na quantidade de finos de materiais menos resistentes, tais como: gesso e pasta de cimento. A Figura 2.5 apresenta curvas granulométricas em que, ARB e ARV são agregados reciclados mistos e ARG são agregados reciclados mistos com pouca presença de material cerâmico.

Figura 2.5 – Curvas de distribuição de tamanho de partícula de agregados reciclados mistos.



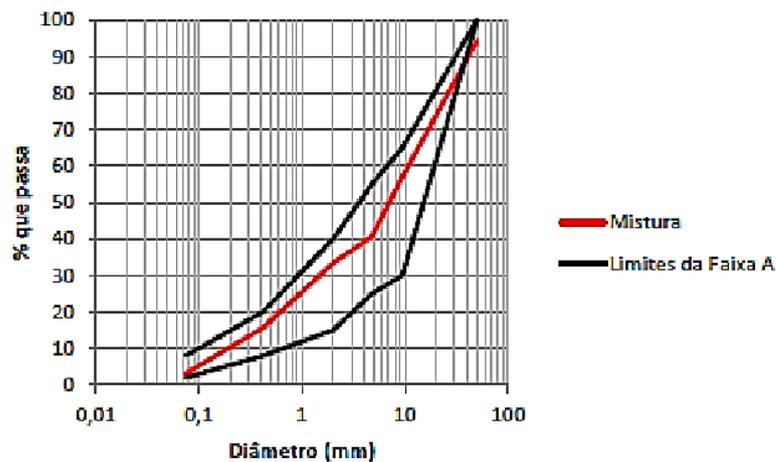
Fonte: Vegas *et al.* (2011).

Durante o processo de compactação é importante obter agregados com altos valores de densidade, visto que eles proporcionam melhores desempenhos quando aplicados em obras de pavimentação. No entanto, a presença de argamassa antiga aderida no agregado de concreto reciclado faz com que a resistência ao esmagamento e a densidade diminuam, e a absorção de água aumente (Cardoso *et al.*, 2016).

Diferente dos agregados naturais, a qualidade dos materiais de RCD sofrem variações consideráveis sendo difícil de ser controladas. De acordo com Silva *et al.* (2014 apud, Cardoso *et al.*, 2016), as propriedades do agregado de concreto reciclado (RCA) está relacionada com as propriedades do concreto fonte (concreto de alta e baixa resistência). Concreto com baixa relação água/cimento, ou seja, concreto de alta resistência, resultará em agregados com altos valores de densidade seca, baixa absorção de água e maior resistência à fragmentação, isso devido à sua baixa porosidade, quando comparados com os concretos de baixa resistência. A sua qualidade também pode ser estabelecida pela quantidade de argamassa residual presente em sua composição. Assim, quanto maior for a porcentagem de argamassa residual, pior vai ser o desempenho mecânico do agregado de concreto reciclado.

Trannin *et al.* (2019) realizaram a análise de misturas de agregados reciclados em distintas proporções para atender às condições prescritas nas normas do DNIT e do DER. Todas as misturas atenderam aos limites prescritos nas normas. A Figura 2.6 apresenta a Mistura que atende à faixa A de limite de distribuição granulométrica do DNIT 141/2010.

Figura 2.6 – Curva granulométrica de misturas de agregados reciclados

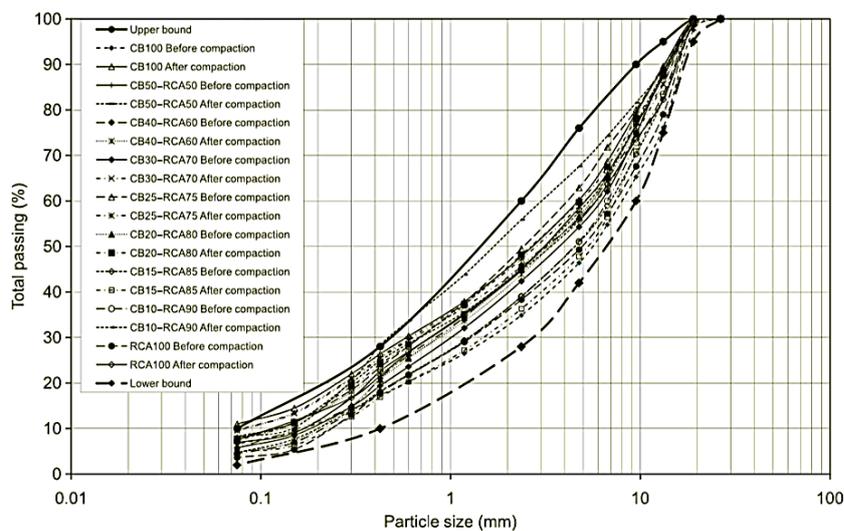


Fonte: Trannin *et al.* (2019).

Conforme Arulrajah *et al.* (2012), após a compactação dos agregados ocorreu uma mudança nas curvas de classificação, isso significa que aconteceu quebra dos grãos durante o processo de compactação. A quebra dos grãos está associada ao teor de alvenaria triturada

(RMA) presente nas amostras e assim, um máximo de 50% deste resíduo pode ser utilizado para conservar uma boa classificação após a compactação. Mesmo assim, os limites de classificação das amostras de alvenaria triturada, antes e após da compactação, estão dentro dos limites para camadas de sub-base, especificados pelas autoridades estaduais. A Figura 2.7 apresenta as curvas granulométricas para diversas misturas com várias porcentagens de concreto triturado (RCA) e RMA.

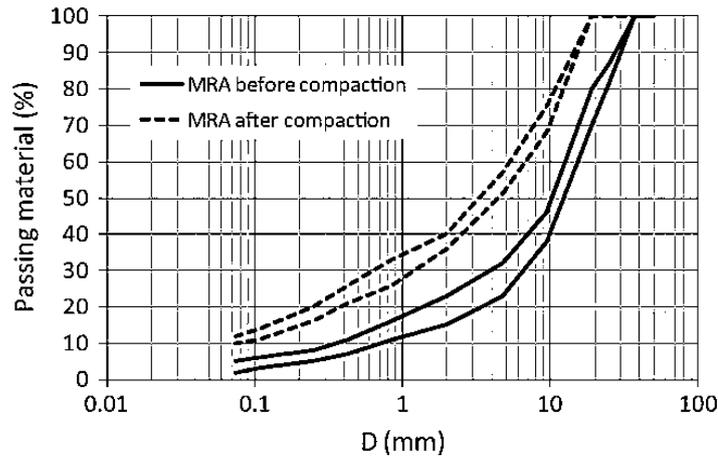
Figura 2.7 – Curvas granulométricas para misturas de resíduos de concreto triturado com alvenaria triturada.



Fonte: Arulrajah et al. (2012).

Cardoso *et al.* (2016) também apresentam as mudanças na curva granulométrica antes e após a compactação quando utilizado o resíduo de alvenaria triturada. Durante a compactação os fragmentos tendem a se esmagar ou quebrar, assim, os diâmetros diminuem e ocorre um rearranjo na distribuição das partículas. A porcentagem de finos pode aumentar em até 7%, como mostrado na Figura 2.8, a curva “após a compactação” apresenta maior porcentagem de material passante, para cada diâmetro de partícula, quando comparado com as curvas “antes da compactação”.

Figura 2.8 – Curvas granulométricas antes e após a compactação do MRA (alvenaria triturada).



Fonte: Cardoso *et al.* (2016), adaptado de Fernandes *et al.* (2009).

A curva granulométrica antes e depois da compactação é comprometida pelo tamanho e a forma do agregado. Cardoso *et al.* (2016), analisaram diversas pesquisas sobre o uso de RCD em obras geotécnicas e realizou uma comparação entre o uso de agregado natural (AN) e reciclado (AR). Em relação ao tamanho das partículas, o agregado reciclado apresenta maior quebra de grãos e geração de finos durante a compactação, e é dependente do processo de trituração. A forma e a rugosidade do AN são definidas pelo tipo de rocha, enquanto que no AR são definidas pelo tipo do material de origem e do processo de esmagamento. Os agregados reciclados são menos homogêneos e apresentam maior absorção de água, se comparado aos agregados naturais, no entanto os AN apresentam maior densidade. Os agregados reciclados apresentam menor força de esmagamento e a resistência é menor quando são compostos por alvenaria, do que quando apresenta partículas de concreto.

Ayan *et al.* (2014), realizaram um estudo para avaliar o comportamento de agregados reciclado em misturas de sub-base. Ao realizar misturas de 100% de concreto reciclado (RCA), 100% de agregado natural (AN) e, 50% de agregado de concreto reciclado com 50% de pavimento asfáltico recuperado (RAP) foi possível observar que, durante a compactação, as partículas de RCA tiveram maior fragmentação quando comparadas com o AN e o RAP. Esse comportamento pode ter sido consequência da diminuição da densidade seca e do aumento da absorção de água, devido ao aumento da porcentagem de finos e, da presença de argamassa aderente às partículas no RCA, formando uma camada porosa e rachada. O cimento residual absorve a água livre durante o processo de compactação. A distinção das propriedades do RAP e do RCA é que, no primeiro, respectivamente, os agregados são

revestidos com betume formando um material de maior flexibilidade e menor possibilidade de quebra, se comparados com o RCA.

De acordo com Vegas *et al.* (2011), a resistência à fragmentação de um agregado está diretamente relacionada com a porcentagem de material cerâmico presente em sua composição. Assim, quanto maior for a quantidade de cerâmica no agregado, maior será sua resistência à fragmentação. Com isso, a geração de finos cerâmicos tem um efeito positivo na consolidação do material compactado, uma vez que, na presença de água, estes induzem reações pozolânicas com o hidróxido de cálcio no concreto.

2.2.1.2 Características após compactação e CBR

Melbouci (2009) realizou, durante a compactação, uma análise do comportamento de agregados reciclados misturados com porcentagens de areia, tijolo e cimento. Durante o ensaio de CBR o rompimento foi realizado em duas condições: imediato e após os quatro dias imersos em água. Assim, pode-se verificar que os valores do CBR, das misturas com tijolo triturado, foram maiores para a condição imediata, devido à sensibilidade do tijolo à água. Para as misturas com RCA, os valores de CBR foram maiores quando o rompimento ocorreu após imersão em água.

Vegas *et al.* (2011), relatam que os agregados reciclados apresentam umidade ótima e densidade específica máxima semelhante às de solos naturais. Porém, os valores das umidades podem aumentar com o aumento do conteúdo cerâmico e de materiais à base de cimento. Além disso, com a geração de finos, devido ao material cerâmico e a fragmentação da argamassa, pode haver maiores densidades de compactação. Os valores do CBR também estão associados à presença de material cerâmico e concreto no agregado reciclado. O aumento do CBR está relacionado com as propriedades hidráulicas do cimento presente no concreto reciclado e, com as reações pozolânicas.

Na pesquisa realizada por Ayan *et al.* (2014), ensaios de compactação foram executados e, foi possível observar que o uso de agregados com 100% de resíduos tem maior umidade ótima e menor densidade seca, se comparados com os AN. No entanto, ao utilizar a mistura de 50% de RCA + 50% de RAP a umidade diminui e a densidade seca aumenta, quando comparado com a mistura de 100% de RCA. Esse fator pode ser explicado devido à facilidade com que as partículas de RCA foram quebradas no processo de compactação.

Com os resultados dos ensaios de CBR, Ayan *et al.* (2014), observam que, o valor de CBR da mistura com 100% de RCA tem maior probabilidade de sofrer variação no ramo

úmido da curva, se comparado ao ramo seco. No entanto, o CBR para esta amostra foi superior ao recomendado para camadas de sub-base. As misturas com 50% de RCA + 50% de RAP obtiveram valores de CBR inferiores ao recomendado para aplicação em sub-base. Para apresentar resultados mais satisfatórios é necessário que ocorra alguma alteração na distribuição do tamanho das partículas da mistura.

De acordo com os estudos analisados por Cardoso *et al.* (2016), ao comparar o uso de amostras com 100% de resíduo, seja este RCA ou RAP, 100% de agregado natural (AN) e misturas de resíduo com solo, é possível observar que a incorporação do AN nas misturas apresentou declínio no desempenho causado pelo agregado reciclado. No entanto, mesmo com a mistura, as propriedades do agregado reciclado influenciam o material compactado. Ao analisar os valores de CBR para os diversos tipos de agregados reciclados observa-se que os valores são inferiores aos obtidos para os agregados naturais. Dentre os agregados reciclados, o RAP é o que apresenta os menores valores de CBR podendo não ser adequado para camadas de sub-base. Contudo, na pesquisa de Vegas *et al.* (2011), os valores do RAP foram maiores, quando comparados com o agregado de alvenaria. Assim, de acordo com a norma brasileira NBR-15.116 (2005), a maioria dos resíduos analisados pelas pesquisas pode ser utilizada em base e sub-base de pavimentos, desde que o conteúdo de alvenaria triturado seja controlado.

2.2.2 Outras Pesquisas com RCD Destinados a Obras de Pavimentação

Trannin *et al.* (2019) avaliaram em seu estudo o uso de agregados reciclados de RCD, provenientes do estado de São Paulo, em obras de pavimentação. As amostras apresentam elevada heterogeneidade e foram submetidas á diversos ensaios laboratoriais. As amostras, em relação aos resultados do CBR, podem ser utilizadas em pavimentação como reforço do subleito, sub-base e revestimento primário, com exceção do uso em base de pavimento quando aplicado a energia normal. A energia de compactação influencia no comportamento do agregado e nas propriedades físicas. Os resultados obtidos pelos autores demonstraram que todas as misturas de agregados reciclados atendem ás normas brasileiras NBR 15115/04, NBR 15116/04, DNIT 141/010 e a DER-SP ET-DE-P00/010, proporcionando excelente potencial de uso em camadas do pavimento.

Arisha *et al.* (2016), relatam que no Egito os resíduos de construção e demolição não são muito utilizados na construção de pavimentos e geralmente são despejados nas laterais dos canais, estradas secundárias e na entrada de cidades e vilas. Assim, esses autores têm como objetivo pesquisar a adequação do uso de misturas de RCD e tijolos de alvenaria de

argila reciclada (RCM) na construção de pavimentos no Egito e avaliar o seu efeito através de uma série de ensaios de laboratório para investigar as propriedades dos resíduos para uso na construção de pavimentos. Dentre os ensaios estão: classificação AASHTO, gravidade específica, absorção de água, limites de Atterberg, LAA, compactação modificada de Proctor, CBR, valor de pH e permeabilidade, ensaios avançados de cisalhamento triaxial estático e RLTT e módulo de elasticidade. As proporções das misturas RCD /RCM foram 100/0, 90/10, 80/20, 70/30, 55/45, 40/60, 20/80 e 0/100% da massa total agregada.

Ainda segundo Arisha *et al.* (2016), geralmente o CBR diminui com o aumento do RCM e que a mistura com 100% de RCD obteve o maior valor de CBR. Os valores de CBR das misturas foram superiores ao que os especificados pelo ECP (2008) para bases de 80%, com exceção das misturas RCD/RCM de 20/80 e 0/100, que podem ser usadas como sub-base. Em relação ao Módulo de Resiliência (MR), todas as amostras apresentaram MR maior que 150 MPa. A resistência ao cisalhamento das misturas investigadas foi relativamente similar e não foi significativamente afetada pelo conteúdo de RCM. Assim, tomando como base o MR, CBR, LAA, a amostra de 100% de RCD é recomendada para ser utilizada como material de base, enquanto que as outras amostras são recomendadas para ser utilizadas como material de sub-base.

Cameron *et al.* (2012) e Azam e Cameron (2013) realizaram pesquisas com a utilização de misturas RCD com 10%, 20% e 30% de alvenaria triturada. Esses autores conseguiram chegar aos resultados de que essas misturas não atendem aos requisitos para utilização de base, no entanto podem ser utilizados como material de sub-base. Os valores de MR para as três misturas foram superiores a 300 MPa.

Com a finalidade de utilizar os resíduos como material de sub-base, Poon *et al.* (2006) realizaram uma série de ensaios de laboratório com diferentes misturas comparando-as com os materiais naturais utilizados como material de sub-base. Os valores de CBR obtidos sofreram diminuição com o aumento do percentual de tijolos de alvenaria de argila reciclada (MCR). Assim, os autores concluíram que as misturas estudadas eram adequadas para ser utilizadas em sub-base, no entanto o CBR mínimo tem que ser de 35%.

Jiménez *et al.* (2011), realizaram a análise de diversos tipos de agregados reciclados, como o agregado de concreto reciclado (RCA) e agregados reciclados de detritos mistos, comparando com o agregado natural. Estas amostras foram submetidas a ensaios de CBR em condição de imersão por quatro dias, com sobrecarga de 4,5 kg. Como resultado, os autores demonstram que os agregados naturais apresentam maiores valores de CBR (152%), enquanto o RCA apresenta valores entre 97% e 138% e, o agregado de detritos mistos apresenta valores

entre 62% e 94%. No entanto, os agregados reciclados apresentam uma alta capacidade de carga. Assim, os RCA atendem a todas as especificações para o uso em camadas de sub-base, de acordo com as especificações técnicas da Espanha para construção de estradas, enquanto alguns agregados mistos apresentaram especificações inferiores devido à baixa resistência à fragmentação e ao elevado teor de enxofre.

Leite *et al.* (2011), relatam que no Brasil ocorre a deposição ilegal de resíduos de construção e demolição causando sérios problemas. Assim, os autores propõem aferir a viabilidade do uso de RCD em aplicações de pavimentos. Uma série de ensaios de laboratório foi realizada: distribuição granulométrica, forma dos grãos, absorção de água, Índice de Suporte Califórnia (CBR), MR e deformação permanente. Os resultados dos ensaios mostraram que a distribuição dos grãos é bastante alterada, principalmente no processo de compactação, fazendo com que aumente a porcentagem de grãos cúbicos, melhorando a capacidade de carga, o módulo de resiliência e a resistência à deformação permanente. A absorção de água é muito variável e depende da natureza dos materiais. Os resultados do módulo de resiliência dos agregados RCD, quando comparados com uma pedra britada graduada padrão, obteve um comportamento similar. O uso de energia modificada provoca um aumento substancial na capacidade de suporte do agregado RCD, comparado aos valores de CBR obtidos com energia intermediária. Assim, a composição e a energia de compactação influenciam no comportamento físico e mecânico dos agregados de RCD. A deformação permanente dos agregados de RCD depende dos níveis de tensão e do nível de compactação e, esses fatores são considerados na aplicação dos resíduos na camada de base, uma vez que altos níveis de tensão são transferidos para a base. Assim, os agregados de RCD podem ser utilizados em camadas de base e sub-base em estradas de baixo volume.

Arulrajah *et al.* (2014), realizam uma avaliação dos resíduos de construção e demolição através de ensaios de laboratórios para a sua utilização em pavimentos. Os ensaios realizados foram: Compactação, CBR, Compressão não confinada (UCS), LA, Cisalhamento direto e ensaios triaxiais DST e consolidado drenado (CD). Foram utilizados seis materiais de RCD: agregado de concreto reciclado (RCA), alvenaria triturada (RMA), pavimento asfáltico reciclado (RAP), resíduos de rocha de escavação (WR), e vidro reciclado (FRG e MRG). Como resultado foi verificado que, para uma mesma energia de compactação, o resíduo WR apresentou maior densidade seca e o FRG apresentou a menor densidade seca. A resistência individual dos três materiais de RCD (WR, FRG e MGR) é considerada elevada se comparadas aos outros materiais RCD (RMA, RAP e RCA). Com base nos resultados do ensaio de LA, os materiais utilizados no ensaio atendem aos requisitos de durabilidade. Em

relação ao ensaio UCS, o RCA foi o que apresentou maior valor de UCS, no entanto seu CBR não é muito alto. Em relação ao ensaio de CBR, o resíduo que teve maior valor de CBR foi o WR. O RAP apresenta o menor valor de CBR, devido ao betume fixado nas partículas possuir baixa rigidez.

Ainda de acordo com Arulrajah *et al.* (2014), os resultados dos ensaios triaxiais DST e CD em RCD indicam: uma característica típica de solos de granulação grossa, quando a resistência ao cisalhamento é induzida pela dilatância, e o comportamento de endurecimento de tensão associadas à dilatância. Os resíduos RMA, RCA e WR apresentam o primeiro tipo de resposta ao cisalhamento, enquanto que o RAP, MRG e FRG apresentam o segundo. A resistência ao cisalhamento, juntamente com a capacidade de carga dos materiais RCD são influenciadas pelo arranjo das partículas e as forças interpartículas. Todos os materiais analisados possuem coesão zero no plano (q, p'). O resíduo WR apresenta o maior ângulo de atrito de pico efetivo e as maiores taxas de dilatação para todas as tensões médias efetivas. Assim, Arulrajah *et al.* (2014) conclui que os materiais analisados podem ser utilizados em aplicações de base e sub-base de pavimentos. No entanto, apenas o RCA, RMA e WR atendem aos requisitos de propriedades de resistência física e de cisalhamento e o RAP, FRG e MRG precisam ser misturados com agregados de maior qualidade para poderem ser utilizados em base e sub-base.

Mohammadiniaa *et al.* (2017) realizaram uma pesquisa com materiais granulares reciclados de RCD estabilizados com cal hidratada para melhorar as propriedades mecânicas e a durabilidade desses materiais residuais sob cargas compressivas e repetidas e, utiliza-los em aplicações de base e sub-base de pavimento. Os ensaios realizados foram: distribuição de tamanho de partícula, CBR, Proctor modificado, teste triaxial de carga repetida e ensaios de compressão não confinada (UCS), com cal variando de 1% a 5%. Esta pesquisa também propõe um novo modelo para determinar o módulo de resiliência de materiais RCD estabilizados com cal, considerando a temperatura de cura e a quantidade de cimentação. Os resíduos verificados foram: o agregado de concreto reciclado (RCA), o pavimento asfáltico recuperado (RAP) e o agregado de alvenaria triturada (RMA).

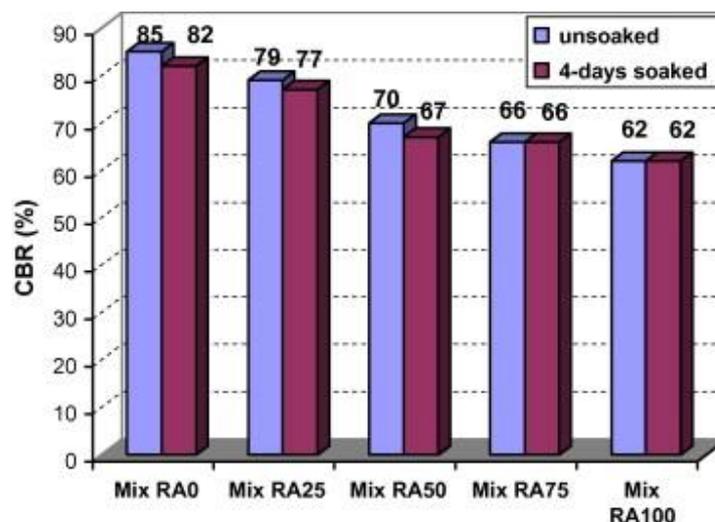
Os resultados do MR dos materiais estabilizados com cal aumentaram de acordo com o aumento no conteúdo de cal e da temperatura de cura. O efeito da temperatura foi avaliado e verificou-se que o tratamento térmico da amostra estabilizada com cal acelerou a reação de calcário e, por conseguinte, elevou a resistência da amostra estabilizada. Os ensaios realizados indicaram que o RCA estabilizado com cal e o RMA são alternativas viáveis para a

construção de camadas de base e sub-base de pavimentos, no entanto o RAP não se adequava aos requisitos para tal aplicação (Mohammadiniaa *et al.* 2017).

Behiry (2013) relata em seu estudo que o concreto triturado representa a maior parte dos resíduos de construção e demolição no Egito. Assim, é necessário conhecer melhor o comportamento mecânico e a durabilidade de misturas recicladas, a fim de avaliar se elas são viáveis para serem utilizadas como material granular nas camadas de base e/ou sub-base dos pavimentos. A mistura do resíduo reciclado tratado com cimento também é avaliada para verificar a melhoria no desempenho mecânico. Para estes fins, os autores realizaram ensaios de laboratório, tais como: Compactação, CBR, teste de carregamento de placa, teste de compressão não confinada e resistência à tração.

Ainda de acordo com Behiry (2013), em seus resultados foi verificado que os agregados naturais de calcário possuem o maior valor de densidade, enquanto o agregado de concreto triturado apresenta o maior valor de absorção de água. Em relação ao CBR, as misturas atendem aos padrões egípcios das rodovias, onde os valores mínimos de CBR para as camadas de base e sub-base são de 50% e 25%, respectivamente. Contudo, o agregado natural possui o maior valor de CBR (85%), enquanto, ao adicionar o conteúdo de concreto reciclado o valor de CBR diminui gradualmente. A Figura 2.9 apresenta essas relações.

Figura 2.9 – Relação do CBR com a adição do resíduo



Fonte: Behiry (2013).

