



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

LETÍCIA AZEVEDO DE FARIAS PEREIRA

**ANÁLISE COMPARATIVA DE ESTRUTURAS DE PAVIMENTOS UTILIZANDO
RCD E DIMENSIONADAS A PARTIR DE PARÂMETROS DISTINTOS**

NATAL/RN

2021

LETÍCIA AZEVEDO DE FARIAS PEREIRA

**ANÁLISE COMPARATIVA DE ESTRUTURAS DE PAVIMENTOS UTILIZANDO
RCD E DIMENSIONADAS A PARTIR DE PARÂMETROS DISTINTOS**

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

Orientador: Prof. Dr. Enio Fernandes Amorim
Coorientadora: Prof.^a. Dra. Laura Maria Goretti da Motta

NATAL/RN

2021

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

Pereira, Letícia Azevedo de Farias.

Análise comparativa de estruturas de pavimentos utilizando RCD e dimensionadas a partir de parâmetros distintos / Letícia Azevedo de Farias Pereira. - 2021.

189f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Natal, 2021.

Orientador: Dr. Enio Fernandes Amorim.

Coorientadora: Dra. Laura Maria Goretti da Motta.

1. MeDiNa - Dissertação. 2. Dimensionamento de Pavimentos - Dissertação. 3. Módulo de Resiliência - Dissertação. I. Amorim, Enio Fernandes. II. Motta, Laura Maria Goretti da. III. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 624

LETÍCIA AZEVEDO DE FARIAS PEREIRA

**ANÁLISE COMPARATIVA DE ESTRUTURAS DE PAVIMENTOS UTILIZANDO
RCD E DIMENSIONADAS A PARTIR DE PARÂMETROS DISTINTOS**

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

BANCA EXAMINADORA

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

Prof.^a. Dra. Laura Maria Goretti da Motta – Coorientadora (UFRJ)

Prof.^a Verônica Teixeira Franco Castelo Branco, Ph.D. – Examinadora Externa (UFC)

Prof. Dr. Olavo Francisco dos Santos Junior – Examinador Interno (UFRN)

Natal, 07 de julho de 2021

A minha mãe, Ethel, minha avó, Terezinha, meu avô, Assis, e meu noivo, Arthur, dedico não só este trabalho, mas todas as vitórias em minha vida!

AGRADECIMENTOS

A Deus, aquele que foi, é e sempre será meu amparo, proteção e auxílio em todas as horas. Toda honra e glória a Ele que me deu o dom da vida, me concede saúde e força todos os dias para seguir lutando pelos meus objetivos.

A minha mãe e amiga, Ethel Mônica, pelo amor, força, carinho, incentivo, companheirismo, por estar comigo todas as horas e por tudo que já fez por mim em todos os meus anos de vida. Nada seria possível sem que você me proporcionasse a condição de aprender. As minhas vitórias são também suas!

Aos meus avós, Terezinha e Assis, por toda a dedicação e amor que sempre tiveram por mim e por estarem presentes sempre, me auxiliando e aconselhando, cada um a seu modo e com sua sabedoria.

Ao amor da minha vida, Arturo, por estar comigo para enfrentar o mundo! Seu apoio, incentivo, força, compreensão, paciência e amor foram e são a energia que me move para continuar a querer crescer cada dia mais. Você me faz uma pessoa melhor!

Ao meu orientador, Prof. Enio Amorim, por acreditar e confiar na minha capacidade sempre, por ter me escolhido como sua aluna de orientação, por todos os ensinamentos ao longo deste período de convívio, por me motivar e entender nas horas de dificuldade, por todo auxílio, dedicação, incentivo e atenção.

A minha coorientadora, Prof^a Laura Motta por toda atenção dedicada, pela prontidão no atendimento de tantas demandas, pela paciência nas horas de dificuldade. Sua solicitude, simplicidade e competência são marcantes.

Aos funcionários do Laboratório de Pavimentos da COPPE / UFRJ, especialmente a Eng^a Mariluce, Eng. Marcos Antônio e o técnico Washington, que auxiliaram nos ensaios e nas análises de resultados e sempre estiveram à disposição para me atender e explicar sobre todos os procedimentos de ensaios.

Ao IFRN e aos técnicos Gian, Natana e Ricardo pela disponibilização dos laboratórios para realização dos ensaios de compactação.

A UFRN pela concessão de auxílio financeiro para transporte dos materiais até a COPPE/UFRJ.

RESUMO

A crescente demanda por agregados para execução de rodovias impulsionou o estudo dos resíduos de construção e demolição de obras (RCD) aplicados aos pavimentos. Com a implantação do novo método de dimensionamento de pavimentos do DNIT (*software* MeDiNa), torna-se importante a realização de ensaios de módulo de resiliência (MR) e de deformação permanente (DP) dos mais variados tipos de materiais utilizados em pavimentação. Nesta dissertação, apresentam-se dimensionamentos de estruturas de pavimento flexível desenvolvidos considerando dois métodos distintos, que fazem uso do módulo de resiliência e da deformação permanente e do índice de suporte Califórnia (CBR), e aplicam misturas de solo com RCD, e misturas de solo-brita em camada de base e/ou sub-base, com o intuito de desenvolver um comparativo de custo entre estes métodos e entre materiais. O solo, oriundo da cidade de Ipueira/RN, foi identificado pelo ensaio MCT como NG', de comportamento não laterítico, o RCD e a brita utilizados apresentaram tamanhos nominais de 19 mm. Foram analisadas misturas de solo-brita e solo-RCD utilizando agregados nos percentuais de 15%, 30%, 45% e 60%, em massa. Realizaram-se ensaios de módulo de resiliência em todas as misturas e de deformação permanente nas misturas com solo-RCD na proporção de 70% de solo e 30% de resíduo. A caracterização e análise das misturas mostrou que as proporções avaliadas não obtiveram enquadramento adequado nas faixas de trabalho propostas pelo DNIT para utilização em camada de base. Os resultados obtidos nos ensaios de MR foram satisfatórios e as misturas de solo-brita 70-30 e solo-RCD 70-30 apresentaram os maiores valores de MR médio. Os parâmetros das regressões (R^2) obtidos no *software* *Statistica 10.0* por meio do modelo composto executado com base nos dados dos ensaios de MR, mostraram que as misturas têm significativa influência das tensões de confinamento e desvio consideradas simultaneamente. Com base nos parâmetros das regressões foram propostas estruturas de pavimentos dimensionadas com o *software* MeDiNa. O critério de seleção de materiais para o dimensionamento pelo método do CBR impossibilitou o uso do solo-RCD 70-30 em camada de base, porém no dimensionamento realizado no *software* MeDiNa verificou-se que este material pode ser empregado em camadas de base e sub-base, em determinadas situações de projeto, uma vez que foi possível obter estruturas que atendessem aos critérios de fadiga e de deformação permanente para o período de vida útil.

Palavras-chave: MeDiNa, Dimensionamento de Pavimentos, Módulo de Resiliência.

ABSTRACT

The growing demand for aggregates for the construction of highways has boosted the study of construction and demolition waste (RCA or CD&W), applied to pavements. With the implementation of DNIT's new pavement dimensioning method (software MeDiNa), it becomes important to carry out resilience modulus (MR) and permanent deformation (DP) tests of the most varied types of materials used in paving. In this dissertation, designs of flexible pavement structures developed considering two different methods are presented, which make use of the modulus of resilience and permanent deformation and the California Bearing Ratio (CBR), and apply soil mixtures with RCA, and mixtures of soil-gravel in base layer and/or sub-base, in order to develop a cost comparison between these methods and between materials. The soil, coming from the city of Ipueira/RN, was identified by the MCT assay as NG', with non-laterite behavior, the RCA and gravel used had nominal sizes of 19 mm. Mixtures of soil-gravel and soil-RCA were analyzed using aggregates in the percentages of 15%, 30%, 45% and 60%, by mass. Resilience modulus tests were carried out in all mixtures and permanent deformation in mixtures with soil-RCA in the proportion of 70% soil and 30% residue. The characterization and analysis of the mixtures showed that the proportions evaluated did not obtain an adequate fit in the working ranges proposed by DNIT for use in the base layer. The results obtained in the MR tests were satisfactory and the mixtures of soil-gravel 70-30 and soil-RCA 70-30 presented the highest values of average resilience modulus. The regression parameters (R^2) obtained in the Statistica 10.0 software through the composite model executed based on the data from the resilience modulus tests, showed that the mixtures have a significant influence of the confinement and deviation stresses considered simultaneously. Based on the regression parameters, pavement structures designed with the MeDiNa software were proposed. The material selection criterion for the design using the CBR method made it impossible to use the soil-RCA 70-30 in the base layer, but in the design performed in the MeDiNa software it was found that this material can be used in base and sub-base layers, in certain design situations, since it was possible to obtain structures that met the fatigue and permanent deformation criteria for the useful life period.

Keywords: MeDiNa, Pavement Design, Resilience Module.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Percentual de estudos obtidos em cada base de dados utilizada na RS desta pesquisa	37
Figura 2 – Publicações nos últimos 5 anos sobre uso de RCD em pavimentação obtido por RS	38
Figura 3 – Quantitativo de estudos desenvolvidos para cada camada estrutural do pavimento com uso de RCD na busca realizada por RS	41
Figura 4 – Classificação resiliente de solos granulares	46
Figura 5 - Classificação resiliente de solos finos	47
Figura 6 – Modelos clássicos de comportamento resiliente para solos	48
Figura 7 – Níveis de comportamento quanto à deformação permanente	52
Figura 8 – Localização e Exemplos de Pontos Críticos dos pavimentos do Estado do Rio Grande do Norte	55
Figura 9 - Percentuais de defeitos verificados nos pavimentos das rodovias do RN	56
Figura 10 – Mapa do Estado do Rio Grande do Norte com destaque para região do Seridó e a cidade de Ipueira.....	58
Figura 11 – Jazida do solo no município de Ipueira/RN	58
Figura 12 – Curva granulométrica do solo de Ipueira	60
Figura 13 – Curva granulométrica do solo comparada com as seis faixas de projeto sugeridas pelo DNIT para utilização como base estabilizada granulometricamente	62
Figura 14 – Região metropolitana de Natal com destaque para localização do município de São José de Mipibu.....	64
Figura 15 – a) Local destinado ao depósito do material que chega na usina; b) Britador.....	65
Figura 16 – Composição do RCD da usina Duarte em amostras coletadas em três datas entre 2017 e 2019	67
Figura 17 - Curvas granulométricas dos agregados de brita 1 (a) e dos agregados de RCD (b)	68
Figura 18 – Resultado do ensaio de DRX no RCD coletado em 2019.....	72
Figura 19 – Fluxograma das etapas realizadas na presente pesquisa	74
Figura 20 – Procedimentos de preparo do solo para ensaios de compactação e ensaios triaxiais de carga repetida: a) destorroamento; b) quarteamento; c) peneiramento; d) solo homogeneizado.....	75
Figura 21 – Amostras para aferição de umidade	76

Figura 22 – Amostras no ensaio de perda de massa por imersão	77
Figura 23 – a) Aparelho de compactação automática utilizado nesta pesquisa; b) execução de uma etapa dos ensaios de compactação; c) amostra de mistura Solo-RCD após extração do molde	79
Figura 24 – a) Mistura de Solo-Brita 85-15 após homogeneização; b) misturas pesadas e embaladas para envio para a COPPE/UFRJ	80
Figura 25 – Etapas da confecção dos caixotes para envio do material até a COPPE/UFRJ	81
Figura 26 – Solo puro após procedimento de homogeneização com a água.....	81
Figura 27 – Misturas de Solo-Brita após procedimento de homogeneização: a) Solo-Brita 70-30; b) Solo-Brita 40-60.....	82
Figura 28- Misturas de Solo-RCD após procedimento de homogeneização: a) Solo-RCD 70-30; b) Solo-RCD 40-60	82
Figura 29 – Corpo de prova de solo puro preparado para o ensaio de MR.....	83
Figura 30 – Corpos de prova das misturas de Solo-Brita preparados para o ensaio de MR	83
Figura 31 - Corpos de prova das misturas de Solo-RCD preparados para o ensaio de MR.....	84
Figura 32 – Sequência de procedimentos para ensaios de MR e DP: a) inserção do corpo da membrana no CP; b) corpo de prova envolto na membrana de látex; c) posicionamento dos LVDTs; d) equipamento montado.....	85
Figura 33 – Prensa e Sistema de aquisição de dados do equipamento triaxial de cargas repetidas da COPPE/UFRJ	86
Figura 34 – Ábaco para dimensionamento de pavimentos flexíveis utilizado no método do DNER	93
Figura 35 – Nomenclatura das espessuras das camadas de acordo com o método do CBR	94
Figura 36 – Tela do Programa MeDiNa para inserção dos parâmetros do tráfego	96
Figura 37 – Seção ilustrativa dos materiais utilizados no pavimento dimensionado pela metodologia do DNER	99
Figura 38 – Seção ilustrativa dos materiais utilizados no pavimento dimensionado pelo software MeDiNa – Estrutura 01	99
Figura 39 – Seção ilustrativa dos materiais utilizados no pavimento dimensionado pelo software MeDiNa – Estrutura 02	100
Figura 40 – Determinação do Coeficiente de Deformabilidade c' do solo desta pesquisa.....	103
Figura 41 – Determinação do Coeficiente de Compactação d' do solo desta pesquisa.....	104
Figura 42 – Determinação da Perda de Massa por Imersão do solo desta pesquisa.....	104
Figura 43 – Classificação MCT (Nogami e Villibor, 1995) do solo desta pesquisa.....	105

Figura 44 – Curvas granulométricas das misturas de Solo-Brita	106
Figura 45 – Curvas granulométricas das misturas de Solo-RCD	106
Figura 46 – Curva granulométrica das misturas de solo-brita 70-30 e solo-RCD 70-30 na faixa “D” do DNIT	109
Figura 47 - Curva granulométrica das misturas de solo-brita 55-45 e solo-RCD 55-45 na faixa “D” do DNIT	110
Figura 48 – Misturas de solo-RCD desta pesquisa avaliadas na faixa de trabalho recomendada pela SLBD ET – DER - P00/003.....	112
Figura 49 – Curvas de compactação das misturas de solo-brita.....	114
Figura 50 - Variação do $\gamma_{d_{m\acute{a}x}}$ em função do percentual de brita 1 das misturas solo-brita desta pesquisa	115
Figura 51 - Variação da umidade ótima em função do percentual de brita 1 das misturas solo-brita desta pesquisa.....	115
Figura 52 – Procedimento de compactação: a) corpo de prova após extração do molde; b) detalhe dos agregados de brita 1 após compactação; c) mistura ao término do ensaio.....	116
Figura 53 – Curvas de compactação das misturas de solo-RCD.....	117
Figura 54 - Variação do $\gamma_{d_{m\acute{a}x}}$ em função do percentual de RCD das misturas desta pesquisa	118
Figura 55 - Variação da umidade ótima em função do percentual de RCD das misturas desta pesquisa	118
Figura 56 – Resultados do procedimento de compactação do Solo-RCD: a) corpo de prova extraído após primeiro ponto da compactação; b) corpo de prova aberto ao meio.....	119
Figura 57 – Variação dos índices físicos em função do percentual de agregados das misturas	121
Figura 58 – Módulo de resiliência médio em função da proporção de agregados de brita 1 desta pesquisa	126
Figura 59 – Módulo de resiliência médio em função da proporção de agregados de RCD desta pesquisa	128
Figura 60 – Comparativo entre o desempenho do MR do solo e das misturas de solo-brita e solo-RCD desta pesquisa	128
Figura 61 – Dados sobre a deformação plástica média das amostras desta pesquisa.....	131
Figura 62 – Variação do módulo de resiliência das misturas de solo-brita desta pesquisa em função da tensão desvio.....	133

Figura 63 – Variação do módulo de resiliência das misturas de Solo-Brita desta pesquisa em função da tensão confinante	133
Figura 64 - Variação do módulo de resiliência das misturas de Solo-RCD desta pesquisa em função da tensão desvio.....	134
Figura 65 - Variação do módulo de resiliência das misturas de Solo-RCD desta pesquisa em função da tensão confinante	134
Figura 66 - Representação gráfica do modelo composto para o solo puro desta pesquisa.....	136
Figura 67 – Representações gráficas do modelo composto de algumas misturas de Solo-Brita desta pesquisa: a) Solo-Brita 70-30; b) Solo-Brita 55-45.....	137
Figura 68 - Representações gráficas do modelo composto de algumas misturas de Solo-RCD desta pesquisa: a) Solo-RCD 70-30; b) Solo-RCD 55-45	138
Figura 69 – Variação da deformação permanente em função das tensões e do número de ciclos	140
Figura 70 – Comportamento da deformação resiliente do SRCD 70-30 ao longo do ensaio de deformação permanente em vários níveis de tensões aplicadas	142
Figura 71 – Verificação do módulo de resiliência do SRCD 70-30 a partir dos ensaios de deformação permanente.....	143
Figura 72 – Comportamento da amostra de Solo-RCD quanto ao acomodamento sob cargas repetidas no ensaio de DP.....	144
Figura 73 – Seções obtidas de acordo com o método do DNER (CBR) considerando as premissas adotadas nesta pesquisa	149
Figura 74 – Estruturas obtidas através do método empírico do DNER em função do número N e do CBR do subleito adotado nesta pesquisa	150
Figura 75 – Seções obtidas no MeDiNa para a Estrutura 01 com solo-RCD na sub-base.....	153
Figura 76 – Seções relativas a $N = 5 \times 10^6$ depois da otimização da camada de revestimento	155
Figura 77 – Análise da variação da classe de fadiga do revestimento na obtenção da espessura da camada	156
Figura 78 – Seções obtidas no MeDiNa para a Estrutura 02 com solo-RCD.....	159
Figura 79 - Estruturas obtidas através do software MeDiNa em função do número N e do MR do subleito utilizando solo-RCD 70-30 na base e na sub-base.....	160
Figura 80 - Estruturas obtidas através do software MeDiNa em função do número N e do MR do subleito	162
Figura 81 – Padrão de via urbana coletora ou de distribuição.....	163

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Normas dos órgãos rodoviários federais e estaduais para base e sub-base estabilizada granulometricamente	27
Tabela 2 – Requisitos específicos para agregado reciclado destinado à pavimentação segundo a ABNT NBR 15115 (2004)	32
Tabela 3 - Resumo dos filtros aplicados nas plataformas de busca RS nesta pesquisa.....	36
Tabela 4 – Resumo das informações extraídas dos artigos por meio da extração de dados feita na RS	39
Tabela 5 – Intervalo de valores de módulos de resiliência de alguns materiais	49
Tabela 6 – Módulo de resiliência obtido em estudos de laboratório com resíduos.....	50
Tabela 7 – Ensaio de caracterização física do solo	59
Tabela 8 – Índices de caracterização do solo	60
Tabela 9 – Resultados de CBR e Expansão do solo	63
Tabela 10 – Ensaio de caracterização física, química e mineralógica dos agregados	66
Tabela 11 – Resultados dos ensaios de caracterização física dos agregados de RCD	68
Tabela 12 - Resultados dos ensaios de caracterização física dos agregados de brita 1	69
Tabela 13 – Resultados dos ensaios de índice de forma e abrasão para os agregados de RCD	70
Tabela 14 - Resultados dos ensaios de índice de forma e abrasão para os agregados de brita 1	70
Tabela 15 – Resultados da composição química do RCD da Duarte	71
Tabela 16 – Nomenclatura das misturas confeccionadas e quantitativo de ensaios previstos .	73
Tabela 17 – Ensaio de caracterização e suas respectivas normativas	75
Tabela 18 – Quantitativo de amostras preparadas para ensaios triaxiais cíclicos desta pesquisa	80
Tabela 19 – Tensões aplicadas nos CPs para ensaio de módulo de resiliência.....	87
Tabela 20 – Tensões aplicadas nos CPs nos ensaios de deformação permanente.....	89
Tabela 21 – Valores de CBR e Expansão das misturas solo-RCD avaliadas por Barreto (2020)	90
Tabela 22 – Faixas granulométricas em função dos níveis de tráfego	91
Tabela 23 – Espessura mínima para revestimento betuminoso – método DNER.....	93
Tabela 24 – Coeficientes de equivalência estrutural para os materiais utilizados.....	94
Tabela 25 - Parâmetros de deformação permanente adotados para o subleito.....	97

Tabela 26 – Parâmetros de DP adotados para o solo-brita 70-30.....	98
Tabela 27 – Materiais e parâmetros considerados para a metodologia do DNER	99
Tabela 28 – Materiais e parâmetros considerados para Estrutura 01 no programa.....	100
Tabela 29 – Materiais e parâmetros considerados para Estrutura 02 no programa.....	101
Tabela 30 – CC, CNU e tipo de distribuição das misturas	107
Tabela 31 – Classificação das misturas com base nos sistemas SUCS e TRB	108
Tabela 32 – Ajustes do percentual passante para misturas de SB 70-30 e SRCD 70-30 para enquadramento na faixa D do DNIT	109
Tabela 33 – Ajustes do percentual passante para misturas de SB 55-45 e SRCD 55-45 para enquadramento na faixa D do DNIT	111
Tabela 34 – Resultados da compactação do solo puro	114
Tabela 35 – Resultados da compactação das misturas de solo-brita	114
Tabela 36 - Resultados da compactação das misturas de Solo-RCD desta pesquisa	117
Tabela 37 – Índices físicos do solo e das misturas desta pesquisa após compactação.....	121
Tabela 38 – Teores de umidade obtidos nos ensaios de compactação e adotados para os ensaios de módulo de resiliência.....	123
Tabela 39 – Análise dos pesos específicos secos máximos nos dois processos de compactação	124
Tabela 40 – Resultado do módulo de resiliência médio do solo puro em três corpos de prova	124
Tabela 41 – Resultados dos módulos de resiliência médios das misturas de Solo-Brita considerando dois ou três CPs por amostra.....	126
Tabela 42 – Resultados dos módulos de resiliência médios das misturas de Solo-RCD	127
Tabela 43 – Análise das médias e desvio padrão dos MR de todas as amostras ensaiadas nesta pesquisa	129
Tabela 44 - Parâmetros regressão potencial para cada CP ensaiado nesta pesquisa.....	132
Tabela 45 – Parâmetros do modelo composto para cada CP ensaiado nesta pesquisa.....	135
Tabela 46 – Média dos parâmetros das equações.....	139
Tabela 47 – Classificação da mistura de SRCD 70-30 com relação aos níveis de shakedown	145
Tabela 48 – Parâmetros da regressão dos ensaios de DP com solo-RCD 70-30 desta pesquisa	146
Tabela 49 – Parâmetros da regressão não linear dos ensaios de deformação permanente de vários materiais comparados aos obtidos no solo-RCD deste trabalho.....	147

Tabela 50 – Espessura total necessária para proteção do subleito nas distintas situações de tráfego adotadas nesta pesquisa.....	148
Tabela 51 – Espessuras das camadas do pavimento de acordo com o método do DNER	149
Tabela 52 - Critérios para dimensionamento no software MeDiNa.....	151
Tabela 53 – Análise dos parâmetros de projeto em função do volume do tráfego e módulo de resiliência do subleito para a Estrutura 01 desta pesquisa.....	152
Tabela 54 – Otimização do dimensionamento da Estrutura 01 desta pesquisa para $N = 5 \times 10^4$ e $N = 5 \times 10^5$	154
Tabela 55 – Dimensionamento e parâmetros de projeto para $N = 5 \times 10^6$	155
Tabela 56 – Dimensionamento e parâmetros de projeto para $N = 5 \times 10^6$ com revestimento de classes de fadiga 2 e 3.....	156
Tabela 57 – Análise dos parâmetros de projeto em função do volume do tráfego e módulo de resiliência do subleito para a Estrutura 02.....	158
Tabela 58 – Análise dos parâmetros de projeto em função do volume do tráfego e módulo de resiliência do subleito com solo-brita 70-30 aplicado na base e sub-base	161
Tabela 59 – Seções utilizadas na análise de custo.....	164
Tabela 60 – Consumo de materiais para a seção obtida no método do DNER.....	164
Tabela 61 – Consumo de materiais para a seção obtida no software MeDiNa – Estrutura 01	165
Tabela 62 – Consumo de materiais para a seção obtida no software MeDiNa – Estrutura 02	165
Tabela 63 – Custos para aquisição do RCD da Usina Duarte em maio/2021	165
Tabela 64 – Composição do custo de base ou sub-base composta por solo-RCD 70-30.....	166
Tabela 65 – Custos para execução de 1 km da seção obtida no dimensionamento do DNER	167
Tabela 66 – Custos para execução de 1 km da seção obtida no MeDiNa – Estrutura 01	167
Tabela 67 – Custos para execução de 1 km da seção obtida no MeDiNa – Estrutura 02	168
Tabela 68 – Seções selecionadas	170
Tabela 69 – Custos para execução de 1 km da seção com solo-brita 70-30.....	170
Tabela 70 – Custos para execução de 1 km da seção com solo-RCD 70-30.....	171
Tabela 71 – Composição do custo de base ou sub-base composta por solo-RCD 70-30.....	172
Tabela 72 – Custos para execução de 1 km da seção com solo-RCD 70-30.....	173

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AR	Agregado Reciclado
ARC	Agregados Reciclados de Concreto
ARM	Agregado de Resíduo Misto
CBM	<i>Cement Bound Mistures</i>
CBR	<i>California Bearing Ratio</i>
CC	Coefficiente de Curvatura
CNT	Confederação Nacional dos Transportes
CNU	Coefficiente de Não Uniformidade
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CP	Corpo-de-prova
DCP	<i>Dynamic Cone Penetrometer</i>
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes
DP	Deformação Permanente
ET	Especificação Técnica
FWD	<i>Falling Weight Deflectometer</i>
HCM	<i>Highway Capacity Manual</i>
IFRN	Instituto Federal do Rio Grande do Norte
IG	Índice de Grupo
IP	Índice de Plasticidade
IS	Índice de Suporte
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transformer</i>
M-E	Método Mecânico-Empírico
MID	Manual para Identificação de Defeitos de Revestimentos Asfálticos de Pavimentos
MR	Módulo de Resiliência
NBR	Norma Brasileira
PMSP	Prefeitura do Município de São Paulo
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos

RAP	<i>Recovered Asphalt Pavement</i>
RCA	<i>Recycled Concrete Aggregate</i>
RCC	Resíduos da Construção Civil
RCD	Resíduos de Construção e Demolição de Obras
RN	Rio Grande do Norte
RS	Revisão Sistemática da Literatura Científica
SL	Subleito
START	<i>State of the Art through Systematic Review</i>
SUCS	Sistema Unificado de Classificação de Solos
TRB	<i>Transportation Research Board</i>
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
UFRN	Universidade Federal do Rio Grande do Norte
VB	Viga Benkelman

LISTA DE ABREVIATURAS

Cm	Centímetro
g	Gramma
kg	Quilograma
km	Quilômetro
kN	QuiloNewton
kPa	QuiloPascal
mm	Milímetro
MPa	MegaPascal
tf	Tonelada-força

LISTA DE SÍMBOLOS

e	Índice de vazios
η	Porosidade
Sr	Grau de saturação
W ótica	Umidade ótica
γ_d máx	Peso específico aparente seco máximo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	21
1.1 Objetivos.....	24
1.1.1 Geral	24
1.1.2 Específicos.....	24
1.2 Estrutura do Trabalho	25
2 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO.....	26
2.1 Materiais usuais empregados nas camadas de Base e Sub-base	26
2.2 Solo-Brita, Solo-RCD e RCD em pavimentação	29
2.2.1 Solo-Brita	29
2.2.2 RCD e Solo-RCD	31
2.3 Módulo de Resiliência (MR)	44
2.3.1 Classificação Resiliente.....	45
2.3.2 Valores típicos de módulo de resiliência.....	49
2.4 Deformação Permanente (DP).....	51
2.5 Métodos de Projeto de Pavimentos Flexíveis	53
2.5.1 Método do DNER.....	53
2.5.2 Método Mecânico-Empírico (<i>Software</i> MeDiNa)	54
3 MATERIAIS E MÉTODOS	57
3.1 Materiais.....	57
3.1.1 Solo.....	57
3.1.2 Agregados de RCD e Brita 1	63
3.1.3 Misturas de Solo-Brita e Solo-RCD	72
3.2 Métodos e Programação para os Ensaios Mecânicos	74
3.2.1 Metodologia MCT	75
3.2.2 Ensaios de Compactação Proctor	78
3.2.3 Ensaios Triaxiais Dinâmicos	79
3.2.4 Índice de Suporte Califórnia (CBR)	89
3.2.5 Dimensionamento do Pavimento.....	90
4 RESULTADOS	102
4.1 Ensaio de MCT	102
4.2 Caracterização das misturas de Solo-Brita e Solo-RCD.....	105
4.3 Ensaios de Compactação Proctor.....	113

4.4 Ensaios Triaxiais Dinâmicos.....	122
4.4.1 Módulo de Resiliência.....	122
4.4.2 Deformação Permanente	140
4.5 Dimensionamento das seções de pavimento com os materiais desta pesquisa.....	148
4.5.1 Método do DNER.....	148
4.5.2 <i>Software</i> MeDiNa.....	150
4.6 Análise de custo.....	163
4.6.1 Comparativo de custos entre métodos	164
4.6.2 Comparativo de custos entre uso de solo-brita 70-30 e solo-RCD 70-30	169
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES	174
5.1 Conclusões	174
5.2 Sugestões para pesquisas futuras	177
REFERÊNCIAS	178
ANEXO A – RELATÓRIO DE DIMENSIONAMENTO DO MEDINA.....	186

1 INTRODUÇÃO

A necessidade do homem de expandir a sua área de influência, buscando novos meios de alcançar recursos e explorar novas terras, propiciou o desenvolvimento contínuo da abertura de caminhos e assim também da pavimentação. Procurando compreender qual a melhor forma de produzir vias para o transporte e locomoção de pessoas de um local para o outro, chegou-se ao projeto dos primeiros pavimentos, utilizando-os nos caminhos denominados de estradas (BALBO, 2007). Anos se passaram e ao longo destes foram desenvolvidas inúmeras pesquisas para melhorar a estrutura dos pavimentos e assim surgiram algumas nomenclaturas para as camadas destes, sendo elas: reforço do subleito, sub-base, base e revestimento, sendo o revestimento a camada final de cobertura, que, no Brasil e em grande parte do mundo, é predominantemente executado com derivados do petróleo (SENÇO, 2008).

O pavimento tradicional de rodovias consiste em um revestimento asfáltico e camadas de base e sub-base de brita graduada ou outros materiais granulares graúdos e miúdos combinados. Quanto maior o volume de tráfego, maiores são as exigências para estes materiais.

Várias pesquisas que buscaram avaliar quais agregados (juntamente com o solo) tem aplicabilidade nas camadas de base e sub-bases foram desenvolvidas para analisar a viabilidade da obra do pavimento, tendo em vista a possibilidade de redução da camada de agregado natural utilizado isoladamente (PARENTE, BOAVISTA e SOARES 2003; COUTO, 2009; LIMA, MOTTA e RODRIGUES, 2017; MARIA e BASTOS, 2018; OLIVEIRA JÚNIOR, ARAÚJO e AYRES, 2018, entre outros).

Vale ressaltar que, para os pavimentos de baixo a médio volume de tráfego, também se tem o uso de solos finos lateríticos nas bases e sub-bases desde a década de 1980, por ação de Job Nogami e Douglas Villibor, que criaram uma classificação brasileira de solos passante na peneira de 2 mm, denominada de classificação MCT. Esta classificação usa ensaios e parâmetros próprios e separa os solos finos em duas grandes classes: os lateríticos e os não lateríticos. O uso de solos finos lateríticos está presente em muitos quilômetros de ruas e rodovias no estado de São Paulo, o pioneiro neste emprego, e em outros estados brasileiros (BERNUCCI *et al.*, 2010).

Para avaliar as características mecânicas dos materiais de pavimentação e do subleito era utilizado tradicionalmente um ensaio denominado de Índice de Suporte Califórnia, representado pela sigla CBR (do termo em inglês, *California Bearing Ratio*) que atualmente está sendo substituído pelo módulo de resiliência, obtido em ensaios de carga repetida, quando a Mecânica dos Pavimentos passou a ser utilizada nos dimensionamentos de pavimentos

asfálticos. No Brasil, este tipo de ensaio foi introduzido na década de 1970 e está normalizado pelo Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (DNIT) desde 1984 (MEDINA e MOTTA, 2015). A atual versão da norma do ensaio é de 2018.

O conhecimento do módulo de resiliência dos solos e dos materiais que compõem as camadas de pavimentos rodoviários é de suma importância para prever o comportamento da estrutura e dimensioná-la corretamente. Devido à importância dos materiais granulares como constituintes de camadas de pavimentos rodoviários flexíveis, pela normalização tradicional em termos do CBR, foi inicialmente evidenciado o interesse em abordar a resposta resiliente destes materiais, procurando conhecer o seu comportamento mecânico, sob a ação de cargas repetidas (SANT'ANNA *et al.*, 2003).

Os defeitos estruturais mais comuns nos pavimentos asfálticos são: o trincamento do revestimento ou da camada estabilizada quimicamente, denominado de fadiga, e o afundamento de trilha de rodas (ATR). Para considerar a fadiga no dimensionamento, de forma simplificada, deve-se calcular as tensões e deformações da estrutura do pavimento e comparar com valores admissíveis. Para isto é necessário se obter os módulos de resiliência de todos os materiais que compõem a estrutura do pavimento e do subleito. Para calcular o ATR, que pode ser proveniente da contribuição do subleito e das camadas do pavimento, deve-se realizar ensaios próprios de avaliação de cada material, denominados ensaios de deformação permanente. O DNIT tem a primeira norma brasileira deste ensaio, datada de 2018, embora este tipo de ensaio triaxial já seja praticado no Brasil desde 1980, sendo a primeira dissertação de mestrado feita por Svenson (1980) e muitos outros autores se seguiram a este primeiro estudo. Tanto o ensaio de módulo de resiliência quanto o ensaio de deformação permanente são obrigatórios para se dimensionar um pavimento asfáltico pelo novo método de dimensionamento do DNIT, denominado MeDiNa, que pode ser baixado da página www.dnit.gov.br.

Considera-se que, por mais que as camadas de solos e britas sejam compactadas durante a construção do pavimento, pode ainda existir uma variação volumétrica pela passagem do tráfego, que provocaria uma variação na espessura da camada, gerando o afundamento da trilha de roda, eventualmente. Assim, para selecionar um material para base ou sub-base por exemplo, deve-se procurar materiais que, após a compactação inicial, tendam ao acomodamento, ou seja, não apresentem variação de volume considerável com as cargas do tráfego.

Arshad (2019) relata que o fornecimento de agregados naturais para construção de rodovias pode apresentar algumas limitações técnicas, além de aumentar os custos de

processamento, tempo e preocupações ambientais. Assim, a utilização de materiais derivados da reciclagem se tornou cada vez mais presente nas pesquisas e nas obras.

Os resíduos da construção civil e de demolição (RCD) são qualquer material originado de reforma ou de uma obra, que, após passar por um processo de beneficiamento pode ser reutilizado em diversas aplicações (Bernucci *et al.*, 2010). Um dos grandes atrativos desse tipo de agregado é o aspecto econômico uma vez que estes materiais têm sido comercializados por preços inferiores aos das britas graduadas tradicionalmente empregadas nas camadas do pavimento (Medina e Motta, 2015).

Quando não gerenciados corretamente os resíduos de construção e demolição causam diversos impactos ambientais. A Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente CONAMA nº 307 de 2002 estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para gerenciamento destes tipos de resíduos. Dentre os benefícios ambientais obtidos pelo gerenciamento adequado dos RCD, destacam-se, também, os ganhos econômicos resultantes das múltiplas aplicações práticas dos produtos da sua reciclagem, a partir da utilização de tecnologias relativamente simples e amplamente disponíveis no mercado. Uma das opções de uso dos resíduos da construção civil, principalmente em municípios de pequeno porte, é em pavimentação de estradas vicinais, visto que, para este caso, podem até ser dispensadas as usinas de beneficiamento e equipamentos mais caros (ESTADO DE SÃO PAULO, 2010).

Características técnicas de RCD regionais já foram avaliadas por diversos autores nacionais e trechos de pavimentos com resíduos já foram implantados em São Paulo, Belo Horizonte e no Rio de Janeiro, entre outros locais, e os resultados oscilam entre “aplicar e não aplicar” de acordo com os governos locais nas várias gestões sucessivas. E, embora existam normas da ABNT sobre este uso, a falta de normas de órgãos como DNIT ou DERs impõe alguma dificuldade para seu uso em rodovias. Por outro lado, o volume relativamente pequeno e a localização destes resíduos nas zonas urbanas fazem com que sua utilização em ruas e estradas municipais pareça muito mais propícia e adequada sob todos os aspectos. A norma PMSP/SP ETS - 001/2003 define os critérios e orienta a execução de camadas de reforço do subleito, sub-base ou base mista de pavimentos com Agregado Reciclado de Resíduo Sólido da Construção Civil, denominado "Agregado Reciclado" (AR), em obras de pavimentação sob a fiscalização da Prefeitura do Município de São Paulo (PMSP).

Assim, entende-se que a busca de aplicação dos conceitos de sustentabilidade e de reaproveitamento de materiais e resíduos diversos tem sido uma temática importante também na pavimentação. O volume de materiais naturais utilizados nos milhares de quilômetros de rodovias brasileiras e a necessidade de construir duplicações ou mesmo expandir a malha

pavimentada é muito grande. A possibilidade de avaliar possíveis materiais alternativos ou o aproveitamento de resíduos diversos na pavimentação utilizando os ensaios de carga repetida, além da mudança recente do método de dimensionamento do DNIT, levou à definição do tema da presente pesquisa.

1.1 Objetivos

1.1.1 Geral

Esta pesquisa tem como objetivo geral verificar a aplicabilidade de misturas de um solo típico da região do Seridó do Estado do RN com resíduo de construção e demolição de obras (RCD) da região de Natal - RN, por meio de dimensionamento de estruturas de pavimento flexível comparadas com misturas de solo-brita aplicadas em camada de base e/ou sub-base utilizando dois métodos distintos: o MeDiNa, recentemente adotado pelo DNIT, a partir dos valores de MR (Módulo de Resiliência) e o antigo método do DNER (que baseia-se no CBR ou Índice de Suporte Califórnia), verificando as principais diferenças entre os métodos e comportamentos dos materiais utilizados, considerando uma breve análise de custo. A escolha dos materiais levou em conta também o aspecto de sustentabilidade.

1.1.2 Específicos

No que concerne aos objetivos específicos destacam-se os seguintes elementos:

- Verificar a adequação das misturas de solo-brita e solo-RCD para execução de camadas de base e sub-base de acordo com as normativas do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT);
- Obter os parâmetros necessários para o dimensionamento do pavimento realizando ensaios de Módulo de Resiliência e Deformação Permanente;
- Verificar a potencialidade de misturas de resíduos de construção, associados a um solo típico do Rio Grande do Norte, com a nova metodologia presente no MeDiNa;
- Fazer uma análise de custo de execução das seções obtidas;
- Averiguar as principais diferenças entre os mecanismos de dimensionamento.

1.2 Estrutura do Trabalho

Esta dissertação organiza-se em cinco capítulos distribuídos do seguinte modo:

- Capítulo 1 – versa sobre o tema principal, justificando a escolha da temática e apresentando a organização da dissertação. A utilização do pavimento como uma possível destinação para o resíduo de construção e demolição (RCD) foi feita comparando diferentes proporções de solo-RCD com misturas tradicionais de solo-brita, ressaltando a visão de sustentabilidade. Para auxiliar na divulgação regional desta alternativa de aproveitamento do RCD, comparou-se o dimensionamento tradicional com base no CBR com o novo método mecanístico-empírico MeDiNa (que se baseia na deformabilidade dos materiais).
- Capítulo 2 – constitui-se da revisão bibliográfica, abordando estudos sobre os materiais granulares convencionais e os materiais reciclados utilizados na pavimentação. Também apresenta temáticas sobre dois métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis, com maior enfoque nos parâmetros de Módulo de Resiliência (MR) e Deformação Permanente (DP), utilizados no método mecanístico-empírico (M-E) presente no *software* MeDiNa.
- Capítulo 3 – apresenta todo o procedimento da pesquisa: a organização, planejamento, etapas de desenvolvimento, as metodologias, os materiais, equipamentos e normas utilizados nos ensaios. Neste capítulo, explicam-se as dosagens das misturas solo-brita e solo-RCD, as premissas feitas e as dificuldades solucionadas no desenvolver do estudo. Adicionalmente, também é apresentada a caracterização de materiais de estudos feitos por outros autores.
- Capítulo 4 – são expostos os resultados dos ensaios dos materiais desta pesquisa e a análise desses, discutidos e comparados com dados de pesquisas anteriores. Por meio dos resultados dos ensaios são apresentados os dimensionamentos e a análise de custo entre seções dimensionadas com brita graduada, solo-brita 70-30 e solo-RCD 70-30.
- Capítulo 5 – são apresentadas as conclusões da presente pesquisa e as sugestões para continuidade das pesquisas nesta linha.

2 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

2.1 Materiais usuais empregados nas camadas de Base e Sub-base

O comportamento estrutural do pavimento rodoviário tem relação direta com: espessura das camadas e interação entre as camadas, rigidez destas e do subleito. As camadas de base, de sub-base e de reforço do subleito podem ser constituídas por materiais granulares, solos ou misturas de solos, com ou sem adição de agentes cimentantes. Dependendo do volume de tráfego, da capacidade de suporte do subleito, da rigidez e espessura das camadas, e das condições ambientais, uma ou mais camadas podem ser suprimidas.

Para a escolha dos materiais de base, sub-base e reforço do subleito devem ser executados métodos de seleção e de caracterização de propriedades. A seleção objetiva analisar os materiais disponíveis localmente quanto às características de natureza e das propriedades individuais, que se relacionam com a verificação da resistência, deformabilidade e permeabilidade que devem ser compatíveis com sua função na estrutura dos pavimentos. Além disto, no método M-E, é possível verificar a compatibilidade de deformabilidade entre os materiais das diversas camadas e subleito. Os materiais que compõem as camadas de base e sub-base são basicamente constituídos por agregados, solos e, eventualmente, aditivos como cimento, cal, emulsão asfáltica, entre outros (BERNUCCI *et al.*, 2010).

Mais de 80% dos materiais que constituem as camadas dos pavimentos em geral são materiais britados devido às exigências tradicionais. Entretanto, a escassez de materiais pétreos em algumas regiões, com destaque para o Norte, Centro Oeste e Nordeste do Brasil, acaba incentivando a busca de solos que possuam boas características geotécnicas e capacidade de suporte. As jazidas de solos mais utilizadas em bases de obras rodoviárias, nestas regiões com carência de rochas, são as de lateritas (ROZA, 2018).

A Tabela 1 apresenta diretrizes estabelecidas por distintos órgãos rodoviários federais e estaduais para execução de base e sub-base estabilizada granulometricamente.

Tabela 1 – Normas dos órgãos rodoviários federais e estaduais para base e sub-base estabilizada granulometricamente

Norma	Especificações para agregados	Especificações para o solo	Índice de Suporte Califórnia (CBR)
DER/PR – ES-P 07/05 - Pavimentação: camadas estabilizadas granulometricamente	Abrasão Los Angeles < 55%	LL < 25% IP < 6%	$N > 5 \times 10^6$; CBR > 80 $N \leq 5 \times 10^6$; CBR > 60%
DER/PR – ES-P 09/05 – Pavimentação: solo arenoso-brita	Abrasão Los Angeles < 50% Ensaio de lamelaridade < 20%	Material arenoso	$N > 5 \times 10^6$; CBR > 80% $N \leq 5 \times 10^6$; CBR > 70%
SLBD – ET – DER P00/003 (2005) - Sub-base ou base de solo de comportamento laterítico – brita descontínua	Abrasão Los Angeles < 50% Índice de forma > 0,5 Granulometria 100% passante na peneira 25 mm	Satisfazer exigências da classificação MCT	$N > 5 \times 10^6$; CBR \geq 80% $N \leq 5 \times 10^6$; CBR \geq 70% CBR \geq 30% para sub-base
DER P00/006 (2006) ET – Sub-base ou base de solo-brita	Abrasão Los Angeles < 50% Índice de forma > 0,5 Granulometria 100% passante na peneira 19 mm	LL < 25% IP < 6%	$N > 5 \times 10^6$; CBR > 80% $N \leq 5 \times 10^6$; CBR > 70% CBR > 30% para sub-base
DNIT 098 – ES (2007) Base estabilizada granulometricamente com utilização de solo laterítico	Abrasão Los Angeles < 65% Equivalente de areia > 30%	LL < 40% IP < 15%	$N > 5 \times 10^6$; CBR > 80% $N \leq 5 \times 10^6$; CBR > 60%

Continua

Norma	Especificações para agregados	Especificações para o solo	Índice de Suporte Califórnia (CBR)
DNIT 141/2010 – ES – Base estabilizada granulometricamente – Especificação de Serviço	Abrasão Los Angeles < 55% Equivalente de areia > 30%	LL < 25% IP < 6%	$N > 5 \times 10^6$: CBR > 80% $N \leq 5 \times 10^6$: CBR > 70%
NOVACAP/DU – ESP 05 (2012) - Especificação técnica para execução de sub-base e base de brita Graduada (BGS)	Abrasão Los Angeles < 50% Equivalente de areia > 55%	-	$N \leq 1,4 \times 10^5$: CBR \geq 60% $1,4 \times 10^5 < N \leq 3,1 \times 10^6$: CBR \geq 80% $N > 3,1 \times 10^6$: CBR \geq 100% CBR \geq 40% para sub-base
NOVACAP/DU – ESP 08 (2012) - Especificação de serviço para execução de base e sub-base estabilizada granulometricamente com cascalho laterítico	Abrasão Los Angeles < 70%	LL < 40% IP < 15%	$N \leq 1,4 \times 10^5$: CBR \geq 60% $N > 1,4 \times 10^5$: CBR \geq 80%
GOINFRA ES-PAV 002/2019 Pavimentação – Sub-base e Base Estabilizadas Granulometricamente com ou sem mistura	Equivalente de areia > 30%	LL < 40% IP < 15% Expansão < 0,5%	$N > 5 \times 10^6$: CBR \geq 80% $N \leq 5 \times 10^6$: CBR \geq 60%

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

2.2 Solo-Brita, Solo-RCD e RCD em pavimentação

2.2.1 Solo-Brita

Pesquisas sobre o desempenho de misturas de solo-brita, confeccionadas com diferentes proporções e com britas de diferentes tamanhos, foram desenvolvidas ao longo dos anos para proporcionar maior conhecimento sobre este tipo de material utilizado em camadas de base e sub-base de pavimentos. Na pesquisa desenvolvida por Couto (2009) foi elaborada uma mistura de um solo argiloso com características lateríticas e brita, a fim de descobrir se a mistura seria viável para utilização em substituição ao material pétreo britado, determinado em projeto para o pavimento estudado. O pavimento executado localizava-se em um trecho da rodovia RSC-129, entre os municípios de Casca e David Canabarro, região norte do estado do Rio Grande do Sul. A porcentagem utilizada neste estudo foi de 40% solo (argila laterítica) + 60% agregado (brita). Foram avaliadas as características físicas e mecânicas dos materiais, isoladamente, e da mistura. Realizaram-se ensaios de análise granulométrica, compactação, índice de suporte Califórnia e ensaio triaxial dinâmico para determinação do módulo de resiliência. Durante a construção do pavimento também foram feitas medições com o *Falling Weight Deflectometer* (FWD). Os ensaios realizados com a mistura apresentaram CBR = 60%, quando compactada na energia intermediária, qualificando-a como viável para o emprego nas camadas de base e sub-base do trecho de estudo pelo critério convencional. Comparando os valores de módulo de resiliência (MR) obtidos no laboratório com o MR obtido na retroanálise das bacias defletométricas, o autor verificou que os valores de módulo de resiliência obtidos em campo foram da ordem de 700 MPa e os valores de laboratório tiveram média de 500 MPa, aproximadamente.

Guimarães (2009) avaliou a deformação permanente de solos e britas e propôs o modelo de comportamento, que hoje compõe a norma do DNIT (DNIT 179/2018 IE) e que está considerado no método MeDiNa de dimensionamento. O autor mostrou que a deformação permanente é dependente do histórico de solicitações no pavimento, tendendo a aumentar com a diminuição da resistência ao cisalhamento dos materiais como solos e britas. Assim, o problema não está somente na caracterização dos materiais que compõem as camadas do pavimento, mas sim na avaliação da natureza da deformação permanente em tais materiais: se há acomodamento ou não.

Lima (2016) desenvolveu uma pesquisa com misturas de solo e brita, utilizando britas retiradas de 2 locais diferentes, mas com a mesma mineralogia (granito-gnaiss). Uma das britas

utilizadas foi a mesma empregada em alguns trechos da obra da via TransCarioca e a outra amostra de brita foi oriunda da pedreira Petra Agregados, situada em Queimados-RJ. A pesquisa teve como finalidade comparar as deformações permanentes, dos materiais e das misturas confeccionadas, para verificar a viabilidade da aplicação destes como material de base e sub-base. Para a caracterização foi realizado um total de 54 ensaios de deformação permanente e 72 ensaios de módulo de resiliência utilizando o equipamento triaxial de cargas repetidas. De acordo com os resultados obtidos, concluiu-se que ambas as britas atenderam as especificações mínimas para serem aplicadas em misturas com solos destinadas a camadas de base e sub-base de pavimentos sob o ponto de vista do MR e da DP. Embora algumas proporções das misturas tenham obtido resultados melhores que outras, todas as combinações avaliadas foram consideradas aptas para a aplicação.

Norback (2018) avaliou os módulos de resiliência e a deformação permanente de três solos e estes solos misturados com uma brita (solo-brita). Os solos foram caracterizados pela classificação MCT como LG', NA' e NG' e foram avaliadas cinco composições de solo – brita, visando contribuir para o estabelecimento de novos critérios de combinação destes dois tipos de materiais, com base no módulo de resiliência e na deformação permanente. Considerou que, para fazer uma boa mistura solo-brita, devem ser considerados alguns fatores, como a granulometria da brita empregada, a natureza do solo utilizado, os limites dos ensaios indicados, e as diferentes faixas de enquadramento especificada. A maioria dos materiais e misturas apresentaram no ensaio de deformação permanente o comportamento de acomodamento do tipo A (escoamento elástico) e B (escoamento plástico) e nenhum material apresentou ruptura.

Oliveira Júnior, Araújo e Ayres (2018) realizaram estudos com misturas de um solo classificado como areia ou pedregulho siltoso, de acordo com a classificação da *Transportation Research Board* (TRB) e agregados. Realizaram diversos ensaios: Limite de Liquidez e Plasticidade, Granulometria, Compactação, Densidade Real dos Grãos, Abrasão Los Angeles e CBR. Foram consideradas sete configurações diferentes para a realização das comparações, sendo elas: o solo natural, sem acréscimo de brita ou seixo, o solo com acréscimos de 20%, 30% e 40% de brita e as mesmas proporções para o seixo. Com os resultados foi observado que a mistura de solo-seixo obteve um aumento, em média, de 65% do CBR com relação ao solo natural e a mistura de solo-brita obteve um acréscimo de resistência, em média, de 60% quando comparado com a mistura de solo-seixo nas mesmas proporções de solo-agregado.

Maria e Bastos (2018) utilizaram como base para o seu estudo um solo comercializado no interior do município de Capão do Leão, no estado do Rio Grande do Sul, (denominado saibro fino) e material pétreo britado. Foram elaboradas quatro misturas definidas por métodos

de estabilização granulométrica. Para o método empírico foram feitas três misturas: mistura 1 (75% solo + 25% agregado), mistura 2 (50% solo + 50% agregado) e mistura 3 (25% solo + 75% agregado) e para o método estatístico foi confeccionada a mistura 4 utilizando 40% solo + 60% agregado. Foram realizados ensaios de caracterização dos materiais e das misturas, tais como: ensaios de Compactação, ensaios CBR e ensaios de Abrasão Los Angeles. Os resultados dos ensaios mostraram que a utilização da mistura 0 (solo puro), a mistura 4 e a brita, possuíam características aptas a utilização e aplicação em camadas de base, sub-base e reforço do subleito. Com relação à capacidade de suporte, os resultados foram satisfatórios: as misturas 3 e 4 apresentaram valores de CBR superiores a 50% na energia Proctor Intermediária e superiores a 100% no Proctor Modificado, atendendo assim as especificações de projeto vigentes na época. A mistura que apresentou melhor desempenho foi a 4, composta por 40% solo e 60% agregado.

Note-se que destas pesquisas citadas, algumas utilizaram o CBR e outras avaliaram as britas e misturas de solo-brita utilizando os ensaios de módulo de resiliência e de deformação permanente, que são mais adequados para avaliar o comportamento mecânico dos materiais de pavimentação e necessários para aplicação no novo método de dimensionamento do DNIT (método MeDiNa).

2.2.2 RCD e Solo-RCD

Segundo a NBR 15115 (2004), o agregado reciclado utilizável na pavimentação é o material granular, obtido por meio de britagem ou beneficiamento mecânico, de resíduos de construção civil, da Classe A da Resolução CONAMA 307. Assim como os materiais convencionais, o material oriundo da reciclagem também deve atender a requisitos como: boa graduação granulométrica; valores mínimos de CBR e máximos de expansão (conforme o tipo de camada de pavimento) e dimensão máxima característica de 63,5 mm. A Tabela 2 a seguir exemplifica os parâmetros elencados pela referida normativa. Nota-se que esta norma ainda faz referência ao ensaio de CBR, e, portanto, deveria ser revista urgentemente.

Tabela 2 – Requisitos específicos para agregado reciclado destinado à pavimentação segundo a ABNT NBR 15115 (2004)

Aplicação	CBR (%)	Expansibilidade (%)	Energia de compactação
Material para execução de reforço de subleito	≥ 12	≤ 1,0	Normal
Material para execução de revestimento primário e sub-base	≥ 20	≤ 1,0	Intermediária
Material para execução de base de pavimento ¹⁾	≥ 60	≤ 0,5	Intermediária ou Modificada

1) Permitido o uso como material de base somente para vias de tráfego com $N \leq 10^6$ repetições do eixo padrão de 8,2 tf (80kN) no período de projeto

Fonte: ABNT NBR 15115 (2004)

Fernandes (2004) avaliou, por meio de ensaios triaxiais de carga repetida, amostras de RCD dos Municípios do Rio de Janeiro e de Belo Horizonte, visando sua aplicação em bases, sub-base e reforços de subleito de pavimentos rodoviários urbanos e rurais. Em cada uma havia um local de beneficiamento dos RCD, no RJ, particular e em BH, municipal. Visitou muitas obras, terminadas e em andamento, e verificou o bom desempenho deste material. Avaliou dez composições granulométricas por meio de ensaios de módulo de resiliência e de deformação permanente e, também, realizou ensaios ambientais de lixiviação e solubilização. A composição granulométrica e a energia de compactação exerceram pouca influência no valor do módulo de resiliência dos agregados em geral. O tipo de material (Concreto ou Misto) foi o principal responsável na diferenciação dos valores de módulo, sendo que RCD com predominância de concreto apresentaram MR superior. A deformação permanente foi muito mais sensível à distribuição granulométrica e à energia de compactação analisadas em conjunto.

Novais (2018) relatou que, na década de 1990, deu-se início à instalação de usinas de reciclagem, mas não havia normalização para o uso de agregados reciclados em pavimentação. Com o desenvolvimento de diversos estudos bem como da NBR 15116 (2004), para utilização de agregados reciclados em camadas de pavimento, várias cidades do Brasil e no exterior passaram a utilizar agregados reciclados para este fim e os resultados satisfatórios vêm demonstrando a boa adequação desse material.

De acordo com Motta (2005), a ampla produção de resíduos da construção civil nas cidades com médio e grande porte levou empresas e cidades a empregarem os agregados reciclados na pavimentação, visto que estes materiais normalmente são comercializados por

preços inferiores aos dos granulares tradicionalmente utilizados. A referida autora analisou o comportamento mecânico de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil para uso em camadas de base, sub-base ou reforço do subleito, em substituição aos materiais convencionais. A pesquisa comparou os resultados dos ensaios de comportamento mecânico realizados com agregado reciclado *in natura*, com incorporação de 4% de cal e 4% de cimento Portland, além de um material de referência constituído de brita graduada simples (BGS). Assim, foi verificado em sua pesquisa que o agregado reciclado apresentava condições técnicas promissoras para utilização na pavimentação, dadas suas propriedades físicas e mecânicas satisfatórias, comparáveis a materiais tradicionais estabilizados granulometricamente ou mesmo a brita graduada simples.

