



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

GEORGE LUIS MORAES ROLEMBERG

**ANÁLISE TÉCNICA DA INCORPORAÇÃO DO RESÍDUO DO BENEFICIAMENTO
DA SCHEELITA: RECICLAGEM PROFUNDA DE PAVIMENTO IN-SITU COM
ESTABILIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA**

NATAL/RN

2026



GEORGE LUIS MORAES ROLEMBERG

ANÁLISE TÉCNICA DA INCORPORAÇÃO DO RESÍDUO DO BENEFICIAMENTO DA
SCHEELITA: RECICLAGEM PROFUNDA DE PAVIMENTO IN-SITU COM
ESTABILIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA

Dissertação de mestrado apresentado ao curso
de Pós-graduação em Engenharia Civil e
Ambiental, da Universidade Federal do Rio
Grande do Norte.

Orientador(a): Prof(a). Dr(a). Maria del Pilar
Durante Ingunza.

Coorientador(a): Prof(a). Dr(a). John Kennedy
Guedes Rodrigues

NATAL/RN

2026



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

Rolemberg, George Luis Moraes.

Análise técnica da incorporação do resíduo do beneficiamento da scheelita: reciclagem profunda de pavimento in situ com estabilização granulométrica / George Luis Moraes Rolemberg. - 2026.

140f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Natal, 2026.

Orientação: Dra. Maria del Pilar Durante Ingunza.

Coorientação: Dr. John Kennedy Guedes Rodrigues.

1. Sustentabilidade - Dissertação. 2. Rodovia - Dissertação. 3. Scheelita - Dissertação. 4. Reciclagem de pavimento - Dissertação. 5. Resíduo - Dissertação. I. Ingunza, Maria del Pilar Durante. II. Rodrigues, John Kennedy Guedes. III. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 624



GEORGE LUIS MORAES ROLEMBERG

ANÁLISE TÉCNICA DA INCORPORAÇÃO DO RESÍDUO DO BENEFICIAMENTO DA
SCHEELITA: RECICLAGEM PROFUNDA DE PAVIMENTO IN-SITU COM
ESTABILIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA

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

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dra. Maria del Pilar Durante Ingunza – Orientador (UFRN)

Prof^o. Dr. John Kennedy Guedes Rodrigues – Coorientador (UFCG)

Prof^o. Dr. Olavo Francisco dos Santos Júnior – Examinador Interno (UFRN)

Prof^o. Dr. Enio Fernandes Amorim – Examinador Externo (IFRN)

Natal, 03 de fevereiro de 2026



AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado força, disposição, resiliência e condições para poder realizar essa dissertação, me acompanhando nos momentos bons e ruins, não deixando me abater quando a situação se encontrava desfavorável.

Agradeço aos meus pais Verônica Cristina Pereira de Moraes Rolemberg e Giuseppe Pinheiro Rolemberg, por terem me ensinado a ser o que sou hoje, fornecendo as melhores condições possíveis para a minha educação, construção da minha pessoa e suporte nos momentos difíceis. Sem eles, não seria possível a conclusão desse ciclo.

Agradeço ao meu irmão Andrei Lucas Moraes Rolemberg e minha cunhada Erika Rolemberg, que apesar da distância, sempre estiveram me apoiando.

Agradeço a minha namorada Bárbara Hillary de Almeida Pinto, que sempre foi a minha principal companhia nesse mestrado, iniciando juntos e enfrentando todas as etapas com muito companheirismo. Sem você eu não teria iniciado o mestrado e hoje estar podendo concluí-lo. Te amo muito.

Agradeço a todos os meus familiares, os que estão nesse mundo e aqueles que já não estão fisicamente entre nós, o apoio de todos foi fundamental para a minha criação.

Agradeço a minha orientadora Maria del Pilar Durante Ingunza, que sempre esteve disponível e não mediu forças para que esse trabalho pudesse ser realizado. A Senhora foi uma mãe para mim nesse período acadêmico.

Agradeço ao meu co-orientador John Kennedy Guedes Rodrigues pelas contribuições ao trabalho, inclusive abrindo as portas do Laboratório de Engenharia de Pavimento (LEP) para a realização de ensaios primordiais, me deixando muito à vontade e fornecendo todo o apoio necessário, junto com Dr. Manoel Farias, que também tem meus agradecimentos.

Agradeço a todos os professores do programa do PPCivAm, que me permitiram ser uma pessoa mais qualificada ao fim do mestrado.

Agradeço à Shirley Buse de Oliveira, pela amizade, disposição em me ajudar na execução dos ensaios, a ter embarcado nesse projeto, e ter mostrado vontade de aprender o que eu estava disposto a ensiná-la sobre a área da pavimentação, ajudando a me interessar pela área acadêmica.

Agradeço ao pessoal do Laboratório de Mecânica dos Solos da UFRN, começando pelos técnicos Diogo Gomes e Débora Gomes por terem me auxiliado nos ensaios, assim



como pela amizade construída ao longo desses quase dois anos. Também agradeço à Ana Beatriz Campos, Pedro Júlio, Francisco Felinto Neto, Matheus Natan, Iago Beserra e Simone Gameleira, que além da ajuda nos ensaios, a amizade construída permitiu que os dias no laboratório se tornassem mais leves e fáceis de lidar.

Agradeço ao técnico Sandro, do Laboratório de Materiais de Construção, pela disponibilidade e auxílio nos ensaios realizados no local.

Agradeço ao professor Ênio Amorim e o técnico Gian Melo, pela disponibilidade do laboratório de Mecânica dos solos do IFRN e auxílio em ensaios realizados.

Agradeço ao DNIT/RN pelo apoio à realização dessa pesquisa, visto que foram utilizados materiais da BR-427/RN, rodovia de sua jurisdição. Meus agradecimentos principalmente aos servidores do DNIT da Unidade Local de Currais Novos, Fabiana Alves, Rossini Santos e Carlos de Souza Júnior (*in memoriam*), que sempre confiaram no meu trabalho durante o período em que trabalhei com eles, o que foi fundamental para o meu crescimento profissional e a paixão pela área rodoviária.

Agradeço aos antigos colegas da Alta Engenharia e hoje amigos, Felipe Cunha, Luan Lopes, Júlio Lima, Wlysses Alves e José Carlos, que se dispuseram a me auxiliar na coleta do material da rodovia em seus horários de folga. Todos foram primordiais para a realização dessa pesquisa.

Agradeço aos amigos Wendell Dantas e Erizangela Barbosa pelo companheirismo e ensinamentos primordiais para que eu pudesse ser o profissional que sou hoje.

Agradeço à Mina Brejuí e aos seus funcionários pela recepção e disponibilidade para a coleta do resíduo do beneficiamento da scheelita, material chave para a realização do estudo.

Agradeço à Pedreira Potiguar pelo fornecimento das britas utilizadas durante a pesquisa.

Agradeço aos professores Felipe Cava, do Além da Inércia, e David Grubba, do Engenheiro do Asfalto, pelos ensinamentos e conselhos na área da pavimentação, como também na área acadêmica, que pude aplicar ao longo da minha pesquisa.

Agradeço também a Rita Gadelha, psicóloga que me acompanhou em todo o período do mestrado, que foi de suma importância para o suporte e equilíbrio em momentos difíceis.



Por fim, mas não menos importante, agradeço a CAPES pela disposição da bolsa de estudo, que me permitiu dedicar exclusivamente à pesquisa e possibilitando alcançar resultados desejáveis.



RESUMO

O Brasil possui o modal rodoviário como predominante, sendo responsável por 60% de todas os modais ativos no país. Contudo, essa grande parcela não reflete na qualidade de suas rodovias, visto que no último levantamento da Confederação Nacional de Transporte (CNT) (2025), a maioria de sua extensão pavimentada apresenta defeitos, gerando prejuízos para quem utiliza essas vias. Para corrigir os defeitos no pavimento, diversos métodos são utilizados, sendo a reciclagem profunda de pavimento *in situ* uma das mais utilizadas devido ao seu viés econômico e sustentável, em função da reutilização de materiais e a não necessidade de destinação de insumos. Diversos estudos têm sido realizados para analisar a viabilidade de resíduos na engenharia civil, sendo o resíduo proveniente do beneficiamento da scheelita um deles. O processo de beneficiamento da scheelita gera grandes volumes de resíduos que se encontram dispostos a céu aberto provocando diversos impactos ambientais. Assim, nesse contexto, o presente trabalho teve o intuito de analisar tecnicamente a incorporação do resíduo do beneficiamento desse mineral no processo de reciclagem profunda de pavimento *in situ*. Foram elaboradas misturas recicladas com a adição de resíduo, revestimento e britas aos materiais de base dos km 51,16 e km 51,60 da rodovia BR-427/RN, realizados ensaios físicos e mecânicos, como granulometria, Limites de Atterberg e *Califórnia Bearing Ratio* (CBR), chegando à mistura Base + 50% Revestimento + 15% Brita 19 + 20% Resíduo (M2) atendendo a todos os parâmetros físicos e mecânicos preconizados na Norma DNIT 141/2022 – ES. Também foi realizado o ensaio para a determinação do Módulo de Resiliência (MR) de M2 nos km 51,16 e 51,60, que obtiveram valores médios de 475 MPa e 354 MPa, respectivamente, acima do valor médio de 250 MPa para Brita Graduada Simples (BGS), material comumente utilizado para camadas granulares. Os modelos de regressão obtidos para os materiais reciclados apresentaram uma principal influência da tensão confinante (σ_3) em relação ao valor do MR, condizente com a sua natureza granular. Também foi realizada uma análise mecanicista considerando uma restauração do pavimento com a base reciclada conforme dosagem M2, no km 51,16, e comparando com esse mesmo pavimento tendo a base degradada substituída por um BGS, chegando no resultado do atendimento a todos os critérios de falha da solução com a reciclagem da base com adição do resíduo da scheelita.

Palavras-chave: Sustentabilidade, rodovia, scheelita, reciclagem de pavimento, resíduo.



ABSTRACT

Brazil has the road transport mode as its predominant one, accounting for about 60% of all active transport modes in the country. However, this large share does not reflect the quality of its highways. According to the latest survey by the National Confederation of Transport (CNT) (2025), most of the paved network shows defects, causing losses for those who use these roads. To correct pavement defects, several methods are employed, with Full Depth Reclamation (FDR) being one of the most commonly used due to its economic and sustainable advantages, as it allows the reuse of materials and eliminates the need for new inputs. Several studies have been conducted to analyze the feasibility of using waste and by-products in civil engineering, and waste from scheelite beneficiation is one of them. The scheelite beneficiation process generates large volumes of waste that are disposed of in open areas, causing various environmental impacts. In this context, the present study aimed to analyze the feasibility of incorporating this mineral waste into the FDR process. Recycled mixtures were prepared by adding waste, Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), and crushed stone to the base materials collected from km 51.16 and km 51.60 of the BR-427/RN highway, executing physical and mechanical tests like grain sizes, Atterberg Limits and California Bearing Ratio (CBR). The mixture composed of, **Base + 50% RAP + 15% Crushed Stone 19 + 20% Waste**, met all the physical and mechanical parameters required by the standard DNIT 141/2022 – ES. Resilient Modulus (MR) tests were also performed for mixture M2 at km 51.16 and km 51.60, yielding average values of 475 MPa and 354 MPa, respectively, exceeding the average value of 250 MPa for Crushed aggregate, a material commonly used in granular pavement layers. The regression models obtained for the materials showed a predominant influence of confining stress (σ_3) on MR values, consistent with their Unbound granular nature. A mechanistic analysis was additionally carried out considering pavement rehabilitation using a recycled base designed with mixture M2 at km 51.16. The performance of this solution was compared with that of an equivalent pavement structure in which the deteriorated base layer was replaced by Crushed aggregates. The results demonstrated that the pavement structure incorporating the recycled base with scheelite residue met all established failure criteria.

Key words: Sustainability, road, scheelite, Full Depth Reclaimed, waste.



LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura de um pavimento flexível.....	27
Figura 2 - Perfis de pavimentos de concreto-cimento e asfáltico.....	28
Figura 3 - Tipos de bases e sub-bases fléxiveis e semirrígidas	29
Figura 4 - Tipos de solo-agregado	30
Figura 5 - Reciclagem profunda de pavimento in situ	32
Figura 6 - Ensaio de CBR e Expansão	34
Figura 7 - Esquema de Deflexão de um pavimento	35
Figura 8 - Triaxial de cargas repetidas	36
Figura 9 - Deformações resilientes e permanentes	37
Figura 10 - Frequência de aplicação de carga MR	39
Figura 11 - Modelos clássicos de comportamento resiliente de solos.....	41
Figura 12 - Outros comportamentos de solos quanto à resiliência.....	42
Figura 13 - Critérios de falha de pavimentos flexíveis.....	44
Figura 14 - Fluxograma de um dimensionamento empírico-mecanístico	45
Figura 15 - Principais bens minerais produzidos (forma bruta) no RN.....	49
Figura 16 - Scheelita.....	51
Figura 17 - Procedimento do beneficiamento da scheelita.....	53
Figura 18 - Resíduo grosso	53
Figura 19 - Fluxograma do procedimento das misturas (M1, M2) e ensaios.....	55
Figura 20 - Coleta e medição do material de base, km 51,16.....	56
Figura 21 - Fresagem do revestimento no serviço de reparo localizado, BR-427/RN.....	56
Figura 22 - Coleta do resíduo grosso, Mina Brejuí	57
Figura 23 - Localização da Mina Brejuí	57
Figura 24 - Coleta das britas.....	58
Figura 25 - Material natural, M1 e M2	59
Figura 26 - Sedimentação, LL e Vazios mínimos	61
Figura 27 - CBR, Abrasão LA e MR.....	62
Figura 28 - DRX do resíduo da scheelita	63
Figura 29 - Curva granulométrica do resíduo da scheelita.....	65
Figura 30 - Curva granulométrica da base, km 51,16	68
Figura 31 - Curva de compactação base, km 51,16.....	70



Figura 32 - Curva granulométrica base, km 51,60	71
Figura 33 - Curva de compactação base, km 51,60.....	73
Figura 34 - Curva granulométrica base, km 67,06	74
Figura 35 - Curva de compactação base, km 67,06.....	76
Figura 36 - Curva granulométrica do revestimento asfáltico	78
Figura 37 - Curva granulométrica brita 19 mm.....	79
Figura 38 Curva granulométrica brita 16 mm	79
Figura 39 Curva granulométrica Brita 12,5 mm.....	79
Figura 40 - Curva granulométrica B+50%R+15%B ₁₉ , km 51,16	82
Figura 41 - Curva de compactação B+50%R+15%B ₁₉ , km 51,16.....	84
Figura 42 - Curva granulométrica B+50%R+20%B ₁₉ , km 51,16	85
Figura 43 - Curva de compactação B+50%R+20%B ₁₉ , km 51,16.....	87
Figura 44 - Curva granulométrica B+50%R+25%B ₁₉ , km 51,16	88
Figura 45 - Curva de compactação B+50%R+25%B ₁₉ , km 51,16.....	90
Figura 46 - Curva granulométrica B+50%R+40%B ₁₆ , km 51,16	91
Figura 47 - Curva de compactação B+40%R+40%B ₁₆ , km 51,16.....	93
Figura 48 - Curva granulométrica B+50%R+15%B ₁₉ +15%S, km 51,16.....	94
Figura 49 - Curva de compactação B+50%R+15%B ₁₉ +15%S, km 51,16	96
Figura 50 - Curva granulométrica B+50%R+15%B ₁₉ +20%S, km 51,16.....	97
Figura 51 - Curva de compactação B+50%R+15%B ₁₉ +20%S, km 51,16	99
Figura 52 - Curva granulométrica B+50%R+40%B ₁₆ , km 51,60	102
Figura 53 - Curva de compactação B+50%R+40%B ₁₆ , km 51,60.....	104
Figura 54 - Curva granulométrica B+50%R+15%B ₁₉ +15%S, km 51,60.....	105
Figura 55 - Curva de compactação B+50%R+15%B ₁₉ +15%S, km 51,60	107
Figura 56 - Curva granulométrica B+50%R+15%B ₁₉ +20%S, km 51,60.....	108
Figura 57 - Curva de compactação B+50%R+15%B ₁₉ +20%S, km 51,60	110
Figura 58 - Curvas de ajustes usando os modelos de σ_3 e σ_d para M1, km 51,16.....	112
Figura 59 - Superfície de ajuste usando o modelo composto para M1, km 51,16	113
Figura 60 - Curvas de ajustes usando os modelos de σ_3 e σ_d para M2, km 51,16.....	113
Figura 61 - Superfície de ajuste usando o modelo composto para M2, km 51,16	113
Figura 62 - Curvas de ajustes usando os modelos de σ_3 e σ_d para M1, km 51,60.....	114
Figura 63 - Superfície de ajuste usando o modelo composto para M1, km 51,60	114



Figura 64 - Curvas de ajustes usando os modelos de σ_3 e σ_d para M2, km 51,60	114
Figura 65 - Superfície de ajuste usando o modelo composto para M2, km 51,60	115
Figura 66 - Número N, Posto 3, BR-427/RN	118
Figura 67 - Dados defletores, km 51,16, BR-427/RN	118
Figura 68 - Retroanálise da bacia de deflexão, km 51,16.....	119
Figura 69 - Pavimento restaurado com M2, km 51,16	120
Figura 70 - Eixo rodoviário padrão e pontos de análise	121
Figura 71 - Interface AEMC com os dados de M2.....	122
Figura 72 - Pavimento restaurado com camada de BGS, km 51,16.....	126
Figura 73 - Interface AEMC com dados do BGS.....	127



LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Pares de tensões para condicionamento	38
Tabela 2 - Pares de tensões MR.....	39
Tabela 3 - Faturamento por substância.....	46
Tabela 4 - Quantidades e valores de produção mineral beneficiada no RN (2010-2023).....	50
Tabela 5 - Esquema da elaboração das misturas	59
Tabela 6 - FRX do resíduo da scheelita.....	64
Tabela 7 - Resumo da granulometria do resíduo	65
Tabela 8 - Índices físicos do resíduo	66
Tabela 9 - Classificação do resíduo	66
Tabela 10 - Índices de vazios mínimo e máximo do resíduo	67
Tabela 11 - Permeabilidade à carga constante do resíduo.....	67
Tabela 12 - Espessuras dos revestimentos e base.....	68
Tabela 13 - Resumo da granulometria da base, km 51,16.....	69
Tabela 14 - Índice físicos da base do km 51,16.....	69
Tabela 15 - Classificação da base, km 51,16.....	69
Tabela 16 - CBR e Expansão Base, km 51,16.....	71
Tabela 17 - Resumo da granulometria base, km 51,60	72
Tabela 18 - Índices Físicos base, km 51,60.....	72
Tabela 19 - Classificação base, km 51,60	72
Tabela 20 - CBR e Expansão base, km 51,60	74
Tabela 21 - Resumo granulometria base, km 67,06	75
Tabela 22 - Índices físicos base, km 67,06.....	75
Tabela 23 - Classificação base, km 67,06	75
Tabela 24 - CBR e Expansão base, km 67,06	77
Tabela 25 - Resumo Índices físicos das bases naturais	77
Tabela 26 - Resumo CBR e Expansão das bases naturais.....	77
Tabela 27 - Índices de forma das britas	80
Tabela 28 - Índices físicos e abrasão LA das britas	80
Tabela 29 - Resumo granulometria B+50%R+15%B ₁₉ , km 51,16	82
Tabela 30 - Índices físicos B+50%R+15%B ₁₉ , km 51,16.....	83



Tabela 31 - Classificação B+50%R+15%B ₁₉ , km 51,16.....	83
Tabela 32 - CBR e Expansão B+50%R+15%B ₁₉ , km 51,16.....	84
Tabela 33 - Resumo granulometria B+50%R+20%B ₁₉ , km 51,16	85
Tabela 34 - Índices físicos B+50%R+20%B ₁₉ , km 51,16	86
Tabela 35 - Classificação B+50%R+20%B ₁₉ , km 51,16.....	86
Tabela 36 - CBR e Expansão B+50%R+20%B ₁₉ , km 51,16.....	87
Tabela 37 - Resumo granulometria B+50%R+25%B ₁₉ , km 51,16	88
Tabela 38 - Índices Físicos B+50%R+25%B ₁₉ , km 51,16	89
Tabela 39 - Classificação B+50%R+25%B ₁₉ , km 51,16.....	89
Tabela 40 - CBR e Expansão B+50%R+25%B ₁₉ , km 51,16.....	90
Tabela 41 - Resumo granulometria B+50%R+40%B ₁₆ , km 51,16	91
Tabela 42 - Índices físicos B+50%R+40%B ₁₆ , km 51,16	92
Tabela 43 - Classificação B+50%R+40%B ₁₆ , km 51,16.....	92
Tabela 44 - CBR e Expansão B+50%R+40%B ₁₆ , km 51,16.....	93
Tabela 45 - Resumo granulometria B+50%R+15%B ₁₉ +15%S, km 51,16.....	95
Tabela 46 - Índices físicos B+50%R+15%B ₁₉ +15%S, km 51,16	95
Tabela 47 - Classificação B+50%R+15%B ₁₉ +15%S, km 51,16.....	96
Tabela 48 - CBR e Expansão B+50%R+15%B ₁₉ +15%S, km 51,16.....	97
Tabela 49 - Resumo granulometria B+50%R+15%B ₁₉ +20%S, km 51,16.....	98
Tabela 50 - Índices Físicos B+50%R+15%B ₁₉ +20%S, km 51,16	98
Tabela 51 - Classificação B+50%R+15%B ₁₉ +20%S, km 51,16.....	99
Tabela 52 - CBR e Expansão B+50%R+15%B ₁₉ +20%S, km 51,16.....	100
Tabela 53 - Tabela resumo de Índices físicos, km 51,16	101
Tabela 54 - Tabela resumo índices mecânicos, km 51,16	101
Tabela 55 - Resumo granulometria B+50%R+40%B ₁₆ , km 51,60	102
Tabela 56 - Índices físicos B+50%R+40%B ₁₆ , km 51,60	103
Tabela 57 - Classificação B+50%R+40%B ₁₆ , km 51,60.....	103
Tabela 58 - CBR e Expansão B+50%R+40%B ₁₆ , km 51,60.....	104
Tabela 59 - Resumo granulometria B+50%R+15%B ₁₉ +15%S, km 51,60.....	105
Tabela 60 - Índices físicos B+50%R+15%B ₁₉ +15%S, km 51,60	106
Tabela 61 - Classificação B+50%R+15%B ₁₉ +15%S, km 51,60.....	106
Tabela 62 - CBR e Expansão B+50%R+15%B ₁₉ +15%S, km 51,60.....	107



Tabela 63 - Resumo granulometria B+50%R+15%B ₁₉ +20%S, km 51,60.....	108
Tabela 64 - Índices físicos B+50%R+15%B ₁₉ +20%S, km 51,60	109
Tabela 65 - Classificação B+50%R+15%B ₁₉ +20%S, km 51,60.....	109
Tabela 66 - CBR e Expansão B+50%R+15%B ₁₉ +20%S, km 51,60.....	110
Tabela 67 - Tabela resumo índices físicos, km 51,60	111
Tabela 68 - Tabela resumo índices mecânicos, km 51,60	111
Tabela 69 - MR e coeficientes de regressão	112
Tabela 70 - Valores referenciais de MR.....	116
Tabela 71 - Tensões, deflexão e deformação com M2	122
Tabela 72 - Deflexão em função do Número N para pavimentos flexíveis	123
Tabela 73 - Número N em função da Deformação específica de compressão no topo do subleito	123
Tabela 74 - Número N em função da deformação específica de tração da fibra inferior do revestimento asfáltico	124
Tabela 75 - Verificação ao atendimento dos critérios de falha com M2.....	125
Tabela 76 - MR e coeficientes de regressão do BGS de análise	126
Tabela 77 - Tensões, deflexão e deformações com BGS	127
Tabela 78 - Verificação ao atendimento dos critérios de falha com BGS.....	128
Tabela 79 - CBR e Expansão da base natural, M1 e M2, dos km 51,16 e km 51,60	129
Tabela 80 - Atendimento aos critérios de falha dos pavimentos restaurados com M2 e BGS, km 51,16.....	130



LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação de resíduos conforme a NBR 10004 (ABNT, 2004).....	54
Quadro 2 - Ensaaios de caracterização física	60
Quadro 3 - Ensaaios de caracterização mecânica.....	61
Quadro 4 - Espessura mínima em função de N	120
Quadro 5 - Condições de aderência entre camadas	121



LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Faturamento Setor Mineral (Bilhões R\$).....	46
Gráfico 2 - Faturamento por estado	47
Gráfico 3 - Participação (US\$) nas exportações 2024.....	48
Gráfico 4 - Produção beneficiada de tungstênio entre os anos de 2010 e 2023	52



LISTA DE ABREVIATURAS

“	Polegada
Δh	Deslocamento vertical máximo
h_o	Altura inicial referencial do corpo de prova
ε_t	Deformação horizontal de tração
ε_t	Deformação total axial
ε_p	Deformação permanente axial
ε_r	Deformação resiliente axial
ε_v	Deformação vertical de compressão
σ_3	Tensão confinante
σ_d	Tensão de desvio
ρ	Massa específica
ρ_d	Massa específica seca
$\rho_d \text{ máx}$	Massa específica seca máxima
ρ_s	Massa específica dos sólidos
ρ_s	Densidade aparente seca
ρ_{sa}	Densidade real seca
ρ_{sss}	Densidade aparente saturada superfície seca
Abs	Absorção
Ca	Cálcio
cm^3	Centímetro cúbico
D_{10}	Diâmetro do grão relativo a 10% de material passante
D_{30}	Diâmetro do grão relativo a 30% de material passante
D_{60}	Diâmetro do grão relativo a 60% de material passante
D	Deflexão
D_{adm}	Deflexão Admissível
e	Índice de vazios
$e_{máx}$	Índice de vazios máximo
$e_{mín}$	Índice de vazios mínimo
g	Grama
hz	Hertz



k_1 , k_2 e k_3	Coeficientes de regressão
$k_{20^\circ\text{C}}$	Coeficiente de permeabilidade à 20°C
km	Quilômetro
kN	QuiloNewton
Ltda	Limitada
m^3	Metro cúbico
M1	Mistura 1
M2	Mistura 2
MPa	Mega Pascal
mm	Milímetro
s	Segundo
Si	Sílica
t	Tempo
Tf	Tonelada força
US\$	Dólar
R\$	Real
S	Grau de Saturação
W	Tungstênio
W_f	Úmidade final
W_i	Úmidade inicial
$W_{\text{ótimo}}$	Umidade ótima



LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnica
ARRA	<i>Asphalt Recycling and Reclaiming Association</i>
AASHO	<i>Association of State Highway Officials</i>
AASHTO	<i>Association of State Highway and Transportation Officials</i>
BGTC	Brita Graduada Tratada com Cimento
BGS	Brita Graduada Simples
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBR	<i>California Bearing Ratio</i>
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CC	Coeficiente de Curvatura
CNU	Coeficiente de Não-Uniformidade
DEMat	Departamento de Engenharia de Materiais
DER-SP	Departamento de Estrada de Rodagem de São Paulo
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
ES	Especificação de Serviço
LA	Los Angeles
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
IFRN	Instituto Federal do Rio Grande do Norte
IP	Índice de Plasticidade
ISC	Índice de Suporte Califórnia
LEP	Laboratório de Engenharia de Pavimentos
ME	Método de Ensaio
MeDiNa	Método de Dimensionamento Nacional
MG	Minas Gerais
MR	Módulo de Resiliência
MR _{máximo}	Módulo de Resiliência máximo
MR _{médio}	Módulo de Resiliência médio



MR _{mínimo}	Módulo de Resiliência mínimo
NBR	Norma Brasileira
NM	Norma do Mercosul
NP	Não Plástico
PA	Pará
RAP	<i>Reclaimed Asphalt Pavement</i>
RC	Raio de Curvatura
RN	Rio Grande do Norte
ROM	<i>Run Of Mine</i>
S.A	Sociedade Anônima
SBG	Serviço Geológico do Brasil
SEDEC	Secretaria do Estado do Desenvolvimento Econômico do Rio Grande do Norte
SUCS	Sistema Universal de Classificação de Solos
T.R.B	<i>Transport Research Board</i>
TSCE	Teoria de Sistema de Camadas Elásticas
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
UFRN	Universidade Federal do Rio Grande do Norte
USACE	<i>U.S. Army Corps of Engineers</i>
VMD	Veículo Médio Diário
VPM	Valor de Produção Mineral



SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	24
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	26
2.1 O pavimento	26
2.2 Estrutura dos pavimentos	26
2.2.1 Tipos de pavimentos.....	27
2.2.2 Camada de base	29
2.3 Estabilização granulométrica	29
2.4 Reciclagem profunda de pavimento <i>in situ</i>	31
2.5 Propriedades mecânicas dos materiais granulares	33
2.5.1 Índice de Suporte Califórnia (Califórnia Bearing Ratio).....	33
2.5.2 Módulo de Resiliência	34
2.5.2.1 Definição	34
2.5.2.2 Características resilientes dos solos	40
2.6 Dimensionamento de pavimentos asfálticos	42
2.7 A mineração no Brasil e no Rio Grande do Norte.....	45
2.8 A scheelita.....	50
2.8.1 O beneficiamento da scheelita	52
3 MATERIAIS E MÉTODOS	54
3.1 Coleta de amostras	55
3.1.1 Amostras do pavimento	55
3.1.2 Amostras do resíduo do beneficiamento da scheelita.....	56
3.1.3 Amostras de agregado graúdo	57
3.2 Elaboração das misturas	58
3.3 Ensaios	59
3.3.1 Caracterização química e mineralógica	59
3.3.2 Caracterização física.....	60
3.3.3 Caracterização mecânica	61
3.4 Análise técnica	62
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	62
4.1 Resíduo do beneficiamento da scheelita.	63



4.1.1 Caracterização química.....	63
4.1.2 Caracterização física.....	65
4.1.3 Índices de vazios máximos e mínimos.	66
4.1.4 Permeabilidade à carga constante.....	67
4.2 Camada de Base da BR-427/RN.....	67
4.2.1 km 51,16.....	68
4.2.1.1 Caracterização física.....	68
4.2.1.2 Caracterização mecânica	70
4.2.2 km 51,60.....	71
4.2.2.1 Caracterização física.....	71
4.2.2.2 Caracterização mecânica	73
4.2.3 km 67,06.....	74
4.2.3.1 Caracterização física.....	74
4.2.3.2 Caracterização mecânica	76
4.2.4 Tabelas Resumos	77
4.3 Revestimento asfáltico, Britas.	78
4.3.1 Revestimento asfáltico.....	78
4.3.2 Britas.....	78
4.4 Misturas recicladas.....	80
4.4.1 Misturas km 51,16.....	81
4.4.1.1 Base + 50% Revestimento + % Britas (B+50%R+%B _{19ou16}).....	82
4.4.1.2 Base + 50% Revestimento + 15% Britas + % Resíduo (B+%50R+15%B ₁₉ +%S)	94
4.4.1.3 Tabela Resumo	100
4.4.2 Misturas km 51,60.....	101
4.4.2.1 Base + 50% Revestimento + % Britas (B+50%R+%B ₁₆).....	102
4.4.2.2 Base + 50% Revestimento + 15% Brita 19 + % Resíduo (B+50%R+15%B ₁₉ +%S)105	
4.4.2.3 Tabela Resumo	111
4.4.3 Módulos de Resiliência das Misturas M1 e M2	111
4.4.4 Análise mecanicista comparativa do pavimento restaurado com a utilização da M2 no km 51,16 e com a substituição da camada de base por um BGS.	117
4.4.4.1 Estudo de tráfego e Número N - Posto 3, BR-427/RN	117
4.4.4.2 Retroanálise do pavimento do km 51,16 pelo BackMeDiNa.....	118



4.4.4.3	Análise mecanicista da estrutura restaurada com a base composta por M2.....	120
4.4.4.4	Análise mecanicista da estrutura restaurada com uma Brita Graduada Simples (BGS)	
	125	
4.4.5	Viabilidade Técnica.....	129
5	CONCLUSÕES.....	130
5.1	Sugestões para futuros trabalhos	131
6	REFERÊNCIAS	133



1 INTRODUÇÃO

No Brasil são utilizados diversos tipos de modais para o transporte de cargas e passageiros ao longo do seu território. De acordo com dados da Confederação Nacional de Transporte (CNT) (2016), o modal rodoviário é predominante no país, visto que a utilização dos modais para o transporte de cargas é de 60% para o transporte rodoviário. Segundo dados da CNT (2025), do total de 1.720.909,0 km de rodovias no país, apenas 213.500,0 km (12,4%) se encontram pavimentadas. Dentro do universo das rodovias pavimentadas, a maioria apresenta defeitos (56,5%) e para a melhoria da situação do pavimento, é necessário um plano de investimento contínuo para a reconstrução e restauração, além da manutenção preventiva. O estado comprometido da infraestrutura viária gera aumento dos custos logísticos das empresas devido às despesas adicionais com manutenção veicular, combustível e tempos de viagem, o que acarreta no aumento dos valores de fretes e consequentemente reverbera nos custos dos materiais que chegam ao mercado consumidor.

Atualmente existem diversos métodos construtivos para recompor a integridade de pavimentos deteriorados. Um desses métodos é a reciclagem profunda de pavimento *in-situ*, que é uma técnica que consiste em proporcionar uma nova estrutura composta por um conjunto de materiais que compõe uma mistura reciclada, fazendo uso de equipamentos apropriados para este tipo de execução. Em alguns casos essa mistura é composta pelo pavimento existente água, agregados adicionais e estabilizantes químicos como cimento Portland, emulsão asfáltica e espuma de asfalto (Orden et al., 2019; Hill e Braham, 2018; Kaseer et al., 2020; Kampala et al, 2024). Assim, as proporções de cada material são definidas em laboratório, sendo misturada, espalhada e compactada e, após ser enquadrada nos parâmetros normativos, essa mistura constituirá a nova camada de base (DER/PR, 2005). A utilização dessa técnica construtiva tem sido muito utilizada devido ao seu viés econômico e sustentável, visto que o reaproveitamento dos materiais para produzir um novo pavimento resulta em uma redução considerável de insumos, custo e energia (Diefenderfer et al., 2023; Torres-Machi et al., 2024; Federal Highway Administration (FHWA) Pavement Sustainability 101 and Tribal Transportation program Webinar, 2021). Ao mesmo tempo, a reciclagem do pavimento deteriorado também contribui para solucionar problemas de disposição inadequada do material na pista, pois o reuso do material permite manter a geometria e a espessura do pavimento (ARRA, 1997).



Em um mundo onde a agenda sustentável tem se tornado imprescindível, a engenharia civil, principalmente a geotecnia, incluindo a infraestrutura viária, como uma área em que se utiliza materiais naturais em larga escala, tem focado na introdução de materiais sustentáveis e reutilização de resíduos (Praticò et al., 2011; Oliveira et al, 2022; Desa, 2016; Karasahin e Terzi, 2007; Sargin et al., 2013). O aumento da quantidade e da diversidade de resíduos sólidos, a limitação da disponibilidade de espaço para a disposição desses materiais, e a diminuição de fontes de recursos naturais encorajam o mundo a encontrar métodos inovadores para reciclar e reusar resíduos (Zhang et al., 2010, Sharholy et al., 2008). Embora os pavimentos rodoviários consumam altas quantidades de matérias virgens, alternativas de reciclagem mostram um potencial de melhoramento de performance e outras demais vantagens para esse tipo de estrutura. Portanto, o aumento da consciência da sustentabilidade na pavimentação tem liderado uma tendência do reuso e reciclagem de materiais nessa área (Khan et al, 2025).

A reutilização do resíduo do beneficiamento da scheelita tem sido estudada ao longo dos últimos anos, visto que após o processo do seu beneficiamento somente 0,8% da extração do minério é aproveitado como fonte de Tungstênio (W), gerando um enorme volume de resíduos (Souza, 2019). O mesmo autor desenvolveu agregados leves com misturas compostas por resíduos de scheelita, lodo de esgoto e cinza da casca do arroz, com ou sem argilas regionais, com o intuito de aplicar em obras e serviços de engenharia. Gerab (2014) analisou a viabilidade de utilização do resíduo da scheelita como camadas de pavimento. Batista et.al (2022) estudaram a utilização do material como agregado miúdo em pavimentos intertravados. Souza et al. (2022) realizaram um estudo de misturas compostas por resíduos de scheelita e solos de jazidas destinados a pavimentação, trazendo que o resíduo grosso, que traz semelhança com areia, em uma adição de 20% mostrou enquadramento nas curvas granulométricas do DNIT para o material de base, necessitando de futuras pesquisas para avaliação de demais parâmetros.

No cenário mundial, a China é o principal produtor e consumidor global desse minério. Devido a uma gama de pouco países produzirem esse minério, destaca-se a importância da extração na região do Seridó no Rio Grande do Norte (França Neta et al., 2020). A mineração de scheelita no município de Currais Novos, Rio grande do Norte, continua tendo grande importância para o Brasil, sendo a principal região do país responsável pela extração do minério para exportação (em 2016), já que foram exportados cerca de US\$ 2



milhões do minério, de acordo com a Secretaria do estado do Desenvolvimento Econômico do Rio Grande do Norte – SEDEC/RN (RIO GRANDE DO NORTE, 2016). Na mina Brejuí, localizada em Currais Novos/RN, sendo a principal mina da América do Sul, estima-se uma produção de na ordem de 6,5 milhões de toneladas de subprodutos (Ramos Filho, 2021).

O objetivo desse trabalho é analisar tecnicamente a adição do resíduo da scheelita na execução da reciclagem de pavimento *in-situ*, visando dar uma destinação sustentável de um material oriundo da mineração, assim como aplicá-lo em uma execução de restauração de pavimentos que também traz viés de sustentabilidade pela reutilização de insumos já existentes na rodovia.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 O pavimento

Conforme o DNIT (2006), pavimento é uma superestrutura constituída por um sistema de camadas de espessuras finitas, assentes sobre um semi-espaco considerado teoricamente como infinito, no caso o solo de fundação (subleito). Possui a função de resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, e a propiciar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, conforto, economia e segurança (Bernucci et.al, 2022).

Segundo Balbo (2007), pavimentar uma via de circulação de veículos é obra civil que enseja a melhoria operacional do tráfego, ao menor custo possível, na medida em que é criada uma superfície mais regular, mais aderente e menos ruidosa diante da ação dinâmica dos pneumáticos, seja qual for a melhoria física oferecida. Consequentemente, ao se dar condição para uma via de melhor qualidade de rolamento, automaticamente se proporciona aos usuários uma expressiva redução nos custos operacionais, visto que os custos de operação e de manutenção dos veículos estão associados às condições de superfície dos pavimentos.

2.2 Estrutura dos pavimentos

De acordo com Balbo (2007), a estrutura do pavimento é composta por camadas sobrepostas de diferentes materiais compactados a partir do subleito estradal, adequada para atender estruturalmente e operacionalmente ao tráfego, de maneira durável e com mínimo custo possível. É concebida para receber e transmitir esforços de maneira a aliviar pressões sobre as camadas inferiores, que geralmente são menos resistentes, até a camada de fundação

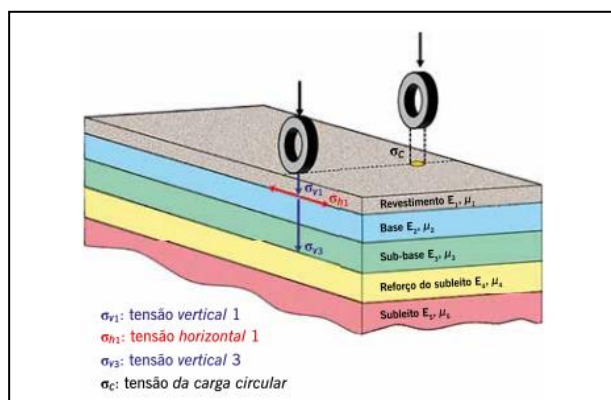


(subleito), a fim de evitar deformações e rupturas incompatíveis com a sua utilização, conforme Figura 1.

Cada camada do pavimento possui uma ou mais funções específicas, que devem proporcionar aos veículos as condições de suporte e rolamento em qualquer condição climática. O DNIT (2006) classifica as camadas da seguinte forma:

- a) Subleito: é o terreno de fundação do pavimento;
- b) Reforço do subleito: é uma camada de espessura constante, posta por circunstâncias técnico-econômicas com características geotécnicas inferiores ao material usado na camada que lhe for superior, porém melhores que o material do subleito;
- c) Sub-base: é a camada complementar à base, quando por circunstâncias técnico-econômicas não for aconselhável construir a base diretamente sobre o subleito;
- d) Base: é a camada destinada a resistir e distribuir os esforços oriundos do tráfego e sobre a qual se constrói o revestimento;
- e) Revestimento: é a camada, tanto quanto possível impermeável, que recebe diretamente a ação do rolamento dos veículos e destinada a melhorá-la, quanto à comodidade e segurança e a resistir ao desgaste.

Figura 1 - Estrutura de um pavimento flexível



Fonte: Bernucci et al. (2022)

2.2.1 Tipos de pavimentos

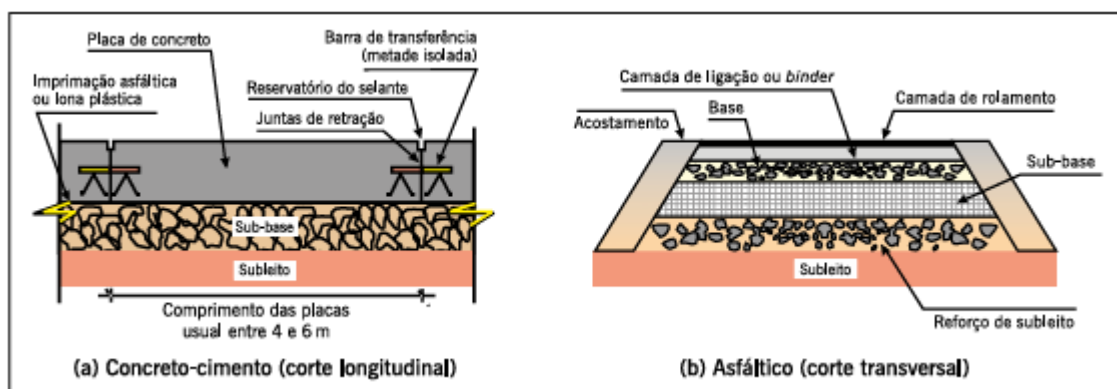
Conforme o Manual de Pavimentação do DNIT (2006), os pavimentos, de forma geral, podem ser classificados em flexíveis, semirrígidos e rígidos:



- Flexível: Aquela estrutura em que todas as camadas sofrem deformação elástica significativa sob o carregamento aplicado, e com isso, a carga se distribui em parcelas aproximadamente equivalentes entre as camadas.
- Semirrígido: Caracterizado pela presença de uma base cimentada por algum aglutinante com propriedades cimentícias. Há a alternativa do pavimento semirrígido invertido, no qual o material cimentado se encontra como cada de sub-base sob uma base granular.
- Rígido: Pavimento em que o revestimento tem uma elevada rigidez em relação às camadas inferiores e consequentemente absorve praticamente todas as tensões provenientes do carregamento aplicado, como os pavimentos constituídos por placas de concreto de cimento Portland.

Conforme Bernucci *et al.* (2022), mais recentemente há uma tendência de nomear os pavimentos conforme o tipo de revestimento utilizado, classificando em pavimentos de concreto-cimento e pavimentos asfálticos (Figura 2). Os pavimentos asfálticos englobam (i) os pavimentos flexíveis, cujas camadas subjacentes ao revestimento asfáltico são constituídas por materiais granulares, solos, solo-agregados, entre outros; e (ii) os pavimentos semirrígidos, no qual a base ou sub-base são constituídas por materiais cimentados, e que resistem aos esforços de tração. Os pavimentos de concreto-cimento são aqueles em que o revestimento é uma placa de concreto de cimento Portland.

Figura 2 - Perfis de pavimentos de concreto-cimento e asfáltico



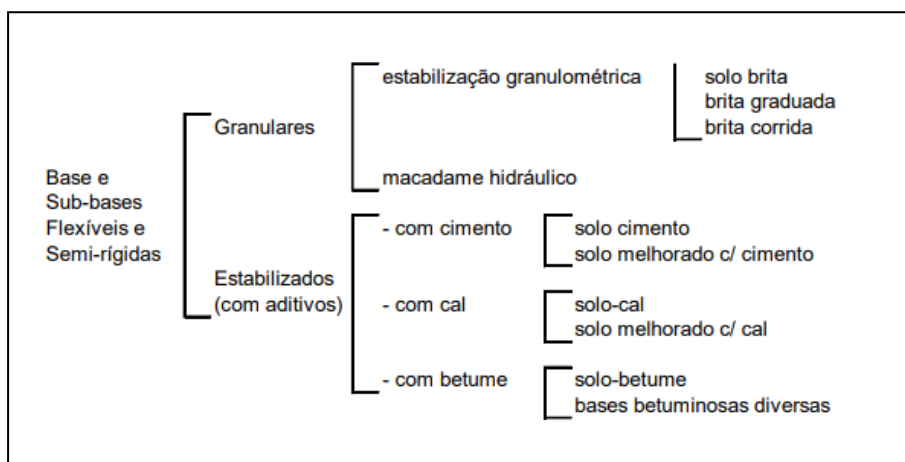
Fonte: Bernucci *et al.* (2022)



2.2.2 Camada de base

As bases podem ser constituídas por solo estabilizado granulometricamente, misturas de solos e agregados (solo-brita), brita graduada simples (BGS), Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC), solo estabilizado quimicamente com ligante hidráulico ou asfáltico (Balbo, 2007), conforme Figura 3. Bernucci et al. (2022) enfatiza que cada vez mais, vêm sendo empregados materiais como agregados, fileres, e mesmo materiais com poder pozolânico, reciclados de diferentes origens, dos próprios pavimentos ou de obras civis diversas (edificações, viadutos, entre outras) e de resíduos industriais de diferentes fontes (escórias, coprodutos da mineração e de termoeletricas, borrachas, plásticos etc.). Além de que sempre deve ter a consciência de que os materiais podem sofrer múltiplas reciclagens, e assim, o processo da utilização desses materiais deve ser analisado obrigatoriamente do ponto de ambiental, para não colocar em risco quaisquer fontes renováveis ou seres vivos.

Figura 3 - Tipos de bases e sub-bases flexíveis e semirrígidas



Fonte: DNIT (2006)

2.3 Estabilização granulométrica

O DNIT (2006) define que bases granulares com estabilização granulométrica são as camadas constituídas por solos, britas de rochas, de escória de alto forno, ou ainda, pela mistura desses materiais. Estas camadas, puramente granulares, são sempre flexíveis e são estabilizadas pela compactação de um material ou de mistura de materiais que apresentem uma granulometria apropriada e índices geotécnicos específicos, fixados em especificações.

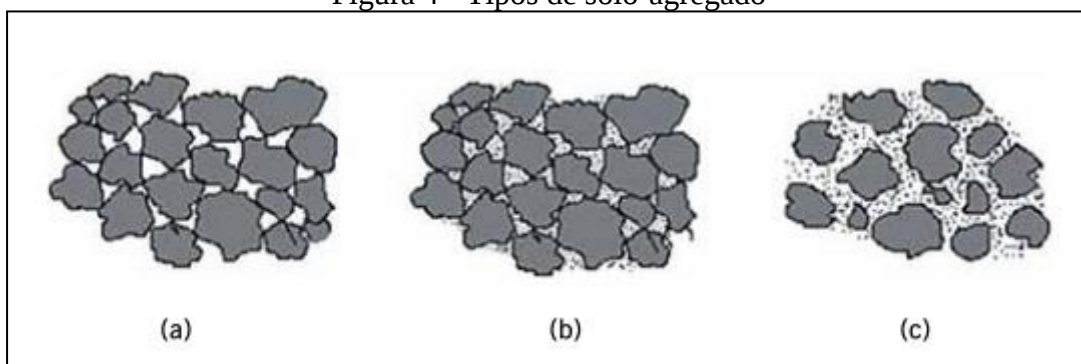


Balbo (2007) comenta que as camadas com materiais que não empregam estabilização com ligante hidráulico ou asfalto são camadas que recebem estabilização puramente mecânica por efeito de compressão e adensamento dos materiais constituintes. Quando esses materiais são bem graduados, são denominadas estabilizadas granulometricamente e são comumente utilizadas em camadas de bases, sub-bases e eventualmente em reforços do subleito, com valores de Módulo de Resiliência (MR) similares ou até superiores as das Britas Graduadas Simples, apresentando

Yoder e Witczak (1975) subdividiu os solos estabilizados granulometricamente em três tipos distintos dependendo da proporção relativa entre a parte gráuda e a parte fina (Figura 4):

- a) Contato grão-grão: baixa densidade, permeável, não suscetível a mudanças com a umidade ou com o congelamento; compactação em geral difícil;
- b) Finos preenchem os vazios, proporcionando alta densidade, permeabilidade mais baixa que o do tipo (a), contato grão-grão, mais resistente em geral que o tipo (a), menor deformabilidade; moderadamente difícil de compactar;
- c) Matriz de finos, não se garante contato grão-grão devido ao excesso de finos; densidade mais baixa em geral que o tipo (b), permeabilidade inferior ao tipo (b), podendo ser mesmo impermeável, dependendo da natureza dos finos; a mistura é afetada por variações de umidade; facilidade na compactação.

Figura 4 - Tipos de solo-agregado



Fonte: Yoder e Witczak (1975)

Para bases de pavimentos, as especificações tradicionais preconizam o uso de materiais do tipo (a) e (b), no qual o contato grão-grão seja garantido. Também se procura



tradicionalmente que fique caracterizada uma distribuição granulométrica bem graduada, com preenchimento dos vazios. Em geral, as misturas onde o contato grão-grão é garantido são tradicionalmente as preferenciais, embora a prática tenha mostrado grande sucesso no tipo (c), quando certos requisitos são observados.

Para camadas de base estabilizadas granulometricamente, o DNIT utiliza a norma DNIT 141/2022 – ES (DNIT, 2022)

2.4 Reciclagem profunda de pavimento *in situ*

Segundo Bernucci et al. (2022), quando há o comprometimento estrutural do pavimento ou perspectiva de aumento de tráfego, as alternativas de restauração ou reforço compreendem aquelas que restabelecem ou incrementam sua capacidade estrutural por meio da incorporação de novas camadas (recapeamento) à estrutura e/ou tratamento de camadas existentes (reciclagem). Sempre que possível, é interessante utilizar as camadas asfálticas ou bases deterioradas em reciclagens envolvendo diversas técnicas, para reduzir a necessidade de disposição, em locais apropriados, de resíduos de alta qualidade.

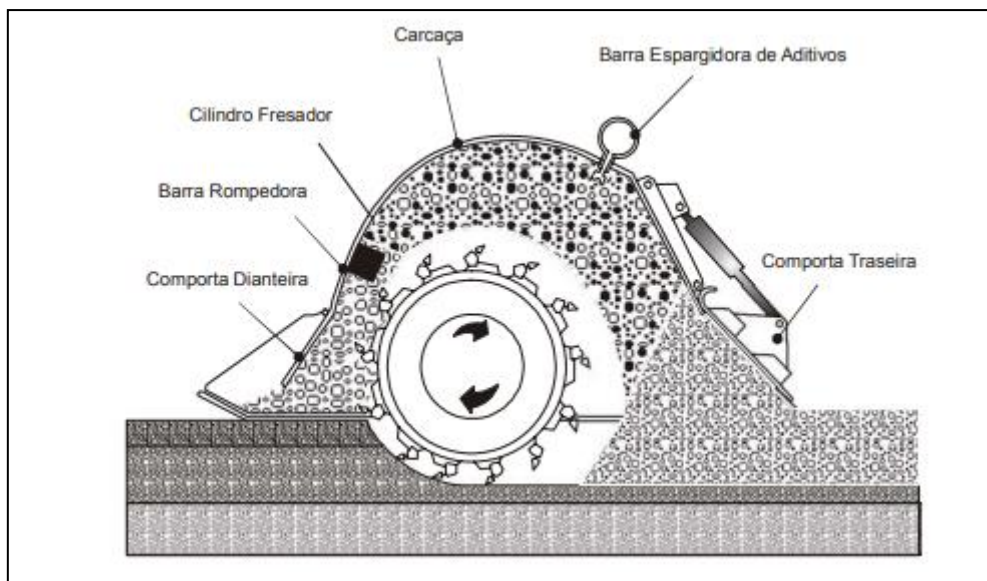
A reciclagem profunda de pavimento é uma técnica de restauração no qual toda a camada de revestimento asfáltico e uma determinada parcela das camadas abaixo (base, sub-base e/ou subleito) é uniformemente pulverizada e misturada para melhorar as características do material (Figura 5). As vezes essa mistura de material, sem a adição de aditivos estabilizantes, é suficiente para ser utilizada como camada de base do novo pavimento. No entanto, por muitas vezes, é necessário que esse material reciclado precise de melhoramento, no qual três tipos de estabilizações podem ser utilizados (ARRA, 1991):

- a) Mecânica (estabilização granulométrica);
- b) Química;
- c) Asfáltica.

Conforme a ARRA (2001), a estabilização mecânica é alcançada com a adição de materiais granulares como agregados virgens ou materiais reciclados como Reclaimed Asphalt Pavement (RAP).



Figura 5 - Reciclagem profunda de pavimento *in situ*



Fonte: DNIT (2006)

Oliveira (2025) e DNIT (2006) descrevem que a reciclagem profunda de pavimento *in situ* abrange as seguintes etapas:

- Distribuição de materiais na plataforma: Quando a reciclagem envolve a utilização de agregados novos ou de ligantes hidráulicos, se faz necessária a distribuição do material adicionado, preferencialmente com distribuidores auto propelidos/ou acoplados a caminhões ou acabadora de asfaltos, a fim de garantir uma maior uniformidade e homogeneidade da mistura reciclada.
- Rompimento do revestimento: Essa etapa consiste no rompimento do revestimento e das camadas granulares subjacentes até a profundidade necessária.
- Mistura: A recicladora, enquanto passa desagregando o revestimento e as camadas granulares, realiza a mistura do material reciclado da rodovia junto com os estabilizantes adicionados e a quantidade de água dosada.
- Compactação: A compactação ocorre imediatamente após a mistura efetuada pela recicladora, a fim de garantir a densidade seca máxima especificada em projeto. Se forem utilizados estabilizantes químicos ou asfálticos, deverá ser considerado o tempo de cura necessário.



- Aplicação da camada de revestimento: Após a imprimação da camada de base e a sua cura, é aplicado o revestimento conforme especificado em projeto para o tráfego considerado.

2.5 Propriedades mecânicas dos materiais granulares

Para o dimensionamento de estrutura de pavimentos, são utilizados no país principalmente dois parâmetros de caracterização mecânica. O primeiro é o *California Bearing Ratio (CBR)* ou Índice de Suporte Califórnia (ISC), usado principalmente no dimensionamento semiempírico do DNER; o segundo é o Módulo de Resiliência, usado na mecânica dos pavimentos e nos métodos empírico-mecanísticos, incluindo o Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa).

2.5.1 Índice de Suporte Califórnia (Califórnia Bearing Ratio)

O ensaio para a determinação do Índice de Suporte Califórnia foi inventado no final da década de 1920 para avaliar o potencial de ruptura do subleito, já que as deformações plásticas dessa camada era o defeito mais frequente nas rodovias da Califórnia. O ensaio também permitia a simulação de uma sobrecarga sobre o solo, simulando o peso da estrutura do pavimento sobre o subleito, como também a saturação do material previamente ao ensaio, por meio da imersão do corpo de prova por 96 horas, para simular a condição de degelo e saturação do solo na primavera, no hemisfério norte. As etapas do ensaio estão demonstradas na Figura 6 (Balbo, 2007; Bernucci *et al*, 2022).

O ensaio mede a resistência do solo ao deslocamento lateral como uma resposta que combina indiretamente a coesão com o ângulo de atrito do material. O ISC é expresso em porcentagem, sendo definido pela relação entre a pressão necessária para penetrar um pistão em corpo de prova e a produzir a mesma penetração em um material padrão referencial, britas e materiais granulares de bases de pavimento com bom desempenho à época da pesquisa de campo californiana. (Balbo, 2007; Bernucci *et al*, 2022).

O ISC é calculado para as penetrações de 2,54 mm (0,1”) e 5,08 mm (2”), e utilizado o maior valor entre os dois, conforme as expressões:

$$ISC_{0,1''} = \frac{P_{0,1''}}{70} \times 100 \quad (1)$$



$$ISC_{0,2''} = \frac{P_{0,2''}}{105} \times 100$$

(2)

Onde:

$P_{0,1''}$ = pressão correspondente à penetração de 2,54 mm (ou 0,1'') em kgf/cm²;

$P_{0,2''}$ = pressão correspondente à penetração de 5,08 mm (ou 0,2'') em kgf/cm²;

Figura 6 - Ensaio de CBR e Expansão



Fonte: DNIT (2006)

No Brasil, devido à facilidade e baixo custo do equipamento, ainda é um ensaio muito popular. No entanto, enfatiza-se que o modo de ruptura e as condições de deformabilidades do ensaio não representam aos estados de tensões atuantes em um pavimento. Com isso, tem-se empregado de forma crescente no país o MR de materiais com o objetivo de utilização de métodos empíricos-mecanísticos de dimensionamento de pavimentos.