Em relação à deformação total, quanto maior for a quantidade de resíduo, menor será a relação de deformação plástica. O MR máximo foi atingindo para a amostra com 75% de resíduo. O tratamento com cimento melhora o módulo resiliente e a deformação plástica. A

resistência à compressão não confinada do agregado de concreto reciclado é maior que para o agregado natural, principalmente quando ocorre a adição do teor de cimento. Assim, a aplicação de agregado de concreto reciclado em bases e sub-bases de pavimentos é apropriada.

Pérez *et al.* (2013) propõem em sua pesquisa, estudar a eficiência do uso de resíduo de concreto tratado com cimento na construção de uma estrada na Espanha. As propriedades dos materiais foram estudadas através de ensaios de laboratórios para avaliar o comportamento mecânico. Uma aplicação real foi realizada, executando uma estrada em Málaga – Espanha, em que duas seções foram construídas, uma com o resíduo tratado com cimento, outra com o agregado natural tratado com cimento. Como resultado, foi verificado que o agregado de resíduo reciclado teve maior nível de absorção de água, em relação ao agregado natural, no entanto os valores de densidade foram maiores. De acordo com o valor de referência do Proctor modificado, o valor necessário de compactação é de 98%, assim, as seções construídas com os dois agregados obtiveram valores superiores. Em relação à resistência a compressão, o agregado reciclado teve menor valor do que o agregado natural, no entanto seus valores são próximos, 10,15 MPa e 10,95 MPa, respectivamente.

Ainda de acordo com Pérez *et al.* (2013), a camada tratada com agregado reciclado apresentou melhor resposta ao deflectômetro de impacto do que aquele em que o agregado natural foi utilizado. Isso se deve ao fato de que no processo de compactação a granulação do agregado reciclado é parcialmente modificada, melhorando sua capacidade de carga. Assim, caso exista um controle da produção do agregado reciclado, bem como uma boa execução da estrada, é possível utilizar o agregado reciclado em camadas de sub-base de pavimentos rodoviários.

Cabalar *et al.* (2016), estudaram o uso de resíduos cerâmicos com solo argiloso (CL) para ser utilizado nos projetos de subleito de pavimentos. Através de uma série de ensaios laboratoriais, tais como: CBR, resistência à compressão simples, compactação e adensamento, foi possível verificar que ao adicionar o resíduo ao solo, diversas propriedades se alteravam. A água tem grande influencia no comportamento dos grãos. A adição dos resíduos provocou diminuição nos limites de liquidez e plasticidade, no entanto, o peso unitário seco máximo aumenta devido à elevada gravidade específica dos resíduos. O aumento dos resíduos na mistura provoca aumento no valor do CBR, no entanto o valor da compressão simples diminuiu. A compressibilidade do material reduziu, devido a redução dos vazios, assim, a utilização de resíduos cerâmicos é uma boa alternativa na estabilização de solo a ser usado em camadas de subleito.

Li *et al.* (2017), avaliaram em seu estudo um projeto de uma rodovia da China através de um extenso conjunto de ensaios de laboratório e de compactação de campo, para assim determinar as características físicas e mecânicas do uso do RCD. Através de ensaios de resistência a compressão, testes de deflexão e CBR, os autores encontraram que o RCD tem uma característica de alta resistência e estabilidade significativa. O teste de detecção de campo mostrou que a deflexão média do aterro foi de 0,66 mm e o módulo resiliente foi de 162,7 MPa, atendendo aos requisitos das especificações relevantes. Assim, o uso de RCD para preenchimento de subleito é bastante viável e, foi visto que quando colocado em prática houve economia nos custos de construção e reduziu o uso da terra e os impactos ambientais.

2.2.3 Pesquisas com o RCD no estado do Rio Grande do Norte

O Resíduo de Construção e Demolição (RCD) utilizado nesta pesquisa, como também o utilizado em diversas outras pesquisas no estado do Rio Grande do Norte, são coletados na empresa privada Duarte Usina de Reciclagem de RCD LTDA. Diversos autores realizam em suas pesquisas análises químicas e microscópicas dos resíduos de construção e demolição provenientes desta empresa. A Tabela 2.2 apresenta alguns resultados do ensaio de FRX para este RCD encontrado na literatura.

Tabela 2.2 – Resultados da literatura sobre o RCD em questão

Fonte	Composição Química									
	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	TiO ₂	SrO	MnO
Pederneiras (2017)	40,40	29,80	10,18	8,90	0,77	5,10	1,60	0,96	1,20	-
Sena Neto (2018)	39,3	29,7	20	3,7	2,1	1,4	1,31	1,14	0,7	0,2
Queiroz Neto (2019)	24,86	49,30	8,25	9,65	-	2,89	1,34	-	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

De acordo com a Tabela 2.2 é possível observar a heterogeneidade do material. Os valores do óxido de sílica (SiO₂) e do óxido de cálcio (CaO) são semelhantes entre os resultados de Pederneira (2017) e Sena Neto (2018). No entanto, Para Queiroz Neto (2019), esses valores são praticamente invertidos. Para Pederneiras (2017) o óxido de sílica é o que apresenta maior percentual, no entanto esse valor é inferior ao encontrado pelo autor para o solo natural.

De acordo com Pederneiras (2017), o RCD utilizado em sua pesquisa é composto principalmente por resto de concreto, em que os materiais cerâmicos correspondem a 10% do total e os materiais contaminantes a 8%. Com base no DRX, o resíduo apresenta fases cristalinas de quartzo e calcita. Outros minerais encontrados são a muscovita, gipsita e a caulinita. Os resultados do MEV apontam que o RCD possui arestas e vértices com textura áspera e rugosa. Não possui forma definida e apresenta alto teor de materiais pulverulentos. A presença de compostos cimentícios hidratados pode ser a causa do alto teor de óxido de cálcio presente no material. Argamassa antiga aderida na superfície de partículas do RCD pode gerar altas porcentagens de calcita e ser a razão da textura áspera e rugosa do resíduo.

Conforme Sena Neto (2018), ao realizar o ensaio MEV para o RCD utilizado é possível observar as seguintes características: grãos arredondados e grãos achatados e pouco alongados, pouca uniformidade no tamanho dos grãos, rugosidade na superfície dos grãos e porosidade. De acordo com os ensaios EDS é perceptível a predominância de percentuais de alumínio e ferro na composição do RCD, principalmente devido a presença de materiais cerâmicos. A presença de materiais cerâmicos pode explicar o alto desgaste do ensaio de abrasão LA, devido a esses materiais apresentarem baixa resistência ao sofrer solicitações de esforços.

De acordo com Queiroz Neto (2019), a composição mineralógica do RC utilizado em sua pesquisa é muito complexa devido à alta variabilidade cristalina e amorfa de sua composição (partículas de argamassa, concreto e materiais cerâmicos).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo se fundamenta na utilização de resíduos de construção e demolição de obras (RCD) associados a três solos típicos de diferentes regiões do Estado do Rio Grande do Norte para aplicação em camadas do pavimento rodoviário, comparando os resultados para as diversas proporções de resíduos. As descrições dos materiais utilizados e a metodologia adotada na pesquisa são mencionadas a seguir.

3.1 Materiais

3.1.1 Solo

As amostras de solo utilizadas nesta pesquisa foram coletadas em jazidas de diversas regiões do estado do Rio Grande do Norte, com a finalidade de abranger os solos característicos das principais regiões do estado. Assim, foram escolhidas três regiões: médio oeste, agreste e seridó. A Figura 3.1 apresenta o estado do Rio Grande do Norte e a localização das três regiões.

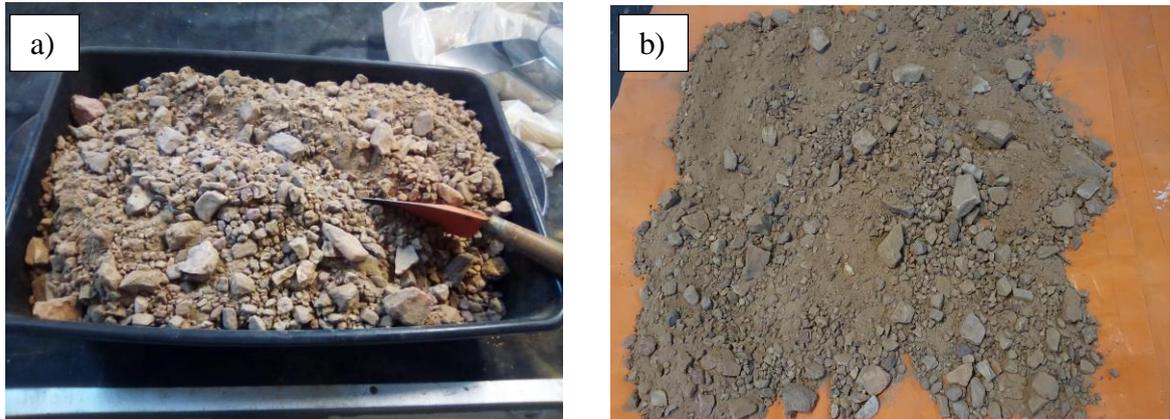
Figura 3.1 – Localização das regiões do estado do RN



Fonte: IBGE (2017).

A amostra de solo da região Médio Oeste, denominada de “Solo 01”, foi coletada na cidade de Caraúbas/RN, numa jazida localizada a 7 km da sede do município. A Figura 3.2 apresenta ilustrações da amostra de solo.

Figura 3.2 – a) Detalhe do Solo 01 oriundo da jazida da cidade de Caraúbas/RN, b) secagem prévia do Solo 01 em laboratório.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

A amostra de solo da região Agreste, denominada de “Solo 02”, foi coletada no município de Macaíba/RN, região metropolitana de Natal, próximo a um trecho da BR-101. A Figura 3.3 ilustra a coleta do material na jazida e a secagem prévia do solo até próximo da umidade higroscópica.

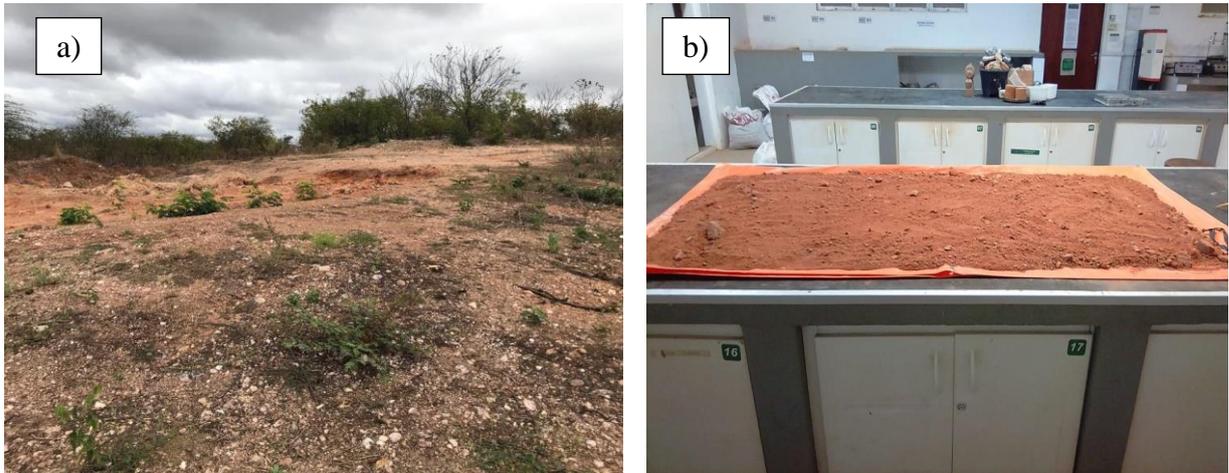
Figura 3.3 – a) Coleta do Solo 02 próximo a um trecho da BR - 101, b) Detalhe ilustrativo entre a amostra seca e úmida do Solo 02.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

O solo da região do Seridó, denominado de “Solo 03”, foi coletado no município de Ipueira/RN situado a uma latitude de $6^{\circ}49'13''$ sul e a uma longitude $37^{\circ}12'16''$ oeste. A Figura 3.4 ilustra a jazida e o solo em secagem prévia no laboratório até próximo da umidade higroscópica.

Figura 3.4 – a) Jazida do solo 03 no município de Ipueira/RN, b) Secagem prévia da amostra em laboratório.

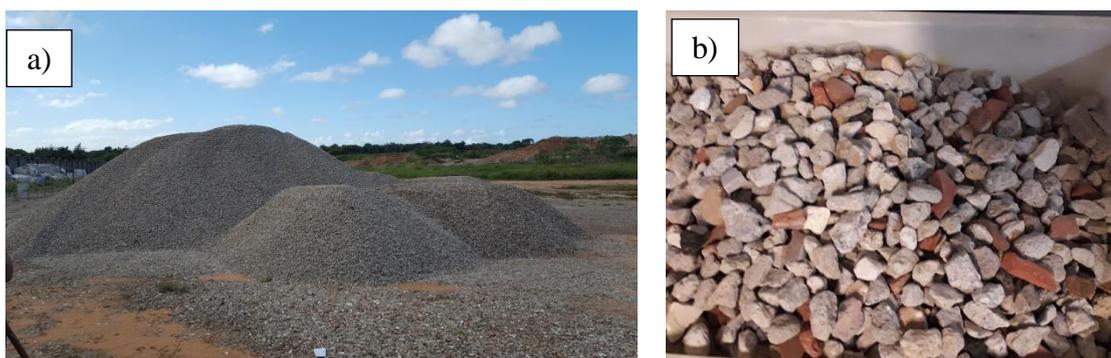


Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

3.1.2 RCD

O Resíduo de Construção e Demolição (RCD) utilizado nesta pesquisa foi coletado na empresa privada Duarte Usina de Reciclagem de RCD LTDA, situada nas proximidades do município de São José de Mipibu/RN. Os materiais de RCD coletados se enquadram na classificação comercial de Brita 01. A Figura 3.5 ilustra detalhes da coleta dos resíduos que serão avaliados nesta pesquisa.

Figura 3.5 – a) Local de coleta do RCD, b) Detalhe do material utilizado na pesquisa.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

3.1.3 Misturas de solo-RCD

As misturas utilizadas na pesquisa foram compostas do solo natural, coletado nas três regiões do estado do Rio Grande do Norte e do resíduo de construção advindo de uma empresa privada. As proporções do RCD para cada tipo de solo foram de 0%, 25%, 50%,

75% e 100%, em massa, em relação à porcentagem total das misturas. Optou-se por trabalhar com essas porcentagens tendo em vista que nas análises realizadas nos estudos bibliográficos esses percentuais apresentaram, com maior clareza, parâmetros geotécnicos investigados no âmbito da área viária para misturas de RCD com solos.

Com a definição das proporções de solo/RCD, em relação ao quantitativo total das misturas, foi realizada a preparação das misturas para cada ensaio geotécnico. A Tabela 3.1 apresenta de forma simplificada as denominações para as misturas de solo com RCD para cada amostra de solo natural.

Tabela 3.1 – Nomenclatura adotada para as diversas amostras da pesquisa

Região	Município	Identificação da amostra	Mistura Solo/RCD	Nomenclatura adotada
Médio Oeste	Caraúbas	“Solo 01”	100%/0%	100/0 – S1
			75%/25%	75/25 – S1
			50%/50%	50/50 – S1
			25%/75%	25/75 – S1
Agreste	Macaíba	“Solo 02”	100%/0%	100/0 – S2
			75%/25%	75/25 – S2
			50%/50%	50/50 – S2
			25%/75%	25/75 – S2
Seridó	Ipuera	“Solo 03”	100%/0%	100/0 – S3
			75%/25%	75/25 – S3
			50%/50%	50/50 – S3
			25%/75%	25/75 – S3

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

3.2 Métodos

A metodologia adotada nesta pesquisa consiste na investigação do resíduo, do solo natural e das misturas de solo com resíduo. Inicialmente foi realizada a caracterização dos materiais e, em seguida, avaliado o comportamento geotécnico das misturas de solo/RCD para as distintas proporções, a partir de diversos ensaios de laboratório. A seguir a metodologia utilizada nesta pesquisa.

3.2.1 Ensaios de laboratório

Os ensaios de laboratório foram realizados para cada amostra de solo retirada de jazidas de três municípios do estado, para o RCD utilizado e para as diversas misturas de solo com RCD. O programa experimental relativo à caracterização física e, ao comportamento mecânico dos materiais utilizados, foi realizado de acordo com as metodologias e os

procedimentos presentes em normas regulamentadoras, tais como: a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e o Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER). A Tabela 3.2 apresenta os tipos de ensaios e as normas que foram utilizadas na pesquisa.

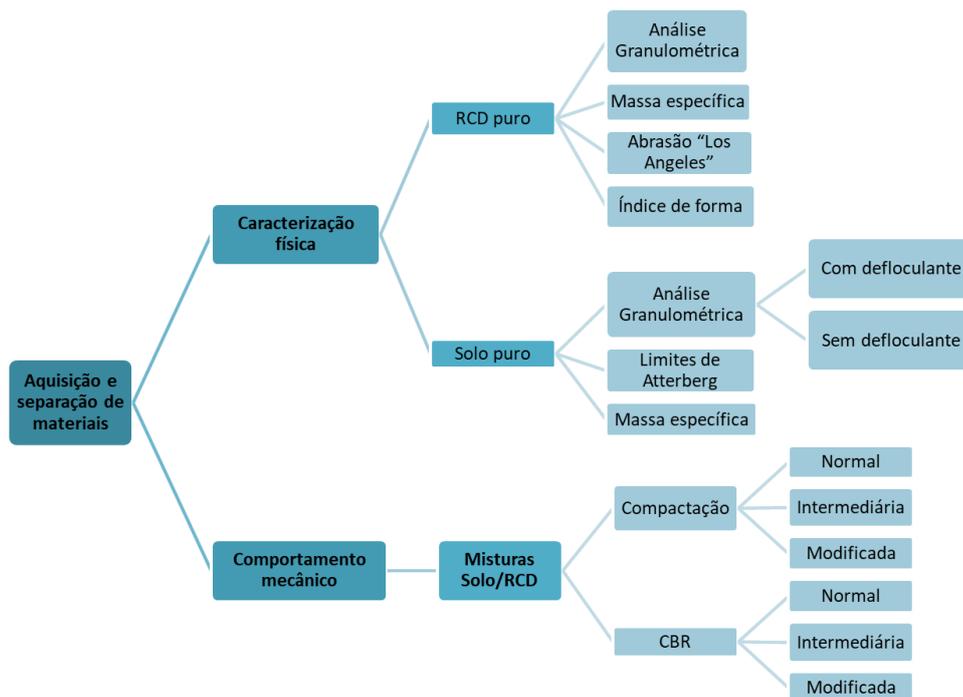
Tabela 3.2 – Normas adotadas para cada ensaio da pesquisa

Ensaio	Descrição	Normas
Caracterização Física	Análise Granulométrica	ABNT - NBR 7181/1984 ABNT - NBR NM 248/2003
	Massa Específica	ABNT - NBR 6508/1984 DNER-ME 081/98
	Abrasão “Los Angeles”	DNER-ME 035/98
	Índice de forma	DNER-ME 086/94
	Limite de Liquidez	ABNT - NBR 6459/1984
	Limite de Plasticidade	ABNT - NBR 7180/1984
Comportamento Mecânico	Compactação	ABNT - NBR 7182/1986
	CBR	ABNT - NBR 9895/1987

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Os ensaios foram realizados no laboratório de Mecânica dos Solos do Campus Natal-Central do Instituto Federal de Educação, Ciência e tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN) e tiveram início no dia 07 de junho de 2019. A metodologia adotada está ilustrada no fluxograma da Figura 3.6, em que se apresenta a relação dos ensaios realizados com os materiais utilizados na pesquisa e o Quadro 3.1 apresenta a quantificação de ensaios realizados durante o decorrer da pesquisa.

Figura 3.6 – Fluxograma das atividades realizadas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Quadro 3.1 – Quantificação dos ensaios realizados na pesquisa

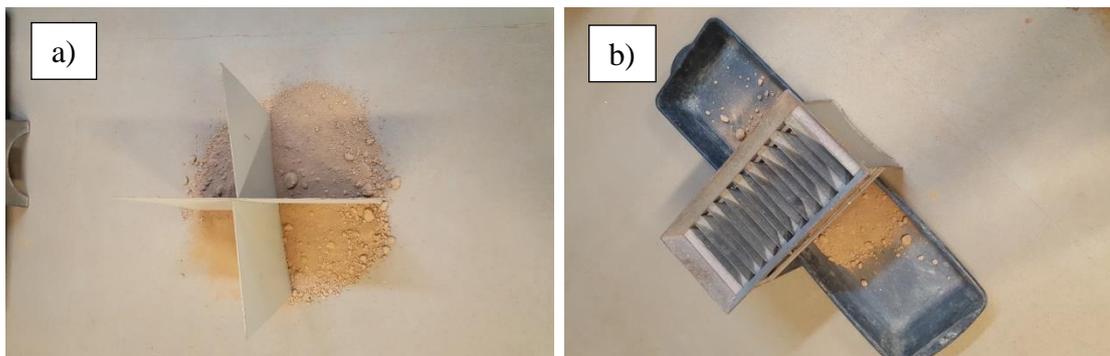
Ensaio de caracterização			
Amostras	Quantidade de ensaios		
RCD	04		
Solo 01	05		
Solo 02	05		
Solo 03	05		
Total	19		
Ensaio de comportamento mecânico			
Misturas Solo/RCD	% Solo/RCD	Ensaio	Energias
Solo1/RCD	04	02	03
Solo2/RCD	04	02	03
Solo3/RCD	04	02	03
Total	78		
Granulometria após CBR			
Misturas Solo/RCD	% Solo/RCD	Ensaio	Energias
Solo1/RCD	03	01	03
Solo2/RCD	03	01	03
Solo3/RCD	03	01	03
Total	28		
Quantidade Geral	125		

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

3.2.1.1 Caracterização física dos materiais

Para a realização dos ensaios de caracterização física, as amostras foram preparadas de acordo com o procedimento recomendado pela NBR 6457 (ABNT, 2016) – Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. A Figura 3.7 apresenta um exemplo dos procedimentos realizados para a preparação das amostras.

Figura 3.7 – a) Quarteamento do solo 02, b) Repartidor de amostras.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Para a avaliação da composição granulométrica do solo natural foi realizado o ensaio de análise granulométrica, executado de acordo com a NBR 7181 (ABNT, 1984). Este ensaio é composto por duas etapas, peneiramento e sedimentação, em que nesta segunda etapa, optou-se por avaliar as amostras com e sem o uso de defloculante, a fim de conferir a

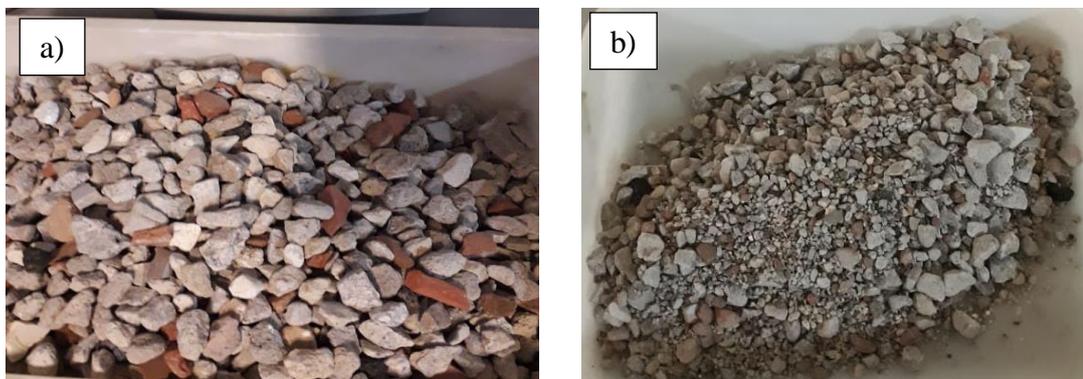
eficiência da utilização do hexametáfosfato de sódio, uma vez que o seu uso pode gerar diferenças constantemente substanciais, podendo não obter uma granulometria real do solo. Para as análises granulométricas realizadas para as frações do RCD serão utilizadas as premissas da NBR NM 248 (ABNT, 2003).

Para o ensaio de massa específica dos solos foi utilizada a norma NBR 6508 (ABNT, 1984) para grãos que passam na peneira de 4,8 mm. Através de um picnômetro e de no mínimo dois ensaios, os resultados são considerados aceitáveis quando a diferença entre eles é de no máximo 0,02 g/cm³.

Para as frações de RCD, a norma ME 081(DNER, 1998) foi utilizada para determinar a absorção d'água e a massa específica do agregado graúdo. Os grãos retidos na peneira de 4,8mm são imersos em água durante um período de 24h, feito isso, são espalhados sobre um pano absorvente, realizando a secagem da superfície dos grãos e, imediatamente após, são colocados em recipiente com água potável, sendo em seguida, secados em estufa até constância de massa.