Leite (2007) desenvolveu pesquisa para analisar o comportamento mecânico do agregado reciclado para emprego em camadas de base e sub-base. A autora realizou ensaios laboratoriais e desenvolveu um estudo de caso no pavimento do novo campus da Universidade de São Paulo (USP Leste) que foi executado utilizando agregados reciclados em quatro seções-tipo diferentes. A pesquisa avaliou as propriedades físicas e mecânicas do agregado reciclado em laboratório e em campo. Os ensaios mecânicos realizados em laboratório foram: índice de suporte Califórnia, módulo de resiliência e deformação permanente e os ensaios de campo foram: resistência à penetração pelo *Dynamic Cone Penetrometer* (DCP) e levantamento deflectométrico com o *Falling Weight Deflectometer* (FWD). Os resultados das avaliações mostraram que se submetido a compactação adequada, o material reciclado comporta-se tal qual uma brita graduada simples.

Quintanilha (2008) realizou análises laboratoriais para investigar as propriedades físicas e mecânicas de três dosagens contendo agregados reciclados e desenvolveu um estudo de caso (duas pistas experimentais na cidade de Goiânia, Goiás) para verificar a viabilidade do emprego destas misturas em camadas de reforço de subleito, sub-base e base. A primeira pista teve base e sub-base (15 cm cada) executadas com as misturas e localizou-se na CEASA-GO, a segunda pista foi uma rua executada no Setor Recanto das Minas Gerais e foi executada com base (30 cm) composta por mistura de agregados reciclados. Os ensaios laboratoriais mostraram que os agregados reciclados investigados se encontravam de acordo com as normas brasileiras para uso em bases e sub-base de pavimentos flexíveis e os ensaios de campo de DCP, Viga Benkelman (VB) e provas de carga sobre placa, realizados após quatro anos de solicitação de tráfego, concluíram que as vias possuíam adequado comportamento estrutural.

Jiménez (2011) também abordou a possibilidade de reuso dos resíduos de construção e demolição de obras produzidos em Brasília como materiais convenientes para utilização em

pavimentação. Em seus estudos foram realizadas a caracterização física e química do RCD mediante os ensaios tradicionais empregados para agregados naturais, a análise da influência do processo de compactação na variação de tamanho, distribuição e forma das partículas e a avaliação do comportamento mecânico do RCD, submetido a diferentes períodos de cura. O autor concluiu que o RCD utilizado na pesquisa apresentava características físicas, químicas e mecânicas que permitiam o seu uso como insumo na construção de bases rodoviárias, podendo assim substituir os materiais convencionais.

Sousa (2011) destaca em sua pesquisa que os estudos com agregados reciclados de concreto (ARC) desenvolvidos no Brasil e no exterior demonstraram que a característica de cimentação própria destes materiais é muito relevante. Desse modo, o autor analisou o comportamento mecânico, ao longo do tempo de cura, do agregado reciclado de concreto proveniente da Usina de Reciclagem de São Carlos e de sua mistura com um solo laterítico, com o intuito de utilizá-los na construção de pavimentos. O material e as misturas, moldados em diferentes energias, foram submetidos a ensaios de resistência à compressão simples, módulo tangente, módulo de resiliência, deformação permanente e índice de suporte Califórnia (CBR), em distintos tempos de cura. A pesquisa concluiu que o material se mostrou apto para uso em camadas de bases, seja da forma pura ou em misturas com solo arenoso laterítico.

O estudo desenvolvido por Beja (2014) verificou o comportamento físico e mecânico do agregado reciclado de resíduos de construção e demolição com adição de cal hidratada e cimento Portland. O autor construiu três trechos experimentais de uma via urbana utilizando RCD misto na sub-base dos pavimentos. As diferentes misturas utilizadas na execução da sub-base passaram por ensaios de comportamentos mecânicos de resistência à compressão simples e ensaios de módulo de resiliência e deformação permanente. Os resultados demonstraram que as misturas com percentual de cimento obtiveram módulos mais elevados do que as demais misturas e de forma geral todas as proporções avaliadas obtiveram deformação permanente dentro dos limites aceitáveis. Também foi executado o monitoramento deflectométrico e realizada uma retroanálise para estimar os módulos de resiliência do material em campo e verificou-se que os valores foram semelhantes aos módulos determinados nos ensaios laboratoriais.

2.2.2.1 Revisão Sistemática

Uma revisão sistemática da literatura científica (RS) sobre determinada temática torna-se relevante para identificar questões de pesquisa, bem como por justificar pesquisas futuras

nessa área. É uma ferramenta para compilar o que foi produzido até o momento, os métodos aplicados, os resultados obtidos, as propostas apresentadas, quem são os principais autores de uma área e quais bancos de dados e publicações que eles usam para apresentar seu trabalho, permitindo-lhes saber como obter informações atualizadas e permanentes sobre os resultados publicados por vários laboratórios, centros de pesquisas e instituições de ensino em geral (TORRES-CARRIÓN *et al.*, 2018).

Esta técnica foi utilizada nesta pesquisa para mostrar uma forma de busca que pode vir a ser útil para o início de qualquer estudo sobre um tema. Para esta aplicação foi feita uma busca seletiva de artigos com o período de publicação nos últimos 5 anos em banco de dados estrangeiros. O tema da presente pesquisa não se enquadra no conceito de “novidade” propriamente dito, o que justificaria em parte a busca concentrada nos artigos mais recentes, sendo importante não ignorar o histórico completo do assunto em si. O maior objetivo nesta fase da revisão foi explorar esta ferramenta e compreender como estão sendo desenvolvidos os estudos internacionais.

A revisão sistemática é um processo que envolve três fases: planejamento, execução e análise dos resultados. Todo este processo é longo e demorado e então surgem os *softwares* para auxiliar nesta demanda. O *State of the Art through Systematic Review (START)*, torna a seleção e avaliação dos artigos mais rápida e por isso foi o escolhido para realizar a presente revisão sistemática.

Na fase de planejamento, define-se a motivação para a execução da RS. Em seguida determina-se o protocolo da revisão, elemento essencial para a execução. No protocolo, especificam-se as questões de pesquisa, a estratégia utilizada para a condução, as fontes consideradas para as buscas, os critérios de seleção e definição da qualidade dos estudos, a forma de extração dos dados e, por fim, como realizar a sintetização dos dados.

Posteriormente, realiza-se a fase de condução, em que os estudos são identificados por meio de uma estratégia de busca ampla e selecionados através da aplicação de critérios de inclusão e de exclusão. Após a seleção, os artigos aceitos passam pela extração e sintetização. A última fase destina-se à avaliação dos resultados obtidos.

Para condução desta revisão sistemática, a priori, estabeleceu-se o objetivo da pesquisa: investigar estudos desenvolvidos, nos últimos 5 anos, visando um primeiro contato com a ferramenta, sobre a aplicação dos resíduos de construção e demolição (RCD) nas camadas do pavimento. Na sequência, definiu-se as questões de pesquisa, sendo estas:

Q1 – Foram desenvolvidos muitos estudos sobre a aplicação de resíduos de construção e demolição na área de pavimentação nos últimos 5 anos?

Q2 – O RCD/RCC foi mais avaliado em qual camada do pavimento?

A seguir, foram definidas palavras-chave de busca somente em inglês devido às ferramentas utilizadas e por ainda estar sendo exploradas as possibilidades de uso. Assim as *strings* de busca, de modo a nortear as expressões (*Keywords*) mais representativas para a pesquisa, foram: “*Pavement*” e “*Paving*” bem como “*Construction and Demolition Wastes*”, “*RCA*” e “*CDW*”, variando as combinações entre elas e formando várias expressões finais de forma a capturar o maior número de estudos possível. A escolha das *strings* em inglês foi devido a ocorrência de maior número de estudos com a utilização desta língua nos bancos de dados.

Os bancos de dados foram definidos com base no critério de utilização de plataformas que possibilitassem exportar as pesquisas no formato *BibTex*. Dessa forma, foram selecionadas as plataformas: *Scopus*, *Science Direct* e *Engineering Village*.

Os critérios de exclusão iniciais foram estabelecidos e aplicados nos filtros que as plataformas apresentavam com o intuito de restringir os resultados de busca e importar para o START os dados mais relevantes para a pesquisa. Assim, inicialmente foram obtidos 3.138 estudos com base nas *strings* definidas. Ao se aplicar o filtro 1 para captura de estudos dos últimos 5 anos foram excluídas 1.208 pesquisas e com a aplicação do filtro 2, de exclusão de artigos pagos, foram retirados 1.730, restando 200 estudos para a etapa seguinte. Os números de estudos obtidos com cada filtro aplicado estão expostos na Tabela 3.

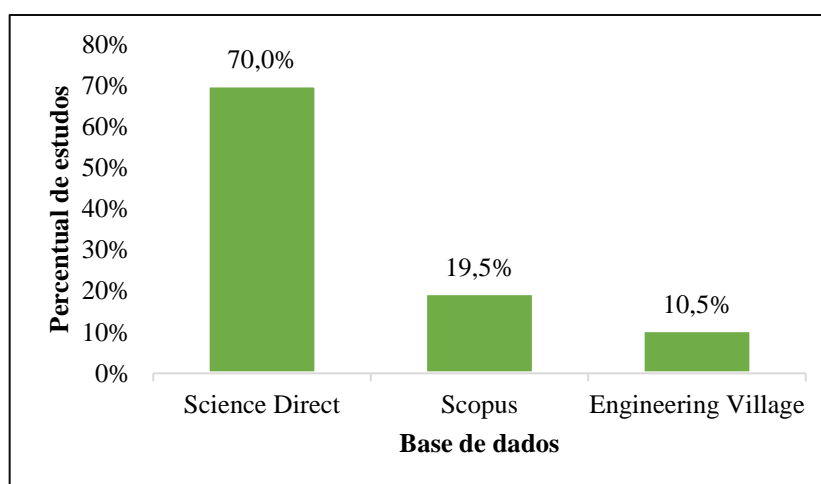
Tabela 3 - Resumo dos filtros aplicados nas plataformas de busca RS nesta pesquisa

Strings	Banco de dados	Total Obtido	Filtro 1	Filtro 2	Total Final
(pavement) AND (construction and demolition wastes)	Science Direct	889	-267	-553	69
(pavement) AND (RCA)		366	-130	-213	23
(pavement) AND (CDW)		121	-44	-72	5
(paving) AND (construction and demolition wastes)	Science Direct	394	-153	-212	29
(paving) AND (CDW)		61	-20	-37	4
(paving) AND (RCA)		151	-66	-75	10
(pavement) AND (construction and demolition wastes)	Scopus	218	-107	-98	13
(pavement) AND (RCA)		239	-101	-122	16
(pavement) AND (CDW)		42	-20	-21	1
(paving) AND (construction and demolition wastes)		39	-18	-17	4
(paving) AND (CDW)		14	-4	-7	3
(paving) AND (RCA)	31	-14	-15	2	
(pavement) AND (construction and demolition wastes)	Engineering Village	183	-90	-88	5
(pavement) AND (RCA)		232	-102	-123	7
(pavement) AND (CDW)		50	-25	-24	1
(paving) AND (construction and demolition wastes)		47	-19	-24	4
(paving) AND (CDW)		19	-8	-8	3
(paving) AND (RCA)	42	-20	-21	1	
	TOTAL	3138	-1208	-1730	200

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

A Figura 1 mostra os percentuais de estudos obtidos em relação ao total para cada base de dados após a primeira triagem.

Figura 1 – Percentual de estudos obtidos em cada base de dados utilizada na RS desta pesquisa



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Os resultados dos 200 estudos retornados através das buscas foram exportados no formato *BibTex* e inseridos no START. No programa foram aplicados os seguintes critérios:

- Exclusão de artigos duplicados/repetidos;
- Exclusão de artigos com score igual a 0 (a fim de aplicar um critério de qualidade);
- Exclusão de artigos cujo título e resumo não condiziam com o foco da pesquisa.

Desse modo, a segunda seleção dos artigos foi realizada e foram obtidos os seguintes dados: artigos duplicados foram no total de 72; artigos com score igual a zero e artigos cujo título e resumo não condiziam com o foco da pesquisa totalizaram 93 artigos rejeitados, sendo excluídos assim 165 estudos, restando então 34 artigos para a próxima etapa.

Os 34 artigos passaram para a fase de extração e sumarização. Na aplicação do formulário de extração foram definidas quatro perguntas:

- Os estudos evidenciam maior utilização do RCD em que camada do pavimento?
- Foram realizados ensaios para a inserção do RCD no pavimento? Se sim, quais?

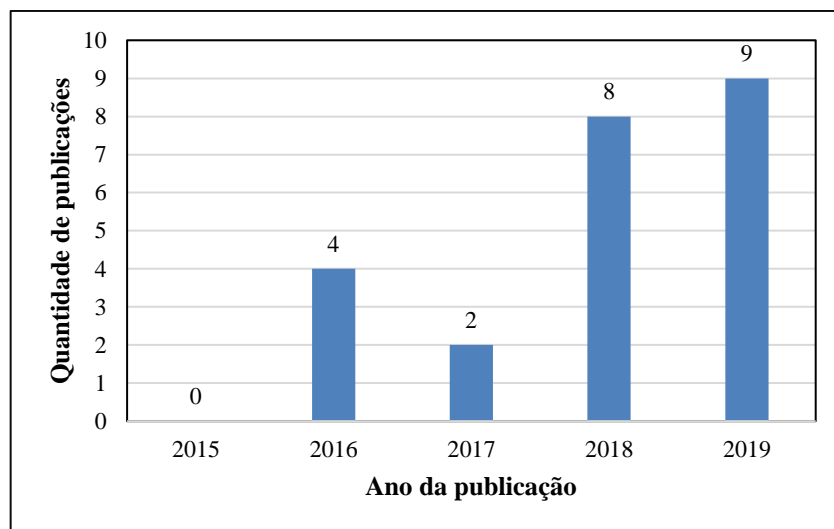
- Quais os aspectos positivos da inserção do RCD na mistura?
- Quais os aspectos negativos da inserção do RCD na mistura?

Assim, a terceira etapa da seleção consistiu na leitura parcial dos trabalhos e a partir desta foram excluídos artigos que não abordavam os resíduos de construção e demolição aplicados na área de pavimentação da forma esperada (apenas faziam citações ao tema), dispensando assim 11 estudos, restando somente 23 artigos.

A aplicação dos vários critérios resultou na seleção de publicações que, posteriormente, foram analisadas através da leitura do completo teor. Tais estudos foram avaliados para responder as perguntas iniciais da pesquisa.

A Figura 2 mostra a distribuição dos 23 artigos selecionados, seguindo os critérios de exclusão e inclusão, em relação ao ano de publicação. Percebe-se que, de modo geral, houve uma tendência de crescimento, exceto pelo ano de 2017, no desenvolvimento de estudos voltados à análise da inserção da resíduos de construção e demolição no pavimento.

Figura 2 – Publicações nos últimos 5 anos sobre uso de RCD em pavimentação obtido por RS



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

A Tabela 4 apresenta parte das informações extraídas dos artigos selecionados a partir da aplicação da estratégia de extração de dados. Nela estão descritos os tipos de ensaios executados para análise das propriedades e características dos resíduos individualmente bem como do desempenho das misturas elaboradas.

Tabela 4 – Resumo das informações extraídas dos artigos por meio da extração de dados feita na RS

Ordem	Referência	RCD aplicado em qual camada do pavimento	Foram realizados ensaios?	Quais ensaios?
1	TAHMOORIAN e SAMALI (2018)	Misturas asfálticas / Revestimento	Sim	Análises físicas e mecânicas convencionais do RCD
2	ARISHA <i>et al.</i> (2016)	Base e Sub-base	Sim	Caracterização das misturas e Teste Triaxial de Carga Repetida
3	TATARANNI <i>et al.</i> (2018)	Base	Sim	Análises físicas e mecânicas convencionais das misturas
4	SHARKAWI <i>et al.</i> (2018)	Misturas asfálticas / Revestimento	Sim	Granulometria, LL, atividade pozolânica, composição química e XRF dos resíduos. As propriedades do CDW triturado foram comparadas de acordo com as técnicas de trituração e o tipo de material produzido.
5	YAGHOUBI <i>et al.</i> (2016)	Não menciona	Sim	Análise do comportamento não saturado em termos de diferença no SWCC e módulo resiliente
6	JAYAKODY, GALLAGE e RAMANUJAM (2019)	Base	Sim	Testes de carga tri-axial repetida foram realizados para investigar a resposta do RCA a deformações elásticas e plásticas
7	POURANIAN e SHISHEHBOR (2019)	Não menciona	Sim	Avaliação do desempenho através do exame de sulcos, suscetibilidade à umidade, resistência térmica e à fissuração por fadiga.
8	MARTINEZ-ARGUELLES <i>et al.</i> (2019)	Misturas asfálticas / Revestimento	Sim	Determinação de propriedades físicas, mecânicas e químicas de acordo com as normas colombianas. Também foram empregadas técnicas de microscópio eletrônico de varredura (MEV) para fornecer imagens sobre a morfologia da superfície da RCA e sua composição, apresentando diferenças significativas entre a RCA e o agregado natural
9	TAHMOORIAN, SAMALI e YEAMAN (2018)	Misturas asfálticas / Revestimento	Sim	Ensaio de caracterização
10	SARAVANAN <i>et al.</i> (2016)	Sub-base	Sim	Ensaio de Cisalhamento Direto, CBR e Resistência à compressão não confinada
11	KOX <i>et al.</i> (2019)	Peças de concreto	Sim	Absorção, densidade específica e resistência à abrasão dos resíduos
12	CHAKRAVARTHI <i>et al.</i> (2019)	Base	Sim	Propriedades físicas, características de compactação e testes de desempenho como Resistência à Compressão Não Confinada, Resistência à Tração Indireta e Módulo de Elasticidade aos 7 dias do período de cura

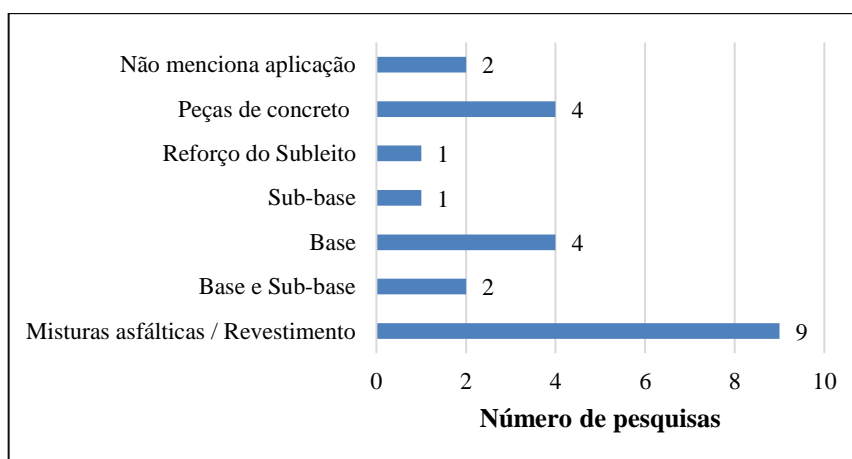
Continua

Ordem	Referência	RCD aplicado em qual camada do pavimento	Foram realizados ensaios?	Quais ensaios?
13	VEGA, MARTINEZ-ARGUELLES e SANTOS (2019)	Misturas asfálticas / Revestimento	Não	-
14	ARSHAD (2019)	Base e Sub-base	Sim	Ensaio de CBR e de módulo de resiliência
15	GIWANGKARA <i>et al.</i> (2019)	Base	Sim	Densidade, absorção de água, ensaio de abrasão, compactação e teste de penetração
16	HOU <i>et al.</i> (2018)	Misturas asfálticas / Revestimento	Sim	Desempenho de fadiga da mistura de asfalto com diferentes agregados e dosagens de RCA, estabilidade Marshall e resistência à tração
17	NOKKAEW (2018)	Misturas asfálticas / Revestimento	Sim	Módulo resiliente das misturas e curvas de características da água no solo foram determinados para cada material
18	ALBAYATI <i>et al.</i> (2018)	Misturas asfálticas / Revestimento	Sim	Amostras com o teor ideal de cimento asfáltico foram preparadas e testadas no teste de tensão indireta para avaliar sua suscetibilidade à umidade.
19	TAHMOORIAN <i>et al.</i> (2017)	Misturas asfálticas / Revestimento	Sim	Propriedades do RCA, tais como: Granulometria, índice de forma, abrasão, densidade, absorção, resistência do agregado, análise do percentual de finos.
20	FRANCISCO, SOUZA e TEIXEIRA (2019)	Peças de concreto	Sim	As propriedades das peças obtidas foram analisadas de acordo com as normas brasileiras para resistência à compressão e absorção de água.
21	JUAN-VALDÉS <i>et al.</i> (2018)	Peças de concreto	Sim	Testes de absorção de água, abrasão e teste de congelamento/degelo. Caracterização dos elementos pré-moldados reciclados, cobrindo propriedades mecânicas, microestruturais e de durabilidade.
22	LI <i>et al.</i> (2017)	Reforço do Subleito	Sim	Compactação em laboratório e em campo para determinar as propriedades físicas dos resíduos. O efeito da cura na resistência dos resíduos de foi investigado usando resistência à compressão não confinada, índice de suporte California (CBR) e medidas de deflexão.
23	KIM, KIM e YANG (2016)	Peças de Concreto	Sim	Massa específica, Absorção, Peso unitário, Resistência à abrasão, composição química dos agregados. Resistência à compressão e módulo de elasticidade das amostras.

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

A Figura 3 mostra a quantidade de referências obtidas nesta análise exploratória acerca de aplicação do RCC/RCD nas diversas camadas do pavimento, tais como: Reforço do subleito, Base, Sub-base, Revestimento (misturas asfálticas e peças de concreto).

Figura 3 – Quantitativo de estudos desenvolvidos para cada camada estrutural do pavimento com uso de RCD na busca realizada por RS



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

A partir da análise desta amostragem pode-se inferir que a maior parte dos estudos realizados nos últimos 5 anos foram voltados para a inserção do RCD em misturas asfálticas empregadas na camada de revestimento. A confecção de peças de concreto com resíduos para fins de pavimentação também mostrou certo destaque.

Em relação à realização de ensaios verificou-se que quase todos os estudos apresentaram alguma avaliação por meio da execução de ensaios com o agregado oriundo do resíduo de construção e demolição de obras bem como ensaios para verificação do desempenho das misturas. O artigo de Vega, Martínez-Arguelles e Santos (2019), porém, que não teve como foco a análise do desempenho dos resíduos, mas sim a análise dos aspectos ambientais envolvendo a inserção dos resíduos na mistura asfáltica, foi o único que não apresentou ensaios físicos e mecânicos.

No que diz respeito às pesquisas com foco na análise destes resíduos em camadas de base e sub-base, pode-se destacar as conclusões de Arisha *et al.* (2016) que utilizaram os resíduos de construção e demolição obtidos de alguns lixões nas margens de estradas e canais em torno da cidade de Mansoura, no Egito. Os autores avaliaram a resposta resiliente dos corpos de prova de oito misturas com diferentes proporções (de 0 até 100%) de agregados oriundos dos resíduos. Os corpos de prova foram compactados na energia Proctor Modificada e

submetidos à carregamentos cíclicos pelo ensaio triaxial de carga repetida e a ensaios de cisalhamento triaxial estático. A pesquisa conclui que os corpos de prova apresentaram módulos resilientes satisfatórios e que nenhuma variação significativa nos valores dos módulos resilientes foi observada com o estado de tensões.

O estudo desenvolvido por Saravanan *et al.* (2016) teve como foco os resíduos de construção e demolição inseridos sob forma de filler em camadas de pavimentos para uso rural e para isto os autores avaliaram a incorporação de filler de RCD em proporções de 0 a 25%. Para cada 5% de aumento na incorporação, a amostra de solo com resíduos foi comparada com o solo puro. Foram realizados testes de cisalhamento direto, de compressão não confinada e de CBR nas misturas que comprovaram melhoria da resistência do material, podendo assim aumentar a vida útil das estradas rurais.

A pesquisa desenvolvida por Tataranni *et al.* (2018) avaliou o desempenho de duas diferentes misturas para camadas de base, ambas contendo material fresado de revestimento asfáltico (RAP, do inglês *Recycled Asphalt Aggregate*) e cada uma delas com um resíduo específico de construção e demolição: resíduos de ladrilhos ou resíduos de concreto britado. Os dados foram sempre comparados com os obtidos para uma base tradicional denominada de *Cement Bound Mistures* (CBM) inteiramente feita de agregados virgens. O CBM é definido como um material granular ou solo, misturado com cimento e compactado próximo ao teor de umidade ideal. O estudo ocorreu em duas etapas: um estudo de laboratório e uma fase de campo experimental. Na primeira fase foram feitos estudos sobre as proporções e a caracterização física e mecânica das misturas. Na segunda fase, foi realizado um trecho experimental em larga escala: testes *in situ* e amostragem foram planejados em quatro datas, correspondendo a 0, 60, 180 e 365 dias de tráfego. Com base nos resultados, os autores destacam que os dados obtidos na caracterização laboratorial e na fase da pista experimental são bastante próximos e que as propriedades mecânicas alcançadas confirmam a qualidade dos projetos de misturas experimentais e a validade dos processos. Ressaltou-se, entretanto, que o desempenho das misturas está estritamente relacionado ao tipo e a qualidade dos materiais reciclados utilizados. Dessa forma, demonstrou-se que a substituição de agregados naturais por resíduos nas camadas cimentadas do tipo CBM parece ser uma solução viável para a construção de camadas de base com desempenho adequado.

Jayakody, Gallage e Ramanujam (2019) estudaram as características de desempenho do *Recycled Concrete Aggregate* (RCA, em tradução livre “Agregado de Concreto Reciclado”), para aplicação como um material com potencial de emprego nas camadas dos pavimentos. Foram executados ensaios triaxiais de carga repetida para investigar a resposta do

RCA às deformações elásticas e plásticas sob cargas dinâmicas. Foram analisados o módulo de resiliência e o acúmulo de deformação permanente em diferentes tensões de confinamento, com corpos de prova em distintos teores de umidade e saturação. Os resultados demonstraram um ganho constante de rigidez dos corpos de prova com um aumento dos ciclos de carga em baixos teores de umidade, altas pressões confinantes e alta pressão axial vertical. Portanto, percebeu-se a possibilidade de prever um módulo de resiliência maior com mais ciclos de carga, mesmo que as amostras compactadas de RCA exibissem valores de módulo de resiliência mais baixos (de 233 a 247 MPa) do que os materiais da camada base de alta qualidade (com 275 a 450 MPa). Os autores ressaltam também que o acúmulo de deformação plástica do RCA se aproximou da faixa do limite do acomodamento plástico (“*plastic shakedown limit*”) devido ao acomodamento da deformação plástica com o aumento dos ciclos de carga. Comportamento similar aos materiais de pavimentação de alta qualidade, que também apresentam acomodamento da deformação plástica após um certo número de ciclos de carga e, a partir daí, se deformam apenas elasticamente. Porém, quando foram aplicadas pressões de confinamento muito baixas, isto é, abaixo de 75 kPa, estas afetaram adversamente o acúmulo de deformação plástica e resultaram em um comportamento acima do limite (“*plastic shakedown limit*”) tendendo a aumento da DP.

Chakravarthi *et al.* (2019) fizeram análises com revestimento asfáltico fresado (RAP) e o *Recycled Concrete Aggregate* (RCA). No estudo desenvolvido por eles, os resíduos foram investigados em misturas com agregados convencionais e com percentual de cimento variando de 2 a 6%. As misturas elaboradas foram avaliadas em termos de propriedades físicas, características de compactação e ensaios de desempenho como: resistência à compressão não confinada, resistência à tração indireta e módulo de elasticidade aos 7 dias do período de cura. Os resultados demonstraram que as misturas de agregados reciclados precisam de maior teor de cimento para atender às especificações como camada base para estradas de alto volume e a estabilização dos corpos de prova produzidos com RCA é mais acentuada se comparadas com os corpos de prova com RAP. Foi observado também melhoria significativa na resistência quando misturado com agregados convencionais em todos os percentuais de inserção de cimento. No entanto, as misturas com RCA alcançaram resistência a compressão em proporções iguais de RCA e agregados convencionais. As amostras que apresentaram adequado desempenho foram as compostas por três distintas proporções de resíduos, que são: 25% de RAP, 25% de RCA e 50% de RCA, todas misturadas com 6% de cimento.

Em pesquisa com misturas granulares contendo agregados naturais e materiais RAP e RCA, Arshad (2019) afirma que o agregado de RAP e o agregado de concreto reciclado (RCA)

têm usos potenciais em quantidades específicas em camadas de base e sub-base de pavimento flexível, mas aponta que a deformação permanente residual sob uma certa faixa de condições de carga aumenta substancialmente com o aumento da adição de materiais reciclados.

No trabalho desenvolvido por Giwangkara *et al.* (2019) as propriedades do RCA foram investigadas e para tanto foram realizados ensaios de densidade, absorção de água, abrasão, compactação e CBR. Os resultados nos ensaios de densidade e absorção de água demonstram que o RCA tem mais porosidade se comparado aos agregados convencionais, e que a natureza de sua porosidade pode causar perda de resistência pontual para um material de construção. Complementarmente, os autores ainda analisaram a inserção, na camada de base, de tiras plásticas de resíduos de garrafas PET em substituição ao sistema de geogrelhas, fragmentadas no tamanho de 2-4 mm de largura e 50-70 mm de comprimento. O resultado de CBR para amostras com RCA foi abaixo do requisito mínimo exigido pelas normas locais. A análise proposta usando as tiras plásticas de PET na camada de base, juntamente com o RCA, mostrou uma elevação no valor de CBR, obtendo valor de 73%. Ao ser considerado, o resultado da CBR também mostra que aumentar muito o conteúdo das tiras plásticas pode causar a diminuição do CBR. Assim, os autores destacaram a necessidade de uma pesquisa adicional para obter a proporção ideal das tiras plásticas para melhoria do RCA.

2.3 Módulo de Resiliência (MR)

De acordo com Preussler (1978) *apud* Norback (2018) o parâmetro do módulo de resiliência vem sendo analisado no Brasil desde 1977. Porém, os primeiros estudos sobre o comportamento resiliente dos materiais usados em pavimentação decorrem do ano de 1930 com Francis Hveem, nos EUA, com outro tipo de concepção de ensaio, mas já associando os defeitos dos pavimentos aos esforços repetidos provenientes do tráfego.

Mesmo com estudos sobre o módulo de resiliência já realizados durante tantos anos, o método de dimensionamento de pavimentos mais empregado ainda no Brasil se apoia, para análise da capacidade de suporte dos pavimentos, em termos de ruptura plástica sob carregamento estático, retratada pelo valor do CBR. Seed (1955) e Santos (1998) *apud* Fernandes (2004) destacavam que o valor deste índice de suporte pode não corresponder ao efeito das cargas aplicadas repetidamente que proporcionam deslocamentos muito reduzidos, muito longe da ruptura provocada pela penetração do pistão na amostra, como ocorre no ensaio CBR. Na passagem do tráfego a intensidade e frequências das cargas são variáveis e os defeitos ocorrem por repetição dos esforços e consequentes deslocamentos.

E assim, no decorrer dos anos, observou-se que parte da malha rodoviária vinha apresentando uma deterioração prematura, atribuída à fadiga dos materiais, ocasionando a necessidade de mudança para levar em consideração a resiliência dos materiais empregados nos pavimentos, permitindo avaliar o comportamento estrutural de forma mais adequada em relação aos procedimentos clássicos. Com os ensaios de carga repetida, foi desenvolvida uma abordagem mais adequada desta problemática e, também, foi possível considerar os solos tropicais e suas especificidades (DNIT, 2006).

De acordo com o método de ensaio ME 134 (DNIT, 2018), o comportamento resiliente do material caracteriza sua resposta elástica resultante de uma carga aplicada em curtos intervalos de tempo. O ensaio para determinação deste parâmetro é realizado no equipamento triaxial de carga repetida e os resultados são utilizados para determinar valores de módulo elástico constantes com o estado de tensões aplicados, ou parâmetros de modelos elásticos não lineares, usados na análise numérica de dimensionamento de pavimentos. O ensaio triaxial de carregamento repetido consiste em aplicar tensões desviadoras de forma cíclica nas amostras, simulando o mais próximo possível a ação do tráfego no material estudado.

A consideração deste parâmetro resulta na possibilidade de analisar e prever estados tensão-deformação de estruturas de pavimentos através de programas computacionais, partindo-se de propriedades expressas em termos de valores de módulo resiliente ou de resiliência. O módulo de resiliência é determinado pela Equação 1:

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \quad (MPa) \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

σ_d : ($\sigma_1 - \sigma_3$) - tensão desvio aplicada repetidamente (MPa);

σ_1 - tensão principal maior;

σ_3 - tensão principal menor ou tensão de confinamento;

ε_r - deformação específica axial resiliente (mm/mm).

2.3.1 Classificação Resiliente

O manual de pavimentação do DNIT (2006), referindo-se aos estudos iniciados na COPPE/UFRJ em 1976, menciona uma classificação de solos fundamentada nas propriedades resilientes destes. Tal classificação apresenta diferenciações para solos granulares e solos finos de forma semelhante à classificação TRB, onde avalia-se se o peso de material passante na

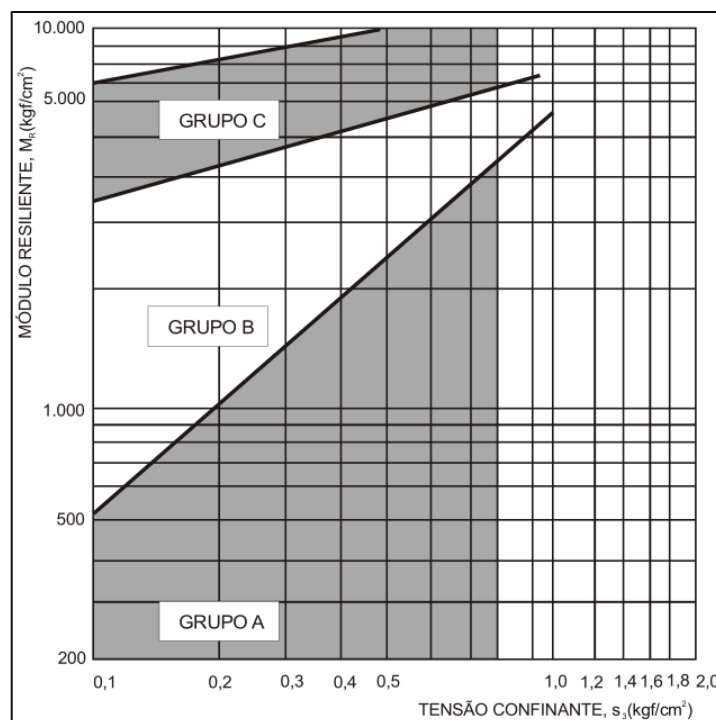
peneira n° 200 (0,075mm) é maior ou menor que 35%. Por meio desta, pode-se avaliar os modelos de comportamento dos materiais bem como a possibilidade do emprego do material em estruturas de pavimento.

A ideia por trás da criação desta classificação à época, se associava muito à prática rodoviária tradicional de seleção por ensaios básicos que fazem parte da classificação TRB, por exemplo, para tentar direcionar a escolha dos materiais para cada camada. Vale ressaltar, no entanto, que estas classificações têm somente importância histórica, e em geral, hoje, não são utilizadas para selecionar os materiais, até porque outros modelos de comportamento do módulo de resiliência são utilizados atualmente. É possível que as indicações apresentadas possam ser um auxílio para uma primeira avaliação de um material, em laboratório, quando o projetista não tem ainda muita familiaridade com a interpretação deste ensaio. Por exemplo, é evidente que um material muito elástico não linear (com expoente alto) não deve ser a primeira escolha, mas às vezes a concepção completa do pavimento pode superar esta condição caso não se tenha outro material disponível (MEDINA e MOTTA, 2015).

A classificação resiliente de solos granulares divide-se em três classes (Figura 4) e é definida através do modelo expresso na Equação 2 a seguir:

$$MR = k1 \times \sigma_3^{k2} \quad \text{Equação 2}$$

Figura 4 – Classificação resiliente de solos granulares



Fonte: Manual de pavimentação do DNIT (2006)

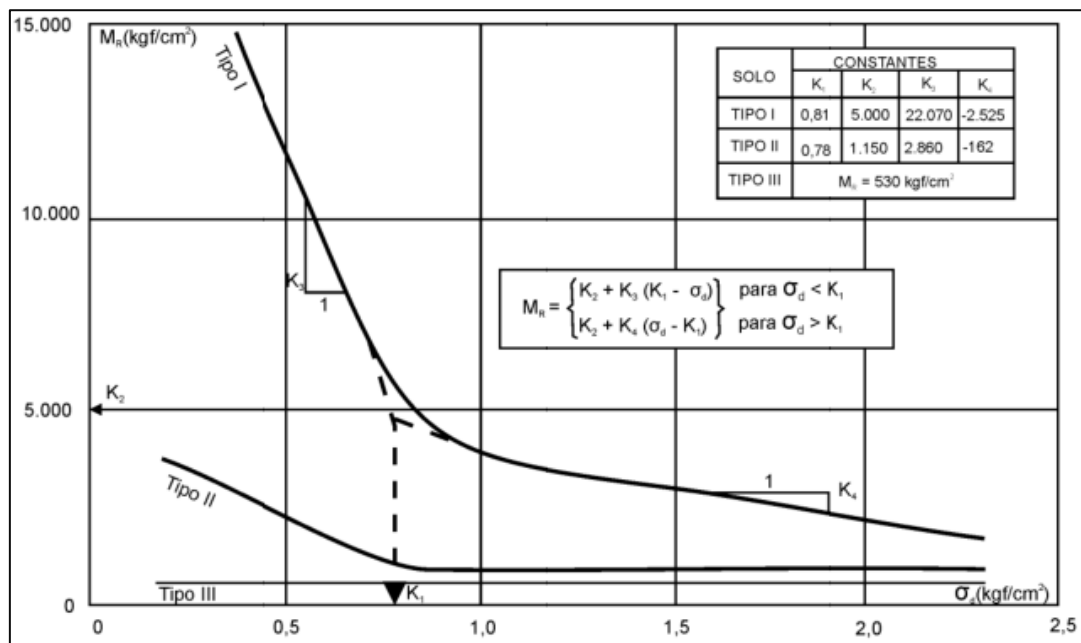
A classe de solos “A” é composta por solos que equivalem à subleitos de péssima qualidade e possuem alto grau de resiliência, não sendo, portanto, aconselhados para emprego em estruturas de pavimento. A classe de solos “B” retrata solos com moderada resiliência, que a depender da magnitude do parâmetro k_2 pode ou não apresentar bom comportamento quando empregados nas estruturas de pavimento. Assim, se $k_2 \leq 0,50$ o solo apresentará bom comportamento, porém quando $k_2 > 0,50$ o comportamento dependerá da espessura da camada e da qualidade do subleito. A classe de solos do grupo “C” é formada por solos com baixo grau de resiliência e que apresentam baixas deflexões quando utilizados em camadas de pavimentos, podendo então serem empregados nas estruturas dos pavimentos sem restrições.

A classificação resiliente de solos finos também se divide em três classes (Figura 5) e é retratada a partir do modelo expresso nas Equações 3 e 4:

$$MR = k_2 + k_3 (k_1 - \sigma_d) \text{ para } \sigma_d < k_1 \quad \text{Equação 3}$$

$$MR = k_2 + k_4 (k_1 - \sigma_d) \text{ para } \sigma_d > k_1 \quad \text{Equação 4}$$

Figura 5 - Classificação resiliente de solos finos



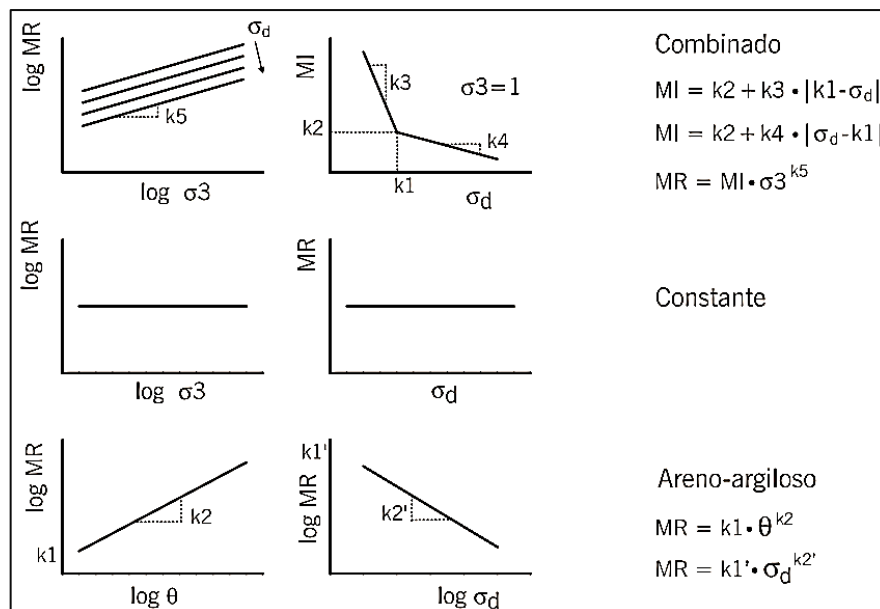
Fonte: Manual de pavimentação do DNIT (2006)

Os solos do tipo “I” representam solos de bom comportamento quanto à resiliência como subleito e reforço do subleito, podendo ser empregado também como camada de sub-base. Os solos do tipo “II” referem-se à solos com comportamento de resiliência regular quando aplicados como reforço do subleito e até como sendo o subleito. Os solos do tipo “III” são

compostos por solos de comportamento ruim quanto à resiliência e por isso não podem ser empregados em camadas estruturais do pavimento e quando presentes em subleitos demandam cuidados e estudos especiais.

Vários autores destacaram a existência de solos que dependem tanto da tensão de confinamento como da tensão-desvio e com isto não apresentavam comportamentos tipicamente granular ou tipicamente coesivo, apresentando comportamento combinado entre estas tensões. A Figura 6 exemplifica modelos de comportamentos de solos quanto à resiliência, ainda considerando os modelos clássicos de representação.

Figura 6 – Modelos clássicos de comportamento resiliente para solos



Fonte: Bernucci *et al.* (2010)

Atualmente o modelo genérico mais utilizado para expressar os resultados do ensaio triaxial de carga repetida para o módulo de resiliência é o modelo que leva em conta simultaneamente a tensão confinante e a tensão desvio, válido para todos os tipos de solos e materiais não estabilizados quimicamente, expresso na Equação 5. Este modelo está considerado no programa MeDiNa.

$$MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3} \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

MR – módulo de resiliência

σ_3 – tensão confinante

σ_d - tensão desvio

k_i – constantes da regressão (experimentais)

2.3.2 Valores típicos de módulo de resiliência

Os materiais granulares são utilizados em grande parcela das camadas que constituem a estrutura do pavimento rodoviário e por isso existe grande interesse acerca da resposta resiliente destes materiais. Com base em uma quantidade significativa de resultados do módulo de resiliência destes materiais, verificou-se que o comportamento dos materiais granulares, no geral, apresenta curvas de tensão-deformação com relação de não-linearidade e assim é necessária a determinação de parâmetros que consigam relacionar, adequadamente, os valores dos módulos com as tensões aplicadas como indicado na Equação 5.

No entanto, não é trivial se comparar materiais por meio desta expressão não linear, e, assim, é comum se expressar a ordem de grandeza do MR por meio de valores médios ou intervalo de valores. A Tabela 5 exemplifica a magnitude da variação do módulo de resiliência para distintos materiais e solos analisados individualmente, na linha de valores típicos.

Tabela 5 – Intervalo de valores de módulos de resiliência de alguns materiais

Autores	Material	MR (MPa)
Thorn e Brown (1989) <i>apud</i> Santos <i>et al.</i> (2019); Balbo (2007); Bernucci <i>et al.</i> (2010)	Calcário	330-540
	Granito	300
	Arenito	290
	Mistura de areia e cascalho	140-470
	Areia	110-150
	Brita graduada	100-400
	Brita granito-gnaïsse	47-331
Norback (2018)	Solos não-lateríticos NA'	32-80
	Solos não-lateríticos NG'	125
	Solo de comportamento laterítico LG'	100-500
Lima (2020)	Solo NS'	178-336
	Solo NA'	241-319
	Solo LA'	382-917
	Solo NG'	151-294
	Solo LG'	250-547

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Na Tabela 6 foram reunidos alguns estudos para apresentar intervalos de módulo de resiliência de resíduos e misturas de agregados e solos com o intuito de, posteriormente, se poder avaliar o desempenho dos materiais desta pesquisa a partir de materiais investigados anteriormente. Nas duas tabelas, considera-se que são indicados valores de referência como ordem de grandeza típica, que, de forma alguma, podem ser tomados para o projeto de um

pavimento, que pressupõe sempre a realização dos ensaios em cada material selecionado para cada uma das camadas.

Tabela 6 – Módulo de resiliência obtido em estudos de laboratório com resíduos

Autores	Material	Energia de Compactação	MR (MPa)
Bezerra Neto (2004)	Brita (50%) e solo arenoso (50%)	Modificada	207**
	Brita (70%) e solo argiloso (30%)	Modificada	236**
Fernandes (2004)	Resíduo de construção e demolição (RCD)	Intermediária	242*
		Modificada	276*
Leite (2007)	Resíduo de construção e demolição (RCD)	Intermediária	160-440
		Modificada	200-500
Puppala, Hoyos e Potturi (2011)	Concreto asfáltico reciclado	Modificada	180-340
	Concreto asfáltico reciclado estabilizado com cimento (4%)	Modificada	200-515
Arulrajah <i>et al.</i> (2013)	Agregado reciclado de concreto	Modificada	239-357
	Bloco cerâmico reciclado	Modificada	301-319
Arisha <i>et al.</i> (2016)	Resíduo de construção e demolição (RCD) e Tijolos de argila reciclados (RCM)	Modificada	184-317
Norback (2018)	Solo NG' e Brita (de 10% a 90%)		202-443
	Solo LG' e Brita (de 10% a 90%)	Intermediária	181-370
	Solo NA' e Brita (de 10% a 70%)		131-414
Santos <i>et al.</i> (2019)	Agregado de gnaiss (60%) e solo argiloso (40%)	Intermediária	130-247
	Agregado de gnaiss (70%) e solo argiloso (30%)	Modificada	136-264
	Agregado de gnaiss (80%) e solo argiloso (20%)	Modificada	184-364
Jayakody, Gallage e Ramanujam (2019)	Agregado reciclado de concreto	Não informada	233-247
Arshad (2019)	Agregados naturais		584-685
	RAP e RCA em diferentes proporções	Não informada	181-432
	Agregado de concreto reciclado (RCA)		518
Lima (2020)	Solo-Brita	Modificada	313
	Brita	Intermediária	273-397

*Valores de Módulo de Resiliência para tensões $\sigma_3 = 0,070$ MPa e $\sigma_d = 0,140$ MPa

**Valores de Módulo de Resiliência para tensões $\sigma_3 = 0,0050$ MPa e $\sigma_d = 0,300$ MPa

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

2.4 Deformação Permanente (DP)

Quando se aplica um carregamento cíclico em uma estrutura de pavimento, tal como a passagem repetida das rodas dos veículos, ela sofrerá um deslocamento de acordo com a resiliência dos materiais que a compõem. Parte deste deslocamento será recuperável, ou seja, elástico e parte será plástico, ou seja, permanente (DNIT, 2018). Desse modo, quando se estuda a deformação permanente de um material destinado à pavimentação o interesse é avaliar qual a magnitude do deslocamento plástico que a estrutura sofrerá ao longo de sua vida útil e se essa deformação implicará em defeitos significativos (Lima, 2020).

Bernucci *et al.* (2010) indicam que a deformação permanente é um dos principais danos estruturais que ocorrem em um pavimento e destacam que, devido a isto, a avaliação desta característica mecânica nos materiais utilizados nas camadas é importante. Guimarães (2009) também destaca que o projeto de um pavimento necessita de materiais que acumulem pequenas deformações permanentes, com adequado desempenho quanto à resistência e rigidez, visto que materiais com elevadas deformações permanentes podem gerar defeitos como o afundamento de trilha de roda (ATR).

Para estudar a deformação permanente e verificar o desempenho dos materiais utilizados em camadas de pavimentos foram desenvolvidos vários modelos ao longo dos anos, com base nos estudos de solos e agregados submetidos a ensaios triaxiais dinâmicos. O modelo desenvolvido por Guimarães (2009) é o atualmente utilizado na Instrução de Ensaio 179 (DNIT, 2018) para determinação da deformação permanente de solo, brita graduada e materiais não estabilizados quimicamente. O modelo é composto pelas tensões aplicadas e número de ciclos de aplicação de carga, sendo necessário ensaiar no mínimo seis corpos de prova em pares de tensões distintos e espaçados entre si para aplicar a regressão não linear múltipla e obter as constantes do modelo. A deformação permanente é então expressa pela Equação 6:

$$\varepsilon_p(\%) = \psi_1 \left(\frac{\sigma_3}{p_0} \right)^{\psi_2} \left(\frac{\sigma_d}{p_0} \right)^{\psi_3} N^{\psi_4} \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

ε_p (%) - deformação permanente específica;

ψ_1 , ψ_2 , ψ_3 , ψ_4 - parâmetros de regressão;

σ_3 - tensão de confinamento;

σ_d - tensão desvio;

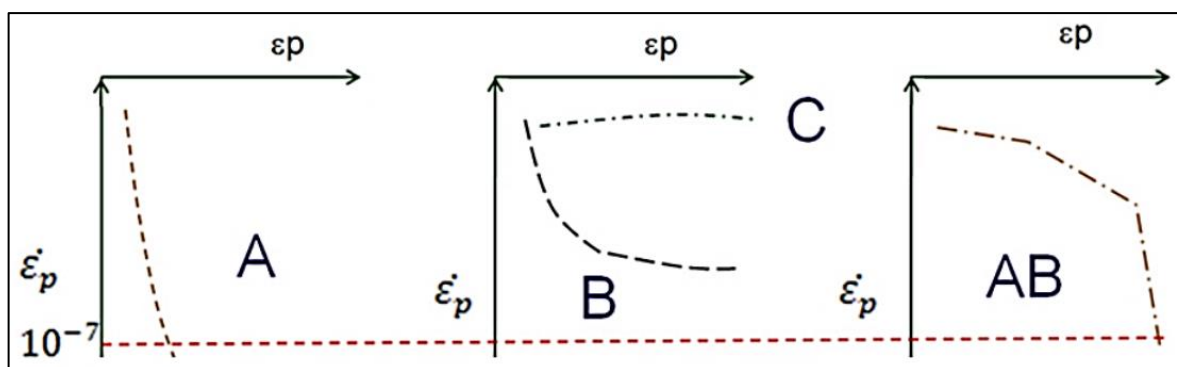
p_0 - tensão de referência (tensão atmosférica);
 N - número de ciclos de aplicação de carga.

Roza (2018) destaca que as limitações nos carregamentos aplicados no topo do subleito ou o controle da deformação permanente em toda a estrutura do pavimento podem ser alguns dos critérios adotados para dimensionamento. Guimarães (2001) *apud* Norback (2018) explica que a investigação do acomodamento ou *shakedown* relaciona-se com a avaliação das deformações permanentes que os materiais utilizados em camadas do pavimento sofrem com a imposição dos carregamentos oriundos do tráfego e serve para verificar se tais deformações resultam em estabilização ou ruptura ao longo do tempo.

Por meio dos ensaios triaxiais dinâmicos para determinação da deformação permanente pode-se avaliar esta tendência ao acomodamento (*shakedown*) através das curvas que relacionam a deformação permanente específica com o número de ciclos impostos ao corpo de prova. Quando o material ensaiado apresenta curvas com tendência ao acomodamento, percebe-se que o comportamento da curva tende a ser horizontal a partir de um determinado número de ciclos de carregamento (Roza, 2018).

Werkmeister (2003) determinou três níveis (A, B, C) de comportamento da deformação permanente a partir da análise do acúmulo de deformação permanente em função da taxa de acréscimo da deformação em razão ao número de ciclo de carga corresponde ao valor total. Guimarães (2009) identificou em sua tese outro nível de comportamento relacionado à solos tropicais, denominado de AB. A Figura 7 exemplifica os quatro níveis de comportamento quanto à deformação permanente.

Figura 7 – Níveis de comportamento quanto à deformação permanente



Fonte: Guimarães (2009) *apud* Lima (2016)

2.5 Métodos de Projeto de Pavimentos Flexíveis

A pavimentação é um fator de importância social, econômica e política que demanda a execução de projetos adequados e de qualidade que possam proporcionar segurança aos usuários até que seja atingida a vida útil do pavimento. A vida útil relaciona-se diretamente com o tipo de pavimento escolhido e prever a vida útil é um procedimento difícil, visto que uma elevada quantidade de fatores influencia no desempenho da estrutura, tais como: carga atuante (sua frequência e distribuição ao longo das faixas horárias); condições climáticas, (faixa de temperatura e a incidência pluviométrica na região); características do subleito e características dos materiais empregados e sua suscetibilidade às ações climáticas e do tráfego.

Para fins de projeto sempre devem ser ponderados os custos de implantação e custos de manutenção ao longo da vida útil. Também de acordo com o tipo de revestimento escolhido é que se pode realizar o dimensionamento das demais camadas, uma vez que existem metodologias específicas para os pavimentos rígidos e para os pavimentos flexíveis.

2.5.1 Método do DNER

O Método de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis utilizado até então no Brasil, é da década de 1960 e passou por revisão na década de 1980, com alguns pequenos ajustes em anos posteriores tais como a introdução do eixo triplo para cálculo do número N entre outros. Este método foi introduzido no país pelo Eng. Murillo Lopes de Souza e utiliza como base para o dimensionamento de pavimentos asfálticos o método apresentado pela USACE e dados obtidos da pista experimental da AASHTO, do fim da década de 1950 (DNIT, 2006).

Os resultados obtidos na Pista Experimental da AASHTO inspiraram a criação dos coeficientes de equivalência estrutural dos materiais integrantes do pavimento. Estes coeficientes são utilizados na ponderação das contribuições estruturais de cada camada da estrutura do pavimento, considerando o conjunto formado por elas, de forma a definir suas espessuras individuais (Reforço do Subleito, Sub-base, Base e Revestimento). O método tem como fundamento a utilização do resultado do ensaio de Índice de Suporte Califórnia (CBR) das amostras de solos do subleito e das camadas granulares do futuro pavimento e na utilização do Número N, número de repetições do eixo padrão durante a vida útil de projeto (DAROUS, 2003).

2.5.2 Método Mecanístico-Empírico (*Software* MeDiNa)

O elevado grau de empirismo do método utilizado nos últimos anos para dimensionamento do pavimento rodoviário proporciona previsões fracas da vida útil e do desempenho das estruturas do pavimento. Devido a estes fatores, e por meio de uma sequência de pesquisas, foi desenvolvido o Método de Dimensionamento Nacional através de uma parceria entre o DNIT, a COPPE/UFRJ e a Rede Temática de Asfaltos. Este novo método significa uma atualização de alguns métodos de dimensionamento não oficiais já utilizados no Brasil, nas universidades e por consultores, e evoluiu mais especificamente a partir do programa SISPAV desenvolvido por Franco (2007). O novo método do DNIT é um *software* para dimensionamento de pavimentos asfálticos denominado MeDiNa, que também inclui um método de retroanálise (BackMeDiNa) que permite avaliar a estrutura de um pavimento que está em serviço e assim poder fazer o projeto de reforço nas mesmas bases conceituais de um pavimento novo. Quando se faz o dimensionamento, o programa gera um relatório com todos os dados de entrada e os resultados obtidos para porcentagem de área trincada e afundamento de trilha de rodas previstas para o final do período de projeto indicado pelo projetista (ROZA, 2018).

O MeDiNa faz a verificação e o dimensionamento mecanístico-empírico de estruturas de pavimentos fazendo uso da rotina de Análise Elástica de Múltiplas Camadas (AEMC). A AEMC calcula tensões e deformações sob carregamento de rodas do tipo eixo padrão rodoviário e emprega modelos de fadiga e deformação permanente para adequar as espessuras das camadas em estruturas de pavimentos (FRANCO e MOTTA, 2018).

O programa representa uma importante ferramenta no dimensionamento de pavimentos mais duráveis e eficientes, visto que os métodos mais antigos de dimensionamento de pavimentos flexíveis não consideram, por exemplo, tecnologias de revestimentos mais avançadas, como asfaltos-borracha e asfaltos modificados por polímeros, e uma série de outros fatores. O novo sistema de dimensionamento incorpora várias melhorias necessárias e mais adequadas para o uso nacional, bem como ratifica e difunde a mecânica dos pavimentos no contexto do dimensionamento brasileiro, extrapolando as fronteiras das universidades brasileiras.