2.5.2 Módulo de Resiliência

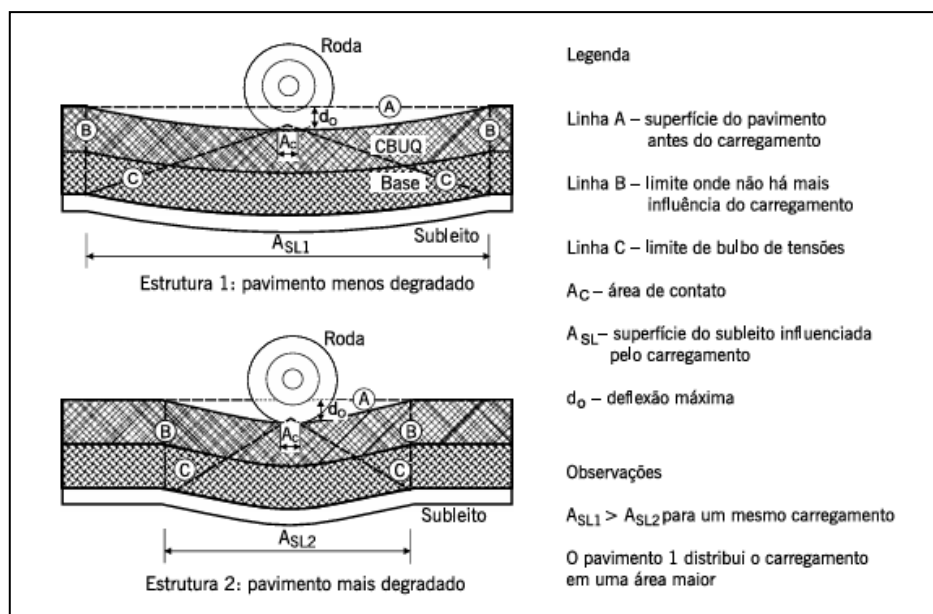
2.5.2.1 Definição

A interação carga-estrutura, com suas consequências sobre a deformação e a ocorrência de campos e gradientes de tensões nas camadas dos pavimentos, deve ser abordada dentro do conceito que a estrutura constitui um conjunto de camadas superpostas, com espessuras e propriedades reológicas distintas, respondendo monoliticamente aos esforços aplicados pelos veículos (Balbo, 2007).



Hveem (1955) entendia que o trincamento progressivo dos revestimentos asfálticos se devia à deformação resiliente (elástica) das camadas subjacentes, em especial o subleito. Devido a ocorrência desse fenômeno em função das cargas repetidas, em 1938, o laboratório do Departamento de Transportes da Califórnia iniciou uma série de medidas em campo dos deslocamentos verticais dos pavimentos causados pela ação da passagem rápida de cargas de roda. Esse tipo de deslocamento vertical foi chamado de deflexão, que é um termo aplicado para movimentos verticais transientes quando o pavimento é solicitado por uma carga de roda (Figura 7). Cessada a ação da carga, a deflexão é recuperada rapidamente, uma parcela do deslocamento sendo resiliente (recuperada) e outra permanente (não recuperada) (Bernucci *et al*, 2022; Medina e Motta, 2015).

Figura 7 - Esquema de Deflexão de um pavimento



Fonte: Bernucci *et. al* (2022)

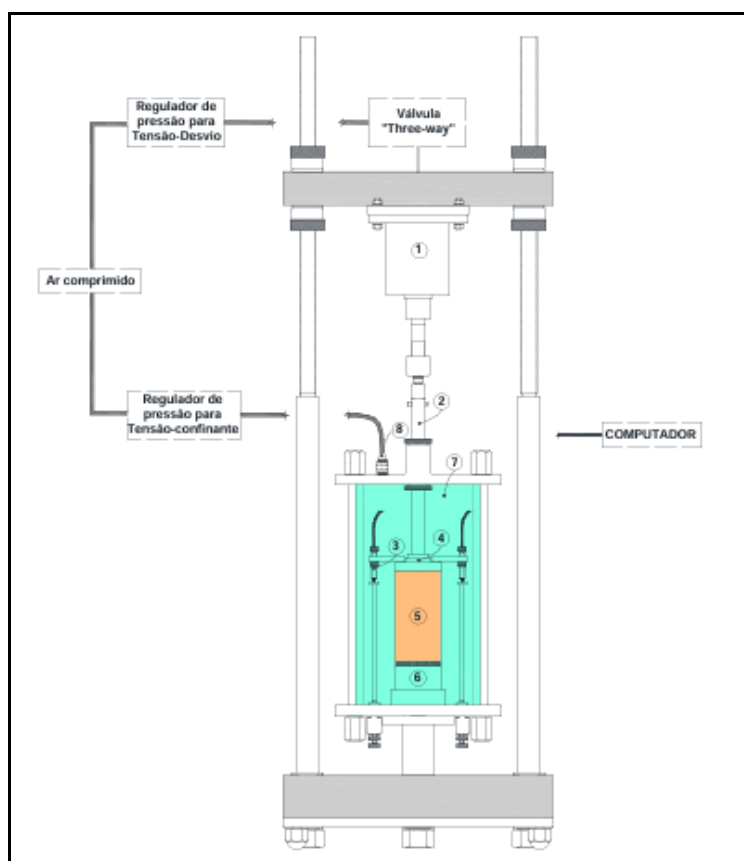
Da necessidade de caracterizar o comportamento dos materiais de pavimentação, considerando a teoria da elasticidade de cada material, permitindo o cálculo de tensões e deformações nas camadas de um pavimento, como também a condição de cargas cíclicas do tráfego, que correspondem a tempos de aplicação muito baixos e intervalos entre ciclos, surgiu na década de 1960 os ensaios triaxiais de cargas repetida (Figura 8) e o módulo de elasticidade obtido nessas condições foi denominado de MR (Bernucci *et. al*, 2022).



A recomendação para a substituição o ISC e outros valores de resistência pelo MR foi baseada nos seguintes argumentos:

- O MR indica uma propriedade básica do material que pode ser utilizada na análise mecânica de sistemas de múltiplas camadas;
- O MR é um método aceito internacionalmente para caracterizar materiais para o projeto de pavimentos e para sua avaliação de desempenho;
- Há técnicas disponíveis para estimar o MR em campo com ensaios rápidos e não destrutivos, o que facilita a uniformização entre os procedimentos de dimensionamento de pavimentos novos e de reforço de pavimentos antigos.

Figura 8 - Triaxial de cargas repetidas



Fonte: DNIT (2018)

Define-se Módulo de Resiliência no ensaio triaxial de cargas repetidas (Medina e Motta, 2015):



$$MR = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \quad (3)$$

Onde:

σ_d = Tensão de desvio ($\sigma_1 - \sigma_3$);

ε_r = Deformação resiliente axial

$$\varepsilon_r = \frac{\Delta h}{h_0} \quad (4)$$

Onde:

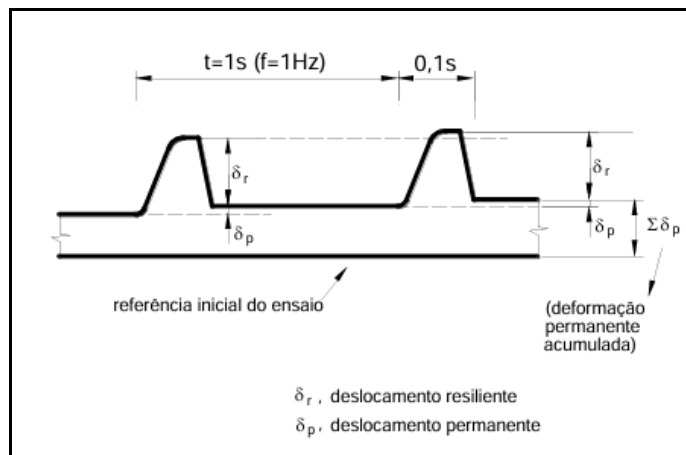
Δh = Deslocamento vertical máximo;

h_0 = Altura inicial referencial do corpo de prova

Conforme *Figura 9*, a cada aplicação de tensão de desvio, a deformação axial tem uma parcela pequena de natureza permanente:

$$\varepsilon_t = \varepsilon_r + \varepsilon_p \quad (5)$$

Figura 9 - Deformações resilientes e permanentes



Fonte: DNIT (2018)

O ensaio para determinação do MR em solos no Brasil é regido pela norma DNIT 134/2018-ME (DNIT, 2018). A realização do ensaio consiste em moldar o corpo de prova na energia e umidade de projeto, com dimensões de 100 mm de comprimento por 200 mm de



altura, ou 150 mm por 300 mm, conforme dimensão máxima do material. Posteriormente o CP é posto na câmara do triaxial de cargas repetidas e realizado um condicionamento com 500 repetições de cada três pares de tensões especificadas, a fim de reduzir a influencia das deformações permanentes (Tabela 1). Após a fase de condicionamento são aplicados 16 pares de tensões com 10 ciclos cada e medido o MR para cada par (Tabela 2). O carregamento imposto pela tensão de desvio tem uma frequência de 1 hz (60 ciclos por minutos), que corresponde a duração do pulso de carga de 0,1 segundo e 0,9 segundo de repouso, demonstrado na Figura 10. (Medina e Motta, 2015; DNIT, 2018)

Tabela 1 - Pares de tensões para condicionamento

Tensão confinante σ_3 (Mpa)	Tensão Desvio σ_d (Mpa)	Razão de Tensões σ_1 / σ_3
0,070	0,070	2
0,070	0,210	4
0,105	0,315	4

Fonte: Adaptado de DNIT (2018)

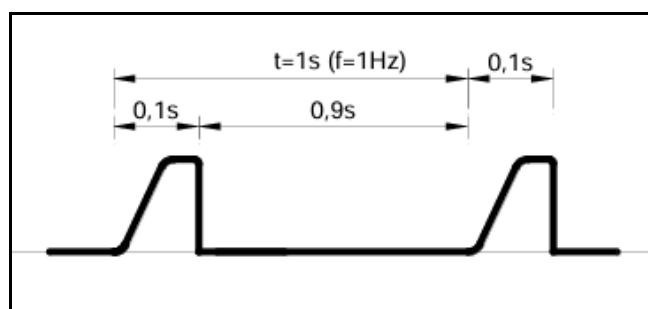


Tabela 2 - Pares de tensões MR

σ_3 (Mpa)	σ_d (Mpa)	σ_1 / σ_3
0,020	0,020	2
	0,210	3
	0,315	4
0,035	0,035	2
	0,070	3
	0,105	4
0,050	0,050	2
	0,100	3
	0,150	4
0,070	0,070	2
	0,140	3
	0,210	4
0,105	0,105	2
	0,210	3
	0,315	4
0,140	0,140	2
	0,280	3
	0,420	4

Fonte: Adaptado de DNIT (2018)

Figura 10 - Frequência de aplicação de carga MR



Fonte: DNIT (2018)



2.5.2.2 Características resilientes dos solos

Conforme Medina e Motta (2015), os solos não sendo materiais elástico lineares as expressões da lei de Hooke generalizada não podem ser aplicadas. Os módulos de resiliência dos solos dependem do estado de tensão atuante – decorrentes do peso próprio mais as tensões causadas pela solicitação do tráfego. O que se procura nos ensaios triaxiais é a relação experimental:

$$MR = f(\sigma_3, \sigma_d) \quad (6)$$

Mantendo-se os demais parâmetros dentro das especificações, para cada solo o seu MR pode ser expresso como uma função do estado de tensões aplicados durante o ensaio, sejam modelos matemáticos com constantes experimentais (Figura 11 e Figura 12). Para os solos coesivos, a deformação resiliente axial depende consideravelmente da tensão de desvio aplicada, sendo bilinear, com o MR variando significativamente para baixas tensões de desvio. Na prática, não é fácil de definir o ponto de transição (k_1 e k_2), por isso Svenson (1980) sugeriu o modelo:

$$MR = k_1 \times \sigma_d^{k_2} \quad (7)$$

Onde:

σ_d = Tensão de desvio ($\sigma_1 - \sigma_3$);

k_1 e k_2 = Coeficientes do modelo de regressão.

Já em relação aos materiais granulares, o MR aumenta com a tensão de confinamento e varia muito pouco com a tensão de desvio.

$$MR = k_1 \times \sigma_3^{k_2} \quad (8)$$

Onde:

σ_d = Tensão de desvio ($\sigma_1 - \sigma_3$);

k_1 e k_2 = Coeficientes do modelo de regressão



A partir dos anos 2000, passou a ser utilizado o modelo denominado composto, no qual são considerados simultaneamente os efeitos das tensões confinantes e de desvio; Esse modelo tem sido o mais empregado atualmente.

$$MR = k_1 \times \sigma_3^{k_2} \times \sigma_d^{k_3} \quad (9)$$

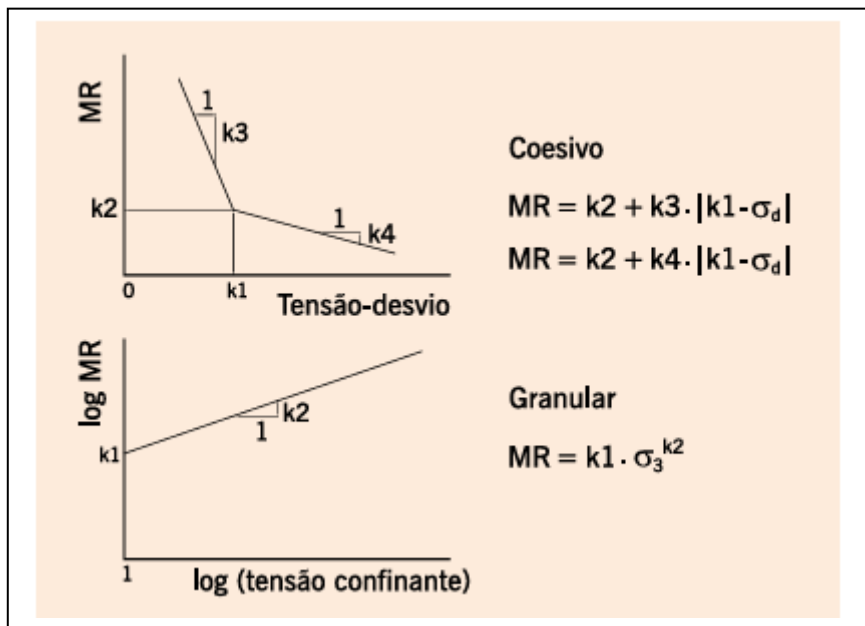
Onde:

σ_d = Tensão de desvio ($\sigma_1 - \sigma_3$);

k_1 , k_2 e k_3 = Coeficientes do modelo de regressão

Para solos estabilizados com porcentagens significativas de cimento ou cal, devido à cimentação das partículas, o MR tende a ser constante, independente da tensão de desvio e da confinante (Bernucci *et. al*, 2022; Medina e Motta, 2015).

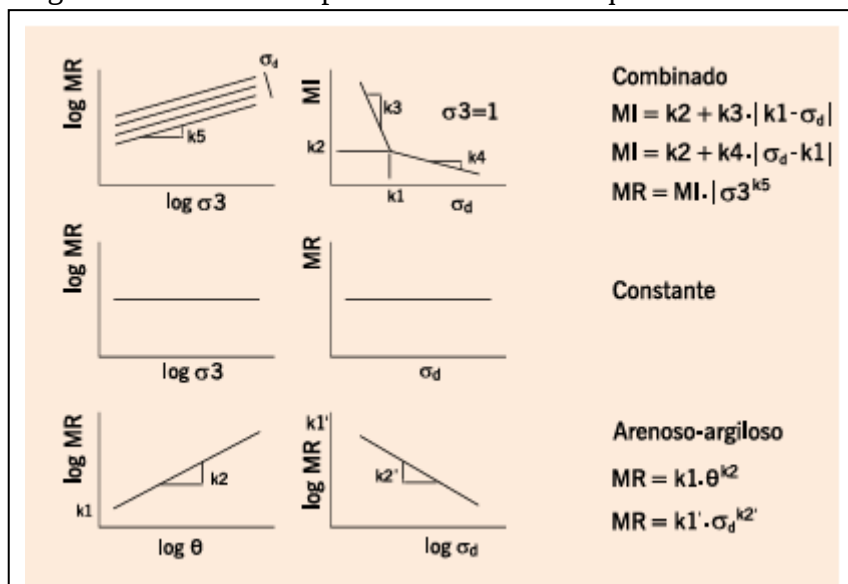
Figura 11 - Modelos clássicos de comportamento resiliente de solos



Fonte: Bernucci *et. al* (2022)



Figura 12 - Outros comportamentos de solos quanto à resiliência



Fonte: Bernucci *et. al* (2022)

Alguns fatores internos e externos podem influenciar o MR de materiais granulares, como alta umidade nos materiais granulares que tende a diminuir os seus módulos, visto que a água lubrifica as partículas, proporcionando um aumento da sua capacidade de deformação e diminuição da sua rigidez; Materiais com partículas cúbicas, com faces fraturadas e rugosas tendem a possuir MR maiores do que aqueles com partículas alongadas e planas; O MR aumenta quando o material está mais compactado e bem graduado; Como já comentado, o estado de tensões influencia o MR desses materiais, com o MR aumentando conforme o acréscimo da tensão confinante; A alta presença de partículas finas tendem a reduzir o MR, enquanto partículas maiores influenciam no aumento do parâmetro (Quintana *et. al*, 2025; Dushmanta *et. al*, 2025).

2.6 Dimensionamento de pavimentos asfálticos

Balbo (2007) menciona que dimensionar um pavimento significa determinar espessuras de camadas e os tipos de materiais a serem utilizados em sua construção, de modo a permitir uma estrutura capaz de suportar o volume de tráfego preestabelecido, em condições climáticas locais, proporcionando um desempenho desejável para a sua finalidade.

São os três tipos básicos de ruptura que permeiam os critérios de dimensionamento. Primeiramente, a ruptura na qual se verifica que a estrutura do pavimento não suporta mais



adequadamente as cargas aplicadas e apresenta excessiva deformabilidade plástica, caracterizando uma ruptura plástica e estrutural.

No caso de um pavimento não servir mais ao usuário, em termo de conforto e segurança ao rolamento, independentemente da ocorrência de problemas de ordem estrutural, fica caracterizada uma ruptura de natureza funcional ou operacional.

O primeiro método de dimensionamento empírico para pavimentos flexíveis, denominado critério do CBR, é atribuído ao engenheiro O.J.Porter em 1922, e o critério básico de ruptura é o cisalhamento do subleito e das camadas granulares, que causariam o aparecimento de sulcos nas trilhas de rodas (deformações permanentes) ou até mesmo rupturas plásticas no subleito.

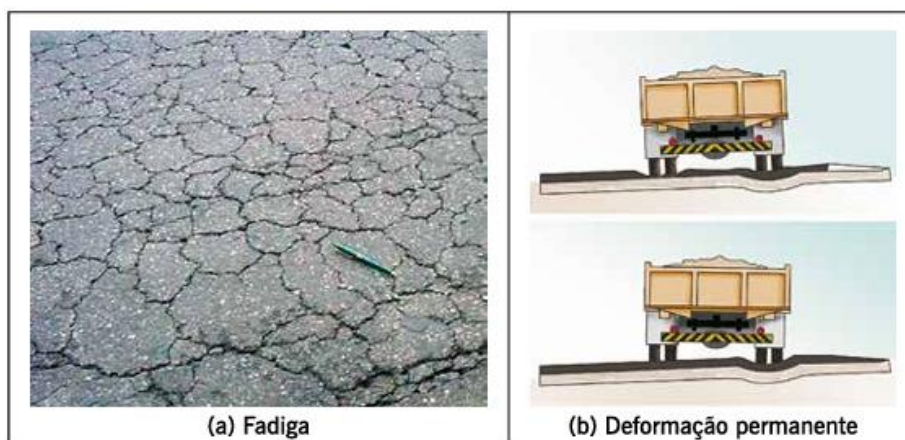
O método semiempírico do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), utilizado no Brasil e criado pelo Engenheiro Murillo Lopes de Souza (1981), foi uma adaptação do critério do CBR com a adoção da repetição de carga de um eixo padrão de 80 kN. Também considera o conceito de coeficiente de equivalência estrutural estabelecido nas pistas experimentais da *American Association of State Highway Officials* (AASHO). Tendo em vista fundamentar-se no critério do CBR, tem como modo de ruptura o acúmulo de deformações plásticas causado pelos esforços de cisalhamento que ocorrem no subleito e nas camadas granulares. Nesse método não são considerados aspectos relacionados à fadiga de misturas asfálticas e de bases cimentadas (Balbo, 2007; Medina e Motta, 2015).

No decorrer dos anos, foram observados outros critérios para que um pavimento falhasse e atualmente pode-se afirmar que pavimentos rompem por diversos fatores. Entre as causas mais relacionadas com a aplicação de cargas cíclicas em um pavimento, destacam-se:

- O fenômeno da fadiga, responsável pelo trincamento de revestimentos betuminosos e de bases cimentadas (Figura 13 (a));
- O acúmulo de deformações plásticas (permanentes) pela ação das deformações cisalhantes que ocorrem em camadas de misturas asfálticas, em materiais granulares e nos solos do subleito (Figura 13 (b)).



Figura 13 - Critérios de falha de pavimentos flexíveis



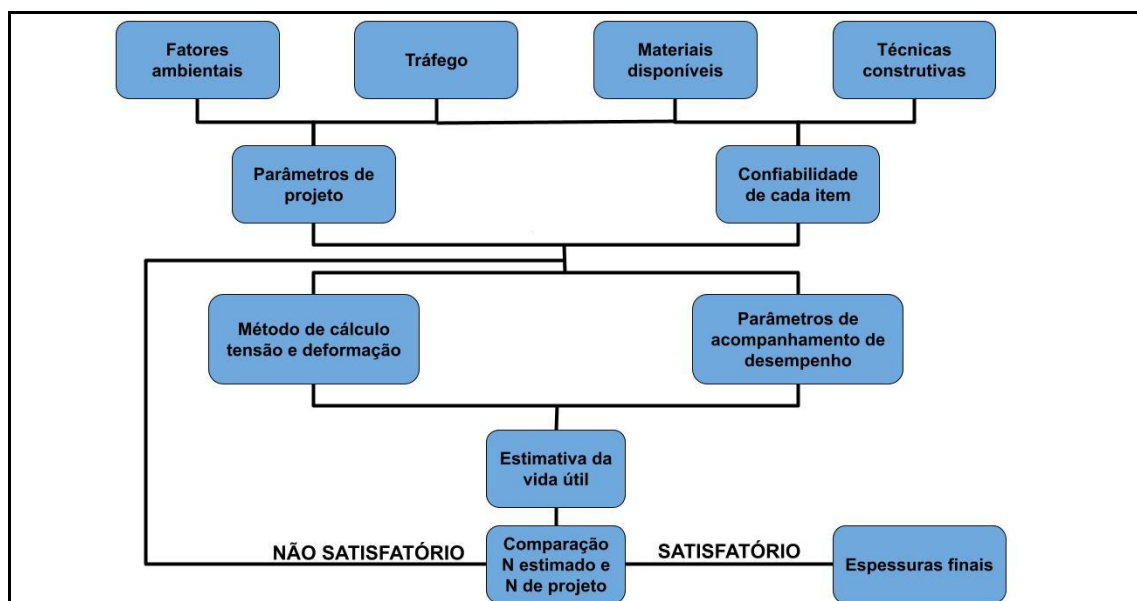
Fonte: Bernucci *et. al* (2022)

Conforme Medina e Motta (2015), a tendência dos principais centros de pesquisas rodoviárias é de estabelecer métodos mecanísticos-empíricos de dimensionamentos fundados em sólidas bases analíticas e experimentais, considerando as características mecânicas dos materiais determinadas em condições de solicitação dinâmica, conforme as cargas dos veículos atuam, e levando em conta os efeitos climáticos na sua variação sazonal. Diferentemente do método semiempírico, o aumento das espessuras das camadas não é a solução para todos os casos de maior solicitação. O enfoque dos métodos é otimizar recursos específicos de projeto, compatibilizar materiais e testar várias combinações para reduzir custos e tempos de construção.

Os mesmos autores ainda mencionam que os métodos mecanísticos-empíricos devem prever todos os mecanismos de degradação de um pavimento: fadiga das camadas de maior rigidez (misturas asfálticas e bases cimentadas), afundamentos de trilha de roda (deformação permanente acumulada) e ruptura plástica a poucas repetições). Além de evitar que esses mecanismos de ruptura aconteçam antes que o N (número de solicitações de um eixo padrão) de projeto seja alcançado. Um dimensionamento mecanístico empírico deve seguir o fluxograma apresentado na Figura 14.



Figura 14 - Fluxograma de um dimensionamento empírico-mecanístico



Fonte: Adaptado de Motta (1991)

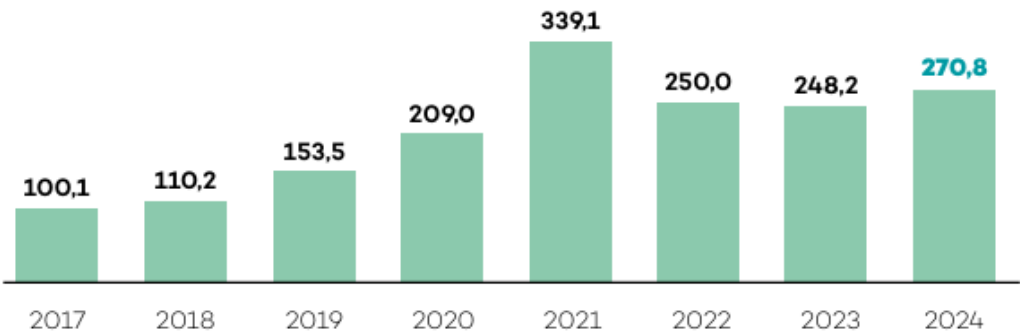
Com a necessidade da implementação de um método mecanístico-empírico nacional para dimensionamento de pavimentos, O DNIT elaborou o método denominado MeDiNa, compreendido por um *software* computacional que utiliza a Teoria de Sistema de Camadas Elásticas (TSCE) para cálculo de tensões e deformações na estrutura do pavimento (Franco e Motta, 2020). Também vem incluído o AEMC para análise de estruturas a partir da mesma teoria do TSCE e o BackMeDiNa para retroanálise de bacias de deflexões. O sistema ainda se encontra em período de implantação e calibração.

2.7 A mineração no Brasil e no Rio Grande do Norte

A atividade minerária no Brasil é uma das principais atividades econômicas do país, responsável por um faturamento superior a 270,8 Bilhões de Reais (R\$) em 2024 (Gráfico 1). O minério de ferro mantém a liderança na lista respondendo por 59,4% do faturamento nacional (R\$ 160,7 bilhões). Outros minérios com grande impacto nas receitas são o minério de Ouro (8,8%), minério de Cobre (7,5%), calcário Dolomítico (3,8%), Granito (2,6%) e a Bauxita (2,3%). Essas seis principais substâncias representam 83,9% do faturamento total de 2024 (Tabela 3). O minério de Tungstênio, encontrado na scheelita, se encontra na posição 71 da lista de faturamento com R\$ 17.850.523,15. (IBRAM, 2025).



Gráfico 1 - Faturamento Setor Mineral (Bilhões R\$)



Fonte: IBRAM (2025)

Tabela 3 - Faturamento por substância

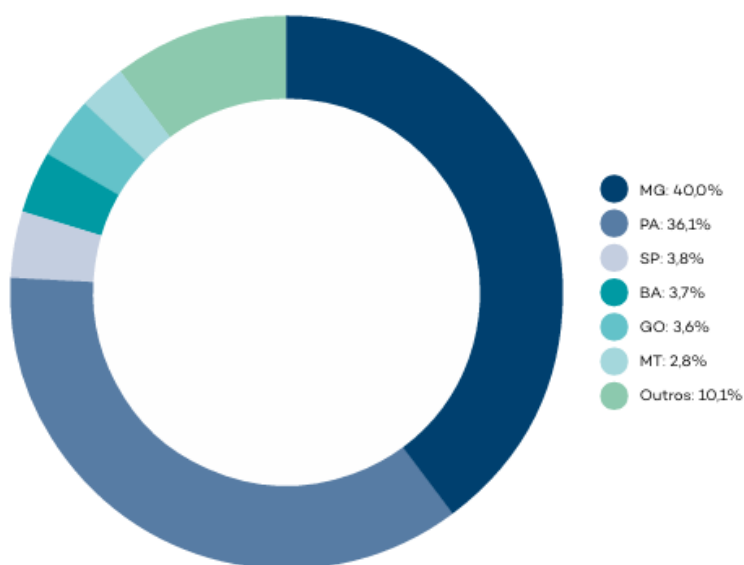
FATURAMENTO (bilhões R\$, %) 2024 x 2023						
	SUBSTÂNCIA	2023	2024	(%) total nacional 2023	(%) total nacional 2024	2024 X 2023
1	MINÉRIO DE FERRO	148,0	160,7	59,6%	59,4%	8,6%
2	MINÉRIO DE OURO	21,1	23,9	8,5%	8,8%	13,3%
3	MINÉRIO DE COBRE	16,2	20,3	6,5%	7,5%	25,2%
4	CALCÁRIO DOLOMÍTICO	9,5	9,1	3,8%	3,4%	-4,3%
5	GRANITO	6,5	7,6	2,6%	2,8%	17,9%
6	BAUXITA	5,7	5,7	2,3%	2,1%	0,7%
	SUBTOTAL	206,9	227,3	83,4%	83,9%	
	OUTRAS	41,3	43,5	16,6%	16,1%	5,4%
	BRASIL	248,2	270,8	100,0%	100,0%	9,1%

Fonte: IBRAM (2025)



Em relação aos estados, Minas Gerais (MG) e Pará (PA) lideram o ranking de estados que mais faturaram com a mineração em 2024, com 76,1% do faturamento nacional em 2024 (Gráfico 2). O estado do Rio Grande do Norte (RN) se encontra apenas na 23ª posição.