O ensaio de Abrasão “Los Angeles”, normatizado pela ME 035(DNER, 1998), é outro ensaio para as partículas de RCD, e pode ser definido como o desgaste suportado pelo agregado, quando depositado na máquina de “Los Angeles” em conjunto com uma carga abrasiva, submetido a um determinado número de ciclos a uma velocidade entre 30 rpm a 33 rpm. De acordo com Arulrajah *et al.* (2012), o ensaio de abrasão “Los Angeles” é utilizado, de forma abrangente, como indicador da qualidade e capacidade relativa de diversos agregados com composições minerais semelhantes. A Figura 3.8a ilustra a detalhes do RCD que foi colocado na máquina de acordo com a sua graduação e a Figura 3.8b apresenta a massa da amostra lavada e seca, após o ensaio (retida na peneira de 1,7 mm).

Figura 3.8 – a) amostra seca depositada na máquina, b) massa do RCD após o ensaio.

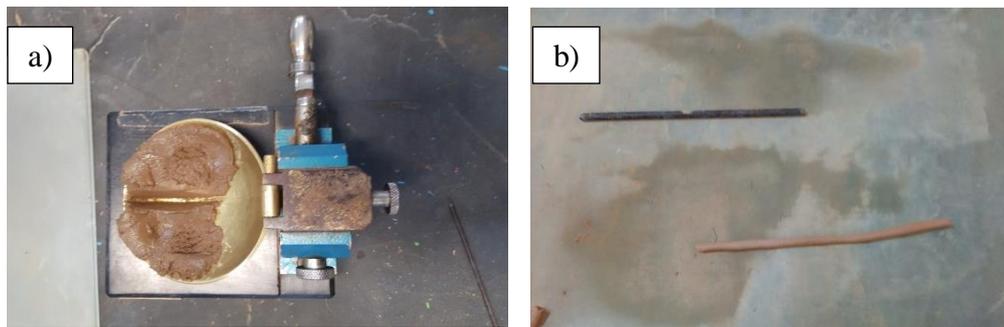


Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

O índice de forma é mais um ensaio que caracteriza a amostra de RCD, em que a norma ME 086 (DNER, 1994) estabelece os requisitos para a sua aplicação. Este índice tem a função de analisar a qualidade de um agregado graúdo em relação à forma dos grãos, em que agregados com partículas cúbicas apresentam índices próximos a 1,0.

Para concluir a caracterização dos solos, analisou-se a plasticidade através dos limites de Atterberg, que têm por finalidade examinar o comportamento do solo na presença de água. Assim, realizou-se o ensaio de limite de liquidez de acordo com as premissas da NBR 6459 (ABNT, 1984d) e o ensaio de limite de plasticidade, de acordo com os procedimentos da NBR 7180 (ABNT, 1984e). Com os resultados dos ensaios de caracterização foi possível realizar a classificação dos materiais através das metodologias SUCS e HRB/TRB. A Figura 3.9 ilustra detalhes da realização dos ensaios de LL e LP.

Figura 3.9 – a) Ilustração do ensaio de LL, b) moldagem da amostra no ensaio de LP.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

3.2.1.2 Ensaio de compactação Proctor

O ensaio de compactação Proctor é executado segundo as premissas da norma NBR 7182 (ABNT, 1986). Este ensaio consiste na compactação de camadas de certa amostra de solo confinada em um molde padrão, em que são aplicados determinados números de golpes com o auxílio de um soquete. Definida a energia de compactação utilizada, o número de camadas, o peso do soquete e o volume do molde sofrem alterações. A Tabela 3.3 apresenta a quantidade de golpes por camada para cada energia, utilizando cilindro e soquete grande.

Tabela 3.3 – Tipos de energias utilizadas no ensaio de compactação

Cilindro	Características inerentes a cada energia	Energia de compactação		
		Normal	Intermediária	Modificada
Grande	Soquete (g)	4.536	4.536	4.536
	Número de camadas	5	5	5
	Número de golpes por camada	12	26	55

Fonte: NBR 7182 (ABNT, 1986).

Na preparação das amostras, realizou-se o peneiramento do material passando-o pela peneira de 4,8 mm, em que no caso de material retido, o mesmo passou pela peneira de 19,1 mm com a finalidade de desmanchar os torrões. Diante dessa condição, logo após o peneiramento, verificou-se a porcentagem de material retido nas peneiras de 4,8mm e 19,1 mm conforme o Quadro 3.2.

Quadro 3.2 – Verificação das amostras

Peneira (mm)	Material retido (% em peso)	Cilindro a ser utilizado no ensaio	Observação
4,8	Menor que 07	Grande ou pequeno	Desprezar o material retido
19,1	Menor que 10	Grande	Desprezar o material retido
19,1	Maior que 10	Grande	Ver nota abaixo
19,1	Maior que 30	Grande	Recomenda-se não ensaiar

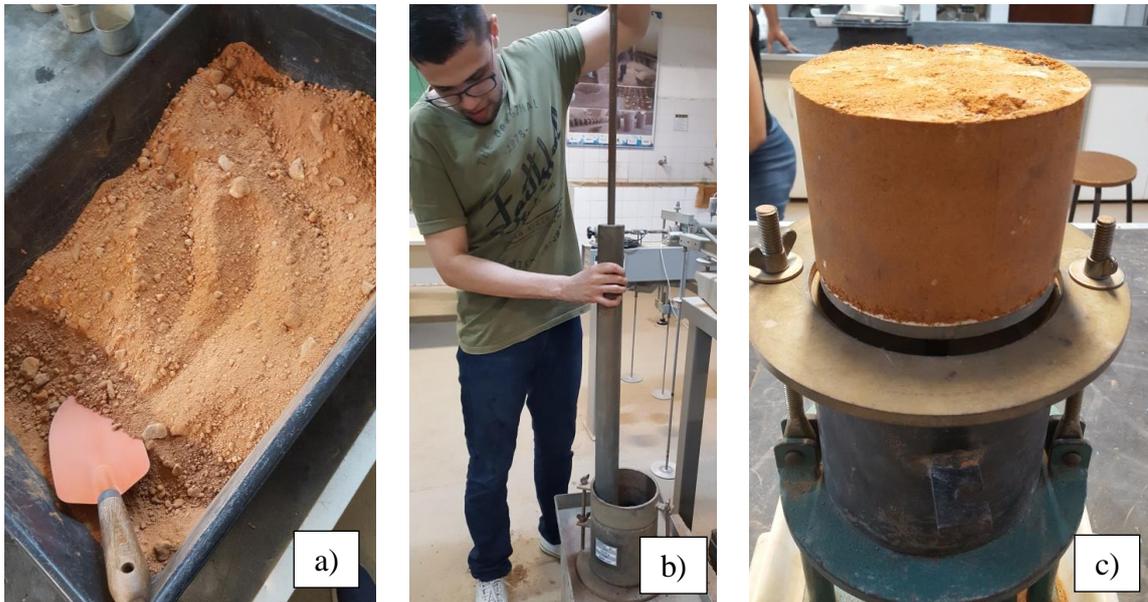
Nota: Passar o material retido na peneira de 19,1 mm através da de 76,2 mm e desprezar o material retido nesta última. Substituir o material retido na peneira de 19,1 mm e que passa na de 76,2 mm por igual quantidade de material retido na peneira de 4,8 mm e que passe na de 19,1 mm.

Fonte: NBR 7182 (ABNT, 1986).

Com isso, foi definida a preparação dos materiais para cada tipo de solo. O “Solo 01” apresentou material retido na peneira de 19,1 mm maior que 10%, assim foi utilizado o procedimento prescrito na nota da tabela acima. Os “Solos 02 e 03” apresentaram material retido na peneira de 4,8 mm menor que 7%, de modo que desprezou-se o material retido e utilizou-se apenas o passante para a realização do ensaio.

Para todas as misturas de solo/RCD de 100/0, 75/25, 50/50 e 25/75 foi realizada a compactação manual com reuso de material, tomando-se 7 kg de amostra total para cada mistura, nas três energias de compactação. Vale destacar que inicialmente foi realizada a compactação com reuso de material para o RCD puro. Contudo, houve bastante dificuldade em conseguir realizar este ensaio, uma vez que com o aumento da umidade o peso específico do corpo-de-prova não diminuía e impossibilitava a geração da curva de compactação. A Figura 3.10 ilustra o procedimento de execução do ensaio e os equipamentos que foram utilizados.

Figura 3.10 – a) homogeneização da amostra, b) aplicação dos golpes em cada camada, c) extração do corpo-de-prova do cilindro.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

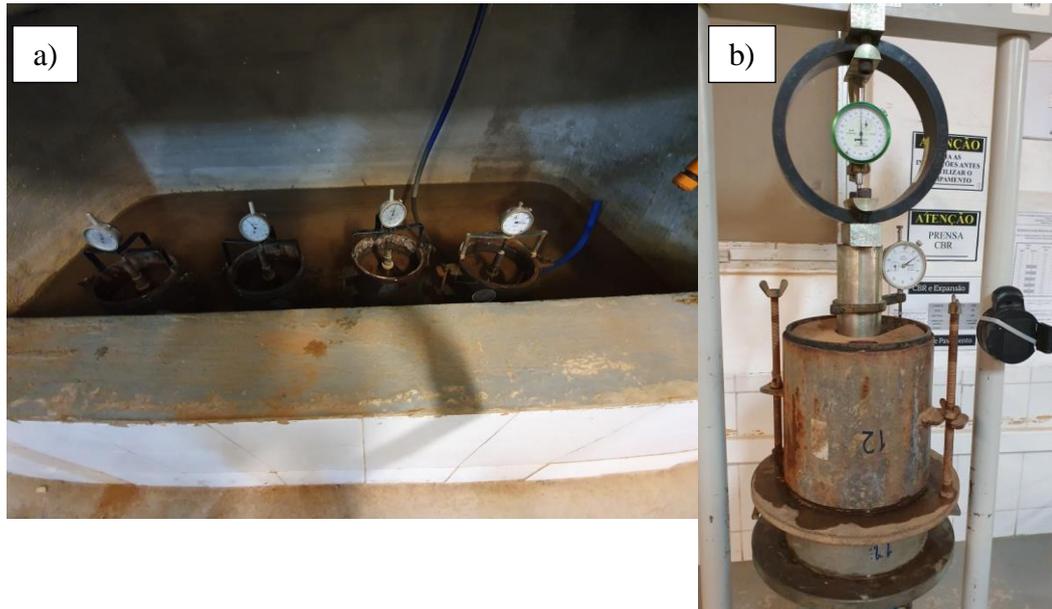
3.2.1.3 Ensaio de Índice de Suporte Califórnia (CBR)

De acordo com o Manual de pavimentação (DNIT, 2006), o ensaio de CBR (California Bearing Ratio) é definido como sendo a relação entre a pressão que é necessária para produzir uma penetração de um pistão em uma amostra de solo e a pressão para fazer penetrar o mesmo pistão numa amostra padrão de pedra britada.

Para a execução do ensaio de CBR foi utilizado os procedimentos da norma NBR 9895 (ABNT, 1987), em que o principal objetivo é verificar a expansão e o suporte dos materiais destinados a pavimentação. Embora tenha um caráter empírico, o ensaio de CBR serve de embasamento para o dimensionamento de pavimentos flexíveis, além de ser mundialmente difundido.

Os corpos-de-prova (CP) ficaram imersos num recipiente durante quatro dias, sendo realizado, durante este período, o acompanhamento para análise do comportamento do nível de expansão ou colapso das amostras ensaiadas. Após a retirada dos CP da imersão realizou-se a penetração por meio de um pistão com aproximadamente 50 mm de diâmetro, sob uma velocidade de penetração de 1,25 mm/min. Em seguida, foi realizada a leitura das pressões do pistão e dos deslocamentos correspondentes, para assim possibilitar a plotagem de uma curva pressão-penetração. A Figura 3.11 apresenta o tanque com os CP e a prensa utilizada no ensaio.

Figura 3.11 – a) Tanque com os CP imersos, b) prensa utilizada durante a penetração.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

No geral, este ensaio foi realizado a partir dos parâmetros obtidos no ensaio de compactação com reuso de material, em que os corpos-de-prova foram moldados com o teor de umidade ótima e o peso específico aparente seco máximo. A exceção ocorreu com as amostras de RCD puro, em que com o término do ensaio de compactação sem reuso de material, esses CP foram invertidos, preparados e utilizados no ensaio de expansão e penetração.

Como nos ensaios de compactação, os ensaios de CBR foram realizados para todas as energias de compactação com a finalidade de verificar a sua influência no resultado final do ensaio. Com a finalização do ensaio de penetração, os CP foram destorroados, secos em estufa e submetidos ao ensaio de análise granulométrica. Os resultados dos ensaios de granulometria após o CBR são comparados com os resultados da granulometria antes do CBR, para assim verificar a quebra dos grãos que ocorre com a aplicação de cargas nas amostras.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta as análises e os resultados obtidos, a partir da realização da metodologia proposta, para os materiais utilizados nesta pesquisa.

4.1 Solos Naturais

Os ensaios laboratoriais foram realizados para os três distintos tipos de amostras de solos utilizados no decorrer da pesquisa.

4.1.1 Caracterização física

4.1.1.1 Solo 01

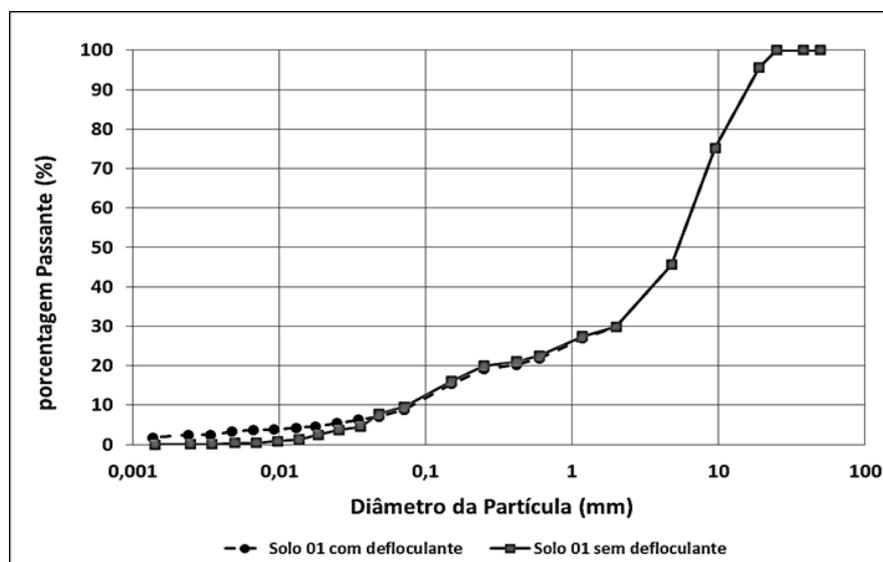
Os resultados obtidos a partir dos ensaios de caracterização física para o solo 01 estão apresentados na Tabela 4.1. A Figura 4.1 apresenta as curvas granulométricas do ensaio de granulometria nas duas condições, com e sem o uso de defloculante, para assim verificar a influência do uso da solução nos resultados encontrados.

Tabela 4.1 – valores de caracterização do solo 01

Parâmetros	CNU	CC	γ_s (g/cm ³)	LL (%)	LL (%)	IP (%)	Atividade das argilas
Com defloculante	85,0	8,9	2,65	0,0	0,0	0,0	0,0
Sem defloculante	94,44	9,89	2,65	0,0	0,0	0,0	0,0

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Figura 4.1 – Curvas granulométricas do solo 01



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

De acordo com a Figura 4.1 observa-se que o uso da solução defloculante causa pouca influência na dispersão do solo 01. Assim a dispersão pode ocorrer naturalmente apenas com a presença de água. Conforme os dados do Coeficiente de Não Uniformidade (CNU) e o Coeficiente de Curvatura (CC) a amostra em questão pode ser determinada como mal graduada.

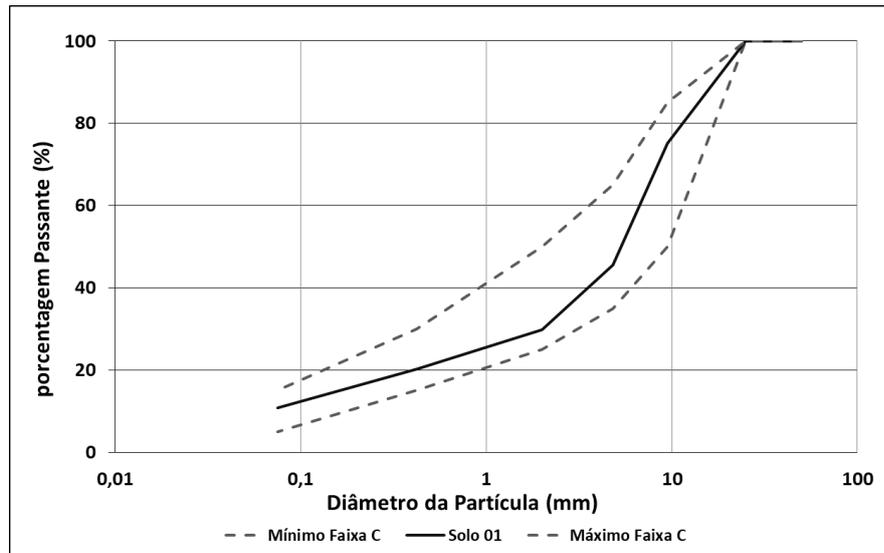
O ensaio de limite de liquidez (LL) e o de limite de plasticidade (LP) não foi possível de ser realizado para esta amostra. Assim, como o índice de plasticidade (IP) foi zero, o solo pode ser considerado como não plástico e a atividade das argilas como inativa. Deste modo, na aplicação em pavimentação, a fração fina da amostra contribui para pequenas deformações e maiores resistências.

Com base nas curvas granulométricas e nos resultados presentes na Tabela 4.1, o solo 01 é classificado como pedregulho mal graduado (GP), de acordo com o sistema unificado de classificação de solos (SUCS), ou como um solo do tipo A-1-a, conforme a classificação do *Highway Research Board* (HRB).

De acordo com Pinto (2006), quando não se dispõe do valor da massa específica de um solo, adota-se o valor de 2,70 g/cm³. No caso de areia o valor é em torno de 2,65 g/cm³, assim, o valor encontrado para esta amostra de 2,65 é aproximado do recomendado pela literatura.

Segundo o DNIT, através da norma ES 141 (DNIT, 2010b), o material utilizado na camada de base do pavimento deve possuir composição granulométrica que satisfaça a uma das seis faixas de enquadramento. Essas faixas podem ser denominadas de faixas “A”, “B”, “C” e “D” quando o número de repetições do eixo padrão (N) de tráfego, calculado conforme a metodologia do USACE é maior que 5×10^6 , e, quando o N é menor que 5×10^6 acrescenta-se as faixas “E” e “F”. Desse modo, para a amostra em questão observou-se que a mesma se enquadra na faixa de trabalho “C”, de acordo com a ES 141 (DNIT, 2010b) e como ilustrado na Figura 4.2.

Figura 4.2 – Limite da Faixa C e curvas granulométricas do solo 01



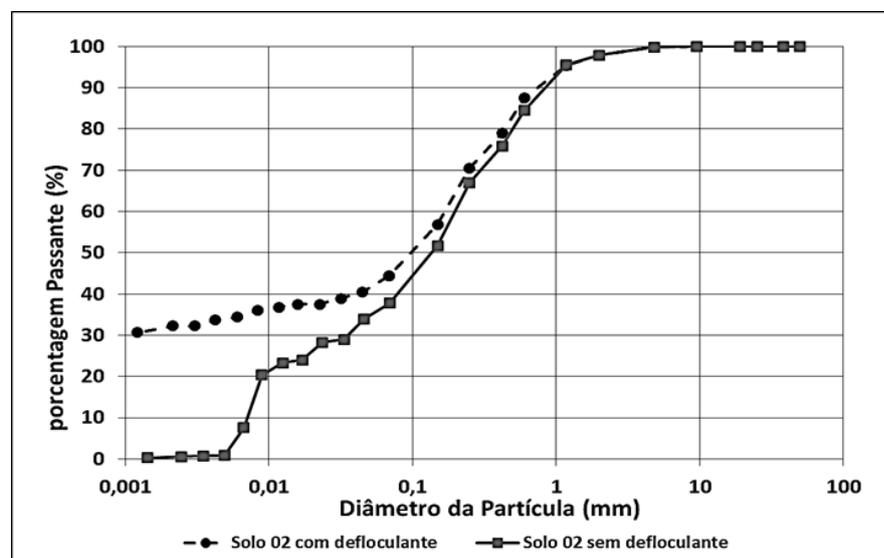
Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

A norma ES 141 (DNIT, 2010b) indica que para a utilização de certo material em camada de base o LL deve ser menor ou igual a 25%, o IP deve ser inferior ou igual a 6% e a porcentagem de material que passa na peneira de 0,075mm deve ser inferior a 2/3 da porcentagem que passa na peneira 0,42mm. Deste modo, com base nos resultados de caracterização, o solo 01 pode ser utilizado em bases estabilizadas granulometricamente.

4.1.1.2 Solo 02

As curvas granulométricas resultantes do ensaio de granulometria do solo 02 estão ilustradas na Figura 4.3. A Tabela 4.2 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização.

Figura 4.3 – Curvas granulométricas do solo 02



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Tabela 4.2 – valores de caracterização do solo 02

Parâmetros	CNU	CC	γ_s (g/cm ³)	LL (%)	LL (%)	IP (%)	Atividade das argilas
Com defloculante	Não determinado	Não determinado	2,59	28,0	23,0	5,0	0,15
Sem defloculante	29,33	0,66	2,59	28,0	23,0	5,0	0,15

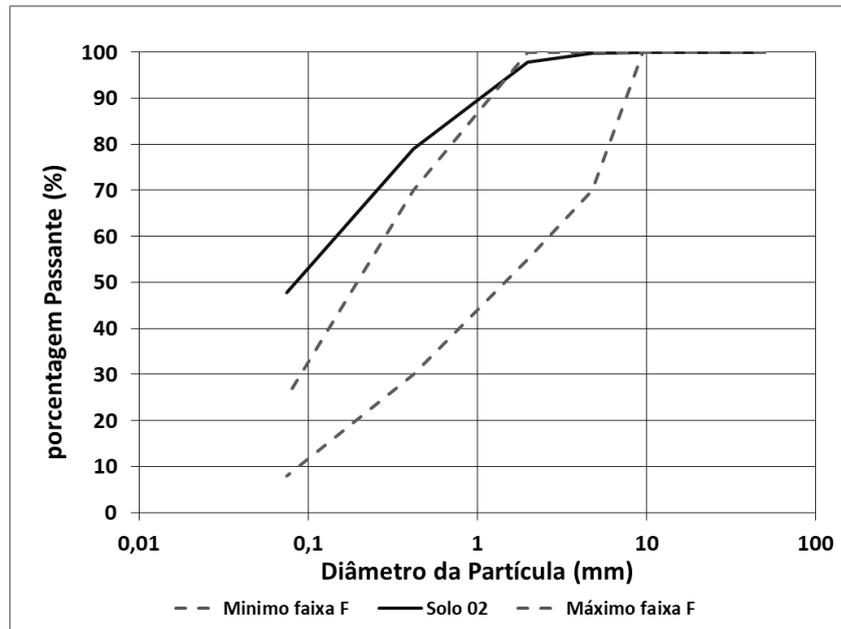
Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Diferente da amostra anterior, o solo 02 apresenta uma diferença significativa entre os resultados obtidos com e sem o uso do defloculante. Conforme ilustrado na Figura 4.3, o uso da solução influencia no resultado final da granulometria. Analisando os resultados da Tabela 4.2 observa-se que na curva granulométrica com o uso de defloculante não é possível definir o CNU e o CC, uma vez que o D_{10} e o D_{30} não foram determinados.

Na granulometria sem o uso da solução, o CNU e o CC foram definidos e o solo pode ser caracterizado como mal graduado. No entanto, os valores desses coeficientes não influenciam na classificação do solo, uma vez que a porcentagem que passa na peneira n° 200 é maior que 12% em ambas as ocasiões e, o que definirá a classificação será a carta de plasticidade. De acordo com os resultados dos índices de consistência, o solo pode ser considerado como fracamente plástico e a atividade das argilas como inativa. Assim, é possível considerar que o potencial de expansão da amostra é muito baixo.

Baseado nos resultados encontrados, o solo 02 pode ser classificado de acordo com o SUCS como Areia – siltosa (SM) e, segundo a classificação HRB como A-4, em que o material predominante é o solo siltoso. Conforme a classificação HRB, esse tipo de solo pode apresentar um comportamento geral como subleito de regular a péssimo. A Figura 4.4 ilustra a curva granulométrica do solo 02 comparada com os limites impostos pelo DNIT.

Figura 4.4 – Limite da Faixa F e curvas granulométricas do solo 02



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Analisando a Figura 4.4 observa-se que o solo em questão não se enquadra dentro dos limites impostos pela Faixa F do DNIT. O valor do limite de liquidez é superior ao valor máximo permitido pela ES 141 (DNIT, 2010b) para uso desse material em base estabilizada granulometricamente. Entretanto, o índice de plasticidade obedece às recomendações impostas na norma. Assim, segundo esses resultados, o solo analisado não é recomendado para ser utilizado como material de base. No entanto, é necessário analisar diversos outros parâmetros para definir o uso do material nas camadas do pavimento.