Para entender uma das motivações da modificação do método de dimensionamento do DNIT, apresenta-se a pesquisa mais recente da Confederação Nacional do Transporte (CNT) que aborda o diagnóstico das condições das rodovias pavimentadas brasileiras; o relatório completo está disponível em: <https://www.cnt.org.br/>. As metodologias utilizadas pela CNT

para os levantamentos baseiam-se em normas do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e em outras referências técnicas tais como: Manual para Identificação de Defeitos de Revestimentos Asfálticos de Pavimentos (MID) e o *Highway Capacity Manual - HCM* (Manual de Capacidade Rodoviária, em tradução livre). O produto de toda a análise apresenta-se sob forma qualitativa e divide-se em categorias, ou seja, as rodovias são classificadas como Ótimas, Boas, Regulares, Ruins ou Péssimas.

A pesquisa realizada no ano de 2019 mostrou que a qualidade das rodovias brasileiras teve piora nas condições das características observadas. O estado geral teve agravamento de 2% em relação ao ano anterior, subindo de 57% para 59% da extensão dos trechos avaliados com comportamento deficiente. Da extensão de rodovias avaliadas, o pavimento apresentou-se com 52,4% de problemas, a sinalização com 48,1% e a geometria da via com 76,3% de problemas, todos os índices com aumento em relação a avaliação de 2018 que foi 50,9%, 44,7% e 75,7% com problemas respectivamente (CNT, 2019). Do relatório desenvolvido pelo CNT no ano de 2019 destacam-se a seguir dados sobre recursos empregados na manutenção, conservação, reconstrução e restauração dos pavimentos no estado do Rio Grande do Norte, tendo em vista que a presente pesquisa se realiza nesse Estado.

A Figura 8 destaca os principais pontos críticos da malha pavimentada do Estado do Rio Grande do Norte. O Estado apresenta maior densidade de pontos críticos nas regiões do Médio e do Alto Oeste, do Vale do Assú e do Seridó e o defeito mais recorrente são os buracos (panelas) com grandes diâmetros.

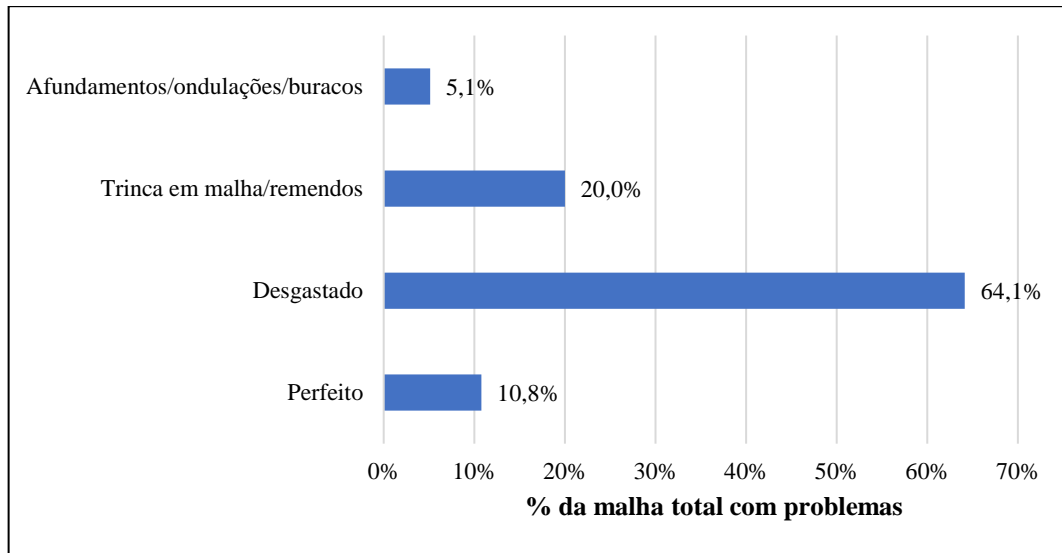
Figura 8 – Localização e Exemplos de Pontos Críticos dos pavimentos do Estado do Rio Grande do Norte



Fonte: CNT (2019)

Dentre os defeitos mais recorrentes nos pavimentos das rodovias do Estado do Rio Grande do Norte temos inicialmente o desgaste, seguido pela ocorrência de trincas interligadas (malha) / remendos e por último os afundamentos / ondulações / buracos, conforme demonstrado na Figura 9.

Figura 9 - Percentuais de defeitos verificados nos pavimentos das rodovias do RN



Fonte: CNT (2019)

Com base em tais dados percebe-se alguns motivos para a mudança no método de dimensionamento dos pavimentos. A malha rodoviária do estado do Rio Grande do Norte foi dimensionada com base na antiga metodologia do DNER, que faz uso do CBR, e boa parte dos pavimentos do Estado apresentam significativos defeitos, que acarretam maiores gastos com manutenção ao longo da vida útil dos trechos.

Com a recente modificação da metodologia de dimensionamento para as rodovias federais, espera-se também que órgãos estaduais e municipais apresentem normativas com base nas novas diretrizes e passem a utilizá-las em seus projetos, obtendo melhor representatividade dos parâmetros dos materiais aplicados nas camadas dos pavimentos e projetando vias mais duráveis e resistentes às ações do tráfego e do clima ao longo do tempo.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais e métodos utilizados para a caracterização física e mecânica do solo e das misturas selecionadas para esta pesquisa. Os ensaios desenvolvidos nesta pesquisa ocorreram em dois locais: no Laboratório de Mecânica dos Solos do IFRN – Campus Natal Central e no Setor de Pavimentos do Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ.

Os ensaios geotécnicos usuais, que objetivam classificar e caracterizar os solos, e os ensaios de caracterização dos agregados já haviam sido executados em pesquisas anteriores com os materiais utilizados nesta pesquisa. Desse modo, tais ensaios não terão seus procedimentos de execução descritos aqui, somente serão referenciados. Buscar-se-á ainda apresentar um histórico de caracterização do RCD da usina Duarte ao longo de anos de pesquisa.

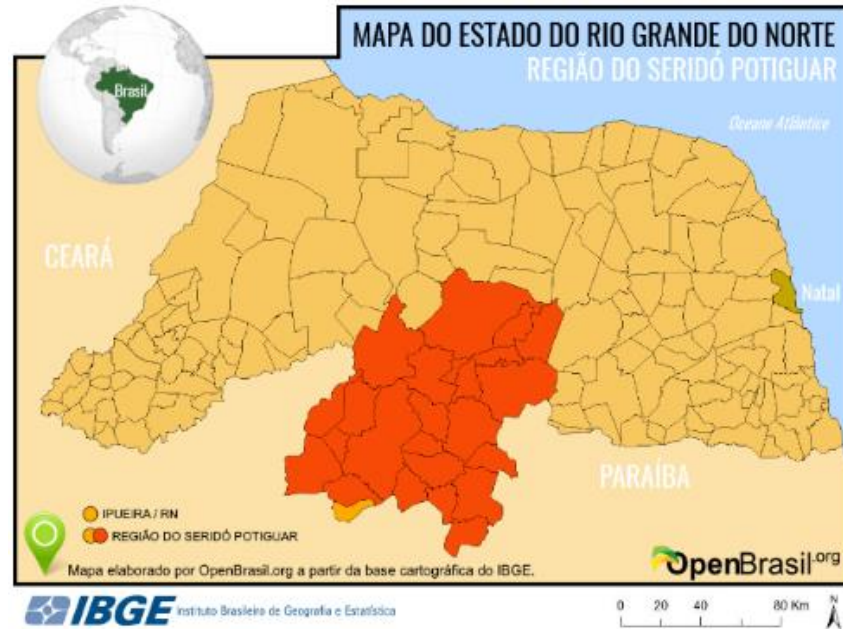
3.1 Materiais

3.1.1 Solo

O solo foi coletado no município de Ipueira (Figura 10), no interior do estado do Rio Grande do Norte, situado na região do Seridó a uma latitude de 6°49'13" sul e a uma longitude 37°12'16" oeste.

A escolha desta jazida justifica-se principalmente pela facilidade logística e devido à necessidade de verificação de sua potencialidade para emprego em obras de pavimentação pelos novos critérios. As amostras de solo coletadas foram acondicionadas em 10 sacos plásticos e a massa aproximada de cada amostra foi de 20 kg, totalizando 200 kg de solo. Após a coleta, o solo foi transportado para o Laboratório de Mecânica dos Solos (IFRN) e as amostras foram estocadas no Laboratório de Pavimentação (IFRN). A Figura 11 destaca a jazida onde foi realizada a coleta do solo.

Figura 10 – Mapa do Estado do Rio Grande do Norte com destaque para região do Seridó e a cidade de Ipueira



Fonte: OpenBrasil.org (2021)

Figura 11 – Jazida do solo no município de Ipueira/RN



Fonte: Barreto (2020)

3.1.1.1 Resultados da Caracterização do Solo

A Tabela 7 exemplifica os ensaios de caracterização física desenvolvidos, as normas utilizadas para execução destes e, assim como nas próximas tabelas, são citados os respectivos autores que caracterizaram o material.

Tabela 7 – Ensaios de caracterização física do solo

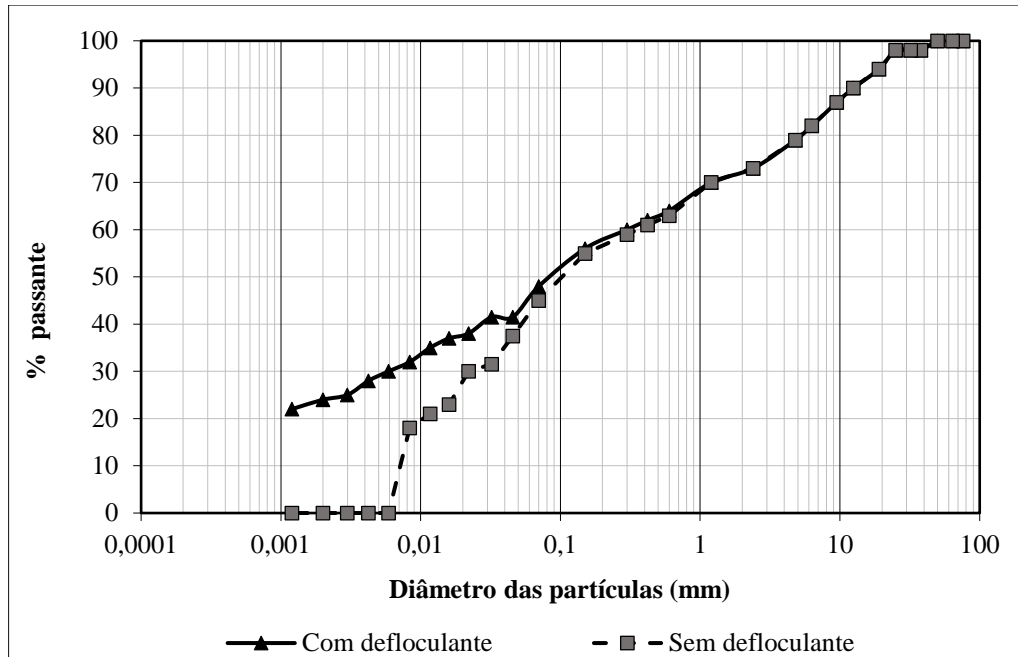
Caracterização	Norma	Ensaio	Autor
	NBR 7181/1984	Análise Granulométrica do solo	
Física	NBR 6508/1984	Massa específica dos grãos do solo	Barreto (2020)
	NBR 7180/1984	Limite de plasticidade	
	NBR 6459/1984	Limite de liquidez	

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Classificação Granulométrica, Massa específica e Limites de Atterberg

O solo selecionado para a pesquisa foi o mesmo utilizado por Barreto (2020) em pesquisa anterior e assim a avaliação da composição granulométrica já havia sido realizada pelo referido autor utilizando os procedimentos de peneiramento e sedimentação. Os ensaios de sedimentação foram feitos com a utilização de defloculante (de acordo com as orientações normativas) e sem defloculante (não possui orientação normativa). A determinação da massa específica do solo também já havia sido realizada para os grãos passantes na peneira de 4,8 mm. Barreto (2020) também avaliou os Limites de Atterberg para verificar o comportamento do solo ao ser submetido a um percentual crescente de umidade executando o ensaio de Limite de Liquidez (LL) e o ensaio de avaliação do Limite de Plasticidade (LP). Assim, os resultados destes ensaios de caracterização do solo estão apresentados na Figura 12 e na Tabela 8.

Figura 12 – Curva granulométrica do solo de Ipueira



Fonte: Barreto (2020)

Tabela 8 – Índices de caracterização do solo

Parâmetros	CNU	CC	γ_s (g/cm ³)	LL (%)	LP (%)	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					

Fonte: Barreto (2020)

A classificação do solo, de acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), considera inicialmente se a porcentagem que passa na peneira n° 200 (P#200) é superior ou inferior a 50%. Para ambas as condições, com e sem defloculante, a porcentagem P#200 é menor que 50%. Em seguida, avalia-se a porcentagem passante na peneira n° 4 (P#4), e neste critério para ambas as condições a P#4 foi maior que 50%. Desse modo, com base nestes parâmetros e no IP determinado, o solo pode ser classificado como uma Areia Siltosa (SM).

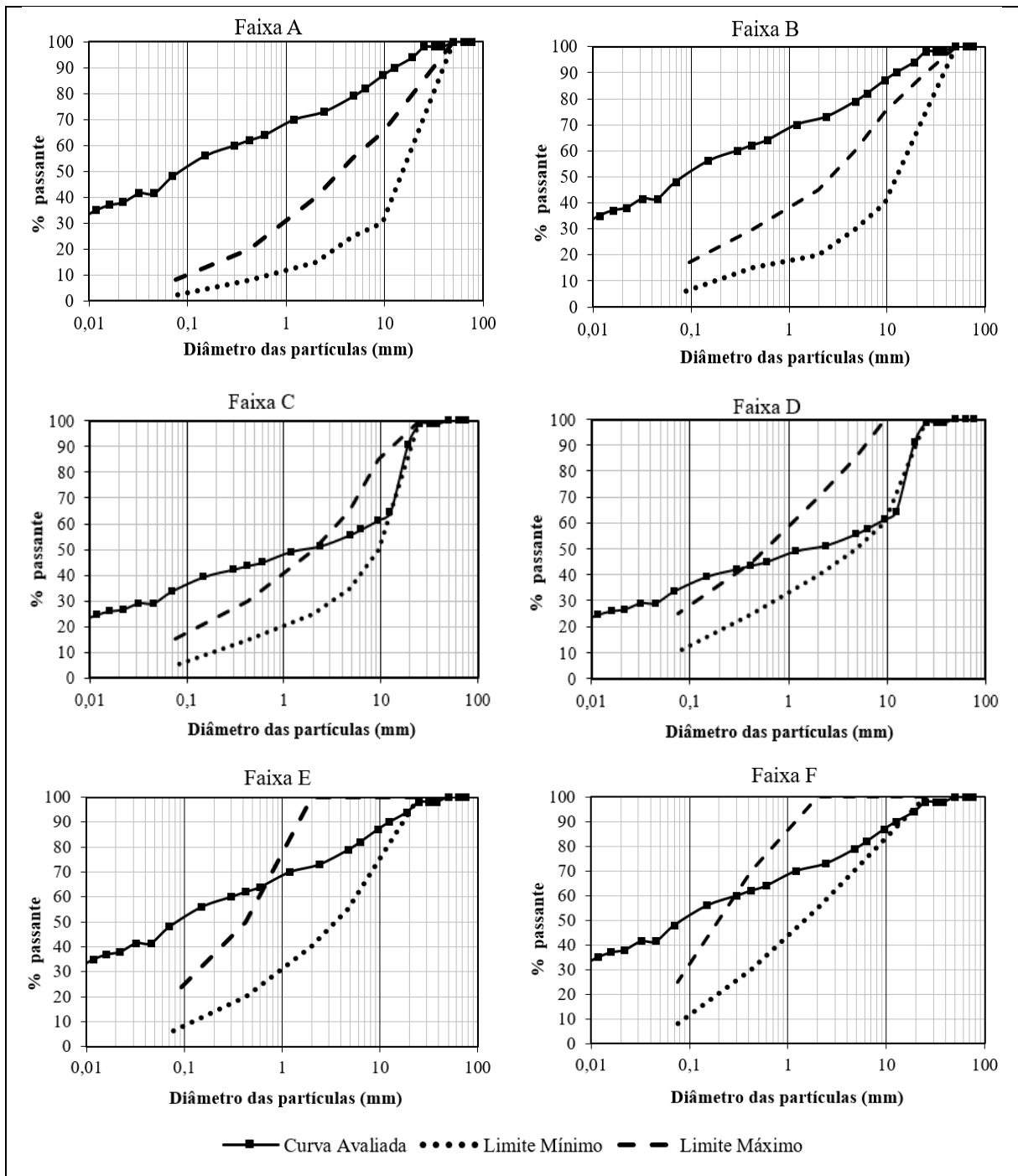
Na classificação do *Transportation Research Board* (TRB) verifica-se se a porcentagem que passa na peneira n° 200 (P#200) é superior ou inferior a 35%. Como para

ambas as condições de ensaio $P\#200 > 35\%$ foram avaliados somente os LL e IP e a amostra foi classificada como do tipo “A-4”.

Através das curvas granulométricas, percebeu-se que o solo apresentou alteração no comportamento da curva granulométrica quando foi utilizado o defloculante e, como relatado por Barreto (2020), a utilização deste tornou maior a quantidade de frações finas da amostra. Também é notório que não foi viável definir o coeficiente de não uniformidade (CNU) e o coeficiente de curvatura (CC) na condição de ensaio com defloculante devido ao D_{10} não ter sido determinado. Para a curva granulométrica sem defloculante os coeficientes foram definidos e o material caracterizou-se como “mal graduado”.

A título de verificação e com base nos resultados apresentados por Barreto (2020) foi feita uma análise da curva granulométrica do solo puro como se fosse para uso em base, nas faixas de projeto que constam na ES 141 (DNIT, 2010), porém, o solo puro não se enquadrava em nenhuma faixa de projeto, como se pode observar na Figura 13, o que corrobora com a necessidade de correção / estabilização granulométrica, considerando os critérios tradicionais de avaliação e também os volumes de tráfego típicos de rodovias federais.

Figura 13 – Curva granulométrica do solo comparada com as seis faixas de projeto sugeridas pelo DNIT para utilização como base estabilizada granulometricamente



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

O valor de LL foi superior ao limite imposto pela ES 141 (DNIT, 2010), bem como o resultado da análise granulométrica não mostrou que o solo seria apto para o uso em camada de base de pavimento. Porém, entende-se que são necessários outros ensaios laboratoriais, tais

como: equivalente de areia, ensaios de compactação, CBR, módulo de resiliência e deformação permanente, para avaliar o comportamento geral deste material.

Índice de Suporte Califórnia e Expansão

A pesquisa desenvolvida por Barreto (2020) que avaliou solos e misturas de solos com RCD para uso em obras de pavimentação contemplou ensaios de Índice de Suporte Califórnia (CBR) e expansão do solo oriundo da cidade de Ipueira. A Tabela 9 apresenta os resultados de CBR e Expansão para as três energias de compactação: normal, intermediária e modificada. Analisando os resultados e a ES 141 (DNIT, 2010) percebe-se que o solo na condição pura apresenta valores de CBR e expansão que o tornam inapto para uso em camadas de base. De acordo com a ES 139 (DNIT, 2010) o solo poderá ser utilizado em camadas de sub-base de pavimentos caso seja compactado na energia modificada, alcançando CBR maior que 20%.

Tabela 9 – Resultados de CBR e Expansão do solo

Energia	CBR (%)	Expansão
Normal	6,0	0,17
Intermediária	6,0	0,11
Modificada	24,0	0,10

Fonte: Adaptado de Barreto (2020)

3.1.2 Agregados de RCD e Brita 1

Os agregados de resíduo de construção e demolição de obras (RCD) foram disponibilizados pela Duarte Usina de Reciclagem de RCC LTDA, localizada na cidade de São José de Mipibu – RN. Esta empresa trabalha com RCD desde 2010, coletando material de construção e demolição de obras, processando e comercializando, dentre vários usos, para obras de pavimentação em locais com baixo tráfego.

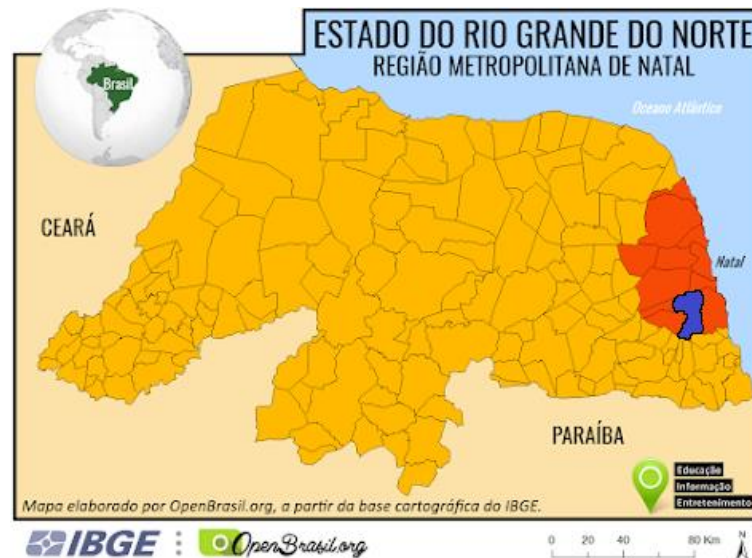
A empresa Duarte forneceu para esta pesquisa agregados reciclados de fração granulométrica equivalente a classificação comercial de brita 1. O procedimento para obtenção de agregados reciclados de RCD na Usina Duarte ocorre com as seguintes etapas.

1. Descarregamento do RCD em local apropriado;
2. Triagem manual do RCD, onde é feita a separação dos resíduos de papéis, gesso, plásticos, madeira e pedaços grandes de metais;

3. Carregamento dos resíduos na caçamba do caminhão e lançamento dos resíduos no britador;
4. Retirada de materiais metálicos, que não foram encontrados na triagem manual, através de eletroímãs antes do britador;
5. Britagem do RCD e movimentação dos agregados sobre esteiras;
6. Transporte dos agregados de RCD;
7. Deposição dos agregados produzidos e realização de uma segunda triagem manual;
8. Transporte dos agregados de RCD para pilha de armazenagem.

Na Figura 14 apresenta-se a localização da cidade de São José de Mipibu dentro da zona metropolitana da capital Natal. A Figura 15 mostra a área onde ocorre a primeira triagem manual, assim que o material chega, e o britador utilizado pela usina Duarte.

Figura 14 – Região metropolitana de Natal com destaque para localização do município de São José de Mipibu



Fonte: Adaptado de OpenBrasil.org (2021)

Figura 15 – a) Local destinado ao depósito do material que chega na usina; b) Britador

(a)



(b)



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Na usina foram coletados da pilha de armazenagem um total de sete sacos com aproximadamente 50 kg de RCD cada, totalizando assim 350 kg. É importante destacar que os agregados de RCD estão sujeitos à sazonalidade, ou seja, as características dos agregados relacionam-se com o tipo de resíduo demolido e coletado na época da pesquisa e tal tipologia não é constante ao longo do tempo. Assim, a caracterização apresentada a seguir informa o comportamento característico médio das amostras de RCD avaliadas ao longo dos anos. A coleta para a presente pesquisa foi feita no dia 11 de fevereiro de 2020.

Para fins de comparação do desempenho das misturas de Solo-RCD com misturas de Solo-Brita foram adquiridos 80 kg de brita granítica número 1 (19 mm), na RECAL Material de Construção localizada na cidade de Parnamirim – RN.

3.1.2.1 Caracterização dos agregados de RCD e Brita 1

A Tabela 10 lista os ensaios desenvolvidos, as normas utilizadas para execução destes e os autores que caracterizaram os agregados nas suas respectivas pesquisas, realizadas na UFRN e no IFRN, e que também foram utilizados na presente pesquisa.

Tabela 10 – Ensaio de caracterização física, química e mineralógica dos agregados

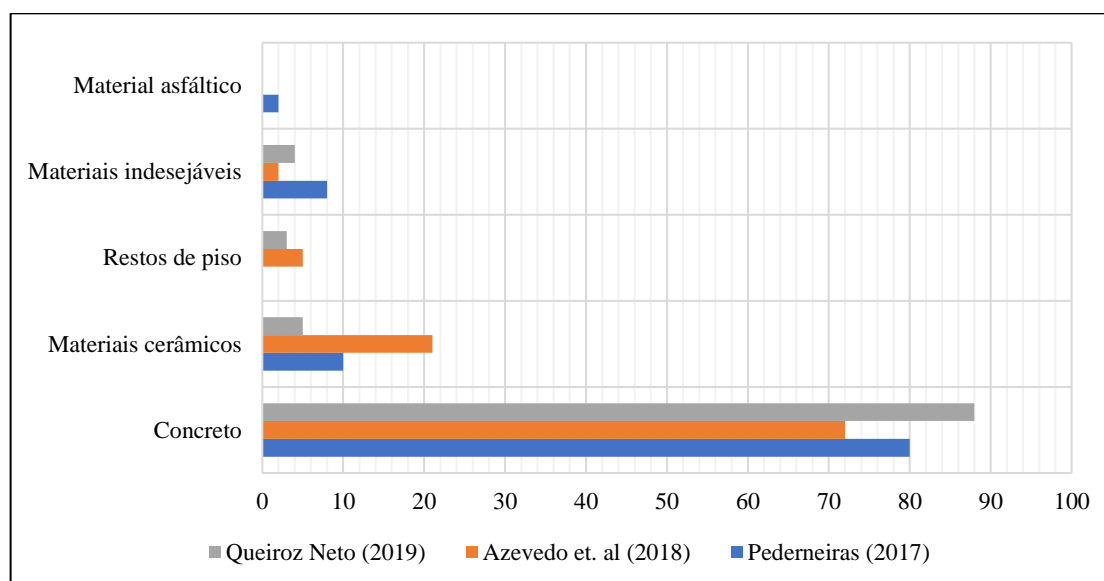
Ensaio	Norma	Autor
Análise Granulométrica dos agregados	NBR NM 248/2003; DNER-ME 083-98	Barreto (2020); Oliveira (2020); Araújo (2020); Queiroz Neto (2019); Sena Neto (2018); Pederneiras (2017)
Massa específica dos agregados graúdos	DNER – ME 081/98	Barreto (2020); Oliveira (2020); Araújo (2020); Queiroz Neto (2019); Sena Neto (2018); Pederneiras (2017)
Absorção dos agregados	DNER – ME 081/98	Barreto (2020); Oliveira (2020); Araújo (2020); Queiroz Neto (2019); Sena Neto (2018); Pederneiras (2017)
Índice de forma	DNER-ME 086/94	Barreto (2020); Oliveira (2020); Araújo (2020); Queiroz Neto (2019); Sena Neto (2018); Pederneiras (2017)
Abrasão “Los Angeles”	DNER-ME 035/98	Barreto (2020); Oliveira (2020); Araújo (2020); Queiroz Neto (2019); Sena Neto (2018); Pederneiras (2017)
Gravimetria dos agregados de RCD	NBR 15116/2004 (Anexo A)	Queiroz Neto (2019); Azevedo <i>et al.</i> (2018); Pederneiras (2017)
Difração de Raio X (DRX) e Fluorescência de Raios X (FRX)	-	Queiroz Neto (2019); Sena Neto (2018); Pederneiras (2017)

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Composição dos agregados de RCD

Por meio da separação manual dos componentes dos agregados reciclados é possível determinar a natureza dos materiais que constituem o resíduo e seu respectivo percentual. Este tipo de procedimento encontra-se disposto na NBR 15116 - Anexo A e tem carácter de cunho unicamente quantitativo. Tal processo já havia sido realizado em anos anteriores por Pederneiras (2017), Azevedo *et al.* (2018) e Queiroz Neto (2019) em pesquisas com agregados de mesma origem, para monitoramento e controle dos agregados produzidos na usina. A Figura 16 exemplifica os valores percentuais de distintos materiais na composição do RCD da usina Duarte desde 2017 até 2019.

Figura 16 – Composição do RCD da usina Duarte em amostras coletadas em três datas entre 2017 e 2019



Fonte: Adaptado de Pederneiras (2017) Azevedo *et al.* (2018) e Queiroz Neto (2019)

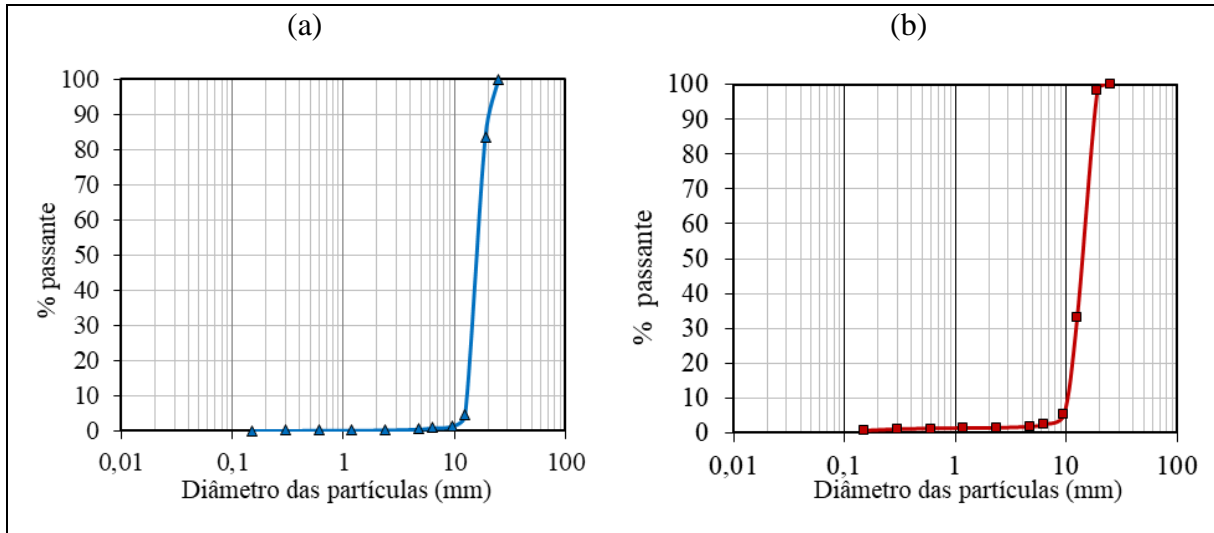
Através destas informações analisa-se que, em média, o RCD da usina Duarte é composto por cerca de 80% de concreto, 12% de materiais cerâmicos, 4,68% de materiais indesejáveis, 2,68% de restos de piso e 0,67% de materiais asfálticos. Verifica-se ainda que apesar de apresentar certo percentual de material oriundo de matriz cerâmica, o que torna os agregados mais porosos, com maior absorção e menor resistência, a matriz predominante é composta por fragmentos à base de cimento Portland. Assim, de acordo com a NBR 15116 (2004), os agregados de RCD se classificam como agregado de resíduo misto (ARM), visto que foram obtidos por meio do beneficiamento de resíduo pertencente à classe A e sua composição na fração graúda apresenta menos de 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland e rochas.

Granulometria, Massa específica do agregado graúdo e Absorção

A análise granulométrica dos agregados de RCD e Brita 1 foi realizada por Araújo (2020) e Oliveira (2020), respectivamente. A Figura 17 contempla as curvas granulométricas elaboradas pelos referidos autores. Percebe-se que ambas as curvas se apresentam com graduação uniforme, ou seja, a maioria dos grãos possui, aproximadamente, a mesma dimensão, em torno dos 19 mm, e assim as curvas se apresentam com alta declividade, tornando-se quase

vertical. Tal semelhança granulométrica entre os agregados foi pensada com o intuito de tornar as misturas elaboradas com características físicas mais próximas.

Figura 17 - Curvas granulométricas dos agregados de brita 1 (a) e dos agregados de RCD (b)



Fonte: Oliveira (2020) e Araújo (2020)

Os ensaios de absorção de água e massa específica aparente dos agregados de RCD oriundos da usina Duarte foram executados por diversos autores desde o ano de 2017 até 2020. A Tabela 11 mostra os resultados obtidos pelos autores nestes ensaios.

Tabela 11 – Resultados dos ensaios de caracterização física dos agregados de RCD

Ensaio	Autor	Resultados
Massa específica dos agregados graúdos de RCD	Barreto (2020)	2,10 g/cm ³
	Araújo (2020)	2,56 g/cm ³
	Queiroz Neto (2019)	2,19 g/cm ³
	Sena Neto (2018)	2,36 g/cm ³
	Pederneiras (2017)	2,48 g/cm ³
Absorção dos agregados RCD	Barreto (2020)	8,05 %
	Araújo (2020)	8,31 %
	Queiroz Neto (2019)	6,17 %
	Sena Neto (2018)	2,00 %
	Pederneiras (2017)	8,00 %

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Verifica-se que a massa específica dos agregados graúdos de RCD ficou em torno de $2,34 \text{ g/cm}^3$ e a absorção destes com média de $6,50 \%$. A absorção nesta faixa é razoável e se encontra dentro da variação aceitável de acordo com os valores da literatura para os resíduos de construção e demolição. Pederneiras (2017) associa a taxa de absorção de água do RCD obtida em seu trabalho com a possível presença de uma camada de argamassa antiga aderida às partículas de agregados reciclados que elevou a porosidade destes e assim foram obtidos valores mais elevados quando comparados aos agregados convencionais. Sena Neto (2018) afirma que em suas amostras de agregados de RCD havia maior absorção de água e menor densidade por parte do material reciclado, quando comparado aos agregados naturais também ensaiados na pesquisa, ratificando tais informações com base na existência de uma matriz menos densa e com maior índice de poros nos agregados reciclados.

Os ensaios de absorção de água e massa específica aparente dos agregados de brita 1 utilizados nesta pesquisa foram investigados por Oliveira (2020) anteriormente. A Tabela 12 expõe os resultados obtidos. Diferentemente do comportamento verificado nos agregados reciclados, os agregados de brita 1 analisados por Oliveira (2020) apresentaram massa específica de $2,66 \text{ g/cm}^3$ e absorção de $0,3\%$, reafirmando as baixas absorções obtidas em agregados naturais graníticos britados expostas na literatura.

Tabela 12 - Resultados dos ensaios de caracterização física dos agregados de brita 1

Ensaio	Autor	Resultados
Massa específica dos agregados graúdos de brita 1	Oliveira (2020)	$2,66 \text{ g/cm}^3$
Absorção dos agregados brita 1		$0,3 \%$

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Índice de forma e Abrasão Los Angeles

O ensaio de índice de forma visa analisar a qualidade de um agregado graúdo em relação ao formato dos seus grãos quando submetidos a certo esforço mecânico padronizado. Neste tipo de avaliação os agregados com partículas cúbicas apresentam índices próximos a $1,0$ e os agregados com partículas mais lamelares apresentam índice mais próximo de 0 .

O ensaio de Abrasão *Los Angeles* tem como objetivo mensurar o desgaste sofrido pelos agregados ao serem inseridos no maquinário denominado “Los Angeles” juntamente com uma carga abrasiva e girados no tambor metálico por vários ciclos.

A Tabela 13 mostra os valores obtidos para o índice de forma e o valor de abrasão nos estudos dos cinco autores citados que avaliaram RCD da mesma empresa coletora.

Tabela 13 – Resultados dos ensaios de índice de forma e abrasão para os agregados de RCD

Ensaio	Autor	Resultados	Ensaio	Autor	Resultados
Índice de Forma	Barreto (2020)	0,92	Abrasão Los Angeles	Barreto (2020)	50 %
	Araújo (2020)	0,89		Araújo (2020)	44 %
	Queiroz Neto (2019)	0,87		Queiroz Neto (2019)	35 %
	Sena Neto (2018)	0,84		Sena Neto (2018)	49 %
	Pederneiras (2017)	0,70		Pederneiras (2017)	49 %

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Na execução do ensaio de forma com a brita 1, Oliveira (2020) menciona que foi realizada uma adaptação para encontrar este índice, tendo em vista que a granulometria da brita 1 apresentou uma fração pequena (com quantidade abaixo de 2,0 kg) em uma das faixas requeridas pela normativa. Assim, o ensaio foi realizado apenas com duas faixas granulométricas e o fator n da equação presente em norma para cálculo do índice de forma, foi 2 ao invés de 3.

A Tabela 14 mostra os valores obtidos para o índice de forma e o valor de abrasão para os agregados de brita 1 estudados pelo referido autor. Verifica-se que os valores de abrasão encontrados pelos diferentes autores para os agregados de RCD são muito superiores ao valor de abrasão dos agregados naturais graníticos.

Tabela 14 - Resultados dos ensaios de índice de forma e abrasão para os agregados de brita 1

Ensaio	Resultados	Autor
Índice de Forma	0,92	Oliveira (2020)
Abrasão Los Angeles	19 %	

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Análises químicas e mineralógicas do RCD

A composição química dos agregados pode ser obtida através do ensaio de fluorescência de raios X (FRX). Esta análise foi realizada por Pederneiras (2017), Sena Neto (2018) e Queiroz Neto (2019) para as suas pesquisas com resíduos de construção e demolição de obras. A partir do FRX, Pederneiras (2017) verificou que os maiores teores de óxidos encontrados foram o dióxido de silício (SiO_2), óxido de cálcio (CaO), óxido de alumínio (Al_2O_3) e óxido de ferro (Fe_2O_3), em porcentagens distintas. Sena Neto (2018) destaca que os teores mais elevados na amostra de RCD analisada foram os de dióxido de silício (SiO_2), óxido de ferro (Fe_2O_3) e óxido de alumínio (Al_2O_3) e associa o elevado teor de ferro, alumínio e sílica à presença dos materiais cerâmicos na composição dos resíduos. Queiroz Neto (2019) ressalta que seus resultados apontaram a presença em comum de alguns óxidos com teores semelhantes, sendo o maior teor o óxido de cálcio (CaO), seguidos do dióxido de silício (SiO_2), óxido de ferro (Fe_2O_3) e óxido de alumínio (Al_2O_3). A partir destes resultados é possível detectar a quantidade de quartzo e demais óxidos bem como verificar a existente de atividade pozolânica presentes nos resíduos, por exemplo.

Os resultados de todos os ensaios realizados pelos referidos autores estão dispostos na Tabela 15 a seguir. Entende-se a variabilidade relativa dos resultados tendo em vista que, como já mencionado, os resíduos variaram com as datas das coletas. Porém, reitera-se que as caracterizações aqui apresentadas têm o intuito de relatar o histórico das características dos agregados de resíduos ao longo dos anos.

Tabela 15 – Resultados da composição química do RCD da Duarte

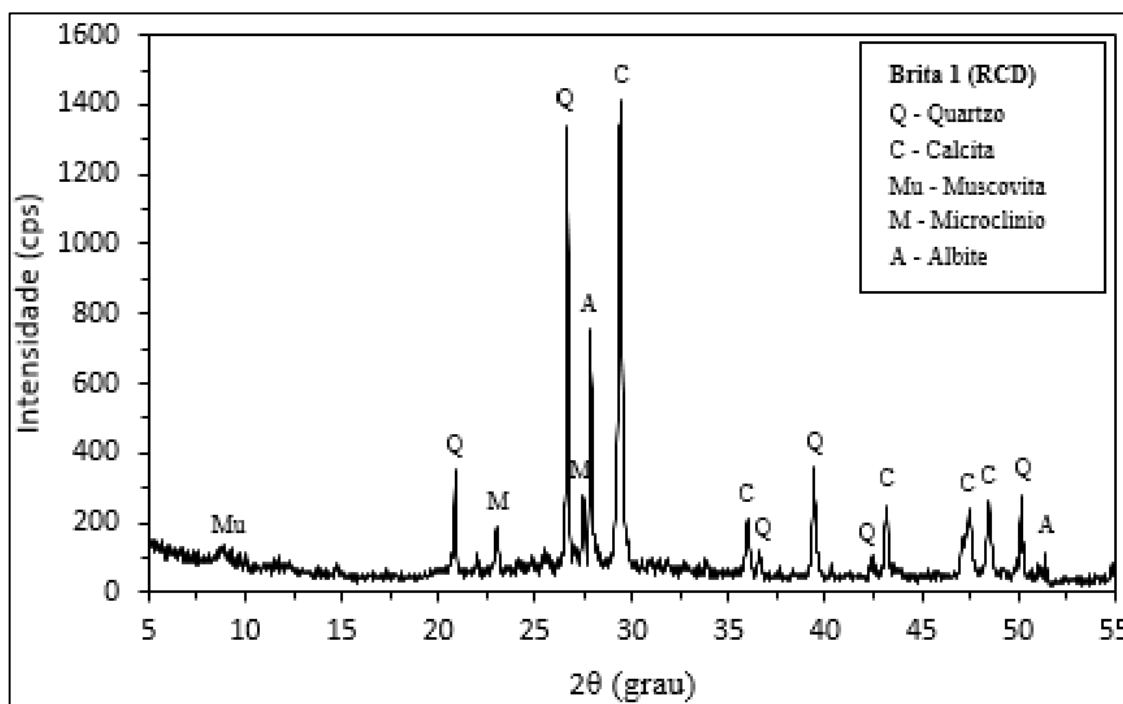
Fonte	Composição Química (%)									
	SiO_2	CaO	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	SO_3	K_2O	TiO_2	SrO	MnO
Pederneiras (2017)	40,40	29,80	10,18	8,90	0,77	5,10	1,60	0,96	1,20	-
Sena Neto (2018)	39,30	29,70	20,00	3,70	2,10	1,40	1,31	1,14	0,70	0,20
Queiroz Neto (2019)	24,86	49,30	8,25	9,65	-	2,89	1,34	-	-	-

Fonte: Barreto (2020)

Queiroz Neto (2019) ainda realizou em sua pesquisa uma análise de Difração de Raios X (DRX) com o intuito de realizar a caracterização cristalográfica dos agregados de RCD. O

autor percebeu que a composição mineralógica é complexa em decorrência da elevada variabilidade cristalina e amorfa dos materiais constituintes: concreto, argamassa e cerâmica. Os principais componentes expostos no DRX são: o quartzo [SiO₂], calcita [CaCO₃], gipsita [Ca(SO₄)(H₂O)₂], Muscovita [KAl₂(Si₃Al)O₁₀(OH)₂], Microclinio [KAlSi₃O₈] e Albite [Na(AlSi₃O₈)] (Figura 18).

Figura 18 – Resultado do ensaio de DRX no RCD coletado em 2019



Fonte: Queiroz Neto (2019)

3.1.3 Misturas de Solo-Brita e Solo-RCD

Na presente pesquisa foram confeccionadas misturas de Solo-Brita e Solo-RCD utilizando o solo natural e os agregados nos percentuais de 15%, 30%, 45% e 60%, em massa, em relação à porcentagem total das misturas. Optou-se por trabalhar com estes percentuais visto que em pesquisa anterior Barreto (2020) estudou o mesmo solo com inserção dos agregados nas proporções de 0%, 25%, 50%, 75% e 100%, assim seria possível obter o comportamento das misturas em uma longa faixa de variação percentual de agregados de RCD.

A partir da definição dos percentuais de solo e agregado foi feito o preparo das misturas para posterior execução dos ensaios de caracterização mecânica. A Tabela 16 apresenta as nomenclaturas das misturas, bem como a estimativa do número de ensaios de caracterização mecânica a serem realizados.

Tabela 16 – Nomenclatura das misturas confeccionadas e quantitativo de ensaios previstos

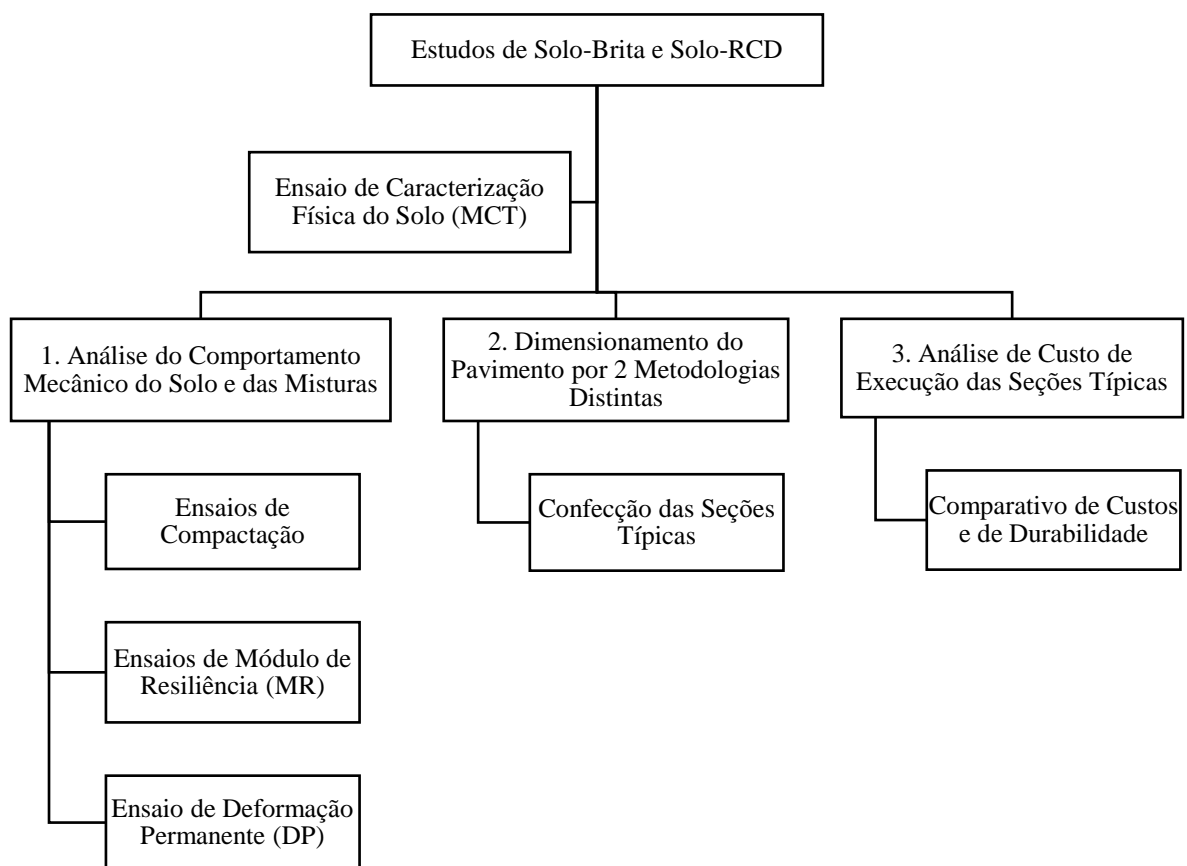
Mistura	% de Solo em massa	% de Agregado em massa	Nomenclatura Utilizada	Estimativa de amostras ensaiadas na Caracterização Mecânica		
				Compactação Proctor	MR	DP
Solo puro	100%	0%	SOLO PURO	01	03	-
Solo-Brita	85%	15%	SB 85-15	01	03	-
	70%	30%	SB 70-30	01	03	-
	55%	45%	SB 55-45	01	03	-
	40%	60%	SB 40-60	01	03	-
Solo-RCD	85%	15%	SRCD 85-15	01	03	-
	70%	30%	SRCD 70-30	01	03	09
	55%	45%	SRCD 55-45	01	03	-
	40%	60%	SRCD 40-60	01	03	-

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

3.2 Métodos e Programação para os Ensaio Mecânicos

Esta seção apresenta a descrição do programa experimental utilizado para alcançar os objetivos desta pesquisa. Serão relatados os procedimentos utilizados para determinação do comportamento mecânico do solo e das misturas, bem como também serão abordados os procedimentos de dimensionamento utilizados na obtenção das seções típicas. O fluxograma da Figura 19 indica o desdobramento das etapas realizadas durante todo o presente estudo.

Figura 19 – Fluxograma das etapas realizadas na presente pesquisa



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Todo o programa experimental foi desenvolvido de acordo com as metodologias e procedimentos descritos nas normas regulamentadoras da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e nos métodos de ensaios do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). A Tabela 17 destaca os ensaios realizados e as normativas utilizadas.

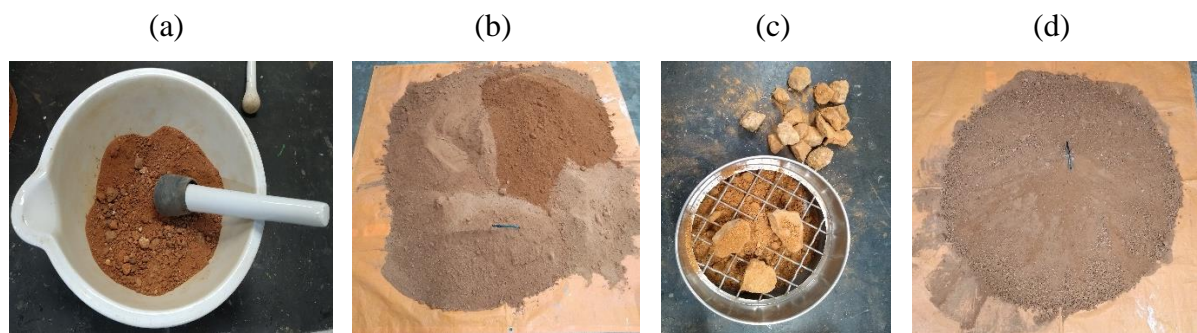
Tabela 17 – Ensaio de caracterização e suas respectivas normativas

Tipo de Caracterização	Ensaio	Normativa utilizada
Física	Classificação MCT	DNER-ME 258/94 e DNER-ME 256/94
	Compactação	NBR 7182/2016
Mecânica	Deformação Permanente	DNIT 179/2018 - IE
	Módulo de Resiliência	DNIT 134/2018 - ME

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Para realização dos ensaios de caracterização mecânica todo o solo foi preparado em porções e, após o período de secagem, foram realizados os procedimentos de destorroamento, quarteamento e peneiramento utilizando a peneira de 19,1mm. A Figura 20 ilustra estes procedimentos.

Figura 20 – Procedimentos de preparo do solo para ensaios de compactação e ensaios triaxiais de carga repetida: a) destorroamento; b) quarteamento; c) peneiramento; d) solo homogêneo.



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

3.2.1 Metodologia MCT

O método brasileiro de classificação de solos finos denominado Miniatura Compactado Tropical (MCT) foi desenvolvido por Nogami e Villibor (1995) sendo aplicado para classificação dos solos tropicais, que apresentam comportamento diferente dos solos de regiões de clima temperado. A utilização da classificação MCT permite analisar o comportamento laterítico ou não laterítico e avaliar as propriedades mecânicas e hidráulicas dos

solos. A metodologia aplica-se para solos que passam integralmente, ou que possuem menos de 10% retido na peneira nº 10 (2,00 mm).

Para classificar o solo desta pesquisa com base na tecnologia MCT, foram utilizadas as normas de “Solos Compactados em equipamento miniatura – Mini-MCV” (DNER-ME 258/94) e de “Solos Compactados em equipamento miniatura – Determinação da perda de massa por imersão” (DNER-ME 256/94). Todos os ensaios foram executados no Laboratório de Pavimentação da COPPE/UFRJ.

Inicialmente, realizou-se o destorroamento do solo e a passagem deste pela peneira nº 10. O material passante foi separado em 5 (cinco) porções com cerca de 500 g cada e em seguida realizou-se a adição de água em cada uma das porções, variando de forma crescente a umidade com intervalos de 2% até abranger uma faixa de umidade que permitisse o traçado completo da curva de compactação. Feita a homogeneização do solo com as umidades calculadas, o material foi armazenado em sacos plásticos para não ter perda de umidade e levado à câmara úmida por 24 horas.

No dia seguinte aos procedimentos de preparação descritos, foram pesados 200 g de cada porção de solo nas respectivas umidades, e uma parcela do solo restante de cada saco foi utilizada para aferição de umidade das amostras, feita em duas cápsulas por ponto de umidade (Figura 21).

Figura 21 – Amostras para aferição de umidade



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Para execução dos ensaios de compactação Mini-MCV foi inserido um suporte de PVC em torno da base de compactação para que o cilindro ficasse apoiado neste suporte. Em seguida,

foi inserido um disco de polietileno na base de compactação para que o solo não ficasse aderido na base. Também foi inserido no cilindro onde o solo vai ser colocado, um anel de vedação para impedir que o solo escapasse pela base do cilindro. As 200 gramas de amostra de solo foram inseridas dentro do cilindro, já posicionado no equipamento, com a ajuda de um funil. Introduzida a amostra foi colocado outro anel e outro disco de polietileno. Depois do primeiro golpe, o suporte de PVC foi retirado e realizou-se a leitura no extensômetro referente ao golpe um. A compactação foi realizada através da aplicação de golpes sucessivos e efetuadas leituras no extensômetro seguindo a série de golpes: 1, 2, 3, 4, 6, 12, 16, 24, 32, 48, 64, 96, 128 e 256.

A normativa recomenda as seguintes condições como critérios de parada: quando a diferença entre a leitura obtida após 4n golpes e a obtida após n golpes for inferior a 2,0 mm, quando o ensaio apresentar intensa exsudação de água, no topo ou na base do corpo de prova, e quando o número de golpes atingir 256.

As leituras feitas no extensômetro associadas a cada golpe foram anotadas em uma planilha, juntamente com os valores de umidade das amostras, em seguida são plotadas as curvas variação de compactação referentes a certo número de golpes e assim foram determinados os parâmetros c' e d' .

Finalizados os procedimentos de compactação, realizou-se a extração parcial do corpo de prova de modo a obter uma saliência de solo fora do cilindro com cerca de 10 mm. Os corpos de prova foram transferidos para um recipiente com água, contendo cubas destinadas a receber o material eventualmente desagregado, por no mínimo 20 horas, denominado ensaio de perda por imersão (PI) (Figura 22).

Figura 22 – Amostras no ensaio de perda de massa por imersão



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Transcorrido este tempo as cubas com o material desagregado foram retiradas e levadas para a estufa, para permitir o cálculo da Perda de Massa por Imersão – Pi (%). Com o valor de d' e PI, calcula-se o parâmetro e' pela Equação 7 e determina-se a classificação do solo pela metodologia MCT.

$$e' = \sqrt[3]{\frac{PI}{100} + \frac{20}{d'}} \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

e' – Índice de classificação (adimensional);

PI – Perda de massa por imersão (%);

d' – Inclinação do ramo seco da curva de compactação de 12 golpes (adimensional).

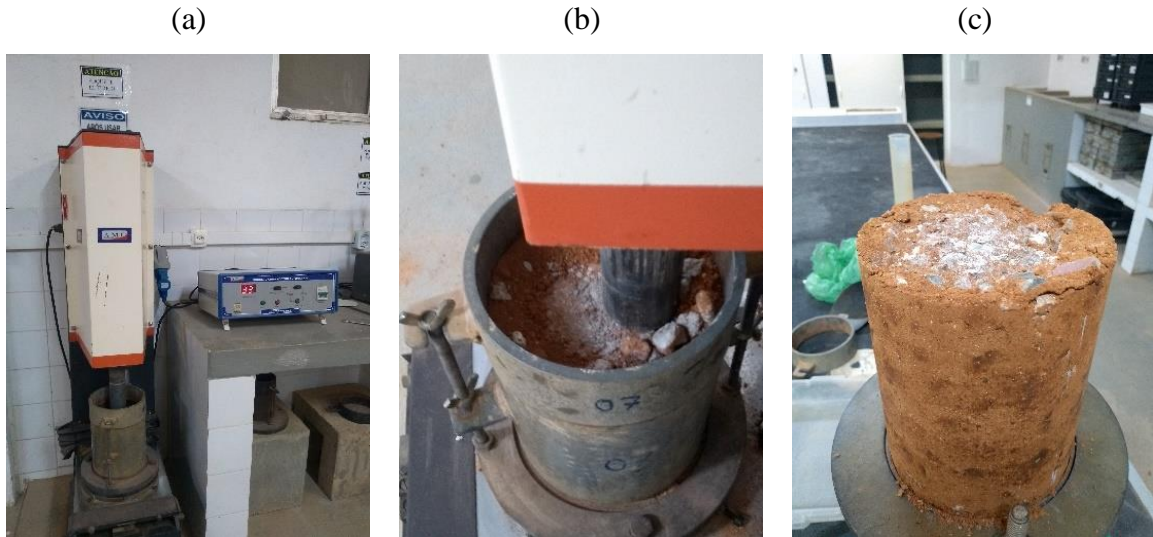
3.2.2 Ensaio de Compactação Proctor

A NBR 7182 (ABNT, 2016) determina os procedimentos metodológicos para execução do ensaio de compactação tipo Proctor. Através deste ensaio é possível obter a relação entre o teor de umidade ótima de um solo e sua massa específica aparente seca máxima, quando a fração de solo que passa na peneira de 19,1 mm é compactada em distintas energias.

Com base na granulometria das amostras ensaiadas nesta pesquisa e nas orientações da NBR 6457 (ABNT, 2016) quanto à % em peso de material retido na peneira 4,8 mm, determinou-se que, para execução dos ensaios de Compactação Proctor, seria utilizado o cilindro grande. Assim foi necessário 7,0 kg de amostra total para cada ensaio, visto que a amostra apresentou menos de 10% de material retido na # 19,1 mm. Optou-se por realizar os ensaios fazendo o reuso de material devido a restrições na quantidade de solo disponível.