Gráfico 2 - Faturamento por estado

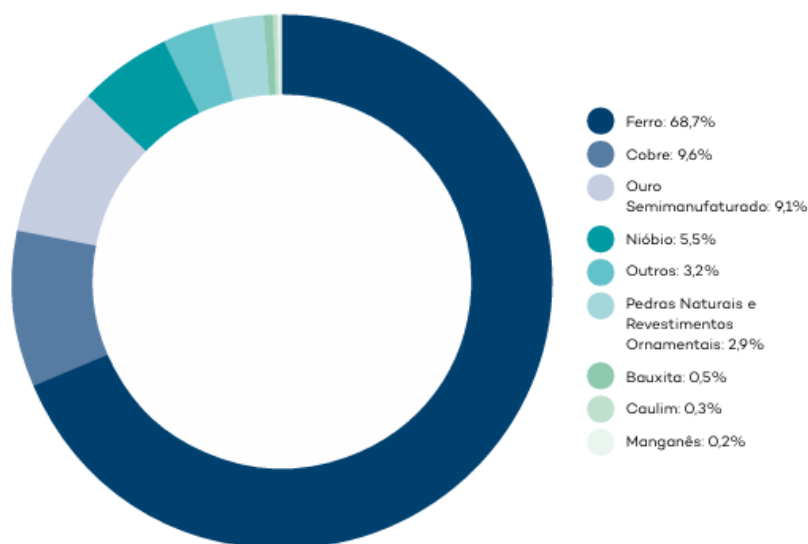


Fonte: IBRAM (2025)

Ainda vale citar que o Brasil é um grande exportador de minérios, exportando 402,39 milhões de toneladas, equivalente a 43,43 bilhões de dólares. O Gráfico 3 demonstra que o minério de ferro representa 68,7 % do total exportado, seguido pelo cobre (9,6%) e ouro semi-manufaturado (9,1%). (IBRAM, 2025).



Gráfico 3 - Participação (US\$) nas exportações 2024



Fonte: IBRAM (2025)

Em relação ao Rio Grande do Norte, o estado historicamente entre os anos de 1940 e meados da década de 1970, destacou-se no cenário nacional como o maior produto de recursos minerais, como gipsita, concentrado de scheelita, caulim primário e concentrado de berilo (Angelim, 2006).

Além disso, o sal marinho, produzido em larga escala nas regiões de Macau, Mossoró e Areia Branca, representa mais de 90% da produção nacional desde os tempos coloniais. A partir de 1938, com o início do registro oficial da produção anual de sal no Brasil, o estado consolidou-se como o maior produtor de sal marinho do país, chegando a responder por mais de 95% da produção (Diniz; Vasconcelos, 2019)

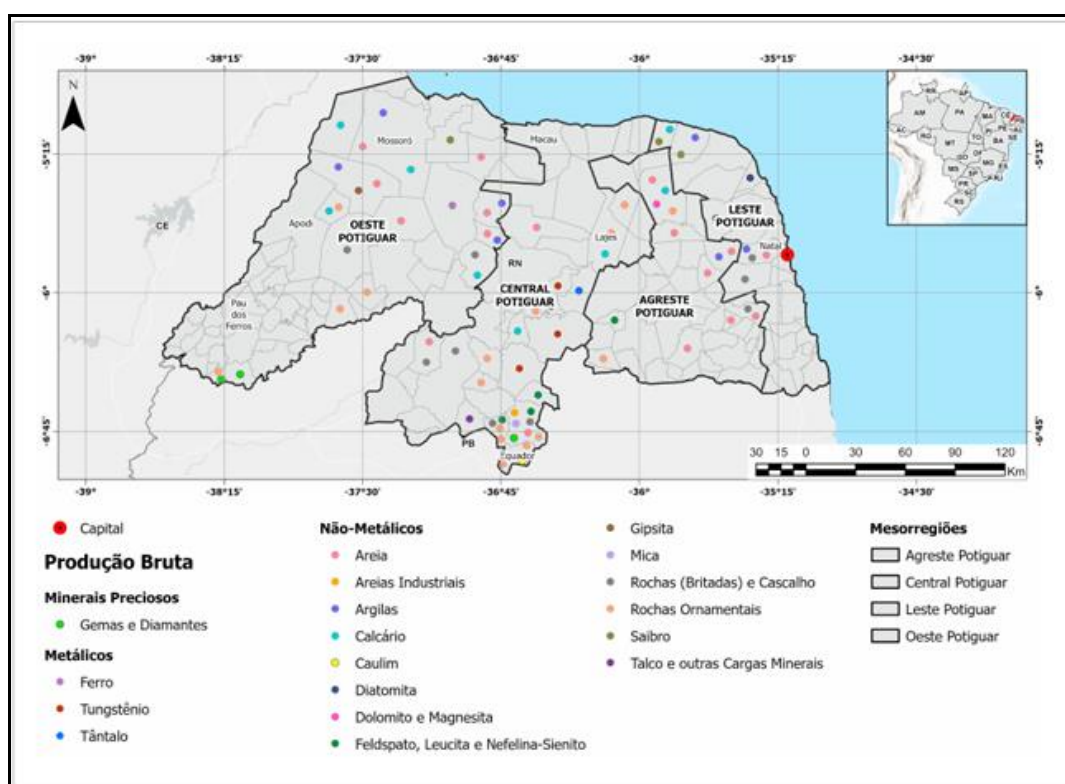
De modo geral, o Rio Grande do Norte possui mais de 60 substâncias minerais distribuídas em 3.169 registros minerais cadastrados no Serviço Geológico do Brasil (Figura 15), sendo algumas delas descritas abaixo (Dantas, 2024):

- Água mineral ou potável de mesa;
- Gemas: água-marinha, esmeralda, lazulita, com destaque para a turmalina Paraíba, etc;
- Materiais de uso na construção civil: areia, brita, cascalho, granito, quartzito, etc.;
- Metais ferrosos: ferro, molibdênio, tungstênio;



- Metais não ferrosos e semimetais: berílio, bismuto, espodumênio, tântalo, entre outros;
- Metais nobres: ouro;
- Recursos minerais energéticos: gás natural, petróleo, tório, turfa, urânio;
- Rochas e minerais industriais: argila, bário, gipso, calcário, feldspato, quartzo, etc.

Figura 15 - Principais bens minerais produzidos (forma bruta) no RN



Fonte: SGP (2025)

Em relação à produção mineral bruta, entre 2010 e 2023, a quantidade acumulada de produção mineral lavrada (ROM) no estado se expandiu de 1,91 milhões para 5,54 milhões de toneladas. Como consequência, foi gerada uma quantidade comercializada de 4,12 milhões de toneladas de minério bruto, com destaque para as substâncias minerais como calcário, rochas ornamentais, ferro, feldspato, leucita, nefelinasiento, argilas caulim e areia. Os municípios que mais se destacaram no estado em termos de valor de produção mineral bruta (VPM) foram: Apodi, Assú, Ceará-Mirim, Extremoz, Macaíba, Parnamirim, Upanema, São



José de Mipibu, Baraúna, Currais Novos, Caicó, Felipe Guerra, Mossoró, Gov. Dix. Sept Rosado, Jandaíra, Pedra Grande, São Rafael e São Vicente.

Tratando da produção mineral beneficiada, nesse mesmo período, o estado alcançou 35,58 milhões de toneladas. A Tabela 4 mostra que os destaques incluem as seguintes substâncias minerais: rochas britadas e cascalhos (28,83% da produção), calcário (24,10%), tungstênio (19%), rochas sedimentares (11,59%) e gemas (9,05%) (SBG, 2025).

Tabela 4 - Quantidades e valores de produção mineral beneficiada no RN (2010-2023)

SUBSTÂNCIA MINERAL	VALOR (R\$)	QUANTIDADE COMERCIALIZADA (t)	UNID.	QUANTIDADE CONTIDO	TEOR
Rochas (Britadas) e Cascalho	509.262.749,97	14.124.340,17	t		
Calcário	425.778.409,21	20.460.438,72	t		
Tungstênio	335.642.557,74	6.629,76	t	4891,05	73,77%
Rochas Ornamentais	204.736.332,24	65.375,91	t		
Gemas	159.898.848,31	915,29	kg	779,73	85,19%
Caulim	28.263.509,73	167.393,06	t		
Ferro	24.842.509,73	156.539,42	t	8877,21	18,45%
Ouro	24.487.021,21	241,13	kg	234,23	97,14%
Feldspato, Leucita e Nefelina-Sienito	21.779.872,86	91.986,81	t		
Dolomito e Magnesita	17.737.744,45	159.351,56	t		
Talco e outras Cargas Minerais	7.369.923,38	31.874,46	t		
Areias Industriais	3.668.074,22	5.189,90	t		
Tântalo	1.045.438,74	18,73	t	18,73	100,00%

Fonte: Adaptado de SGB (2025)

2.8 A scheelita

De acordo com DANA (1978), a scheelita (Figura 16) é um mineral que pertence à classe dos tungstatos. É um tungstato de cálcio que tem por composição: CaWO_4 (Ca 19,4% e WO_3 80,6%). O seu nome foi dado em homenagem ao descobridor do Tungstênio Karl Wilhelm Schelle.



Figura 16 - Scheelita



Fonte: Autor (2026)

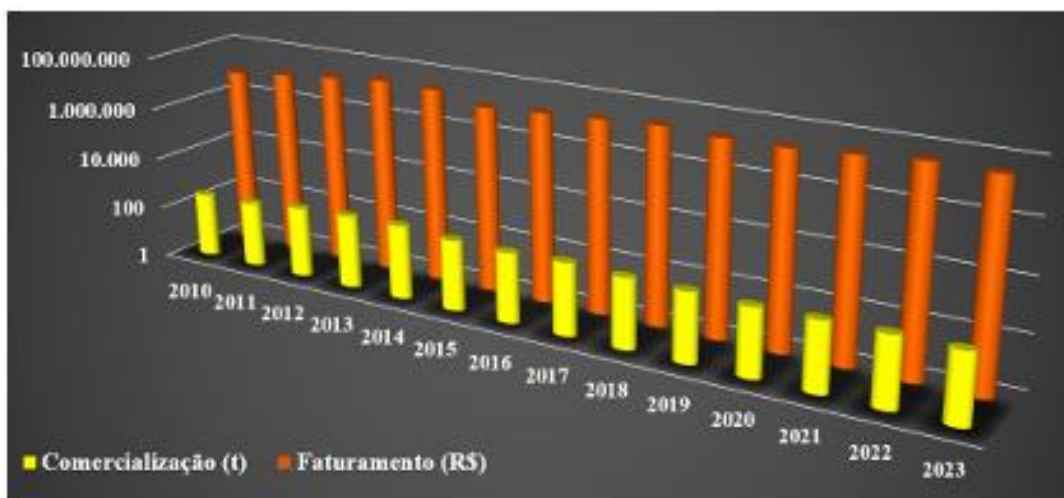
O mineral é encontrado nos pegmatitos graníticos, nos depósitos metamórficos de contato e nos filões de minérios de alta temperatura que estão associados com rochas graníticas (Dana, 1978). A sua exploração tem a finalidade de se obter o tungstênio de uso difundido na produção de lâmpadas e canetas, na indústria metalúrgica, bélica, petrolífera etc.

A Província Scheelitífera da Borborema, localizada nos estados do Rio Grande do Norte e Paraíba, onde o principal depósito é estratiforme e a rocha hospedeira é o escarnito, abriga a mais importante concentração de minério de tungstênio do país. Nessa província, o tungstênio é explorado e comercializado na forma de concentrado de scheelita. (SBG, 2025).

Depois de um impacto negativo nas exportações da scheelita no Rio Grande do Norte, na década de 1980, causada pelo crescimento da China que passou a controlar a oferta mundial de tungstênio, a produção e comercialização do minério têm sido retomadas nos últimos anos, conforme Gráfico 4 (Angelim, 2006; Dantas e Cavalcante, 2021; Dantas, 2024).



Gráfico 4 - Produção beneficiada de tungstênio entre os anos de 2010 e 2023



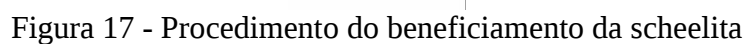
Fonte: SGB (2025)

Atualmente, a indústria da scheelita (lavra e beneficiamento) está concentrada no município de Currais Novos, sendo representada pelas três principais minas em operação: Brejuí, Barra Verde e Boca de Lage, que correspondem por praticamente toda a produção nacional do concentrado de scheelita (SBG, 2025).

2.8.1 O beneficiamento da scheelita

O beneficiamento da scheelita é um processo bastante rústico, abrangendo diversas etapas. A exceção de alguns equipamentos que foram modernizados, basicamente a essência do procedimento se manteve desde a década de 40. O processo é realizado por equipamentos que trabalham por processos gravimétricos, dentre os quais, os mais importantes são as mesas vibratórias e os jigues, nenhum efluente químico é utilizado, conforme Figura 17 (Gerab, 2014).

Após o procedimento do beneficiamento, são gerados três subprodutos: o concentrado de scheelita, o resíduo grosso (Figura 18) e o resíduo fino. Do beneficiamento, somente 0,8% é utilizado como matéria prima no setor industrial. Paiva (2013) detalhando os processos de lavra e beneficiamento da scheelita na Mina Brejuí, apresenta que são produzidos mais de 50 m³ diários de resíduos durante o beneficiamento.



Fonte: Autor (2026)

53



algum elemento radioativo, atendendo as recomendações internacionais para a reciclagem de resíduo (CFR – title 40 – Protection of environmental)

Quadro 1 - Classificação de resíduos conforme a NBR 10004 (ABNT, 2004)

Classificação de resíduos	Definição
Classe I – Perigosos	São aqueles que apresentam periculosidade ou uma das seguintes características: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidades
Classe II – Não perigosos, não inertes	São aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos de classe I ou de classe III, nos termos dessa norma. Os resíduos de classe II podem ter propriedades: combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água.
Classe III – Não perigosos, inertes	Quaisquer resíduos que, quando amostrados de forma representativa, segundo a NBR 10007 – amostragem de resíduos, e submetidos a um contato estático ou dinâmico com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, conforme teste de solubilização, segundo a NBR 10006 – solubilização de resíduos, não tiver nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, executando-se os padrões de aspectos, cor, turbidez e sabor. Como exemplos desses materiais, têm-se: rochas, tijolos, vidros e certos plásticos e borrachas que não são decompostas prontamente.

Fonte: ABNT (2004)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A fim de avaliar a viabilidade da incorporação do resíduo grosso proveniente do beneficiamento da scheelita em uma mistura de reciclagem profunda de pavimento *in situ* para utilização como camada de base, foi necessário desenvolver dosagens com vários teores do resíduo adicionado aos demais insumos existentes na rodovia, assim como também com a adição costumeira de britas.

Previamente ao processo de dosagem, foram realizadas as caracterizações de todos os materiais componentes da mistura a serem elaboradas, já que a adição dos materiais (revestimento, britas e resíduo) deverá ter como referência o peso do material natural (base).

Com a caracterização dos materiais que compuseram as misturas, foram elaboradas as dosagens só com adição de revestimento e brita (M1) e com a adição de revestimento, brita e resíduo (M2).

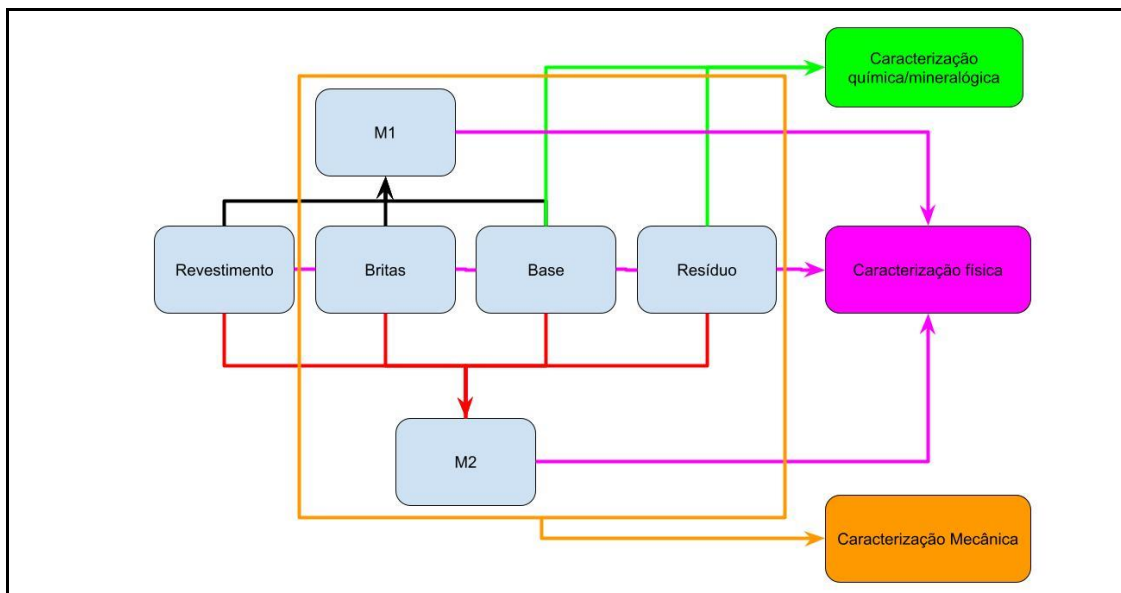
As etapas descritas anteriormente estão demonstradas na Figura 19.

No final, foi realizada a análise da viabilidade da incorporação do resíduo do beneficiamento da scheelita em uma mistura reciclada, considerando o atendimento aos parâmetros de norma. Também foi feita uma análise mecanicista comparativa entre o



pavimento restaurado com a mistura M2 e outra estrutura com a substituição da camada de base natural por uma Brita Graduada Simples (BGS), ambos no km 51,16.

Figura 19 - Fluxograma do procedimento das misturas (M1, M2) e ensaios



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

3.1 Coleta de amostras

3.1.1 Amostras do pavimento

A partir de vistoria realizada na BR-427/RN, e autorização da Superintendência Regional do DNIT/RN, foram determinados os pontos de coleta das amostras das camadas de bases dos pavimentos da rodovia, em função do estado de deterioração da estrutura devido à presença de defeitos como painéis, remendos, afundamentos, trincas etc. Após a definição dos pontos nos km 51,16, km 51,60 e km 67,06, janelas de sondagens foram abertas de forma manual e os materiais da base coletados. Também foram verificadas as espessuras da camada granular e do revestimento existente (Figura 20).

O revestimento a ser utilizado no estudo da mistura foi obtido a partir do material fresado em decorrente do serviço de remendo executado pela empresa responsável pela manutenção da rodovia (Figura 21).



Figura 20 - Coleta e medição do material de base, km 51,16



Fonte: Autor (2026)

Figura 21 - Fresagem do revestimento no serviço de reparo localizado, BR-427/RN



Fonte: Alta-MPB (2025)

3.1.2 Amostras do resíduo do beneficiamento da scheelita

O resíduo foi coletado diretamente na mina do grupo Mineração Tomaz Salustino S.A., Mina Bejuí, situada no município de Currais Novos/RN (Figura 23). Para o estudo foi utilizado o resíduo grosso, em função da sua granulometria e maior disponibilidade para utilização. Dentro da localidade há diversas pilhas de resíduos dispostas a ar livre, e para uma amostragem representativa, foram coletados materiais em diversos pontos dessas pilhas e posteriormente quarteados (Figura 22).

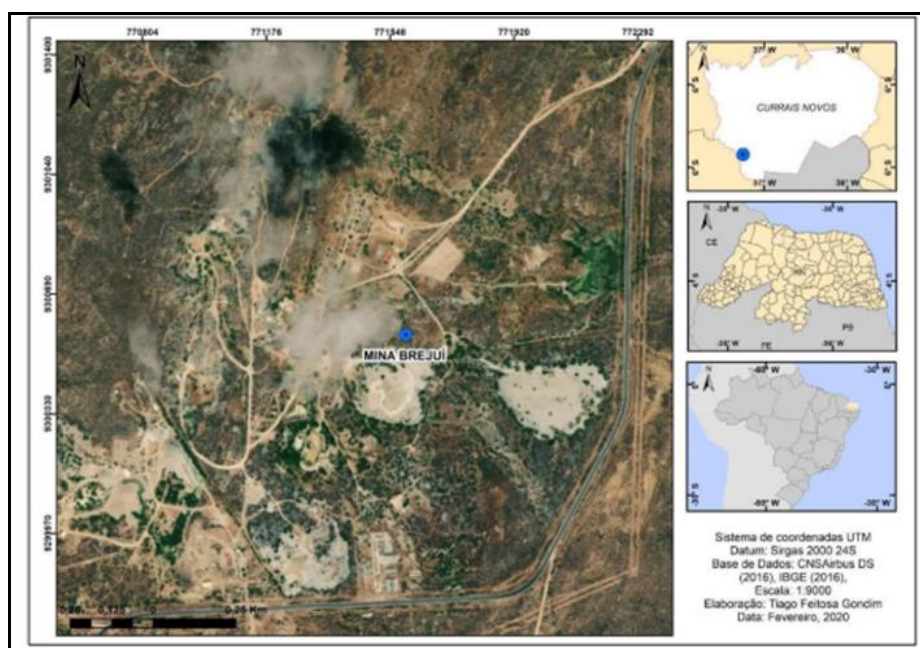


Figura 22 - Coleta do resíduo grosso, Mina Brejuí



Fonte: Autor (2026)

Figura 23 - Localização da Mina Brejuí



Fonte: Gondim (2020)

3.1.3 Amostras de agregado graúdo

Para os agregados graúdos, foram coletados insumos provenientes da região, a fim de se obter uma representatividade maior do estudo, visto que os serviços realizados nas rodovias da região do Seridó utilizam agregados de britadores da proximidade, com o intuito de baratear o custo de aquisição. As britas utilizadas foram coletadas no britador do Grupo Pedreira Potiguar, no município de Acará, na proximidade do km 41 da BR-427/RN. Foram obtidas britas de 19 mm, 16 mm e 12,5 mm. (Figura 24)



Figura 24 - Coleta das britas



Fonte: Autor (2026)

3.2 Elaboração das misturas

A dosagem da reciclagem foi considerada utilizando toda a camada de base existente na rodovia (100% Base), que possui espessura média de 15 cm, mais a reutilização de 5 cm do revestimento asfáltico existente (adição de 50% Revestimento), assim obtendo a reciclagem de 20 cm do pavimento.

Para as dosagens, as proporções dos materiais de base e de adição do revestimento se mantiveram constantes (Base + 50% Revestimento). Inicialmente foram feitas misturas do material natural (base da rodovia) e revestimento com adição de britas, solução comumente adotada em serviços de reciclagem com estabilização granulométrica. Iniciou-se com 15% de adição do material pétreo, a fim de avaliar a influência da incorporação desse material na mistura e posteriormente nas proporções, 20%, 25% e 40% para a obtenção de uma porcentagem mínima que atendesse aos parâmetros de norma (%ótima), denominada M1.

Após a obtenção de um M1 com uma porcentagem mínima possível de adição de brita (%ótima), foram realizadas misturas contendo o material natural, mais o revestimento, com a adição do agregado graúdo e do resíduo (M2). Considerando o processo de dosagem de M1, a mistura M2 começou com a adição de 15% de brita e 15% do resíduo, para avaliar o impacto que o resíduo geraria em uma mistura já estudada. Depois, foi elaborada uma outra mistura com mais 5% de resíduo, totalizando a adição de 20% do material, assim obtendo a mistura M2.

O esquema da elaboração das misturas e as próprias misturas estão demonstrados na Tabela 5 e Figura 25, respectivamente.



Tabela 5 - Esquema da elaboração das misturas

MISTURA	MATERIAIS			
	BASE	REVESTIMENTO	BRITAS	RESÍDUO
MATERIAL NATURAL	100%	0%	0%	0%
M1	100%	50%	15%,20%,25%, 40%	0%
M2	100%	50%	X%	Y%

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Figura 25 - Material natural, M1 e M2



Fonte: Autor (2026)

3.3 Ensaios

Os ensaios laboratoriais foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos, Laboratório de Materiais de Construção e Laboratório de materiais do Departamento de Engenharia de Materiais (DEMat), na Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), no Laboratório de Mecânica dos Solos no Instituto Federal do Rio Grande do Norte (IFRN) e no Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Os procedimentos foram divididos em ensaios de caracterização química/mineralógica, caracterização física e caracterização mecânica.

3.3.1 Caracterização química e mineralógica

As caracterizações química e mineralógica foram realizadas no Laboratório de materiais do DEMat e consiste na realização dos ensaios de DRX e FRX da amostra do resíduo. O intuito dessa caracterização foi determinar os componentes químicos presentes nas amostras, como também a presença de minerais de interesse.



3.3.2 Caracterização física

As caracterizações físicas foram realizadas nos laboratórios de Mecânica dos solos e Laboratório de materiais de construção da UFRN (Quadro 2). Essa etapa foi importante para a determinação dos parâmetros físicos dos insumos a fim de estabelecer a porcentagem de cada material na dosagem, assim como também determinar os parâmetros da própria mistura com o intuito de verificar o atendimento aos parâmetros preconizados em norma. Os ensaios realizados estão contidos na Figura 26.

Quadro 2 - Ensaios de caracterização física

	Ensaio	Norma	Materiais
Físico	Solo - Análise granulométrica	NBR 7181/2025	Resíduo, Base, M1, M2
	Agregados - Determinação da composição granulométrica	NBR NM 248	Britas, Revestimento
	Limite de liquidez	NBR 6459/2016	Resíduo, Base, M1, M2
	Limite de plasticidade	NBR 7180/2016	Resíduo, Base, M1, M2
	Massa específica dos grãos passantes na peneira de 2,00 mm	NBR 17212/2025	Resíduo, Base, M1, M3
	Agregado graúdo - Determinação da densidade e da absorção de água	NBR 16917/2021	Britas
	Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio	NBR 7809/2019	Britas
	Permeabilidade de carga constante	NBR 13292/2021	Resíduo
	Compactação	NBR 7182/2016	Base, M1, M2
	Determinação do índice de vazios máximo de solos não-coesivos	NBR 16840/2020	Resíduo
	Determinação do índice de vazios mínimo de solos não-coesivos	NBR 12051/1991	Resíduo

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)



Figura 26 - Sedimentação, LL e Vazios mínimos



Fonte: Autor (2026)

3.3.3 Caracterização mecânica

As caracterizações mecânicas, demonstradas no Quadro 3, foram realizadas no Laboratório de Mecânica dos Solos, Laboratório de Materiais de Construção, esses na UFRN, no Laboratório de Mecânica dos Solos do IFRN e no Laboratório de Engenharia de Pavimentos da UFCG. Essa etapa consistiu na verificação mecânica dos insumos, como também da própria mistura. O procedimento é imprescindível, visto que um bom comportamento mecânico se dá em função ao atendimento dos parâmetros físicos.

O ensaio para determinação do Módulo de Resiliência das misturas M1 e M2 foi realizado no Laboratório Engenharia de Pavimentos da (UFCG), em função da disponibilidade do Triaxial de cargas repetidas na localidade (Figura 27).

Quadro 3 - Ensaios de caracterização mecânica

	Ensaio	Norma	Materiais
Mecânico	Índice de Suporte Califórnia	NBR 9895/2016	Base, M1, M2
	Ensaio de abrasão "Los Angeles"	NBR NM 51	Britas
	Solos - Determinação do módulo de resiliência	DNIT 134/2018-ME	M1, M2

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)



Figura 27 - CBR, Abrasão LA e MR



Fonte: Autor (2026)

3.4 Análise técnica

Após a obtenção da mistura reciclada com adição do resíduo proveniente do beneficiamento da scheelita, foi feita a análise ao atendimento dos parâmetros físicos e mecânicos com aqueles preconizados na norma DNIT 141/2022 – Base estabilizada granulometricamente (DNIT, 2022).