4.1.1.3 Solo 03

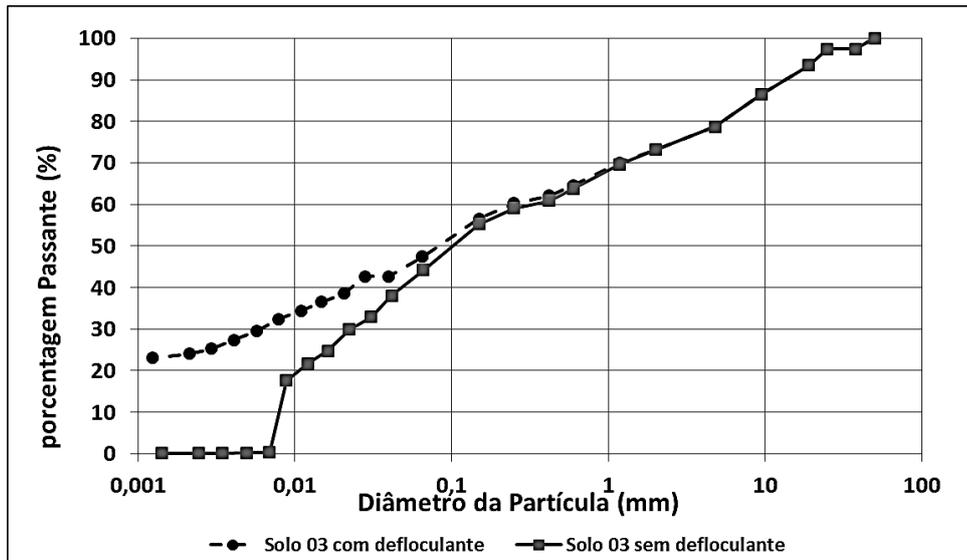
Os resultados dos ensaios de caracterização física do solo 03 estão presentes na Tabela 4.3. A Figura 4.5 ilustra as curvas granulométricas para as duas condições de ensaio, com e sem o uso de defloculante.

Tabela 4.3 – Valores de caracterização do solo 03

Parâmetros	CNU	CC	γ_s (g/cm ³)	LL (%)	LL (%)	IP (%)	Atividade das argilas
Com defloculante	Não determinado	Não determinado	2,57	31,0	28,0	3,0	0,12
Sem defloculante	34,62	0,23	2,57	31,0	28,0	3,0	0,12

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Figura 4.5 – Curvas granulométricas do solo 03



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

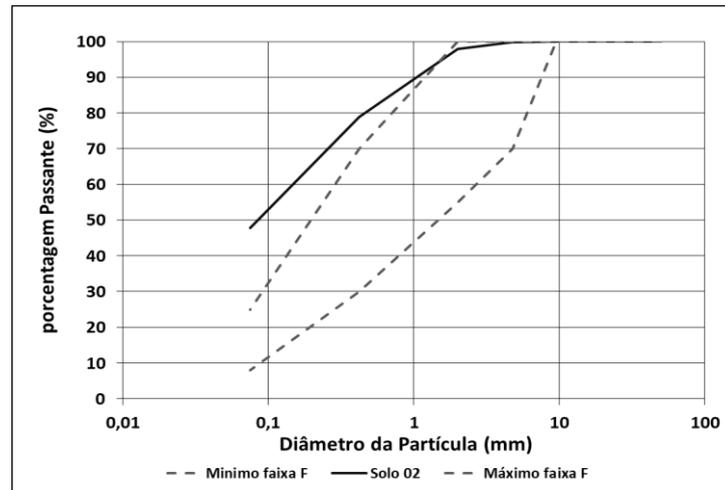
Análogo ao que foi mencionado para solo anterior, o solo 03 apresenta mudança no comportamento da curva granulométrica com o uso de defloculante. É possível perceber que o uso da solução faz com que aumente o número de frações finas da amostra.

Analisando a Figura 4.5 e os resultados da Tabela 4.3, observa-se que não foi possível definir o CNU e o CC na condição de ensaio com defloculante devido ao D_{10} não ter sido determinado. Contudo, para a segunda condição, foi possível definir os coeficientes e caracterizar o material como mal graduado.

A classificação dos solos, de acordo com o SUCS, considera inicialmente se a porcentagem que passa na peneira nº 200 (P#200) é superior ou inferior a 50%. Deste modo, analisando os resultados da granulometria para as duas condições de ensaio, observa-se que para a condição “com defloculante” a porcentagem P#200 é maior que 50%, assim o solo 03 é classificado como Silte de baixa compressibilidade (SM). Para a condição “sem defloculante”, a porcentagem P#200 é menor que 50%, e o solo pode ser classificado como Areia siltosa (SM). Na classificação HRB a amostra é classificada como A-4 em ambas as condições de ensaio.

A Figura 4.6 apresenta os limites granulométricos da Faixa F proposto na norma ES 141 (DNIT, 2010b) para o uso de material em base granulometricamente estabilizada.

Figura 4.6 – Limite da Faixa F e curvas granulométricas do solo 03



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Analisando a Figura 4.6 é possível definir que o solo em questão não se enquadra nos limites da Faixa F de projeto. Em relação aos resultados dos índices de consistência, a amostra pode ser definida como fracamente plástico e a atividade das argilas como inativa. No entanto, o valor de LL é superior ao permitido na ES 141 (DNIT, 2010b), enquanto o IP obedece aos limites impostos pela norma para o uso como material de base. Deste modo, apesar dos resultados da caracterização não serem favoráveis para o uso em camada de base de pavimento é necessário a análise de outros ensaios laboratoriais, como os ensaios de compactação e CBR, para verificar se os resultados do comportamento mecânico dos solos são favoráveis para este uso.

4.1.2 Compactação e Índice de Suporte Califórnia (CBR)

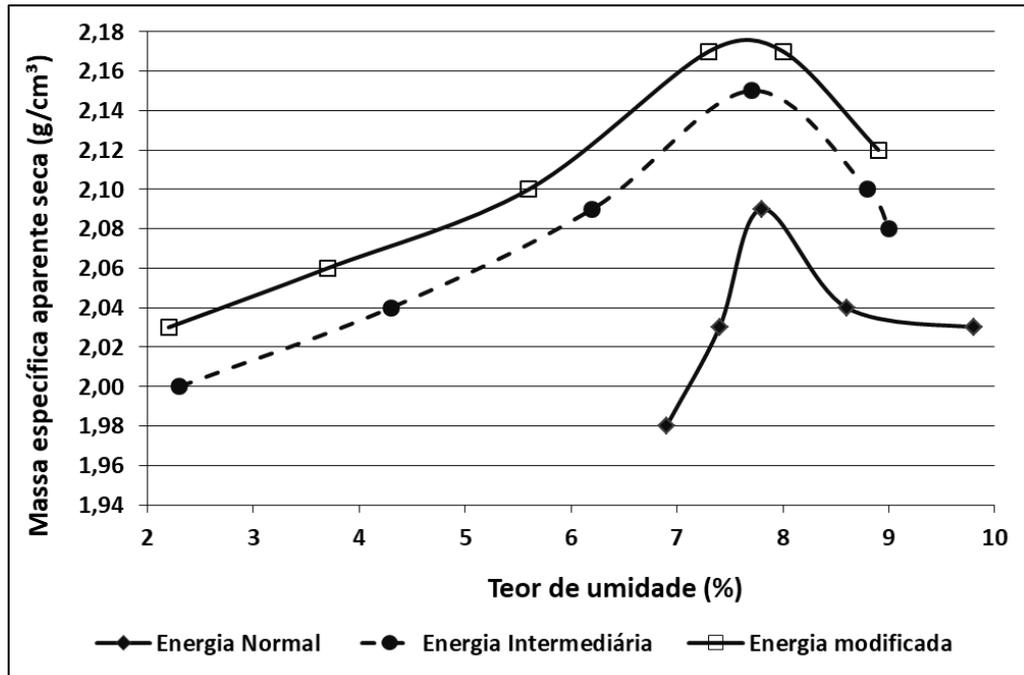
Os ensaios de compactação e CBR para as três amostras de solo puro foram realizados com reuso de material, aplicando-se as três energias de compactação. A Tabela 4.4 apresenta os parâmetros de compactação e CBR do solo 01 e, a Figura 4.7 ilustra as curvas de compactação desse solo para as três energias aplicadas no ensaio.

Tabela 4.4 – Resultados da compactação e CBR do solo 01

Energia	$W_{ótima}$ (%)	$\gamma_{dmáx}$ (g/cm ³)	CBR (%)	Expansão
Proctor – normal	7,9	2,09	78,0	0,0
Proctor – Intermediária	7,8	2,15	99,0	0,0
Proctor – Modificada	7,8	2,17	97,0	0,0

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Figura 4.7 – Curvas de compactação do solo 01 nas três energias



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Analisando a Figura 4.7 observa-se que a aplicação de uma maior energia de compactação faz com que aumente o valor do peso específico seco máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$). Contudo esse acréscimo é mais expressivo, com um aumento em torno de 4%, se compararmos a mudança da energia proctor normal para a modificada. Em relação à umidade ótima, o aumento da energia aplicada provocou uma variação insignificante, com um decréscimo de 0,1% entre as energias normal e intermediária.

De acordo com a Tabela 4.4 observa-se um ganho de resistência no CBR, em torno de 27%, quando aplicada a energia intermediária em relação à normal. No entanto, com a aplicação da energia modificada, o valor de CBR reduziu em torno de 2% em relação à energia intermediária. Essa redução pode ser explicada pela dificuldade em conseguir realizar os ensaios de compactação e CBR para este solo, no entanto, os resultados da energia modificada e intermediária são muito próximos, sendo assim, essa diferença nos valores se torna insignificante. Com relação à expansão, os resultados são nulos em todas as energias aplicadas.

A ES 141 (DNIT, 2010b) estabelece valores limites de CBR e expansão para utilização de materiais em camada de base estabilizada granulometricamente: $CBR \geq 60\%$, no caso de $N \leq 5 \times 10^6$, $CBR \geq 80\%$, no caso de $N > 5 \times 10^6$, e expansão $\leq 0,5\%$. Portanto, é possível afirmar que o solo 01 pode ser utilizado como camada de base, independente da energia de compactação avaliada, sendo que, quando aplicada as energias intermediária e modificada o material pode ser utilizado para tráfego com $N > 5 \times 10^6$. No entanto, de acordo

com a NBR 15115 (ABNT, 2004) o RCD só é permitido de ser utilizado como material de base para vias de tráfego com $N \leq 5 \times 10^6$. A energia proctor intermediária é a mais adequada ao uso devido ao alto valor de CBR quando comparada às outras energias.

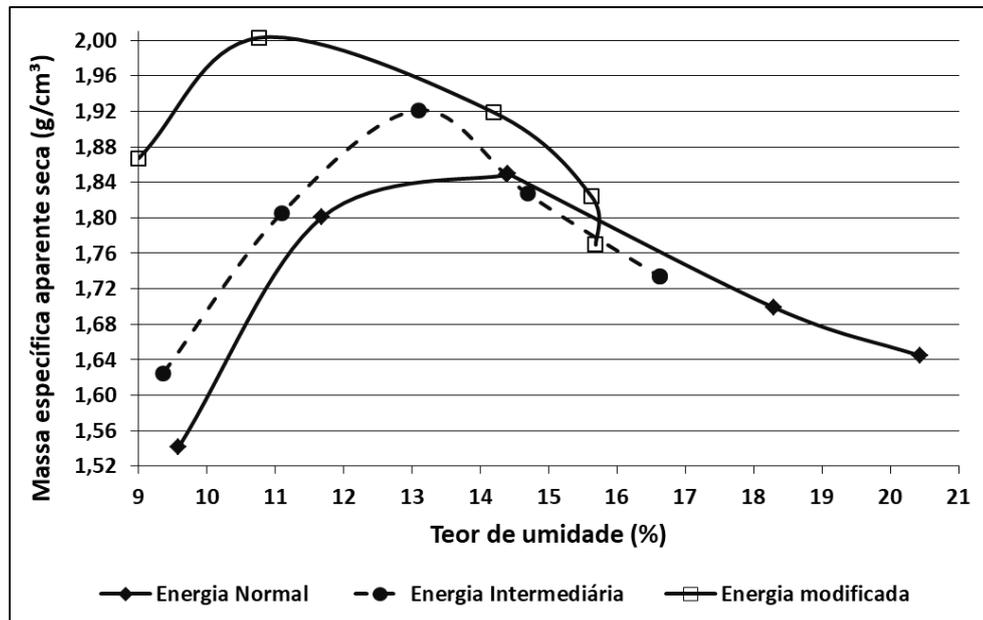
Para o solo 02, na condição pura, os ensaios foram realizados de forma análoga e os resultados estão apresentados na Tabela 4.5. A Figura 4.8 ilustra as curvas de compactação para as três energias aplicadas.

Tabela 4.5 – Resultados da compactação e CBR do solo 02

Energia	$W_{ótima}$ (%)	$\gamma_{dmáx}$ (g/cm ³)	CBR (%)	Expansão
Proctor – normal	15,3	1,85	10,0	0,01
Proctor – Intermediária	13,3	1,92	14,0	0,07
Proctor – Modificada	12,5	2,00	6,0	0,29

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Figura 4.8 – Curvas de compactação do solo 02 nas três energias



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Com base nas curvas de compactação da Figura 4.8 é possível observar que, com o aumento da energia aplicada ocorre um acréscimo no peso específico seco e decréscimo no valor da umidade ótima do solo. Com isso, o aumento na energia de compactação pode ser favorável para melhorar as propriedades do solo. No entanto, o ganho de resistência no valor do CBR em função do aumento da energia de compactação é insignificante, uma vez que com o aumento da energia normal para a intermediária o acréscimo no valor do CBR é baixo e, na

energia modificada o valor de CBR encontrado é o menor entre as demais. Em relação à expansão do solo, ocorre aumento de valor com o aumento da energia de compactação.

Analisando as normas ES 141 (DNIT, 2010) para bases e a ES 139 (DNIT, 2010) para sub-base estabilizada granulometricamente, os valores do solo em questão não atendem aos limites impostos nas normas. No entanto, de acordo com a ES 108 (DNIT, 2009) os parâmetros obtidos atendem aos requisitos mínimos para o uso como material de subleito.

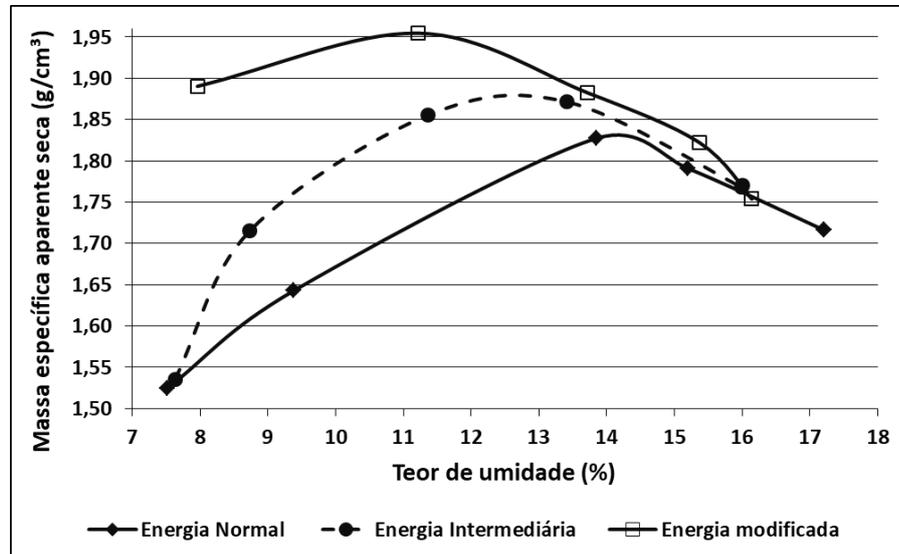
A Tabela 4.6 apresenta os parâmetros obtidos para o solo 03 na condição pura, enquanto a Figura 4.9 apresenta as curvas de compactação deste solo nas três energias de ensaio.

Tabela 4.6 – Resultados da compactação e CBR do solo 03

Energia	$W_{ótima}$ (%)	$\gamma_{dmáx}$ (g/cm ³)	CBR (%)	Expansão
Proctor – Normal	14,2	1,83	6,0	0,17
Proctor – Intermediária	12,7	1,88	6,0	0,11
Proctor – Modificada	11,3	1,95	24,0	0,10

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Figura 4.9 – Curvas de compactação do solo 03 nas três energias



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Análogo ao que foi mencionado, anteriormente, avaliando os resultados da Tabela 4.6 e a Figura 4.9, observa-se que o aumento na energia de compactação provoca diminuição da umidade ótima e aumento do peso específico seco do solo. Junto a isso, o valor do CBR é estável, mas passa por um acréscimo significativo com o aumento da energia intermediária para a modificada. A expansão da amostra diminui com o aumento da energia de compactação.

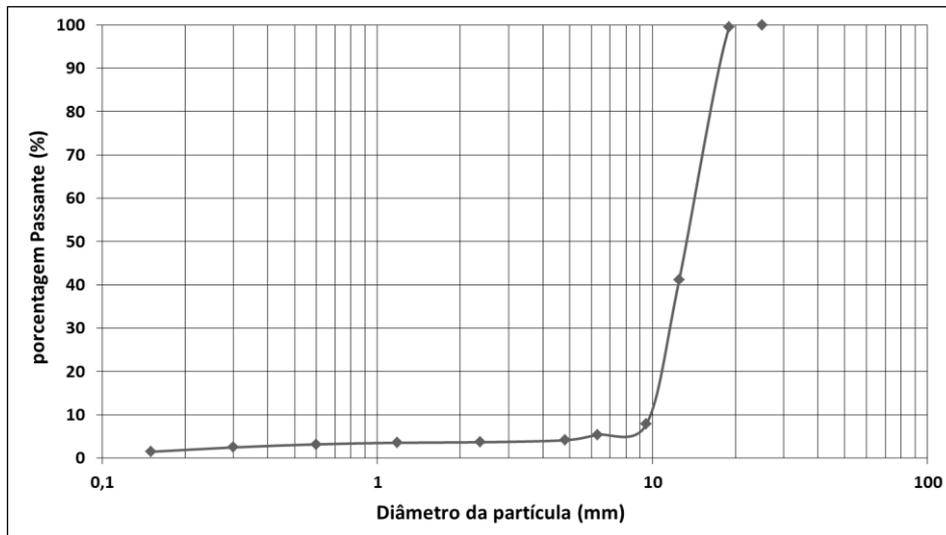
De acordo com os dados do CBR e da expansão, o solo 03 não pode ser empregado como material para camada de base, segundo a ES 141 (DNIT, 2010). Porém, pode ser utilizado na camada de sub-base granulometricamente estabilizada, se for aplicada a energia de compactação modificada, uma vez que seus valores de resistência atendem aos limites propostos na ES 139 (DNIT, 2010). No entanto, para a aplicação da energia normal e intermediária o uso do solo se limita ao subleito do pavimento, uma vez que os valores de CBR só atendem aos limites mínimos da ES 108 (DNIT, 2009).

4.2 Resíduos de Construção e Demolição de Obras – RCD

4.2.1 Caracterização física do RCD

O RCD utilizado nesta pesquisa passou por diversos ensaios laboratoriais com a finalidade de caracterizar este material. A Figura 4.10 apresenta a curva granulométrica obtida a partir do ensaio de determinação da composição granulométrica da NM 248 (ABNT, 2001).

Figura 4.10 – Curva Granulométrica do RCD



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

De acordo com a Figura 4.10 é possível obter o CNU e o CC do material, que correspondem a 1,53 e 0,98, respectivamente. Portanto, pode-se definir o material como mal graduado, em que a graduação é aberta, com ausência de partículas finas na composição. O módulo de finura obtido no ensaio é de 6,74% e a dimensão máxima característica é de 19 mm. Todos os resultados da caracterização do RCD estão resumidos na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Resultados da Caracterização do RCD

Norma	Parâmetro	Resultado
NM 248 (ABNT, 2001)	Módulo de Finura (%)	6,74
	Dimensão máx (mm)	19,00
ME 081(DNER, 1998)	Massa específica (g/cm ³)	2,10
	Absorção (%)	8,05
ME 035(DNER, 1998)	Abrasão LA (%)	49,72
ME 086 (DNER, 1994)	Índice de forma	0,92

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

A Tabela 4.8 apresenta resultados da absorção de água de diversos estudos sobre agregados reciclados. É possível observar que, devido à heterogeneidade dos materiais, ocorre certa variação entre os diversos RCD analisados. No entanto o valor de absorção obtido neste estudo se assemelha aos valores encontrados na literatura, com exceção do resíduo estudado por Leite *et al.* (2011).

Tabela 4.8 – Valores de absorção de diversos RCD

Fonte	Absorção (%)	Origem
Carneiro <i>et al.</i> (2001)	8,2	Salvador/BA
Motta (2005)	7,8	São Paulo /SP
Leite <i>et al.</i> (2011)	12,2	Santo André/SP
Amorin (2013)	8,23	Campo Verde/MT
Souza (2015)	7,6	Brasília/DF
Novais e Crispim (2017)	8,1	Sinop/MT

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

De acordo com a literatura, como Cardoso *et al.* (2016), Trannin *et al.* (2019) entre outros autores, os valores de absorção são maiores quanto maior forem as frações de argamassa e cerâmica vermelha na composição do RCD. Uma elevada absorção, como a que foi determinada nesta pesquisa, influencia no teor de umidade da compactação, uma vez que resultará em teor inferior ao ótimo, dificultando no controle de parâmetros de compactação e resultando em baixo grau de compactação. O elevado grau de absorção pode estar relacionado a argamassa antiga aderida às partículas do RCD, como também a elevada porosidade dos grãos.

O método de avaliação adotado para determinar o índice de forma foi o método do crivo, em que o agregado é considerado de ótima cubicidade quando o índice é igual a 1,0 e, lamelar quando o índice é 0,0. Assim, o valor do índice de forma encontrado nessa pesquisa se aproxima da condição cúbica.

O alto desgaste do RCD no ensaio de Los Angeles pode ser devido à presença de materiais cerâmicos, uma vez que esses proporcionam baixa resistência quando sofrem

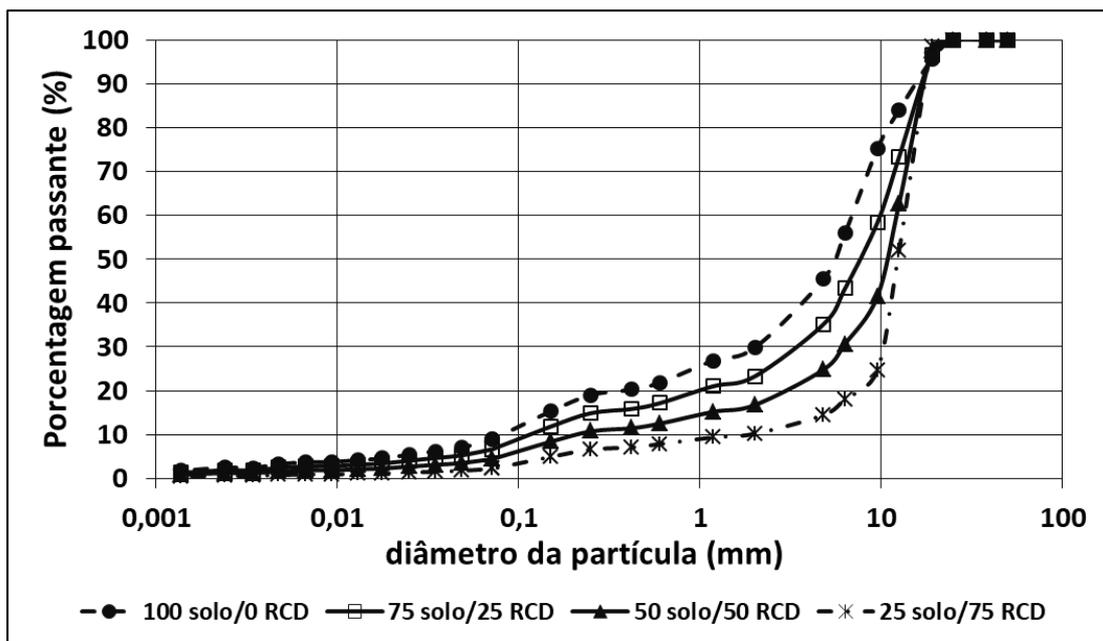
solicitações de esforços. Desse modo, ao analisar os resultados de abrasão Los Angeles e índice de forma, o material atende aos limites prescritos na ES 141 (DNIT, 2010b) e pode ser utilizado em camadas de base e sub-base, uma vez que, o desgaste sofrido foi inferior a 55% e o índice de forma foi inferior a 0,5, apresentando boa cubicidade.