O solo puro e todas as proporções analisadas das misturas de Solo-Brita e Solo-RCD foram ensaiadas na energia Intermediária, aplicando-se 26 golpes em cada uma das cinco camadas. Os ensaios de compactação Proctor desta pesquisa foram feitos utilizando Soquete CBR / Proctor Automático digital da AMC, com controlador de golpes, que é um equipamento automático e de fácil operação. A Figura 23 mostra o soquete utilizado bem como algumas etapas do procedimento de compactação.

Figura 23 – a) Aparelho de compactação automática utilizado nesta pesquisa; b) execução de uma etapa dos ensaios de compactação; c) amostra de mistura Solo-RCD após extração do molde



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

3.2.3 Ensaios Triaxiais Dinâmicos

3.2.3.1 *Preparação dos corpos de prova*

Foram preparados vários pacotes das misturas de Solo-Brita e Solo-RCD, com aproximadamente 6,0 kg cada, colocando-as em sacos plásticos e fazendo as devidas identificações. Ao todo foram organizadas 36 amostras: 03 amostras de solo natural, 12 amostras de solo-brita, 12 amostras de solo-RCD, para ensaios de Módulo de Resiliência, e 09 amostras de solo-RCD com 70% de solo e 30% de agregados (SRCD 70-30) para um ensaio de Deformação Permanente que exige nove corpos de prova (Tabela 18). O planejamento inicial da pesquisa voltou-se exclusivamente para a execução dos ensaios de Módulo de Resiliência, assim o quantitativo de solo-RCD 70-30 encaminhado para ensaios de Deformação Permanente foi enviado de forma adicional, para ser realizado caso houvesse tempo hábil. Diante disto não foi feito envio de amostras adicionais de solo-brita 70-30 para execução de ensaios de DP. A Figura 24 mostra os procedimentos de mistura e organização das amostras.

Tabela 18 – Quantitativo de amostras preparadas para ensaios triaxiais cíclicos desta pesquisa

Material	Massa de Solo (kg)	Massa de Agregado (kg)	Massa Total Unitária (kg)	Quantidade de		
				Corpos de prova (unidades)	Massa Total (kg)	
Solo puro	6,00	-	6,00	3	18,00	
Misturas	Mistura de Solo-Brita (85% e 15%)	5,10	0,90	6,00	3	18,00
	Mistura de Solo-RCD (85% e 15%)			6,00	3	18,00
	Mistura de Solo-Brita (70% e 30%)	4,20	1,80	6,00	3	18,00
	Mistura de Solo-RCD (70% e 30%)			6,00	12	72,00
	Mistura de Solo-Brita (55% e 45%)	3,30	2,70	6,00	3	18,00
	Mistura de Solo-RCD (55% e 45%)			6,00	3	18,00
	Mistura de Solo-Brita (40% e 60%)	2,40	3,60	6,00	3	18,00
	Mistura de Solo-RCD (40% e 60%)			6,00	3	18,00
	TOTAL			162,00	36	216,00

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

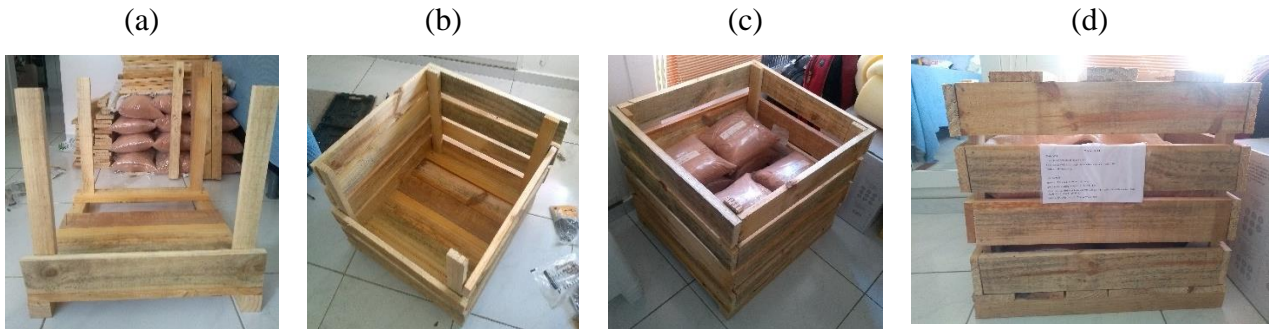
Figura 24 – a) Mistura de Solo-Brita 85-15 após homogeneização; b) misturas pesadas e embaladas para envio para a COPPE/UFRJ



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Concluída a organização das amostras foram confeccionados os 03 caixotes utilizados para transporte das amostras até a COPPE/UFRJ. Os caixotes foram planejados com dimensões de 55 cm x 55 cm x 55 cm para acondicionar 12 amostras cada. A Figura 25 exemplifica as etapas de confecção dos caixotes e disposição das amostras nestes.

Figura 25 – Etapas da confecção dos caixotes para envio do material até a COPPE/UFRJ



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

No Laboratório de Pavimentação da COPPE/UFRJ, o solo e as misturas foram retirados das embalagens e foi realizado inicialmente a homogeneização com o teor de água necessário para proporcionar percentual de umidade inferior a 1% da ótima, determinada através das curvas de compactação. As Figuras 26, 27 e 28 retratam algumas amostras após o procedimento de homogeneização do solo puro, das misturas de Solo-Brita e Solo-RCD com o teor de umidade necessário.

Figura 26 – Solo puro após procedimento de homogeneização com a água



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Figura 27 – Misturas de Solo-Brita após procedimento de homogeneização: a) Solo-Brita 70-30; b) Solo-Brita 40-60



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Figura 28- Misturas de Solo-RCD após procedimento de homogeneização: a) Solo-RCD 70-30; b) Solo-RCD 40-60



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Posteriormente o material foi colocado em sacos duplos, em câmara úmida por, no mínimo, 12 horas. Ao se retirar as amostras da câmara úmida estas foram moldadas, em moldes tripartidos de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, em camadas de 1/10 da altura do corpo de prova, compactadas por impacto através de compactador automático, utilizando a energia Proctor Intermediária. As Figuras 29, 30 e 31 mostram alguns dos corpos de prova obtidos após o procedimento de compactação.

Figura 29 – Corpo de prova de solo puro preparado para o ensaio de MR



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Figura 30 – Corpos de prova das misturas de Solo-Brita preparados para o ensaio de MR



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

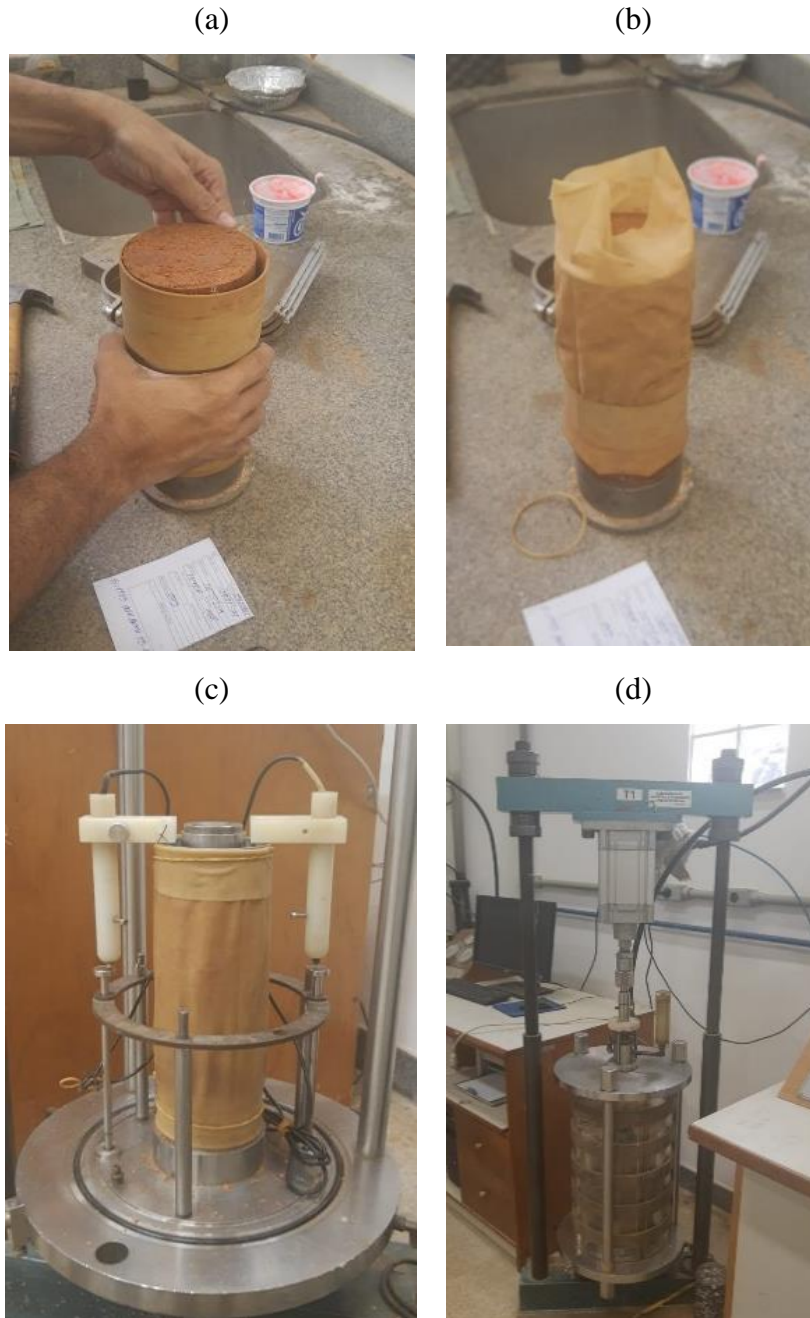
Figura 31 - Corpos de prova das misturas de Solo-RCD preparados para o ensaio de MR



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Depois da extração dos corpos de prova estes foram envoltos em uma membrana de látex e colocados na base do equipamento triaxial sobre uma pedra porosa. O conjunto foi inserido na câmara triaxial e o *top cap* (cabecote) foi posicionado na parte superior do corpo de prova. Os LVDTs (do inglês, *Linear Variable Differential Transformer*, em tradução livre “Transformador Diferencial Variável Linear”), posicionados de forma oposta diametralmente, foram ajustados. Em seguida, foi inserido o cilindro de acrílico da câmara triaxial e conectado o encaixe da tampa e o pistão utilizado para a aplicação de carga. A Figura 32 ilustra estes procedimentos descritos.

Figura 32 – Sequência de procedimentos para ensaios de MR e DP: a) inserção do corpo da membrana no CP; b) corpo de prova envolto na membrana de látex; c) posicionamento dos LVDTs; d) equipamento montado.



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Finalizada a montagem do corpo de prova e de todo o conjunto foi feita a inserção dos parâmetros de: tensão confinante, tensão desvio, quantidade de ciclos, diâmetro e altura do corpo de prova no sistema de aquisição de dados (Figura 33).

Figura 33 – Prensa e Sistema de aquisição de dados do equipamento triaxial de cargas repetidas da COPPE/UFRJ



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

3.2.3.2 *Ensaio de Módulo de Resiliência (MR)*

Os ensaios de módulo de resiliência (MR) foram realizados no Setor de Pavimentos do Laboratório de Geotecnia COPPE/UFRJ. Para execução destes foram seguidas as orientações dispostas no método ME 134 (DNIT, 2018).

O intuito do ensaio é avaliar principalmente a magnitude do MR e o modelo que melhor descreve a correlação entre este módulo e as tensões aplicadas. As tensões, confinantes e desvio respeitaram as diretrizes da normativa para camadas de sub-base ou base de pavimentos. Todos os ensaios de MR foram efetuados com aplicações de carga cíclica na frequência de 1 Hz, sendo 0,1 segundo de carregamento e 0,9 segundo de descarregamento. Os conjuntos de tensões aplicados na fase de condicionamento e do ensaio propriamente dito encontram-se descritos na Tabela 19.

Tabela 19 – Tensões aplicadas nos CPs para ensaio de módulo de resiliência

Fase	Tensão Confinante (MPa)	Tensão desvio (MPa)
Condicionamento	0,070	0,070
	0,070	0,210
	0,105	0,315
Carregamento Efetivo		0,020
	0,020	0,040
		0,060
		0,035
	0,035	0,070
		0,105
		0,050
	0,050	0,100
		0,150
		0,070
	0,070	0,140
	0,210	
	0,105	
0,105	0,210	
	0,315	
	0,140	
0,140	0,280	
	0,420	

Fonte: DNIT 134/2018 – ME

Foram ensaiadas na fase de carregamento efetivo as amostras que apresentaram pequenas deformações permanentes durante a fase de condicionamento. As amostras de misturas que resultaram em elevadas deformações durante o condicionamento não foram ensaiadas na fase de carregamento efetivo devido ao aparelho triaxial ser limitado para deformações máximas de 10 mm. Por isso algumas misturas apresentam dados de somente dois ensaios de MR e não três como previsto inicialmente.

Deformações permanentes elevadas na fase de condicionamento, na maior parte das vezes, correspondem a umidades elevadas. Tal fato foi verificado na pesquisa quando foram medidos os teores de umidade das amostras que não foram ensaiadas completamente, pois identificou-se que estes corpos de prova estavam com umidade superior à ótima determinada nos ensaios de compactação. A compactação no cilindro Proctor ou no cilindro utilizado para o

ensaio triaxial (que precisa de relação altura/diâmetro = 2) pode gerar umidades ótimas ligeiramente diferentes, dependendo do material. Provavelmente foi o que ocorreu neste caso e assim, como não seria possível refazer as curvas de compactação, os ensaios passaram a ser realizados com percentual de umidade inferior a 1% da ótima estimada nos ensaios de compactação.

Utilizando os dados obtidos nos ensaios foi feita uma regressão tipo potencial no *software Excel*. No próprio computador que regula o ensaio no equipamento triaxial, na folha de ensaio já aparecem duas correlações simplificadas: MR com a tensão confinante (σ_3) e MR com a tensão desvio (σ_d). Estas plotagens já permitem avaliar a qualidade do ensaio e a eventual necessidade de repetição. Mas na prática atual, avalia-se o MR como uma função das duas tensões simultaneamente conforme indicado anteriormente na Equação 5. Assim, foi utilizado o *software Statistica 10.0* para executar uma regressão que resultasse em um Módulo de Resiliência Composto, ou seja, que considera as duas tensões (σ_3 , σ_d) simultaneamente, modelo mais utilizado atualmente tendo em vista que na maioria dos materiais há influência das duas tensões.

3.2.3.3 Ensaios de Deformação Permanente (DP)

Para execução do ensaio de deformação permanente (DP) foi necessária a confecção de um corpo de prova para cada par de tensões (confinante e desviadora) conforme recomendações da IE 179 (DNIT, 2018). A normativa recomenda atualmente a aplicação de 09 pares distintos de tensões no corpo de prova a ser analisado, porém com base no estudo desenvolvido por Lima (2020) foram elaborados 06 corpos de prova a serem ensaiados em alguns pares de tensões selecionados dentre os indicados na normativa do DNIT.

A Tabela 20 indica quais foram os pares de tensões aplicados nos ensaios de deformação permanente desta pesquisa. Devido a dificuldades relativas ao tempo necessário para execução deste ensaio e o fato de ser necessário sua realização no Laboratório da COPPE/UFRJ, foi decidido a realização somente na mistura solo-RCD 70-30, selecionada como a de melhor desempenho, e por ser o material alternativo.

Desse modo, foram confeccionados seis corpos de prova da mistura de SRCD 70-30, utilizando a umidade de 10% e os procedimentos já descritos no tópico 3.2.3.1.

Tabela 20 – Tensões aplicadas nos CPs nos ensaios de deformação permanente

Fase	Tensão Confinante (MPa)	Tensão desvio (MPa)
Condicionamento	30	30
	40	40
Carregamento Efetivo	120	120
	80	80
	120	240
	120	120
		360

Fonte: Adaptado de IE 179 (DNIT, 2018) e Lima (2020)

Na realização dos ensaios de DP foram feitas aplicações de carga cíclica na frequência de 2,0 Hz, com 0,1 segundo de carregamento e 0,4 segundo de descarregamento. Na fase de condicionamento foram aplicados 50 ciclos de tensões no início de cada ensaio. Para cada fase de carregamento efetivo para a determinação da deformação permanente foram aplicados no mínimo 150.000 ciclos. Para realizar as análises da deformação permanente e determinar os parâmetros do modelo proposto por Guimarães (2009) foi utilizado o *software* Statistica 10.0.

3.2.4 Índice de Suporte Califórnia (CBR)

Inicialmente os ensaios de Índice de Suporte Califórnia (CBR) estavam previstos para serem realizados com as misturas desta pesquisa, porém, devido a problemas com a disponibilidade do laboratório do IFRN, durante a pandemia de COVID-19, estes não foram realizados e como alternativa para este problema utilizou-se o estudo desenvolvido por Barreto (2020) para avaliação do CBR da mistura otimizada de solo-RCD e posteriormente emprego deste CBR no método de dimensionamento de pavimentos flexíveis do DNER.

A Tabela 21 exemplifica os valores de CBR obtidos por Barreto (2020) em seu estudo. Os valores de índice de suporte obtidos referem-se à energia de compactação intermediária e modificada. Percebe-se que a mistura que mais se aproximou da composição otimizada desta pesquisa (solo-RCD 70-30) foi a mistura com 75% de solo com 25% de RCD. Vale relembrar que o solo utilizado por Barreto (2020) é o mesmo utilizado neste estudo, conforme descrito anteriormente no tópico 3.1.1.1. Optou-se por utilizar tais parâmetros neste estudo, uma vez que eles são mais representativos do que correlações. Entende-se que o fato do RCD utilizado nesta pesquisa não ser oriundo da mesma coleta realizada por Barreto (2020) pode acarretar diferenças, visto que, como mencionado anteriormente, o RCD é bastante heterogêneo e varia conforme material coletado. Porém, tal adoção restringe-se exclusivamente para justificativa

do valor de CBR a ser utilizado no método de dimensionamento antigo do DNER, que possui como valor máximo o índice de 20%.

Tabela 21 – Valores de CBR e Expansão das misturas solo-RCD avaliadas por Barreto (2020)

Solo / RCD	Energia de Compactação	CBR (%)	Expansão (%)
100 / 0	Intermediária	6,0	0,11
	Modificada	24,0	0,10
75 / 25	Intermediária	9,0	0,22
	Modificada	38,0	0,38
50 / 50	Intermediária	30,0	0,04
	Modificada	31,0	0,04
25 / 75	Intermediária	24,0	0,02
	Modificada	90,0	0,05

Fonte: Adaptado de Barreto (2020)

Para a mistura de solo-RCD 75-25 compactada na Energia Intermediária, verificou-se que o valor de CBR obtido não atende aos requisitos dispostos na ES 141 (DNIT, 2010) no que diz respeito ao valor mínimo de CBR para camadas de base. Porém, verifica-se que, quando elevada a energia de compactação, o valor de CBR dessa mistura específica sobe para 38%, passando assim a adequar-se aos requisitos da ES 139 (DNIT, 2010) para camadas de sub-base estabilizadas granulometricamente, com valor de CBR muito superior aos 20% exigidos.

3.2.5 Dimensionamento do Pavimento

3.2.5.1 Método do DNER

O dimensionamento de pavimentos flexíveis que faz uso da metodologia proposta pelo Eng. Murillo Lopes de Souza consiste em obter as espessuras das camadas do pavimento utilizando como parâmetros a capacidade de suporte do subleito, o tráfego, o fator climático regional, o coeficiente de equivalência estrutural e espessuras mínimas de revestimentos betuminosos (DNER, 1981).

O dimensionamento de pavimentos flexíveis por meio desta metodologia segue algumas etapas, que são: definição da capacidade de suporte do subleito, definição dos materiais, determinação do tráfego e determinação das espessuras das camadas.

Quando se faz a seleção dos materiais que serão utilizados em camadas de base, sub-base e reforço do subleito atualmente ainda tem-se que levar em consideração alguns critérios para seleção, que são: características de natureza e física, que interferem diretamente nas propriedades geotécnicas dos materiais. Com base nesta necessidade as normas ES 141 (DNIT, 2010) e ES 139 (DNIT, 2010) estabelecem os critérios a serem avaliados inicialmente para adoção de materiais voltados para camadas de base e sub-base, respectivamente, que são os seguintes:

a) Materiais para base granulometricamente estabilizada devem obedecer aos seguintes critérios:

— Apresentar composição granulométrica satisfazendo a uma das faixas da Tabela 22 a seguir, de acordo com o Número N de tráfego calculado segundo a metodologia do USACE.

Tabela 22 – Faixas granulométricas em função dos níveis de tráfego

Tipos Peneira	N > 5 X 10 ⁶			N < 5 X 10 ⁶		
	A	B	C	D	E	F
	% em peso passando					
2''	100	100	-	-	-	-
1''	-	75-90	100	100	100	100
3/8''	30-65	40-75	50-85	60-100	-	-
Nº 4	25-55	30-60	35-65	50-85	55-100	70-100
Nº 10	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100	55-100
Nº 40	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50	30-70
Nº 200	2-8	5-15	5-15	10-25	6-20	8-25

Fonte: DNIT (2006)

- CBR ≥ 60% para N ≤ 5 x 10⁶ (na Energia Proctor Modificada)
- CBR ≥ 80% para N > 5 x 10⁶ (na Energia Proctor Modificada)
- Expansão ≤ 0,5%
- Limite de liquidez ≤ 25% e Índice de plasticidade ≤ 6%
- Se LL ≥ 25% e/ou IP ≥ 6%; o material pode ser empregado em base (satisfeitas as demais condições), desde que o equivalente de areia seja superior a 30.
- % passante na nº 200 ≤ 2/3 % passante na nº 40
- Abrasão do agregado ≤ 55%

b) Materiais para sub-base granulometricamente estabilizada devem obedecer aos seguintes critérios:

- CBR ≥ 20% (na Energia Proctor Intermediária)

- Expansão $\leq 1\%$
- I.G. = 0
- Solos lateríticos – IG $\neq 0$ e Expansão $> 1,0\%$, desde que no ensaio de expansibilidade (DNER-ME 029/94) apresente um valor inferior a 10%.

Por meio da execução do ensaio de CBR, na umidade ótima, dos materiais das camadas de base, sub-base, reforço e subleito, faz-se a determinação da capacidade de suporte de cada material analisado. Pode-se também utilizar, quando for justificável e em prol de maior segurança, em vez do valor de CBR, o Índice de Suporte (IS), que é o CBR corrigido em função do Índice de Grupo (IG), obtido em função dos resultados dos ensaios de caracterização.

A variável de tráfego se relaciona com volume diário médio de tráfego, denominado de VDM, de veículos comerciais. De acordo com a intensidade, caracteriza-se como tráfego leve, tráfego médio e tráfego pesado. Deve-se tomar o tráfego de veículos comerciais do tipo caminhões e ônibus. Para execução do dimensionamento é necessário determinar o número equivalente (N) de operações de um eixo tomado como padrão, com carga de 8,2 t, durante o período de projeto escolhido, onde N é dado pela Equação 8:

$$N = 365 \cdot Vm \cdot P \cdot (FC) \cdot (FE) \cdot (FR) \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

Vm - Volume diário médio de tráfego no sentido mais solicitado, no ano médio do período de projeto;

P - Período de projeto ou vida útil, em anos;

FC - Fator de carga ou Fator de operações de carga

FE - Fator de eixo;

FR - Fator climático regional.

Na prática para se obter um valor de Volume Médio Diário (VMD) de tráfego em conjunto com o Fator de Veículo (FV) e calcular o número equivalente de operações de um eixo padrão (N) é preciso realizar a contagem e pesagem de tráfego da via caso seja uma via existente ou estimar por análise de pesquisa origem-destino na região onde será implantado o pavimento. Como o projeto a ser simulado nesta pesquisa tem como foco a análise do material solo-RCD e em sua viabilidade para aplicação em situações de tráfego pequeno a moderado, as

análises foram desenvolvidas com três distintos valores de N : 5×10^4 , 5×10^5 , 5×10^6 , representativos do volume de tráfego leve e médio.

Este método de dimensionamento de pavimentos flexíveis fixa espessuras mínimas para a camada de revestimento betuminoso com base no valor de N . A Tabela 23 expõe os tipos de revestimentos e valores mínimos exigidos. A situação de projeto desta pesquisa resulta em revestimentos de tratamentos superficiais betuminosos com espessura que pode variar de 2,0 até 3,0 cm e revestimentos betuminosos com 5,0 cm de espessura.

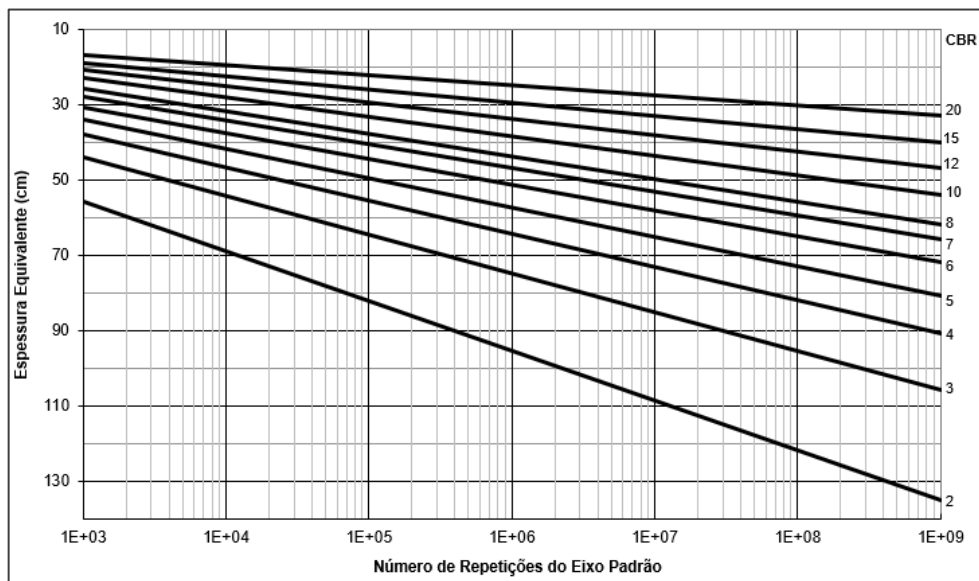
Tabela 23 – Espessura mínima para revestimento betuminoso – método DNER

N	Espessura mínima de revestimento betuminoso
$N \leq 10^6$	Tratamentos superficiais betuminosos
$10^6 < N \leq 5 \times 10^6$	Revestimentos betuminosos com 5,0 cm de espessura
$5 \times 10^6 < N \leq 10^7$	Concreto betuminoso com 7,5 cm de espessura
$10^7 < N \leq 5 \times 10^7$	Concreto betuminoso com 10,0 cm de espessura
$N > 5 \times 10^7$	Concreto betuminoso com 12,5 cm de espessura

Fonte: Souza (1981)

Posteriormente determina-se a espessura total do pavimento fazendo uso do ábaco presente no Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis (SOUZA, 1981) e exposto na Figura 34.

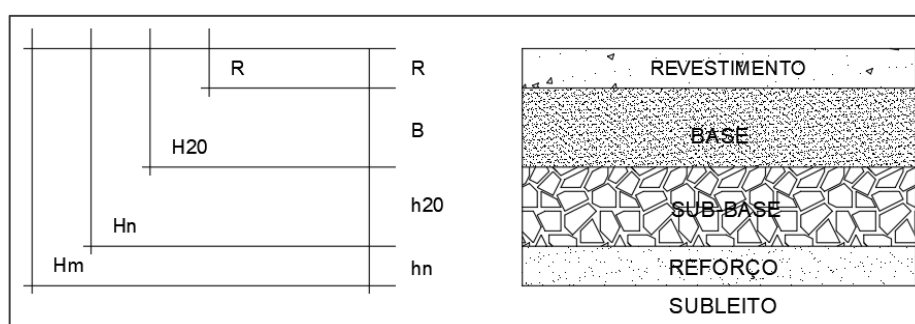
Figura 34 – Ábaco para dimensionamento de pavimentos flexíveis utilizado no método do DNER



Fonte: Souza (1981)

No ábaco foram inseridas as informações de N e CBR do subleito para determinar a espessura total do pavimento (Hm) que, segundo o método, proporcionaria adequada proteção à camada de subleito. Para a pesquisa foi necessária a adoção de CBR de subleito para execução das simulações, desse modo, foram adotados os valores de 2, 10 e 20%, em que 2% representa o valor mínimo e 20% representa o valor máximo admitido, que já corresponde ao exigido para sub-base, e o 10% desempenha um valor intermediário entre estes dois limites. A Figura 35 retrata as nomenclaturas utilizadas no método para a determinação das espessuras das camadas.

Figura 35 – Nomenclatura das espessuras das camadas de acordo com o método do CBR



Fonte: Souza (1981)

Depois de determinada a espessura total do pavimento e a espessura da camada de revestimento, o próximo passo é a escolha dos coeficientes de equivalência estrutural (K), visto que a espessura fornecida pelo ábaco é dada em termos de material com $K = 1,00$ e assim sempre deve-se multiplicar o coeficiente de equivalência estrutural (K) da camada pela sua respectiva espessura. A determinação do valor de K de cada camada foi feita com base nas informações da Tabela 24.

Tabela 24 – Coeficientes de equivalência estrutural para os materiais utilizados

Componentes do Pavimento	Coefficiente K
Base ou revestimento de concreto betuminoso	2,00
Base ou revestimento pré-misturado a quente, de graduação densa	1,70
Base ou revestimento pré-misturado a frio, de graduação densa	1,40
Base ou revestimento betuminoso por penetração	1,20
Camadas Granulares	1,00
Solo cimento com resistência à compressão aos 7 dias superior a 45 kg/cm ²	1,70
Solo cimento com resistência à compressão aos 7 dias entre 45 e 28 kg/cm ²	1,40
Solo cimento com resistência à compressão aos 7 dias entre 28 e 21 kg/cm ²	1,20
Bases de Solo-cal	1,20

Fonte: Souza (1981)

Desse modo, quando se determinou as espessuras das camadas (H_m , H_n , H_{20}) pelo ábaco, e R pela Tabela 23 de espessura mínima de revestimento betuminoso, as espessuras da base (B), sub-base (h_{20}) e reforço do subleito (h_n) foram obtidas pela resolução sucessiva das inequações a seguir:

$$Rk_R + Bk_B \geq H_{20}$$

$$Rk_R + Bk_B + h_{20}k_s \geq H_n$$

$$Rk_R + Bk_B + h_{20}k_s + h_nk_{ref} \geq H_m$$

Onde:

K_R – coeficiente de equivalência estrutural do revestimento;

R – espessura do revestimento;

K_B - coeficiente de equivalência estrutural da base;

B – espessura da base;

H_{20} – espessura de pavimento necessária para proteger a sub-base;

K_S - coeficiente de equivalência estrutural da sub-base;

h_{20} – espessura da sub-base;

H_n – espessura de pavimento necessária para proteger o reforço do subleito;

K_{ref} - coeficiente de equivalência estrutural do reforço de subleito;

h_n – espessura do reforço do subleito;

H_m – espessura total de pavimento necessária para proteger um material com CBR igual a $m\%$.

3.2.5.2 *Software MeDiNa*

Utilizando os parâmetros da regressão do modelo composto obtidos através do *software Statistica 10.0* com base nos dados dos ensaios triaxiais de carga repetida dos materiais desta pesquisa, realizaram-se as primeiras análises das misturas de solo-brita 70-30 e solo-RCD 70-30 aplicadas em camadas de base e sub-base de um pavimento por meio do *software MeDiNa*, versão 1.1.5.0 – dezembro 2020.

Inicialmente foram estabelecidos os dados sobre o tráfego e para cada situação de que se pretendia avaliar foi determinado o VMD no 1º ano. Todas as análises foram realizadas para um período de vida útil de 10 anos e taxa de crescimento de 2,0%. Desse modo, para totalizar um número equivalente total de passagens (N) de 5×10^4 foi inserido o VMD de 13, para o tráfego de 5×10^5 adotou-se o VMD de 125 e para o tráfego de 5×10^6 foi utilizado o VMD de 1250. O fator de veículo (FV) foi considerado unitário, o tipo de via foi a Coletora Primária e o período de vida de projeto foi de 10 anos. O eixo considerado no dimensionamento é o eixo

padrão rodoviário (com 8,2 tf ou 80,4 kN), porém no programa também podem ser inseridos distintos tipos de eixos para o cálculo do N, caso o projetista possua o estudo do tráfego. O *software* considera o carregamento circular e uniformemente distribuído e a pressão de inflação dos pneus corresponde a pressão de contato entre a roda e a estrutura do pavimento. Na Figura 36 exemplifica-se o modo de inserção dos parâmetros de tráfego no *software*.

Figura 36 – Tela do Programa MeDiNa para inserção dos parâmetros do tráfego

EIXO PADRÃO RODVIÁRIO	
DADOS DO TRÁFEGO	
Tipo de Via:	Sistema Coletor Primário
VMD (1º ano):	1250
FV:	1,000
N anual (1º ano):	4,56e+05
% Veículos na faixa de projeto:	100
N Anual da faixa:	4,56e+05
Taxa de crescimento (%):	2,0
Período de projeto (anos):	10
N Total:	5,00e+06

Tipo de Via:
O Tipo de Via define o nível de confiabilidade e os critérios de dimensionamento relativos à fadiga e ao Afundamento de Trilha de Roda

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Posteriormente foram inseridos os parâmetros dos materiais que constituiriam as camadas de base e sub-base bem como os parâmetros dos materiais das outras camadas. O material adotado para a camada de revestimento foi o tratamento superficial duplo para os casos de $N = 5 \times 10^4$ e de $N = 5 \times 10^5$ e revestimento de concreto asfáltico para $N = 5 \times 10^6$.

Os módulos de resiliência adotados no MeDiNa para o subleito foram de 50, 150 e 250 MPa. O valor mínimo representa o menor valor de módulo admitido no *software* para o subleito e o valor de 250 MPa representa um subleito com bom desempenho mecânico, sendo o valor intermediário de 150 MPa adotado para que fosse possível avaliar o dimensionamento com um valor de MR de subleito em três níveis de deformabilidade. É importante ressaltar que as magnitudes estabelecidas para os módulos de resiliência e para os índices de suportes não se correlacionam diretamente, ou seja, os valores mínimos, médios e máximos foram escolhidos prioritariamente em função dos parâmetros mínimos utilizados em cada método.

Os parâmetros de deformação permanente dos materiais que foram utilizados no subleito foram escolhidos comparando as magnitudes de módulo adotadas com as magnitudes de módulo obtidas na pesquisa desenvolvida por Norback (2018) para as misturas que a autora

avaliou. A Tabela 25 mostra os parâmetros de deformação permanente utilizados para as distintas magnitudes de módulos de resiliência do subleito.

Tabela 25 - Parâmetros de deformação permanente adotados para o subleito

Nomenclatura	Módulo de	Equivalente a				
Subleito	Resiliência	Norback (2018)	ψ_1	ψ_2	ψ_3	ψ_4
01	50	Mistura 1	0,68	-0,29	1,12	0,03
02	150	Mistura 2	0,44	-0,25	1,05	0,04
03	250	Mistura 5	0,31	0,06	0,85	0,05

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

O MeDiNa também contempla uma base de dados com informações sobre alguns tipos de materiais já estudados pela COPPE/UFRJ, mas é importante destacar que, para fins de dimensionamento de projetos de engenharia, deve-se realizar a inserção dos parâmetros específicos dos materiais que se pretende utilizar no pavimento. O *software* requer a inserção de no mínimo três camadas, e limita o dimensionamento até oito camadas (o subleito também conta como camada).

Nas camadas em que se aplicou o solo-RCD 70-30, as propriedades e características do material foram inseridas no *software*, ou seja, foram informados para o programa os parâmetros obtidos nos ensaios de módulo de resiliência e deformação permanente para este material. Porém, para a mistura de solo-brita 70-30, foi feita a adoção do parâmetro de DP por meio da base de dados do *software* MeDiNa, uma vez que este material não passou por ensaios de deformação permanente.

Desse modo, o material da base de dados que apresentou parâmetros de módulo de resiliência mais próximos do solo-brita 70-30 desta pesquisa foi a mistura de solo-brita composta com Solo LG' + 30% de brita 1 e 40% de brita 0. Estes parâmetros foram considerados para fins comparativos, visto que, a magnitude média do módulo de resiliência da mistura SB 70-30 assemelhou-se ao módulo da mistura presente no programa. Considera-se este um valor de referência que de forma alguma pode ser tomado para o projeto de um pavimento. Esta etapa do estudo não pretende correlacionar valores de MR e DP, mas sim fazer uma adoção de parâmetros de DP para desenvolver o dimensionamento do pavimento no MeDiNa. A Tabela 26 mostra os parâmetros de DP utilizados para o SB 70-30.

Tabela 26 – Parâmetros de DP adotados para o solo-brita 70-30

Nomenclatura no <i>software</i>	Módulo de Resiliência	ψ_1	ψ_2	ψ_3	ψ_4
Solo-Brita M3 (LG' s:1521)	398	0,27	-0,14	1,33	0,06

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Materiais utilizados em camadas de base, sub-base e reforço de SL, granulares ou solos finos, devem ter espessura de camada mínima de 15 cm e máxima de 40 cm no MeDiNa. O subleito é considerado com espessura semi-infinita.

O MeDiNa apresenta nas suas configurações para estimativa do comportamento dos materiais dois modelos distintos: o modelo composto desenvolvido por Macêdo (1996) para o módulo de resiliência e o modelo desenvolvido por Guimarães (2009) para descrever a deformação permanente. O *software* calcula a DP de forma isolada para cada camada do pavimento avaliando o estado de tensões atuantes no centro de cada camada. A deformação permanente total é dada através do somatório de todas as deformações calculadas isoladamente, contabilizando também a deformação permanente do subleito. O MeDiNa não considera a DP em misturas asfálticas para o cálculo do afundamento de trilha de roda, sendo este critério verificado pelo atendimento do *Flow Number* mínimo exigido da mistura em função do tráfego de projeto. No dimensionamento também deve ser levado em consideração as condições de aderência entre camadas. Para este estudo todas as camadas foram consideradas como “Não Aderidas”.

Por fim, o *software* gerou um relatório mostrando um panorama para cada dimensionamento realizado com todos os dados de entrada e exibindo os resultados de evolução mensal dos danos, as bacias de deflexão simulando os equipamentos *Falling Weight Deflectometer* e viga Benkelman, a porcentagem de área trincada e afundamento de trilha de rodas previstas para o final do projeto.

3.2.5.3 Seções avaliadas

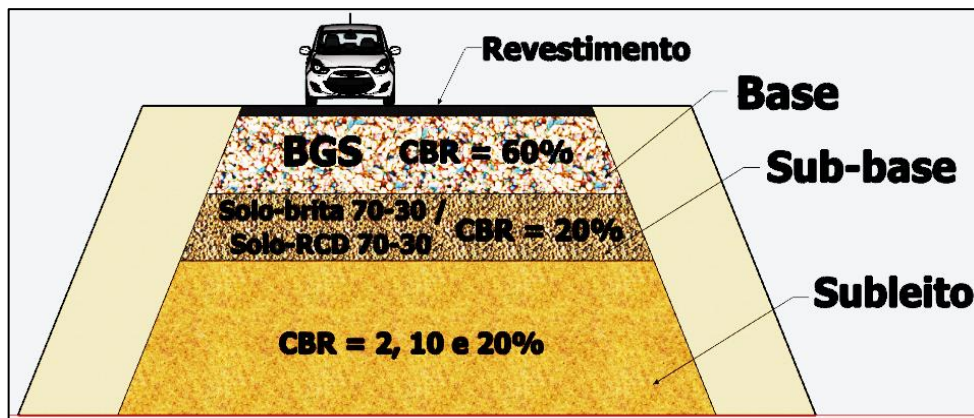
A Tabela 27 mostra os parâmetros dos materiais utilizados para composição do pavimento a ser dimensionado pelo método do DNER e a Figura 37 exemplifica tal seção.

Tabela 27 – Materiais e parâmetros considerados para a metodologia do DNER

Revestimento	Tratamento Superficial Duplo com 2,0 cm de espessura / Revestimento Betuminoso com 5,0 cm de espessura
Base	Brita Graduada Simples com CBR = 60%
Sub-base	Solo-brita 70-30 com CBR = 20% ou Solo-RCD 70-30 com CBR = 20%
Subleito	Solo com CBR de 2, 10 e 20%

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

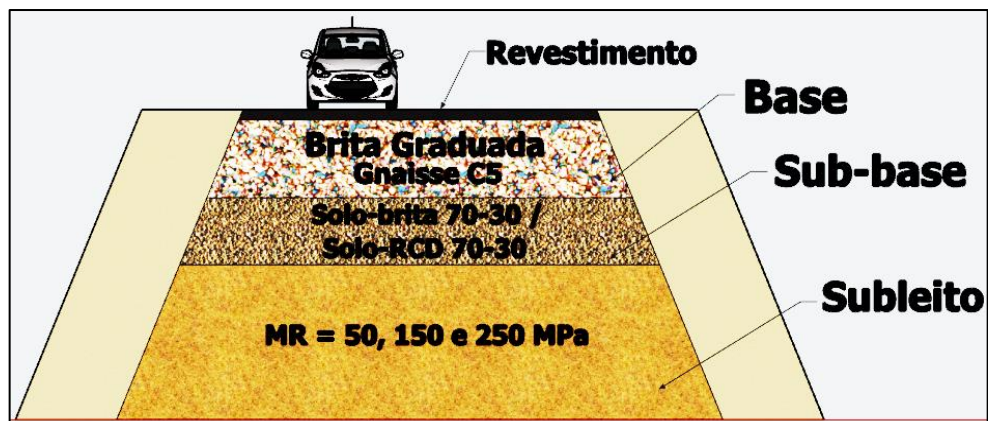
Figura 37 – Seção ilustrativa dos materiais utilizados no pavimento dimensionado pela metodologia do DNER



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

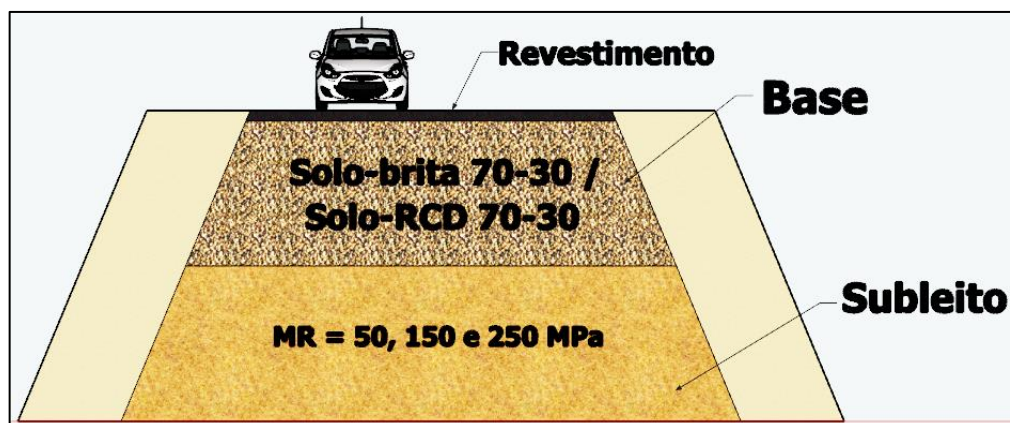
As estruturas de pavimentos elaboradas para avaliação no *software* MeDiNa estão exemplificadas através da Figura 38 e Figura 39, a seguir.

Figura 38 – Seção ilustrativa dos materiais utilizados no pavimento dimensionado pelo *software* MeDiNa – Estrutura 01



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Figura 39 – Seção ilustrativa dos materiais utilizados no pavimento dimensionado pelo *software* MeDiNa – Estrutura 02



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Os parâmetros dos materiais utilizados nas camadas da “Estrutura 01” e da “Estrutura 02” encontram-se apresentados nas Tabelas 28 e 29, respectivamente.

Tabela 28 – Materiais e parâmetros considerados para Estrutura 01 no programa

Camada	Material	Módulo de Resiliência	Coefficiente de Poisson
Revestimento	Tratamento Superficial Duplo	1.000 MPa	0,25
	Concreto Asfáltico Classe 1 / Classe 2	5.764 MPa / 6.743 MPa	0,30
Base	Brita graduada – Gnaisse C5	Resiliente Não Linear 309 MPa (1º mês)	0,35
Sub-base	Solo-RCD 70-30 / Solo-Brita 70-30	Resiliente não-linear	0,35
Subleito	Solo com MR variável em três níveis	Resiliente linear 50, 150 e 250 MPa	0,45

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Tabela 29 – Materiais e parâmetros considerados para Estrutura 02 no programa

Camada	Material	Módulo de Resiliência	Coefficiente de Poisson
Revestimento	Tratamento Superficial Duplo	1.000 MPa	0,25
	Concreto Asfáltico Classe 1 / Classe 2	5.764 MPa / 6.743 MPa	0,30
Base	Solo-RCD 70-30 / Solo-Brita 70-30	Resiliente não-linear	0,35
Sub-base	Solo-RCD 70-30 / Solo-Brita 70-30	Resiliente não-linear	0,35
Subleito	Solo com MR variável em três níveis	Resiliente linear 50, 150 e 250 MPa	0,45

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

4 RESULTADOS

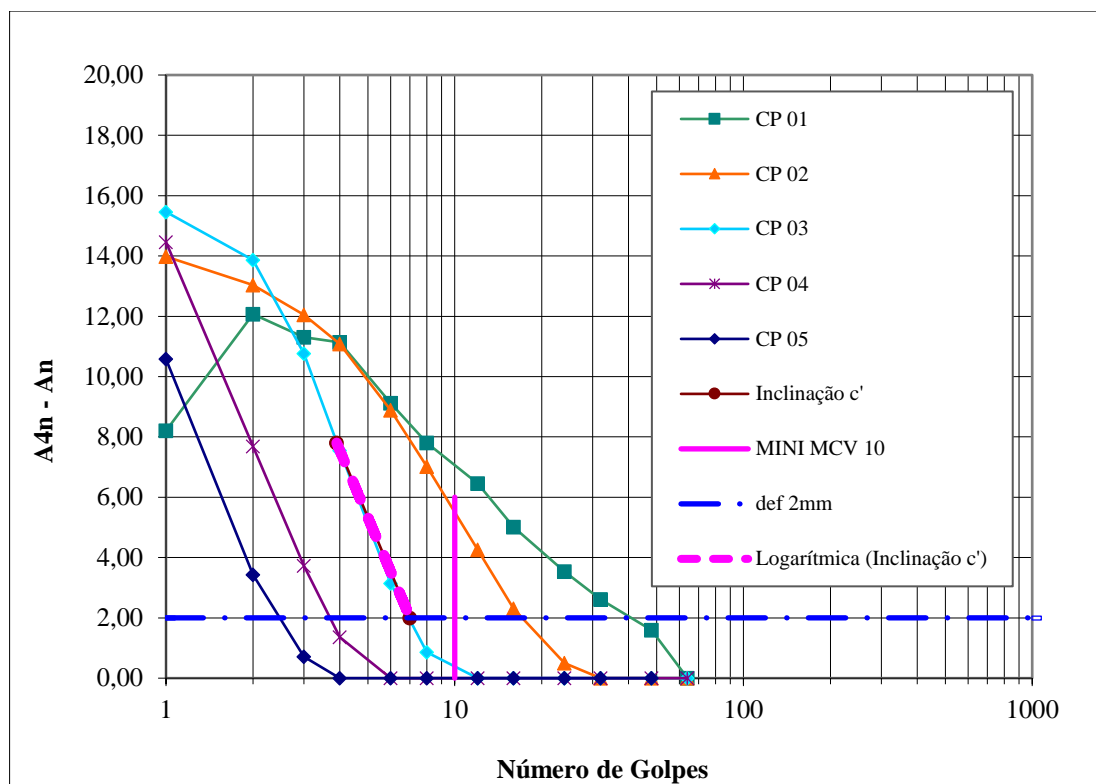
Nesta seção serão apresentados os resultados oriundos dos ensaios realizados com o solo e com as misturas solo-brita e solo-RCD, bem como a verificação por meio do método MeDiNa das seções típicas propostas a partir destes resultados, e ao final uma breve análise e comparativo de custos das seções.

4.1 Ensaio de MCT

Com a realização dos ensaios de compactação Mini-MCV e de Perda de Massa por Imersão (PI) foi possível determinar o coeficiente c' , que se relaciona com a granulometria do material, d' e PI, que resultam no e' , e mostram o grau de laterização do solo. De acordo com Nogami e Villibor (1995) os solos que apresentam PI menores que 100 e d' maiores que 20 denotam um comportamento laterítico. Estes dois últimos parâmetros definem o valor do coeficiente e' e os valores combinados de e' e c' classificam o material por meio de um ábaco específico.

Para a determinação do coeficiente c' , inicialmente foram plotadas as curvas de Mini-MCV, representando no eixo das abcissas o número de golpes (n) e no eixo das ordenadas os valores da diferença de alturas do corpo de prova na série padronizada da relação $4n - n$. O coeficiente c' é o coeficiente angular (sem sinal) da curva de deformabilidade correspondente a Mini-MCV = 10, obtido, se necessário, por interpolação gráfica e representa a parte retilínea da curva de deformabilidade. A partir da análise dos dados presentes na Figura 40, o c' obtido para o solo desta pesquisa foi de 2,28.

Figura 40 – Determinação do Coeficiente de Deformabilidade c' do solo desta pesquisa

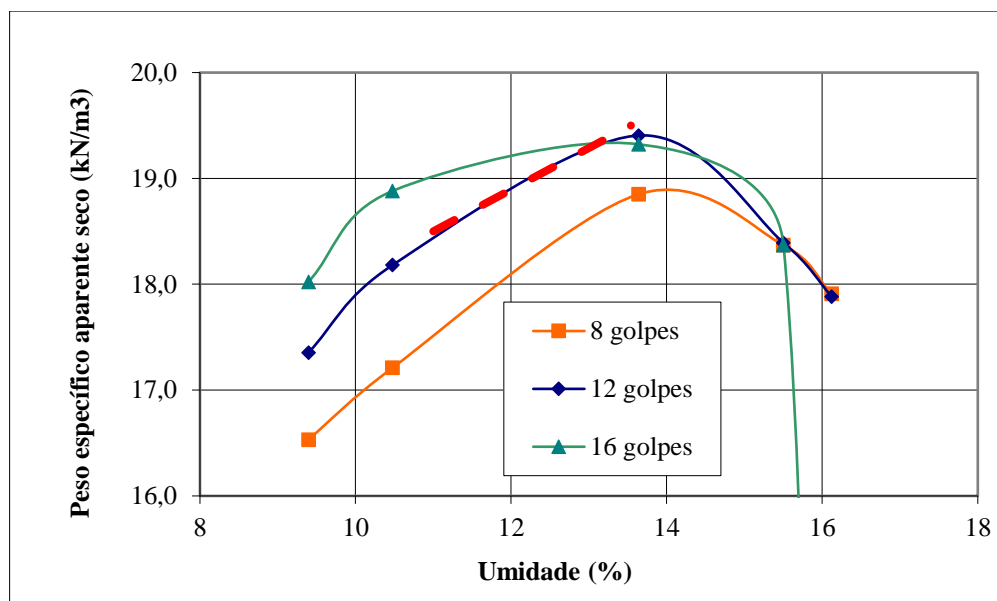


Fonte: Elaborado pela autora (2021)

O coeficiente d' é obtido da inclinação do ramo seco da curva de compactação gerada a partir da massa específica seca do solo compactado e das umidades de cada ponto, determinada de acordo com a norma ME 258 (DNER, 1994). Como a energia de compactação vai variando com o número de golpes, podem ser traçadas várias curvas de compactação (unindo pontos correspondentes ao mesmo número de golpes) até que seja atingido um dos critérios de parada do ensaio. O coeficiente d' é a inclinação da reta correspondente ao ramo seco da curva de compactação, para número de golpes igual a 12, nas adjacências do ponto de massa específica seca máxima.

A Figura 41 mostra a família de curvas de compactação e a inclinação da referida reta de forma tracejada. Analisando tais dados, verificou-se que o coeficiente d' do solo desta pesquisa é de 39,4.

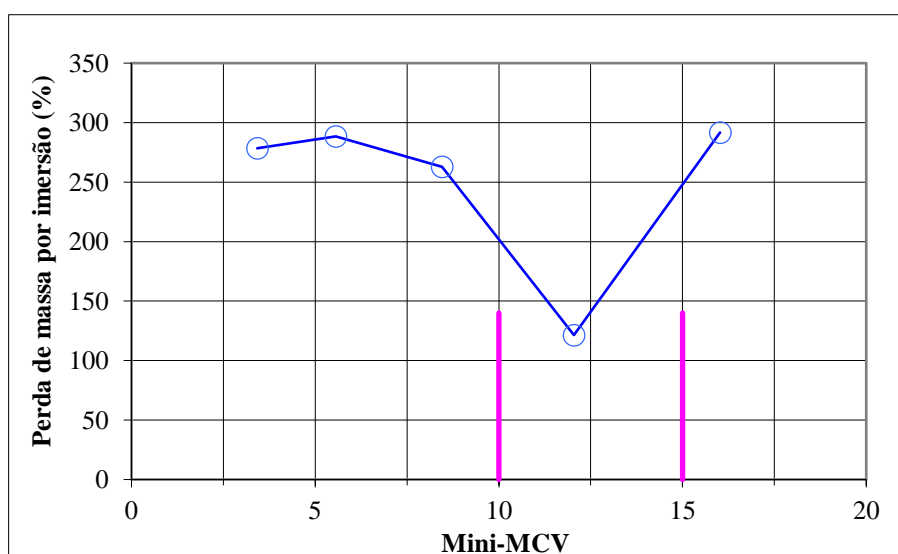
Figura 41 – Determinação do Coeficiente de Compactação d' do solo desta pesquisa



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Calculou-se posteriormente o valor de PI a ser utilizado na classificação por meio do gráfico PI (Perda de Massa de cada corpo de prova) x Mini-MCV. Comparando-se a altura final do corpo de prova com $A_f < 48$ mm para Mini-MCV = 10, verificou-se que o solo foi considerado de alta massa específica, então procurou-se o valor de Mini-MCV igual a 15 e determinou-se $PI = 250$. A Figura 42 mostra o gráfico que correlaciona a perda de massa por imersão com os resultados de Mini-MCV.

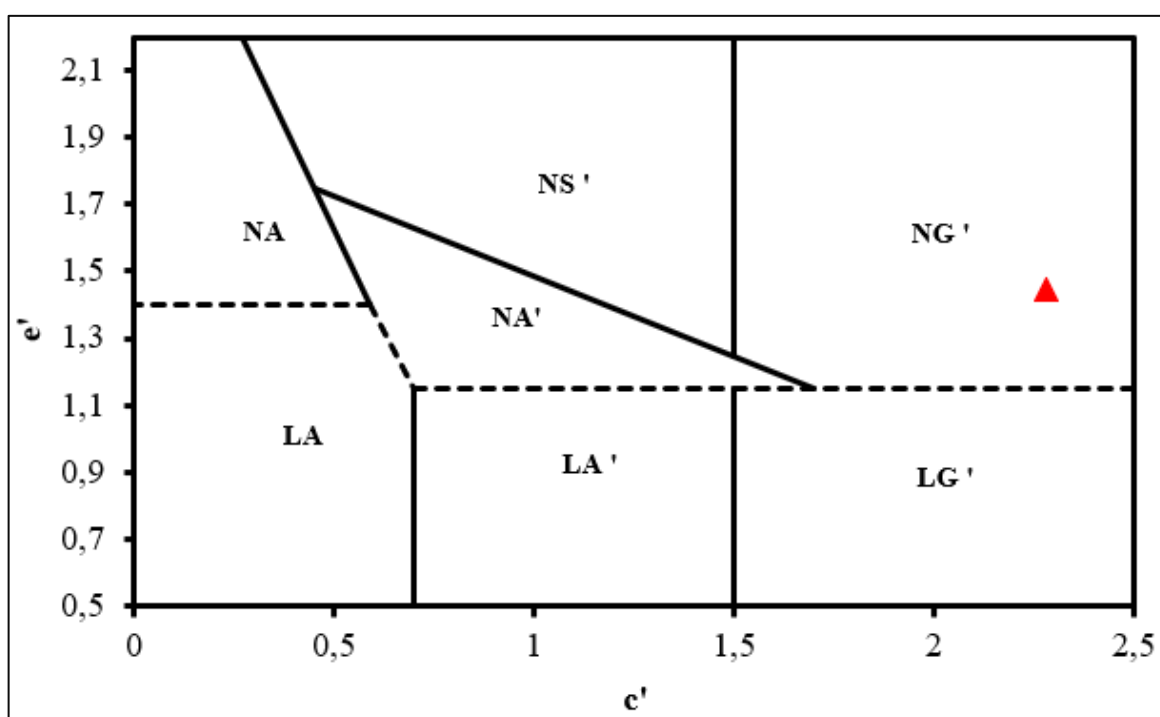
Figura 42 – Determinação da Perda de Massa por Imersão do solo desta pesquisa



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Com base nos valores de PI e d' calculou-se o valor de e' de acordo com a Equação 7 descrita no tópico 3.2.1. O índice e' objetiva expressar o comportamento laterítico ou não laterítico dos solos, segundo a metodologia MCT. A partir destes parâmetros, realizou-se a Classificação MCT do solo ensaiado, ou seja, os valores de $c' = 2,28$ e $e' = 1,44$ foram inseridos no ábaco exposto na Figura 43 e, assim, verificou-se que o solo deste estudo se classifica como solo NG'. Esta classificação "N" é consequência principalmente da PI que foi alta, e o G' (material argiloso) expressa a predominância da fração argila no comportamento deste solo.