No mais, visando a aplicabilidade, também foi realizada análise mecânica comparativo do pavimento restaurado com a mistura M2 e de outra estrutura com a troca do material de base por um BGS, no km 51,16, a fim de verificar o comportamento estrutural desse pavimento e o seu atendimento aos critérios de falha, utilizando dados de tráfego e defletoométricos fornecidos pelo DNIT/RN, para a rodovia BR-427/RN e equações de desempenho da Instrução de Projeto de pavimentação IP-DE-P00/001-B, do Departamento de Estrada de Rodagem de São Paulo (DER-SP, 2024) .

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse presente capítulo são apresentados os resultados obtidos pelos ensaios realizados durante a pesquisa.

Em função da variedade de materiais ensaiados, além dos produtos obtidos pela mistura desses componentes, os resultados serão apresentados de forma separadas:

- Resíduo do beneficiamento da scheelita;
- Material de base da BR-427/RN;



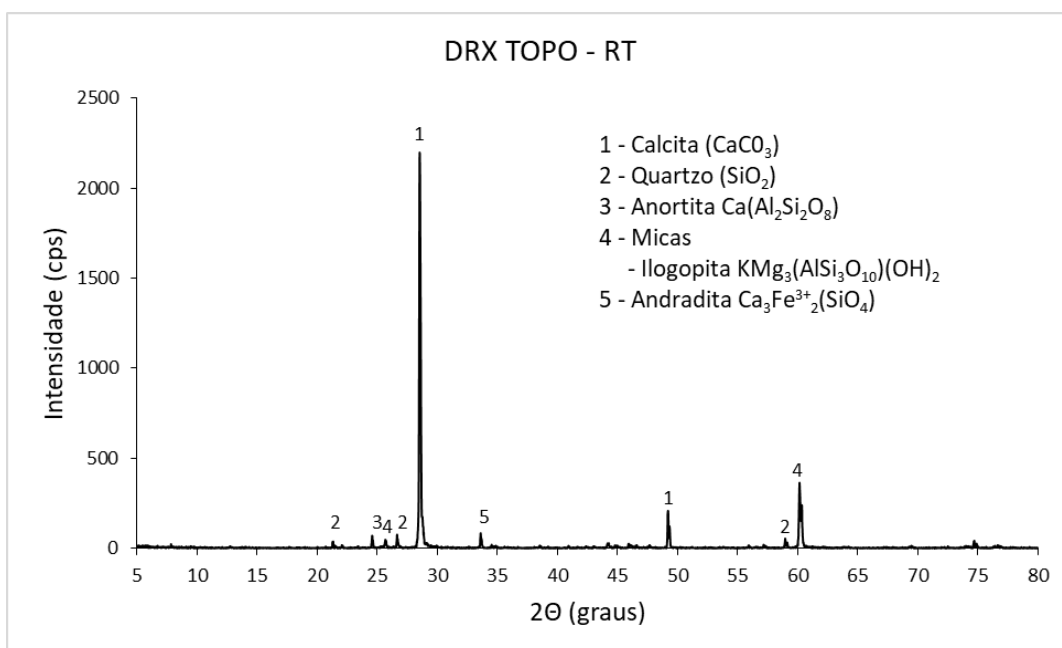
- Demais materiais adicionados às misturas recicladas: Revestimento asfáltico, Britas;
- Misturas recicladas.
- Módulo de Resiliência das misturas M1 e M2.
- Análise mecanicista comparativa do pavimento restaurado com a utilização da M2 e com a substituição por um BGS, ambos no km 51,16.

4.1 Resíduo do beneficiamento da scheelita.

4.1.1 Caracterização química

A Figura 28 apresenta os resultados obtidos no ensaio do DRX, enquanto a Tabela 6 mostra a presença dos óxidos e elementos presentes no resíduo, a partir do ensaio de FRX.

Figura 28 - DRX do resíduo da scheelita



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)



Tabela 6 - FRX do resíduo da scheelita

Óxido	(%)
CaO	40,965
SiO ₂	24,491
Al ₂ O ₃	12,929
Fe ₂ O ₃	11,518
MgO	5,098
SrO	1,631
K ₂ O	1,565
TiO ₂	0,689
MnO	0,458
ZrO ₂	0,239
Rb ₂ O	0,095
Au ₂ O	0,092
SO ₃	0,076
ZnO	0,059
Ga ₂ O ₃	0,048
CuO	0,047

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Os resultados da caracterização química indicam predominância dos elementos de cálcio (Ca), Sílica (Si), condizendo com a composição mineralógica das rochas encaixantes da scheelita.

Os principais componentes apontados pelo FRX são os óxidos CaO (40,965%), SiO₂ (24,491%), AlO₃ (12,929%) e Fe₂O₃ (11,518%), representando 89,90% dos compostos presentes na amostra.

Os principais minerais constatados no ensaio do DRX foram a Calcita que obteve o maior pico de incidência, condizendo com a mineralogia do Tungstato de Cálcio, Quartzo e Anortita (Silicatos do grupo dos Tectossilicatos), Andradita (Silicato do grupo dos Nesossilicato) e Micas (Flogopita – Silicato do grupo dos Filossilicatos). Não foi constatado a presença de argilominerais, especialmente aqueles expansíveis, indicando uma tendência que a adição do resíduo poderá não gerar riscos de expansão do material reciclado, considerando que esse parâmetro é um dos fatores a ser considerado na aplicação da mistura como camada de base de um pavimento. No entanto, esse ensaio não é suficiente para determinar esse comportamento, necessitando de ensaios complementares.

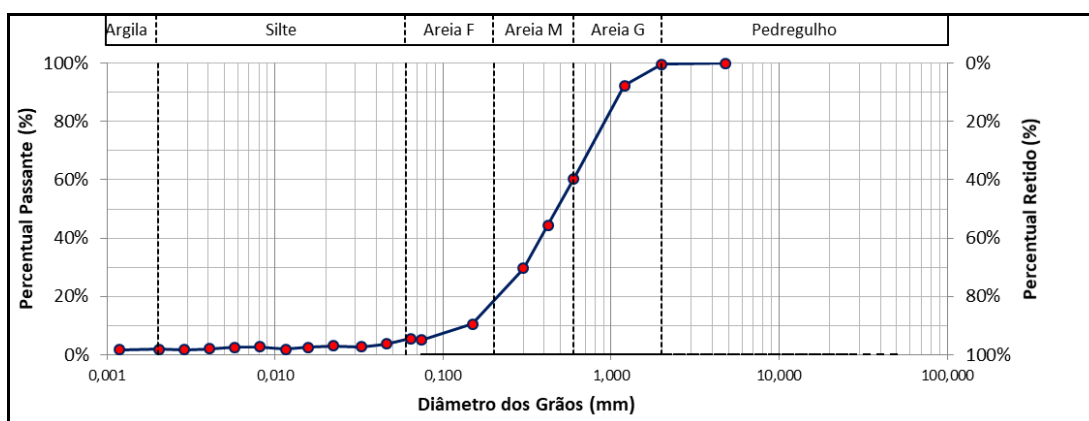


4.1.2 Caracterização física

O resíduo apresentou ρ_s de 2,92 g/cm³. O valor obtido em ensaio condiz com Gondim (2020), no qual o autor caracterizou o mesmo material e obteve o valor de 2,98 g/cm³. Esse valor alto se deve em função da heterogeneidade do material, composto por diversos minerais em sua composição.

Para o ensaio de granulometria e sedimentação, as Figura 29 e Tabela 7 demonstram que o resíduo possui predominância das frações de areia grossa (39,24%) e areia média (43,56%). A parcela fina do material que passa na peneira #200 (0,075 mm), representa apenas 4,79%, demonstrando que essa fração não influencia no comportamento do material.

Figura 29 - Curva granulométrica do resíduo da scheelita



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Tabela 7 - Resumo da granulometria do resíduo

Resumo da Granulometria	
Pedregulho (>2,0mm)	0,35%
Areia Grossa (0,6 - 2mm)	39,24%
Areia Média (0,2 - 0,6mm)	43,56%
Areia Fina (0,06 - 0,2mm)	12,17%
Silte (0,002- 0,06mm)	2,87%
Argila (<0,002mm)	1,82%

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

A curva granulométrica também fornece que o material apresenta uma variedade de tamanhos dos seus grãos, como também uma má graduação, devido aos parâmetros de Coeficiente de Não-Uniformidade (CNU) de 5,35 e Coeficiente de Curvatura (CC) de 1,39.



O material se apresentou como Não Plástico ($IP=0$), visto que não foi possível a determinação dos Limite de Plasticidade (LP) e Limite de Liquidez (LL), em função da ausência de coesão do material (Tabela 8).

Tabela 8 - Índices físicos do resíduo

Material	ρ_s (g/cm ³)	D ₁₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	CNU	CC	LL (%)	LP (%)	IP
Resíduo	2,92	0,111	0,303	0,595	5,348	1,389	0	0	NP

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

A Tabela 9 fornece que, de acordo com o Sistema Universal de Classificação de Solos (SUCS), o material pode ser classificado como areia mal graduada (SP). Como o resíduo tem uso rodoviário, também é importante classifica-lo pelo Sistema Transport Research Board (T.R.B), onde por esse sistema de classificação, o material é enquadrado na categoria A-2-4 (areia e areia siltosa ou argilosa) com comportamento de excelente a bom para utilização como subleito.

Tabela 9 - Classificação do resíduo

Material	SUCS	TRB
Resíduo	SP	A-2-4

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

4.1.3 Índices de vazios máximos e mínimos.

Devido ao material não possuir coesão e consequentemente não ser possível determinar sua massa específica máxima seca (ρ_d máximo) pelo ensaio de compactação Proctor, visto que não foi possível obter uma curva parabólica, foram realizados os ensaios para a determinação dos Índices de vazio máximo (e_{max}) e mínimo (e_{min}) para o material e consequentemente suas massas específicas secas para essas condições.

Os resultados estão contidos na Tabela 10, no qual podemos determinar que o ρ_d máximo do material, relativo ao estado mais compacto (e_{min}), é de 1,918 g/cm³.



Tabela 10 - Índices de vazios mínimo e máximo do resíduo

Vazios	e	ρ_d (g/cm ³)
Máximo	0,75	1,669
Mínimo	0,522	1,918

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

4.1.4 Permeabilidade à carga constante.

Foi realizado o ensaio de permeabilidade à carga constante para as condições próximas dos índices de vazios máximos e mínimos, a fim de verificar a condutividade hidráulica do material nessas condições.

Os resultados da Tabela 11 mostraram que a permeabilidade do material não tem variação significativa em relação à sua compactidade. Os valores de $k_{20^\circ\text{C}}$ são condizentes com os da permeabilidade de areias grossas, o que condiz com a granulometria do material estudado.

Tabela 11 - Permeabilidade à carga constante do resíduo

Vazios	ρ (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	Wi (%)	Wf (mm)	S (%)	e	$k_{20^\circ\text{C}}$ (cm/s)
Máximo	1,637	1,634	0,206	17,389	64,37	0,79	3,62E+00
Mínimo	1,892	1,888	0,206	12,923	68,88	0,55	8,68E-01

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

4.2 Camada de Base da BR-427/RN

Foram coletadas amostras de três pontos da rodovia BR-427/RN: km 51,16, km 51,60 e km 67,06.

Durante o processo de coleta, foram registradas as espessuras dos revestimentos asfálticos existentes e das camadas de base, a fim de obter as estratigrafias das estruturas dos pavimentos nessas localidades e a espessura em que o material de base deve ser reciclado juntamente com uma espessura de revestimento asfáltico.

As espessuras das camadas citadas estão descritas na Tabela 12:



Tabela 12 - Espessuras dos revestimentos e base

Km	Revestimento (cm)	Base (cm)
51,16	12	15
51,60	14	13
67,06	9	17

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

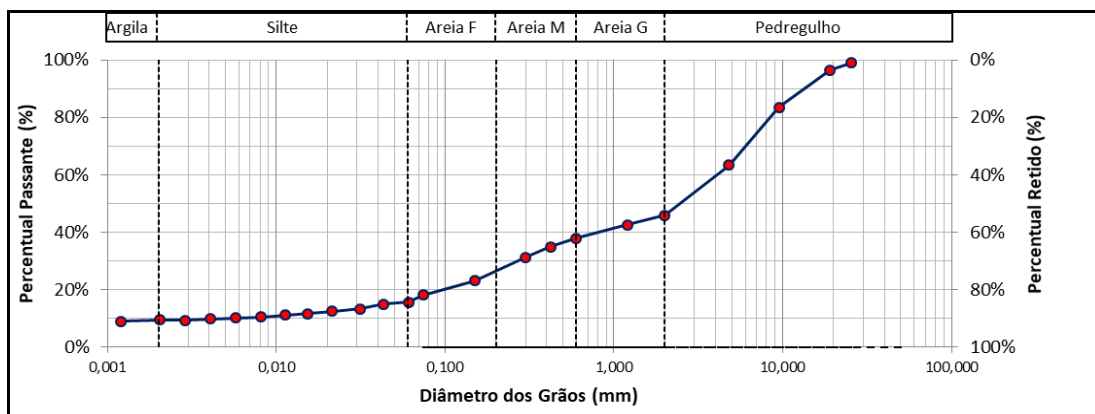
4.2.1 km 51,16

4.2.1.1 Caracterização física

O material de base do km 51,16 apresenta ρ_s de $2,66 \text{ g/cm}^3$ e curva granulométrica conforme a Figura 30, demonstrando predominância da fração pedregulho (54,08%) (Tabela 13). A fração fina representa 18,14% do material, no qual 9,51% é composto pela fração argila.

A granulometria do material não atendeu a nenhuma faixa especificada na norma DNIT 141/2022 – ES.

Figura 30 - Curva granulométrica da base, km 51,16



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)



Tabela 13 - Resumo da granulometria da base, km 51,16

Resumo da Granulometria	
Pedregulho (>2,0mm)	54,08%
Areia Grossa (0,6 - 2mm)	8,03%
Areia Média (0,2 - 0,6mm)	12,08%
Areia Fina (0,06 - 0,2mm)	10,24%
Silte (0,002- 0,06mm)	6,07%
Argila (<0,002mm)	9,51%

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Os valores de CNU de 481,124 e CC de 6,934, nos fornecem a informação que o material possui boa variedade de tamanho dos seus grãos e uma má graduação.

O material apresentou LL de 22%, LP de 17% e IP de 5%. Os valores de LL e IP atendem aos critérios de norma, visto que são preconizados os limites de 25% e 6% para LL e IP, respectivamente (Tabela 14).

Tabela 14 - Índice físicos da base do km 51,16

Material	ρ_s (g/cm ³)	D ₁₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	CNU	CC	LL (%)	LP (%)	IP
Base Km 51,16	2,66	0,005	0,277	2,308	481,124	6,934	22	17	5

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

A Tabela 15 demonstra que o material, de acordo com a classificação SUCS, é classificado como areia silto argilosa (SC - SM). Para o sistema T.R.B, é classificado como A-1-B (pedra britada, pedregulho e areia) com o comportamento de excelente a bom para utilização como subleito.

Tabela 15 - Classificação da base, km 51,16

Material	SUCS	TRB
Base Km 51,16	SC - SM	A-1-B

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

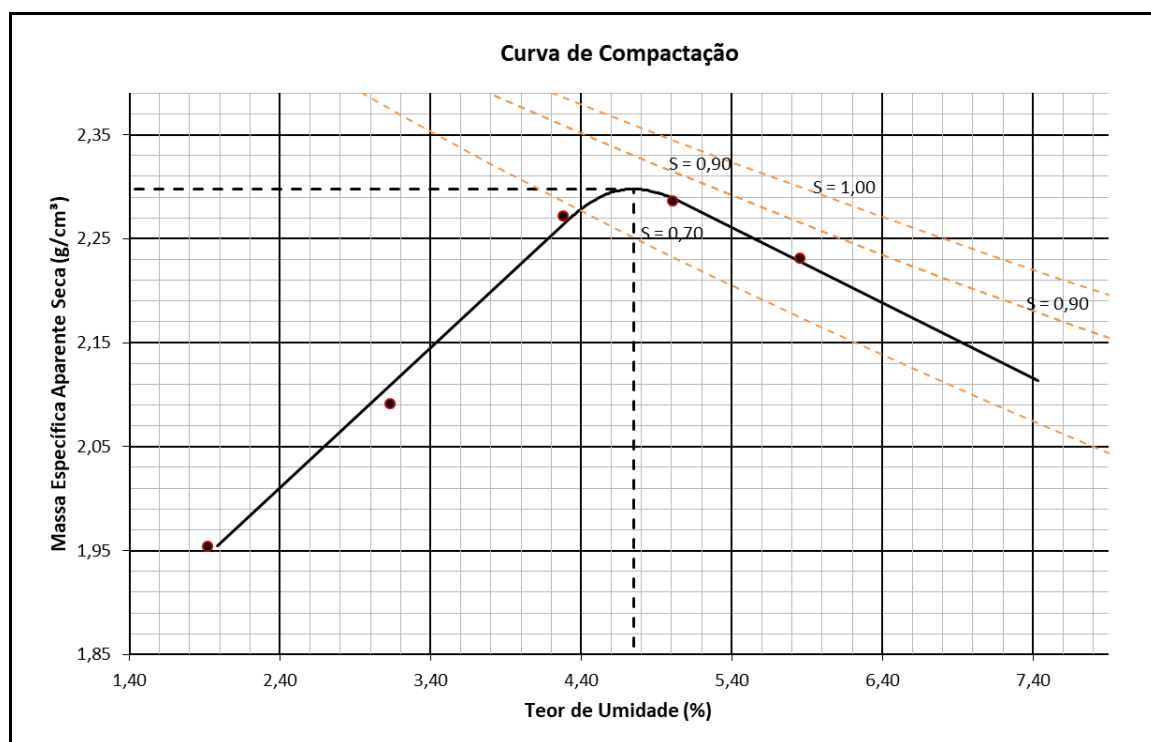


4.2.1.2 Caracterização mecânica

Para o ensaio de compactação Proctor somente foi utilizada a energia modificada, visto que pela norma DNIT 141/2022 – ES, as utilizações de materiais para camada de base só devem ser compactadas com a referida energia.

A curva de compactação obtida para esse material é apresentada na Figura 31.

Figura 31 - Curva de compactação base, km 51,16



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

De acordo com a curva obtida, o material apresentou ρ_d máximo de 2,30 g/cm³ na umidade ótima ($W_{ótimo}$) de 4,75%.

O ensaio de CBR e expansão realizado com o corpo de prova moldado na energia modificada e umidade ótima apresentou os resultados contidos na Tabela 16:



Tabela 16 - CBR e Expansão Base, km 51,16

Ensaio			Amostra de Base
			Km 51,16
Energia Modificada 55 golpes	Compactação	W _{ótima} (%)	4,75
		ρ _d máx (g/cm ³)	2,23
	ISC	CBR (%)	39
		Expansão (%)	0,08

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Os resultados obtidos pelo ensaio de CBR e expansão demonstram que o material de base do km 51,16 não atendeu aos critérios para a sua utilização como esse componente da estrutura do pavimento, por mais que atenda ao critério de expansão ($\text{Expansão} \leq 0,5\%$), visto que o CBR do material possui valor abaixo de 80%, conforme preconizado em norma.

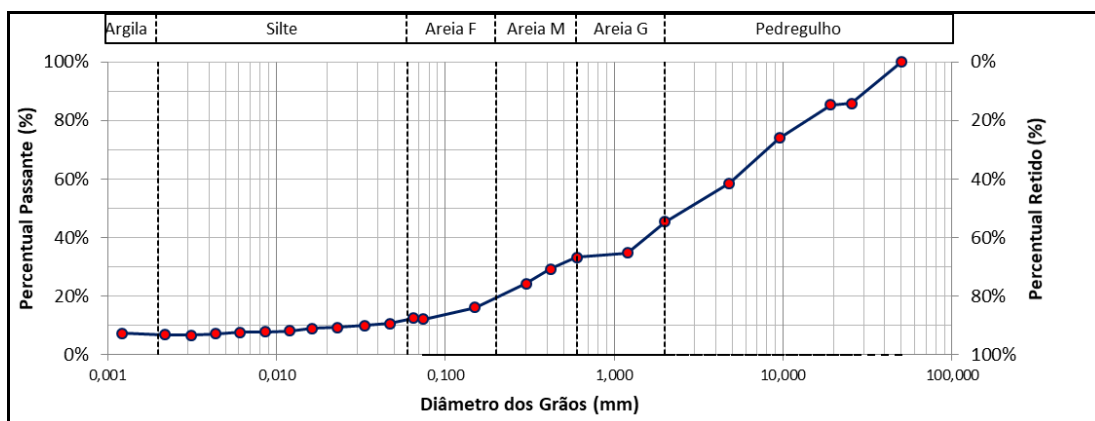
4.2.2 km 51,60

4.2.2.1 Caracterização física

O material de base do km 51,60 apresenta ps de 2,59 g/cm³ e curva granulométrica conforme a Figura 32, demonstrando predominância da fração pedregulho (54,61%) (Tabela 17). A fração fina representa 12,14% do material, no qual 6,89% é composto pela fração argila. A granulometria se mostrou semelhante à do km 51,16, dada a proximidade entre esses pontos

A granulometria do material também não atende a nenhuma faixa especificada na norma DNIT 141/2022 – ES.

Figura 32 - Curva granulométrica base, km 51,60



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)



Tabela 17 - Resumo da granulometria base, km 51,60

Resumo da Granulometria	
Pedregulho (>2,0mm)	54,61%
Areia Grossa (0,6 - 2mm)	12,10%
Areia Média (0,2 - 0,6mm)	14,50%
Areia Fina (0,06 - 0,2mm)	6,81%
Silte (0,002- 0,06mm)	5,09%
Argila (<0,002mm)	6,89%

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Os valores de CNU de 143,975 e CC de 1,190, contidos na Tabela 18, nos fornecem a informação que o material possui boa variedade de tamanho dos seus grãos e é bem graduado.

O material apresentou LL de 22%, LP de 18% e IP de 4%. Os valores de LL e IP atendem aos critérios de norma, visto que são preconizados os limites de 25% e 6% para LL e IP, respectivamente.

Tabela 18 - Índices Físicos base, km 51,60

Material	ρ_s (g/cm ³)	D ₁₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	CNU	CC	LL (%)	LP (%)	IP
Base Km 51,60	2,59	0,034	0,45	4,944	143,975	1,190	22	18	4

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

O material, de acordo com a classificação SUCS, é classificado como areia siltosa (SM). Para o sistema T.R.B, é classificado como A-1-A (pedra britada, pedregulho e areia) com o comportamento de excelente a bom para utilização como subleito (Tabela 19).

Tabela 19 - Classificação base, km 51,60

Material	SUCS	TRB
Base Km 51,60	SM	A-1-a

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

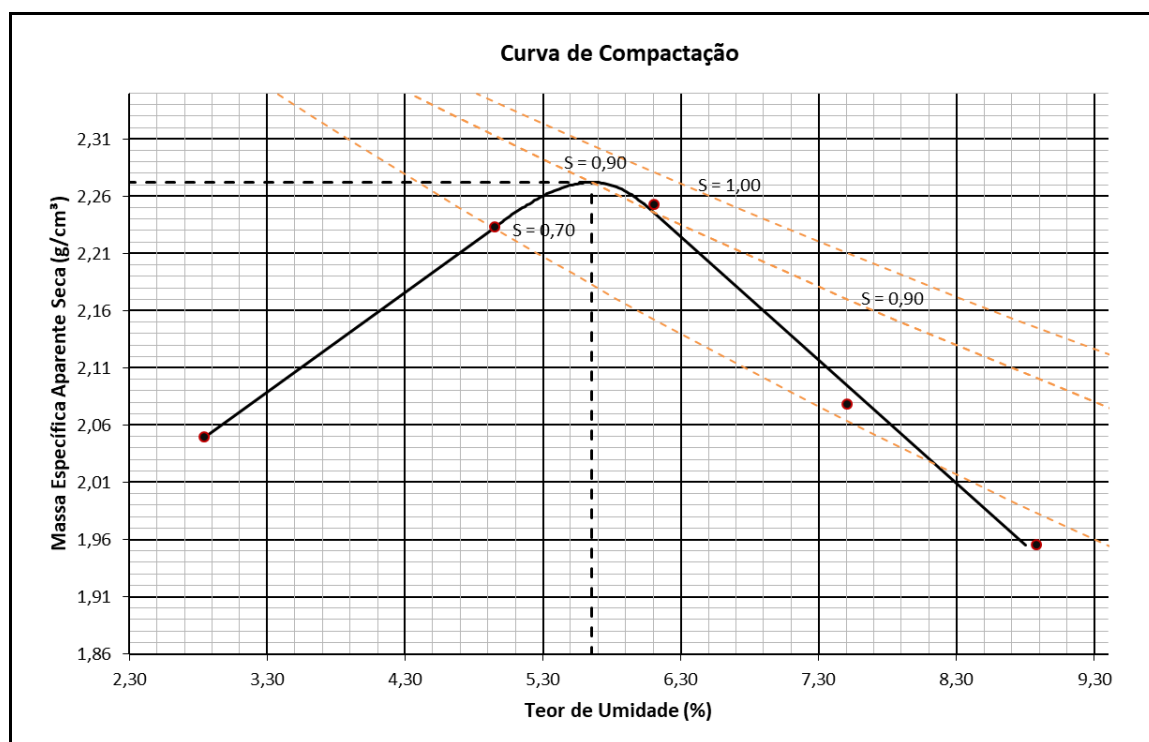


4.2.2.2 Caracterização mecânica

Para o ensaio de compactação Proctor somente foi utilizada a energia modificada, visto que pela norma DNIT 141/2022 – ES, as utilizações de materiais para camada de base só devem ser compactadas com a referida energia.

A curva de compactação obtida para esse material é apresentada na Figura 33.

Figura 33 - Curva de compactação base, km 51,60



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

De acordo com a curva obtida, o material apresentou ρ_d máximo de 2,27 g/cm³ na umidade ótima ($W_{ótimo}$) de 5,62%.

O ensaio de CBR e expansão realizado com o corpo de prova moldado na energia modificada e umidade ótima apresentou os resultados da Tabela 20:



Tabela 20 - CBR e Expansão base, km 51,60

Ensaio			Amostra de Base
			Km 51,60
Energia Modificada 55 golpes	Compactação	W _{ótima} (%)	5,65
		ρ _d máx (g/cm ³)	2,27
	ISC	CBR (%)	48
		Expansão (%)	0,02

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Os resultados obtidos pelo ensaio de CBR e expansão demonstraram que o material de base do km 51,60 também não atendeu aos critérios para a sua utilização como esse componente da estrutura do pavimento, por mais que atenda ao critério de expansão ($\text{Expansão} \leq 0,5\%$), já que o CBR do material possui valor abaixo de 80%.

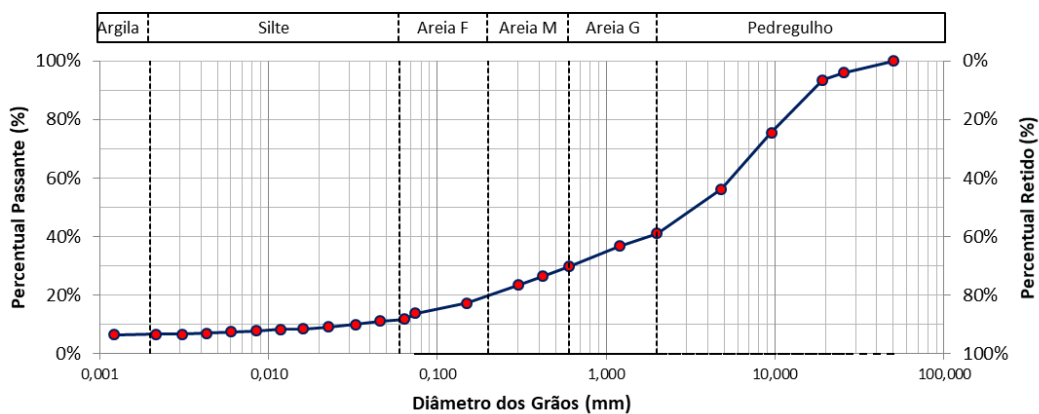
4.2.3 km 67,06

4.2.3.1 Caracterização física

O material de base do km 51,60 apresentou ps de 2,58 g/cm³ e curva granulométrica conforme a Figura 34, demonstrando predominância da fração pedregulho (58,99%) (Tabela 21). A fração fina representa 13,75% do material, no qual 6,65% é composto pela fração argila. A granulometria se mostrou semelhante às do km 51,16 e 51,60, por mais que haja uma distância aproximada de 16 km entre os pontos anteriores.