4.3 Misturas de Solo-RCD

4.3.1 Composição Granulométrica

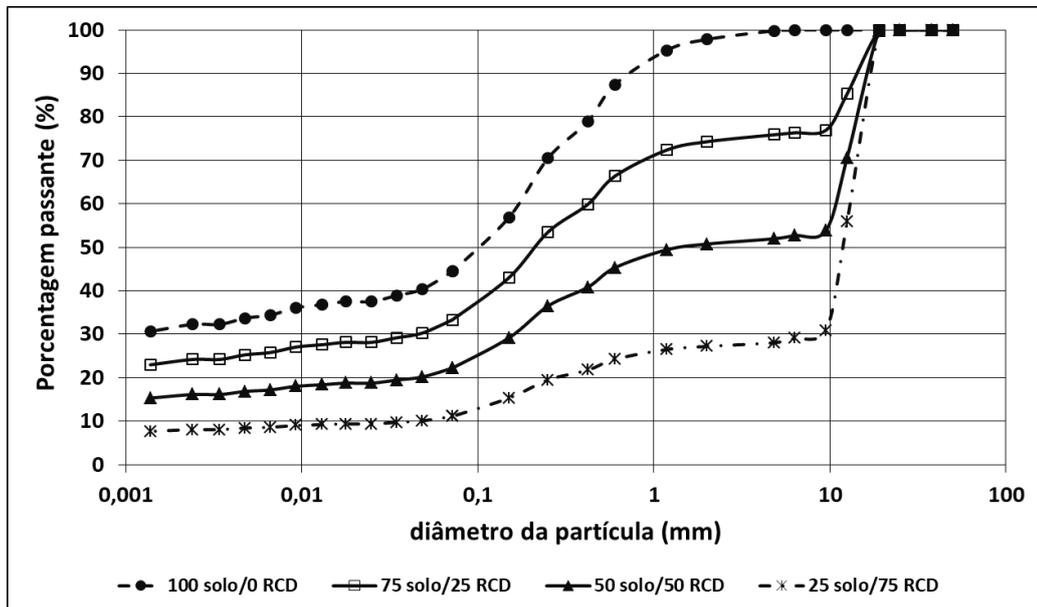
A composição granulométrica foi realizada para todas as misturas de solo com RCD em todas as amostras de solo. As Figuras de 4.11 a 4.13 apresentam as curvas granulométricas das misturas solo/RCD para os solos 01, 02 e 03, respectivamente.

Figura 4.11 – Curva Granulométrica das misturas solo/RCD do solo 01



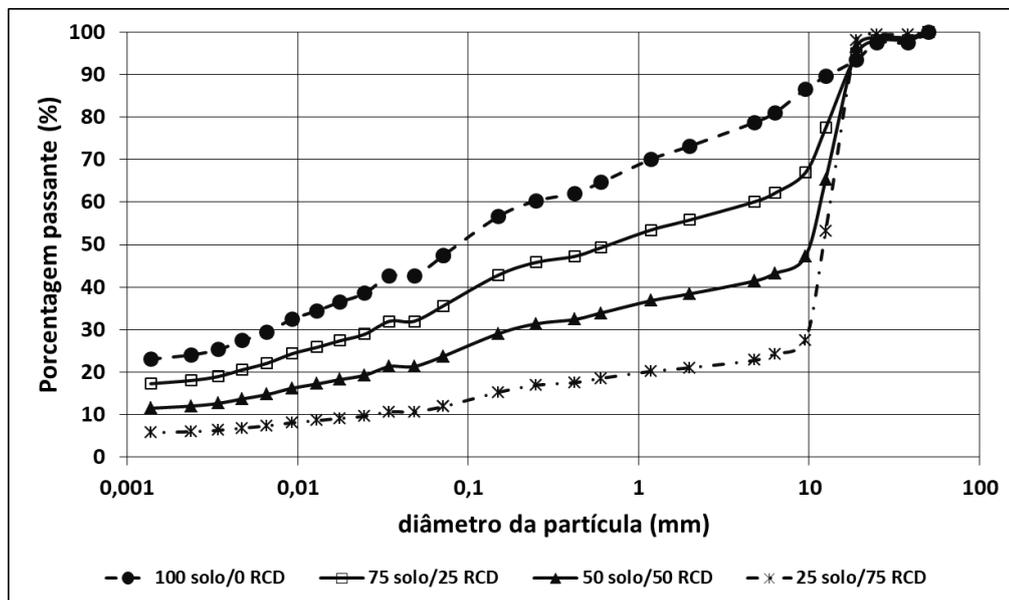
Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Figura 4.12 – Curva Granulométrica das misturas solo/RCD do solo 02



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Figura 4.13 – Curva Granulométrica das misturas solo/RCD do solo 03



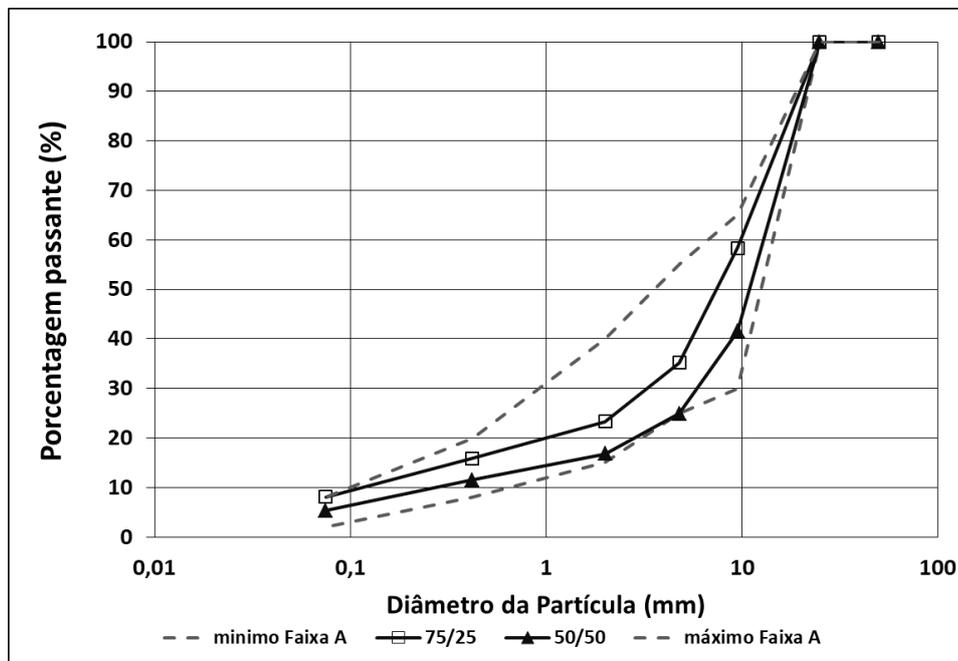
Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Conforme ilustrado nas figuras anteriores, comparando as curvas granulométricas dos solos para a condição pura com as curvas granulométricas das misturas, é possível observar que a adição do RCD às amostras de solo provocou uma mudança na granulometria. Com o aumento da quantidade de RCD na composição, aumenta-se o número da fração grossa e diminui a porcentagem de finos. Essa alteração acontece com maior relevância no solo 02 e

no solo 03, em que a porcentagem de finos é muito elevada. A inserção do RCD tende a gerar um material mais estável granulometricamente. Para o solo 01, a variação da granulometria com a adição do RCD foi mínima.

Em relação ao solo 01, a amostra na condição natural (100/0) apresenta uma granulometria adequada de acordo com os limites propostos pela ES - 141 (DNIT, 2010). No entanto, a adição de 25% e de 50% de RCD associado ao solo proporcionou um enquadramento das misturas solo/RCD numa faixa mais granular, uma vez que as misturas 75/25 e 50/50 encontram-se situadas na Faixa A, enquanto o solo puro encontrava-se situado dentro da Faixa C. A Figura 4.14 apresenta o limite da Faixa A com as curvas que se enquadram nesse limite.

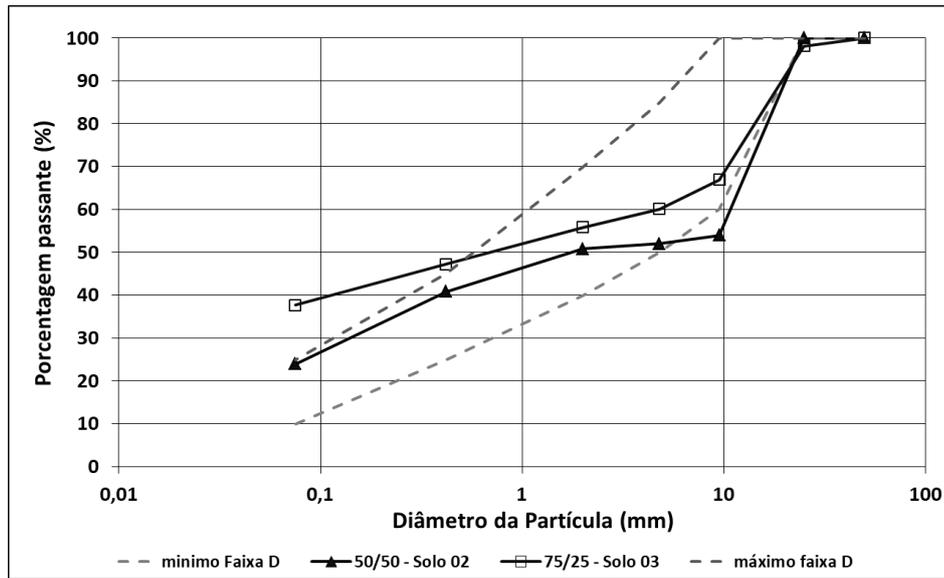
Figura 4.14 – Misturas do solo 01/ RCD dentro do Limite da Faixa A



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

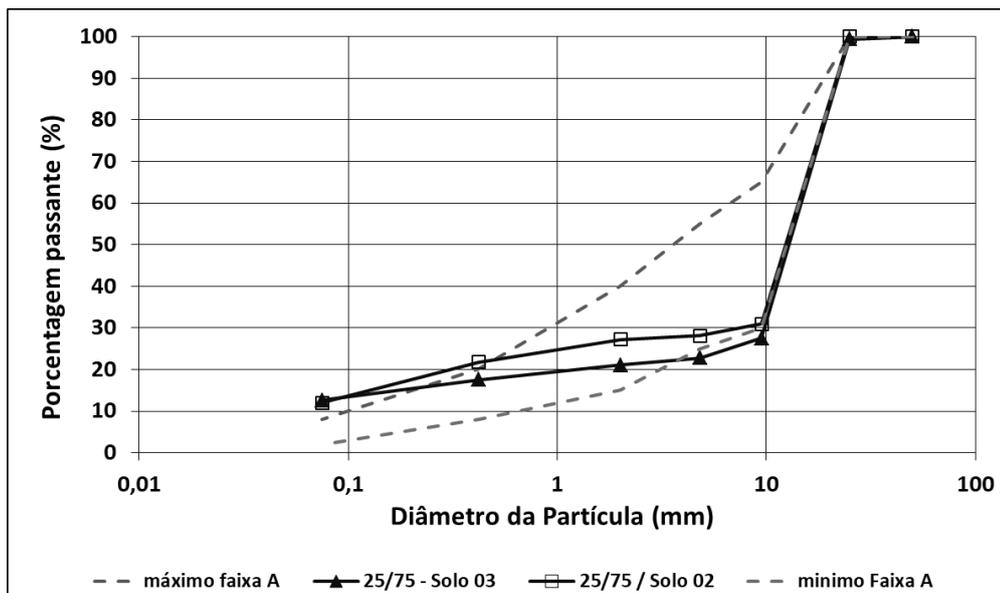
Quanto aos solos 02 e 03 na condição natural não se enquadraram em nenhuma das Faixas limites de granulometria. No entanto, para o solo 02, a mistura solo/RCD de 50/50 consegue se enquadrar nos limites da Faixa D, enquanto a mistura de 25/75 se aproxima dos limites da Faixa A. Para o solo 03 a mistura 25/75 se aproxima dos limites da Faixa A e, a mistura 75/25 se aproxima dos limites da Faixa D. As Figuras 4.15 e 4.16 apresentam os Limites das Faixas D e A, respectivamente.

Figura 4.15 – Misturas Solo/RCD dentro do Limite da Faixa D



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Figura 4.16 – Misturas Solo/RCD dentro do Limite da Faixa A



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Deste modo, é possível inferir que a adição de RCD nas misturas do solo 02 e do solo 03, dependendo da porcentagem de resíduo, originou melhorias na granulometria, proporcionando um enquadramento numa faixa mais granular. O mesmo acontece para o solo 01 ao adicionar até 50% de RCD ao solo.

Em relação aos valores obtidos para os pesos específicos dos grãos, a incorporação do RCD causou redução no valor do γ_s , proporcionalmente ao incremento de RCD nas

misturas, se comparado aos valores obtidos para os solos na condição pura. A Tabela 4.9 apresenta os valores obtidos para as misturas solo/RCD de cada amostra de solo.

Tabela 4.9 – Valores do peso específico dos grãos das misturas

% Solo/RCD	Peso específico dos grãos (g/cm ³)			
	100/0	75/25	50/50	25/75
Solo 01	2,65	2,51	2,38	2,24
Solo 02	2,64	2,51	2,37	2,24
Solo 03	2,65	2,51	2,37	2,24

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Para determinar a classificação destes novos materiais, o sistema de classificação SUCS e o HRB foram utilizados para identificar cada uma das misturas. Conforme apresentado no Quadro 4.1, é possível observar que a nomenclatura para as misturas com o solo 01 foi semelhante à nomenclatura para o solo natural. No entanto, as classificações para as misturas do solo 02 e do solo 03 passaram por algumas alterações, dependendo da proporção de RCD.

Quadro 4.1 – Classificação das misturas solo/RCD

Amostras	Misturas solo/RCD	Classificação	
		SUCS	HRB
Solo 01	100/0	GP	A - 1 - a
	75/25	GP	A - 1 - a
	50/50	GP	A - 1 - a
	25/75	GP	A - 1 - a
Solo 02	100/0	SM	A - 4
	75/25	SM	A - 4
	50/50	GM	A - 1 - b
	25/75	GM	A - 1 - a
Solo 03	100/0	ML	A - 4
	75/25	GM	A - 4
	50/50	GM	A - 1 - b
	25/75	GM	A - 1 - a

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

4.3.2 Compactação e Índice de Suporte Califórnia (CBR) das misturas

Para as misturas de solos com RCD, os ensaios de compactação e CBR foram realizados de forma análoga aos ensaios com o solo na condição pura. Para cada amostra de solo foi adicionada as proporções de RCD e executado os ensaios com reuso de material, aplicando-se as energias normal, intermediária e modificada.

4.3.2.1 Misturas do Solo 01

O solo 01 sem a adição de resíduo apresenta resultados satisfatórios de resistência para o uso em camadas de pavimento. Entretanto, foi analisada a necessidade da adição do RCD e, a Tabela 4.10 apresenta os parâmetros de compactação e os valores da expansão e CBR obtidos para as misturas do solo em questão, nas três energias de compactação.

Tabela 4.10 – Parâmetros de compactação e CBR do solo 01/RCD

Solo / RCD	Energia proctor	W _{ótima} (%)	$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (g/cm ³)	CBR (%)	Expansão (%)
100/0	Normal	7,9	2,09	78	0,0
	Intermediária	7,8	2,15	99	0,0
	Modificada	7,8	2,17	97	0,0
75/25	Normal	7,8	2,05	48	0,0
	Intermediária	8,3	2,07	133	0,0
	Modificada	7,6	2,16	88	0,0
50/50	Normal	10,2	1,93	25	0,0
	Intermediária	11,4	2,0	134	0,0
	Modificada	8,9	2,06	161	0,0
25/75	Normal	10,6	1,9	22	0,0
	Intermediária	11,4	2,0	69	0,0
	Modificada	11,1	2,02	185	0,0

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Analisando a Tabela 4.10 é possível aferir o comportamento do material ao adicionar as proporções de RCD. Observa-se que os valores da umidade ótima e do peso específico variaram de acordo com a energia aplicada e a adição do resíduo. No entanto, comparando-se os valores do solo puro com os valores das misturas, essas alterações só foram mais acentuadas com o incremento de RCD na ordem de 50% e 75%. Para uma mesma energia de compactação a umidade aumenta quanto maior for a quantidade do resíduo. O aumento da umidade ótima pode estar relacionado com a absorção da água utilizada no ensaio por parte das partículas de RCD nas misturas. A absorção do material é mais acentuada quanto maior for as frações de materiais cerâmicos presente no resíduo. De acordo com Amorim (2013), ao analisar a absorção de partículas de alvenaria, concreto e piso, observa-se que a absorção das frações de alvenaria é em torno de 200% maior que das demais partículas.

O ensaio de compactação tem a finalidade de diminuir o volume de vazios com a adição de água. Até certa umidade, á medida que se adiciona água aumenta-se o empacotamento entre os grãos e, conseqüentemente, o valor do peso específico. No entanto, ao aumentar ainda mais a umidade, a água não consegue mais expulsar o ar dos vazios e o valor do peso específico começa a diminuir. Na realização dos ensaios de compactação e CBR para este solo, ao adicionar as porcentagens de resíduo aumentava-se a dificuldade em moldar

os corpos-de-prova. Como ilustrado na Figura 4.17, à medida que se adicionava água à mistura, conseqüentemente aumentava-se a umidade, no entanto, o peso específico também continuava aumentando, até um ponto em que a mistura ficasse completamente saturada. Esse evento pode estar relacionado ao alto valor de absorção dos resíduos empregados. Outra justificativa para este fenômeno é a possibilidade de um alto teor de materiais pulverulentos presente no RCD, uma vez que esse alto teor juntamente com as partículas ásperas e porosas demandam mais água para conseguir lubrificar os grãos.

Figura 4.17 – Mudança do comportamento do material no decorrer do ensaio de compactação

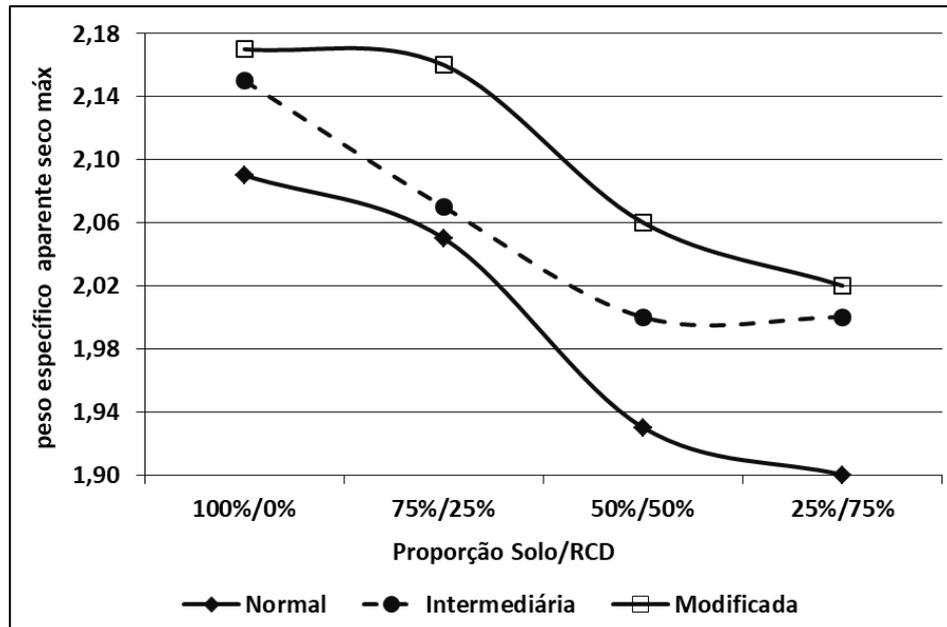


Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

O menor valor da umidade ótima foi de 7,6%, obtido quando aplicada a energia modificada para a mistura de 75/25, em que o $\gamma_{dm\acute{a}x}$ foi de 2,16 g/cm³. Entretanto, o maior valor do peso específico aparente seco máximo foi de 2,17 g/cm³ obtido para o solo puro, quando aplicada a energia modificada, em que a $W_{\acute{o}tima}$ é de 7,8%. Assim, quando o incremento de RCD é de no máximo 25%, percebe-se que não houve uma alteração expressiva para os materiais avaliados.

Apesar da pequena diferença, o valor da umidade ótima quando aplicada a energia modificada foi o menor na maioria das misturas, com exceção da mistura solo/RCD de 25/75. Os valores do peso específico aparente seco máximo, foram maiores quando aplicada a energia modificada e quanto menor o incremento de RCD ao solo, como ilustrado na Figura 4.18.

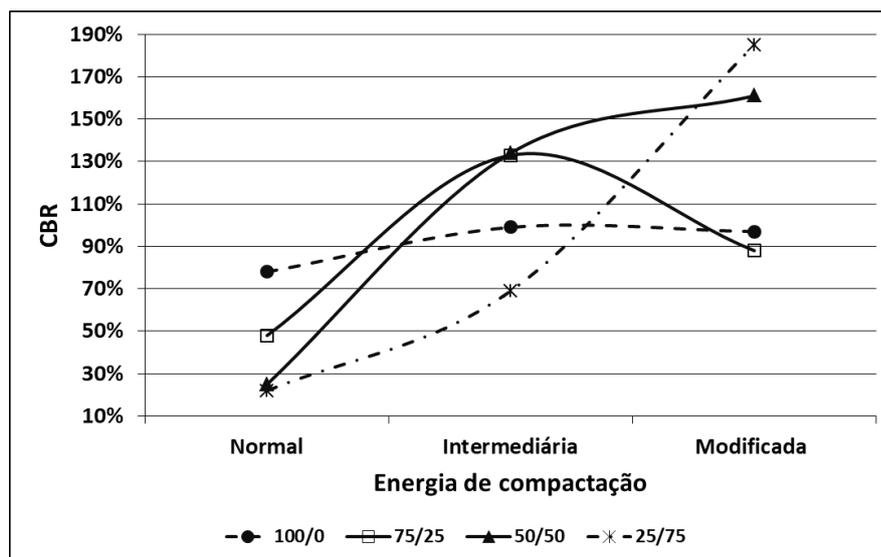
Figura 4.18 – Variação do $\gamma_{dm\acute{a}x}$ com a porcentagem de RCD para as misturas do solo 01



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

De acordo com a Figura 4.19, considerando os valores do CBR, para a mistura 75/25 o maior ganho de resistência ocorre quando a energia intermediária é aplicada, sendo esse comportamento semelhante ao do solo na condição pura. No entanto, para as misturas de 50/50 e 25/75, o valor do CBR aumenta com o aumento da energia aplicada.

Figura 4.19 – Variação do CBR com a energia de compactação para as misturas do solo 01

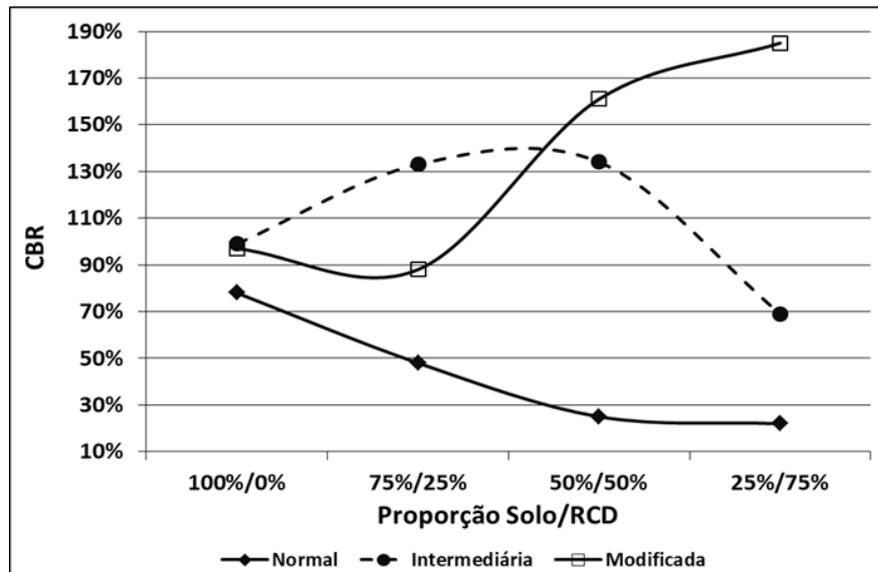


Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Com base nos valores do CBR é possível definir como as misturas são heterogêneas, uma vez que é complicado determinar uma tendência da variação do CBR com a variação da porcentagem de RCD e da energia aplicada. Adotando como exemplo a mistura 25/75 e

comparando-a com as demais, observa-se que a maior porcentagem de RCD proporcionou o maior valor de CBR quando aplicada a energia modificada, mas quando da utilização da energia normal, o CBR foi o menor. Conforme ilustrado na Figura 4.20, quando aplicada a energia normal o CBR é maior quanto menor for a porcentagem de RCD associado ao solo. No entanto, para as demais energias, esse padrão não se aplica.