Figura 43 – Classificação MCT (Nogami e Villibor, 1995) do solo desta pesquisa

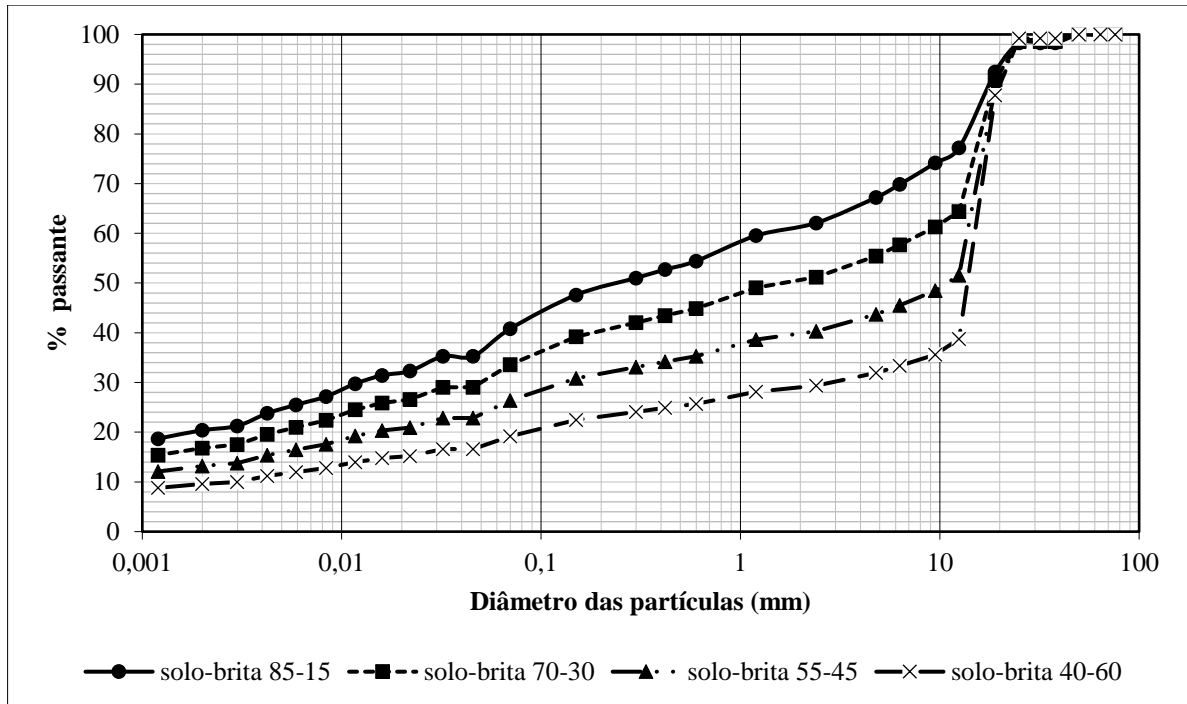


Fonte: Elaborado pela autora (2021)

4.2 Caracterização das misturas de Solo-Brita e Solo-RCD

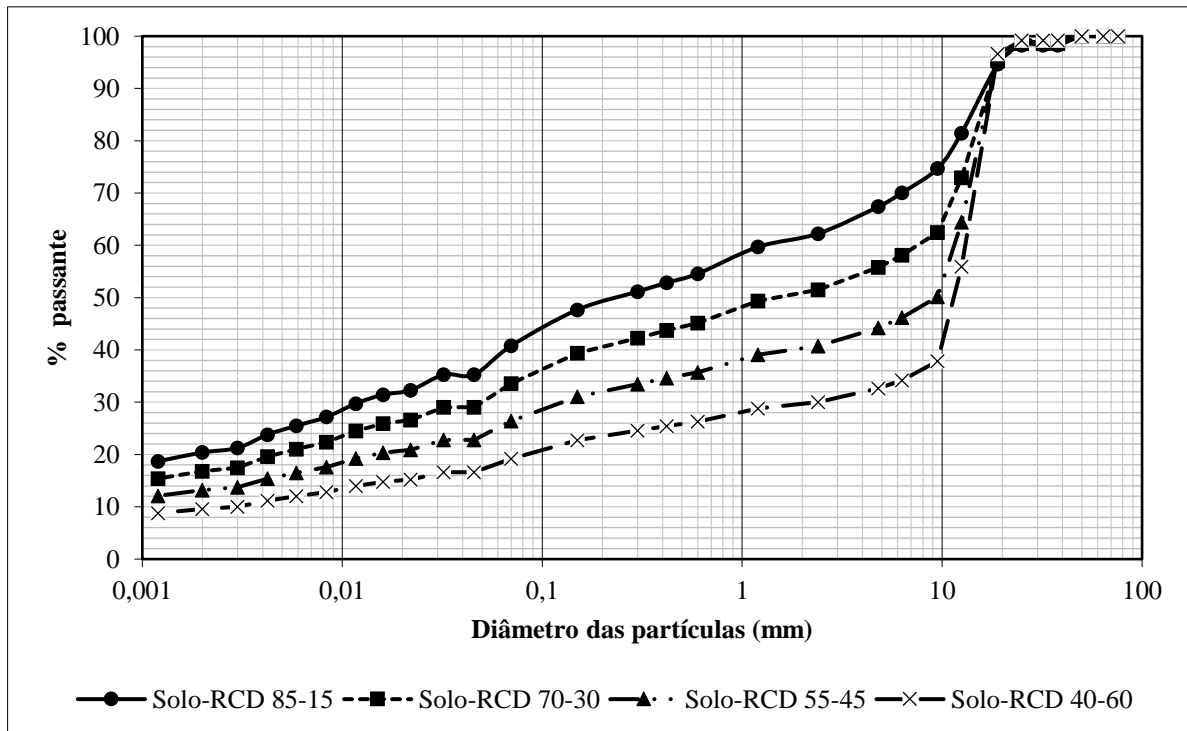
Para obter a composição granulométrica das misturas foi realizada uma análise dos percentuais passantes (do solo e dos agregados) em cada peneira e com base nestes percentuais passantes e na proporção de solo e agregados das misturas desta pesquisa foram elaboradas as curvas granulométricas compostas. Assim, a composição granulométrica das misturas de Solo-Brita e Solo-RCD para as distintas proporções avaliadas nesta pesquisa estão expostas nas Figuras 44 e 45, respectivamente.

Figura 44 – Curvas granulométricas das misturas de Solo-Brita



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Figura 45 – Curvas granulométricas das misturas de Solo-RCD



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Ao se comparar a curva granulométrica do solo puro com as curvas granulométricas das misturas de Solo-Brita e Solo-RCD, percebe-se que a inserção dos agregados causa modificação significativa na granulometria. Conforme cresce o percentual de agregados na mistura, cresce também a fração de maior diâmetro ao passo que diminui o percentual de finos em relação ao todo. Portanto, percebe-se que a inserção dos agregados, tanto de brita 1 como de RCD, leva a obtenção de um material com maior possibilidade de encaixe nas faixas de projeto sugeridas pelo DNIT.

A partir das curvas granulométricas do solo e das misturas foi possível avaliar os coeficientes de curvatura (CC) e de não uniformidade (CNU) das misturas e determinar em qual tipo de distribuição estas se enquadravam. Todas as granulometrias das misturas foram elaboradas utilizando os dados do procedimento de peneiramento da fração grossa e da sedimentação do solo com a utilização de defloculante. Porém, para se conseguir determinar o CNU e o CC foi necessário adotar para a fração fina da curva granulométrica (abaixo de 0,075 mm) a análise do solo sem a presença do defloculante, visto que somente assim tem-se o valor do D_{10} determinado para todas as misturas. Com base nestas informações elaborou-se a Tabela 30 a seguir que destaca que todas as misturas confeccionadas são desuniformes e mal graduadas.

Tabela 30 – CC, CNU e tipo de distribuição das misturas

Material	CC	CNU	Distribuição	
SB 85-15	0,03	187,50	Mal graduada	Desuniforme
SB 70-30	0,04	1062,50	Mal graduada	Desuniforme
SB 55-45	0,14	1875,00	Mal graduada	Desuniforme
SB 40-60	70,31	2000,00	Mal graduada	Desuniforme
SRCD 85-15	0,01	187,50	Mal graduada	Desuniforme
SRCD 70-30	0,05	1000,00	Mal graduada	Desuniforme
SRCD 55-45	0,18	1500,00	Mal graduada	Desuniforme
SRCD 40-60	55,80	1750,00	Mal graduada	Desuniforme

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Sabe-se que tanto a classificação SUCS como a classificação TRB foram desenvolvidas para validação de solos de locais de clima temperado. No entanto, como se pretende verificar qual semelhança as misturas de solo-brita ou solo-RCD teriam como se fossem um solo “natural” pelas classificações usuais, foram analisados os parâmetros das curvas granulométricas de cada mistura e, com base nos referidos sistemas de classificação foi

elaborada a Tabela 31 que mostra a classificação para as misturas de Solo-Brita e Solo-RCD nestas classificações SUCS e TRB.

Tabela 31 – Classificação das misturas com base nos sistemas SUCS e TRB

Material	Classificação	
	SUCS	TRB
SB 85-15	SM – Areia siltosa	A4
SB 70-30	SM – Areia siltosa	A-2-4
SB 55-45	GM- Pedregulho Siltoso	A-1-b
SB 40-60	GM- Pedregulho Siltoso	A-1-a
SRCD 85-15	SM – Areia siltosa	A4
SRCD 70-30	SM – Areia siltosa	A-2-4
SRCD 55-45	GM- Pedregulho Siltoso	A-1-b
SRCD 40-60	GM- Pedregulho Siltoso	A-1-a

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

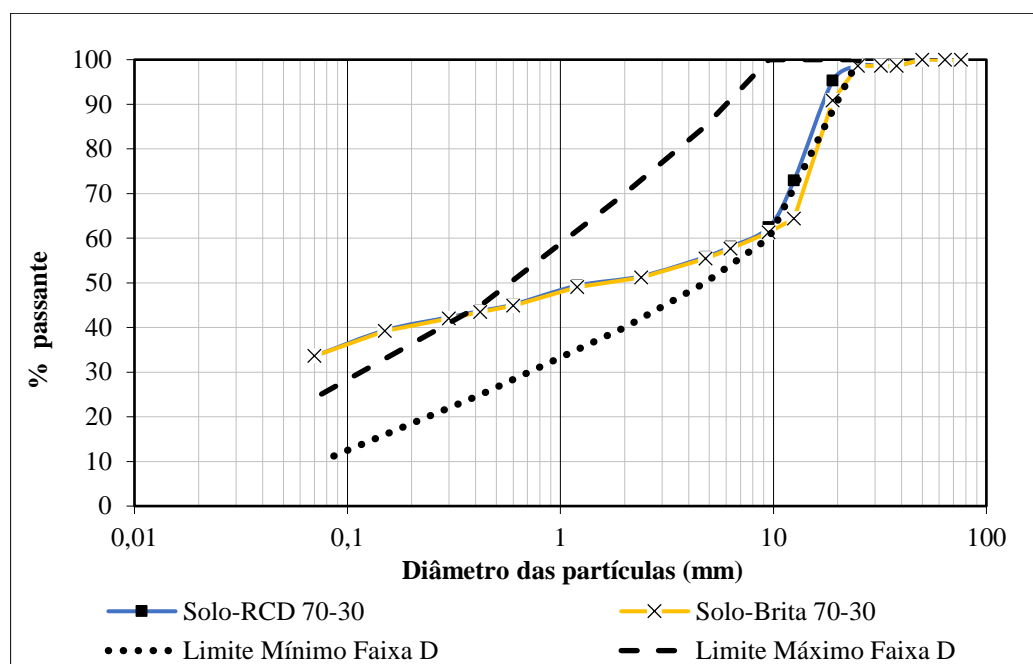
Analisando as composições em relação à classificação SUCS percebe-se que as misturas com 15% e 30% de agregados assemelharam-se a solos com mistura de areia e silte, porém quando se aumenta as proporções de agregados para 45% e 60% as misturas mudam de classificação e assemelham-se a pedregulhos com grande quantidade de finos.

No que diz respeito à classificação TRB, verifica-se que as misturas com agregados na proporção de 15% assemelharam-se aos solos classificados no grupo A4, solos siltosos não plásticos, ou moderadamente plásticos. As misturas com 30% de agregados assemelharam-se com a classificação A-2-4, que abrange materiais como pedregulhos e areia grossa. As misturas com proporções de 45% e 60% de agregados passam a ser classificadas como um material constituído de mistura bem graduada de fragmentos de pedra ou pedregulhos, areia grossa, areia fina e um aglutinante não plástico ou fracamente plástico, grupo A1.

É oportuno lembrar que o solo na condição natural não se enquadraram em nenhuma das faixas de limites granulométricos estabelecidas na ES 141 (DNIT, 2010) para camadas de base. Fazendo esta mesma análise para as misturas verificou-se que o solo-brita 85-15, solo-RCD 85-15, solo-brita 40-60 e solo-RCD 40-60 também não se enquadraram em nenhuma faixa de trabalho sugerida pelo DNIT.

As misturas de solo-brita 70-30 e solo-RCD 70-30 possuem semelhança granulométrica e ambas somente se enquadraram, de forma aproximada, nos limites da Faixa D (Figura 46).

Figura 46 – Curva granulométrica das misturas de solo-brita 70-30 e solo-RCD 70-30 na faixa “D” do DNIT



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Percebe-se que esta proporção ainda necessita principalmente de correção da fração fina, através de ajuste feito no processo produtivo na sequência de peneiras do britador ou da usina, para enquadramento completo dentro da Faixa D. Desse modo, foi feita uma análise matemática visando seguir o padrão normativo das faixas do DNIT e verificou-se em quais peneiras seriam necessários acréscimos ou reduções no teor de material passante para adequar as curvas. A Tabela 34 apresenta os resultados desta análise.

Tabela 32 – Ajustes do percentual passante para misturas de SB 70-30 e SRCO 70-30 para enquadramento na faixa D do DNIT

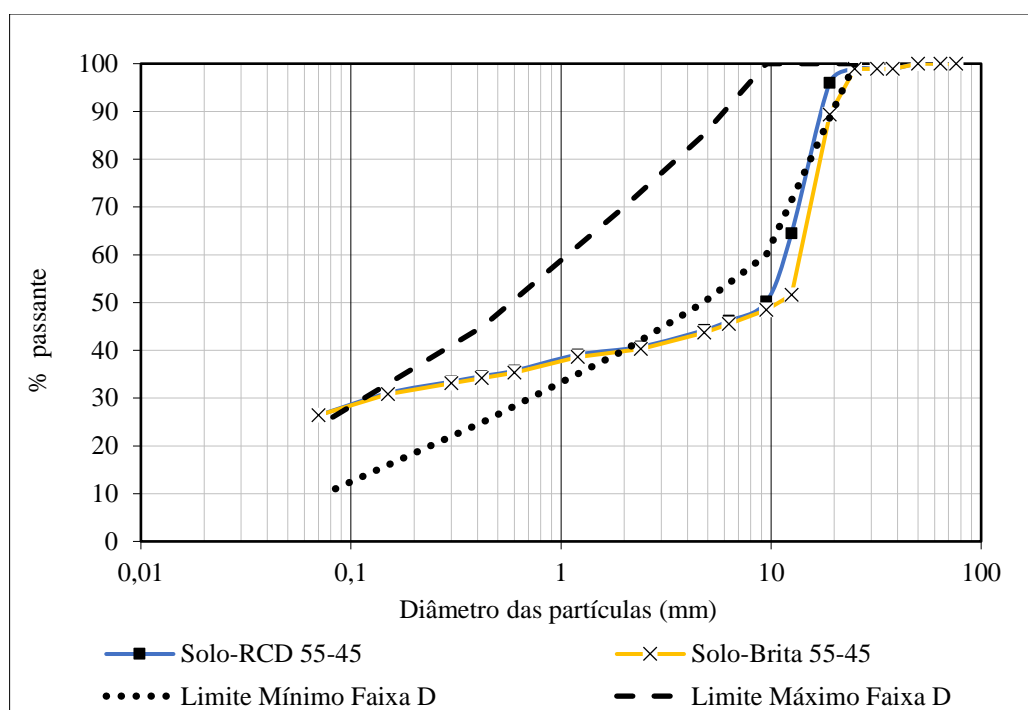
Mistura	Nº da Peneira	Malha da peneira (mm)	Redução / Acréscimo no % passante na peneira
Solo-Brita 70-30	1/2"	13,00	+ 5,62
	50	0,30	- 3,05
	100	0,15	- 7,22
	200	0,075	- 8,60
Solo-RCD 70-30	50	0,30	- 3,30
	100	0,15	- 7,37
	200	0,075	- 8,60

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Verificou-se que seriam necessários redução do percentual passante nas peneiras da fração fina (0,30, 0,15 e 0,075 mm) para as misturas de solo-brita 70-30 e solo-RCD 70-30. Especificamente para a mistura de solo-brita 70-30 também seria preciso acréscimo de 5,62% no percentual de material passante na peneira de 13 mm.

As misturas de solo-brita 55-45 e o solo-RCD 55-45 também apresentaram enquadramento aproximado na faixa D, porém ainda necessitam de ajustes, principalmente na fração grossa, para o enquadramento total, como se pode observar na Figura 47.

Figura 47 - Curva granulométrica das misturas de solo-brita 55-45 e solo-RCD 55-45 na faixa “D” do DNIT



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

A mesma análise matemática citada anteriormente foi realizada e verificou-se que seriam necessários acréscimos significativos de material na série de peneiras de 13 a 2,4 mm e ainda uma pequena redução de 1,40% no teor de material passante na peneira n° 200, para ambas as misturas. A Tabela 33 apresenta os resultados da análise para as misturas de SB 55-45 e SRCD 55-45.

Tabela 33 – Ajustes do percentual passante para misturas de SB 55-45 e SRCD 55-45 para enquadramento na faixa D do DNIT

Mistura	Nº da Peneira	Malha da peneira (mm)	Redução / Acréscimo no % passante
Solo-Brita 55-45	1/2"	13,0	+ 23,43
	3/8"	9,5	+ 11,54
	1/4"	6,3	+ 9,50
	4	4,8	+ 6,30
	8	2,4	+ 1,72
	200	0,075	- 1,40
Solo-RCD 55-45	1/2"	13,0	+ 10,57
	3/8"	9,5	+ 9,83
	1/4"	6,3	+ 8,84
	4	4,8	+ 5,77
	8	2,4	+ 1,24
	200	0,075	- 1,40

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

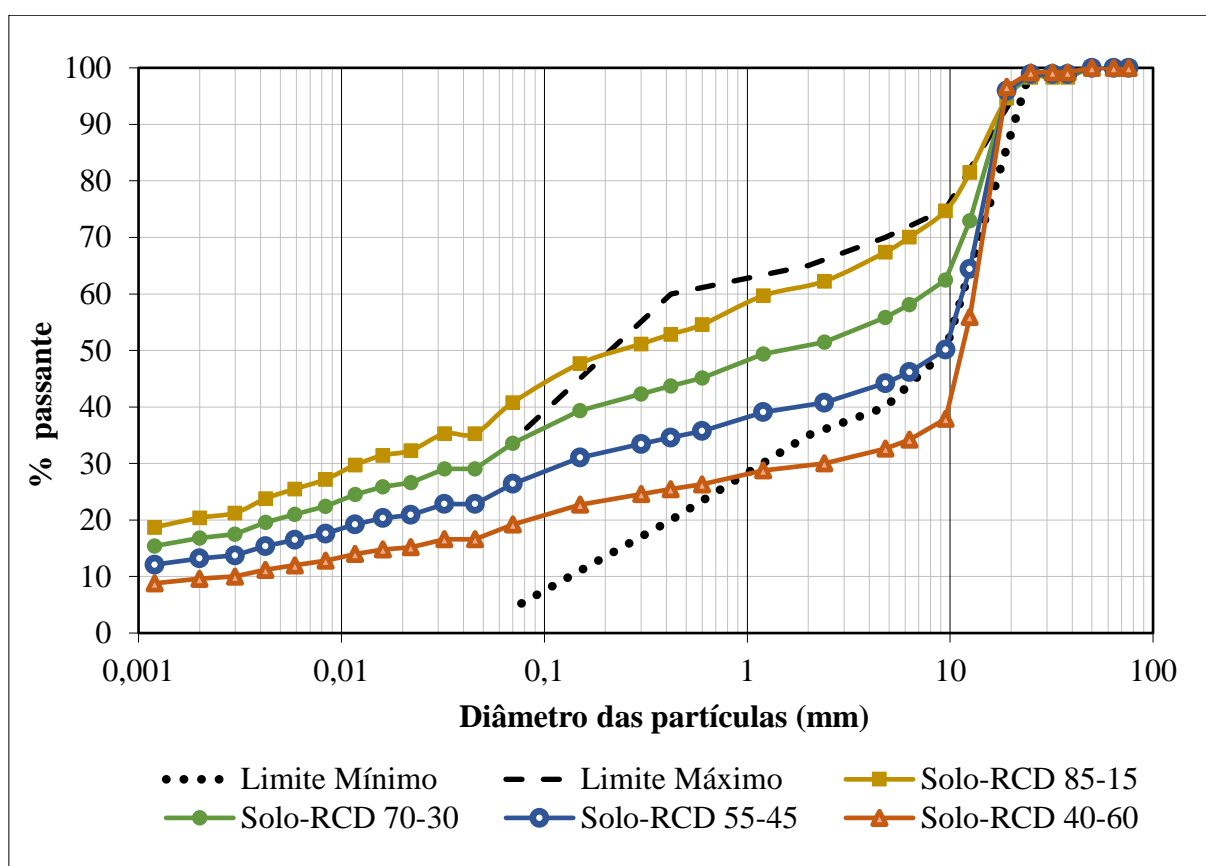
As verificações realizadas são simplesmente matemáticas, imaginando-se que se pudesse “montar” uma granulometria peneira a peneira. Na prática, são utilizadas proporções “globais” dos dois materiais, e, a formulação de uma granulometria contínua como em geral são as faixas granulométricas padronizadas nas especificações tradicionais não determinam necessariamente o comportamento mecânico melhor quando se trata de compor dois materiais tão distintos. Todas estas análises se prendem a atender critérios de faixas granulométricas tradicionais que podem, em algumas situações específicas, não representar a melhor formulação de combinação de materiais tão diferentes entre si.

Esta avaliação numérica é uma das possibilidades de ajuste, mas é difícil obter um percentual único de mistura que possa atender simultaneamente todos os critérios. Além disto, o mais importante a considerar é que a especificação de serviço que destaca tais recomendações está em revisão para se adequar aos critérios mecanísticos utilizados no método MeDiNa, levando em conta outros critérios tais como o MR e DP. Para estes ensaios, é esperado que o arranjo granulométrico tenha influência, mas não é determinante que se enquadre em certas faixas convencionais, sob certas condições. O ajuste no caso de mistura de dois materiais tão distintos pode ser feito não por tentativas, mas utilizando alguns critérios de empacotamento, como por exemplo a utilização do método Bailey adaptado como sugerido por Lima (2016, 2020), por exemplo.

Como as curvas granulométricas possuem distribuição descontínua, optou-se por avaliá-las também de acordo com as exigências da faixa de trabalho da norma de solo brita

descontínua do DER/ SP visto que, poderia apresentar melhor enquadramento. Solo-brita descontínuo tem sido utilizado na prática, mas preferencialmente com solos lateríticos, conforme apresentam Nogami e Villibor (1995), por exemplo. A Figura 48 mostra as curvas granulométricas das misturas de solo-RCD nas distintas proporções avaliadas nesta pesquisa, sobrepondo-as na faixa de trabalho proposta pela Especificação Técnica SLBD – DER - P00/003 (2005). As curvas de solo-brita também foram avaliadas de acordo com esta especificação e apresentaram comportamento semelhante ao verificado pelas curvas de solo-RCD.

Figura 48 – Misturas de solo-RCD desta pesquisa avaliadas na faixa de trabalho recomendada pela SLBD ET – DER - P00/003



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Analisando o comportamento das curvas na faixa de trabalho proposta verificou-se que o solo-RCD 70-30 e solo-RCD 55-45 foram os materiais que se adequaram totalmente às exigências da faixa granulométrica da referida especificação de serviço. Entende-se que as misturas de solo-brita 70-30 e solo-brita 55-45, devido à semelhança granulométrica, também possam apresentar o mesmo comportamento. Desse modo, de acordo com a especificação citada

do DER/SP, estes materiais estão adequados para uso quanto a este quesito, restaria somente a conferência dos demais parâmetros, mediante a execução dos ensaios específicos com os materiais, que constam na ET.

Diante do exposto, as misturas de solo-brita 70-30 e solo-RCD 70-30 foram selecionadas previamente como as misturas otimizadas desta pesquisa e seus resultados mecânicos e físicos serão utilizados no dimensionamento apresentado posteriormente.

4.3 Ensaio de Compactação Proctor

O solo puro utilizado nesta pesquisa exibe distribuição granulométrica não enquadrada em nenhuma faixa do DNIT para uso em camadas de base. Assim, os ensaios de comportamento mecânico buscam avaliar a interferência dos agregados de brita 1 e RCD incorporados ao solo visando seu emprego em camadas superiores independentes da distribuição granulométrica individualmente.

A primeira análise objetiva que se faz de um material ou composição de materiais sob o ponto de vista de aplicação em um pavimento é realizar ensaios de compactação na energia indicada para a camada onde se quer utilizar o material. É esperado que o aumento da energia de compactação melhore o desempenho mecânico de um material, embora como mostra a classificação MCT, este aumento de energia esbarra no arranjo máximo possível dos grãos e não se tem como crescer indefinidamente a energia. Na prática tradicional, utiliza-se a energia Normal para o subleito, a Intermediária quando se quer avaliar um material para sub-base e a Modificada quando se avalia para base.

Nesta pesquisa, optou-se por utilizar a energia Intermediária tanto para o solo puro como para as misturas de solo e agregados. Por meio destes ensaios de compactação foram obtidos os parâmetros de umidade ótima e massa específica máxima necessários à execução dos ensaios de desempenho mecânico. Cabe considerar aqui todo o conhecimento proveniente da classificação MCT que viabiliza o emprego de solos finos lateríticos em bases ou sub-bases de pavimento, já com ampla utilização em centenas de quilômetros de rodovias, como demonstrado por Bernucci *et al.* (2010).

Os resultados dos parâmetros de compactação Proctor do solo puro estão apresentados na Tabela 34.

Tabela 34 – Resultados da compactação do solo puro

Amostra	W ótima (%)	γ _d máx (kN/m ³)
Solo Puro	12,70	18,88

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

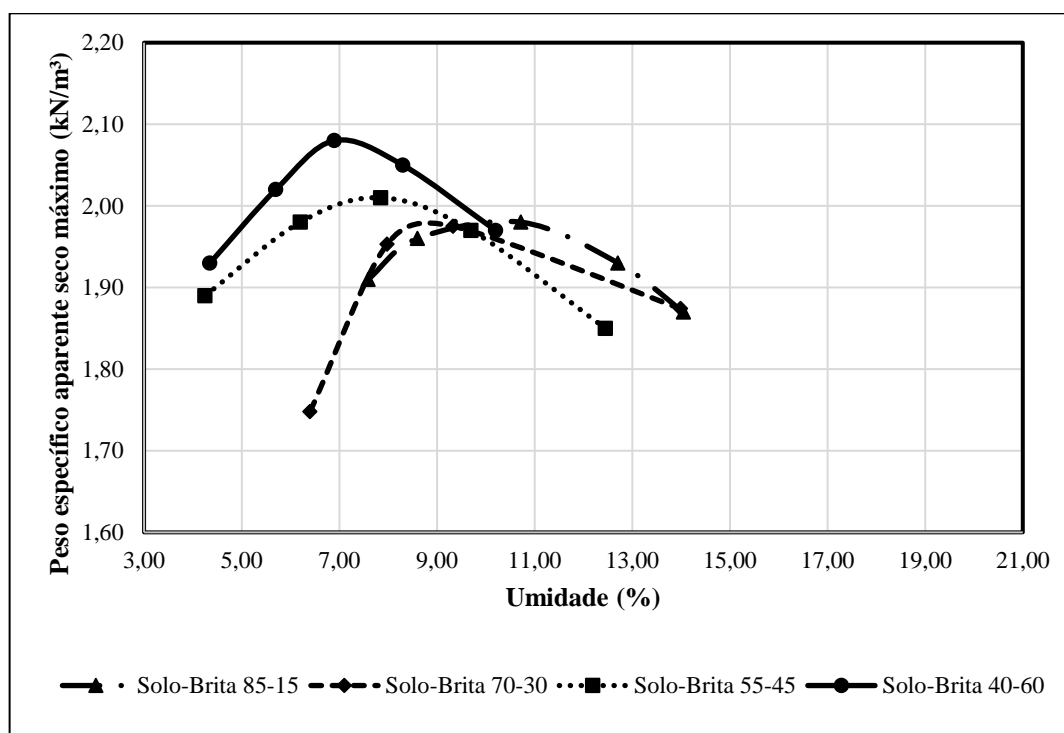
A Tabela 35 resume os parâmetros obtidos e a Figura 49 apresenta as curvas de compactação obtidas nos ensaios realizados nas misturas de solo-brita.

Tabela 35 – Resultados da compactação das misturas de solo-brita

Amostra	W ótima (%)	γ _d máx (kN/m ³)
SB 85-15	10,70	19,45
SB 70-30	8,80	19,80
SB 55-45	7,85	20,15
SB 40-60	6,90	20,85

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

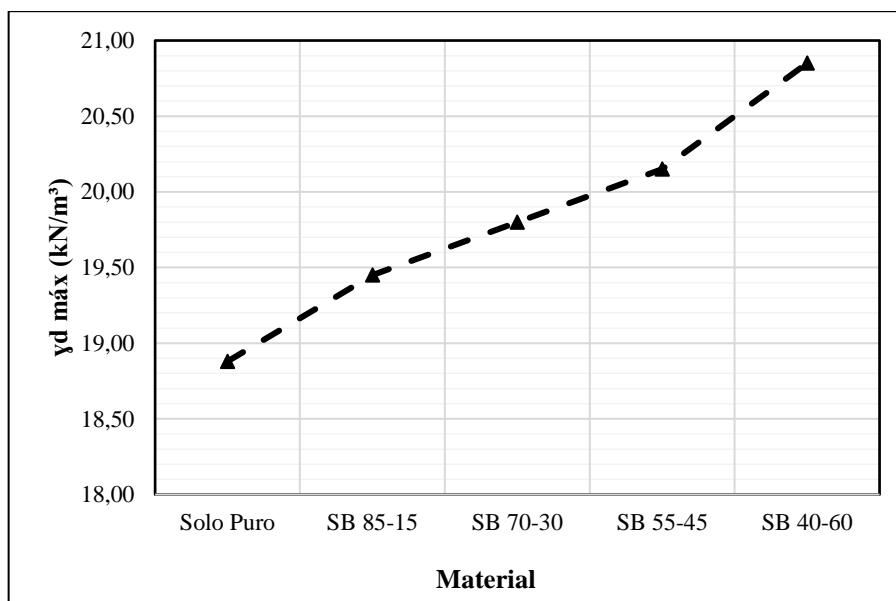
Figura 49 – Curvas de compactação das misturas de solo-brita



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

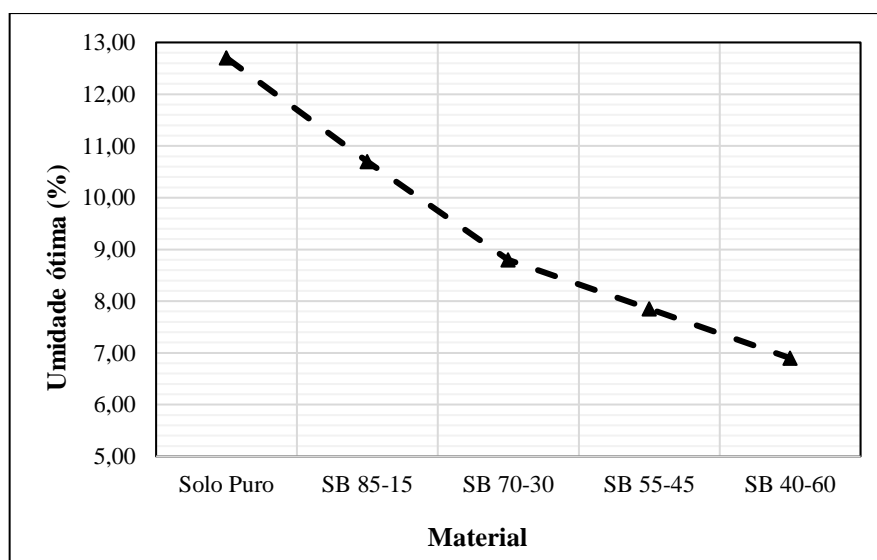
As Figuras 50 e 51 apresentam a variação do peso específico aparente seco máximo ($\gamma_{d\text{máx}}$) e da umidade ótima (W ótima) com o incremento de distintas proporções de brita 1 ao solo.

Figura 50 - Variação do $\gamma_{d\text{máx}}$ em função do percentual de brita 1 das misturas solo-brita desta pesquisa



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Figura 51 - Variação da umidade ótima em função do percentual de brita 1 das misturas solo-brita desta pesquisa

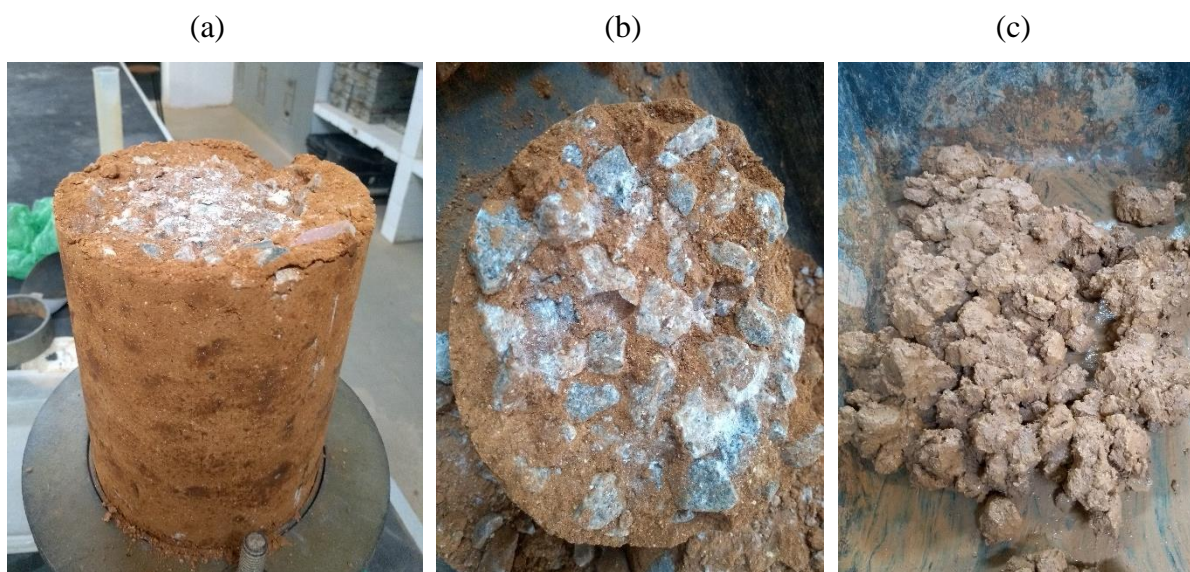


Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Através das Figura 50 e 51, pode-se verificar que, conforme se aumentou o percentual de agregados na mistura, ocorreu aumento gradativo do peso específico aparente seco máximo e redução do teor de umidade ótima, coerente com a superfície específica menor dos agregados em relação ao solo.

A Figura 52 mostra algumas etapas do procedimento de compactação de uma mistura de solo-brita. É importante destacar que o acréscimo de umidade torna a mistura semelhante a uma massa plástica à medida que se acrescenta água para execução do ensaio de compactação. Este comportamento ocorreu com todas as misturas analisadas nos ensaios de compactação e provavelmente teve reflexo diretamente na análise das propriedades mecânicas nos ensaios de Módulo de Resiliência. Nota-se claramente que os agregados da brita não tem tamanhos variados, concentrando-se em dimensões graúdas em relação ao solo argiloso, o que torna a mistura “descontínua” em parte.

Figura 52 – Procedimento de compactação: a) corpo de prova após extração do molde; b) detalhe dos agregados de brita 1 após compactação; c) mistura ao término do ensaio



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

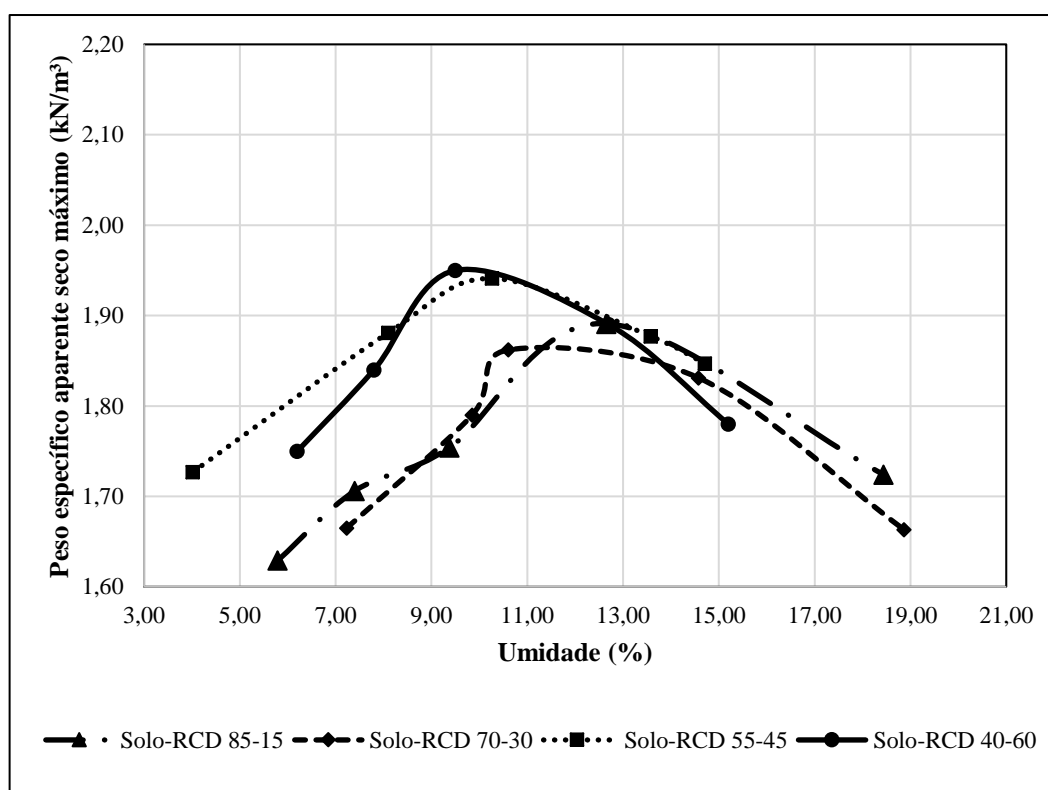
A Tabela 36 destaca os parâmetros dos ensaios de compactação realizados nas misturas de solo-RCD e a Figura 53 mostra as curvas de compactação obtidas nestes ensaios.

Tabela 36 - Resultados da compactação das misturas de Solo-RCD desta pesquisa

Amostra	W ótima (%)	γ _d máx (kN/m ³)
SRCD 85-15	12,70	18,90
SRCD 70-30	11,40	18,65
SRCD 55-45	10,30	19,40
SRCD 40-60	9,50	19,65

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

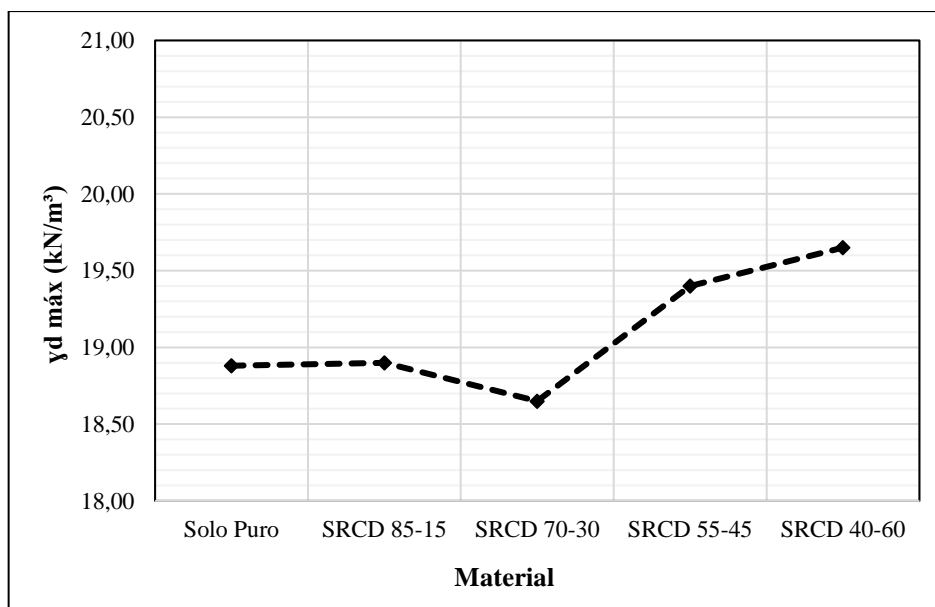
Figura 53 – Curvas de compactação das misturas de solo-RCD



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

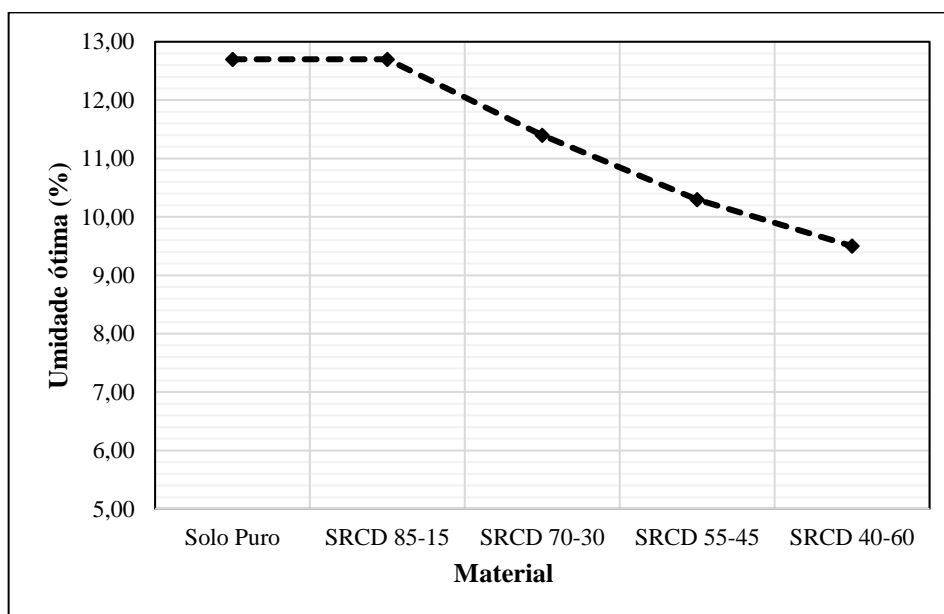
As Figuras 54 e 55 apresentam a variação do peso específico aparente seco máximo e da umidade ótima com a variação da proporção de RCD nas misturas com solo.

Figura 54 - Variação do $\gamma_{d\text{máx}}$ em função do percentual de RCD das misturas desta pesquisa



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Figura 55 - Variação da umidade ótima em função do percentual de RCD das misturas desta pesquisa



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Em relação ao acréscimo de agregados de RCD na composição de misturas com o solo, verificou-se que, diferentemente do ocorrido com a inserção dos agregados de brita 1, a inserção de RCD ocasionou um decréscimo nos valores do peso específico aparente seco máximo, à medida que ocorreu aumento do percentual de RCD incorporado ao solo até composições com

70% solo e 30% de RCD. Este efeito deve estar associado à diferença de densidade dos grãos da brita e do RCD e em parte pode estar associado ao elevado índice de quebra dos grãos verificado durante a execução da compactação. A composição de solo-RCD com 55% de solo e 45% de agregados resultou um aumento do peso específico aparente seco máximo em relação aos valores das misturas com menor proporção de agregados e ao solo puro. Os resultados de umidade ótima apresentam diminuição gradativa conforme aumenta-se a proporção dos agregados na mistura.

É importante considerar a possibilidade de quebra de alguns agregados de RCD para justificar estas diferenças e até a variabilidade dos materiais que foram utilizados para compor cada corpo de prova. Fernandes (2004) e outros autores relataram em suas pesquisas sobre a elevada quebra das partículas maiores de resíduos após procedimento de compactação.

A Figura 56 mostra parte de um corpo de prova de solo-RCD 55-45 após a compactação. Analisando o corpo de prova desfeito, verifica-se que a quebra de grãos que os agregados de RCD sofrem com o procedimento de compactação por impacto e pode-se perceber a descontinuidade dos tamanhos dos agregados de RCD em relação ao solo. Este efeito ocorreu em todas as misturas analisadas e provavelmente se refletirá nas propriedades mecânicas destas misturas. Quanto maior for a proporção de RCD em relação ao solo, mais contato se terá entre as frações graúdas e a quebra aumenta. Fernandes (2004) realizou em sua pesquisa uma análise granulométrica dos agregados após os ensaios de módulo de resiliência e verificou alteração na composição granulométrica dos agregados, com aumento das partículas entre o material passante na peneira nº 10 e retido na nº 40, e relacionou este aumento à quebra das partículas.

Figura 56 – Resultados do procedimento de compactação do Solo-RCD: a) corpo de prova extraído após primeiro ponto da compactação; b) corpo de prova aberto ao meio



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Comparando as misturas de solo-brita e solo-RCD no que diz respeito aos valores de γ_d máx, constata-se que as composições com o agregado granítico proporcionaram os maiores valores de peso específico aparente seco máximo, porém, bem próximos em ordem de grandeza entre as duas misturas. Ao se comparar a umidade ótima das misturas de solo-brita com as misturas de solo-RCD, percebe-se que, para as composições de solo-brita com maiores teores de agregados, tem-se significativa queda do teor de umidade ótima, e este comportamento foi menos significativo para as composições de solo-RCD, provavelmente devido à composição variada das partículas dos resíduos, ao alto índice de absorção e à elevada abrasão sofrida por estes agregados, como indicado na descrição das características dos materiais utilizados nesta pesquisa.

Através dos ensaios de compactação foi possível também determinar os índices físicos clássicos: índice de vazios (e), porosidade (η), peso específico “natural” (γ_n) e saturação (S_r). Para a condição das amostras compactadas nos pesos específicos aparentes secos máximos e umidade ótima foram calculados os índices físicos (Tabela 37) considerando o peso específico das partículas sólidas (γ_s) igual a 25,7 kN/m³, conforme obtido no ensaio de massa específica dos grãos, e utilizando as seguintes equações/correlações:

$$\eta = 1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_s} \quad \text{Equação 9}$$

$$e = \frac{\eta}{1-\eta} \quad \text{Equação 10}$$

$$\gamma_n = \gamma_d \cdot (1 + h) \quad \text{Equação 11}$$

$$S_r = \frac{h \cdot \gamma_s}{e \cdot \gamma_w} \quad \text{Equação 12}$$

Onde:

η – porosidade (%);

γ_d – peso específico aparente seco (kN/m³);

γ_s – peso específico das partículas sólidas (kN/m³);

e - índice de vazios (adimensional);

γ_n – peso específico “natural” da amostra após compactação (kN/m³);

h - umidade ótima da mistura;

S_r – saturação da amostra na umidade ótima;

γ_w – peso específico da água ≈ 10 kN/m³.

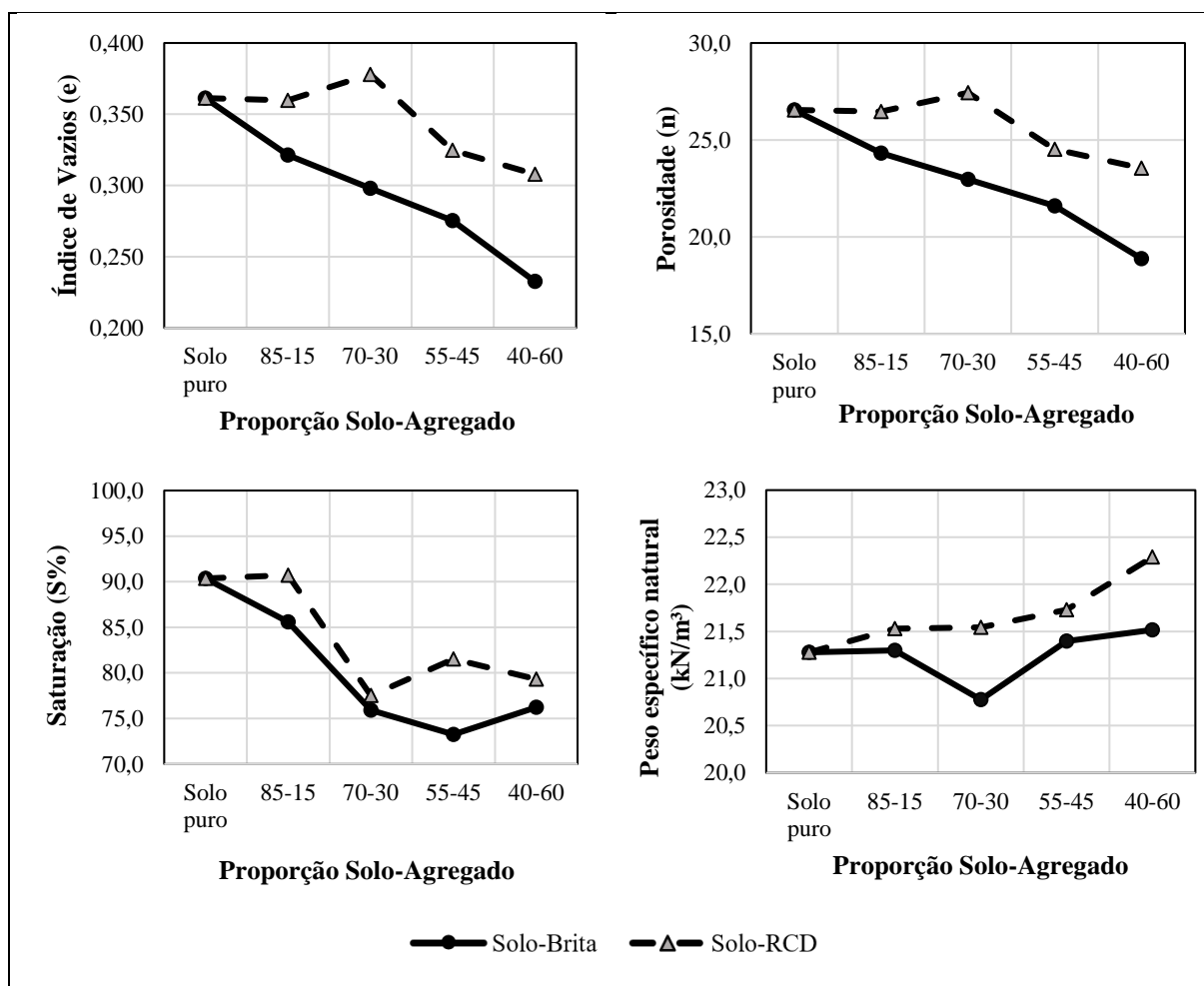
Tabela 37 – Índices físicos do solo e das misturas desta pesquisa após compactação

Material	e	η (%)	γ_n (kN/m ³)	Sr (%)
Solo Puro	0,36	26,54	21,28	90,36
SB 85-15	0,32	24,32	21,53	85,58
SB 70-30	0,30	22,96	21,54	75,90
SB 55-45	0,28	21,60	21,73	73,25
SB 40-60	0,23	18,87	22,29	76,23
SRCD 85-15	0,36	26,46	21,30	90,72
SRCD 70-30	0,38	27,43	20,78	77,50
SRCD 55-45	0,32	24,51	21,40	81,51
SRCD 40-60	0,31	23,54	21,52	79,30

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

A Figura 57 apresenta as variações dos índices de vazios, porosidade, peso específico natural e saturação em função do percentual de agregados presentes nas misturas. A análise destes índices foi realizada no teor de umidade ótima de todas as misturas confeccionadas.

Figura 57 – Variação dos índices físicos em função do percentual de agregados das misturas



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Por meio dos índices físicos das misturas pode-se inferir o comportamento sob distintos aspectos e compreender o desempenho destas com distintas proporções de agregados. A saturação demonstra o quanto de água está presente nos vazios do solo e/ou mistura. Ao se analisar este índice (S_r) verifica-se que o acréscimo de agregados proporciona uma diminuição da saturação das misturas. Entende-se que o aumento da quantidade de agregados implica em maior absorção de água por estes o que pode ter acarretado esta diminuição. No geral, verificou-se aumento gradativo do peso específico natural das misturas, ou seja, as misturas que possuem os maiores teores de agregados também obtiveram pesos naturais mais elevados.

Percebe-se que o índice de vazios apresenta comportamento decrescente com o acréscimo de agregados na mistura, denotando então que esta diminuição proporciona melhor arranjo da estrutura da mistura, tornando-a mais densa. Este comportamento também é verificado na análise da porosidade, que também decai com o aumento percentual de brita e RCD, por serem parâmetros vinculados.

4.4 Ensaios Triaxiais Dinâmicos

4.4.1 Módulo de Resiliência

Na execução dos ensaios de compactação para realização dos ensaios triaxiais dinâmicos percebeu-se que a umidade encontrada como ótima nas curvas de compactação associava-se à processos de exsudação de água, conferindo pouquíssima trabalhabilidade para as amostras. Isto fez com que se interpretasse que os teores de umidade associados a tais pontos não representavam com fidedignidade a umidade ótima. Então, na moldagem dos corpos de prova para os ensaios de módulo, adotou-se o valor de umidade ótima com 1% a menos no percentual verificado nas curvas de compactação no cilindro Proctor.

Esta interpretação baseou-se também no desempenho de alguns ensaios de módulo realizados inicialmente com teor de umidade bem próximo da umidade ótima obtida nos ensaios de compactação, que resultaram em valores de deformações plásticas acima da capacidade de medição do equipamento. Assim, para permitir a realização dos ensaios de MR, foram adotados os valores de umidade indicados na Tabela 38, porque também não havia tempo nem material na COPPE/UFRJ para refazer as curvas de compactação. Por outro lado, no campo também se aceita esta variação de umidade no controle da compactação.

Tabela 38 – Teores de umidade obtidos nos ensaios de compactação e adotados para os ensaios de módulo de resiliência

Amostra	W ótima (%)	W ótima adotada (%)
Solo Puro	12,70	11,70
SB 85-15	10,70	9,70
SB 70-30	8,80	7,80
SB 55-45	7,85	6,85
SB 40-60	6,90	5,90
SRCD 85-15	12,70	11,70
SRCD 70-30	11,40	10,40
SRCD 55-45	10,30	9,30
SRCD 40-60	9,50	8,50

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Ao término dos ensaios de MR foram obtidos os teores de umidade dos corpos de prova de solo e das misturas ensaiadas e, ao se analisar tais teores, verificou-se que estes se encontravam próximos dos teores de umidade ótima adotados, ou seja, as variações ocorridas foram menores que 1% para a maioria das amostras ensaiadas. Essa variação e dificuldade de obtenção do teor exato de umidade ótima adotada relaciona-se bastante com a heterogeneidade das misturas, principalmente àquelas com agregados de RCD, visto que a heterogeneidade característica dos resíduos de construção e demolição pode proporcionar comportamento distinto em cada amostra de mistura ensaiada.