A granulometria do material, como dos pontos anteriores, também não atende a nenhuma faixa especificada na norma DNIT 141/2022 – ES.

Figura 34 - Curva granulométrica base, km 67,06



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)



Tabela 21 - Resumo granulometria base, km 67,06

Resumo da Granulometria	
Pedregulho (>2,0mm)	58,99%
Areia Grossa (0,6 - 2mm)	11,15%
Areia Média (0,2 - 0,6mm)	10,43%
Areia Fina (0,06 - 0,2mm)	7,78%
Silte (0,002- 0,06mm)	5,00%
Argila (<0,002mm)	6,65%

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Os valores de CNU de 159,143 e CC de 2,25, nos fornecem a informação que o material possui boa variedade de tamanho dos seus grãos e é bem graduado.

O material apresentou LL de 21%, LP de 14% e IP de 7%, conforme demonstrado na Tabela 22. O valor de LL atende ao critério de norma, já o IP não, visto que são preconizados os limites de 25% e 6% para LL e IP, respectivamente. Em função do não atendimento dos parâmetros, deve ser verificado o equivalente de areia desse material.

Tabela 22 - Índices físicos base, km 67,06

Material	ρ_s (g/cm ³)	D ₁₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	CNU	CC	LL (%)	LP (%)	IP
Base Km 67,06	2,58	0,032	0,605	5,091	159,143	2,250	21	14	7

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

O material, de acordo com a classificação SUCS, é classificado como areia argilosa (SC). Para o sistema T.R.B, é classificado como A-2-4 (areia, areia siltosa ou argilosa) com o comportamento de excelente a bom para utilização como subleito (Tabela 23).

Tabela 23 - Classificação base, km 67,06

Material	SUCS	TRB
Base Km 67,06	SC	A-2-4

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

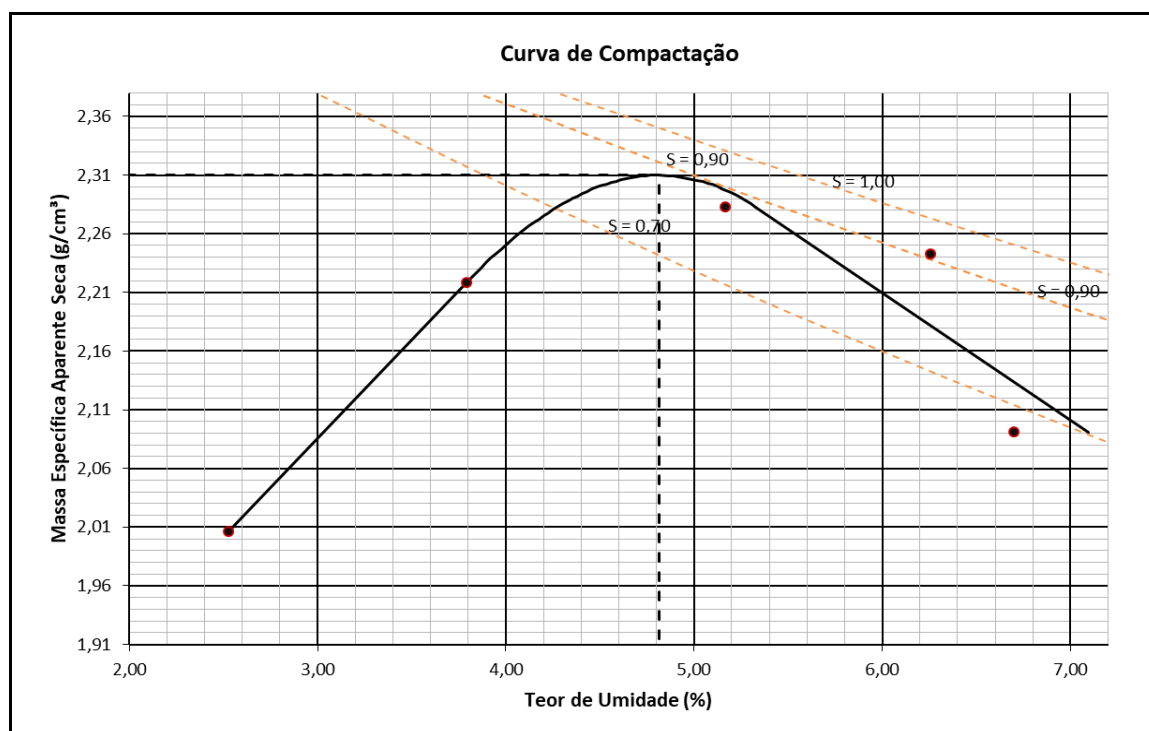


4.2.3.2 Caracterização mecânica

Para o ensaio de compactação Proctor somente foi utilizada a energia modificada, visto que pela norma DNIT 141/2022 – ES, as utilizações de materiais para camada de base só devem ser compactadas com a referida energia.

A curva de compactação obtida para esse material é apresentada na Figura 35.

Figura 35 - Curva de compactação base, km 67,06



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

De acordo com a curva obtida, o material apresentou ρ_d máximo de 2,31 g/cm³ na umidade ótima ($W_{ótimo}$) de 4,81%.

O ensaio de CBR e expansão realizado com o corpo de prova moldado na energia modificada e umidade ótima apresentou os resultados apresentados na Tabela 24:



Tabela 24 - CBR e Expansão base, km 67,06

Ensaio			Amostra de Base
			Km 67,06
Energia Modificada 55 golpes	Compactação	W _{ótima} (%)	4,81
		ρ _d máx (g/cm ³)	2,31
	ISC	CBR (%)	101
		Expansão (%)	0,08

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Os resultados obtidos pelo ensaio de CBR e expansão demonstraram que o material de base do km 67,06 ainda atendeu aos critérios para utilização como camada de base (CBR $\geq$ 80% e Expansão $\leq$ 0,5%), demonstrando que não houve degradação considerável ao longo da sua vida útil e necessidade de melhoramento estrutural desse material.

4.2.4 Tabelas Resumos

Os dados obtidos para os materiais de base foram consolidados em tabelas resumo, conforme Tabela 25 e Tabela 26.

Tabela 25 - Resumo Índices físicos das bases naturais

Material de base	ρ _s (g/cm ³)	D ₁₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	CNU	CC	LL (%)	LP (%)	IP
Base Km 51,16	2,66	0,005	0,277	2,308	481,124	6,934	22	17	5
Base Km 51,60	2,59	0,034	0,45	4,944	143,975	1,190	22	18	4
Base Km 67,06	2,58	0,032	0,605	5,091	159,143	2,250	21	14	7

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Tabela 26 - Resumo CBR e Expansão das bases naturais

Ensaio			Amostra de Base		
			Km 51,16	Km 51,60	Km 67,06
Energia Modificada 55 golpes	Compactação	W _{ótima} (%)	4,75	5,65	4,81
		ρ _d máx (g/cm ³)	2,30	2,27	2,31
	ISC	CBR (%)	39	48	101
		Expansão (%)	0,08	0,02	0,08

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)



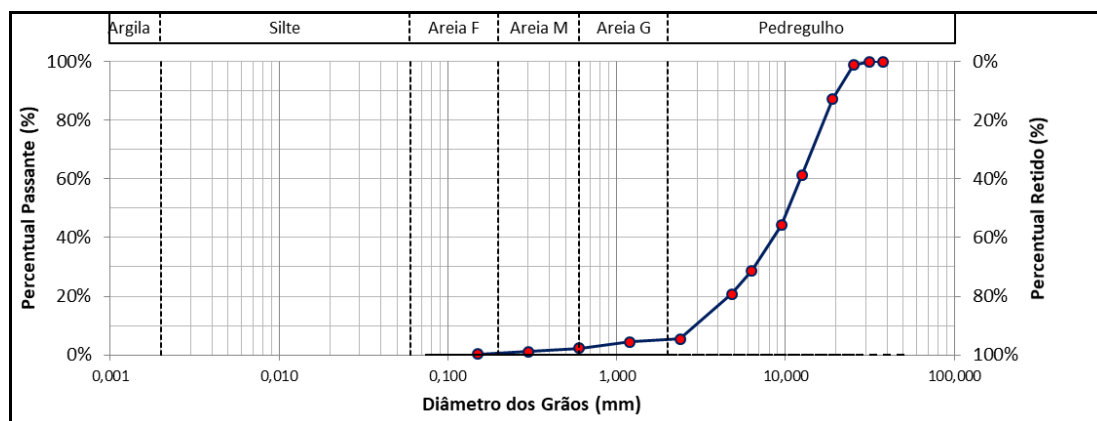
4.3 Revestimento asfáltico, Britas.

Foram caracterizados os outros materiais que compõem as misturas recicladas, com a finalidade de estimar a granulometria a ser obtida das misturas com a adição desses materiais. Como também, verificar o atendimento de norma da abrasividade das britas utilizadas.

4.3.1 Revestimento asfáltico

A granulometria do revestimento asfáltico (fresado) possui a granulometria apresentada na Figura 36. O material apresentou uma granulometria predominantemente composta por pedregulho.

Figura 36 - Curva granulométrica do revestimento asfáltico



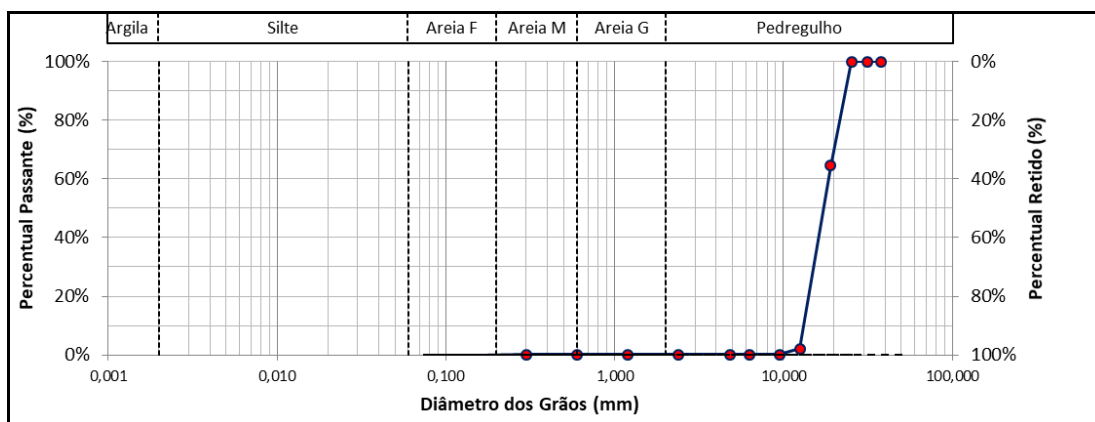
Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

4.3.2 Britas

Foram realizados ensaios de granulometria para as britas de 19 mm, 16 mm e 12,5 mm, que estão demonstradas nas Figura 37, Figura 38, Figura 39, respectivamente.

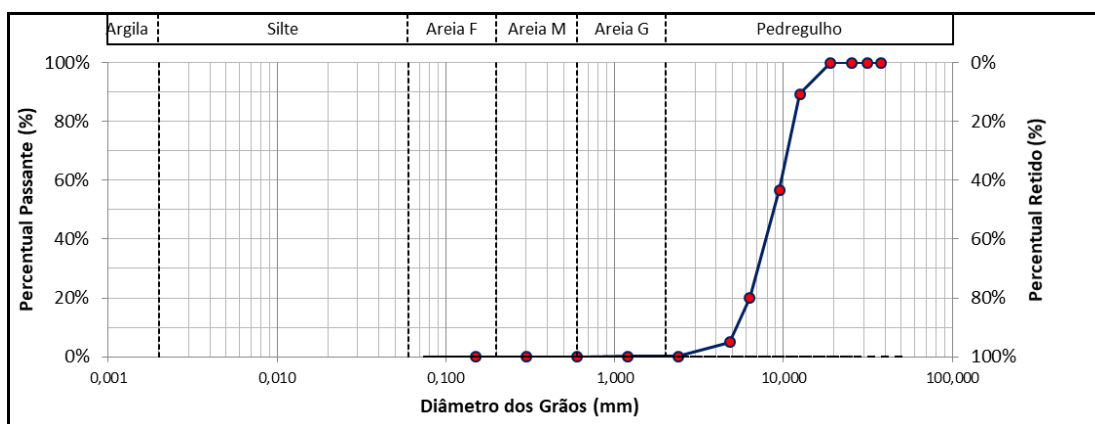


Figura 37 - Curva granulométrica brita 19 mm



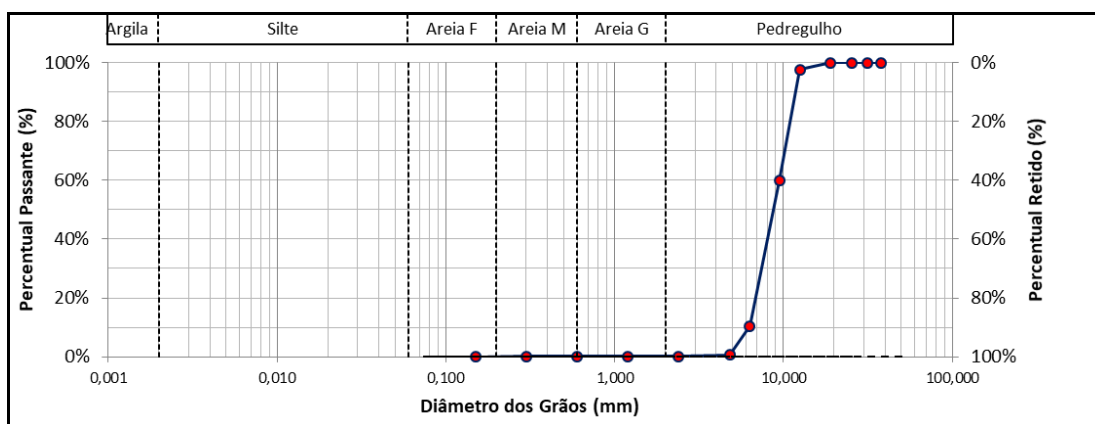
Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Figura 38 Curva granulométrica brita 16 mm



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Figura 39 Curva granulométrica Brita 12,5 mm



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)



Foram determinadas as densidades aparente seca (ρ_s), aparente saturada superfície seca (ρ_{sss}) e a real seca (ρ_{sa}), como também a porcentagem de absorção de água do material (Abs) e os índices de forma.

O ensaio de Abrasão Los Angeles foi realizado para avaliar se as britas atende ao critério de abrasividade requerido em norma, no qual é solicitado um valor inferior a 55%. Os resultados estão contidos nas Tabela 27 e Tabela 28.

Tabela 27 - Índices de forma das britas

	Brita 19,00 mm	Brita 16,00 mm	Brita 12,50 mm
Cmédio (mm)	29,4	19,5	16,9
Emédio (mm)	12,3	7,6	7,1
Índice de Forma	2,2	2,6	2,4

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Tabela 28 - Índices físicos e abrasão LA das britas

Material	ρ_s (g/cm ³)	ρ_{sss} (g/cm ³)	ρ_{sa} (g/cm ³)	Abs (%)	Abrasão LOS ANGELES (%)
Brita	2,562	2,630	2,749	2,66%	39,47%

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

O resultado de 39,47% confirma que as britas estavam conformes para utilização nas misturas recicladas.

4.4 Misturas recicladas

Com os resultados dos materiais de bases, foi determinado que os projetos de misturas seriam iniciados com o material do km 56,16 visto que apresentou menor capacidade de suporte e que o do km 67,06 não necessitaria de melhoramento, pois já atendia aos critérios de norma.

Foi iniciada a mistura reciclada do km 51,16 com o material da base, adição de revestimento asfáltico e britas, conforme procedimento usualmente realizado para esse



serviço. Para todas as misturas foram adicionados 50% de peso de revestimento, que equivale a aproximadamente 6 cm da capa asfáltica presente no local, a fim de atingir 20 cm de reciclagem. A porcentagem variável foi a de brita, que se iniciou com 15%, e posteriormente executados traços com adição de 20%, 25% e 40%. A motivação da adição de brita alternar de 25% a 40%, veio do não atendimento do I.S.C com 25% e pouca variação de resistência entre a proporção de 15% e 20%. A brita utilizada na dosagem de 40% foi a de 16 mm, devido ao melhor enquadramento da mistura dentro da Faixa “C” do DNIT.

Posteriormente, foi iniciada a dosagem com a adição de brita e do resíduo, inicialmente com 15% de brita 19 e 15% de resíduo, com o intuito de avaliar a influência desse novo material na resistência mecânica da mistura. Após a constatação do incremento de resistência, porém ainda não suficiente para atender a norma, foi executado o traço com adição da mesma proporção de brita e 20% do resíduo.

Para o km 51,60, o traço da reciclagem somente com adição de brita foi iniciado já com adição de 40%, visto que essa proporção ainda não foi suficiente para atingir um I.S.C de 80% no material do km 51,16.

Também foram realizados os mesmos traços com a adição de brita 19 mm e resíduo do km 51,16.

As misturas foram nomeadas conforme o percentual de peso dos demais insumos adicionados ao peso do material da camada de base natural (**B+%R+%B_{19ou16}+%S**). As siglas de cada material seguem descritas assim:

- B – Material da Base natural;
- R – Revestimento asfáltico reciclado;
- B₁₉ e B₁₆ – Brita de 19 mm e 16 mm, respectivamente;
- S – Resíduo da Scheelita

4.4.1 Misturas km 51,16

Os resultados das misturas realizadas com o material de base do km 51,16 se encontram apresentados nos tópicos a seguir.



Tabela 30 - Índices físicos B+50%R+15%B₁₉, km 51,16

Mistura Km 51,16	ρ_s (g/cm ³)	D ₁₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	CNU	CC	LL (%)	LP (%)	IP
B+50%R+15%B ₁₉	2,59	0,074	1,943	6,004	81,448	8,531	22	17	5

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Conforme a Tabela 31, O material de acordo com a classificação SUCS, é classificado como pedregulho mal graduado com argila siltosa (SP - SC). Para o sistema T.R.B, é classificado como A-1-a (pedra britada, pedregulho e areia) com o comportamento de excelente a bom para utilização como subleito.

Tabela 31 - Classificação B+50%R+15%B₁₉, km 51,16

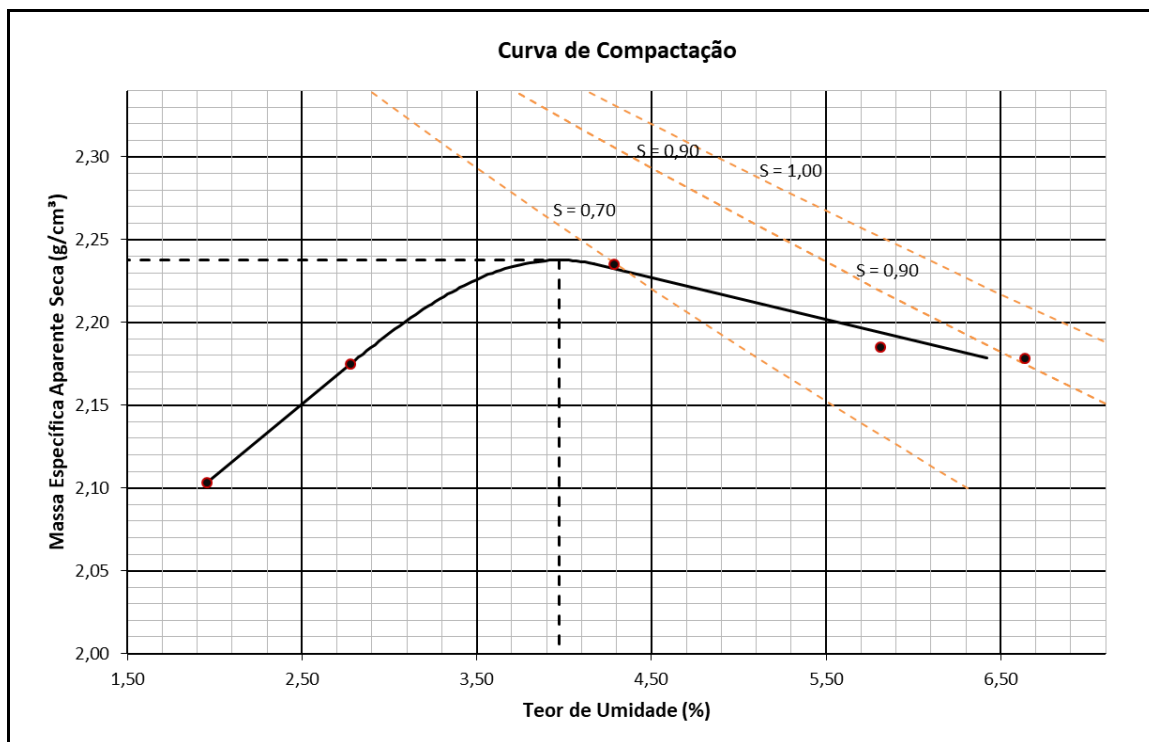
Mistura Km 51,16	SUCS	TRB
B+50%R+15%B ₁₉	GP - GC	A-1-a

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Para o ensaio de compactação Proctor, com energia modificada, a curva de compactação apresentou a seguinte configuração, conforme Figura 41.



Figura 41 - Curva de compactação B+50%R+15%B₁₉, km 51,16



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

De acordo com a curva obtida, o material apresentou ρ_d máximo de 2,24 g/cm³ na umidade ótima ($W_{ótima}$) de 3,97%.

O ensaio de CBR e expansão realizado com o corpo de prova moldado na energia modificada e umidade ótima apresentou os resultados da Tabela 32:

Tabela 32 - CBR e Expansão B+50%R+15%B₁₉, km 51,16

Ensaio			Mistura Km 51,16
			B+50%R+15%B ₁₉
Energia Modificada 55 golpes	Compactação	$W_{ótima}$ (%)	3,97
		ρ_d máx (g/cm³)	2,24
	ISC	CBR (%)	58
		Expansão (%)	0,04

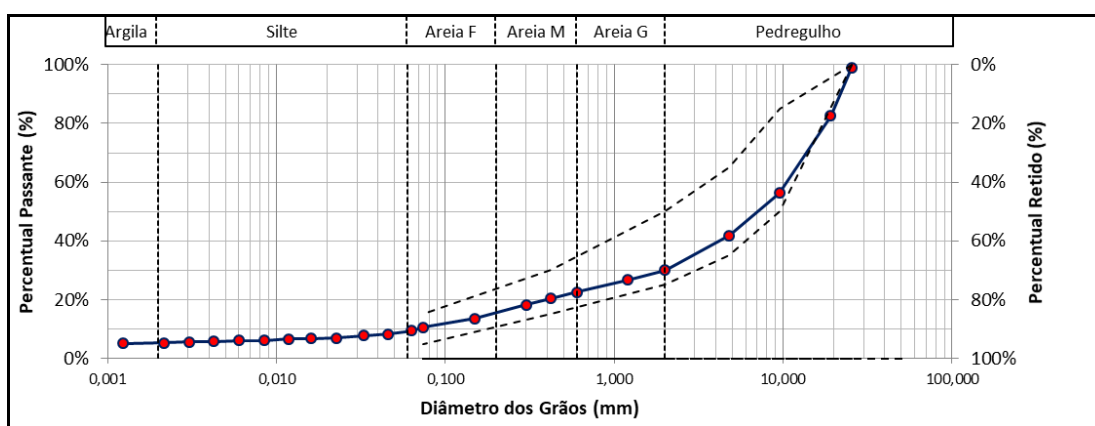
Fonte: Elaborado pelo autor (2026)



Os resultados obtidos pelo ensaio de CBR e expansão demonstraram que a mistura com adição 50% de revestimento e 15% de brita 19 garantiu uma melhora da capacidade de suporte e diminuição da expansão em relação ao material da base dessa localidade. No entanto esse incremento não foi suficiente para atendimento ao valor de CBR preconizado.

Para a mistura com material da **Base + 50 % de Revestimento + 20% de Brita 19 (B+50%R+20%B₁₉)**, foi obtida a curva granulométrica conforme a Figura 42.

Figura 42 - Curva granulométrica B+50%R+20%B₁₉, km 51,16



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Tabela 33 - Resumo granulometria B+50%R+20%B₁₉, km 51,16

Resumo da Granulometria	
Pedregulho (>2,0mm)	70,02%
Areia Grossa (0,6 - 2mm)	7,48%
Areia Média (0,2 - 0,6mm)	7,41%
Areia Fina (0,06 - 0,2mm)	5,84%
Silte (0,002- 0,06mm)	3,96%
Argila (<0,002mm)	5,29%

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

A mistura apresentou granulometria predominantemente pedregulhosa (70,02%), com material passante na peneira #200 de 10,65%, no qual 5,29% é composto por argila (Tabela 33). O material se enquadrou dentro da Faixa “C” especificada pelo DNIT. Os demais parâmetros de CNU de 145,77 e CC de 5,93, mostram que a granulometria do material não é uniforme e há uma má graduação dos seus grãos.



A mistura apresentou LL de 22%, LP de 18% e IP de 4% (Tabela 34). Os valores de LL e IP atendem aos critérios de norma. Também foi constatado uma diminuição desses valores em relação a mistura **B+50%R+15%B₁₉**, o que diminuiu mais a plasticidade do material.

Tabela 34 - Índices físicos B+50%R+20%B₁₉, km 51,16

Mistura Km 51,16	ρ_s (g/cm ³)	D ₁₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	CNU	CC	LL (%)	LP (%)	IP
B+50%R+20%B ₁₉	2,57	0,068	2,001	9,92	145,768	5,929	22	18	4

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

A mistura, de acordo com a classificação SUCS, é classificado como pedregulho mal graduado siltoso (GP - GM). Para o sistema T.R.B, é classificado como A-1-a (pedra britada, pedregulho e areia) com o comportamento de excelente a bom para utilização como subleito (Tabela 35).

Tabela 35 - Classificação B+50%R+20%B₁₉, km 51,16

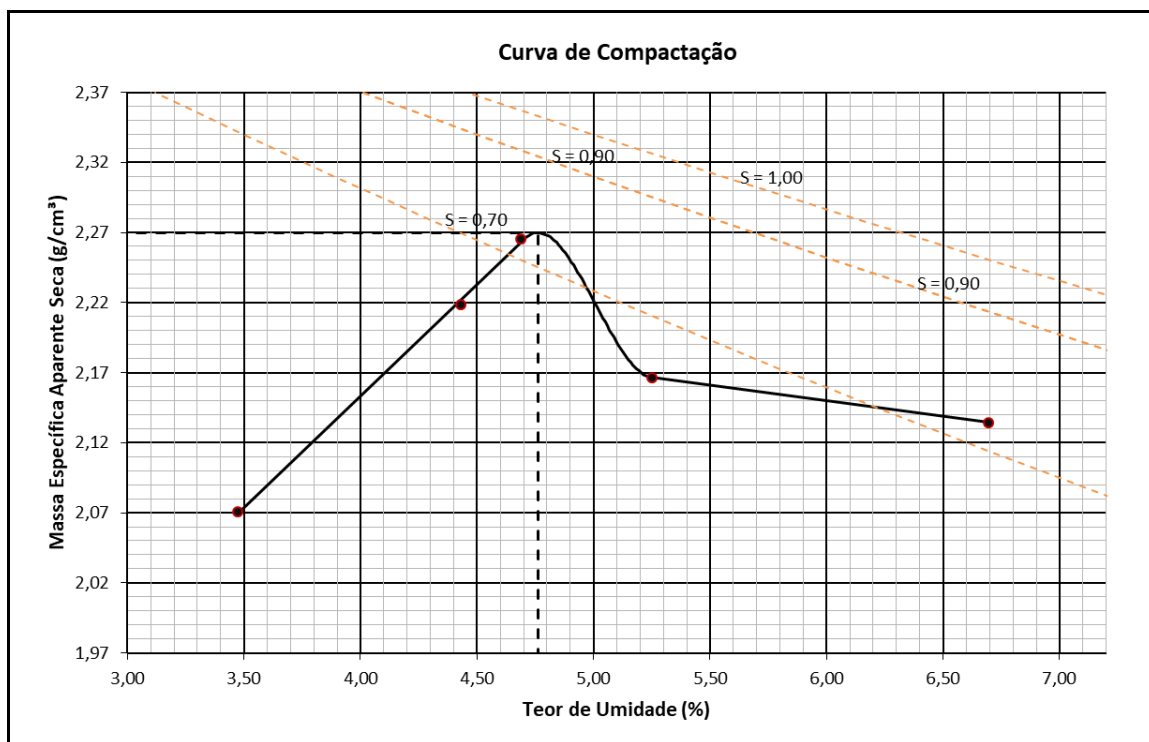
Mistura Km 51,16	SUCS	TRB
B+50%R+20%B ₁₉	GP - GM	A-1-a

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Para o ensaio de compactação Proctor, com energia modificada, a curva de compactação apresentou a seguinte configuração, conforme Figura 43.