Figura 4.20 – Variação do CBR com a porcentagem de RCD para as misturas do solo 01



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Todavia, analisado os valores de CBR e expansão obtidos, segundo os limites estabelecidos pelas normas ES 139 (DNIT, 2010f) e ES 141 (DNIT, 2010b), pode-se inferir que todas as misturas de solo/RCD exibiram valores satisfatórios para o uso em obras de pavimentação. Entretanto, quando aplicada a energia normal, as misturas de 75/25, 50/50 e 25/75 só podem ser utilizadas como camadas de sub-base. Assim, ao adicionar o RCD ao solo e comparar seus resultados com o solo puro, observa-se que essa adição não causou ganhos expressivos de resistência, aliás, dependendo da porcentagem do resíduo e da energia aplicada, o desempenho dessas misturas em pavimentação é menor que o do solo puro.

4.3.2.2 Misturas do Solo 02

Diferente da amostra anterior, o solo 02 apresenta baixos valores de CBR na condição pura. Com isso, a adição do RCD na composição do material pode melhorar as suas propriedades de resistência. A Tabela 4.11 apresenta os parâmetros de compactação, CBR e

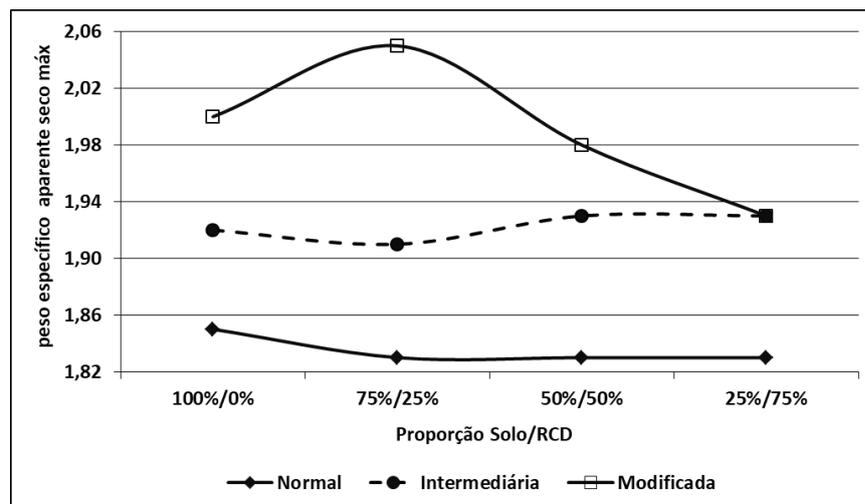
expansão para as diversas misturas de solo/RCD. A Figura 4.21 apresenta a variação do peso específico aparente seco máximo com o incremento de RCD ao solo.

Tabela 4.11 – Parâmetros de compactação e CBR do solo 02/RCD

Solo / RCD	Energia proctor	$W_{ótima}$ (%)	$\gamma_{dmáx}$ (g/cm ³)	CBR (%)	Expansão (%)
100/0	Normal	15,3	1,85	10,0	0,01
	Intermediária	13,3	1,92	14,0	0,07
	Modificada	12,5	2,0	6,0	0,29
75/25	Normal	13,6	1,83	7,0	0,03
	Intermediária	11,9	1,91	7,0	0,06
	Modificada	9,9	2,05	44,0	0,01
50/50	Normal	10,5	1,83	25,0	0,01
	Intermediária	12	1,93	14,0	0,01
	Modificada	9,1	1,98	18,0	0,01
25/75	Normal	14,3	1,83	21,0	0,00
	Intermediária	13,1	1,93	38,0	0,00
	Modificada	8,8	1,93	118,0	0,00

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Figura 4.21 – Variação do $\gamma_{dmáx}$ com a porcentagem de RCD para as misturas do solo 02

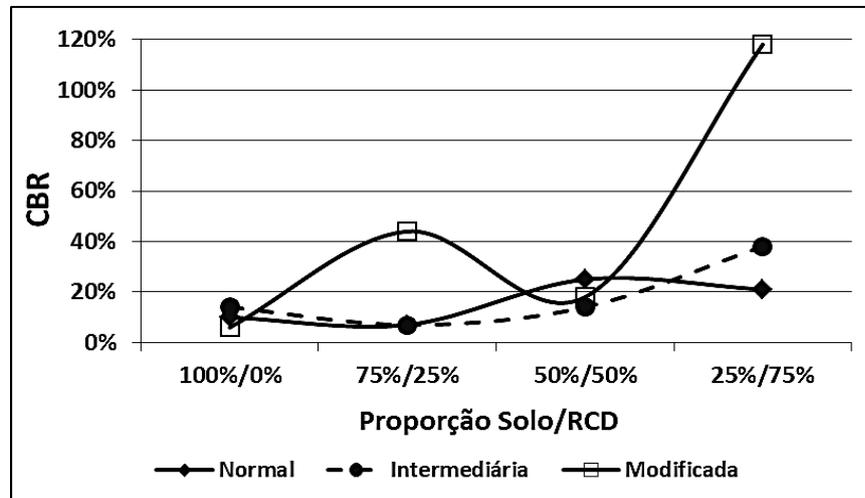


Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Analisando-se a Figura 4.21 é possível observar que houve um aumento no peso específico aparente seco máximo com o aumento da energia aplicada, em que a mistura de 75/25 teve o maior acréscimo, de aproximadamente 12,2%. Além disso, conforme a Tabela 4.11, quando aplicada a energia modificada, a umidade ótima é a menor em todas as misturas e, decresce com o incremento do RCD. No que diz respeito às porcentagens de RCD associadas ao solo, percebe-se que quando aplicada a energia normal, os valores de $\gamma_{dmáx}$ das misturas são constantes e menores se comparados ao solo na condição pura. No entanto, ao aplicar a energia modificada, o valor de $\gamma_{dmáx}$ aumenta ao adicionar 25% de RCD ao solo e, decresce constantemente ao acrescentar mais porcentagens do resíduo.

A Figura 4.22 apresenta a relação entre os valores de CBR e as diversas porcentagens de RCD adicionadas ao solo 02.

Figura 4.22 – Variação do CBR com o incremento de RCD para as misturas do solo 02



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Análogo ao que foi mencionado para a amostra anterior, o solo em questão apresenta um comportamento bem heterogêneo com a adição do resíduo em sua composição. Analisando-se a Figura 4.23 observa-se que nem sempre a aplicação de uma maior energia de compactação faz com que gere um maior CBR, como no solo puro, em que o maior valor de CBR ocorre quando a energia intermediária é aplicada e, na mistura 50/50, em que o maior valor ocorre quando aplicada a energia normal. No entanto, para as misturas 75/25 e 25/75, a aplicação da energia modificada provocou um acréscimo significativo no valor do CBR, de forma tal, que houve um ganho de desempenho, quando do uso dessas misturas em camadas do pavimento.

Além disso, em relação às porcentagens de RCD adicionadas ao solo para uma mesma energia de compactação, observa-se que para a energia normal o valor do CBR tem pouca variação ao adicionar 25% de resíduo, mas com a adição de 50% houve um aumento de aproximadamente 150% no valor do CBR em relação ao valor do solo puro. Para a energia intermediária, o incremento de 25% e 50% de RCD ao solo provoca pouca variação nos valores do CBR, entretanto, ao adicionar 75% de resíduo, o valor do CBR aumenta de forma considerável. O mesmo acontece quando aplicada a energia modificada, em que ao adicionar 75% de RCD incorporado ao solo, o valor do CBR foi o maior se comparado aos demais, gerando um ganho significativo de desempenho.

Dessa forma, para o uso em camadas de base de pavimento, o incremento do RCD ao solo só é significativo se for adicionado 75% aplicando a energia modificada, uma vez que de acordo com a norma ES 141 (DNIT, 2010b), essa mistura é a única que atende aos limites propostos. Todavia para ser utilizado em camadas de sub-base, de acordo com a ES 139 (DNIT, 2010f), as misturas de 75/25 e 50/50 atendem aos limites estabelecidos dependendo da energia de compactação aplicada.

4.3.2.3 Misturas do Solo 03

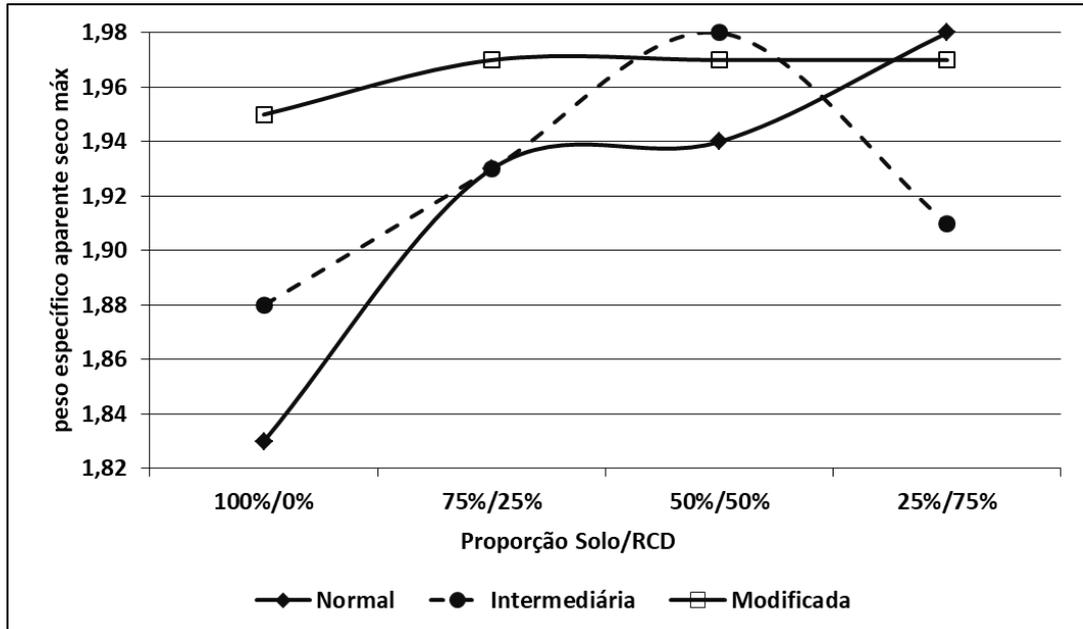
Equivalente ao que foi mencionado para o solo 02, a amostra em questão apresenta alguns valores de CBR inferiores para o uso em camadas de base e sub-base de pavimentos. Assim, foi analisada a influência do RCD quando incorporado ao solo, nos ensaios de comportamento mecânico. A Tabela 4.12 apresenta os parâmetros de compactação, CBR e expansão e, as Figuras 4.23 e 4.24 apresentam, respectivamente, a variação do peso específico aparente seco máximo e da umidade ótima com o incremento do RCD ao solo.

Tabela 4.12 – Parâmetros de compactação e CBR do solo 03/RCD

Solo / RCD	Energia proctor	W _{ótima} (%)	$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (g/cm ³)	CBR (%)	Expansão (%)
100/0	Normal	14,2	1,83	6,0	0,17
	Intermediária	12,7	1,88	6,0	0,11
	Modificada	11,3	1,95	24,0	0,10
75/25	Normal	10,7	1,93	1,0	0,09
	Intermediária	11,1	1,93	9,0	0,22
	Modificada	9,2	1,97	38,0	0,38
50/50	Normal	9,6	1,94	6,0	0,00
	Intermediária	10	1,98	30,0	0,04
	Modificada	9,8	1,97	31,0	0,04
25/75	Normal	13,1	1,98	20,0	0,09
	Intermediária	12,2	1,91	24,0	0,02
	Modificada	9,3	1,97	90,0	0,05

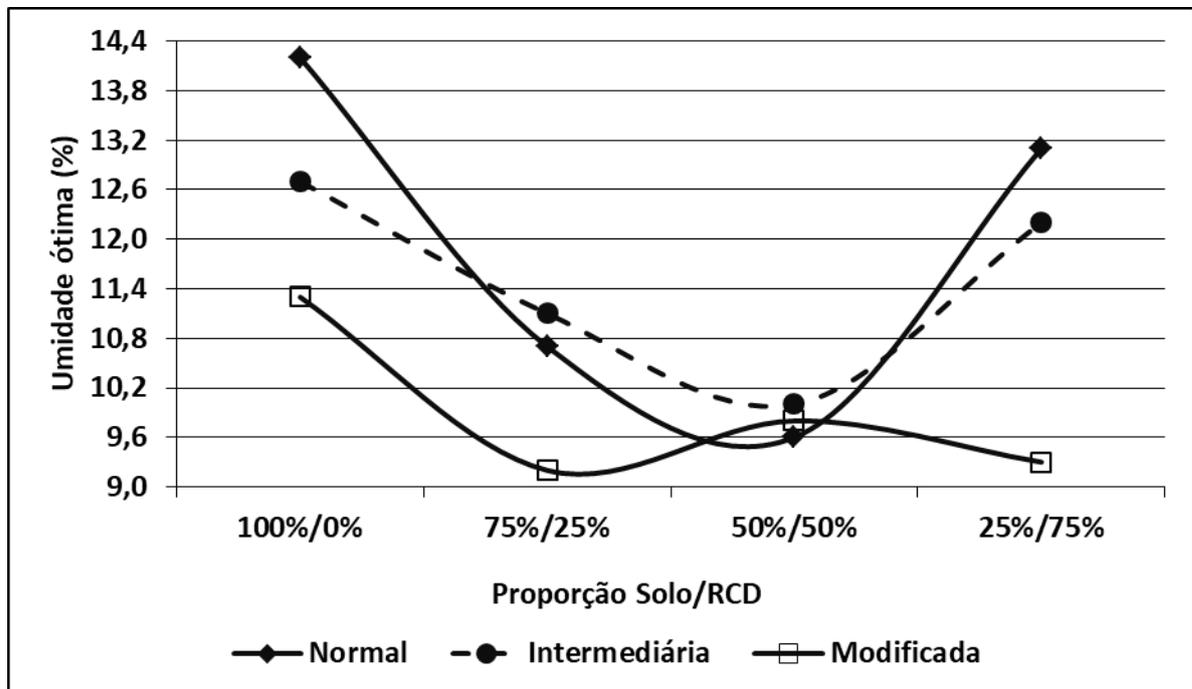
Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Figura 4.23 – Variação do $\gamma_{dm\acute{a}x}$ com a porcentagem de RCD para as misturas do solo 03



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Figura 4.24 – Variação da umidade ótima com a porcentagem de RCD para as misturas do solo 03



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

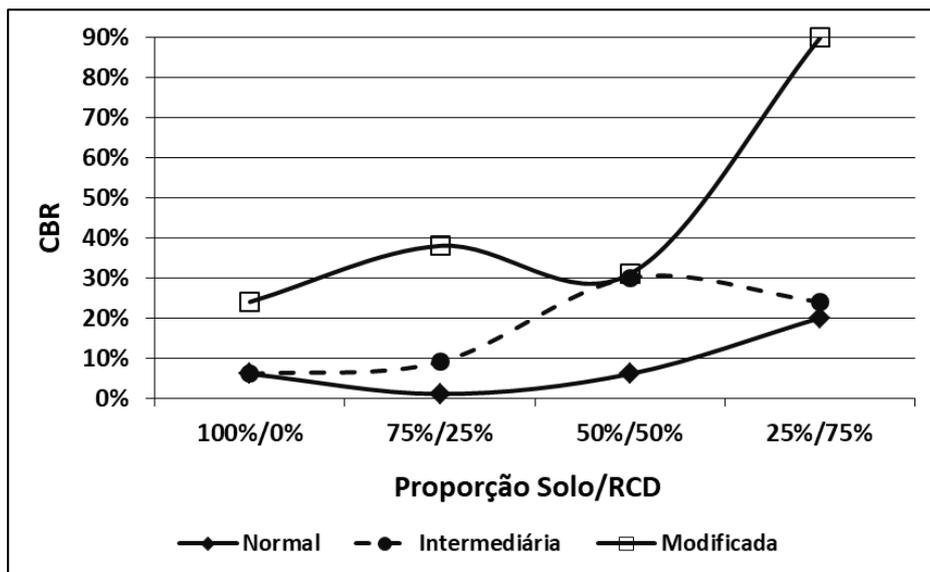
Verificando as Figura 4.23 e 4.24, observa-se que a aplicação de uma maior energia de compactação causa uma modificação nos resultados das misturas. A energia modificada provoca um aumento significativo no peso específico aparente seco máximo para o solo puro

e para a mistura 75/25, mas para as demais misturas com maior quantidade de RCD, o acréscimo de energia origina valores abaixo do esperado. Em relação aos valores da umidade ótima, o aumento de energia provoca diminuição da umidade na maioria das misturas, com exceção da mistura 50/50, em que os valores da umidade são praticamente constantes.

Analisando a variação da porcentagem de RCD para uma mesma energia de compactação, observa-se que para a energia normal, os valores do peso específico aparente seco foram crescentes à medida que foi aumentando a porcentagem de RCD incorporado ao solo. Na energia intermediária os valores de $\gamma_{dm\acute{a}x}$ aumentam até o incremento de 50% de RCD ao solo, mas ao adicionar 75% do resíduo, o $\gamma_{dm\acute{a}x}$ decresce de valor. Com a aplicação da energia modificada o valor de $\gamma_{dm\acute{a}x}$ aumenta com a adição de 25% de RCD, no entanto ao adicionar mais porcentagens de resíduo, o valor se torna constante. Os valores de umidade ótima para as energias normal e intermediária diminuem com o incremento de até 50% de RCD. Apesar disso, para a energia modificada os valores da umidade oscilam com o incremento do resíduo, mas a adição de 75% gera o menor valor de umidade ótima.

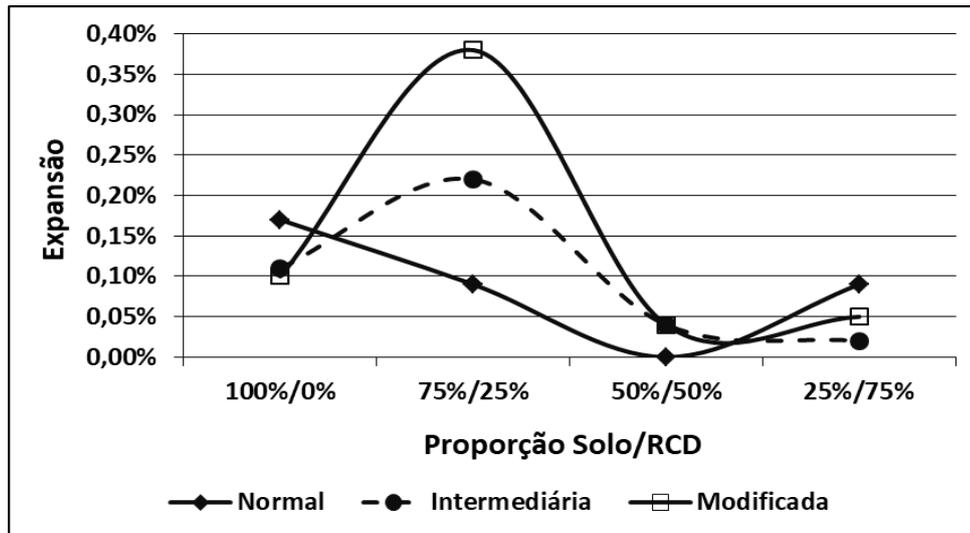
A Figura 4.25 apresenta a relação entre os valores de CBR e as diversas porcentagens de RCD adicionadas ao solo 03 e, a Figura 4.26 apresenta a variação da expansão com o incremento do resíduo.

Figura 4.25 – Variação do CBR com o incremento de RCD para as misturas do solo 03



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Figura 4.26 – Variação da expansão com o incremento de RCD para as misturas do solo 03



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

De acordo com o gráfico da Figura 4.25, a energia de compactação influencia nos valores do CBR para as misturas do solo 03. Percebe-se que na maioria das amostras, quanto maior for a energia aplicada maior é o acréscimo no valor do CBR. Mesmo assim, o ganho de resistência em função do aumento da energia só se tornou expressivo se comparar a energia normal com a modificada, uma vez que a mudança da energia normal para a intermediária gera valores de CBR praticamente iguais, com exceção da mistura 50/50. Com relação à expansão, no geral, a aplicação da energia normal foi a que gerou menores valores de expansão. No entanto, todos os valores são aceitáveis dentro os limites das normas para pavimentação.

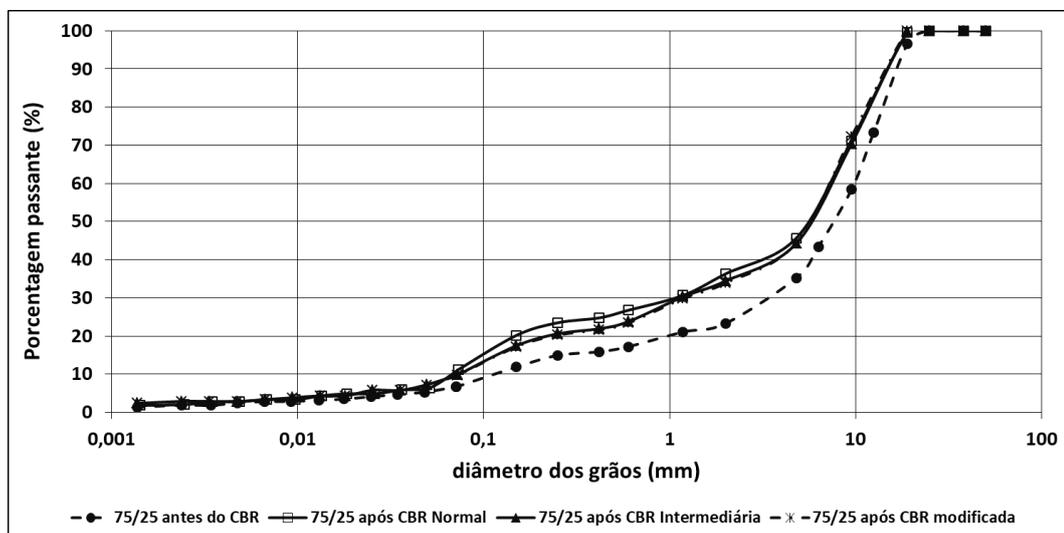
Além disso, com relação às porcentagens de RCD integradas ao solo para uma mesma energia de compactação, o valor de CBR da maioria das misturas solo/RCD é maior que o valor para o solo na condição pura. Quando aplicada a energia normal, a adição de 25% de RCD provoca uma diminuição no valor, mas com o incremento de mais porcentagens de RCD ao solo, os valores de CBR foram crescentes. Se comparar o valor de CBR do solo puro com o valor da mistura com 75% de RCD observa-se um aumento expressivo no valor do CBR, de aproximadamente 233%, gerando um ganho significativo no desempenho da amostra. Para a energia intermediária, o incremento de RCD ao solo gera um aumento nos valores do CBR, em que o maior valor é encontrado ao adicionar 50% do resíduo. Quando aplicada a energia modificada, à medida que foi incrementada as porcentagens de RCD, os valores do CBR oscilaram, contudo a incorporação de 75% do resíduo à mistura apresentou um valor de CBR superior aos demais encontrados para o solo 03.

Deste modo, de acordo com os valores do CBR e da expansão o incremento de 25% do RCD ao solo só proporciona melhorais se for aplicada a energia de compactação modificada, podendo assim, essa mistura ser utilizada como material para camada de sub-base. Ao incorporar 50% do resíduo, as misturas também podem ser utilizadas como material de sub-base, sendo necessária apenas a aplicação da energia intermediária. A mistura com 75% de RCD pode ser utilizada como material de sub-base sendo aplicada qualquer uma das energias. No entanto, a aplicação da energia modificada proporciona um valor de CBR que atende aos limites propostos pela ES 141 (DNIT, 2010b) para uso como material em camadas de base de pavimentos.