Devido a constante prática dos ensaios de módulo de resiliência no Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ, avaliou-se que a determinação da umidade ótima nos cilindros Proctor ou no cilindro de CBR, podem ter resultado em parâmetros de umidade ótima e densidade máxima que não foram reproduzidos de forma adequada quando se compacta o corpo de prova no cilindro tripartido, de altura de 10 x 20 cm (ou de 15 x 30 cm, dependendo do tamanho máximo nominal do material) com uso de 10 camadas. Portanto, com distribuição dos golpes mais efetiva em relação ao volume. Entende-se que o ideal seria realizar os ensaios de compactação no mesmo tipo de molde e com a mesma quantidade de camadas, conforme recomendado nas normas dos ensaios de MR e de DP atuais. O método de ensaio ME 134 (DNIT, 2018) relata sobre a execução dos ensaios de compactação com maquinários e cilindros semelhantes aos utilizados para desenvolvimento dos ensaios de módulo de resiliência, porém para esta pesquisa os ensaios de compactação já haviam sido realizados previamente no IFRN, antes do envio de material para COPPE e assim optou-se por aproveitar os resultados.

Desse modo, analisou-se o impacto dessa modificação através da verificação da magnitude do peso específico seco máximo, obtido nos ensaios de módulo de resiliência, com o peso específico seco máximo obtido nos ensaios de compactação realizado no IFRN (Tabela 39).

Tabela 39 – Análise dos pesos específicos secos máximos nos dois processos de compactação

Material	Ensaio de Compactação	Compactação para MR	Diferença
	γ_d máx (kN/m ³)	γ_d máx (kN/m ³)	Percentual
Solo puro	18,88	21,62	14,5%
SB 85-15	19,45	21,04	8,2%
SB 70-30	19,80	22,39	13,1%
SB 55-45	20,15	22,89	13,6%
SB 40-60	20,85	22,45	7,7%
SRCD 85-15	18,90	21,64	14,5%
SRCD 70-30	18,65	21,69	16,3%
SRCD 55-45	19,40	21,34	10,0%
SRCD 40-60	19,65	20,60	4,8%

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Assim, foi possível constatar que a modificação no tamanho do cilindro de compactação e na quantidade de camadas implica em significativo aumento do peso específico seco máximo obtido para as compactações realizadas nos CPs destinados aos ensaios de módulo de resiliência. Este fato confirma que a energia aplicada em mais camadas no molde tripartido acaba acomodando melhor os materiais e isto se reflete no aumento do valor do peso específico, tendo resultado para algumas amostras em um aumento de até 16% no valor de peso específico seco máximo.

A Tabela 40 destaca os valores mínimo e máximo de módulo de resiliência verificados nos ensaios com o solo puro.

Tabela 40 – Resultado do módulo de resiliência médio do solo puro em três corpos de prova

Amostra	CP	MR mínimo (MPa)	MR máximo (MPa)	MR médio (MPa)
Solo Puro	1	182	665	339
	2	151	608	
	3	209	539	

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Em relação aos valores de módulos de resiliência encontrados para o solo puro, os MR mínimos variaram de 182 a 209 MPa, os máximos variaram de 539 a 665 MPa, apresentando média geral de 339 MPa. Note-se que, apesar de ser um solo argiloso não laterítico, os MR são bastante elevados, lembrando que o ensaio é feito na umidade ótima ou o mais próximo possível desta. Eventualmente a variação de umidade pós compactação pode diminuir estes valores em algum percentual.

Norback (2018) realizou ensaios de MR para os materiais que compuseram as misturas de sua pesquisa e obteve os seguintes resultados: o solo de comportamento laterítico LG' apresentou valor médio de 353 MPa, os solos não-lateríticos NA' e NG' apresentaram módulos médios de 123 e 303 MPa, respectivamente. Lima (2020) também realizou ensaios de módulo com solos classificados como NS', NA', LA', NG' e LG', todos compactados na energia intermediária. A autora obteve valores de MR variando da seguinte forma: para o solo NS' módulo de 178-336 MPa, para o solo NA' módulo de 241-319 MPa, para o solo LA' módulo de 382-917 MPa, para o solo NG' módulo de 151-294 MPa e para o solo LG' módulo de 250-547 MPa.

Com base nos valores, mínimos, máximos e médio obtidos para o módulo de resiliência do solo puro, bem como os valores apresentados em pesquisas anteriores entende-se que o solo analisado nesta pesquisa apresentou desempenho satisfatório com magnitude de MR semelhante ao comportamento solo laterítico do tipo LG'. É importante aqui lembrar que o solo utilizado neste estudo advém principalmente do horizonte B, como visto na apresentação dos materiais, e que Bernucci *et al.* (2010) destacam que em várias regiões brasileiras têm disponibilidade de solos lateríticos no horizonte superficial B com bom desempenho em camadas do pavimento.

O valor médio de MR, no geral, foi obtido através da média dos 3 corpos de prova de cada material. Porém, novamente ressalta-se que ao se trabalhar com material granular como brita e RCD misturado ao solo, pode ocorrer dificuldades na obtenção exata da umidade de compactação devido a algumas misturas receberem eventualmente um pouco mais de agregado graúdo, outras menos pela descontinuidade granulométrica, tornando-se em alguma medida variável a proporção do material que vai para o ensaio. Esta dificuldade implica diretamente na repetibilidade dos ensaios, visto que o acréscimo de água para misturas com as mesmas proporções globais de materiais também apresentou variações. Dessa forma, alguns ensaios de módulo de resiliência feitos no início da pesquisa não tiveram sua execução finalizada devido a elevadas deformabilidades e/ou trincas no corpo de prova e para estes casos o valor médio de MR foi obtido através da média de 2 corpos de prova. A Tabela 41 apresenta os resultados dos

valores mínimos, máximos e médios dos módulos de resiliência obtidos nos ensaios realizados com as misturas de Solo-Brita.

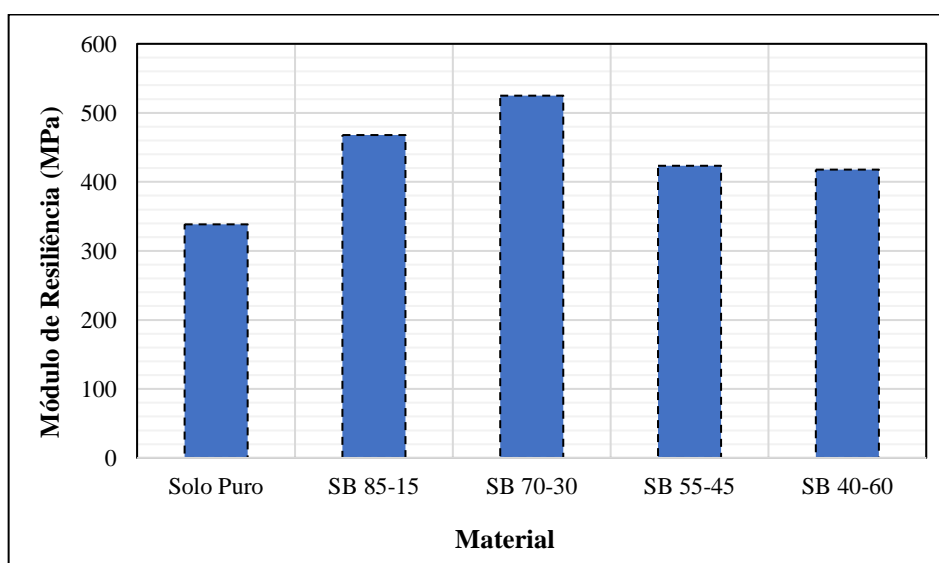
Tabela 41 – Resultados dos módulos de resiliência médios das misturas de Solo-Brita considerando dois ou três CPs por amostra

Amostra	CP	MR mínimo	MR máximo	MR médio
SB 85-15	1	-	-	468
	2	349	600	
	3	302	972	
SB 70-30	1	333	862	525
	2	-	-	
	3	340	855	
SB 55-45	1	260	618	424
	2	261	553	
	3	334	781	
SB 40-60	1	203	524	418
	2	-	-	
	3	379	761	

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Analisando os valores médios apresentados na Tabela 41, verificou-se que a proporção com 70% de solo e 30% de brita 1 foi a que apresentou o maior valor médio de MR, com 525 MPa. Para ilustrar graficamente o desempenho do solo puro e das variadas misturas de solo-brita frente aos valores médios de módulo de resiliência, elaborou-se também a Figura 58.

Figura 58 – Módulo de resiliência médio em função da proporção de agregados de brita 1 desta pesquisa



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Nos estudos desenvolvidos por Norback (2018) foram analisados o MR de uma brita de granito-gnaiss (que apresentou valor médio de 356 MPa), bem como de misturas de solo-brita preparadas com três tipos de solos e diferentes proporções da brita sob forma combinada de brita 1, brita 0 e o pó-de-pedra. Os módulos de resiliência variaram de 156 MPa, para uma mistura composta de 35% de solo NG', 25% de brita 1, 20% de brita 0 e 20% de pó-de-pedra, até 433 MPa, para uma mistura composta por 30% de solo NG', 30% de brita 1 e 40% de brita 0. Comparando tais resultados com os desta presente pesquisa, percebe-se que as misturas de solo-brita analisadas encontram-se com módulo de resiliência médio com magnitude semelhante aos módulos apresentados na pesquisa da referida autora.

A Tabela 42 apresenta os resultados dos valores mínimos, máximos e médios dos módulos de resiliência obtidos nos ensaios realizados com as misturas de Solo-RCD.

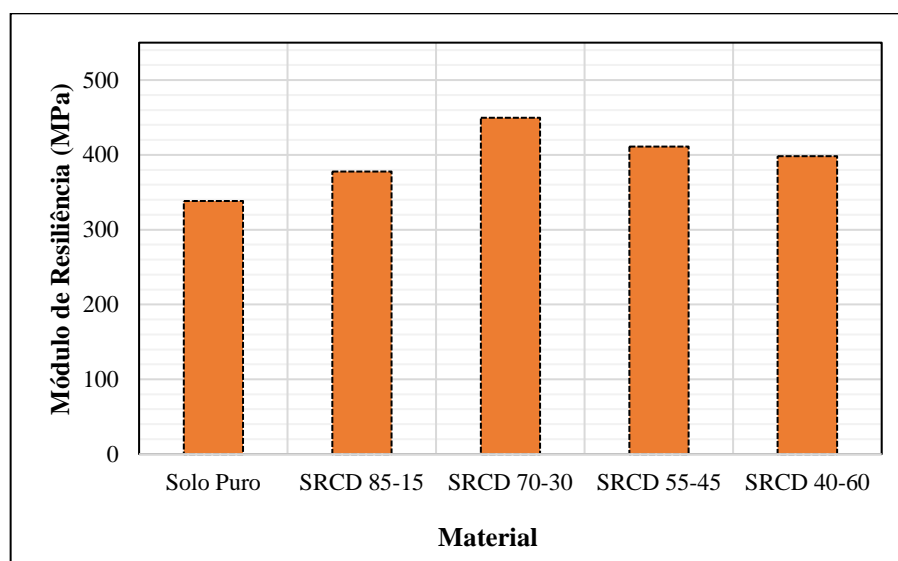
Tabela 42 – Resultados dos módulos de resiliência médios das misturas de Solo-RCD

Amostra	CP	MR mínimo (MPa)	MR máximo (MPa)	MR médio (MPa)
SRCD 85-15	1	-	-	378
	2	282	709	
	3	166	748	
SRCD 70-30	1	244	990	450
	2	290	865	
	3	291	854	
SRCD 55-45	1	252	633	426
	2	279	650	
	3	272	705	
SRCD 40-60	1	223	536	420
	2	317	915	
	3	328	806	

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

A Figura 59 foi elaborada para se analisar as consequências da adição dos agregados de RCD em relação ao solo puro. Os resultados médios de módulo de resiliência para as misturas de Solo-RCD mostram que a mistura com 70% de solo e 30% de RCD foi a que apresentou o melhor valor de MR, com média de 450 MPa. A magnitude dos módulos médios obtidos para as quatro proporções de Solo-RCD também se encontra semelhante aos módulos de misturas de solo-agregado apresentados em estudos anteriores desenvolvidos por Fernandes (2004), Norback (2018), Santos *et al.* (2019) e Lima (2020).

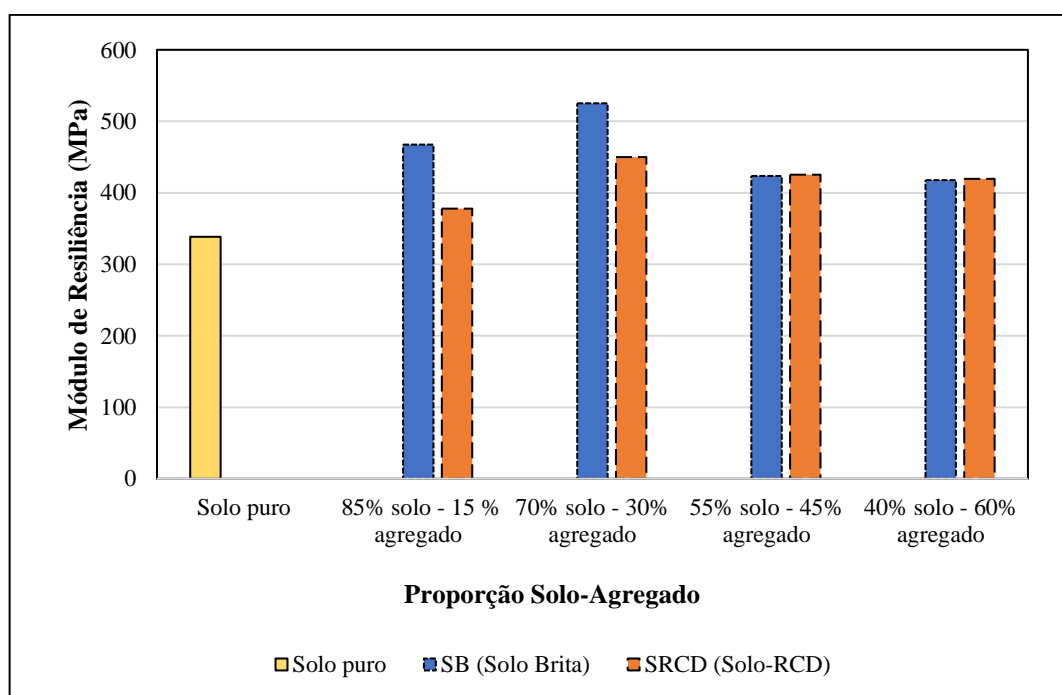
Figura 59 – Módulo de resiliência médio em função da proporção de agregados de RCD desta pesquisa



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Através da Figura 60, pode-se analisar simultaneamente o desempenho de todas as misturas confeccionadas, de solo, solo-brita e solo-RCD.

Figura 60 – Comparativo entre o desempenho do MR do solo e das misturas de solo-brita e solo-RCD desta pesquisa



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

A Tabela 43 apresenta uma verificação acerca do desvio padrão (em MPa) dos valores médios de MR (MPa) obtidos em todos os ensaios executados.

Tabela 43 – Análise das médias e desvio padrão dos MR de todas as amostras ensaiadas nesta pesquisa

Material	CP	Intervalo de MR (MPa) para o conjunto de tensões	MR médio por CP (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	MR médio total (MPa)
Solo puro	1	182-665	372	44	338
	2	151-608	289		
	3	209-539	354		
SB 85-15	1	-	-	46	468
	2	349-600	435		
	3	302-972	500		
SB 70-30	1	333-862	548	32	525
	2	-	-		
	3	340-855	502		
SB 55-45	1	260-618	410	51	423
	2	261-553	380		
	3	334-781	480		
SB 40-60	1	203-524	310	153	418
	2	-	-		
	3	379-761	526		
SRCD 85-15	1	-	-	103	378
	2	282-709	451		
	3	166-748	305		
SRCD 70-30	1	244-990	441	28	450
	2	290-865	427		
	3	291-854	481		
SRCD 55-45	1	252-633	401	27	425
	2	279-650	421		
	3	272-705	454		
SRCD 40-60	1	223-536	330	77	419
	2	317-915	466		
	3	328-806	462		

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Fazendo um comparativo entre os módulos médios das misturas de solo-brita e solo-RCD, percebe-se que em relação ao solo na condição pura, os módulos de resiliência das misturas de solo-brita e de solo-RCD tiveram valores crescentes até a proporção da mistura com 30% de agregados e valores decrescentes para proporções com mais de 30% de agregados, porém todos os valores médios de módulo de resiliência obtidos para as misturas foram

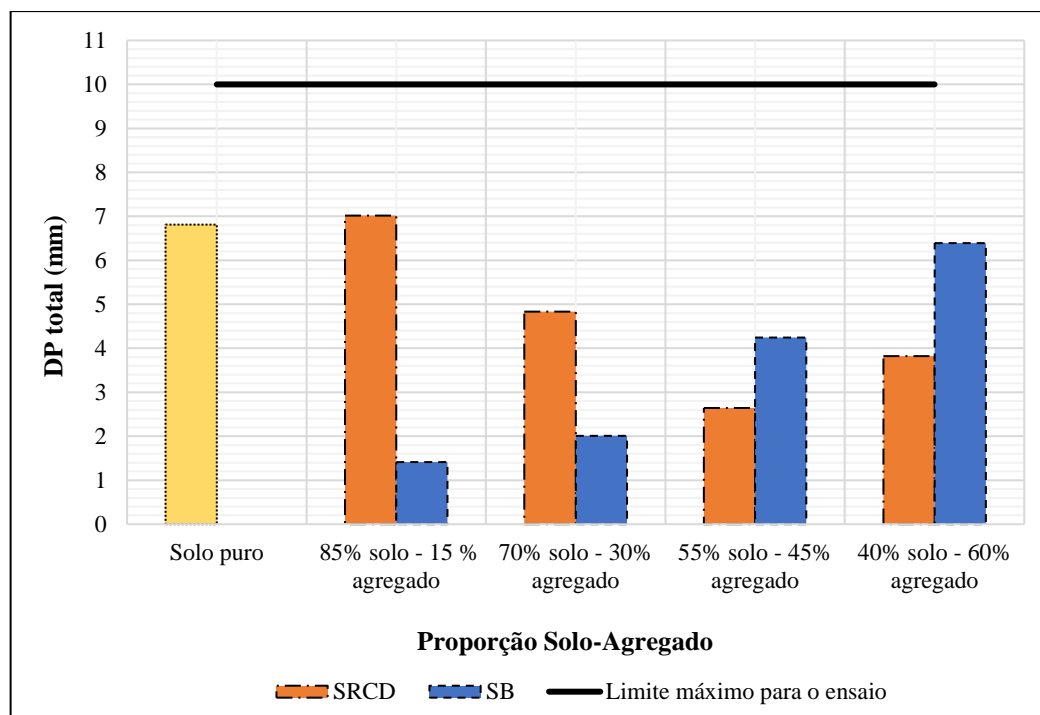
superiores aos valores médios de MR do solo na condição pura. As misturas SB 85-15 e SB 70-30 apresentaram desempenho mais expressivo em relação às misturas SRCD 85-15 e SRCD 70-30. Tanto nas misturas de solo-brita como nas misturas de solo-RCD a composição otimizada entre as proporções ensaiadas, ou seja, a composição que apresentou maior magnitude de módulo de resiliência foi a com 70% de solo e 30% de agregados.

É interessante destacar também que as misturas com 45% e 60% de agregados apresentaram módulo de resiliência médio semelhante com tendência de estabilização, ou seja, nenhum ganho ou perda expressiva na magnitude do módulo em função do aumento do percentual de agregados.

O desvio padrão foi calculado com base nos valores dos módulos de resiliência médios obtidos em cada ensaio. Não foi verificado comportamento característico do desvio padrão em função do teor de agregados das misturas, mas sim certa dispersão dos resultados. Fatores como heterogeneidade dos materiais e a interferência humana nos procedimentos de preparação dos corpos de prova eventualmente podem contribuir para a dispersão. Este desvio padrão alto não provém totalmente de dispersão dos ensaios entre três corpos de prova do mesmo material, parte resulta de o comportamento dos materiais serem não lineares com o estado de tensões. Assim o valor médio é simplesmente uma forma simplificada de comparar os valores entre as várias configurações de arranjo granulométrico dos materiais. Isto será visto em item seguinte onde os modelos de comportamento não linear serão apresentados.

O ensaio de módulo de resiliência fornece também dados sobre a deformação plástica durante a fase de condicionamento e a deformação plástica total sofrida pelas amostras ao final do ensaio. Na execução dos ensaios por limitações do próprio sistema de aquisição de dados não é possível ensaiar amostras que apresentem deformações acima de 10 mm. Esse cuidado foi programado porque o ensaio visa representar a parcela do comportamento elástico somente, portanto um corpo de prova que mudasse muito seu estado de compactação não é a condição adequada para avaliar a parte elástica. Como relatado anteriormente, algumas amostras apresentaram a deformação plástica máxima permitida para o ajuste dos LVDTs e o ensaio teve que ser interrompido. Com o intuito de avaliar a média das deformações permanentes ocorridas durante o ensaio de MR (poucos ciclos de carga em relação ao ensaio de DP propriamente dito, mas com variados estados de tensão) nas amostras ensaiadas, elaborou-se a Figura 61.

Figura 61 – Dados sobre a deformação plástica média das amostras desta pesquisa



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

No geral, a magnitude da deformação plástica total do solo mostrou-se superior à maioria das amostras de misturas. O pequeno aumento ocorrido na amostra de SRCD 85-15 provavelmente é um ponto fora da curva e relaciona-se com o fato de a média ter sido obtida através de duas amostras e não de três como planejado inicialmente. Para as misturas de solo-brita, verificou-se um aumento na deformação plástica total com o aumento do percentual de agregados naturais. Porém, nas misturas de solo-RCD, percebe-se o oposto, ou seja, a diminuição da deformação plástica total com o aumento do percentual de agregados até as amostras de SRCD 55-45, provavelmente devido ao melhor arranjo das misturas proporcionado pela inserção deste tipo de agregado. Para as amostras de SRCD 40-60 ocorre ligeiro aumento da deformação em relação à amostra anterior de SRCD 55-45. A média da deformação plástica total dos corpos de prova ensaiados foi bastante inferior ao limite máximo de 10 mm da máquina triaxial.

É importante considerar que no ensaio de MR o número de ciclos de carga aplicados é bastante baixo (± 100) em relação ao ensaio de deformação permanente que aplica até 150.000 ciclos. Portanto, esta análise da deformação plástica total é simplesmente qualitativa. Muitos materiais podem apresentar grandes deformações plásticas nos primeiros ciclos e depois acomodarem, por exemplo, por isso a importância da execução dos ensaios de Deformação Permanente.

4.4.1.1 Parâmetros das regressões dos modelos de comportamento do MR

Através do ensaio de módulo de resiliência, obtiveram-se também os parâmetros das equações adotadas para avaliação da correlação das tensões confinante e desvio com o MR dos materiais estudados. A Tabela 44 mostra os parâmetros obtidos na regressão potencial e os coeficientes de correlação obtidos para cada amostra ensaiada.

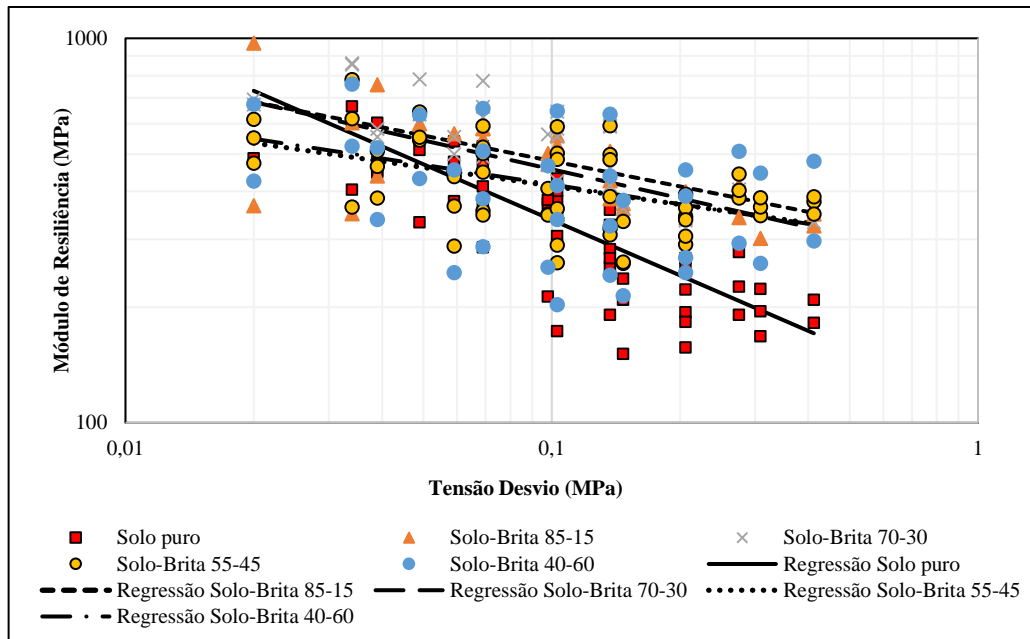
Tabela 44 - Parâmetros regressão potencial para cada CP ensaiado nesta pesquisa

Material	CP	Umidade do CP (%)	Tensão Confinante $MR = k_1 \times \sigma_3^{k_2}$			Tensão Desvio $MR = k_1 \times \sigma d^{k_2}$		
			k ₁	k ₂	R ²	k ₁	k ₂	R ²
Solo puro	1	12,48	107,97	-0,402	0,398	118,44	-0,466	0,801
	2	12,76	94,00	-0,357	0,236	68,83	-0,583	0,740
	3	11,80	156,44	-0,350	0,524	147,73	-0,378	0,733
SB 85-15	1	-	-	-	-	-	-	-
	2	8,70	457,91	0,024	0,008	374,78	-0,058	0,069
	3	8,86	174,07	-0,350	0,524	203,35	-0,373	0,890
SB 70-30	1	8,80	272,70	-0,320	0,241	253,06	-0,228	0,710
	2	-	-	-	-	-	-	-
	3	8,65	298,52	-0,169	0,179	260,28	-0,273	0,701
SB 55-45	1	7,73	348,39	-0,046	0,015	258,53	-0,189	0,366
	2	7,38	460,28	0,075	0,050	307,75	-0,082	0,090
	3	7,37	381,18	-0,070	0,035	290,90	-0,207	0,456
SB 40-60	1	6,70	258,51	-0,052	0,018	196,93	-0,185	0,349
	2	-	-	-	-	-	-	-
	3	5,66	483,84	-0,022	0,005	366,54	-0,149	0,345
SRCD 85-15	1	-	-	-	-	-	-	-
	2	10,34	222,19	-0,233	0,294	211,66	-0,315	0,804
	3	11,75	169,87	-0,177	0,096	152,04	-0,272	0,339
SRCD 70-30	1	11,04	159,08	-0,329	0,237	132,30	-0,509	0,749
	2	10,04	288,41	-0,122	0,079	227,42	-0,258	0,529
	3	9,97	267,47	-0,187	0,154	226,90	-0,308	0,624
SRCD 55-45	1	10,76	308,25	-0,077	0,031	223,09	-0,239	0,441
	2	9,59	427,90	0,016	0,002	294,94	-0,143	0,223
	3	8,24	1059,30	0,308	0,502	562,70	0,115	0,098
SRCD 40-60	1	10,22	240,50	-0,099	0,062	189,96	-0,228	0,498
	2	8,94	380,45	-0,059	0,023	292,00	-0,190	0,364
	3	7,65	313,14	-0,128	0,112	279,35	-0,217	0,425

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

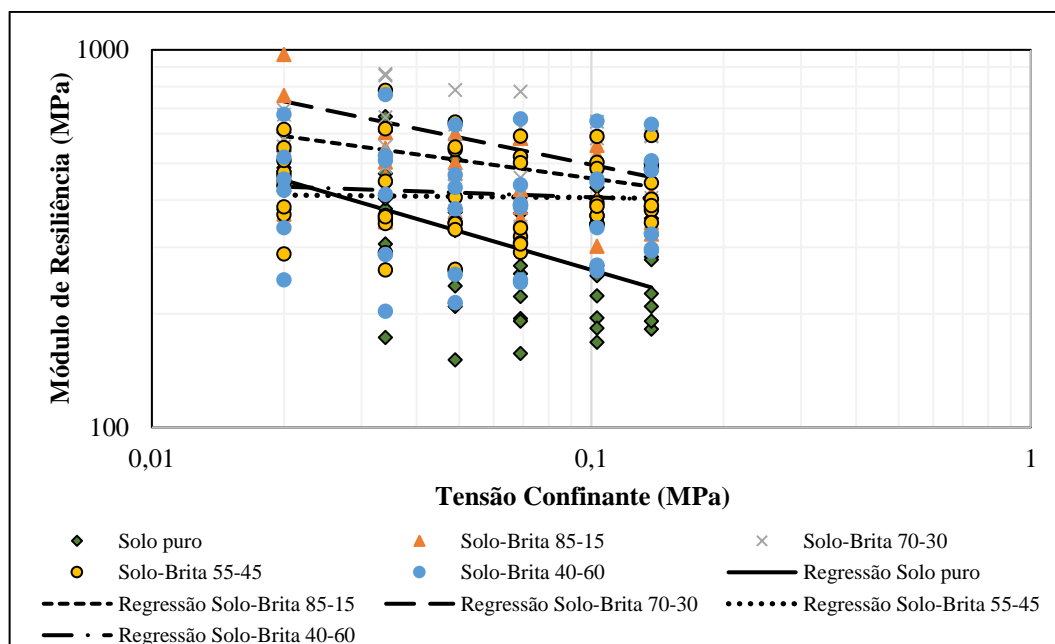
As análises de MR das misturas de solo-brita *versus* Tensão de Confinamento e MR *versus* Tensão Desvio estão apresentados na Figura 62 e na Figura 63, respectivamente.

Figura 62 – Variação do módulo de resiliência das misturas de solo-brita desta pesquisa em função da tensão desvio



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

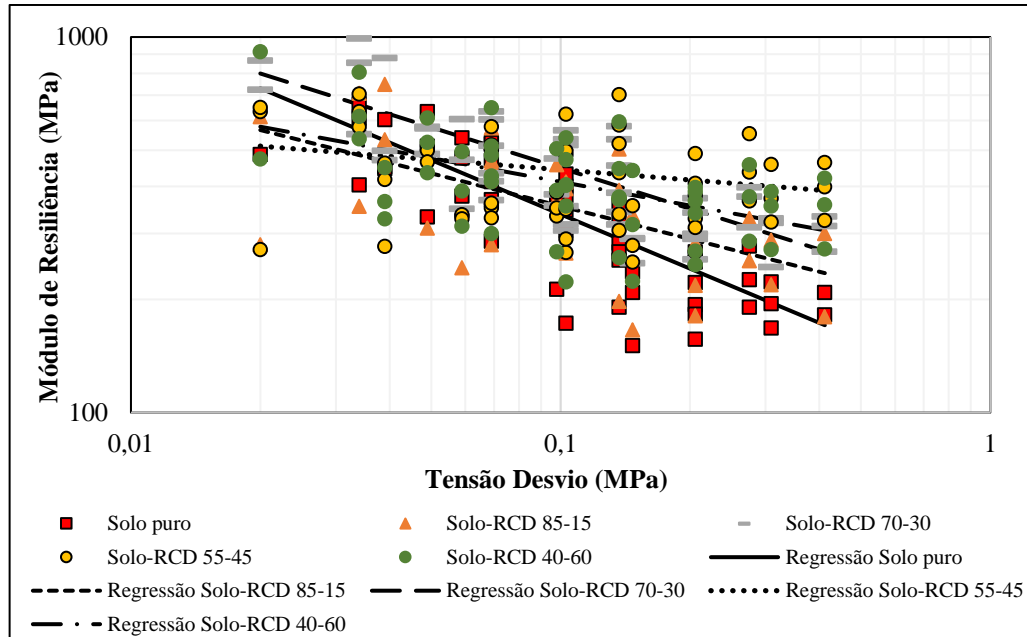
Figura 63 – Variação do módulo de resiliência das misturas de Solo-Brita desta pesquisa em função da tensão confinante



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

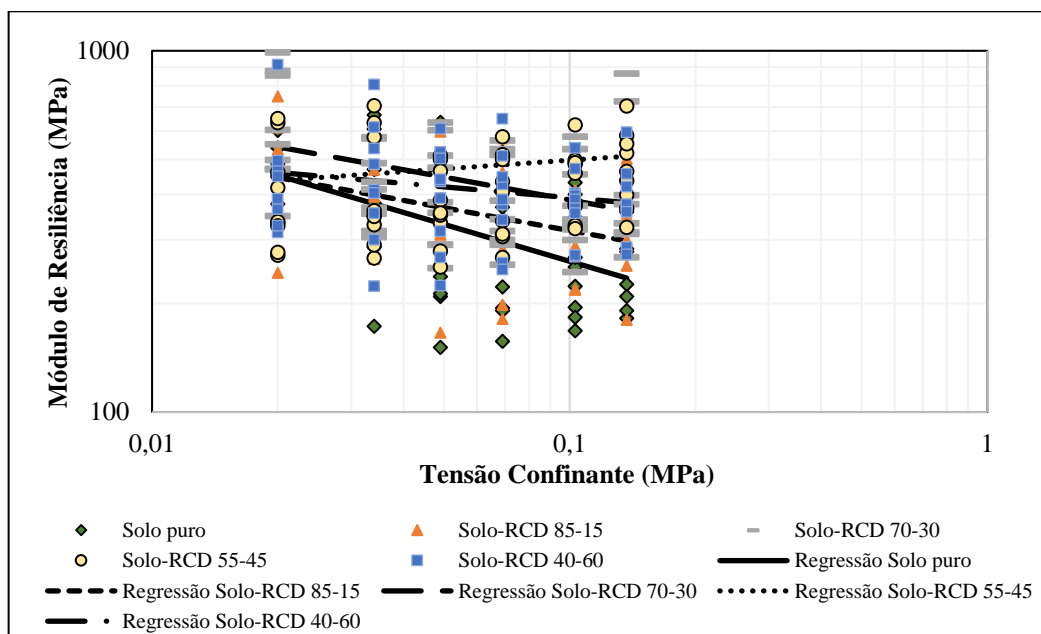
As análises de MR do solo-RCD versus Tensão de Confinamento e MR *versus* Tensão Desvio estão apresentados na Figura 64 e 65, respectivamente.

Figura 64 - Variação do módulo de resiliência das misturas de Solo-RCD desta pesquisa em função da tensão desvio



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Figura 65 - Variação do módulo de resiliência das misturas de Solo-RCD desta pesquisa em função da tensão confinante



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Estas representações isoladas de cada uma das tensões impostas durante o ensaio de MR, compõem conjuntos de relações de σ_1 / σ_3 diferentes, e, assim, para uma mesma tensão no eixo x tem-se mais de um resultado justamente porque, como mostrado na Tabela 19 do Capítulo 3, para cada tensão confinante são aplicadas três tensões desvio.

Utilizando o *software Statistica 10.0*, foram obtidas as constantes k_1 , k_2 e k_3 do modelo composto, que considera as tensões desvio e confinante simultaneamente. Este é o modelo genérico para todos os materiais de base, sub-base e subleito na entrada de dados no programa MeDiNa. Outro aspecto a ser comentado, é que todos os materiais se mostram sensíveis às duas tensões, portanto, o modelo que melhor vai refletir este comportamento é a representação pelo modelo composto. A Tabela 45 mostra os parâmetros obtidos para cada corpo de prova ensaiado.

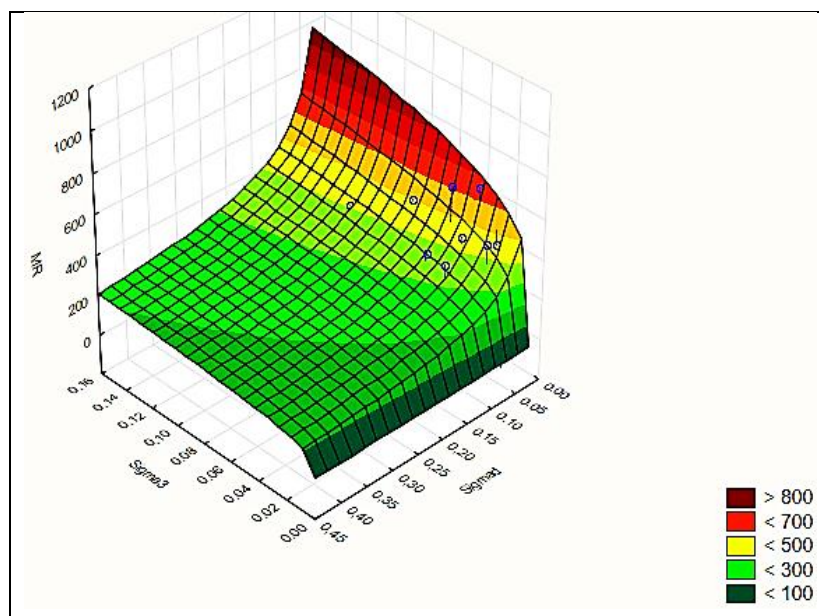
Tabela 45 – Parâmetros do modelo composto para cada CP ensaiado nesta pesquisa

Material	CP	Umidade do CP (%)	Modelo Composto $MR = k_1 \times \sigma^3 \times \sigma d^{k_3}$			
			k^1	k^2	k^3	R^2
Solo puro	1	12,48	202,22	0,221	-0,527	0,742
	2	12,76	58,564	0,099	-0,781	0,828
	3	11,80	194,05	0,129	-0,429	0,692
SB 85-15	1	-	-	-	-	-
	2	8,70	564,88	0,288	-0,245	0,387
	3	8,86	200,45	0,019	-0,403	0,897
SB 70-30	1	8,80	434,87	0,315	-0,486	0,792
	2	-	-	-	-	-
	3	8,65	410,67	0,338	-0,501	0,889
SB 55-45	1	7,73	442,79	0,429	-0,496	0,851
	2	7,38	576,20	0,474	-0,408	0,770
	3	7,37	506,33	0,430	-0,507	0,870
SB 40-60	1	6,70	300,21	0,388	-0,491	0,753
	2	-	-	-	-	-
	3	5,66	605,15	0,392	-0,424	0,887
SRCD 85-15	1	-	-	-	-	-
	2	10,34	323,88	0,264	-0,465	0,902
	3	11,75	206,41	0,142	-0,343	0,259
SRCD 70-30	1	11,04	126,90	0,238	-0,823	0,861
	2	10,04	328,31	0,387	-0,583	0,811
	3	9,97	376,89	0,370	-0,557	0,809
SRCD 55-45	1	10,76	394,22	0,477	-0,592	0,900
	2	9,59	518,40	0,466	-0,486	0,804
	3	8,24	1228,26	0,633	-0,349	0,721
SRCD 40-60	1	10,22	304,85	0,398	-0,523	0,823
	2	8,94	409,49	0,378	-0,518	0,705
	3	7,65	343,69	0,230	-0,422	0,574

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

A Figura 66 mostra a representação gráfica do modelo composto obtido em uma das amostras de solo puro.

Figura 66 - Representação gráfica do modelo composto para o solo puro desta pesquisa

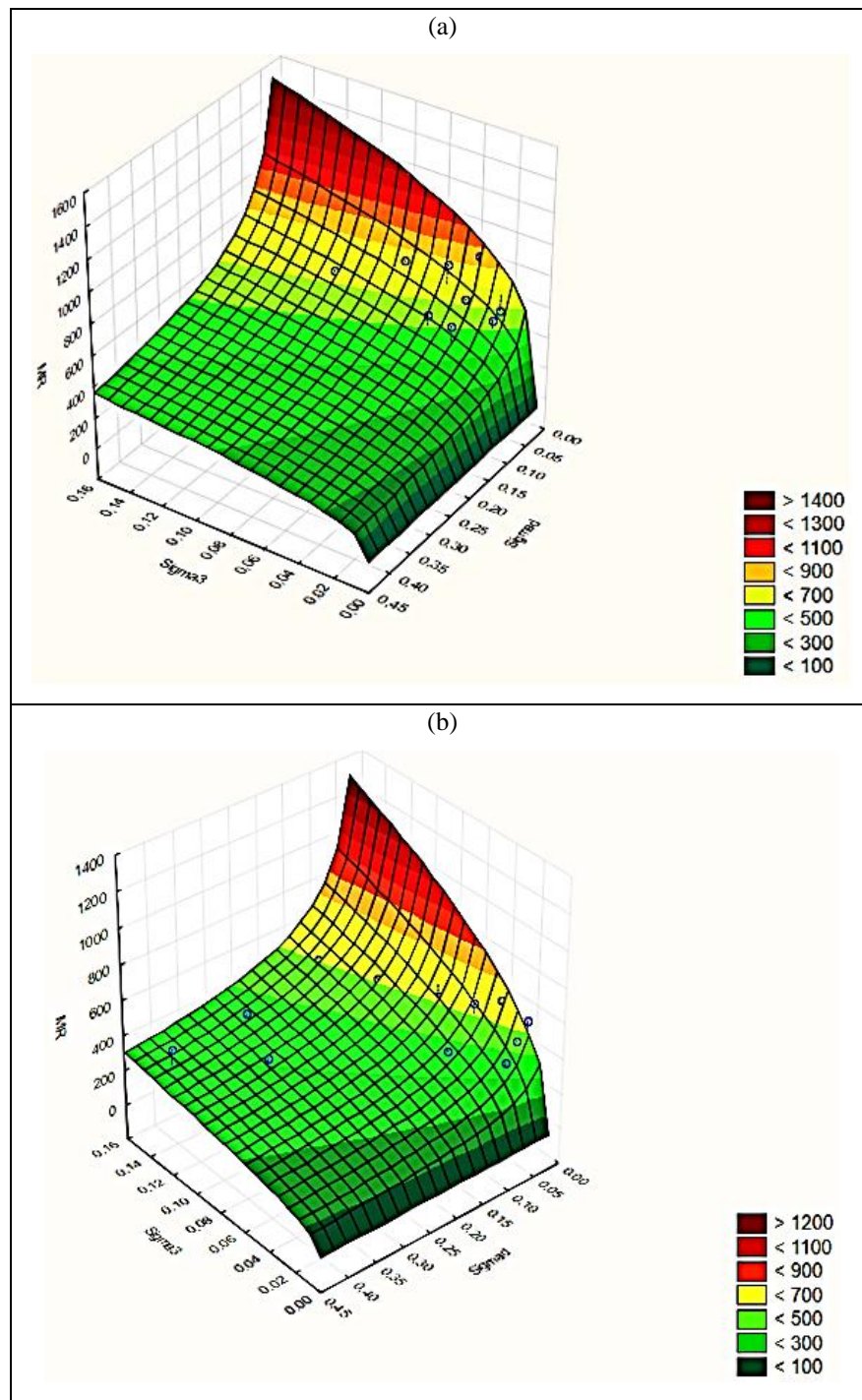


Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Medina e Motta (2015) destacam que no geral o modelo composto desenvolvido por Macêdo (1996), que realça a tendência de relações não lineares, apresenta alto R^2 para a maioria dos solos e materiais de pavimentação, porém é importante frisar que este modelo apesar de ser bastante representativo, não é necessariamente o melhor para todos os tipos de solos. Existem, por exemplo, solos que apresentam módulo de resiliência que melhor se enquadram no modelo constante (independente das tensões aplicadas), por exemplo, lateritas granulares, como também é possível, com um conjunto de dados, estabelecer estatisticamente outras equações que apresentem melhores correlações para o material analisado.

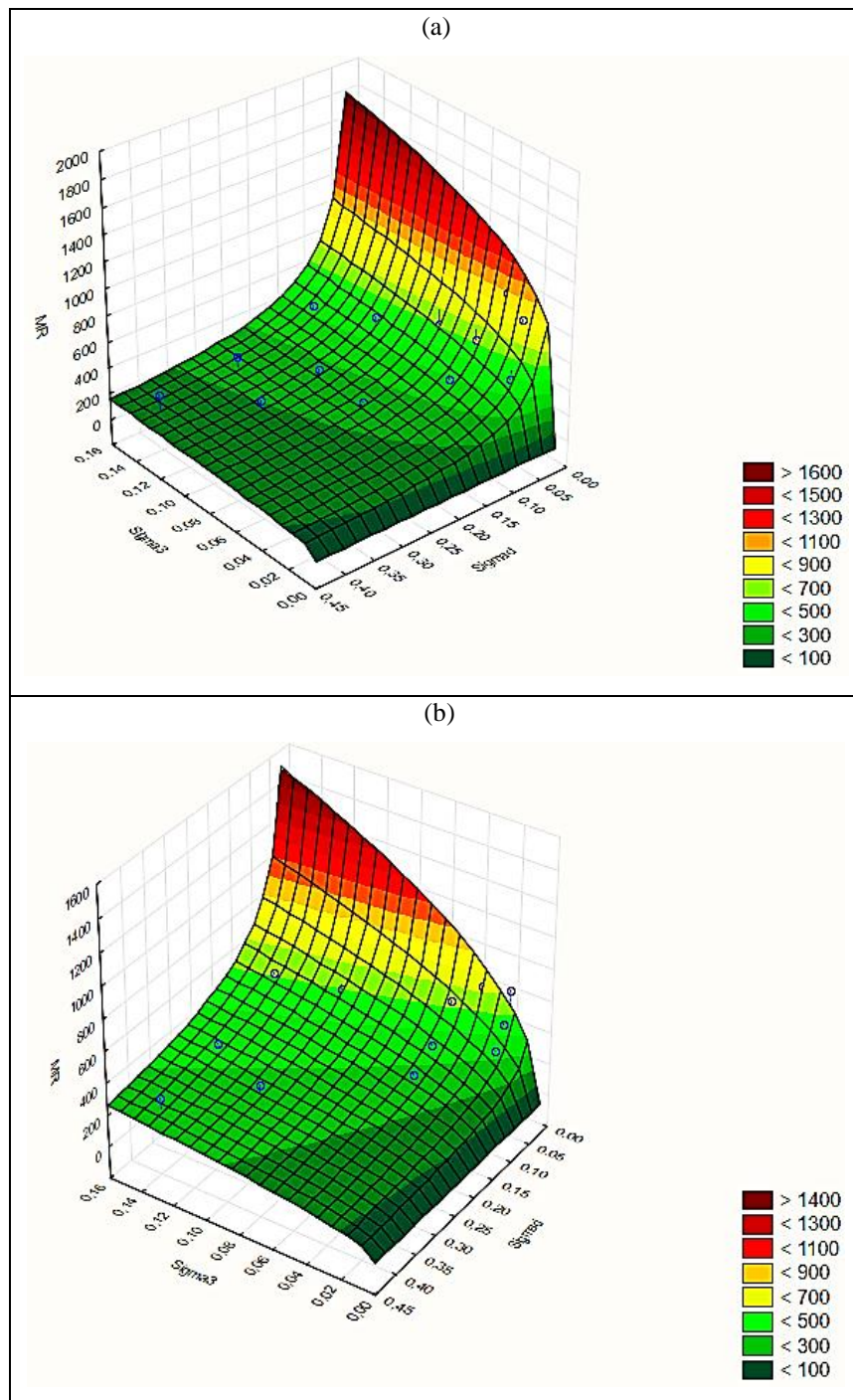
A Figura 67 mostra a representação gráfica do modelo composto para misturas de solo-brita e a Figura 68 destaca modelos para misturas de solo-RCD.

Figura 67 – Representações gráficas do modelo composto de algumas misturas de Solo-Brita desta pesquisa: a) Solo-Brita 70-30; b) Solo-Brita 55-45



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Figura 68 - Representações gráficas do modelo composto de algumas misturas de Solo-RCD desta pesquisa: a) Solo-RCD 70-30; b) Solo-RCD 55-45



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Os resultados da média dos coeficientes de regressão k_1 e k_2 , da regressão tipo potencial em função da tensão confinante e da tensão desvio, e a média dos coeficientes k_1 , k_2 e k_3 , das regressões não lineares utilizando o modelo composto, bem como o valor da média de

R^2 para cada material avaliado estão expostos na Tabela 46. A média para obtenção dos coeficientes foi realizada a partir dos parâmetros individuais obtidos para cada corpo de prova.

Tabela 46 – Média dos parâmetros das equações

Material	Tensão Confinante $MR = k_1 \times \sigma_3^{k_2}$			Tensão Desvio $MR = k_1 \times \sigma d^{k_2}$			Modelo Composto $MR = k_1 \times \sigma_3^{k_2} \times \sigma d^{k_3}$			
	k_1	k_2	R^2	k_1	k_2	R^2	k_1	k_2	k_3	R^2
Solo puro	119,47	-0,34	0,31	111,67	-0,48	0,76	151,61	0,15	-0,58	0,75
SB 85-15	315,99	-0,16	0,27	289,07	-0,22	0,48	382,66	0,15	-0,32	0,64
SB 70-30	285,61	-0,24	0,21	256,67	-0,25	0,71	422,77	0,33	-0,49	0,84
SB 55-45	396,62	-0,01	0,03	285,73	-0,16	0,30	508,44	0,44	-0,47	0,83
SB 40-60	371,18	-0,04	0,01	281,74	-0,17	0,35	452,68	0,39	-0,46	0,82
SRCD 85-15	196,03	-0,21	0,20	181,85	-0,29	0,57	265,15	0,20	-0,40	0,58
SRCD 70-30	238,32	-0,21	0,16	195,54	-0,36	0,63	277,37	0,33	-0,65	0,83
SRCD 55-45	598,48	0,08	0,18	360,24	-0,09	0,25	713,63	0,53	-0,48	0,81
SRCD 40-60	311,36	-0,10	0,07	253,77	-0,21	0,43	352,68	0,34	-0,49	0,70

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

O coeficiente de determinação (R^2) apresenta valores no intervalo de 0 a 1 e quanto mais próximo do valor unitário melhor é o grau percentual de ajuste do modelo para àquela situação. Analisando os parâmetros individuais e os parâmetros obtidos através das médias dos três corpos de prova percebe-se que os modelos de regressão tipo potencial resultaram em equações com níveis de regressão (R^2) muito pequenos, ou seja, muito distantes do valor unitário, tanto para o solo puro como para as misturas, o que demonstra que o modelo não é representativo o suficiente. O R^2 médio mais elevado foi de 0,76, do solo puro, porém para algumas misturas o R^2 nestes modelos chegou próximo de zero, como para a mistura de SB 40-60. Isto significa que a tendência apresentada pelo modelo reproduzido não é uma ferramenta significativa para análise de valores de MR, em situações análogas à ilustrada. Pode-se inferir então que a dependência do módulo de resiliência em função da tensão confinante e da tensão desvio isoladamente, para alguns destes materiais, pode ser considerada pouco expressiva.

Quando empregado o modelo composto a média dos níveis de regressão (R^2) obtidos foi mais significativa para as misturas. Os coeficientes de determinação variaram de 0,58 (SRCD 85-15) até 0,85 (SRCD 55-45), aproximando-se do valor unitário e mostrando então melhor adequação do modelo em relação a tais composições. Tanto no modelo composto como no modelo em função da tensão desvio o solo puro alcançou R^2 de 0,75 e 0,76, respectivamente,

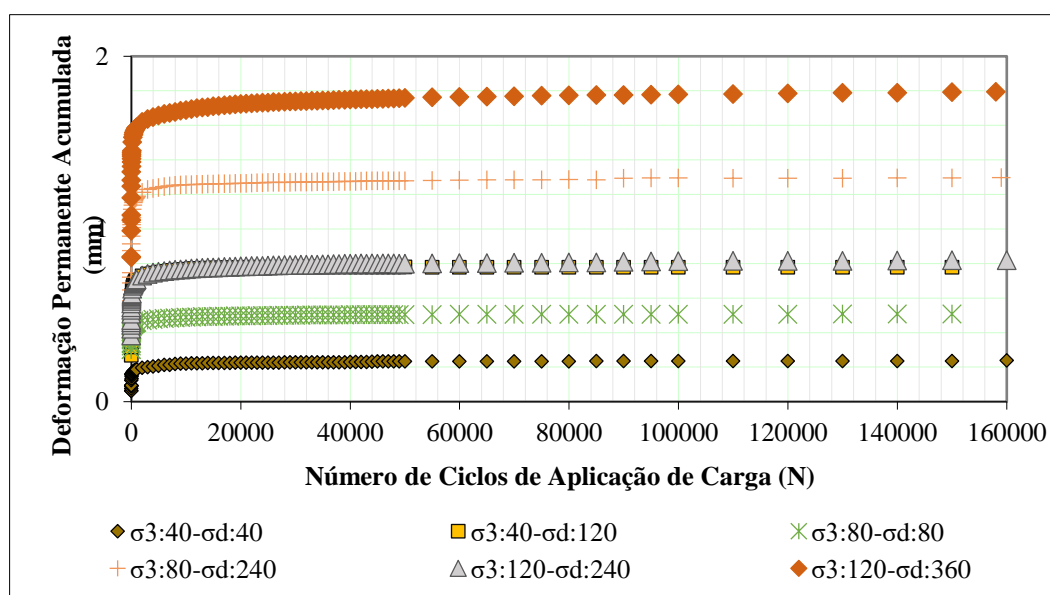
mostrando moderada correlação do MR com as tensões aplicadas de forma conjunta, bem como com a tensão desvio de forma isolada.

Ainda em referência aos parâmetros médios percebe-se que os coeficientes obtidos em k_2 para o modelo composto são positivos, o que indica um aumento do módulo de resiliência com o aumento da tensão confinante. Porém, em relação à tensão desvio, observa-se comportamento distinto, visto que o coeficiente k_3 mostra-se negativo, indicando que o módulo é maior para menores tensões desvio. Isto está associado à resistência ao cisalhamento, que tem a componente de coesão e de atrito em geral.

4.4.2 Deformação Permanente

Com base nos resultados obtidos nos resultados dos ensaios de CBR realizados por Barreto (2020) e nos ensaios de módulo de resiliência, foi feita a escolha de uma mistura de solo-RCD para realização do ensaio de deformação permanente, visto que devido a questões de tempo e logística a realização destes ensaios para as variadas amostras seria inviável. Desse modo, a mistura de solo-RCD com 70% de solo e 30% de agregados foi a escolhida para análise nos ensaios de deformação permanente. A Figura 69 mostra os resultados obtidos nos ensaios de DP para as tensões de confinamento de 40, 80 e 120 kPa associadas a tensões desvio iguais ou com magnitude de duas a três vezes a tensão de confinamento (conforme descrito na Tabela 23 do Capítulo 3).

Figura 69 – Variação da deformação permanente em função das tensões e do número de ciclos



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Ao se avaliar a Figura 69, constata-se que a deformação permanente se apresenta de forma mais acentuada no início dos ciclos e a partir de 5.000 ciclos o que se verifica é uma tendência ao acomodamento, ou seja, não ocorrem grandes variações da deformação permanente acumulada. Também é possível analisar a influência da tensão desvio na deformação permanente total e percebe-se que ao se aumentar a magnitude desta tensão, mantendo a tensão de confinamento constante, tem-se significativo aumento da deformação permanente acumulada. Para a tensão de confinamento de 40 kPa o crescimento da tensão desvio até os 120 kPa proporciona aumento de 226% na deformação permanente acumulada. Quando a tensão de confinamento é de 80 kPa o crescimento da tensão desvio para 240 kPa amplifica em 156% a deformação permanente acumulada, e para a tensão de confinamento de 120 kPa percebe-se elevação da ordem de 118% na deformação permanente acumulada. Este comportamento é esperado e foi constatado nos materiais utilizados nos estudos de Guimarães (2009) e Lima (2016).

Embora se constatem estas variações, no caso presente todas correspondem a valores finais de DP muito baixos, menores do que os valores de deformação plástica total verificados nos ensaios de Módulo de Resiliência, correspondentes as deformações plásticas médias, que, como comentado, correspondem a acumulações de DP para 18 pares de tensões aplicados no mesmo corpo de prova e aqui, cada par de tensões utilizados é aplicado em um corpo de prova exclusivo.

Outra observação muito importante a ser feita sobre os resultados deste ensaio é que em todos os níveis de tensões aplicados, houve o acomodamento das deformações a partir de 30.000 ciclos de carga aproximadamente. Na norma do ensaio DNIT 179/2018 IE está descrito a forma de interpretação matemática do acomodamento. Procura-se sempre que possível selecionar materiais que tendam ao acomodamento e em níveis baixos de DP total, porque assim não vão contribuir para o afundamento de trilha de roda no pavimento. Este ensaio mede, em última instância, uma possibilidade de ocorrer sobre-compactação, eventualmente, na trilha de roda, pela passagem do tráfego ao longo da vida útil do pavimento.