Figura 43 - Curva de compactação B+50%R+20%B₁₉, km 51,16



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

De acordo com a curva obtida, o material apresentou ρ_d máximo de 2,27 g/cm³ na umidade ótima ($W_{ótima}$) de 4,76%.

O ensaio de CBR e expansão realizado com o corpo de prova moldado na energia modificada e umidade ótima apresentou os resultados da Tabela 36:

Tabela 36 - CBR e Expansão B+50%R+20%B₁₉, km 51,16

Ensaio			Mistura Km 51,16
			B+50%R+20%B ₁₉
Energia Modificada 55 golpes	Compactação	$W_{ótima}$ (%)	4,76
		ρ_d máx (g/cm ³)	2,27
	ISC	CBR (%)	56
		Expansão (%)	0,01

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

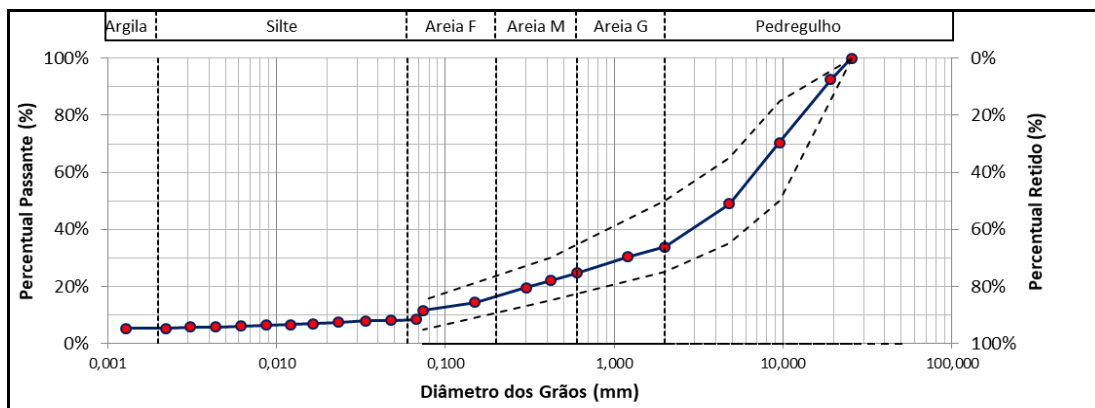
Os resultados obtidos pelo ensaio de CBR e expansão demonstraram que a mistura com adição 50% de revestimento e 20% de brita 19 não garantiu uma melhora da capacidade



de suporte em relação a mistura de **B+50%R+15%B₁₉** dessa localidade. Foi constatada uma diminuição da expansão, mas o material ainda não atendeu valor de CBR de norma.

Em relação à mistura com material da **Base + 50 % de Revestimento + 25% de Brita 19 (B+20%R+25%B₁₉)**, a granulometria do material é demonstrada na Figura 44.

Figura 44 - Curva granulométrica B+50%R+25%B₁₉, km 51,16



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Tabela 37 - Resumo granulometria B+50%R+25%B₁₉, km 51,16

Resumo da Granulometria	
Pedregulho (>2,0mm)	66,11%
Areia Grossa (0,6 - 2mm)	9,16%
Areia Média (0,2 - 0,6mm)	8,57%
Areia Fina (0,06 - 0,2mm)	7,94%
Silte (0,002- 0,06mm)	3,01%
Argila (<0,002mm)	5,21%

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

A mistura apresentou granulometria predominantemente pedregulhosa (66,11%), com material passante na peneira #200 de 11,49%, no qual 5,21% é composto por argila (Tabela 37). O material se enquadrou dentro da Faixa “C” especificada pelo DNIT. Os demais parâmetros de CNU de 78,764 e CC de 1,765, mostram que a granulometria do material não é uniforme e há uma boa graduação dos seus grãos.

Conforme valores da Tabela 38, a mistura apresentou LL de 23%, LP de 18% e IP de 5%. Os valores de LL e IP atendem aos critérios preconizados da norma.



Tabela 38 - Índices Físicos B+50%R+25%B₁₉, km 51,16

Mistura Km 51,16	ρ_s (g/cm ³)	D ₁₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	CNU	CC	LL (%)	LP (%)	IP
B+50%R+25%B ₁₉	2,54	0,071	0,834	5,572	78,764	1,765	23	18	5

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

O material, de acordo com a classificação SUCS, é classificado como pedregulho bem graduado com argila siltosa (GW - GC). Para o sistema T.R.B, é classificado como A-1-a (pedra britada, pedregulho e areia) com o comportamento de excelente a bom para utilização como subleito (Tabela 39).

Tabela 39 - Classificação B+50%R+25%B₁₉, km 51,16

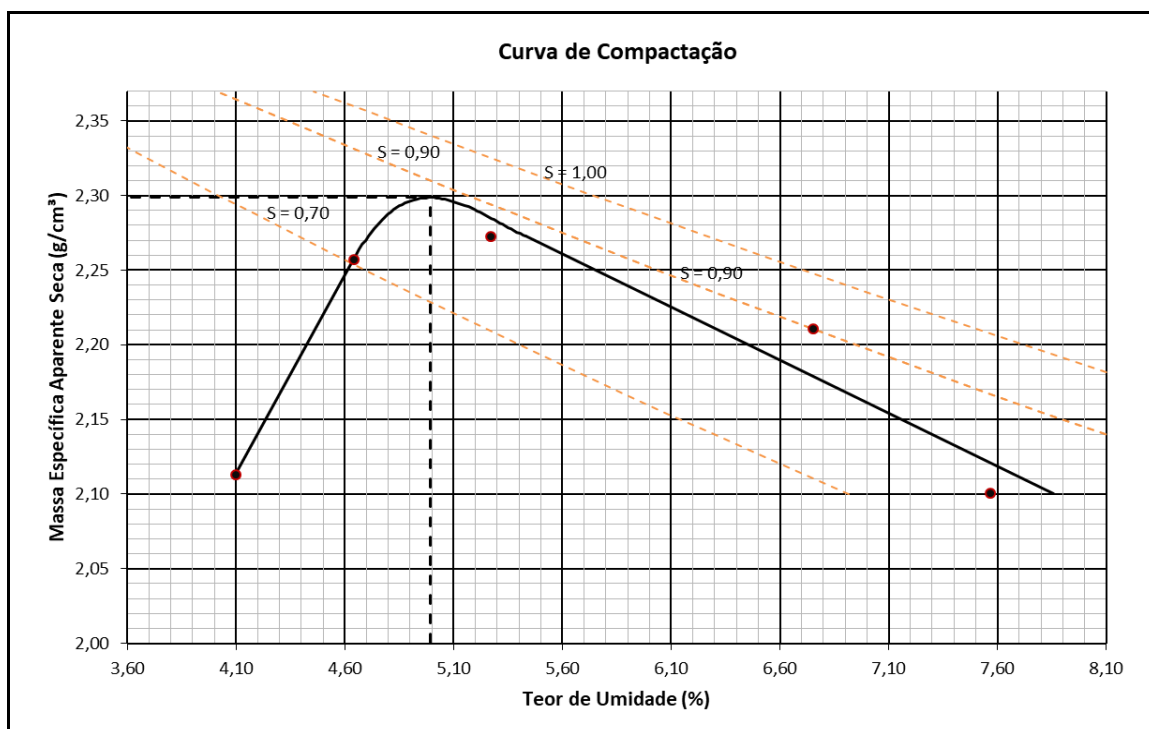
Mistura Km 51,16	SUCS	TRB
B+50%R+25%B ₁₉	GW - GC	A-1-a

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Para o ensaio de compactação Proctor, com energia modificada, a curva de compactação apresentou a seguinte configuração, conforme Figura 45.



Figura 45 - Curva de compactação B+50%R+25%B₁₉, km 51,16



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

De acordo com a curva obtida, o material apresentou ρ_d máximo de 2,30 g/cm³ na umidade ótima ($W_{ótima}$) de 4,99%.

O ensaio de CBR e expansão realizado com o corpo de prova moldado na energia modificada e umidade ótima apresentou os resultados da Tabela 40:

Tabela 40 - CBR e Expansão B+50%R+25%B₁₉, km 51,16

Ensaio			Mistura Km 51,16
			B+50%R+25%B ₁₉
Energia Modificada 55 golpes	Compactação	$W_{ótima}$ (%)	4,99
		ρ_d máx (g/cm ³)	2,30
	ISC	CBR (%)	67
		Expansão (%)	0,00

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

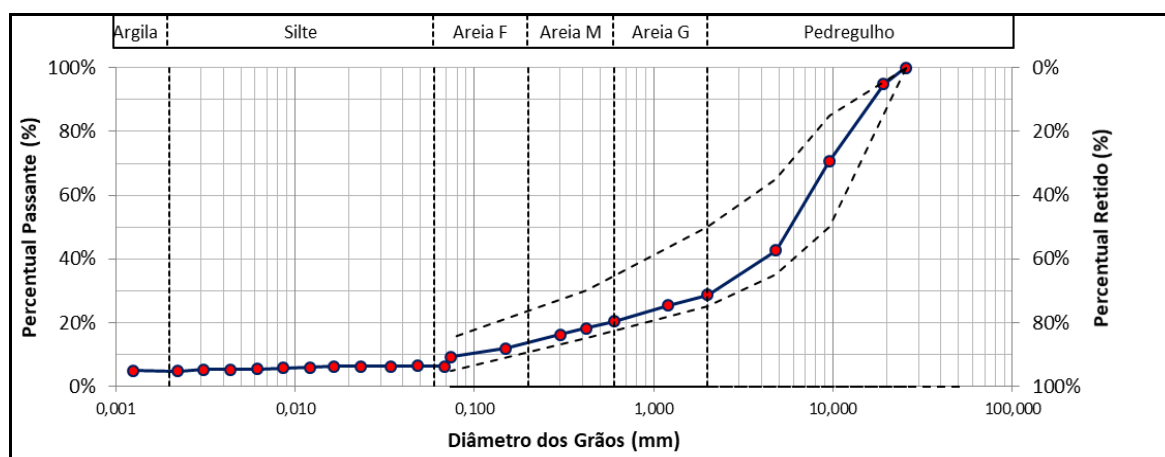
Os resultados obtidos pelo ensaio de CBR e expansão demonstraram que a mistura com adição 50% de revestimento e 25% de brita 19 garantiu uma melhora da capacidade de suporte e anulou a expansão em relação ao material de base. Apesar da melhoria da



capacidade de suporte e ausência de expansão, a mistura ainda não atendeu ao parâmetro de resistência de norma.

Para a mistura de **Base + 50 % de Revestimento + 40% Brita 16 (B+50%R+40%B₁₆)**, a granulometria do material apresentou composição conforme Figura 46.

Figura 46 - Curva granulométrica B+50%R+40%B₁₆, km 51,16



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Tabela 41 - Resumo granulometria B+50%R+40%B₁₆, km 51,16

Resumo da Granulometria	
Pedregulho (>2,0mm)	71,24%
Areia Grossa (0,6 - 2mm)	8,33%
Areia Média (0,2 - 0,6mm)	7,08%
Areia Fina (0,06 - 0,2mm)	7,00%
Silte (0,002- 0,06mm)	1,52%
Argila (<0,002mm)	4,83%

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

De acordo com os valores da Tabela 41, a mistura apresentou granulometria predominantemente pedregulhosa (71,24%), com material passante na peneira #200 de 9,26%, no qual 4,83% é composto por argila. O material se enquadrou dentro da Faixa “C” especificada pelo DNIT. Os demais parâmetros de CNU de 67,11 e CC de 8,45, mostra que a granulometria do material não é uniforme e há uma má graduação dos seus grãos.



A mistura apresentou LL de 23%, LP de 17% e IP de 6%. Os valores de LL e IP também atendem aos critérios de norma (Tabela 42).

Tabela 42 - Índices físicos B+50%R+40%B₁₆, km 51,16

Mistura Km 51,16	ρ_s (g/cm ³)	D ₁₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	CNU	CC	LL (%)	LP (%)	IP
B+50%R+40%B ₁₆	2,53	0,085	2,034	5,731	67,111	8,451	23	17	6

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

De acordo com o apresentado na Tabela 43, o material de acordo com a classificação SUCS, é classificado como pedregulho mal graduado com argila siltosa (GP - GC). Para o sistema T.R.B, é classificado como A-1-a (pedra britada, pedregulho e areia) com o comportamento de excelente a bom para utilização como subleito.

Tabela 43 - Classificação B+50%R+40%B₁₆, km 51,16

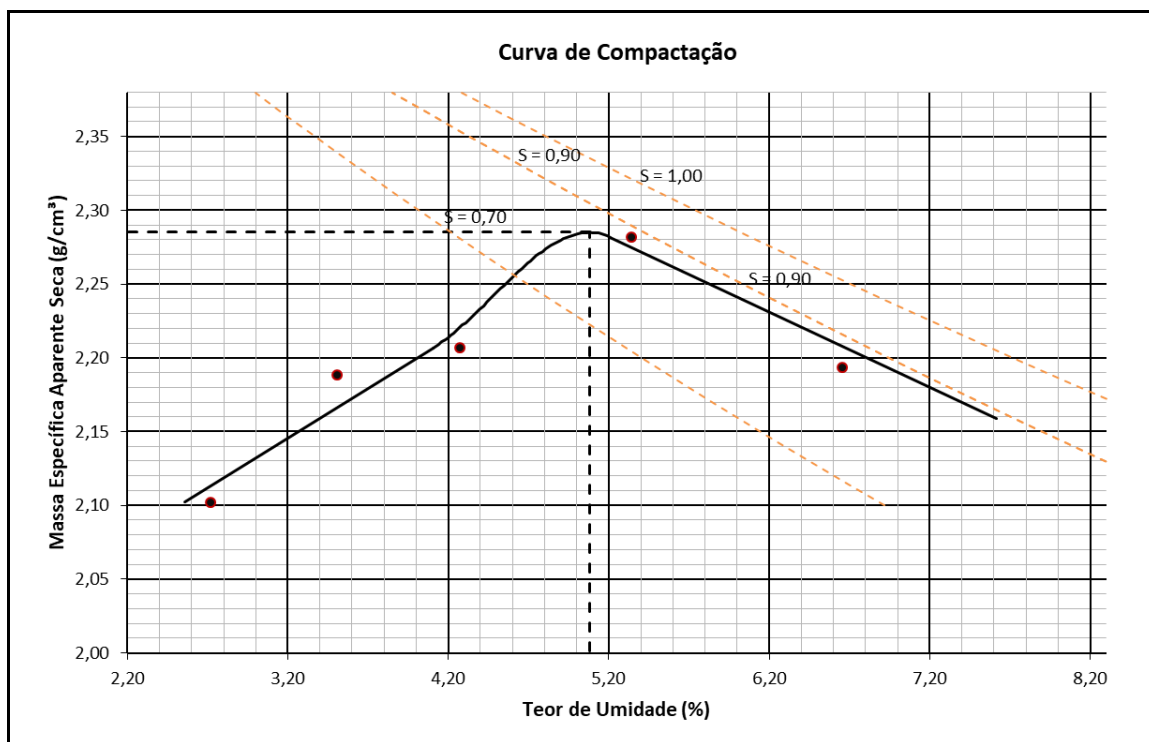
Mistura Km 51,16	SUCS	TRB
B+50%R+40%B ₁₆	GP - GC	A-1-a

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Para o ensaio de compactação Proctor, com energia modificada, a curva de compactação apresentou a seguinte configuração, conforme Figura 47.



Figura 47 - Curva de compactação B+40%R+40%B₁₆, km 51,16



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

De acordo com a curva obtida, o material apresentou ρ_d máximo de 2,29 g/cm³ na umidade ótima ($W_{ótima}$) de 5,08%.

O ensaio de CBR e expansão realizado com o corpo de prova moldado na energia modificada e umidade ótima apresentou os seguintes resultados, contidos na Tabela 44:

Tabela 44 - CBR e Expansão B+50%R+40%B₁₆, km 51,16

Ensaio			Mistura Km 51,16
			B+50%R+40%B ₁₆
Energia Modificada 55 golpes	Compactação	$W_{ótima}$ (%)	5,08
		ρ_d máx (g/cm ³)	2,29
	ISC	CBR (%)	75
		Expansão (%)	0,02

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Os resultados obtidos pelo ensaio de CBR e expansão demonstram que a mistura com adição 50% de revestimento e 40% de brita 16 obteve mais uma melhora da capacidade de suporte em função do acréscimo de mais britas. Ocorreu expansão do material, mas com valor discreto e dentro do preconizado. Novamente o acréscimo de brita na mistura



proporcionou um incremento na capacidade de suporte da mistura, chegando ao valor próximo de 80%, conforme normatizado, mas ainda não foi possível atingi-lo.

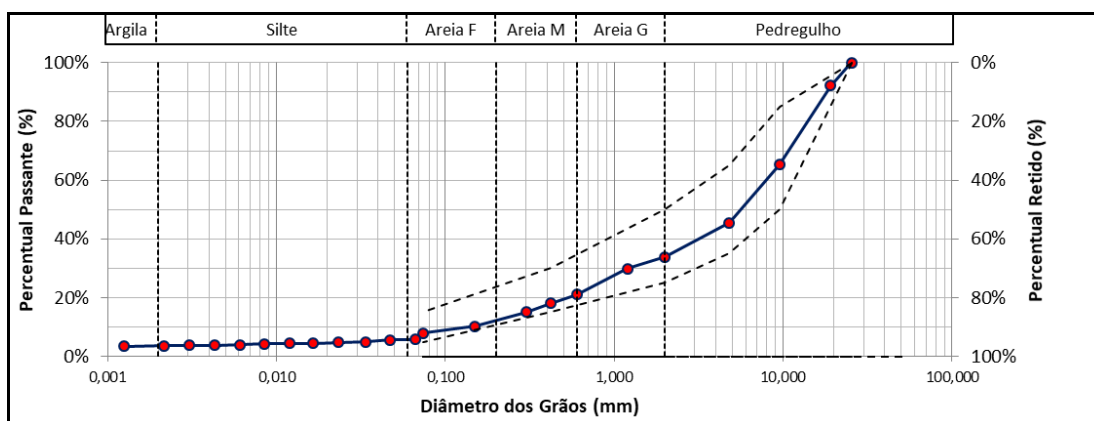
Não foi realizado traços com mais acréscimo de britas, visto que a adição de 40% de agregado pétreo já representa um traço com bastante incorporação de material, o que acarreta na oneração do serviço de reciclagem de base, em função do aumento do desgaste dos bits da recicladora, como também no aumento da espessura em que o próprio equipamento operaria considerando as espessuras da base natural, revestimento asfáltico e a brita adicionada. Deve-se avaliar outras formas de estabilização como a reciclagem de base com adição de cimento Portland, emulsão asfáltica ou espuma de asfalto. Com isso, a mistura M1, para o km 51,16, será composta por **B+50%R+40%B₁₆**.

4.4.1.2 Base + 50% Revestimento + 15% Britas + % Resíduo (B+%50R+15%B₁₉+%S)

O projeto da mistura com a adição de uma porcentagem do resíduo iniciou como parâmetro de referência a mistura de **B+50%R+15B₁₉**. Primeiramente, foi incrementada uma quantidade de 15% de resíduo a essa mistura base com o intuito de avaliar a influência desse material no comportamento do produto final. Com isso, foi obtida a mistura **Base + 50% Revestimento + 15% Brita 19 + 15% Resíduo (B+50%R+15B₁₉+15%S)**.

A granulometria da mistura **B+50%R+15B₁₉+15%S** apresentou distribuição conforme Figura 48.

Figura 48 - Curva granulométrica B+50%R+15%B₁₉+15%S, km 51,16



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)



Tabela 45 - Resumo granulometria B+50%R+15%B₁₉+15%S, km 51,16

Resumo da Granulometria	
Pedregulho (>2,0mm)	66,07%
Areia Grossa (0,6 - 2mm)	12,81%
Areia Média (0,2 - 0,6mm)	9,31%
Areia Fina (0,06 - 0,2mm)	6,09%
Silte (0,002- 0,06mm)	2,17%
Argila (<0,002mm)	3,55%

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

A mistura apresentou granulometria predominantemente pedregulhosa (66,07%), com material passante na peneira #200 de 7,86%, no qual 3,55% é composto por argila (Tabela 45). O material se enquadrou dentro da Faixa “C” especificada pelo DNIT. Os demais parâmetros de CNU de 52,63 e CC de 2,23, mostra que a granulometria do material não é uniforme e há uma boa graduação dos seus grãos.

Conforme dados da Tabela 46, a mistura apresentou LL de 20%, LP de 18% e IP de 2%. Os valores de LL e IP atendem aos critérios de norma. O acréscimo do resíduo proporcionou uma redução da plasticidade do material em comparação ao material de base e das misturas com somente acréscimo de britas.

Tabela 46 - Índices físicos B+50%R+15%B₁₉+15%S, km 51,16

Mistura Km 51,16	ρ_s (g/cm ³)	D ₁₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	CNU	CC	LL (%)	LP (%)	IP
B+50%R+15%B ₁₉ +15%S	2,66	0,112	1,219	5,895	52,643	2,249	20	18	2

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

O material, de acordo com a classificação SUCS, é classificado como pedregulho bem graduado siltoso (GW - GM). Para o sistema T.R.B, é classificado como A-1-a (pedra britada, pedregulho e areia) com o comportamento de excelente a bom para utilização como subleito (Tabela 47).



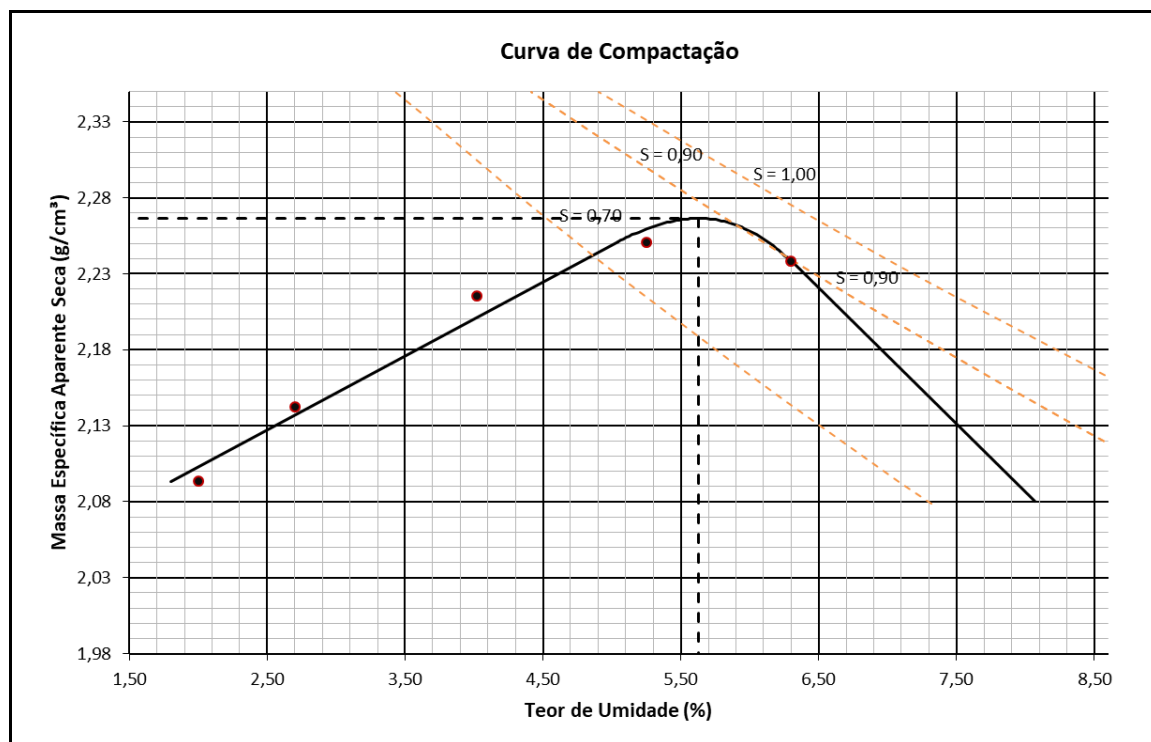
Tabela 47 - Classificação B+50%R+15%B₁₉+15%S, km 51,16

Mistura Km 51,16	SUCS	TRB
B+50%R+15%B ₁₉ +15%S	GW - GM	A-1-a

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Para o ensaio de compactação Proctor, com energia modificada, a curva de compactação apresentou a seguinte configuração, conforme Figura 49.

Figura 49 - Curva de compactação B+50%R+15%B₁₉+15%S, km 51,16



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

De acordo com a curva obtida, o material apresentou ρ_d máximo de $2,27 \text{ g}/\text{cm}^3$ na umidade ótima ($W_{\text{ótimo}}$) de 5,63%.

O ensaio de CBR e expansão realizado com o corpo de prova moldado na energia modificada e umidade ótima apresentou os resultados da Tabela 48:



Tabela 48 - CBR e Expansão B+50%R+15%B₁₉+15%S, km 51,16

Ensaio			Mistura Km 51,16
			B+50%R+15%B ₁₉ +15%S
Energia Modificada 55 golpes	Compactação	W _{ótima} (%)	5,63
		ρ _d máx (g/cm ³)	2,27
	ISC	CBR (%)	78
		Expansão (%)	0,00

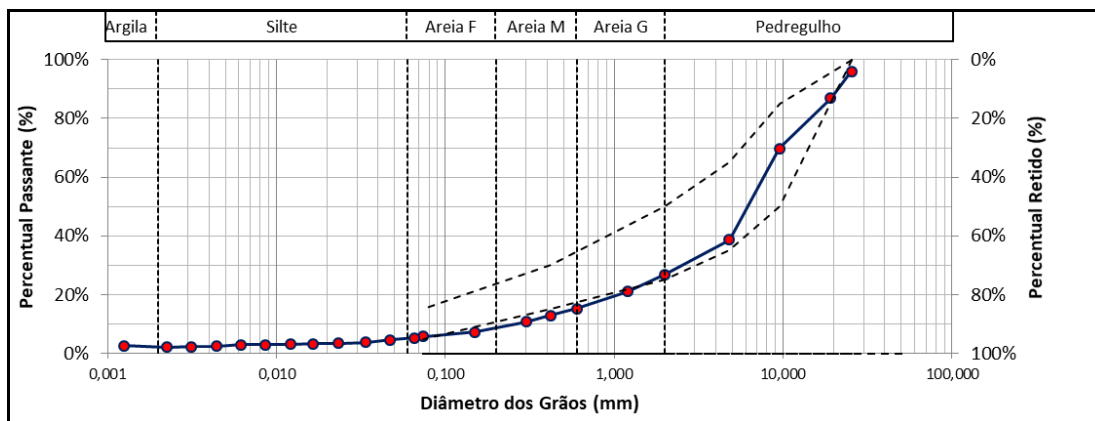
Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Os resultados obtidos pelo ensaio de CBR e expansão demonstraram que a adição de 15% de Resíduo à mistura **B+50%R+15%B₁₉** proporcionou um grande incremento da capacidade do suporte, aumentando de 58% para 78%, além de anular totalmente a expansão. A Mistura **B+50%R+15%B₁₉+15%S** obteve resultados melhores do que **B+50%R+40%B₁₆**, apesar de possuir menos adição de material ao material de base, podendo ser explicado por um melhor enquadramento da sua curva granulométrica e proporcionando um intertravamento dos grãos, que é o principal fator relacionado à resistência de um solo estabilizado granulometricamente.

Apesar de um resultado satisfatório devido ao incremento do resíduo, o valor da sua capacidade de suporte ainda não atingiu o valor mínimo.

Adicionando mais 5% do resíduo, foi elaborada a mistura **Base + 50% Revestimento + 15 % Brita 19 + 20% Resíduo (B+50%R+15%B₁₉+15%S)**, no qual sua granulometria se apresentou conforme Figura 50.

Figura 50 - Curva granulométrica B+50%R+15%B₁₉+20%S, km 51,16



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)



Tabela 49 - Resumo granulometria B+50%R+15%B₁₉+20%S, km 51,16

Resumo da Granulometria	
Pedregulho (>2,0mm)	73,14%
Areia Grossa (0,6 - 2mm)	11,57%
Areia Média (0,2 - 0,6mm)	6,89%
Areia Fina (0,06 - 0,2mm)	3,35%
Silte (0,002- 0,06mm)	2,83%
Argila (<0,002mm)	2,22%

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

De acordo com os dados da Tabela 49, a mistura apresentou granulometria predominantemente pedregulhosa (73,14%), com material passante na peneira #200 de 5,68%, no qual 2,22% é composto por argila. O material não se enquadrou dentro de alguma faixa do DNIT, porém a norma enaltece que é apenas uma recomendação. Os demais parâmetros de CNU de 21,54 e CC de 2,80, mostra que a granulometria do material não é uniforme e há uma boa graduação dos seus grãos.