4.3.3 Análise da quebra dos grãos após o ensaio de CBR

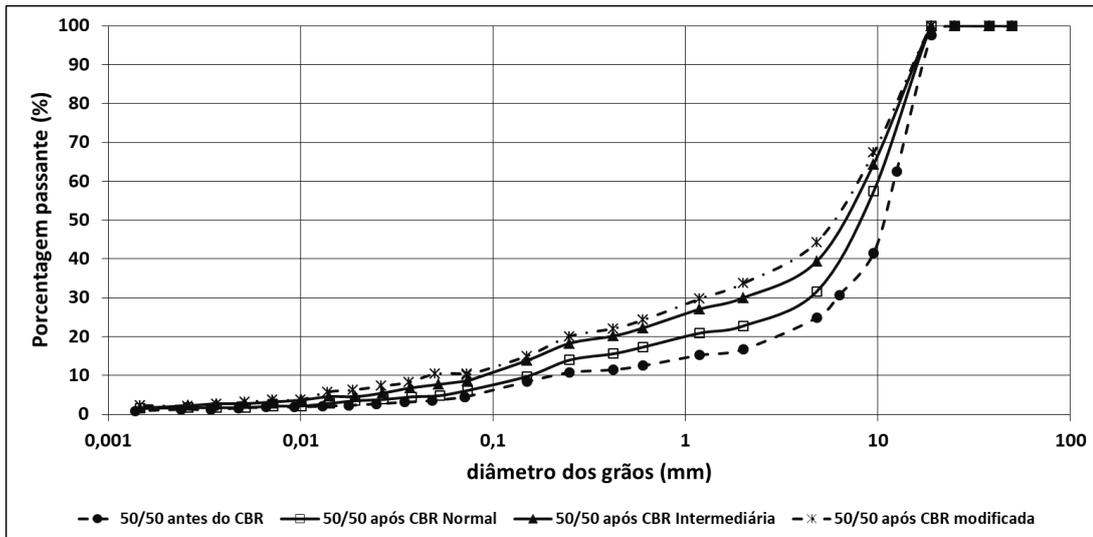
A adição do RCD aos solos acarretou em aumento na porcentagem de pedregulho e diminuição da fração de finos de todas as amostras. No entanto, ao realizar os ensaios de compactação e CBR era perceptível que, com a aplicação da energia de compactação a composição granulométrica das misturas alterava-se durante o ensaio. Alguns materiais presente na composição do RCD, como cerâmica vermelha e materiais cimentícios, têm maior probabilidade de se decompor com a aplicação da energia. Assim, após a realização do ensaio de CBR foi realizado um novo ensaio de granulometria com a finalidade de verificar a quebra dos grãos para cada amostra. As Figuras de 4.27 a 4.29 ilustram as curvas granulométricas para as amostras do solo 01 com o RCD, nas misturas de 75/25, 50/50 e 25/75, respectivamente.

Figura 4.27 – Curvas granulométricas após CBR da mistura 75/25 do solo 01



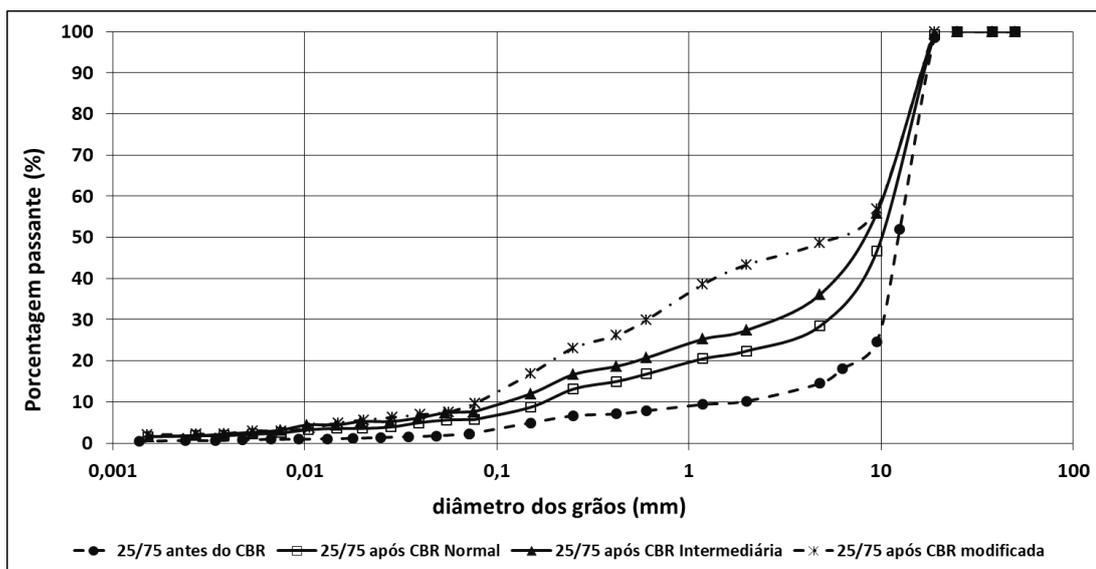
Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Figura 4.28 – Curvas granulométricas após CBR da mistura 50/50 do solo 01



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Figura 4.29 – Curvas granulométricas após CBR da mistura 25/75 do solo 01



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Analisando-se as figuras anteriores, verifica-se que em todas as misturas solo/RCD a realização do ensaio de CBR provocou mudanças em sua granulometria. Nas misturas 25/75 e 50/50 quanto maior a energia aplicada maior é a porcentagem de materiais finos e, menor a fração de pedregulhos. No entanto, ao comparar as curvas granulométricas antes e depois do ensaio, observa-se que, com exceção da mistura 25/75, a mudança na granulometria não é tão significativa. Assim, quanto maior a porcentagem de RCD da mistura, maior será a quebra dos grãos.

As Figuras de 4.30 a 4.32 apresentam as curvas granulométricas para as misturas solo 02/RCD nas proporções 75/25, 50/50 e 25/75, respectivamente.

Figura 4.30 – Curvas granulométricas após CBR da mistura 75/25 do solo 02

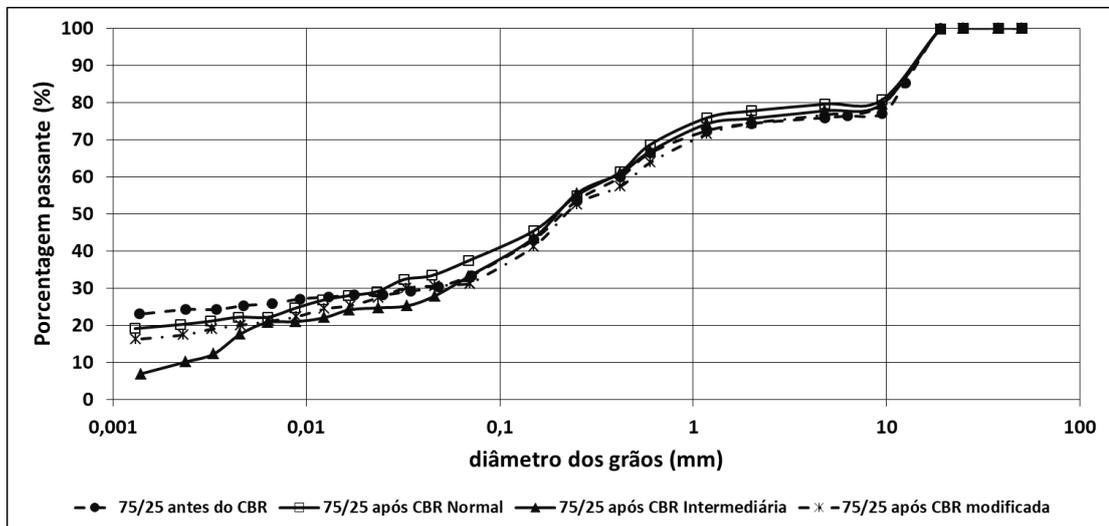


Figura 4.31 – Curvas granulométricas após CBR da mistura 50/50 do solo 02

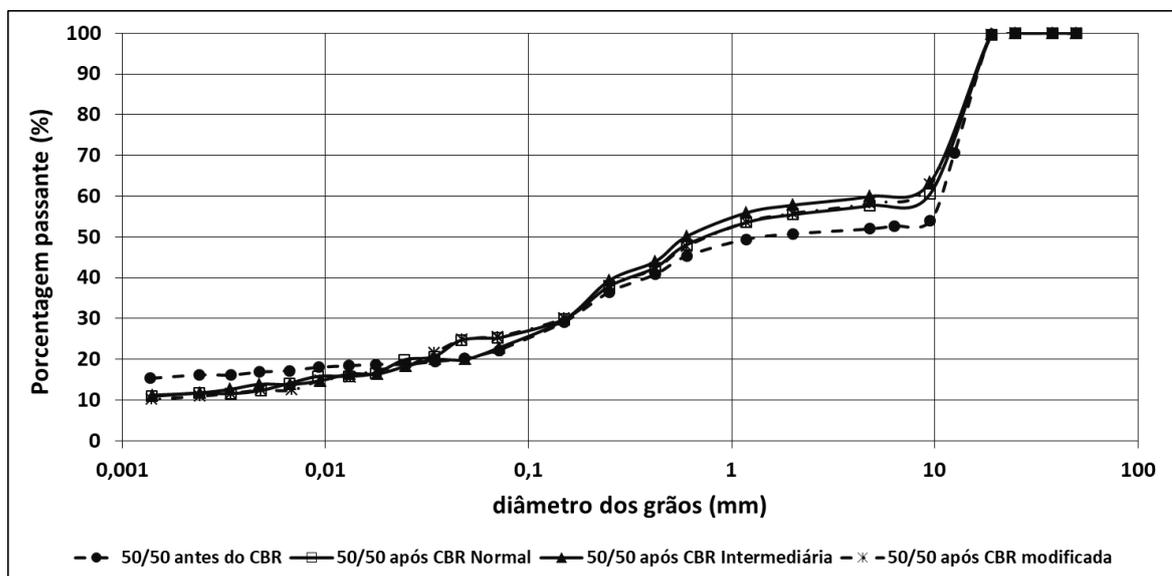
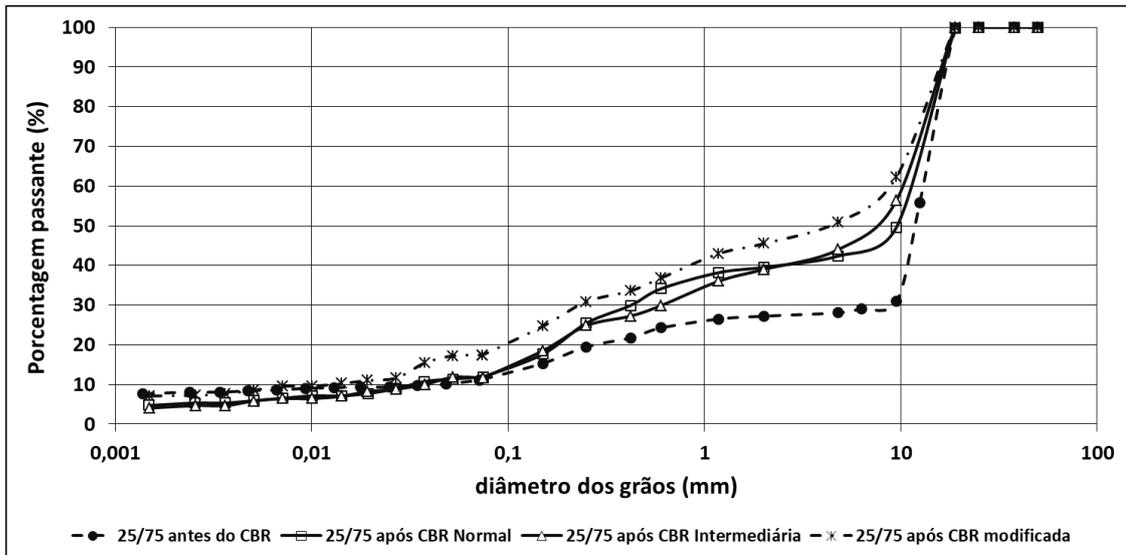


Figura 4.32 – Curvas granulométricas após CBR da mistura 25/75 do solo 02



Com base nas figuras ilustradas foi possível compreender que para as misturas do solo 02, a aplicação de uma maior energia de compactação pouco influencia no resultado. Comparando as curvas antes e após o ensaio, é possível inferir que houve quebra dos grãos em todas as misturas, entretanto, apenas na mistura com maior porcentagem de RCD, a mistura 25/75, a mudança na granulometria é mais acentuada. Neste caso, a porcentagem de pedregulho reduz em torno de 20% em relação ao valor obtido antes do ensaio.

Com relação às mistura do solo 03 com o RCD, as Figuras de 4.33 a 4.35 apresentam as curvas granulométricas para as misturas 75/25 e 25/75, respectivamente.

Figura 4.33 – Curvas granulométricas após CBR da mistura 75/25 do solo 03

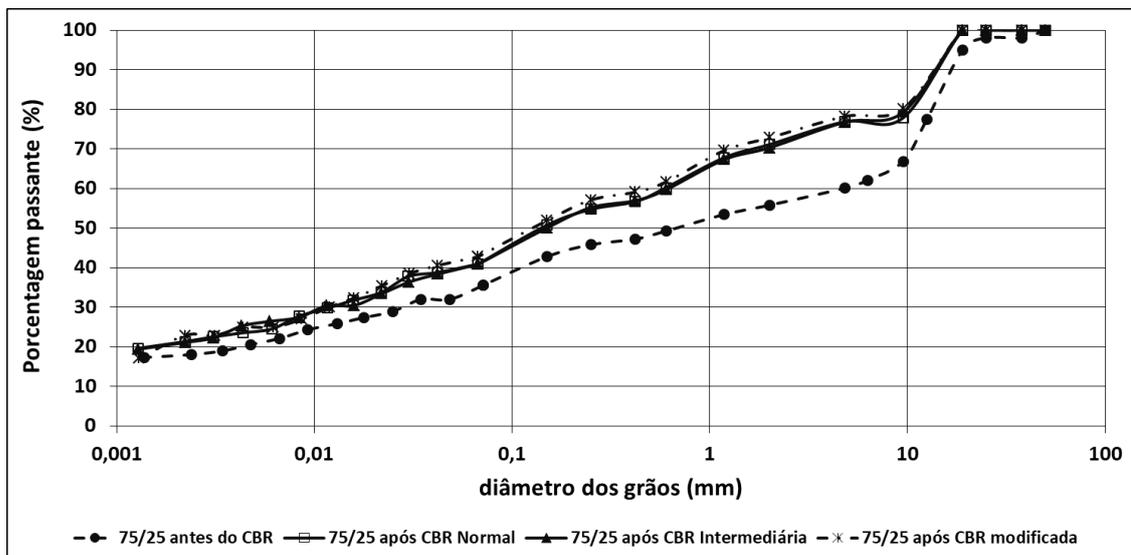


Figura 4.34 – Curvas granulométricas após CBR da mistura 50/50 do solo 03

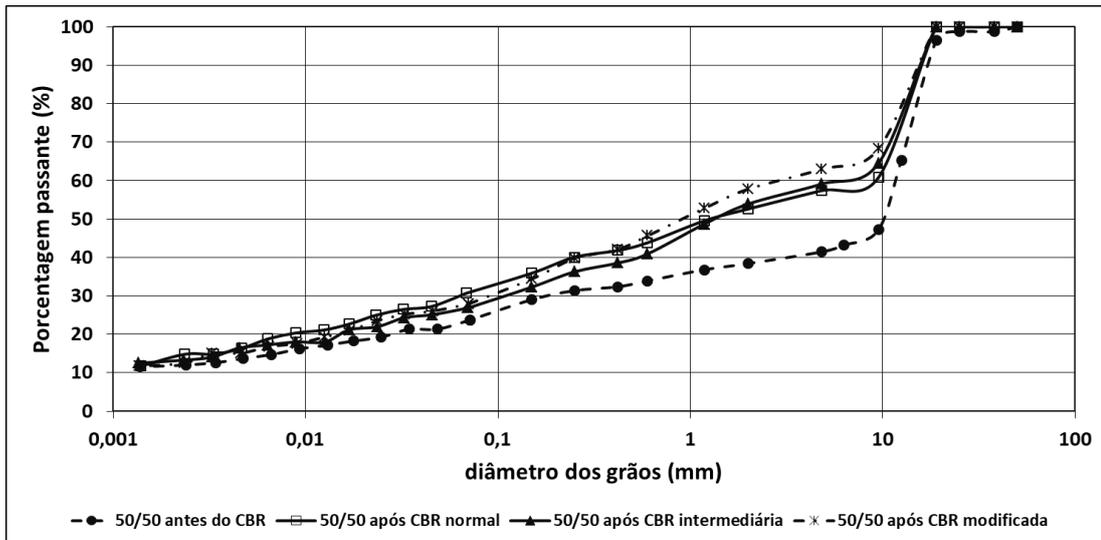
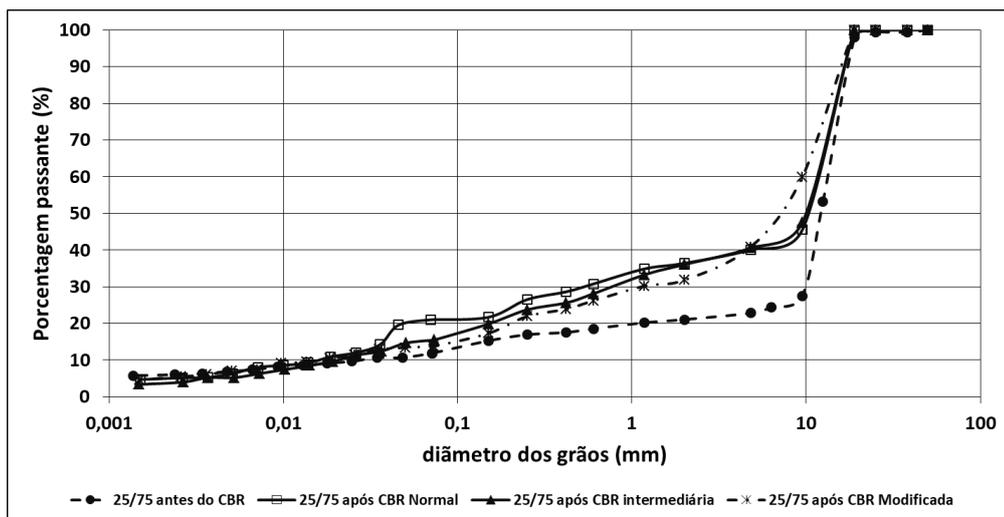


Figura 4.35 – Curvas granulométricas após CBR da mistura 25/75 do solo 03



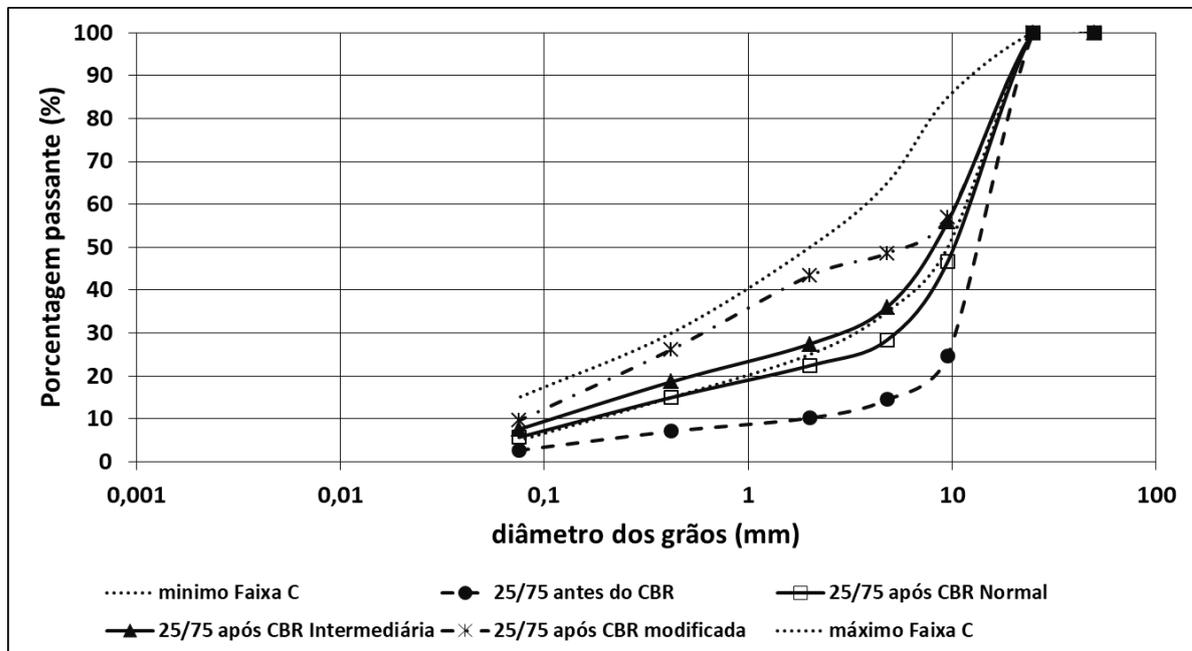
Verificando as curvas granulométricas é possível observar que a quebra dos grãos é significativa em todas as misturas do solo 03 com o RCD. À medida que aumenta a porcentagem de RCD aumenta a quantidade de finos e as frações de pedregulho diminuem. No entanto, o aumento da energia aplicada durante o ensaio pouco influencia na mudança da granulometria.

Baseado nos resultados da granulometria de todas as misturas é possível inferir que, independente da amostra de solo, a mistura 25/75 apresentou a maior quebra de grãos. Uma possível explicação para este fenômeno é que o RCD é um material muito heterogêneo, composto por partículas que são mais fáceis de desagregar-se quando comparadas às partículas do solo. Deste modo, como as misturas 25/75 tem maior porcentagem de RCD em

relação à porcentagem de solo, é compreensível que a quebra dos grãos seja mais significativa para estas misturas do que para as que contêm maior quantidade de solo.

Considerando os limites estabelecidos pelas faixas para materiais empregados em camadas de base, após a quebra dos grãos a estabilidade granulométrica da maioria das amostras não foi comprometida. No entanto, para outras amostras a aplicação da energia de compactação alterou a faixa em que ela se enquadrava. Como exemplo, na Figura 4.36 a mistura 25/75 do solo 01 conseguiu se enquadrar dentro da Faixa de trabalho C com a aplicação da energia intermediária e modificada.

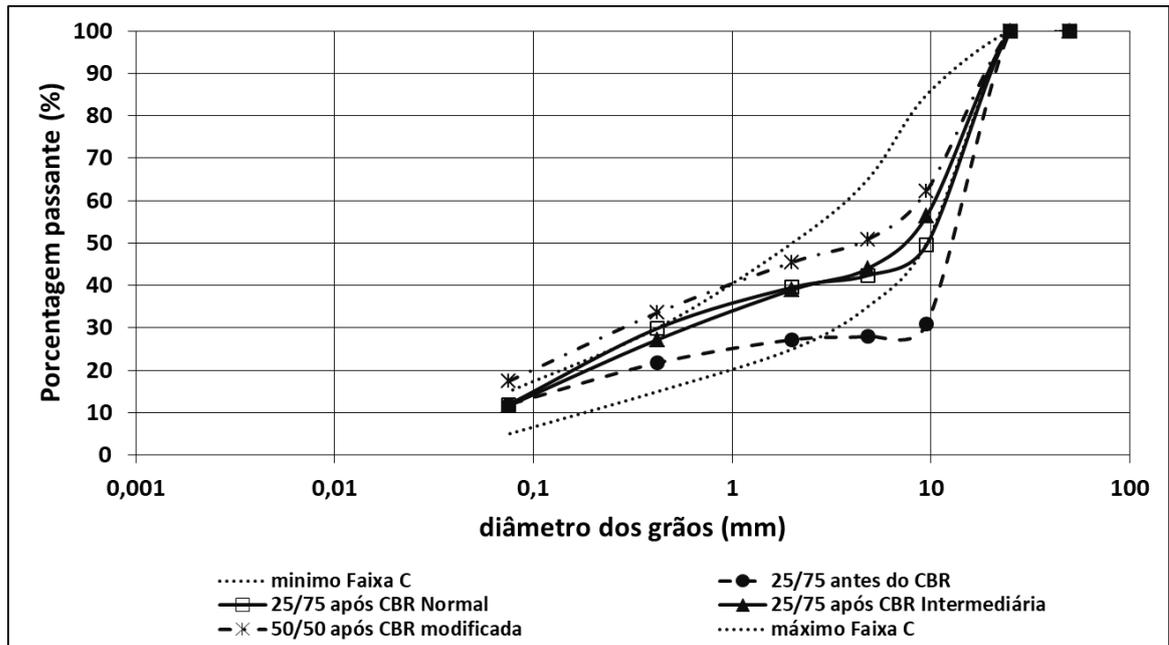
Figura 4.36 – Curvas granulométricas 25% do solo 01 dentro da Faixa C após CBR



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

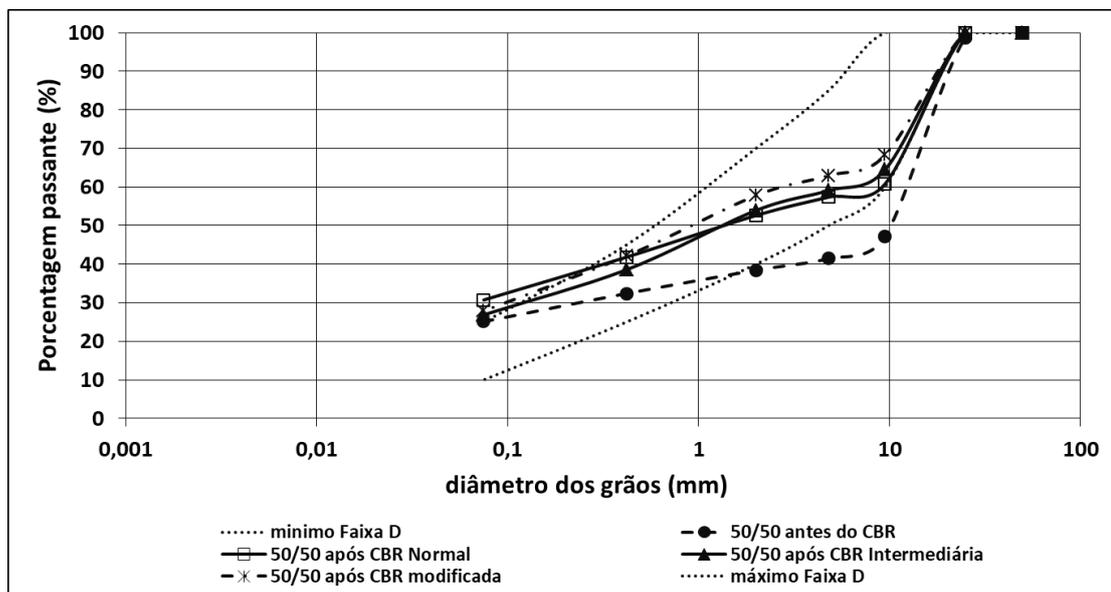
Para a mistura 25/75 do solo 02, que antes se enquadrava dentro da Faixa de trabalho A, após a aplicação das energias de compactação passou a se encontrar dentro da Faixa C, como mostrado na Figura 4.37. Para o solo 03, de acordo com a Figura 4.38, a mistura 50/50 que antes se aproximava da Faixa D, após a aplicação da energia passou a se enquadrar dentro da Faixa de trabalho.