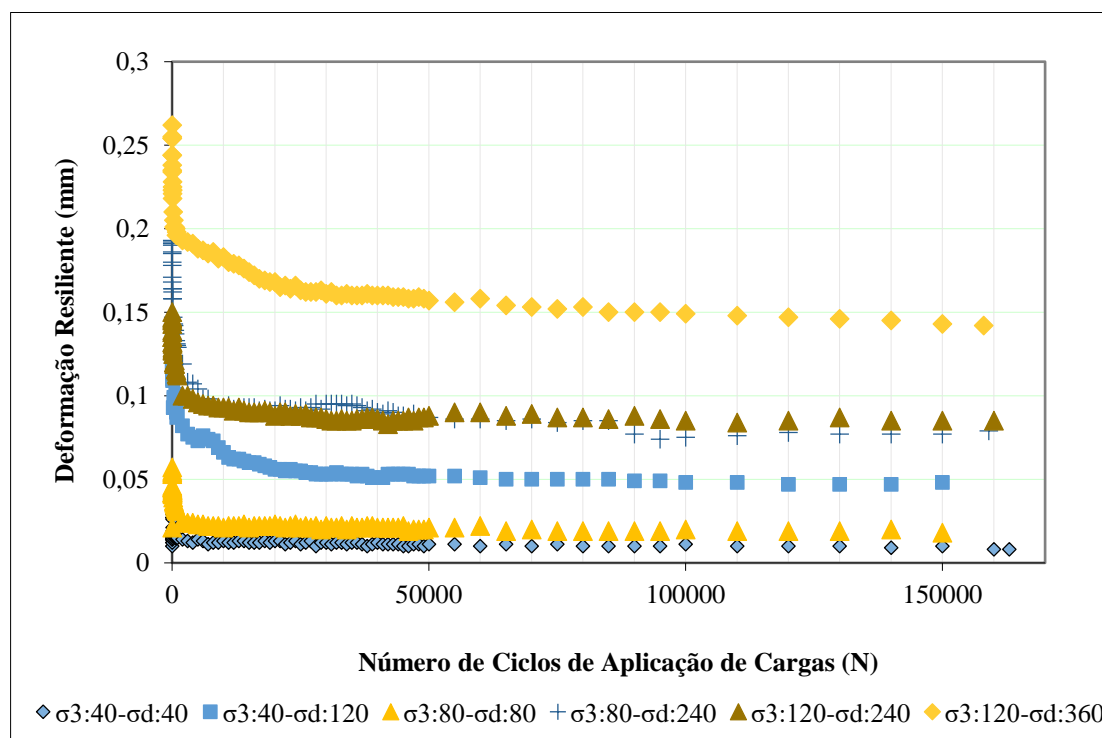
E ainda uma terceira constatação pode ser feita: embora tenha havido quebra de agregados de RCD durante a compactação (esforço concentrado numa pequena área do soquete), durante o ensaio de DP esta quebra aparentemente não continuou a ocorrer considerando que as DP foram bem baixas. Comportamento semelhante foi verificado nas amostras de RCD ensaiadas por Fernandes (2004).

Observa-se que o valor máximo de deformação permanente acumulada obtida para esse material foi de 1,80 mm no ensaio número 06, com a tensão desvio de 360 kPa e tensão

confinante de 120 kPa. Norback (2018) cita que tal magnitude de deformação permanente pode ser considerada baixa quando comparada com o valor admissível de afundamento de trilha de roda (ATR) considerado 12,5 mm para projeto típico de rodovias, para a contribuição conjunta de todas as camadas geotécnicas (menos o revestimento asfáltico). No método MeDiNa estão estabelecidos níveis de ATR para as classes de rodovias e de N de tráfego.

Com as medições realizadas nos ensaios de DP também foi possível avaliar a evolução do comportamento da deformação resiliente do material ao longo dos ciclos de aplicação de cargas, conforme exposto na Figura 70. Nota-se diminuição da parcela elástica da deformação, o que indica certo crescimento do MR ao longo dos ciclos.

Figura 70 – Comportamento da deformação resiliente do SRCD 70-30 ao longo do ensaio de deformação permanente em vários níveis de tensões aplicadas

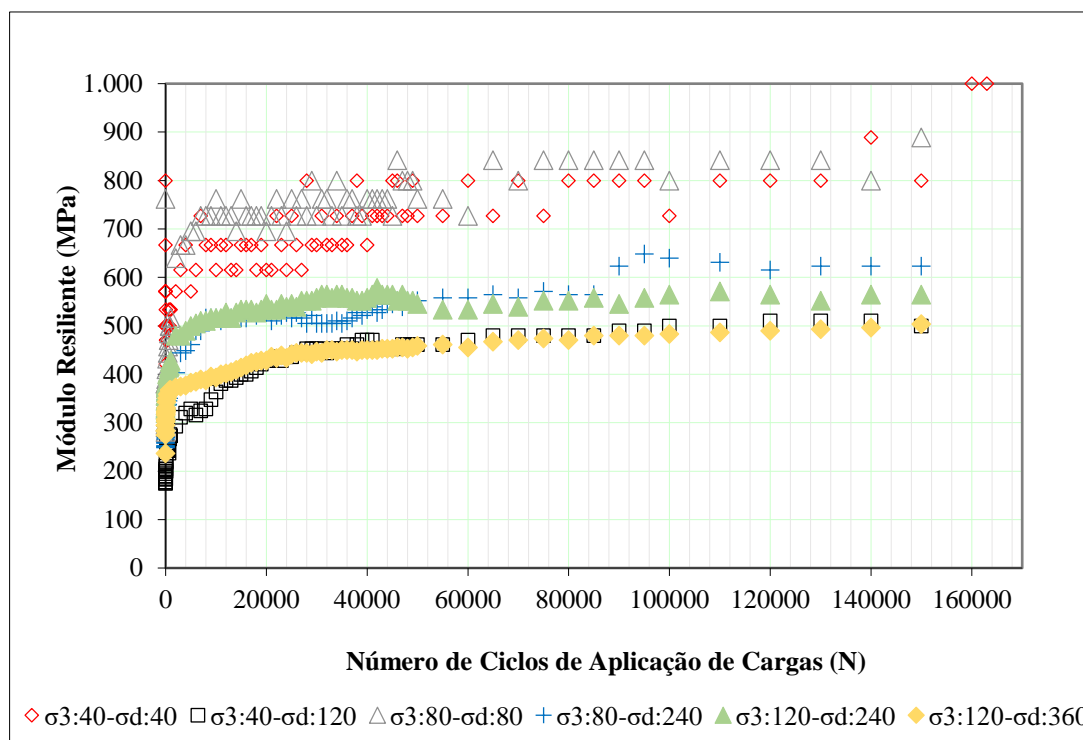


Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Ainda em relação a Figura 70, percebe-se que a deformação resiliente é mais significativa no início da aplicação dos ciclos de carga decaindo com o aumento do número de ciclos. A partir de 20.000 ciclos, em média, ocorre uma tendência de estabilização da deformação resiliente da mistura para todos os pares de tensões avaliados. Tal comportamento também foi verificado nos materiais estudados por Guimarães (2009) e Lima (2016).

A variação do módulo de resiliência da mistura com o número de ciclos de aplicação de carga está apresentada na Figura 68.

Figura 71 – Verificação do módulo de resiliência do SRCD 70-30 a partir dos ensaios de deformação permanente



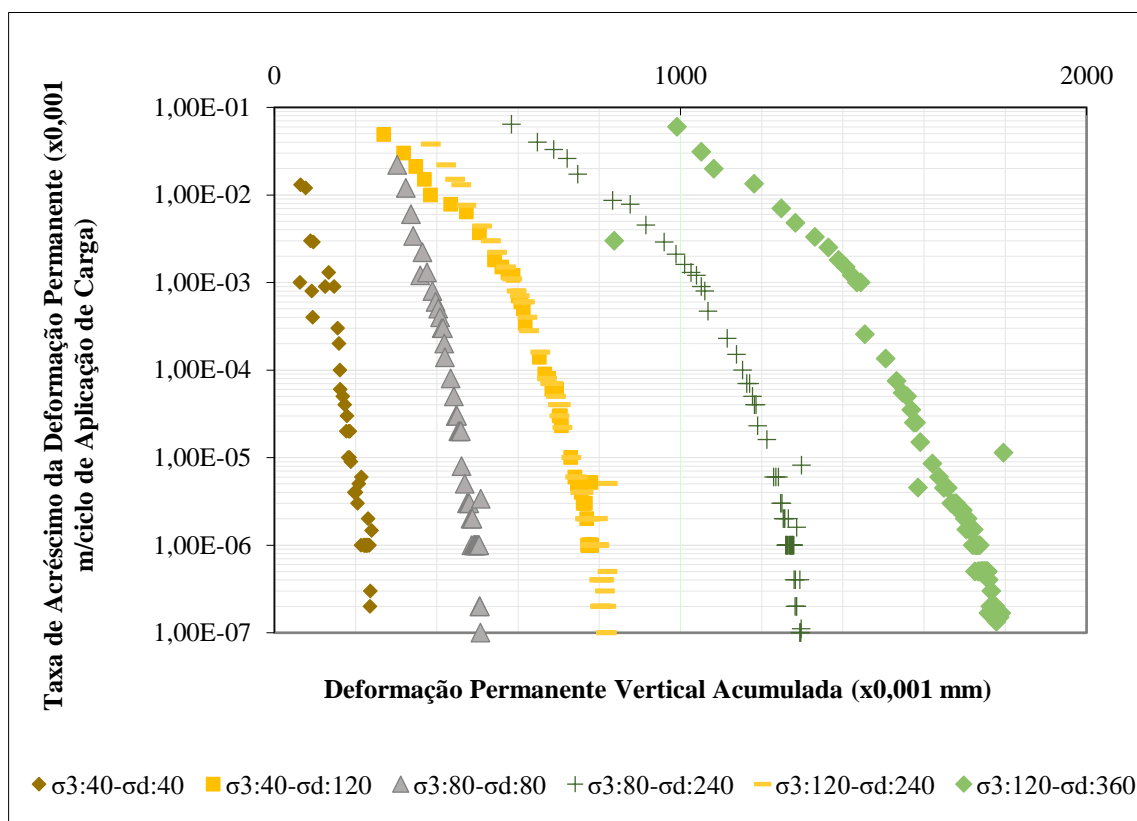
Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Na Figura 71 é possível verificar que o módulo de resiliência tende a variar conforme os níveis de tensões aplicados no material, de acordo com o verificado no ensaio de laboratório de MR (material com comportamento elástico não linear). Para os dois maiores níveis de tensões de confinamento e desvio a mistura tende a apresentar valores de módulo variando de 480 a 560 MPa. Para os dois menores níveis de tensões de confinamento e desvio, o módulo variou entre 500 a 750 MPa. Adicionalmente, percebe-se que a partir dos 34.000 ciclos de carga ocorre uma tendência de estabilização do módulo de resiliência para todos os níveis de tensões aplicados o que indica o acomodamento das deformações, elásticas e plásticas, desejado quando se seleciona o material para camadas do pavimento. O CP que obteve maior módulo de resiliência foi o do ensaio número 3, com $\sigma_3 = 80$ kPa e $\sigma_d = 80$ kPa, alcançando em média 800 MPa. O aumento do módulo de resiliência da mistura tem forte relação com certa reorganização ou pequeno rearranjo dos grãos que a mistura apresenta com as solicitações dinâmicas, fazendo

com que o corpo de prova apresente menor deformação elástica em decorrência do aumento, mesmo que pequeno, em sua densidade. É o acomodamento ou *Shakedown* acontecendo.

Assim, foi avaliado o comportamento da mistura de Solo-RCD 70-30 quanto ao acomodamento (*shakedown*). O *shakedown* relaciona-se diretamente com os estados de tensões impostos à mistura. A Figura 72 exemplifica as curvas de *Shakedown* obtidas para cada par de tensões aplicados, os valores de deformação permanente (mm/mm) foram multiplicados por 1.000 nos eixos vertical e horizontal. Através destas curvas pode-se avaliar o estado de tensões médio representativo em que é possível a aplicação da mistura de forma segura e adequada para não haver grande contribuição para o ATR.

Figura 72 – Comportamento da amostra de Solo-RCD quanto ao acomodamento sob cargas repetidas no ensaio de DP



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Com base nos estudos desenvolvidos por Guimarães (2009) e na análise da Figura 72 foi elaborada a Tabela 47 que apresenta a avaliação do comportamento quanto a DP (nível) da mistura para cada um dos pares de tensões utilizados nos ensaios de deformação permanente. Esta análise representa as várias tendências possíveis de comportamento, conforme estabelece

a norma DNIT 179/2018: A – acomodamento plástico; B e C – escoamento plástico; AB – significativas deformações iniciais seguida de acomodamento plástico.

Tabela 47 – Classificação da mistura de SRCD 70-30 com relação aos níveis de *shakedown*

Material	σ_3 / σ_d (kPa)					
	40/40	40/120	80/80	80/240	120/240	120/360
SRCD 70-30	A	A	A	AB	A	AB

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Os pares de tensões 40/40, 40/120, 80/80 e 120/240 resultaram em comportamentos do tipo A. Tais tipos de comportamento são característicos de materiais com baixas deformações permanentes acumuladas que não influenciam em afundamentos no pavimento, ou seja, as deformações plásticas ocorrem até um determinado número de ciclos de carga. Os pares de tensões 80/240 e 120/360 proporcionaram para a mistura o comportamento do tipo AB, que possui elevadas deformações permanentes iniciais com acomodamento plástico (*plastic shakedown*) na sequência. Conforme explicado por Lima (2020), este tipo de comportamento foi primeiramente verificado nas pesquisas com solos tropicais lateríticos desenvolvidas por Guimarães (2009) e não significa que o material não possa ser utilizado na estrutura do pavimento, mas sim que a sua aplicação para aqueles níveis de tensões deve ser avaliada com mais cautela.

Ao se analisar todas as variáveis apresentadas anteriormente, verifica-se que o comportamento da mistura de Solo-RCD 70-30 com relação à deformação permanente não causa nenhuma restrição para utilização desta mistura como material de pavimentação. Existe acomodamento plástico para a maior parte das relações de tensões e para uma pequena parcela ocorre variação do comportamento, apesar disto ainda ocorre tendência ao acomodamento com o aumento do número de ciclos. Nos seis ensaios desenvolvidos não ocorreu propensão ao comportamento tipo C, de ruptura, bem como as deformações permanentes acumuladas totais para 150.000 ciclos foram menores do que 2 mm para todos os pares de tensões. Assim, considera-se a mistura adequada para utilização em camadas de base e sub-base, não implicando em problemas de afundamento de trilha de roda, contanto que sejam mantidas as umidades utilizadas nos ensaios.

4.4.2.1 Parâmetros da regressão do modelo de DP

Os resultados dos parâmetros ψ_1 , ψ_2 , ψ_3 e ψ_4 e de R^2 da regressão não linear do modelo proposto por Guimarães (2009), obtidos através do programa *Statistica 10.0*, encontram-se expostos na Tabela 48.

Tabela 48 – Parâmetros da regressão dos ensaios de DP com solo-RCD 70-30 desta pesquisa

Parâmetros obtidos através do Modelo de Guimarães (2009)					
Material	$\varepsilon_p(\%) = \psi_1 \cdot \left(\frac{\sigma_3}{\rho_0}\right)^{\psi_2} \cdot \left(\frac{\sigma_d}{\rho_0}\right)^{\psi_3} \cdot N^{\psi_4}$				
	ψ_1	ψ_2	ψ_3	ψ_4	R^2
SRCD 70-30	0,109	-0,665	1,321	0,043	0,94

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Analisando os parâmetros obtidos, percebe-se que o parâmetro ψ_3 foi o que apresentou maiores valores, indicando que a tensão desviadora contribui mais significativamente na deformação permanente específica. O valor do coeficiente de correlação (R^2) obtido para o modelo que engloba os seis ensaios de DP foi de 0,94, apresentando elevada correlação e enquadramento satisfatório. Desse modo, o modelo proposto por Guimarães (2009) pode ser considerado estatisticamente adequado para previsões da deformação permanente neste tipo de mistura para os estados de tensões utilizados.

Os parâmetros ψ_1 , ψ_2 , ψ_3 e ψ_4 da mistura deste estudo foram comparados com os valores dos parâmetros obtidos nos materiais das pesquisas desenvolvidas por Guimarães (2009), Zago (2016), Lima (2016), Norback (2018) e Lima (2020), expostos na Tabela 49 a seguir, e percebeu-se que os coeficientes de correlação e os parâmetros do modelo de deformação permanente assemelharam-se aos obtidos para o solo-RCD desta pesquisa.

Tabela 49 – Parâmetros da regressão não linear dos ensaios de deformação permanente de vários materiais comparados aos obtidos no solo-RCD deste trabalho

		Parâmetros obtidos através do Modelo de Guimarães (2009)				
Autor	Material	$\varepsilon_{\rho}(\%) = \psi_1 \cdot \left(\frac{\sigma^3}{\rho_0}\right)^{\psi_2} \cdot \left(\frac{\sigma_d}{\rho_0}\right)^{\psi_3} \cdot N^{\psi_4}$				
		ψ_1	ψ_2	ψ_3	ψ_4	R ²
Zago (2016)	NA'NG'	0,593	-0,198	1,332	0,042	0,920
	LG'	0,385	-0,861	1,523	0,075	0,919
	LG'	0,869	0,006	1,212	0,042	0,899
Lima (2016) *	C1	0,161	-0,097	0,525	0,075	0,818
	C2	0,097	-0,168	0,733	0,086	0,895
	C3	0,128	-0,408	1,050	0,073	0,946
	C4	0,101	-0,182	0,909	0,075	0,840
	C5	0,087	-0,280	0,893	0,096	0,934
	C6	0,129	-0,065	1,100	0,073	0,926
	C7	0,077	-0,230	1,143	0,086	0,951
Norback (2018) **	LG'	0,32	-0,09	1,21	0,05	0,96
	NA'	0,57	0,71	0,27	0,05	0,77
	NG'	0,39	0,84	0,54	0,06	0,81
	Brita	0,34	-0,45	1,11	0,05	0,96
	Mistura 1	0,68	-0,29	1,12	0,03	0,99
	Mistura 2	0,44	-0,25	1,05	0,04	0,95
	Mistura 3	0,27	-0,14	1,33	0,06	0,98
Lima (2020)	Mistura 4	0,24	-0,34	1,37	0,04	0,98
	Mistura 5	0,31	0,06	0,85	0,05	0,97
	LA	0,086	-0,507	1,616	0,078	0,94
	NA	0,061	-1,298	2,368	0,074	0,95
	NS'	0,318	0,427	1,064	0,052	0,96
	NA'	0,152	-0,216	1,337	0,065	0,96
	LA'	0,130	-0,003	1,205	0,038	0,97
	NG'	0,219	0,258	1,420	0,056	0,94
Pereira (2021)	LG'	0,211	0,117	1,122	0,049	0,95
	BGS	0,082	-0,534	1,219	0,085	0,96
	Solo-RCD 70-30	0,109	-0,665	1,321	0,043	0,94

*Os materiais nomeados de C1 a C7 são misturas de brita graduada simples (BGS) com distintas proporções granulométricas.

**As misturas desta pesquisa referem-se às misturas dos solos LG', NA' e NG' com a brita em diferentes proporções.

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

4.5 Dimensionamento das seções de pavimento com os materiais desta pesquisa

Com base nos resultados dos ensaios e nos resultados do estudo desenvolvido por Barreto (2020) foram dimensionadas as seções típicas viáveis para um projeto de pavimentação rodoviária de acordo com o método de dimensionamento do antigo DNER, atual DNIT, e o método mecanístico-empírico presente no *software* MeDiNa, em implantação no DNIT.

4.5.1 Método do DNER

A partir das adoções descritas no capítulo sobre metodologia foram realizadas as primeiras análises com base nas variações de N e CBR do subleito. A Tabela 50 a seguir exemplifica os resultados obtidos para o valor de “Hm” nas distintas situações.

Tabela 50 – Espessura total necessária para proteção do subleito nas distintas situações de tráfego adotadas nesta pesquisa

N	CBR Subleito (%)		
	2	10	20
$N = 5 \times 10^4$	78 cm	32 cm	21 cm
$N = 5 \times 10^5$	91 cm	37 cm	26 cm
$N = 5 \times 10^6$	105 cm	42 cm	28 cm

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Avaliando a resistência mecânica do solo-RCD 70-30 para compor a estrutura do pavimento, percebeu-se que, de acordo com as normativas, o valor do CBR estimado para este material somente permitiria a aplicação dele na camada de sub-base e quando realizada a compactação na Energia Modificada. Desse modo, optou-se por realizar este dimensionamento considerando que a camada de base seria composta por material granular do tipo Brita Graduada Simples (BGS) com CBR de 60%.

A Tabela 51 e a Figura 73 apresentam os valores de espessura encontrados para o pavimento composto por revestimento de tratamento superficial duplo (nos casos de $N = 5 \times 10^4$ e $N = 5 \times 10^5$) ou concreto asfáltico (para $N = 5 \times 10^6$), base com brita graduada e sub-base de solo-RCD 70-30 ou solo-brita 70-30 para as diferentes situações de tráfego e de capacidade de suporte do subleito. Tanto para o solo-RCD 70-30 como para o solo-brita 70-30 foi

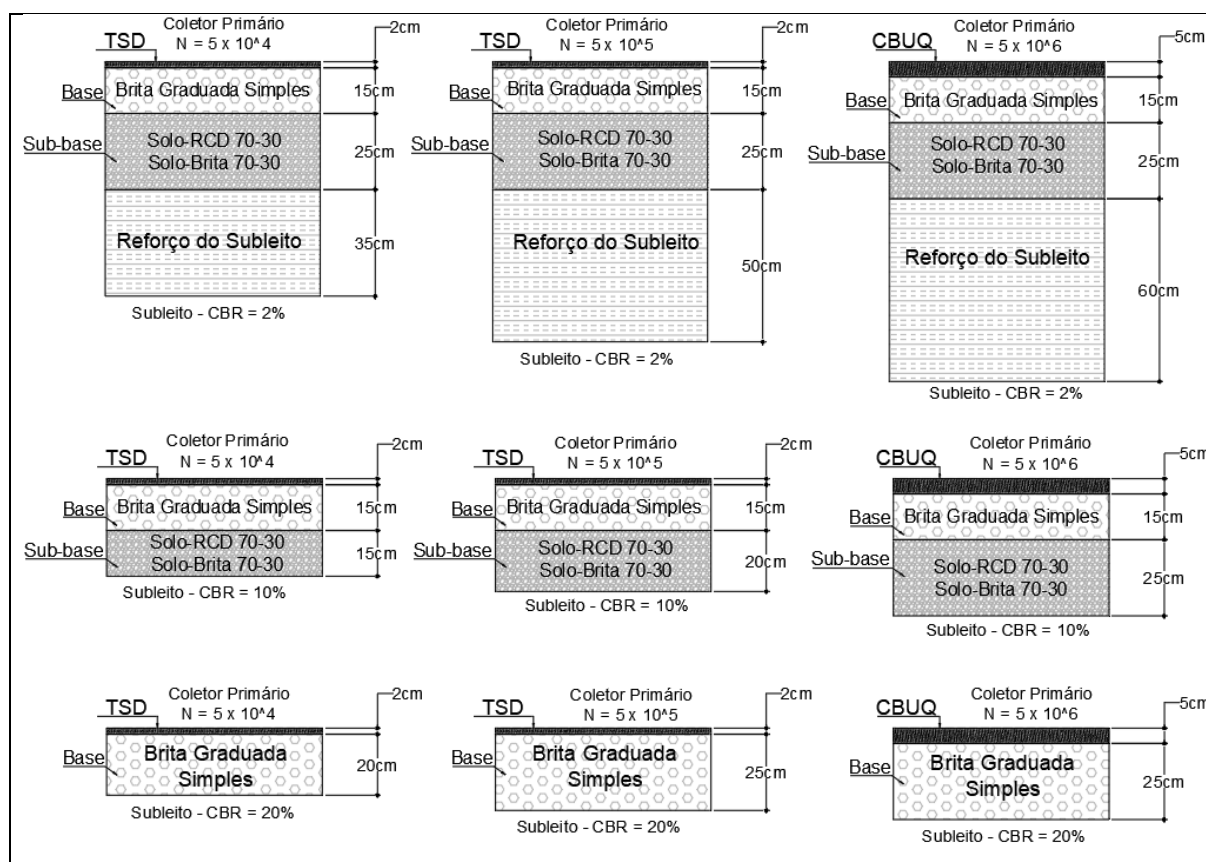
considerado o CBR máximo de 20%, o que resulta em dimensionamento semelhante quando utilizam-se tais materiais na mesma camada.

Tabela 51 – Espessuras das camadas do pavimento de acordo com o método do DNER

N	N = 5 x 10 ⁴			N = 5 x 10 ⁵			N = 5 x 10 ⁶		
	2	10	20	2	10	20	2	10	20
Espeçsura revestimento (cm):	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	5,00	5,00	5,00
Espeçsura base (cm):	15,00	15,00	20,00	15,00	15,00	25,00	15,00	15,00	25,00
Espeçsura sub-base (cm):	25,00	15,00	-	25,00	20,00	-	25,00	25,00	-
Reforço do subleito (cm):	35,00	-	-	50,00	-	-	60,00	-	-

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Figura 73 – Seções obtidas de acordo com o método do DNER (CBR) considerando as premissas adotadas nesta pesquisa

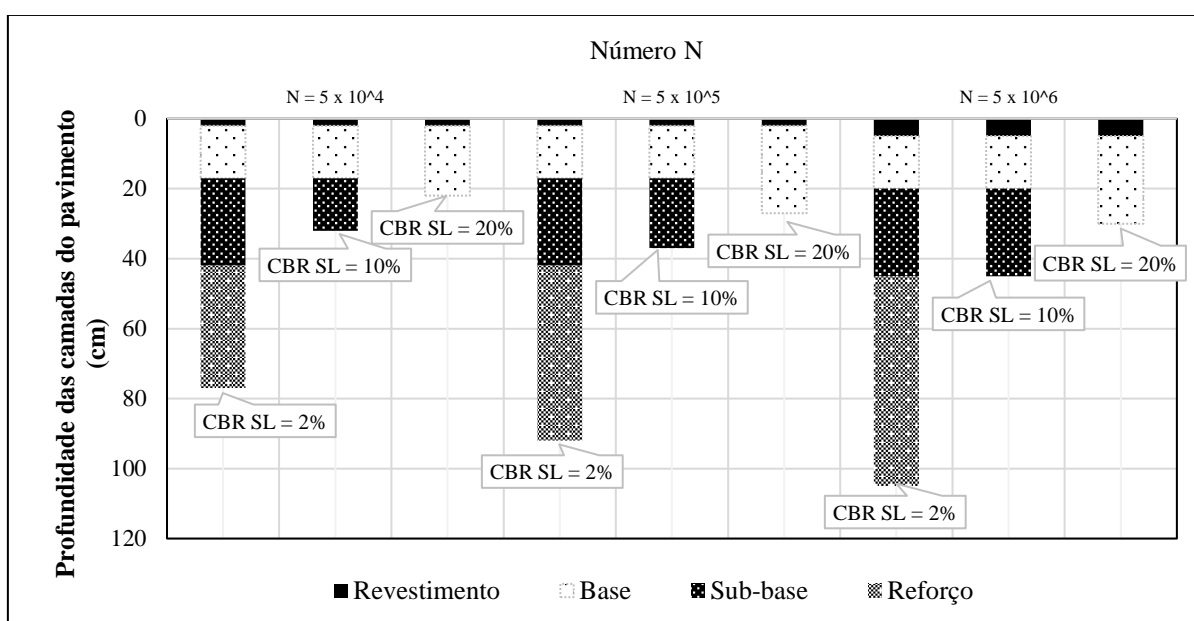


Fonte: Elaborado pela autora (2021)

É importante destacar que o método do DNER considera como valor máximo de Índice de Suporte Califórnia (CBR) para entrada no ábaco o CBR de 20% para a camada de sub-base. Desse modo, mesmo que os valores de CBR do solo-RCD 70-30 e do solo-brita 70-30 fossem superiores a este valor, seria utilizado este, ou seja, valores de capacidade de suporte superiores não são levados em consideração na sub-base (e, também, na base) no método para otimização do dimensionamento.

Através do comparativo presente na Figura 71, verifica-se que o dimensionamento obtido através do método do DNER proporciona estruturas de pavimento muito robustas para subleitos que apresentam a menor capacidade de suporte permitida (CBR=2%). Quando esta capacidade de suporte de subleito apresenta melhor desempenho (CBR=10% ou CBR =20%), as estruturas geradas dispensam a necessidade de implementação de reforço de subleito.

Figura 74 – Estruturas obtidas através do método empírico do DNER em função do número N e do CBR do subleito adotado nesta pesquisa



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

4.5.2 Software MeDiNa

Após a inserção dos dados sobre os materiais e tráfego na página inicial do MeDiNa, realizaram-se diferentes análises para verificar como se comportavam as estruturas projetadas. Todas as avaliações foram feitas com base nas disposições presentes no Manual do MeDiNa, desenvolvido por Franco e Motta (2018). As considerações sobre o afundamento de trilha de

roda e o percentual de área trincada máxima ao final da vida útil de projeto para cada tipo de via, que foram utilizadas nesta pesquisa, estão apresentadas na Tabela 52 a seguir.

Foi escolhido para esta pesquisa o Sistema Coletor Primário, com confiabilidade de 85%, área trincada e deformação permanente máximas de 30% e 13 mm, respectivamente.

Tabela 52 - Critérios para dimensionamento no software MeDiNa

Tipo de via	Confiabilidade	Área Trincada	Def. Permanente
Sistema Arterial Principal	95%	30%	10 mm
Sistema Arterial Primário	85%	30%	13 mm
Sistema Arterial Secundário	75%	30%	20 mm
Sistema Coletor Primário	85%	30%	13 mm
Sistema Coletor Secundário	75%	30%	20 mm
Sistema Local	65%	30%	20 mm

Fonte: Franco e Motta (2018)

4.5.2.1 Avaliações com o Solo-RCD 70-30

Inicialmente, analisou-se a seção denominada de “Estrutura 01”, composta por: revestimento de tratamento superficial duplo (nos casos de $N = 5 \times 10^4$ e $N = 5 \times 10^5$) ou concreto asfáltico (para $N = 5 \times 10^6$) com classe de fadiga 1, base com brita graduada – gnaisse C5 e sub-base de solo-RCD 70-30 para as diferentes situações de tráfego e de capacidade de suporte do subleito, semelhante à composição utilizada no dimensionamento feito através do método do DNER.

No começo das análises foram testadas as camadas de base e sub-base com as espessuras mínimas (15 cm) adotadas pelo programa, porém alguns dimensionamentos resultaram em afundamentos de trilha de roda (ATR) maiores que os limites de 5% da espessura da camada ou 5 mm de contribuição do subleito e então as espessuras foram aumentadas para correção deste problema. As espessuras e os parâmetros de ATR e de área trincada obtidos no MeDiNa, ao final das simulações, estão apresentadas na Tabela 53.

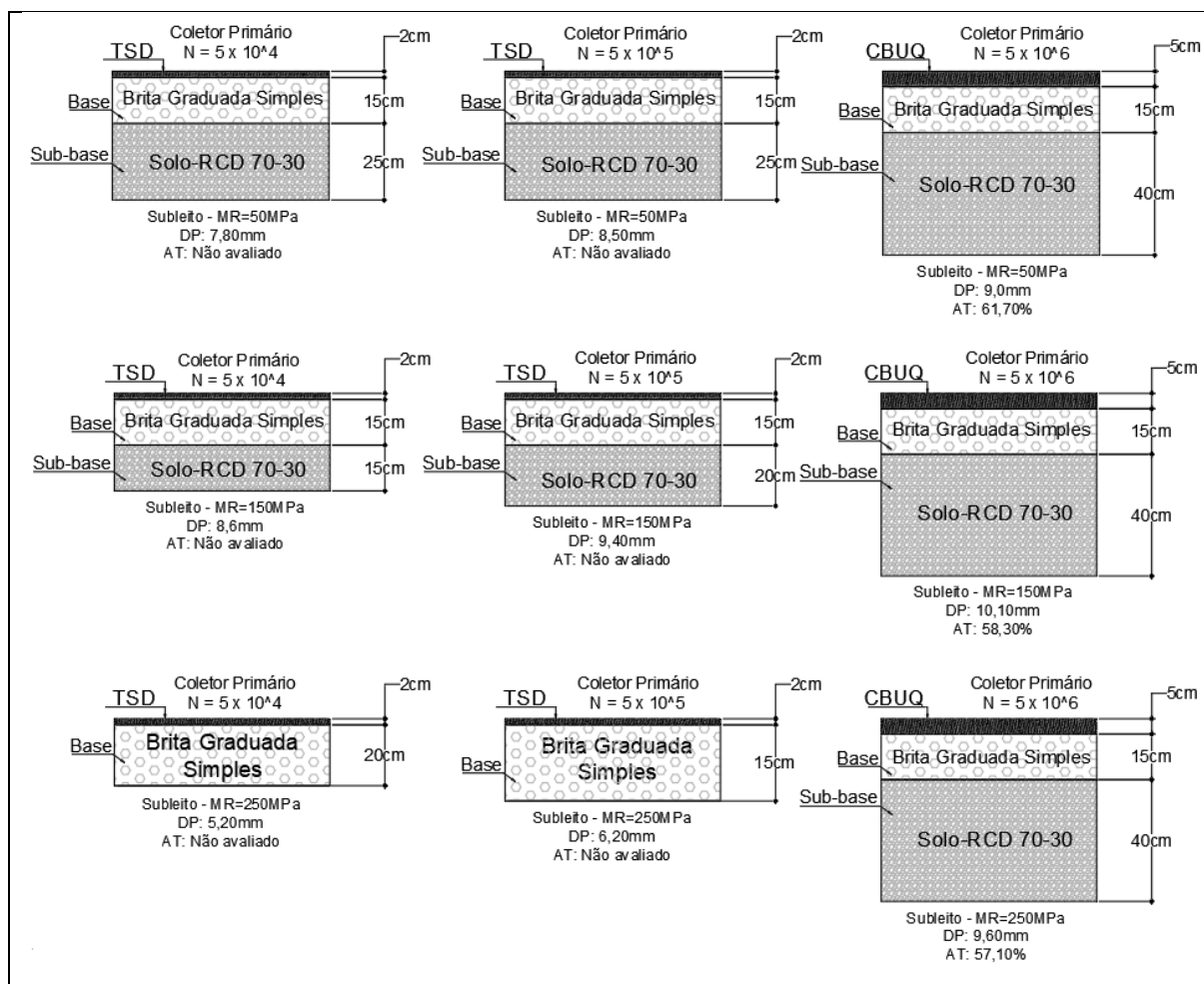
Tabela 53 – Análise dos parâmetros de projeto em função do volume do tráfego e módulo de resiliência do subleito para a Estrutura 01 desta pesquisa

N	N = 5 x 10⁴			N = 5 x 10⁵			N = 5 x 10⁶		
MR Subleito (MPa)	50	150	250	50	150	250	50	150	250
Espessura revestimento (cm)	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	5,00	5,00	5,00
Espessura base (cm) – Brita Graduada Gnaisse C5	15,00	15,00	20,00	15,00	15,00	25,00	15,00	15,00	15,00
Espessura sub-base (cm) – Solo-RCD 70-30	25,00	15,00	-	25,00	20,00	-	40,00	40,00	40,00
ATR sub-base (mm)	2,31	1,56	1,32	2,54	2,31	2,28	4,16	4,63	4,86
ATR subleito (mm)	4,67	6,28	3,84	4,99	6,04	3,90	2,87	3,51	2,76
ATR total (mm)	7,80	8,60	5,20	8,50	9,40	6,20	9,00	10,10	9,60
Área trincada estimada (%)	-	-	-	-	-	-	61,70	58,30	57,10

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

A Figura 75 exemplifica as seções obtidas com base no atendimento do critério de deformação permanente total máxima, representada por DP, que, em função do tipo de via escolhida, deve ser menor ou igual a 13 mm. Para o caso de $N = 5 \times 10^6$, mostra-se também a indicação de AT, representando a área trincada estimada, quando o revestimento é do tipo Concreto Betuminoso (CBUQ). Destaca-se que para revestimentos em TSD a análise da área trincada não é realizada pelo programa devido à natureza desta camada e sua espessura.

Figura 75 – Seções obtidas no MeDiNa para a Estrutura 01 com solo-RCD na sub-base



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Posteriormente também foram avaliados os parâmetros de afundamentos de trilha de roda (ATR) obtidos a partir de uma otimização da estrutura adotando nas camadas de base e sub-base a espessura mínima (15 cm) permitida pelo programa (Tabela 54). Em alguns dimensionamentos ocorreram afundamentos de trilha de roda maiores que os limites de 5% da espessura da camada ou 5 mm de contribuição do subleito e para tais casos deve-se avaliar se o aumento na espessura da camada para correção deste problema seria de fato necessário ou se seria mais viável promover a melhoria do subleito com procedimentos de compactação, por exemplo.

Tabela 54 – Otimização do dimensionamento da Estrutura 01 desta pesquisa para $N = 5 \times 10^4$ e $N = 5 \times 10^5$

N	$N = 5 \times 10^4$			$N = 5 \times 10^5$		
MR Subleito (MPa)	50	150	250	50	150	250
Espessura revestimento (cm)	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Espessura base (cm) – Brita Graduada Gnaisse C5	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00
Espessura sub-base (cm) – Solo-RCD 70-30	15,00	15,00	-	15,00	15,00	-
ATR sub-base (mm)	1,01	1,16	0,85	1,43	1,72	1,05
ATR subleito (mm)	6,68	6,18	4,23	7,32	6,88	4,74
ATR total (mm)	8,40	8,20	5,10	9,70	9,60	5,80

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Verificou-se que as seções obtidas para o $N \leq 5 \times 10^5$ resultaram em ATR abaixo do valor máximo recomendado e as camadas de sub-base e base necessárias para atendimento do tráfego variaram entre 15 e 30 cm. O valor da espessura de TSD foi mantido constante em todas as análises.

Nos casos de $N = 5 \times 10^6$ a espessura da camada de sub-base atingiu o valor máximo para a camada (40 cm) quando se executou a análise otimizando a sub-base e mantendo a espessura do revestimento em 5 cm. Para este caso foi obtida a deformação permanente dentro do limite, porém a área trincada estimada foi muito superior ao limite de 30% para todos os módulos de resiliência de subleito considerados. Isto fez com que o programa emitisse um alerta sobre o tráfego elevado para a estrutura avaliada.

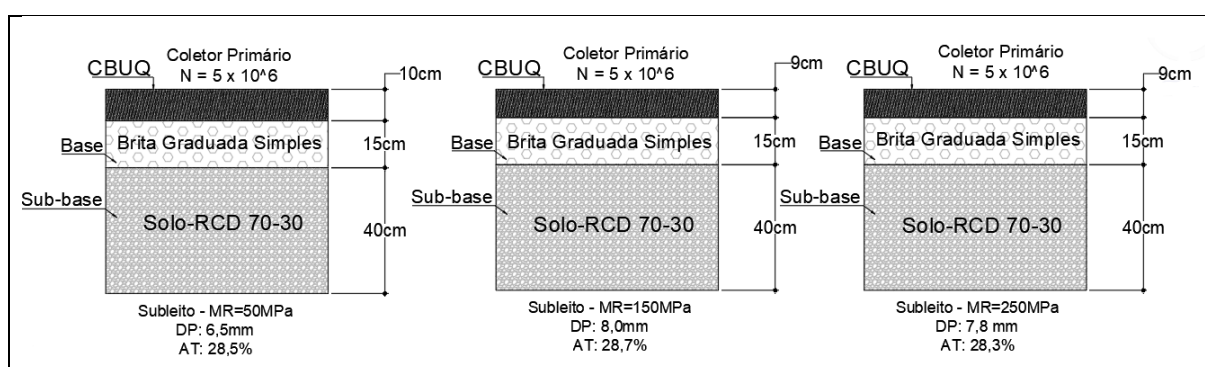
Entende-se que para o valor de $N = 5 \times 10^6$ o valor mínimo de revestimento de 5cm utilizado na metodologia do DNER de acordo com o tráfego (DNIT, 2006) e adotado aqui como valor inicial não foi suficiente para obter o parâmetro de área trincada dentro do limite aceitável, sendo necessário então aumentar tal camada. A Tabela 55 ilustra o dimensionamento final obtido para a situação de tráfego com $N = 5 \times 10^6$, após a realização de simulações com a otimização da camada de revestimento pelo MeDiNa, mantendo as espessuras de base e sub-base nos valores analisados anteriormente.

Tabela 55 – Dimensionamento e parâmetros de projeto para $N = 5 \times 10^6$

N	$N = 5 \times 10^6$		
MR Subleito (MPa)	50	150	250
Espessura revestimento (cm) - Classe 1	9,40	8,50	8,30
Espessura base (cm) – Brita Graduada Gnaiss C5	15,00	15,00	15,00
Espessura sub-base (cm) – Solo-RCD 70-30	40,00	40,00	40,00
ATR (mm)	6,50	8,00	7,80
Área trincada estimada (%)	28,50	28,70	28,30

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

A Figura 76 exemplifica as espessuras das seções para fins práticos, ou seja, as espessuras de projeto, adotadas após dimensionamento feito no MeDiNa. Apesar das estruturas apresentarem revestimento mais espesso que o método do DNER, na metodologia do MeDiNa são levadas em consideração as características dos materiais e isto resulta em maior segurança e confiança no dimensionamento realizado, compensando qualquer gasto adicional com a elevação da espessura do revestimento, pois a estrutura dimensionada não apresentará defeitos significativos antes do período previsto.

Figura 76 – Seções relativas a $N = 5 \times 10^6$ depois da otimização da camada de revestimento

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Para o tráfego $N = 5 \times 10^6$ verificou-se que mantidas as espessuras de base e sub-base em 15 e 40 cm, respectivamente, se tornou necessário aumentar a espessura do revestimento para atendimento dos critérios máximos de ATR e área trincada. Como anteriormente havia sido utilizado nas simulações o concreto asfáltico com classe de fadiga 1, optou-se por verificar também o impacto da modificação da classe de fadiga do concreto asfáltico (para 2 e 3) na

espessura do revestimento. Os resultados destes dimensionamentos encontram-se expostos na Tabela 56 a seguir.

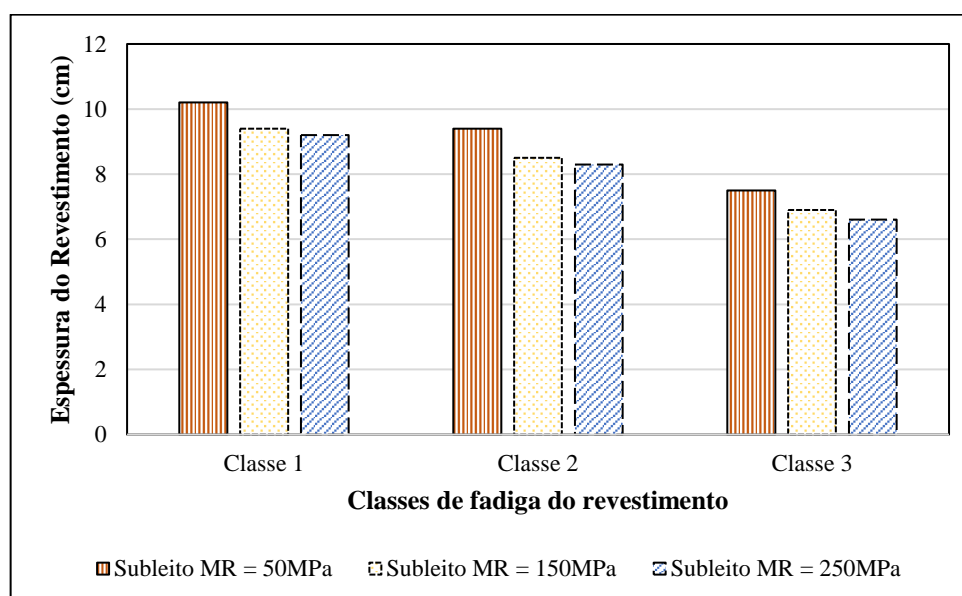
Tabela 56 – Dimensionamento e parâmetros de projeto para $N = 5 \times 10^6$ com revestimento de classes de fadiga 2 e 3

N	N = 5 x 10 ⁶					
Classe de fadiga	Classe 2			Classe 3		
MR Subleito (MPa)	50	150	250	50	150	250
Espessura revestimento (cm)	9,40	8,50	8,30	7,50	6,90	6,60
Espessura base (cm) – Brita Graduada Gnaisse C5	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00
Espessura sub-base (cm) – Solo-RCD 70-30	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00
ATR (mm)	6,10	7,60	7,40	7,00	8,40	8,20
Área trincada estimada (%)	28,30	29,50	29,20	28,80	29,00	29,60

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

A Figura 77 mostra um comparativo entre as espessuras das camadas de revestimento obtidas nos dimensionamentos realizados com revestimento asfáltico de classes de fadiga 1, 2 e 3.

Figura 77 – Análise da variação da classe de fadiga do revestimento na obtenção da espessura da camada



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Analisando os resultados da Figura 77 observou-se que ao utilizar o revestimento de concreto asfáltico com classe de fadiga 2 é possível obter redução na espessura desta camada quando se considera um revestimento com melhor desempenho à fadiga. Este tipo de revestimento é o caso da classe 2, que pode ser obtida por ajustes granulométricos da mistura asfáltica classe 1, sem demandar maiores gastos. Isto ocorre devido ao fato de que no método do CBR as características da mistura asfáltica não são determinantes para definir a espessura do revestimento e no MeDiNa tais características podem ser levadas em consideração.

Posteriormente, foram realizadas simulações que empregavam o solo-RCD 70-30 também na camada de base com o intuito de verificar a aplicabilidade deste material para esta camada de acordo com as diretrizes do novo método. Esta adoção de materiais foi denominada de “Estrutura 02”.

As camadas de base e sub-base da “Estrutura 02” foram limitadas a espessuras máximas individuais de 25 cm, visto que o mesmo material foi aplicado em camadas sucessivas. Critérios técnicos relacionados com a disponibilidade deste material também foram levados em consideração para esta adoção pois, o dimensionamento que resulta em camadas de base e sub-base de solo-RCD com espessura máxima (40 cm) pelo método MeDiNa, do ponto de vista de projeto e execução não é o recomendado, visto que o quantitativo de resíduos gerados em determinado período do ano pode não ser tão elevado para suprir a demanda e viabilizar a execução de camadas de pavimento tão espessas, por exemplo.

Devido ter sido verificado nas simulações anteriores para $N = 5 \times 10^6$ que a camada de revestimento obtida no método MeDiNa é mais espessa que a camada recomendada no método antigo do DNER, o dimensionamento da “Estrutura 02” para este tráfego foi realizado por meio da otimização da camada de revestimento, ou seja, foram atribuído os valores de 25 cm, aqui considerados como máximos, para as camadas de base e sub-base e obteve-se a espessura de revestimento adequada para suportar tal tráfego nestas condições. Nas situações em que se percebeu ATR e área trincada bastante inferiores aos limites estabelecidos foi feita a diminuição das camadas de base e sub-base para obter o dimensionamento mais otimizado possível. A classe de fadiga considerada nestes dimensionamentos foi a 2.

Os resultados dos dimensionamentos finais obtidos para a “Estrutura 02” bem como os parâmetros de ATR e área trincada, dentro dos limites máximos estabelecidos, estão apresentados na Tabela 57.

Tabela 57 – Análise dos parâmetros de projeto em função do volume do tráfego e módulo de resiliência do subleito para a Estrutura 02

N	N = 5 x 10 ⁴			N = 5 x 10 ⁵			N = 5 x 10 ⁶		
MR Subleito (MPa)	50	150	250	50	150	250	50	150	250
Espessura revestimento (cm)	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	*9,40	*8,30	*7,90
Espessura base (cm) – Solo - RCD 70-30	25,00	25,00	15,00	25,00	25,00	15,00	25,00	25,00	25,00
Espessura sub-base (cm) – Solo- RCD 70-30	-	-	-	-	-	-	25,00	25,00	25,00
ATR base (mm)	1,77	2,13	0,88	1,95	2,35	0,97	2,50	2,89	3,05
ATR subleito (mm)	5,19	5,39	4,15	5,56	5,90	4,95	2,77	3,53	2,81
ATR total (mm)	7,00	7,50	5,0	7,50	8,20	5,60	6,40	8,00	7,60
Área trincada estimada (%)	-	-	-	-	-	-	28,70	28,40	28,40

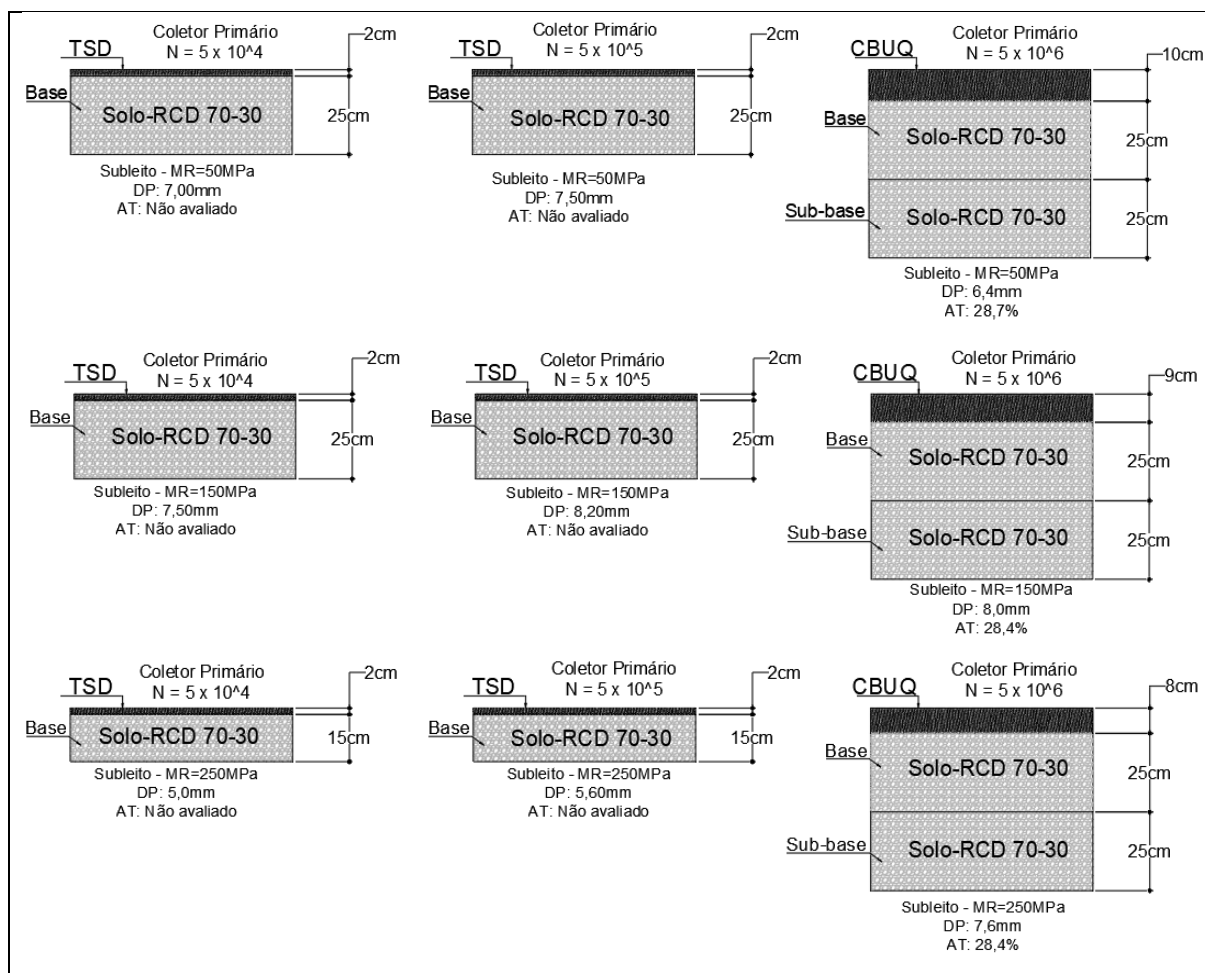
* Concreto asfáltico Classe 2

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Verificou-se que, de modo geral, o ATR obtido para as estruturas dimensionadas está atrelado principalmente às deformações do subleito. O material solo-RCD 70-30 apresentou pouca contribuição para as deformações obtidas em todos os níveis de tráfego avaliados.

Assim como nas análises anteriores, em alguns dimensionamentos ocorreram afundamentos de trilha de roda com mais 5 mm de contribuição do subleito. Destaca-se que o aviso emitido pelo programa para deformações acima de 5 mm não invalida a estrutura, mas informa ao projetista que este parâmetro deve ser considerado e possivelmente pode ser importante implementar melhorias na compactação do subleito, caso seja mantida a configuração. A Figura 78 ilustra o dimensionamento obtido para a Estrutura 02.

Figura 78 – Seções obtidas no MeDiNa para a Estrutura 02 com solo-RCD



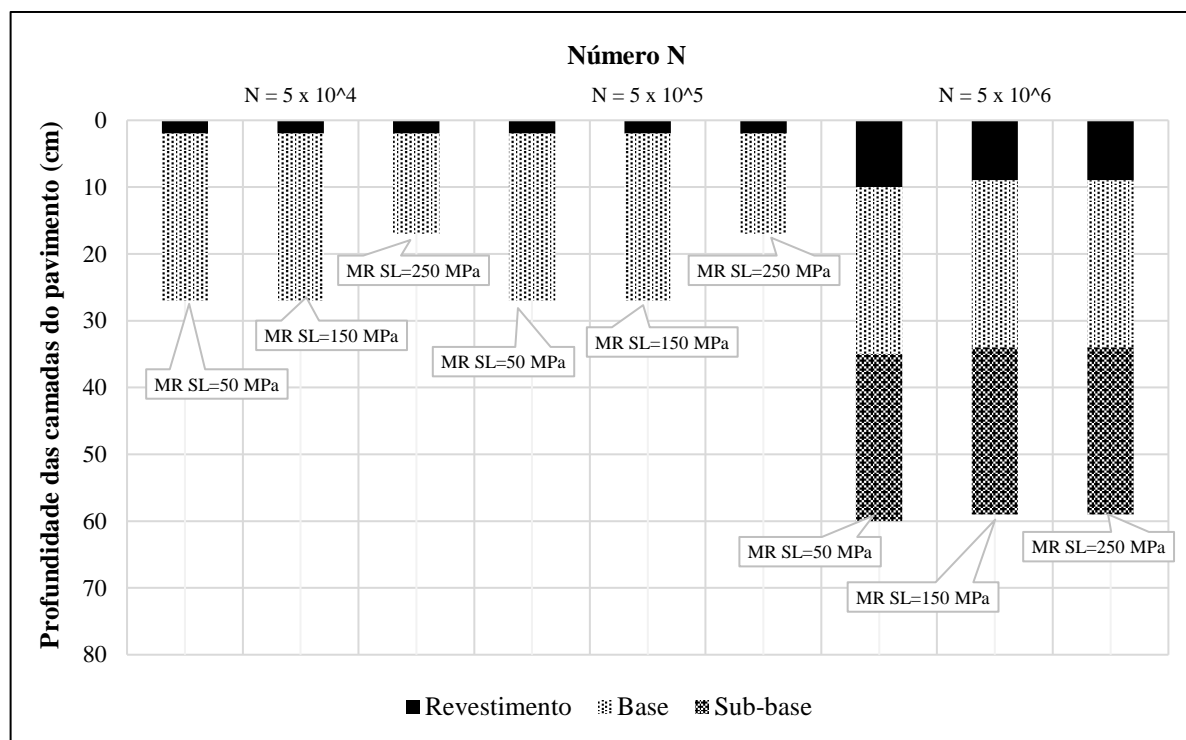
Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Nos dimensionamentos para $N = 5 \times 10^4$ e $N = 5 \times 10^5$ obteve-se uma otimização da estrutura em relação a “Estrutura 01” avaliada anteriormente, visto que a utilização de solo-RCD 70-30 proporcionou para tais tráfegos a possibilidade de utilizar somente a camada de base com este material. Para tais análises a espessura foi limitada a 25 cm e nos casos onde o ATR obtido foi bastante inferior, devido ao módulo do subleito ter aumentado de magnitude, optou-se por otimizar ainda mais a camada considerando-a com os 15 cm mínimos permitidos pelo programa.

Percebe-se então que para $N = 5 \times 10^6$ e subleitos com baixo módulo de resiliência a aplicação de solo-RCD 70-30 em camadas de base e sub-base limitadas a 25 cm impõem aumento da camada de revestimento, mesmo quando considera-se um revestimento com classe de fadiga 2. Outra opção para diminuir a camada de revestimento seria extrapolar a espessura das camadas de base e sub-base (até os 40 cm permitidos no MeDiNa) porém, conforme destacado anteriormente, entende-se que esta prática não é a mais recomendada. A Figura 79

retrata um comparativo entre todas as estruturas para as distintas situações de N e de módulo de resiliência do subleito.