Figura 4.37 – Curvas granulométricas 25% do solo 02 dentro da Faixa C após CBR



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Figura 4.38 – Curvas granulométricas 50% do solo 03 dentro da Faixa D após CBR



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusões

Os resultados da caracterização dos solos servem como indícios da diversidade de materiais nas regiões do estado do Rio Grande do Norte. A amostra da cidade de Caraúbas/RN (solo 01) é um material granular, mal graduado, em que a sua granulometria se enquadra numa faixa de trabalho de boa qualidade para ser utilizado em camadas de base (Faixa C), segundo indicado pelo DNIT para tráfegos com $N > 5 \times 10^6$. Além do mais, os valores do LL e do IP obedecem aos limites impostos pela norma ES 141 (DNIT, 2010b) para uso em camadas de base. Entretanto, as amostras da cidade de Macaíba/RN (solo 02) e Ipueira/RN (solo 03) apresentam um material menos granular e mais plástico, em que as suas curvas granulométricas não se enquadram em nenhuma das faixas limites impostas pelo o DNIT e, os valores de LL são superiores ao recomendado na norma para uso em base de pavimento. Assim, de acordo com a caracterização física apenas o solo 01 pode ser utilizado como material para camada de base.

Os ensaios de caracterização física das partículas de RCD apresentaram um material mal graduado, com graduação aberta e com ausência de partículas finas em sua composição. A capacidade de suporte de um pavimento é diretamente influenciada pela presença de partículas grossas, assim, como este material tem elevada presença dessas partículas, conseqüentemente tem alta possibilidade de ser usado em camadas de pavimentos. O resultado do ensaio de absorção do RCD foi elevado, se compara-lo à absorção de agregados naturais. Esse fato pode ser consequência da presença de materiais cerâmicos na composição. No entanto ao compara-lo com outros resultados presentes na literatura, o valor encontrado nesta pesquisa é satisfatório. Embora o alto valor de absorção, os resultados do ensaio de abrasão Los Angeles e índice de forma estão dentro dos limites prescritos pelo DNIT para agregados naturais.

Em todas as amostras o incremento de RCD ao solo promoveu um aumento na porcentagem de partículas grossas, sendo que a maior alteração na granulometria ocorreu para o solo 02 e o solo 03. Todas as misturas do solo 02 apresentaram melhorias na granulometria em relação ao solo puro, de modo que ao adicionar 50% de RCD ao solo, a mistura passou a se enquadrar nos limites da Faixa D para uso em camadas de base conforme recomendado pelo DNIT. As misturas do solo 03 também apresentaram melhoria em sua composição granulométrica, no entanto, a adição de RCD ao solo não foi suficiente para enquadrar a

amostra em alguma das faixas do DNIT. Para as misturas do solo 01 verificou-se que a adição do RCD ao solo gerou uma melhoria granulométrica, em que a faixa de enquadramento para uso em camada de base passou a ser a Faixa A, caracterizando um ganho expressivo em termos de estabilização granulométrica. A classificação do solo 01 puro e das misturas solo/RCD são idênticas. Contudo, as classificações do solo 02 e do solo 03 sofrem alteração com o incremento do RCD.

Quanto aos ensaios de compactação e CBR, verificou-se que para o solo 01 na condição pura a aplicação da energia modificada é dispensável, uma vez que com a aplicação da energia intermediária o CBR obtido foi o maior. Em relação à adição de RCD ao solo, à medida que aumentava a porcentagem do resíduo o peso específico diminuía e a umidade ótima aumentava. O incremento de 25% de RCD ao solo promoveu um comportamento semelhante ao do solo puro. A adição do RCD ao solo gerou diferentes resultados que são influenciados pela porcentagem do resíduo e pela energia aplicada. Dessa forma, o incremento do RCD ao solo só é satisfatório caso seja adicionado 50% e 75% de resíduo com a aplicação da energia modificada.

Para o Solo 02 na condição pura os valores do CBR são relativamente baixos, sendo o valor da energia intermediária o mais elevado. Assim, no geral, ao adicionar as partículas de RCD ao solo houve um ganho de desempenho, quando do uso das misturas em camadas do pavimento. A aplicação da energia modificada é mais significativa para as misturas solo/RCD 75/25 e 25/75. Quando comparado os valores na condição pura com as misturas, o incremento do RCD ao solo na porcentagem de 75% em massa gerou um aumento nos valores do CBR quando aplicada qualquer energia de compactação. Portanto, enquanto na condição pura a amostra só poderia ser utilizada como material de subleito, a mistura 25/75 quando aplicada a energia modificada pode ser utilizada como material em camada de base de pavimento, atendendo aos limites da norma ES 141 (DNIT, 2010b).

Quanto aos ensaios de compactação e CBR para o solo 03, verificou-se que os valores do CBR só se alteram com a aplicação da energia modificada e a expansão aumenta com o aumento da energia. Se comparar os resultados das misturas com os do solo na condição pura, observa-se que no geral a umidade ótima diminui e, em qualquer energia de compactação o valor do peso específico aumentou com o incremento do RCD. A energia de compactação influencia nos valores do CBR, em que quanto maior for a energia aplicada maior é o valor do CBR. Além disso, os valores do CBR da maioria das misturas para uma mesma energia são superiores aos valores do solo na condição pura. Sendo assim, enquanto na condição pura o solo só poderia ser utilizado como sub-base quando aplicada a energia

modificada, com o incremento do RCD ao solo ocorre um ganho significativo em termos de resistência e, ao adicionar 75% do resíduo aplicando a energia modificada, a amostra pode ser utilizada como material de base granulometricamente estabilizada.

Em relação à quebra dos grãos, para as misturas do solo 01, no geral, à medida que se aumentava a energia de compactação a porcentagem de finos das misturas também crescia. Para o solo 02 e o solo 03 a energia de compactação tem pouca influência na quebra dos grãos. Entretanto, para as misturas das três amostras de solo, à medida que se aumentava a porcentagem de RCD ao solo a quebra dos grãos também aumentava. Esse fato pode ser explicado pela presença de materiais de fácil degradação na composição do RCD, como por exemplo, os materiais cerâmicos.

Enfim, tendo em vista os resultados apresentados nesta pesquisa, pode-se inferir que a utilização do RCD em conjunto com os solos estudados apresentam parâmetros satisfatórios para a sua utilização como material alternativo em obras de pavimentação. Dessa forma, o incremento de RCD a solos com características semelhantes aos do estudo também podem apresentar alto potencial para uso em pavimentos.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Estudar outras proporções de misturas de solo/RCD para os solos estudados nesta pesquisa para assim aumentar a quantidade de informações sobre os mesmos;

Realizar o ensaio de módulo de resiliência para aumentar o conhecimento técnico sobre as amostras;

Avaliar o emprego de ensaios de compactação e CBR sem reuso do material e compará-los com os resultados dos ensaios realizados com reuso de material;

Avaliar a aplicação de misturas de solo/RCD com solos de características diferentes e de outras regiões do estado.

REFERÊNCIAS

AHMED, Aly. Recycled bassanite for enhancing the stability of poor subgrades clay soil in road construction projects. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 48, p.151-159, nov. 2013.

AMADEI, D. I. B.; PEREIRA, J. A.; SOUZA, R. A. de; MENEGUETTI, K. S. A questão dos resíduos de construção civil: um breve estado da arte. **Revista Nupem**, [S.I.], v. 3, n. 5, ago. 2011.

AMORIM, Enio Fernandes. **Viabilidade técnica econômica de misturas de solo-RCD em camadas de base de pavimentos urbanos. Estudo de caso: município de Campo Verde - MT.** 2013. 151 f. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

Angulo SC, Miranda LFR, John VM. Construction and demolition waste, its variability and recycling in Brazil. **Proceedings of sustainable building**, Oslo; 2002.

ARISHA, A.; GABR, A.; EL-BADAWY, S.; SHWALLY, S. Using Blends of Construction & Demolition Waste Materials and Recycled Clay Masonry Brick in Pavement. **Procedia Engineering**, Egypt, v. 143, p.1317-1324, 2016.

ARULRAJAH, A.; ALI, M. M. Y.; PIRATHEEPAN, J.; M. W. Bo, M.ASCE. Geotechnical Properties of Waste Excavation Rock in Pavement Subbase Applications. **Journal of Materials in Civil Engineering**, Australia, v.24, n. 7, julho, 2012.

ARULRAJAH, A.; DISFANI, M. M.; HORPIBULSUK, S.; SUKSIRIPATTANAPONG, C.; PRONGMANEE, N. Physical properties and shear strength responses of recycled construction and demolition materials in unbound pavement base/subbase applications. **Construction And Building Materials**, Australia, v. 58, p.245-257, 2014.

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

_____. **NBR 15112**: Resíduos da construção civil e resíduos volumosos - Áreas de transbordo e triagem - Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 15113**: Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes - Aterros - Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 15114**: Resíduos sólidos da Construção civil - Áreas de reciclagem - Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 15115**: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Execução de camadas de pavimentação - Procedimentos. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **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.

_____. **NBR 7181:** Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR NM 248:** Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 6508:** Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 6457:** Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 6459:** Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 7180:** Solo - Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 7182:** Ensaio normal de compactação de solos. Rio de Janeiro: ABNT, 1986.

_____. **NBR 9895:** Solo - Índice de Suporte Califórnia - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA RECICLAGEM DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL E DEMOLIÇÕES - ABRECON; **Relatório da Pesquisa setorial da reciclagem de resíduos da construção 2014/2015**, set. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA RECICLAGEM DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL E DEMOLIÇÃO ABRECON. **Relatório da Pesquisa Setorial da reciclagem de resíduos da construção 2017/2018**, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS - ABRELPE. **Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil – 2011**. São Paulo, 2011.

AYAN, V.; LIMBACHIYA, M. C.; OMER, J. R.; AZADANI, S. M. N. Compaction assessment of recycled aggregates for use in unbound subbase application. **Journal Of Civil Engineering and Management**, v. 20, n. 2, p. 169-174, 2014.

AZAM, H., & CAMERON, D. Laboratory evaluation of recycled concrete aggregate and recycled clay masonry blends in pavement applications. **ASTM International**, v. 2, p. 328-346, 2013.

BARBUDO, A.; AGRELA, F.; AYUSO, J.; JIMÉNEZ, J. R.; POON, C. S. Statistical analysis of recycled aggregates derived from different sources for sub-base applications. **Construction and Building Materials**, v. 28, n. 1, p. 129-138, 2012.

BEHIRY, Ahmed Ebrahim Abu El-maaty. Utilization of cement treated recycled concrete aggregates as base or subbase layer in Egypt. **Ain Shams Engineering Journal**, [s.l.], v. 4, n. 4, p.661-673, mar. 2013.

BENNERT, T.; PAPP JR., W. J.; MAHER, A.; GUCUNSKI, N. Utilization of construction and demolition debris under traffic-type loading in base and subbase applications. **Transportation Research Record**, n.1714, p.33-39, 2000.

BLANKENAGEL, B. J.; & GUTHRIE, W. S. Laboratory characterization of recycled concrete for use as pavement base material. **Transportation Research Record**, Washington, n. 1952, p. 21-27, 2006.

BRASIL, MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Resolução CONAMA nº 307 – **Diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil**, Brasília, 2002.

CABALAR, A. F.; HASSAN, D. I.; ABDULNAFAA, M. D.. Use of waste ceramic tiles for road pavement subgrade. **Road Materials And Pavement Design**, [s.l.], v. 18, n. 4, p.882-896, 14 jun. 2016.

CAMERON, D.; AZAM, A.; RAHMAN, M. Recycled clay masonry and recycled concrete aggregate blends in pavement. *In*: GEOCONGRESS 2012 CONF, GEOTECH. Spec. pub. ASCE, p. 1532-1541, 2012.

CARDOSO, R.; SILVA, R. V.; BRITO, J. de; DHIR, R. Use of recycled aggregates from construction and demolition waste in geotechnical applications: A literature review. **Waste Management**, v.49, p. 131-145, 2016.

CARNEIRO, A. P.; BURGOS, P. C.; ALBERTE, E. P. V. Uso do agregado reciclado em camadas de base e sub-base de pavimentos. **Projeto Entulho Bom**. Salvador: EDUFBA / Caixa Econômica Federal, p. 190-227, 2001.

Confederação Nacional do Transporte. **Pesquisa CNT de rodovias 2019, relatório gerencial**, Brasília, CNT: SEST, SENAT, 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS – DNER. **ME 035**: Agregados - determinação da abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, 1998.

_____. **ME 081**: Agregados - determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1998.

_____. **ME 086**: Agregado - determinação do índice de forma. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES- DNIT (Brasil). **Manual de pavimentação**. 3. ed. Rio de Janeiro: Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 2006. 274 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES- DNIT. **ES 108**: Terraplanagem – Aterros – Especificação de Serviço. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **ES 139**: Pavimentação – Sub-base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **ES 141:** Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2010.

ELLIS, R.; AGDAS, D.; FROST, K. **Developing improved opportunities for the recycling and reuse of materials in road, bridge, and construction projects**, Florida, 2014.

EUROPEAN COMMISSION. 1999. **Construction and demolition waste management practices, and their economic impacts – Final Report**. Disponível em: <http://europa.eu.int/comm/environment/waste/studies/cdw/c&dw_report.htm>. Acesso em: 29 de nov. 2004.

Eurostat, 2014. Waste statistics in Europe. < <https://epp.eurostat.ec.europa.eu/> > (july, 2014).

Forster SW. FHWA views on recycling concrete pavements. *In: FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION INTERNATIONAL CENTER FOR AGGREGATES RESEARCH 5TH ANNUAL, SYMPOSIUM, 20–23 April, 1997.*

FRASSON, S. A.; PASCHOALIN FILHO, J. A. A Utilização dos Agregados Reciclados na Ótica de Profissionais do Setor da Construção Civil e Gestores de Usinas de Reciclagem de Entulho(URE). *In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE GESTÃO DE PROJETOS, INOVAÇÃO E SUSTENTABILIDADE, 6., 2017, São Paulo. Anais [...]. São Paulo: 2017.*

FUJII, L. M. T. **Estudo de misturas de solo, RCD e cal virgem e hidratada para uso em obras rodoviárias**. 2012. 137 f. Dissertação (Mestrado em engenharia civil) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2012.

GAUTAM, P. K.; KALLA, P.; JETHOO, A. S.; AGRAWAL, R.; SINGH, H. Sustainable use of waste in flexible pavement: A review. **Construction and Building Materials**, v. 180, p. 239-253, agost. 2018.

GHANBARI, M.; ABBASI, A.M.; RAVANSHADNIA, M. Economic and Environmental evaluation and optimal ratio of natural and recycled aggregate production. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2017, p. 10, 2017.

G. Triches; P. R. Kryckyj. **Use of civil construction waste in urban pavements: a feasibility study**. *In: 5th International Symposium on Environmental Geotechnology and Global Sustainable Development. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, 2000.*

G. Triches; P. R. Kryckyj. **Aproveitamento de entulho da construção civil na pavimentação urbana**. *In: Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, São José dos Campos, 1999.*

HENDRIKS, Ch. F. Sustainable raw materials construction and demolition waste. **Report 22**. France: Rilem: Publications s.a.r.l. 2000.

JIMÉNEZ, J.R.; AGRELA, F.; AYUSO, J.; LÓPEZ, M. A comparative study of recycled aggregates from concrete and mixed debris as material for unbound road sub-base. **Materiales de Construcción**, v. 61, n.302, p. 289-302, junho, 2011.

JOHN, Vanderley; AGOPYAN, Vahan. **Reciclagem de Resíduos da Construção**. In: SEMINÁRIO DE RECICLAGEM DE RESÍDUOS SÓLIDOS DOMICILIARES, 2000, São Paulo. Anais. São Paulo: USP, 2000.

LEITE, F. C.; MOTTA, R. S.; VASCONCELOS, K. L.; BERNUCCI, L. Laboratory evaluation of recycled construction and demolition waste for pavements. **Construction And Building Materials**, Brasil, v. 25, n. 6, p. 2972-2979, jan. 2011.

LI, Y.; ZHOU, H.; SU, L.; HOU, H.; DANG, L. Investigation into the Application of Construction and Demolition Waste in Urban Roads. **Advances In Materials Science And Engineering**, v. 2017, p.1-12, 2017.

LIMA, José Antonio Ribeiro de. **Proposição de diretrizes para produção e normalização de resíduo de construção reciclado e de suas aplicações em argamassas e concretos**. 1999. 204 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, EESC - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

LIMA, Rosimeire Suzuki; LIMA, Ruy Reynaldo Rosa. **Guia para elaboração de projeto de gerenciamento de resíduos da construção civil**. Série de Publicações Temáticas do CREA-PR, 2011.

MACHADO, Sandro Lemos; MACHADO, Miriam de Fátima C.. **Mecânica dos solos I**: Bahia: Universidade Federal da Bahia, 2009. 113 slides, color.

MELBOUCI, B. Compaction and shearing behaviour study of recycled aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 8, p. 2723–2730, abr. 2009.

MIRANDA, L. F. R.; ÂNGULO, S. C.; CARELI, E.D. **A reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil: 1986 – 2008**. Revista Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 9, n°1, p. 57-71, 2009.

MOHAMMADINIA, A.; ARULRAJAH, A.; HAGHIGHI, H.; HORPIBULSUK, S. Effect of lime stabilization on the mechanical and micro-scale properties of recycled demolition materials. **Sustainable Cities And Society**, [s.l.], v. 30, p.58-65, abr. 2017.

MOTTA, R. S. **Estudo laboratorial de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil para aplicação em pavimentação de baixo volume de tráfego**. 2005. 134f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

NETO, J. C. M., SCHALCH, V. **Gestão dos Resíduos de Construção e Demolição: Estudo da Situação no Município de São Carlos – SP**, Brasil. Engenharia Civil, São Carlos, 2010.

NOVAIS, C. M.; CRISPIM, F. A. Caracterização de Agregados Reciclados de Resíduos da Construção Civil para Uso em Base e Sub-Base de Pavimento Urbano em Sinop – MT. **Anais inovação, tecnologia, gestão e sustentabilidade – Revista eletrônica de iniciação científica**, Mato Grosso, v. 3, 2017.

O'MAHONY, Margaret M. An analysis of the shear strength of recycled aggregates. **Materials And Structures/mat&iaux Et Constructions**, Dublin, Ireland, v. 30, p. 599-606, dez. 1997.

OLIVEIRA, João Carlos de. **Indicadores de potencialidade e desempenho de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil em pavimentos flexíveis**. 2007. 210 f. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2007.

PASCHOALIN FILHO, J, A.; FARIA, A.C.; PIRES, G.O.W.; DUARTE, E.B.L. Investimentos em ativos imobilizados para instalação de usina de reciclagem de resíduos de construção civil de médio porte na Zona Leste da Cidade de São Paulo. **Desenvolvimento em Questão**, Unijuí, v.14, n.36, p. 320-351, 2016.

PEDERNEIRAS, C. M. **Avaliação de blocos intertravados com agregados reciclados provenientes de resíduos de construção e demolição de obras do município de Natal/RN**. 2017. 118 f. Dissertação (mestrado em engenharia civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Natal, RN, 2017.

PÉREZ, Pablo et al. Application of cement-treated recycled materials in the construction of a section of road in Malaga, Spain. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 44, p.593-599, jul. 2013.

PERINA, J.M.; TRANNIN, I.C.B. Proposta para aproveitamento de resíduos da construção civil gerados em canteiros de obras. **Revista Sodebras [on line]**, v. 14, n. 159, p. 192-197, 2019.

PETKOVIC, G., et al. **Environmental Impact from the Use of Recycled Materials in road Construction: Method for Decision-Making in Norway**. Resources. Conservation and Recycling, 42. p. 249-264, 2004.

PINTO, Carlos de Sousa. **Curso básico de mecânica dos solos**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 367p.

PMSP – Prefeitura Municipal de São Paulo. **Plano de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PGIRS) da cidade de São Paulo**. São Paulo, 2014. 456p.

POON, Chin Sun; CHAN, Dixon. Feasible use of recycled concrete aggregates and crushed clay brick as unbound road sub-base. **Construction And Building Materials**, Hong Kong, v. 20, p.578-585, 2006.

Prefeitura Municipal de São Paulo - PMSP/SP ETS 001. Camadas de reforço do subleito, sub-base e base mista de pavimento com agregado reciclado de resíduos sólidos da construção civil. Mar, 2003.

PREUSSLER, L. A. **Contribuição ao estudo da deformabilidade de camadas de pavimento**. 2007. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes)- Departamento de Engenharia e Transportes, Escola Politécnica da Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, 2007.

Queiroz Neto, M. L. **Aplicação de concreto asfáltico a quente utilizando resíduos da construção e demolição de obras (RCD) em via urbana na cidade de Natal/RN**. 2019. 87 f. Dissertação (mestrado em engenharia civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Natal, RN, 2019.

RON, M.; CASAGRANDE, M.D.T.; VALE, A.C.; LOPES, M.M.; SOARES, J.B. **Aplicabilidade de resíduos reciclados da construção civil e demolição como agregados em misturas asfálticas**. In: 15ª Reunião de Pavimentação Urbana, 2008.

SANTOS, Eder Carlos Guedes dos. **Aplicação de resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) em estruturas de solo reforçado**. 2007. 168 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, EESC -- Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

SCHNEIDER, Dan Moche. **Deposições Irregulares de Resíduos da Construção Civil na Cidade de São Paulo**. 2003. 130 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

SENA NETO, P. G. de. **Análises de dosagens de concreto asfáltico do tipo Pré Misturado a Frio (PMF) utilizando Resíduo de Construção e Demolição de obras (RCD)**. 2018. 100 f. Dissertação (mestrado em engenharia civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Natal, RN, 2018.

SILVA, R. V.; BRITO, J. de; DHIR, H. K. Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. **Construction and Building Materials**, v. 65, p. 201-2017, 2014.

SOUZA, Marcus Vinicius Ribeiro e. **Comportamento Mecânico de um Agregado Reciclado como Base de Pavimento Flexível a partir de um Modelo Físico**. 2015. 125 f. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília-DF, 2015.

TALUKDAR, D. K. A study of correlation between californian bearing ratio (CBR) value with other properties of soil. **International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering**, India, v. 4, p. 559-562, jan. 2014.

TRANNIN, I. C. B.; PANCIERI, T. A. Uso de agregados reciclados de resíduos da construção e demolição como alternativa sustentável para a pavimentação. **Revista Sodebras [on line]**, v. 14, n. 163, p. 26-31, jul. 2019.

ULSEN, C.; KAHN, H.; ÂNGULO, S. C.; JOHN, V. M. Composição química de agregados mistos de resíduos de construção e demolição do Estado de São Paulo. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 63, n. 2, p.339-346, jun. 2010.

VAN NIEKERK, A.A. **Mechanical Behavior and Performance of Granular Bases and Sub-Bases in Pavements**. Phd Thesis. Delft University of Technology, Delft, the Netherlands. 2002.

VEGAS, I.; IBAÑEZ, J. A.; LISBONA, A.; CORTAZAR, A. S. de; FRÍAS, M. Pre-normative research on the use of mixed recycled aggregates in unbound road sections. **Construction and Building Materials**, v. 25, n.1, p. 2674-2682, 2011.

XUAN, D.X.; MOLENAAR, A.A.A.; HOUBEN, L.J.M. Evaluation of cement treatment of reclaimed construction and demolition waste as road bases. **Journal of Cleaner Production**, v.100, n.1, p. 77-83, 2015.

YUAN, H.; SHEN, L. Trend of the research on construction and demolition waste management. **Waste Management**, v.31, p. 670-679, 2011.