Figura 79 - Estruturas obtidas através do *software* MeDiNa em função do número N e do MR do subleito utilizando solo-RCD 70-30 na base e na sub-base



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Aqui foi mostrada algumas possibilidades de análise de uma estrutura de pavimento com distintos materiais, para diferentes volumes de tráfego, quando se utiliza o MeDiNa. Muitas outras poderiam ser consideradas por um projetista, levando em conta os materiais regionais, o uso de materiais alternativos ou outros resíduos, combinados ou não com solo etc., são muitas as possibilidades. Cabe considerar que não necessariamente, para cada camada, a seleção dos materiais deve ficar limitada a valores de resistência ou deformabilidades “fixos”, mas combinações de rigidez entre camadas importa, como indica a Mecânica dos Pavimentos. Outra questão está na energia de compactação utilizada que pode melhorar muito o comportamento mecânico dos materiais estudados e que aqui não foi explorada.

Não se teve a intenção de esgotar todas as possibilidades, mas ilustrar as novas formas de avaliar as características mecânicas dos materiais, convencionais ou alternativos, e entender o comportamento da estrutura dos pavimentos pelo aspecto da análise em conjunto das

deformabilidades elásticas e plásticas de cada um, mas principalmente quando analisados em conjunto.

4.5.2.2 Avaliação com o Solo-brita 70-30

Para avaliar o comportamento do solo-brita 70-30 e comparar este comportamento com o solo-RCD 70-30, foram realizadas simulações com a aplicação deste material simultaneamente nas camadas de base e sub-base (quando necessário), como realizado para o solo-RCD 70-30 anteriormente. Os resultados do dimensionamento realizado com este material estão apresentados na Tabela 58.

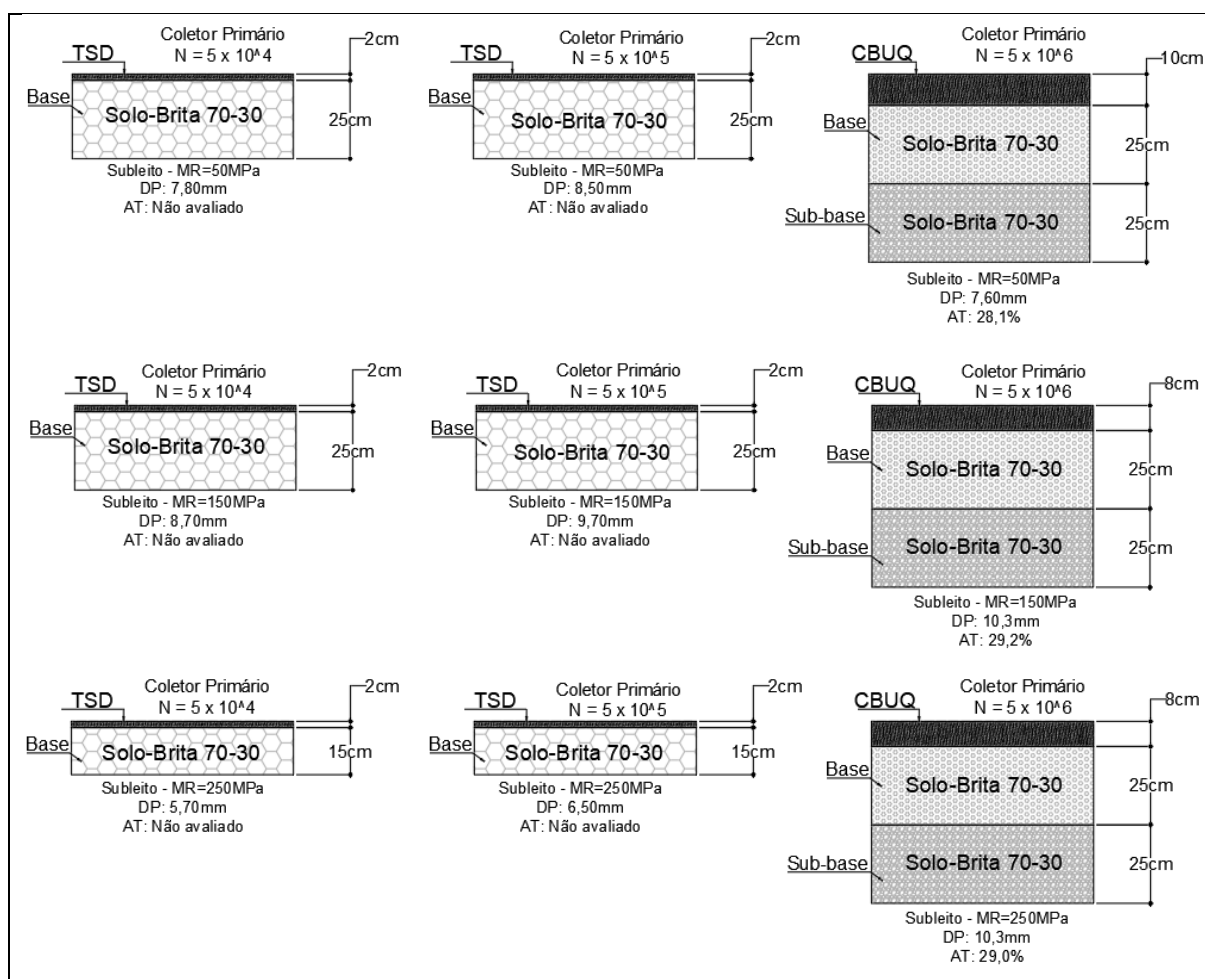
Tabela 58 – Análise dos parâmetros de projeto em função do volume do tráfego e módulo de resiliência do subleito com solo-brita 70-30 aplicado na base e sub-base

N	N = 5 x 10 ⁴			N = 5 x 10 ⁵			N = 5 x 10 ⁶		
	50	150	250	50	150	250	50	150	250
(MPa) MR Subleito									
Espessura revestimento (cm)	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	9,40	7,90*	7,50*
Espessura base (cm) – Solo-brita 70-30	25,00	25,00	15,00	25,00	25,00	15,00	25,0	25,0	25,0
Espessura sub-base (cm) – Solo-brita 70-30	-	-	-	-	-	-	25,0	25,0	25,0
ATR base (mm)	2,74	3,43	1,61	3,14	3,93	1,84	3,35	4,32	4,65
ATR subleito (mm)	5,03	5,24	4,12	5,38	5,73	4,61	2,77	3,59	2,85
ATR total (mm)	7,80	8,70	5,70	8,50	9,70	6,50	7,60	10,30	10,30
Área trincada estimada (%)	-	-	-	-	-	-	28,10	29,20	29,00

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

A Figura 80 ilustra o dimensionamento obtido quando se utilizou solo-brita 70-30 nas camadas de base ou de base e sub-base, simultaneamente.

Figura 80 - Estruturas obtidas através do *software* MeDiNa em função do número N e do MR do subleito



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Analisando os resultados dos dimensionamentos, verifica-se que o comportamento obtido para a estrutura com solo-brita 70-30 foi semelhante ao comportamento obtido para a estrutura que empregou o solo-RCD 70-30 aplicado nas camadas de base e sub-base. As deformações permanentes obtidas para a estrutura que utilizou o solo-RCD 70-30 foram menores do que as deformações permanentes totais obtidas nos dimensionamentos com o solo-brita 70-30. É importante ressaltar que tais análises e dimensionamentos foram meramente ilustrativos, visto que os parâmetros de deformação permanente para o solo-brita 70-30 foram adotados e não obtidos através de ensaios.

A proposição das estruturas visa difundir exemplos de dimensionamentos do novo método mecanístico-empírico e por isso todos os dimensionamentos são indicações, pois várias combinações entre materiais são possíveis e podem ser analisadas no programa. Os dimensionamentos foram realizados com o intuito de realçar a viabilidade do emprego do RCD

em mistura com solo local nas camadas de um pavimento, mesmo que as características físicas e de CBR estimado para as misturas do solo com estes resíduos, de acordo com as orientações normativas vigentes, não tornem o material totalmente apto para uso em camada de base.

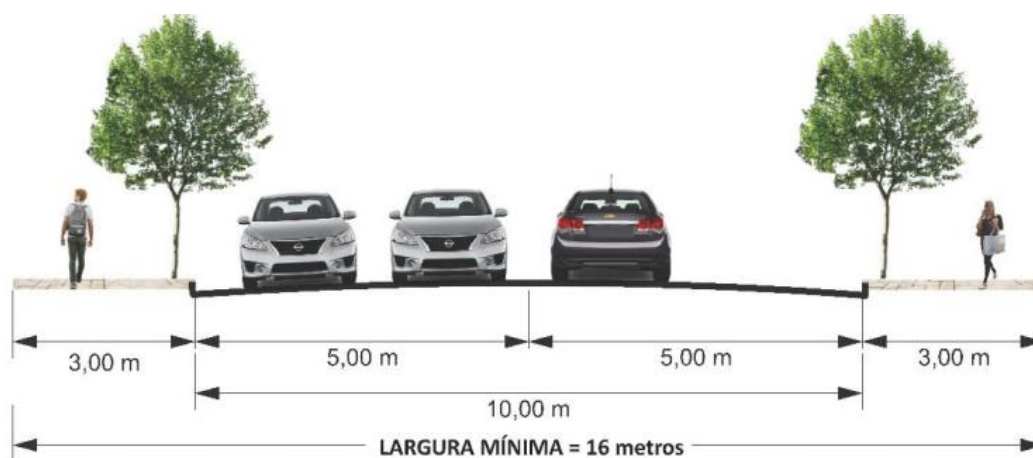
Em um projeto real todos os materiais devem passar por vários ensaios de módulo de resiliência e deformação permanente, desse modo a autora não se responsabiliza pelo uso indevido de nenhuma estrutura apresentada nesta pesquisa.

4.6 Análise de custo

Os comparativos de custos aqui desenvolvidos foram executados em duas vertentes: primeiro fez-se um comparativo de custos de execução das seções dos pavimentos obtidas por meio de métodos de dimensionamento distintos e, posteriormente, realizou-se comparativo de custos de execução das seções dos pavimentos com base na modificação dos materiais, analisando a variação do custo de acordo com o uso de materiais convencionais e uso materiais alternativos em seção semelhante.

Nesta pesquisa, optou-se por calcular o custo referente a cada km de pavimento executado. Assim, determinou-se a largura das camadas com base no padrão de via urbana coletora. A largura de 10m foi considerada para o cálculo do consumo de material no trecho de 1 km, para posteriormente calcular os valores gastos. A Figura 81 aborda a seção considerada para vias urbanas coletoras.

Figura 81 – Padrão de via urbana coletora ou de distribuição



Fonte: Anexo III do Plano Diretor Municipal de Diamante do Norte - PR (2020)

4.6.1 Comparativo de custos entre métodos

O estudo comparativo desta pesquisa foi desenvolvido analisando prioritariamente as variáveis relacionadas aos custos de aquisição dos materiais e considerando também custos de transporte destes até o local de aplicação. Para tanto foram levadas em consideração três seções específicas conforme exemplificado na Tabela 59.

Tabela 59 – Seções utilizadas na análise de custo

	Método do DNER	Método do MeDiNa – Estrutura 01	Método do MeDiNa – Estrutura 02
N	5 x 10⁵		
CBR SL (%)	2	-	-
MR SL (MPa)	-	50	50
Espessura revestimento (cm):	2,00	2,00	2,00
Espessura base (cm):	15,00	15,00	25,00
Espessura sub-base (cm):	25,00	25,00	-
Reforço do subleito (cm):	50,00	-	-
ATR (mm)	Não é calculado	8,50	7,50

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Como apresentado na Tabela 59 foi escolhido para análise o dimensionamento resultante do tráfego com $N = 5 \times 10^5$ associado ao índice de suporte Califórnia do subleito de 2% (para o método do DNER) e ao módulo de resiliência do subleito de 50 MPa (para o método do MeDiNa). Eventuais melhorias que poderiam ser requeridas para tais tipos de subleitos em casos de projetos reais não foram verificadas nesta avaliação de custo.

A partir da definição da seção das estruturas que seriam avaliadas, foram determinados os quantitativos necessários para executar cada um dos pavimentos. As Tabelas 60, 61 e 62 exemplificam o quantitativo de insumos por km (materiais granulares e tratamento superficial duplo na camada de revestimento em m³ e em m², respectivamente) que seriam necessários para executar as seções.

Tabela 60 – Consumo de materiais para a seção obtida no método do DNER

Camada	Espessura (cm)	Quantitativo de insumo por km
Revestimento	2,0	10.000m ²
Base	15,0	1.500 m ³
Sub-base	25,0	2.500 m ³
Reforço do Subleito	50,0	5.000 m ³

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Tabela 61 – Consumo de materiais para a seção obtida no *software* MeDiNa – Estrutura 01

Camada	Espessura (cm)	Quantitativo de insumo por km
Revestimento	2,0	10.000m ²
Base	15,0	1.500 m ³
Sub-base	25,0	2.500 m ³

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Tabela 62 – Consumo de materiais para a seção obtida no *software* MeDiNa – Estrutura 02

Camada	Espessura (cm)	Quantitativo de insumo por km
Revestimento	2,0	10.000m ²
Base	25,0	2.500 m ³

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

A determinação dos custos para execução de cada camada do pavimento foi feita a partir das informações presentes nas composições do Sistema de Custos Referenciais de Obras (SICRO) referente ao mês de janeiro de 2021 para o estado do Rio Grande do Norte.

Porém, para o material de solo-RCD 70-30, foi necessário elaborar a composição do custo, visto que o SICRO não contempla composição com agregados de resíduos reciclados. Para tanto, utilizou-se como base a composição de custo referente a “Sub-base estabilizada granulometricamente com mistura solo-brita (70%-30%) na pista com material de jazida” e calculou-se a composição para o caso do solo-RCD com base nos dados disponibilizados pela Usina Duarte Ltda, expostos na Tabela 63.

Tabela 63 – Custos para aquisição do RCD da Usina Duarte em maio/2021

Material	Unidade	Custo	Região de entrega
RCD 19 mm	m ³	R\$ 65,00	Natal e Região metropolitana
		R\$ 150,00	Ipueira/RN

Fonte: Duarte Usina de RCC LTDA (2021)

A Tabela 64 mostra a composição dos custos estimados referentes ao serviço de “Base ou Sub-base estabilizada granulometricamente com mistura solo-RCD (70%-30%) na pista com material de jazida”.

Tabela 64 – Composição do custo de base ou sub-base composta por solo-RCD 70-30

ITENS	CUSTO HORÁRIO		CUSTO HOR.	
	PRODUTIVO	IMPRODUTIVO	TOTAL	
Caminhão tanque com capacidade de 10.000 l - 188 kW	R\$ 204,53	R\$ 55,07	R\$ 179,12	
Grade de 24 discos rebocável de 24"	R\$ 2,57	R\$ 1,71	R\$ 2,25	
Motoniveladora - 93 kW	R\$ 166,55	R\$ 70,87	R\$ 166,55	
Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	R\$ 136,15	R\$ 65,11	R\$ 126,21	
Rolo compactador pé de carneiro vibratório autopropelido de 11,6 t - 82 kW	R\$ 138,81	R\$ 62,99	R\$ 131,23	
Trator agrícola - 77 kW	R\$ 121,06	R\$ 31,45	R\$ 87,01	
CUSTO TOTAL DE EQUIPAMENTOS			R\$ 692,38	
PRODUÇÃO DA EQUIPE (M ³)			150,88	
CUSTO UNITÁRIO DE EQUIPAMENTOS POR M ³ PRODUZIDO			R\$ 4,70	
DEMAIS ITENS	QTD.	UNIDADE	CUSTO HORÁRIO / PREÇO UNITÁRIO	CUSTO HORÁRIO TOTAL
Servente	1	h	R\$ 16,3531	R\$ 16,3531
Resíduo de Construção e Demolição de Obras – RCD Usina Duarte	0,4126	m ³	R\$ 150,00	R\$ 61,89
Escavação e carga de material de jazida com escavadeira hidráulica de 1,56m ³	0,77019	m ³	0,90	R\$ 0,69
Escavação e carga de material de jazida com escavadeira hidráulica de 1,56 m ³ - Caminhão basculante 10 m ³	1,4441	t	1,01	R\$ 1,46
Resíduo de Construção e Demolição - RCD - Caminhão basculante 10 m ³	0,6189	t	0,97	R\$ 0,60
CUSTO FINAL			R\$ 69,34	

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

As Tabelas 65 e 66 apresentam os custos de execução das seções obtidas através do método do DNER e do *software* MeDiNa, ambas com base de brita graduada com brita comercial e sub-base de solo-RCD 70-30.

Tabela 65 – Custos para execução de 1 km da seção obtida no dimensionamento do DNER

Camada	Descrição do Serviço – SICRO janeiro / 2021	Unidade	Custo unitário	Quantitativo de insumo por km	Custo Total
Revestimento	Tratamento superficial duplo com banho diluído - brita comercial	m ²	R\$ 3,60	10000	R\$ 36.000,00
Base	Brita graduada com brita comercial	m ³	R\$ 115,42	1500	R\$ 173.130,00
Sub-base	Estabilizada granulometricamente com mistura solo-RCD (70% - 30%) na pista com material de jazida e brita comercia	m ³	R\$ 69,34	2500	R\$ 173.350,00
Reforço do Subleito	Reforço do subleito com material de jazida	m ³	R\$ 6,88	5000	R\$ 34.400,00
TOTAL					R\$ 416.880,00

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Tabela 66 – Custos para execução de 1 km da seção obtida no MeDiNa – Estrutura 01

Camada	Descrição do Serviço – SICRO janeiro / 2021	Unidade	Custo unitário	Quantitativo de insumo por km	Custo Total
Revestimento	Tratamento superficial duplo com banho diluído - brita comercial	m ²	R\$ 3,60	10000	R\$ 36.000,00
Base	Brita graduada com brita comercial	m ³	R\$ 115,42	1500	R\$ 173.130,00
Sub-base	Estabilizada granulometricamente com mistura solo-RCD (70%-30%) na pista com material de jazida	m ³	R\$ 69,34	2500	R\$ 173.350,00
TOTAL					R\$ 382.480,00

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

A Tabela 67 apresenta o custo estimado para uma seção inteiramente composta por base em solo-RCD 70-30, referente a Estrutura 02, dimensionada no programa para a mesma situação de tráfego e módulo do subleito.

Tabela 67 – Custos para execução de 1 km da seção obtida no MeDiNa – Estrutura 02

Camada	Descrição do Serviço – SICRO janeiro / 2021	Unidade	Custo unitário	Quantitativo de insumo por km	Custo Total
Revestimento	Tratamento superficial duplo com banho diluído - brita comercial	m ²	R\$ 3,60	10000	R\$ 36.000,00
	Estabilizada granulometricamente com mistura solo-RCD (70%-30%) na pista com material de jazida	m ³	R\$ 69,34	2500	R\$ 173.350,00
TOTAL					R\$ 209.350,00

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Observando as tabelas com os custos de cada seção, pode-se afirmar que a estrutura do pavimento que apresentou menor custo foi a obtida através das análises realizadas no MeDiNa quando feito uso do solo-RCD 70-30 na camada de base com 25 cm de espessura. Mesmo com a elevação dos custos com aquisição do RCD devido a consideração de um cenário onde os resíduos teriam que ser transportados da Usina Duarte até a cidade de Ipueira, de onde foi oriundo o solo, o custo total por km da estrutura ainda se apresentou inferior às demais opções. Em um cenário que o processamento dos resíduos de construção e demolição de obras ocorra na própria cidade o custo por km ainda seria menor.

Devido ao *software* MeDiNa considerar os parâmetros de módulo de resiliência e deformação permanente dos materiais o dimensionamento obtido com a utilização do programa para $N = 5 \times 10^5$ foi mais otimizado, ou seja, foi possível renunciar à utilização de reforço do subleito como havia sido utilizado no método do DNER, e também foi possível analisar o desempenho da estrutura quando utilizado solo-RCD 70-30 somente na camada de base, o que não seria viável no método antigo do DNER.

Assim, entende-se que a redução dos custos para esta estrutura ocorreu em função da supressão e diminuição das camadas pela otimização proporcionada pelo MeDiNa. A

diminuição na espessura não prejudicou o desempenho da estrutura e nem ocasionou deformações permanentes elevadas (ao final da vida útil de projeto) nas simulações feitas no programa. Verificou-se que o uso do *software* permite avaliar o desempenho de materiais diversos e analisar a potencialidade e o custo-benefício da aplicação desses materiais para otimizar estruturas de pavimento com cargas de tráfego que variem de baixas a médias.

Destaca-se novamente que não se pretende aqui comparar ou correlacionar o valor mínimo de CBR com valor de mínimo de MR, pois são parâmetros distintos. Porém, ao se considerar os valores mínimos de capacidade de suporte e módulo de resiliência em duas metodologias distintas fica evidente que o método MeDiNa proporciona otimização no dimensionamento que resulta em ganhos econômicos consideráveis, visto que podem ser dimensionados pavimentos para tráfegos baixos e médios com materiais de custo inferior que atendem à demanda proposta.

A outra seção avaliada no MeDiNa, composta por brita graduada com brita comercial na base e solo-RCD 70-30 na sub-base apareceu como segundo menor custo na estimativa realizada e a seção obtida através do método do antigo DNER, composta por brita graduada na base e solo-RCD 70-30 na sub-base foi a que apresentou o custo por km mais elevado dentre as três seções, assim, entende-se que a necessidade de inserção de reforço de subleito e as camadas mais espessas obtidas para este método alteraram significativamente o valor dos custos.

4.6.2 Comparativo de custos entre uso de solo-brita 70-30 e solo-RCD 70-30

Para estas análises foram comparados os custos associados à aplicação do solo-RCD 70-30 em camadas de base em relação aos custos de aplicação dos materiais granulares tradicionais como o solo-brita 70-30. Os comparativos foram executados unicamente em função dos gastos com material e transporte dos materiais para execução de 1,0 km de via pavimentada, calculando-se o custo por km executado a partir das composições presentes no Sistema de Custos Referenciais de Obras (SICRO) e na composição intitulada de “Base ou Sub-base estabilizada granulometricamente com mistura solo-RCD (70%-30%) na pista com material de jazida”, descrita no tópico anterior.

Partindo do princípio de que o custo operacional de execução dos serviços será o mesmo em ambas as condições foi realizado o comparativo entre seções semelhantes com variação somente do material aplicado nas camadas. Sabe-se que na prática isto não ocorre, pois, os materiais são diferentes e isto implica na variação de alguns fatores executivos, como

por exemplo distintos teores de umidade de compactação. Porém, como a seção obtida utilizando o solo-brita 70-30 e o solo-RCD 70-30 em foi igual para o caso do método do DNER e aproximada na maioria das simulações feitas com o *software* MeDiNa fez-se essa adoção para simplificar o processo entendendo que as pequenas variações executivas não afetariam consideravelmente a magnitude dos custos por km. Este comparativo foi desenvolvido levando em consideração duas seções específicas, com espessuras das camadas de base e sub-base iguais, obtidas através *software* MeDiNa conforme exemplificado na Tabela 68.

Tabela 68 – Seções selecionadas

N	5 x 10 ⁵	
MR SL (MPa)	50	
Material utilizado na base e na sub-base	Solo-Brita 70-30	Solo-RCD 70-30
Espessura revestimento (cm):	2,00	2,00
Espessura base (cm):	25,00	25,00
Espessura sub-base (cm):	-	-
ATR (mm)	8,50	7,50

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

As Tabelas 69 e 70 apresentam os custos de execução de seções obtidas através do *software* MeDiNa quando foram utilizados solo-brita 70-30 e solo-RCD 70-30 na camada de base.

Tabela 69 – Custos para execução de 1 km da seção com solo-brita 70-30

Camada	Descrição do Serviço – SICRO janeiro / 2021	Unidade	Custo unitário	Quantitativo de insumo	Custo Total
Revestimento	Tratamento superficial duplo com banho diluído - brita comercial	m ²	R\$ 3,60	10000	R\$ 36.000,00
Base	Estabilizada granulometricamente com mistura solo-brita (70%-30%) na pista com material de jazida	m ³	R\$ 42,67	2500	R\$ 106.675,00
TOTAL					R\$ 142.675,00

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Tabela 70 – Custos para execução de 1 km da seção com solo-RCD 70-30

Camada	Descrição do Serviço – SICRO janeiro / 2021	Unidade	Custo unitário	Quantitativo de insumo	Custo Total
Revestimento	Tratamento superficial duplo com banho diluído - brita comercial	m ²	R\$ 3,60	10.000	R\$ 36.000,00
Base	Estabilizada granulometricamente com mistura solo-RCD (70%-30%) na pista com material de jazida	m ³	R\$ 69,34	2.500	R\$ 173.350,00
TOTAL					R\$ 209.350,00

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Analisando as tabelas dos custos por km das seções com os distintos materiais, verifica-se que a estrutura que utilizou o solo-brita 70-30 apresentou menor custo por km em relação a estrutura que utiliza solo-RCD 70-30. Este fato se deve ao valor do metro cúbico considerado para aquisição do RCD, pois, conforme exposto anteriormente na Tabela 63, em um cenário de comercialização dos resíduos com o preço usual do m³ (entregue em Natal e região metropolitana) a R\$ 65,00, o valor do custo por km do pavimento que utiliza solo-RCD na composição diminuiria consideravelmente, chegando a ser inferior ao praticado com a utilização do solo-brita 70-30. A Tabela 71 demonstra a composição do custo considerando o valor do m³ de RCD como R\$ 65,00, obtendo então um valor de R\$ 34,27 para cada m³ executado com solo-RCD 70-30.

Tabela 71 – Composição do custo de base ou sub-base composta por solo-RCD 70-30

ITENS	CUSTO HORÁRIO		CUSTO HOR. TOTAL	
	PRODUTIVO	IMPRODUTIVO		
Caminhão tanque com capacidade de 10.000 l - 188 kW	R\$ 204,53	R\$ 55,07	R\$ 179,12	
Grade de 24 discos rebocável de 24"	R\$ 2,57	R\$ 1,71	R\$ 2,25	
Motoniveladora - 93 kW	R\$ 166,55	R\$ 70,87	R\$ 166,55	
Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	R\$ 136,15	R\$ 65,11	R\$ 126,21	
Rolo compactador pé de carneiro vibratório autopropelido de 11,6 t - 82 kW	R\$ 138,81	R\$ 62,99	R\$ 131,23	
Trator agrícola - 77 kW	R\$ 121,06	R\$ 31,45	R\$ 87,01	
CUSTO TOTAL DE EQUIPAMENTOS			R\$ 692,38	
PRODUÇÃO DA EQUIPE (M³)			150,88	
CUSTO UNITÁRIO DE EQUIPAMENTOS POR M³ PRODUZIDO			R\$ 4,70	
DEMAIS ITENS	QTD.	UNIDADE	CUSTO HORÁRIO /	CUSTO HORÁRIO
Servente	1	h	R\$ 16,3531	R\$ 16,3531
Resíduo de Construção e Demolição de Obras – RCD Usina Duarte	0,4126	m³	R\$ 65,00	R\$ 26,82
Escavação e carga de material de jazida com escavadeira hidráulica de 1,56m³	0,77019	m³	0,90	R\$ 0,69
Escavação e carga de material de jazida com escavadeira hidráulica de 1,56 m³ -	1,4441	t	1,01	R\$ 1,46
Resíduo de Construção e Demolição - RCD Caminhão basculante 10 m³	0,6189	t	0,97	R\$ 0,60
CUSTO FINAL			R\$ 34,27	

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

A Tabela 72 exemplifica os custos finais em um cenário onde o RCD seria obtido com custos mais baixos, em uma unidade de beneficiamento no Seridó, por exemplo, com valor de m³ semelhante ao praticado pela Duarte Usina de RCC para entrega em Natal e região metropolitana atualmente.

Tabela 72 – Custos para execução de 1 km da seção com solo-RCD 70-30

Camada	Descrição do Serviço – SICRO janeiro / 2021	Unidade	Custo unitário	Quantitativo de insumo	Custo Total
Revestimento	Tratamento superficial duplo com banho diluído - brita comercial	m ²	R\$ 3,60	10000	R\$ 36.000,00
Base	Estabilizada granulometricamente com mistura solo-RCD (70%- 30%) na pista com material de jazida	m ³	R\$ 34,27	2500	R\$ 85.675,00
TOTAL					R\$ 121.675,00

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Verificou-se que, quando foram reduzidos os custos com transporte dos agregados reciclados, a estrutura do pavimento com a mistura de solo-RCD 70-30 apresentou custos com cerca de 15% de redução em relação à estrutura convencional executada com solo-brita 70-30. Dessa forma, percebe-se a necessidade de implantação de centrais de processamento de resíduos nas diversas cidades do estado, visto que, esta seria a maneira mais viável para estimular e contribuir ainda mais na difusão do reuso nas obras de pavimentação (com tráfego leve e médio) dentro das cidades.

Em virtude da promulgação da Lei 12.305/2010, sabe-se que, tanto ao Distrito Federal como aos Municípios cabem a gestão integrada dos resíduos sólidos gerados nos respectivos territórios e que estes devem observar a seguinte ordem de prioridade nas tomadas de decisões sobre a temática: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos. Estas diretrizes da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) para o setor de resíduos é uma realidade e espera-se que, aos poucos, o cenário de reuso nos municípios seja modificado, fazendo com que os estados passem a ter mais pontos de beneficiamento dos resíduos, diminuindo as distâncias de transportes e aumentando o volume de material disponível para reincorporação na cadeia de construção.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Por meio dos estudos realizados nesta pesquisa esta seção apresenta as conclusões, recomendações e sugestões para pesquisas futuras.

5.1 Conclusões

A análise da adequação das misturas de solo-brita e solo-RCD para execução de camadas de base e sub-base de pavimentos de acordo com as normativas do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes vigentes mostrou que as composições que mais se aproximaram das faixas específicas sugeridas foram as de solo-brita 70-30 e solo-RCD 70-30, porém estas misturas ainda necessitavam de correções granulométricas para enquadramento perfeito nas faixas granulométricas. Tendo como referência os diversos autores consultados e os resultados obtidos para os materiais ensaiados na presente pesquisa, foram elencadas as seguintes conclusões:

- a) Por meio dos ensaios triaxiais dinâmicos, verificou-se que a maioria das misturas de solo-RCD e solo-Brita preparadas nesta pesquisa, mostrou desempenho satisfatório, semelhante ao comportamento de misturas de solo-agregados avaliadas em pesquisas desenvolvidas por outros autores.
- b) Realizando um comparativo com os módulos de resiliência médios das misturas de Solo-Brita (SB) e Solo-RCD (SRCD) constatou-se que os MR de ambas as misturas tiveram valores crescentes até a proporção com 30% de agregados e valores decrescentes para proporções com mais de 30% de agregados, porém todos os valores médios de MR das misturas foram superiores aos valores médios de MR do solo na condição pura.
- c) Os ensaios de módulo de resiliência mostraram que a mistura otimizada, ou seja, a mistura que apresentou maior MR foram as misturas de SB 70-30 e SRCD 70-30.
- d) As misturas de solo-brita com teores de 15% e 30% de agregados apresentaram melhor desempenho na magnitude do módulo de resiliência quando comparadas com as misturas de solo-RCD com mesma proporção de agregados.
- e) Por meio da análise dos parâmetros das regressões e dos níveis de regressão (R^2) obtidos nos modelos utilizados, verificou-se que todas as misturas sofrem

significativa influência das tensões de confinamento e desvio consideradas simultaneamente. Isto demonstra que o Modelo Composto é o que melhor representa o comportamento mecânico destas misturas.

- f) As estruturas dimensionadas pelo método antigo do DNER demonstraram que o método não permite muita otimização das espessuras das camadas, devido seus critérios simplificados, o que acaba conduzindo a pavimentos com espessuras das camadas geotécnicas muitas vezes superior ao necessário quando se trata de tráfego leve a médio. No caso do revestimento de concreto asfáltico, as espessuras são consideradas somente em relação ao N, e assim, não leva em conta as diferentes composições granulométricas nem os diferentes ligantes que podem ser utilizados.
- g) Mediante a análise dos relatórios fornecidos pelo *software* MeDiNa, comprovou-se que as misturas de solo local com os resíduos de construção e demolição de obras na proporção de 70% de solo e 30% de RCD podem ser empregadas em camadas de base e sub-base, quando aplicadas às mesmas situações de projeto de solo-brita, uma vez que as deformações permanentes e a área trincada (quando pertinente) para o período de vida útil foram inferiores aos valores recomendados pelo DNIT no método MeDiNa.
- h) O dimensionamento dos pavimentos rodoviários realizados a partir de métodos distintos, utilizando valores de Módulo de Resiliência ou Índice de Suporte Califórnia, permitiu comparar as espessuras das camadas e os custos previstos a partir da modificação dos materiais utilizados nas camadas. O comparativo entre os métodos de dimensionamento evidenciou que o novo método de dimensionamento nacional do DNIT torna os pavimentos submetidos a tráfego menos intenso mais otimizados, menos onerosos e com possibilidade real de emprego de materiais alternativos. O comparativo de custos com três diferentes tipos de materiais utilizados para dimensionamento no *software* MeDiNa mostrou que, para utilizar o RCD em misturas com o solo para pavimentação, é preciso ter unidades de beneficiamento de resíduos mais próximas da região onde o solo será coletado (ou que o RCD é gerado) para que o custo com o transporte não seja tão elevado. Porém, sem dúvidas os inúmeros benefícios ambientais também devem ser levados em consideração mesmo que ainda difíceis de serem calculados.
- i) Por fim, é importante enfatizar que a nova metodologia de dimensionamento adotada pelo DNIT exige que os valores de Módulo de Resiliência e de

Deformação Permanente, dos mais variados tipos de materiais destinados às estruturas dos pavimentos, oriundos de todas as regiões do Brasil, sejam obtidos por ensaios próprios, e que ainda são poucos os laboratórios que realizam estes ensaios nas várias regiões do país. Somente com estes tipos de análises, torna-se possível mudanças significativas no dimensionamento dos pavimentos e difusão da utilização dos resíduos de construção e demolição utilizando o novo método de dimensionamento.

5.2 Sugestões para pesquisas futuras

- a) É necessário a realização de estudos com as misturas de solo-RCD para verificar a influência da compactação na intensidade da quebra das partículas e o reflexo desta quebra nos parâmetros de módulo de resiliência e deformação permanente destas misturas;
- b) Estudar outros tipos de solos combinados com o RCD, utilizando solo com desempenho mecânico melhor, para obter misturas com menores deformações e menor ATR, e verificar também se tais misturas poderiam ser utilizadas para situações de tráfego elevado;
- c) Construir um trecho experimental para avaliar em campo o comportamento dos materiais desta pesquisa e comparar com o previsto em laboratório;
- d) Preparar misturas solos-RCD nas diferentes energias de compactação, para comparar a influência da compactação na deformação permanente e no índice de vazios;
- e) Ensaiai misturas de solos-RCD em distintas umidades de compactação e verificar a influência desta variável na deformação permanente e no módulo de resiliência;
- f) Realizar estudos de viabilidade para implementação de pequenas usinas para beneficiamento dos resíduos sólidos na região do Seridó e outras no RN, o que reduziria consideravelmente os custos para implementação do material nos pavimentos.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA GOIANA DE TRANSPORTES E OBRAS. **PAV- 002 - Pavimentação – Sub-base e Base Estabilizadas Granulometricamente com ou sem mistura**. AGETOP. Goiânia, p. 24. 2018.
- ALBAYATI, A. *et al.* Moisture Susceptibility of Sustainable Warm Mix Asphalt. **Advances in Civil Engineering**, v. 2018, p. 1-9, 2018.
- ARAÚJO, C. L. **Estudo geotécnico de solo-rhd para fins de pavimentação**. Universidade Federal Rural do Semi-Árido. Angicos, p. 49. 2020.
- ARISHA, A. *et al.* Using Blends of Construction & Demolition Waste Materials and Recycled Clay Masonry Brick in Pavement. **Procedia Engineering**, v. 143, p. 1317-1324, 2016.
- ARSHAD, M. Development of a Correlation between the Resilient Modulus and CBR value for granular blends containing Natural Aggregates and RAP/RCA material. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2019, p. 1-16, Abril 2019.
- ARULRAJAH, A. *et al.* Geotechnical and geoenvironmental properties of recycled construction and demolition materials in pavement subbase applications. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 25, n. 8.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15115: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção - Execução de camadas de pavimentação - Procedimentos**. Rio de Janeiro, p. 10. 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15116: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - Requisitos**. Rio de Janeiro, p. 12. 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182:2016 - Solos - Ensaio de Compactação**. Rio de Janeiro, p. 9. 2016.
- AZEVEDO, J. G. D.; SANTOS, C. B. D.; AMORIM, E. F. **Análise geotécnica comparativa da aplicação de misturas de solo-RCD dos estados do Rio Grande do Norte e Mato Grosso em camadas de pavimentos urbanos**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 2018, Salvador: ABMS. 2018.
- BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica - materiais, projeto e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 560 p.

BARRETO, A. C. **Desempenho Técnico de misturas de diferentes tipos de solos com RCD para uso em obras de pavimentação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, p. 109. 2020.

BEJA, I. A. **Agregado reciclado de construção e demolição com adição de aglomerantes hidráulicos como sub-base de pavimentos**. Dissertação de Mestrado - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo. 2014.

BERNUCCI, L. B. *et al.* **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2006. 504 p.

BEZERRA NETO, R. S. B. **Análise comparativa de pavimentos dimensionados através dos métodos empírico do DNER e mecanístico e proposta de um catálogo simplificado de pavimentos para a região de Campo Grande (MS)**. 2004. 189 f. Dissertação (Mestrado em Transportes) - Programa de Pós-Graduação em Transportes, Universidade de São Paulo. São Carlos. 2004.

BRASIL. **Lei n. 12.305 de 02 de agosto de 2010**. Poder Executivo. Brasília. 2010.

CHAKRAVARTHI, S. *et al.* Evaluation of cement treated reclaimed asphalt pavement and recycled concrete pavement bases. **Journal Pavement Research and Technology**, v. 12, p. 581-588, 2019.

COMPANHIA URBANIZADORA DA NOVA CAPITAL DO BRASIL. **Especificação Técnica para execução de sub-base e base de brita graduada (BGS) - ESP 05**. NOVACAP. Distrito Federal, p. 10. 2012.

COMPANHIA URBANIZADORA DA NOVA CAPITAL DO BRASIL. **Especificação Técnica para serviço de execução de base e sub-base estabilizada granulometricamente com cascalho laterítico - ESP 08**. NOVACAP. Distrito Federal, p. 8. 2012.

CONAMA. **Resolução nº 307, DE 5 DE JULHO DE 2002, Publicada no DOU nº 136, de 17/07/2002**. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Brasília, p. 95-96. 2002.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. Pesquisa CNT de Rodovias 2019, Brasília, 2019. Disponível em: <<https://pesquisarodovias.cnt.org.br/relatorio-gerencial>>. Acesso em: 02 fevereiro 2021.

COUTO, J. B. **Estudo de misturas de solo-agregado em bases e sub-bases rodoviárias do Rio Grande do Sul: caracterização de laboratório e execução de trecho experimental**. 2009. 163 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Sub-base ou base de solo de comportamento laterítico-brita descontínua - SLBD**. DER. São Paulo, p. 24. 2005.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Sub-base ou base de solo-brita**. DER. São Paulo, p. 22. 2006.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DO PARANÁ. **ES-P 07/05 - Pavimentação: camadas estabilizadas granulometricamente**. DER/PR. Curitiba, p. 16. 2005.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DO PARANÁ. **ES-P 09/05 - Pavimentação: solo arenoso-brita**. DER/PR. Curitiba, p. 11. 2005.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 256: Solos compactados com equipamento miniatura - determinação da perda de massa por imersão**. DNER. Rio de Janeiro, p. 6. 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 258: Solos compactados em equipamento miniatura - Mini-MCV**. DNER. Rio de Janeiro, p. 14. 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Pavimentação**. Publicação IPR 719. Rio de Janeiro, p. 274. 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **ES 098: Pavimentação – base estabilizada granulometricamente com utilização de solo laterítico – Especificação de serviço**. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro, p. 07. 2007.

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **ES 141: Pavimentação - Base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço**. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro, p. 10. 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **ES 141: Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço**. DNIT. Rio de Janeiro, p. 9. 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **IE 179: Pavimentação – Solos – Determinação da deformação permanente – Instrução de ensaio**. Rio de Janeiro, p. 21. 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **ME 134: Pavimentação- Solos - Determinação do módulo de resiliência - Método de ensaio**. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro, p. 18. 2018.
ESTADO DE SÃO PAULO. **Cadernos de Educação Ambiental, 6**. Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo. São Paulo, p. 76. 2010.

FERNANDES, C. G. **Caracterização mecânica de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição dos municípios do Rio de Janeiro e Belo Horizonte para uso em pavimentação**. 2004. 193 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2004.

FRANCISCO, J. T. M.; SOUZA, A. E. D.; TEIXEIRA, S. R. Construction and demolition waste in concrete: property of pre-molded parts for paving. **Cerâmica**, v. 65 (Supl.1), p. 22-26, 2019.

FRANCO, F. A. C. D. P. **Método de Dimensionamento Mecânico-Empírico de Pavimentos Asfálticos – SisPav**. 2007. 315 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2007.

FRANCO, F. A. C. P.; MOTTA, L. M. G. **Guia para utilização de Método Mecânico-Empírico - MeDiNa**. Convênio UFRJ/DNIT. Rio de Janeiro. 2018.

GIWANGKARA, G. G. *et al.* **Recycled concrete aggregates as a road base material**. International Conference on Geotechnical Engineering in Tropical Regions. Kuala Lumpur: IOP Publishing Ltd. 2019.

GUIMARÃES, A. C. R. **Um Método Mecânico-Empírico para a previsão da Deformação Permanente em Solo Tropicais Constituintes de Pavimentos**. 2009. 367 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Engenharia Civil COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro. 2009.

HOU, Y. *et al.* Adhesion between Asphalt and Recycled Concrete Aggregate and Its Impact on the Properties of Asphalt Mixture. **Material**, v. 11, n. 2528, 2018.

JAYAKODY, S.; GALLAGE, C.; RAMANUJAM, J. Performance characteristics of recycled concrete aggregate as an unbound pavement material. **Heliyon**, v. 5, p. 10, 2019.

JIMÉNEZ, A. M. G. **Estudo experimental de um Resíduo de Construção e Demolição (RCD) para utilização em pavimentação**. 2011. 148 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade de Brasília. Brasília. 2011.

JUAN-VALDÉS, A. *et al.* Paving with Precast Concrete Made with Recycled Mixed Ceramic Aggregates: A Viable Technical Option for the Valorization of Construction and Demolition Wastes (CDW). **Materials**, v. 12, p. 24, 2018.

KIM, N.; KIM, J.; YANG, S. Mechanical Strength Properties of RCA Concrete Made by a Modified EMV Method. **Sustainability**, v. 2016, p. 1-15, 2016.

KOX, S. *et al.* Experimental evaluation of the high-grade properties of recycled concrete aggregates and their application in concrete road pavement construction. **Case Studies in Construction Materials**, v. 11, 2019.

LEITE, F. C. **Comportamento mecânico de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil em camadas de base e sub-base de pavimentos**. 2007. 216 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade de São Paulo. São Paulo. 2007.

LI, Y. *et al.* Investigation into the Application of Construction and Demolition Waste in Urban Roads. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2017, p. 12, 2017.

LIMA, C. D. A. **Estudo da deformação permanente de duas britas graduadas para uso em camadas de pavimento**. 2016. 268 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2016.

LIMA, C. D. A. **Avaliação da deformação permanente de materiais de pavimentação a partir de ensaios triaxiais de cargas repetidas**. 2020. 452f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2020.

LIMA, C. D. A. D.; MOTTA, L. M. G. D.; RODRIGUES, A. C. Estudo da deformação permanente de britas granito-gnaiss para uso em base e sub-base de pavimentos. **Transportes**, v. 25, n. 2, p. 41-52, 2017.

MARIA, R. P.; BASTOS, C. A. B. **Estudo para melhoramento da capacidade de suporte de um solo residual com adição de agregado pétreo britado**. Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental. São Paulo: Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo. 2018.

MARTINEZ-ARGUELLES, G. *et al.* **Characterization of Recycled Concrete Aggregate as Potential Replacement of Natural Aggregate in Asphalt Pavement**. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. WMCAUS 2018: IOP Publishing. 2019. p. 10.

MEDINA, J. D.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2015.

MOTTA, L. M. G.; MEDINA, J. D. Investigação e Desenvolvimento em Mecânica dos Pavimentos na COPPE - Brasil. **Revista Engenharia Civil**, v. 26, 2006.

MOTTA, R. D. S. **Estudo laboratorial de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil para aplicação em pavimentação de baixo volume de tráfego**. 2005. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos**. São Paulo, p. 240. 1995.

NOKKAEW, K. Characterization of recycled aggregate for use as base course material. **International Journal of GEOMATE**, v. 15, p. 129-136, 2018.

NORBACK, C. **Caracterização do módulo de resiliência e da deformação permanente de três solos e misturas de solo-brita**. 2018. 180 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2018.

NOVAIS, C. **Caracterização de agregados reciclados de resíduos da construção civil para uso em base e sub-base de pavimento urbano em Sinop - MT**. Jornada Inovação, Tecnologia, Gestão e Sustentabilidade 2017. Tangará da Serra: Even3. 2018.

OLIVEIRA JÚNIOR, J. M. R.; ARAÚJO, C. B. C. D.; AYRES, T. M. D. C. Estudo comparativo entre solo seixo e solo brita para fins de pavimentação. **Revista Tecnologia**, v. 39, n. 1, p. 1-17, 2018.

OLIVEIRA, J. M. A. **Estudo geotécnico de solo-brita para fins de pavimentação**. 2020. 43 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido. Angicos, 2020.

PARENTE, E. B.; BOAVISTA, A. H.; SOARES, J. B. **Estudo de comportamento mecânico de misturas de solo e escória de aciaria para aplicação na construção rodoviária na região metropolitana de Fortaleza**. Congresso de pesquisa e ensino em Transportes. Rio de Janeiro: Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes. 2003.

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) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2017.

POURANIAN, M. R.; SHISHEHBO, M. Sustainability Assessment of Green Asphalt Mixtures: A Review. **Environments**, v. 6, p. 56, 2019.

PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. **PMSP/SP ETS - 001/2003 - Camadas de reforço do subleito, sub-base e base mista de pavimento com agregado reciclado de resíduos sólidos da construção civil**. Secretaria de Infra-Estrutura Urbana. São Paulo, p. 14. 2003.

PUPPALA, A. J.; HOYOS, L. R.; POTTURI, A. K. Resilient moduli response of moderately cement-treated reclaimed asphalt pavement aggregates. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 23, n. 7, p. 990-998, 2011.

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. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2019.

QUINTANILHA, F. S. **Avaliação de Utilização e Desempenho de Resíduos de Construção e Demolição em Bases e Sub-bases de Pavimentos Flexíveis**. 2008. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Meio Ambiente, Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2008.

ROZA, A. E. D. **Contribuição para o projeto mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos na região norte do estado do Mato Grosso**. 2018. 178 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2018.

SANT'ANNA, G. L. *et al.* Módulo de resiliência de um solo arenoso e de suas misturas com alcatrão fracionado e cal. **Revista Árvore**, v. 27, n. 4, p. 527-534, 2003.

SANTOS, T. A. *et al.* Avaliação da resistência e da deformação resiliente de quatro solos de subleitos rodoviários no estado do Rio Grande do Sul. **Revista Transportes**, v. 27, n. 1, 2019.

SARAVANAN, S. *et al.* Construction of Rural Roads Using C&D Waste Materials. **Indian Journal of Science and Technology**, v. 9 (27), Jul 2016.

SENA NETO, P. G. **Análises de dosagens de concreto asfáltico do tipo pré misturado a frio (PMF) utilizando resíduos da construção e demolição de obras (RCD)**. 2018. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2018.

SENÇO, W. D. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. 2. ed. São Paulo: Pini, v. 1, 2008.

SHARKAWI, A. *et al.* Feasible Construction Applications for Different Sizes of Recycled Construction Demolition Wastes. **Alexandria Engineering Journal**, v. 57, p. 3351-3366, 2018.

SOUSA, W. F. D. **Estudo sobre a aplicação de agregado reciclado de concreto em construção de pavimentos**. 2011. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos. 2011.

SOUZA, M. L. D. **Método de projeto de pavimentos flexíveis**. IPR. Rio de Janeiro. 1981.

SVENSON, M. **Ensaio Triaxiais Dinâmicos de Solos Argilosos**. 1980. 144 f. Dissertação (Mestrado em Ciência) - Programa de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 1980.

TAHMOORIAN, F. *et al.* Evaluation of Mechanical Properties of Recycled Material for Utilization in Asphalt Mixtures. **Applied Sciences**, v. 7, p. 763, 2017.

TAHMOORIAN, F.; SAMALI, B. Laboratory investigations on the utilization of RCA in asphalt mixtures. **International Journal of Pavement Research and Technology** **11**, v. 6, p. 627-638, 2018.

TAHMOORIAN, F.; SAMALI, B.; YEAMAN, J. Study of the characteristics of different components of recycled construction aggregate (RCA): Statistical study in Sydney. **International Journal of GEOMAT**, v. 15, p. 84-90, 2018.

TATARANNI, P. *et al.* A laboratory and field study on 100% Recycled Cement Bound Mixture for base layers. **International Journal of Pavement Research and Technology**, v. 11, p. 427-437, 2018.

THORN, N. H.; BROWN, S. Unbound Aggregates in Roads. In: JONES, R. H.; DAWSON, A. R. **The mechanical properties of unbound aggregates from various sources**. England: University of Nottingham, 1989. p. 130-142.

TORRES-CARRIÓN, P. *et al.* Methodology for Systematic Literature Review applied to Engineering and Education. **IEEE - Global Engineering Education Conference (EDUCON)**, Santa Cruz de Tenerife, Abril 2018. 11.

VEGA, D. L.; MARTINEZ-ARGUELLES, G.; SANTOS, J. **Life Cycle Assessment of Warm Mix Asphalt with Recycled Concrete Aggregate**. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. [S.l.]: IOP Publishing. 2019. p. 603.

WERKMEISTER, S. **Permanent Deformation Behavior of Unbound Granular Materials in Pavement Constructions**. 2003. 189f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Técnica de Dresden. Alemanha, 2003.

YAGHOUBI, E. *et al.* Impact of Compaction Methods on Resilient Response of Unsaturated Granular Pavement Material. **Procedia Engineering**, v. 143, p. 323-330, 2016.

ZAGO, J. P. **Estudo da deformação permanente de três solos típicos de subleitos rodoviários de Santa Maria - RS**. 2016. 225 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2016.

ANEXO A – RELATÓRIO DE DIMENSIONAMENTO DO MEDINA

Programa MeDiNa v.1.1.5.0 - dezembro/2020

Cópia registrada para Leticia Azevedo (azevedo_leticia@hotmail.com), da empresa UFRN..

Dimensionamento do pavimento

Empresa: **UFRN**

Nome do Projeto: **Projeto Artigo**

Responsável pelo projeto: **Letícia Azevedo**

Seção do pavimento dimensionada considerando os dados inseridos pelo Engenheiro Projetista no programa MeDiNa.

Tipo de via: **Sistema Coletor Primário**

Nível de confiabilidade: **85%**

Período de projeto: **10 anos**.

Análise realizada em **03/06/2021 às 14:24:23** no modo: **Pavimento Novo (Nível A)**

Análise realizada não considerou o dano relativo à fadiga.

Afundamento de Trilha de Roda previsto no pavimento no fim do período: **7,0mm**

ATENÇÃO: O programa MeDiNa é apenas uma ferramenta de cálculo que auxilia o projetista no dimensionamento ou na avaliação de pavimentos, conforme descrito no Guia do Método Mecânico Empírico. O conhecimento das propriedades dos materiais a serem aplicados na estrutura do pavimento, por meio de ensaios de laboratório, assim como o conhecimento detalhado do tráfego são imprescindíveis para a elaboração do projeto. O sucesso do projeto somente será alcançado se as propriedades dos materiais consideradas no dimensionamento sejam aplicadas no campo e verificadas a partir de ensaios geotécnicos com um controle de qualidade rigoroso.

Portanto, a responsabilidade pelo projeto é exclusivamente do engenheiro projetista, que deve entender e avaliar criteriosamente os resultados gerados pelo programa, antes de aprovar o projeto para a execução no campo.

Estrutura do pavimento

Cam	Material	Espessura (cm)	Módulo de Resiliência	Coef de Poisson
1	TRATAMENTO SUPERFICIAL Tratamento Superficial Duplo	2,0	Resiliente Linear MR = 1000 MPa	0,25
2	MATERIAL GRANULAR Solo-RCD	25,0	Resiliente Não Linear MR = 355 MPa (1º mês) k1 = 277,37 k2 = 0,330 k3 = -0,650 k4 = 0,000	0,35
3	SUBLEITO Subleito 01	SL	Resiliente Linear MR = 50 MPa	0,45

Materiais

1 - TRATAMENTO SUPERFICIAL: Tratamento Superficial Duplo

Propriedades

Modelos

Massa específica (g/cm³) = 2,4

Norma ou Especificação = DNIT ES 147

2 - MATERIAL GRANULAR: Solo-RCD

Propriedades	Modelos
Descrição do Material = Solo-RCD 70-30 Massa específica (g/cm ³) = 2,57 Umidade Ótima (%) = 10 Energia Compactação = Intermediária Abrasão Los Angeles (%) = 45 Faixa Granulométrica = ... Norma ou Especificação = DNIT ES 141	Ensaio de Deformação Permanente Modelo: $ep = psi1.(s3^{psi2}).(sd^{psi3}).(N^{psi4})$ Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1): 0,109 Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2): -0,665 Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3): 1,321 Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4): 0,043

3 - SUBLEITO: Subleito 01

Propriedades	Modelos
Descrição do Material = ... Grupo MCT = ... MCT - Coeficiente c' = ... MCT - Índice e' = ... Massa específica (g/cm ³) = 1,8 Umidade Ótima (%) = ... Energia Compactação = ... Norma ou Especificação = DNIT ES 137	Ensaio de Deformação Permanente Modelo: $ep = psi1.(s3^{psi2}).(sd^{psi3}).(N^{psi4})$ Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1): 0,68 Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2): -0,29 Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3): 1,12 Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4): 0,03

Definição do tráfego

Volume Médio Diário no ano de abertura do tráfego: VMD (1º ano) = **13**
 Fator de veículo no ano de abertura do tráfego: FV = **1,00**
 Número de passagens anual do eixo padrão (1º ano): **4,75e+03**
 % Veículos na faixa de projeto: **100%**
 Número de passagens anual do eixo padrão na faixa de projeto: **4,75e+03**
 Taxa de crescimento do tráfego: **2,0%**
 Número Equivalente total de passagens do eixo padrão na faixa de projeto: N Eq = **5,20e+04**

Eixo	Tipo	FE	Carga (ton)	FC	FVi
1	Eixo simples de roda dupla	100%	8,20	1,000	1,000

Evolução dos danos no pavimento

Análise realizada não considerou o dano relativo à fadiga.

Análise de Afundamento de Trilha de Roda

Cam	Material	Afundamento de Trilha de Roda (mm)
1	TRATAMENTO SUPERFICIAL	0,00

Cam	Material	Afundamento de Trilha de Roda (mm)
2	MATERIAL GRANULAR	1,77
3	SUBLEITO	5,19 *
Afundamento de Trilha de Roda (mm)		7,0

* O Afundamento de Trilha de Roda ultrapassou o limites de 5% da espessura da camada ou 5mm de profundidade do subleito

Controle por Deflexões

As bacias foram calculadas considerando as camadas aderidas e um fator de segurança, após avaliados dados de campo comparativos entre FWD e Viga Benkelman. Os resultados apresentados estão a favor do dimensionamento.

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: TRATAMENTO SUPERFICIAL - Tratamento Superficial Duplo

Equipamento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 20 cm	Sensor 3 30 cm	Sensor 4 45 cm	Sensor 5 60 cm	Sensor 6 90 cm	Sensor 7 120 cm	Sensor 8 150 cm	Sensor 9 180 cm
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	105	88	77	62	51	36	28	23	20
FWD Raio = 15,0 cm Carga = 4,0 ton	175	105	78	54	39	24	17	14	11

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: MATERIAL GRANULAR - Solo-RCD

Equipamento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 20 cm	Sensor 3 30 cm	Sensor 4 45 cm	Sensor 5 60 cm	Sensor 6 90 cm	Sensor 7 120 cm	Sensor 8 150 cm	Sensor 9 180 cm
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	105	88	77	62	51	36	28	23	20

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: SUBLEITO - Subleito 01

Equipamento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 20 cm	Sensor 3 30 cm	Sensor 4 45 cm	Sensor 5 60 cm	Sensor 6 90 cm	Sensor 7 120 cm	Sensor 8 150 cm	Sensor 9 180 cm
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	185	116	85	59	45	33	27	22	20