A mistura não apresentou limites de consistência (LL e LP), consequentemente sendo classificado como Não Plástico (NP). Os valores de LL e IP atendem aos critérios de norma (Tabela 50). O acréscimo do resíduo proporcionou mais uma redução da plasticidade do material em comparação ao material de base e das misturas com somente acréscimo de britas, o tornando Não Plástico.

Tabela 50 - Índices Físicos B+50%R+15%B₁₉+20%S, km 51,16

Mistura Km 51,16	ρ_s (g/cm ³)	D ₁₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	CNU	CC	LL (%)	LP (%)	IP
B+50%R+15%B ₁₉ +20%S	2,61	0,271	2,102	5,83	21,539	2,799	NP	NP	NP

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

O material, de acordo com a classificação SUCS, é classificado como pedregulho bem graduado siltoso (GW - GM). Para o sistema T.R.B, é classificado como A-1-a (pedra britada, pedregulho e areia) com o comportamento de excelente a bom para utilização como subleito (Tabela 51).



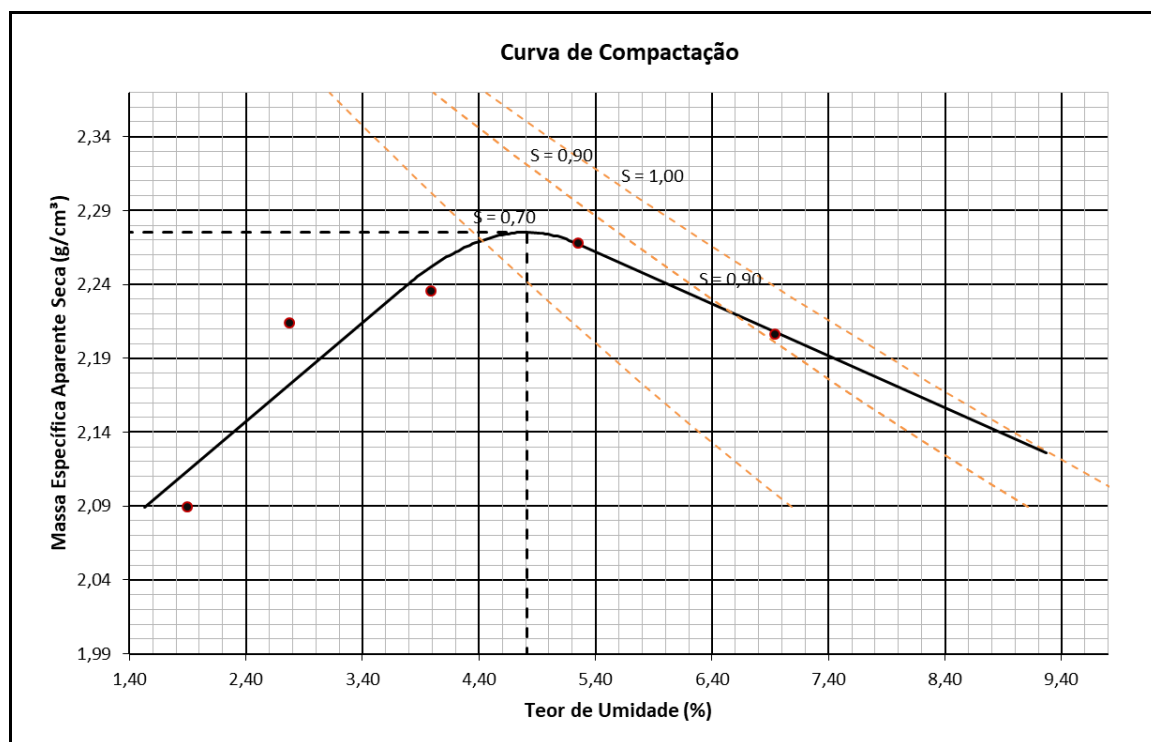
Tabela 51 - Classificação B+50%R+15%B₁₉+20%S, km 51,16

Mistura Km 51,16	SUCS	TRB
B+50%R+15%B ₁₉ +20%S	GW - GM	A-1-a

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Para o ensaio de compactação Proctor, com energia modificada, a curva de compactação apresentou a seguinte configuração, conforme Figura 51.

Figura 51 - Curva de compactação B+50%R+15%B₁₉+20%S, km 51,16



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

De acordo com a curva obtida, o material apresentou ρ_d máximo de $2,28 \text{ g}/\text{cm}^3$ na umidade ótima ($W_{\text{ótimo}}$) de 4,81%.

O ensaio de CBR e expansão realizado com o corpo de prova moldado na energia modificada e umidade ótima apresentou os seguintes resultados na Tabela 52:



Tabela 52 - CBR e Expansão B+50%R+15%B₁₉+20%S, km 51,16

Ensaio			Mistura Km 51,16
			B+50%R+15%B ₁₉ +20%S
Energia Modificada 55 golpes	Compactação	W _{ótima} (%)	4,81
		ρ _d máx (g/cm ³)	2,28
	ISC	CBR (%)	99
		Expansão (%)	0,02

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Os resultados obtidos pelo ensaio de CBR e expansão mostraram que a adição de mais 5% de resíduo constituindo assim a mistura **B+50%R+15%B₁₉+20%S** garantiu um aumento importante da capacidade do suporte, já que apresentou um valor de CBR de 99%, maior do que o valor de 78% da mistura **B+50%R+15%B₁₉+15%S**. O valor de expansão foi irrisório, visto que atende com boa margem o valor mínimo da norma. Com isso, a mistura **B+50%R+15%B₁₉+20%S**, para o km 51,16, apresenta viabilidade técnica devido ao atendimento a todos os parâmetros de norma e menor utilização de materiais adicionados, já que a mistura **B+50%R+40%B₁₆** não conseguiu garantir o atendimento da capacidade de suporte preconizada. A mistura M2 para o km analisado é composta por **B+50%R+15%B₁₉+20%S**.

4.4.1.3 Tabela Resumo

Com os dados dispostos individualmente, gerou-se tabelas resumo Tabela 53 e Tabela 54 dos parâmetros obtidos para uma melhor avaliação.



Tabela 53 - Tabela resumo de Índices físicos, km 51,16

Material Km 51,16	ρ_s (g/cm ³)	D ₁₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	CNU	CC	LL (%)	LP (%)	IP
Base	2,66	0,005	0,277	2,308	481,124	6,934	22	17	5
B+50%R+15%B ₁₉	2,59	0,074	1,943	6,004	81,448	8,531	22	17	5
B+50%R+20%B ₁₉	2,57	0,068	2,001	9,92	145,768	5,929	22	18	4
B+50%R+25%B ₁₉	2,54	0,071	0,834	5,572	78,764	1,765	23	18	5
B+50%R+40%B ₁₆ (M1)	2,53	0,085	2,034	5,731	67,111	8,451	23	17	6
B+50%R+15%B ₁₉ +15%S	2,66	0,112	1,219	5,895	52,643	2,249	20	18	2
B+50%R+15%B ₁₉ +20%S (M2)	2,61	0,271	2,102	5,83	21,539	2,799	NP	NP	NP

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Tabela 54 - Tabela resumo índices mecânicos, km 51,16

Ensaio			Amostra de Base	Mistura Km 51,16 B+%R+%B _{19ou16}					Mistura Km 51,16 B+%R+%B ₁₉ +%S
			Km 51,16	B+50%R+15%B ₁₉	B+50%R+20%B ₁₉	B+50%R+25%B ₁₉	B+50%R+40%B ₁₆ (M1)	B+50%R+15%B ₁₉ +15%S	B+50%R+15%B ₁₉ +20%S (M2)
Energia Modificada 55 golpes	Compactação	W _{ótima} (%)	4,75	3,97	4,76	4,99	5,08	5,63	4,81
		ρ_d máx (g/cm ³)	2,30	2,24	2,27	2,30	2,29	2,27	2,28
	ISC	CBR (%)	39	58	56	67	75	78	99
		Expansão (%)	0,08	0,04	0,01	0,00	0,02	0,00	0,02

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

4.4.2 Misturas km 51,60

Devido ao estudo dos projetos de misturas do km 51,16 detectar que aquela mistura com **B+50%R+40%B₁₆** não atender a capacidade de suporte preconizada, além de que o próprio material da Base do km 51,60 apresentar um valor de CBR superior a do km 51,16, decidiu-se iniciar o estudo do projeto da mistura já com a adição de 40% de brita 16, e caso atendesse a todos os parâmetros de norma, se reduziria a porcentagem da adição desse agregado para um valor mínimo que se enquadrasse nos requisitos de norma.

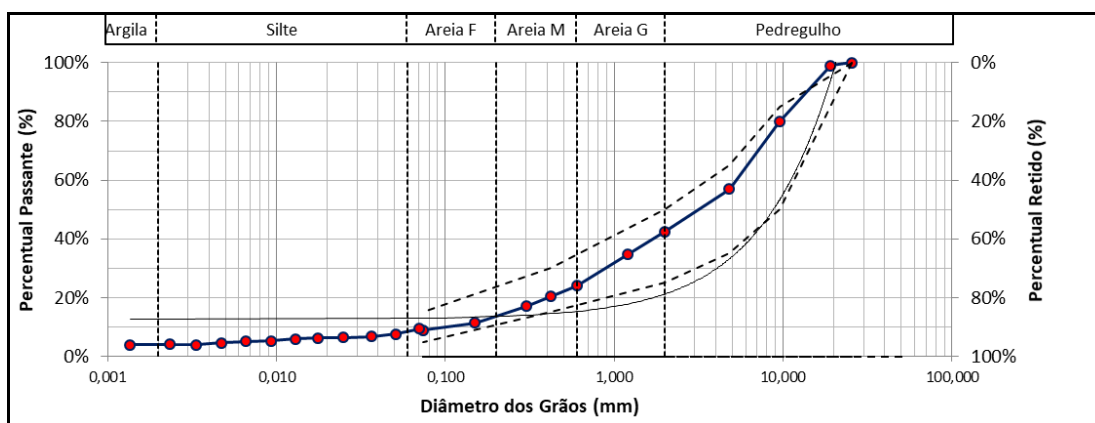
Para as misturas com adição de resíduo, foi iniciado conforme os projetos do km 51,16, **B+50%R+15%B₁₉+15%S**, visto que a adição desse material trouxe melhorias importantes para o comportamento da mistura.



4.4.2.1 Base + 50% Revestimento + % Britas (B+50%R+%B₁₆)

Para a mistura de **B+50%R+40%B₁₆**, a granulometria do material apresentou composição conforme Figura 52.

Figura 52 - Curva granulométrica B+50%R+40%B₁₆, km 51,60



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Tabela 55 - Resumo granulometria B+50%R+40%B₁₆, km 51,60

Resumo da Granulometria	
Pedregulho (>2,0mm)	57,55%
Areia Grossa (0,6 - 2mm)	18,39%
Areia Média (0,2 - 0,6mm)	10,75%
Areia Fina (0,06 - 0,2mm)	4,85%
Silte (0,002- 0,06mm)	4,37%
Argila (<0,002mm)	4,08%

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

A mistura apresentou granulometria predominantemente pedregulhosa (57,55%), com material passante na peneira #200 de 8,98%, no qual 4,08% é composto por argila (Tabela 55). O material se enquadrou dentro da Faixa “C” do DNIT. Os demais parâmetros de CNU de 54,99 e CC de 1,20, mostram que a granulometria do material não é uniforme e há uma boa graduação dos seus grãos.

A mistura apresentou LL de 22%, LP de 20% e IP de 2%. Os valores de LL e IP atendem aos critérios de norma (Tabela 56). O acréscimo da brita proporcionou uma redução de 3% para 2% da plasticidade do material em comparação ao material de base.



Tabela 56 - Índices físicos B+50%R+40%B₁₆, km 51,60

Mistura Km 51,60	ps (g/cm ³)	D ₁₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	CNU	CC	LL (%)	LP (%)	IP
B+50%R+40%B ₁₆	2,50	0,091	0,739	4,998	54,992	1,203	22	20	2

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Conforme a Tabela 57, o material, de acordo com a classificação SUCS, é classificado como areia bem graduada siltosa (SW - SM). Para o sistema T.R.B, é classificado como A-1-a (pedra britada, pedregulho e areia) com o comportamento de excelente a bom para utilização como subleito.

Tabela 57 - Classificação B+50%R+40%B₁₆, km 51,60

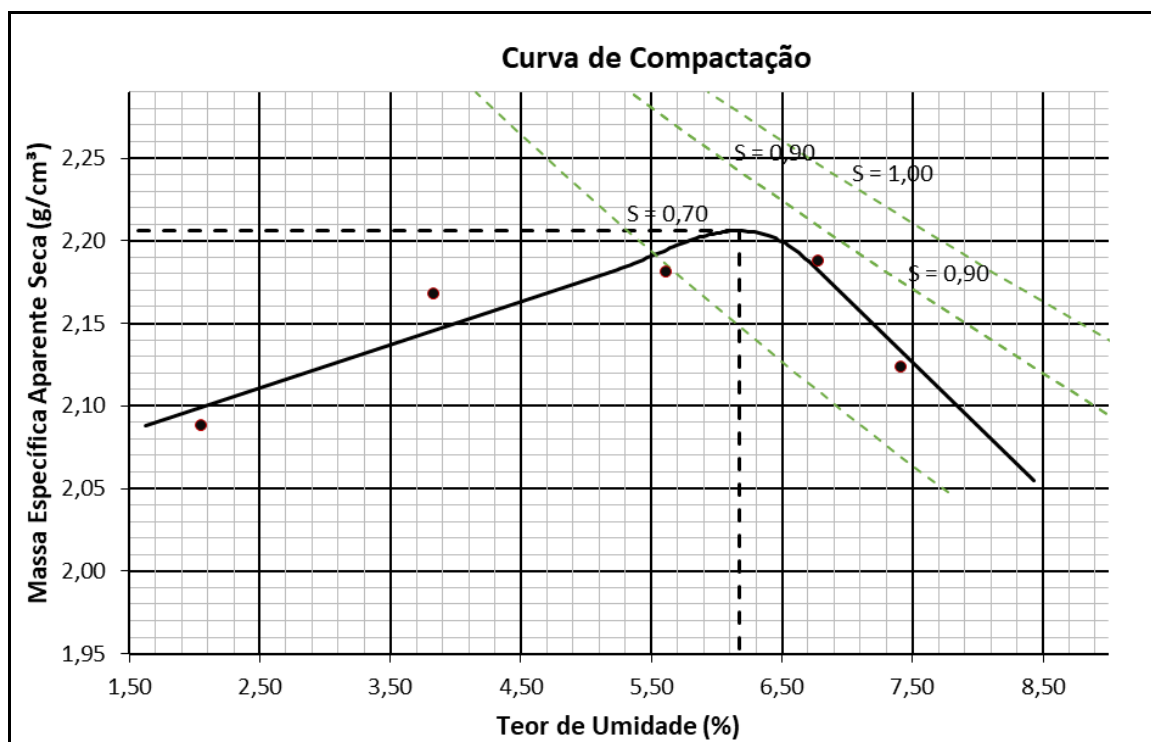
Mistura Km 51,60	SUCS	TRB
B+50%R+40%B ₁₆	SW - SM	A-1-a

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Para o ensaio de compactação Proctor, com energia modificada, a curva de compactação apresentou a seguinte configuração, conforme Figura 53.



Figura 53 - Curva de compactação B+50%R+40%B₁₆, km 51,60



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

De acordo com a curva obtida, o material apresentou ρ_d máximo de 2,21 g/cm³ na umidade ótima ($W_{ótimo}$) de 6,17%.

O ensaio de CBR e expansão realizado com o corpo de prova moldado na energia modificada e umidade ótima apresentou os seguintes resultados da *Tabela 58*:

Tabela 58 - CBR e Expansão B+50%R+40%B₁₆, km 51,60

Ensaio			Mistura Km 51,60
			B+50%R+40%B ₁₆
Energia Modificada 55 golpes	Compactação	$W_{ótima}$ (%)	6,17
		ρ_d máx (g/cm³)	2,21
	ISC	CBR (%)	73
		Expansão (%)	0,02

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Os resultados obtidos pelo ensaio de CBR e expansão demonstraram que a mistura com adição de 50% de revestimento e 40% de brita 16 garantiu uma melhora da capacidade de suporte com o aumento do CBR de 48% para 73%, em relação ao material natural da base.



Também houve uma diminuição da expansão entre esses materiais. Apesar da melhoria da capacidade de suporte, a mistura ainda não atendeu ao parâmetro de resistência de norma.

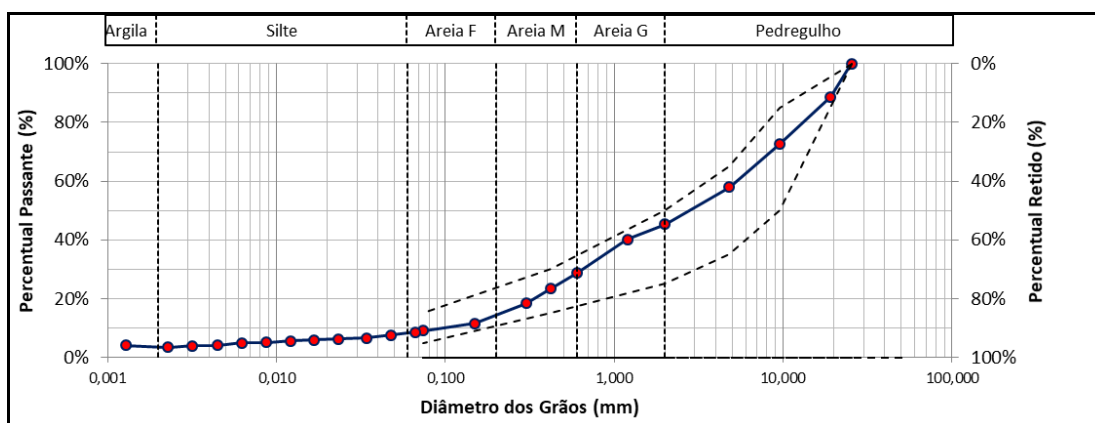
A explicação para a não realização de um traço com mais incorporação de brita é análoga ao descrito para o material do km 51,16: Oneração do serviço e dificuldade executiva. Com isso, a M1 do km 51,60 é composta por **B+50%R+40%B₁₆**.

4.4.2.2 Base + 50% Revestimento + 15% Brita 19 + % Resíduo (B+50%R+15%B₁₉+%S)

O projeto da mistura com adição do resíduo do km 51,60 iniciou da mesma forma que o material do km 51,16, com a composição de **B+50%R+15%B₁₉+15%S**.

A granulometria da mistura apresentou distribuição conforme Figura 54.

Figura 54 - Curva granulométrica B+50%R+15%B₁₉+15%S, km 51,60



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Tabela 59 - Resumo granulometria B+50%R+15%B₁₉+15%S, km 51,60

Resumo da Granulometria	
Pedregulho (>2,0mm)	54,62%
Areia Grossa (0,6 - 2mm)	16,69%
Areia Média (0,2 - 0,6mm)	14,85%
Areia Fina (0,06 - 0,2mm)	5,69%
Silte (0,002- 0,06mm)	4,54%
Argila (<0,002mm)	3,63%

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

A mistura apresentou granulometria predominantemente pedregulhosa (54,62%), com material passante na peneira #200 de 9,04%, no qual 3,63% é composto por argila



(Tabela 59). O material se enquadrando dentro da Faixa “C” especificada pelo DNIT. Os demais parâmetros de CNU de 55,91 e CC de 0,88, mostra que a granulometria do material não é uniforme e há uma má graduação dos seus grãos.

Conforme dados da Tabela 60, a mistura não apresentou limites de consistência (LL e LP), consequentemente sendo classificado como Não Plástico (NP). Os valores de LL e IP atendem aos critérios de norma. O acréscimo do resíduo proporcionou uma redução da plasticidade do material em comparação ao material natural da base e da mistura com adição somente de britas.

Tabela 60 - Índices físicos B+50%R+15%B₁₉+15%S, km 51,60

Mistura Km 51,60	ρ_s (g/cm ³)	D ₁₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	CNU	CC	LL (%)	LP (%)	IP
B+50%R+15%B ₁₉ +15%S	2,59	0,09	0,629	5,007	55,907	0,881	NP	NP	NP

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

O material, de acordo com a classificação SUCS, é classificado como areia má graduada siltoso (SP - SM). Para o sistema H.R.B, é classificado como A-1-a (pedra britada, pedregulho e areia) com o comportamento de excelente a bom para utilização como subleito (Tabela 61).

Tabela 61 - Classificação B+50%R+15%B₁₉+15%S, km 51,60

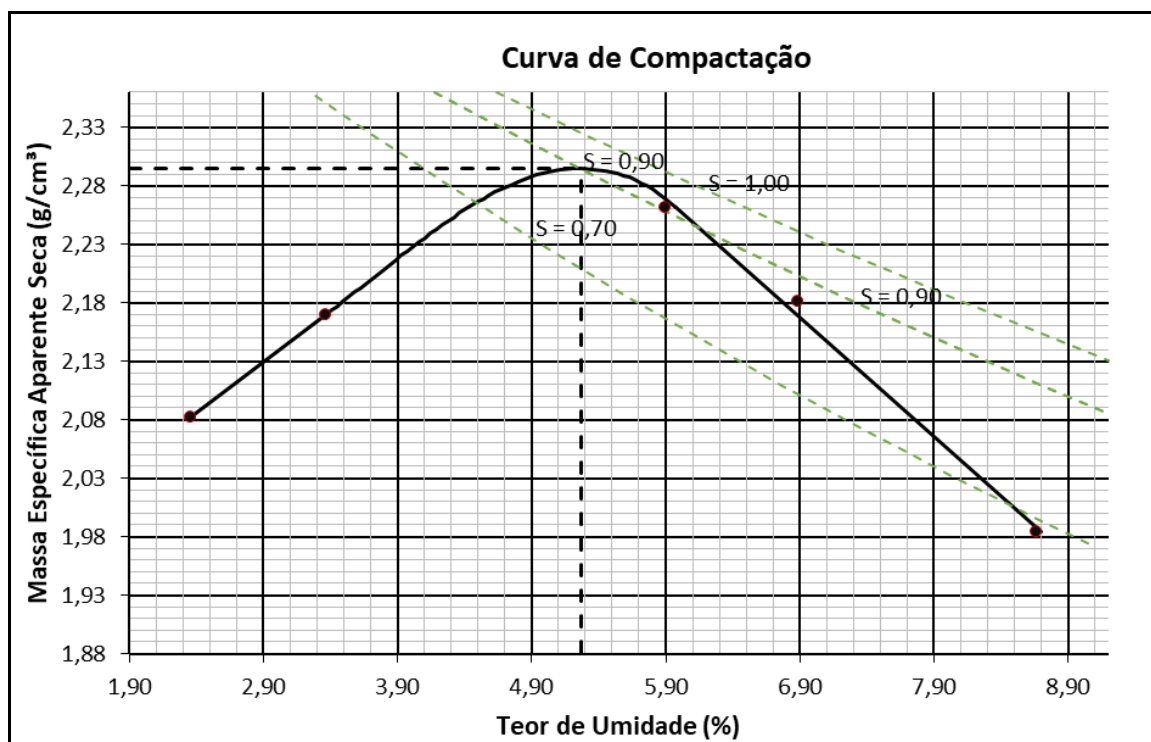
Mistura Km 51,60	SUCS	TRB
B+50%R+15%B ₁₉ +15%S	SP - SM	A-1-a

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Para o ensaio de compactação Proctor, com energia modificada, a curva de compactação apresentou a seguinte configuração, conforme Figura 55.



Figura 55 - Curva de compactação B+50%R+15%B₁₉+15%S, km 51,60



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

De acordo com a curva obtida, o material apresentou ρ_d máximo de 2,30 g/cm³ na umidade ótima ($W_{ótima}$) de 5,27%.

O ensaio de CBR e expansão realizado com o corpo de prova moldado na energia modificada e umidade ótima apresentou os resultados da Tabela 62:

Tabela 62 - CBR e Expansão B+50%R+15%B₁₉+15%S, km 51,60

Ensaios			Mistura Km 51,60 B+50%R+15%B ₁₉ +15%S
Energia Modificada 55 golpes	Compactação	W _{ótima} (%)	5,27
		ρ _d máx (g/cm³)	2,30
	ISC	CBR (%)	69
		Expansão (%)	0,00

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

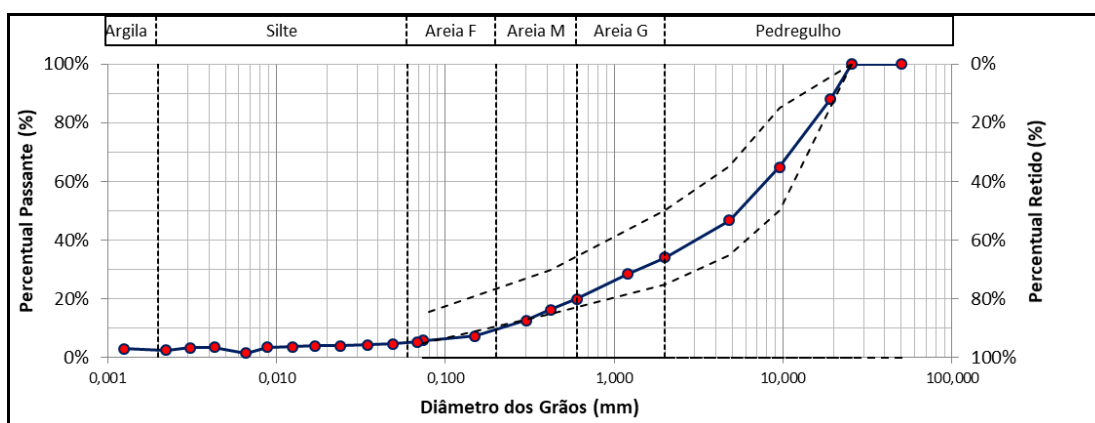
Os resultados obtidos pelo ensaio de CBR e expansão demonstraram que a mistura **B+50%R+15%B₁₉+15%S** garantiu uma melhora da capacidade de suporte e anulou a expansão em relação aos parâmetros do material da base natural. O mesmo traço para o material de base do km 51,16 apresentou um melhor comportamento mecânico, considerando



que o CBR do material natural possui um valor abaixo. No entanto, mesmo com o incremento de resistência, a sua capacidade de suporte não atendeu ao parâmetro mínimo de norma.

Como o procedimento adotado para a mistura do km 51,16, foi adicionado mais 5% de resíduo à nova mistura, assim obtendo o traço **B+50%R+15%B₁₉+20%S**. A granulometria desse novo material é mostrada na Figura 56.

Figura 56 - Curva granulométrica B+50%R+15%B₁₉+20%S, km 51,60



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Tabela 63 - Resumo granulometria B+50%R+15%B₁₉+20%S, km 51,60

Resumo da Granulometria	
Pedregulho (>2,0mm)	65,91%
Areia Grossa (0,6 - 2mm)	14,10%
Areia Média (0,2 - 0,6mm)	10,87%
Areia Fina (0,06 - 0,2mm)	4,09%
Silte (0,002- 0,06mm)	2,39%
Argila (<0,002mm)	2,64%

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

A mistura apresentou granulometria predominantemente pedregulhosa (65,91%), com material passante na peneira #200 de 5,75%, no qual 2,64% é composto por argila (Tabela 63). O material se enquadrou dentro da Faixa “C” especificada pelo DNIT. Os demais parâmetros de CNU de 26,27 e CC de 1,52, mostra que a granulometria do material não é uniforme e há uma boa graduação dos seus grãos.

A mistura não apresentou limites de consistência (LL e LP), consequentemente sendo classificado como Não Plástico (NP) (Tabela 64). Os valores de LL e IP atendem aos critérios



de norma. Como no traço com 15% de resíduo, a ausência de plasticidade se manteve nessa mistura.

Tabela 64 - Índices físicos B+50%R+15%B₁₉+20%S, km 51,60

Mistura Km 51,60	ρ_s (g/cm ³)	D ₁₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	CNU	CC	LL (%)	LP (%)	IP
B+50%R+15%B ₁₉ +20%S	2,69	0,225	1,416	5,898	26,270	1,515	NP	NP	NP

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Conforme a Tabela 65, o material, de acordo com a classificação SUCS, é classificado como pedregulho bem graduado siltoso (GW - GM). Para o sistema H.R.B, é classificado como A-1-a (pedra britada, pedregulho e areia) com o comportamento de excelente a bom para utilização como subleito.

Tabela 65 - Classificação B+50%R+15%B₁₉+20%S, km 51,60

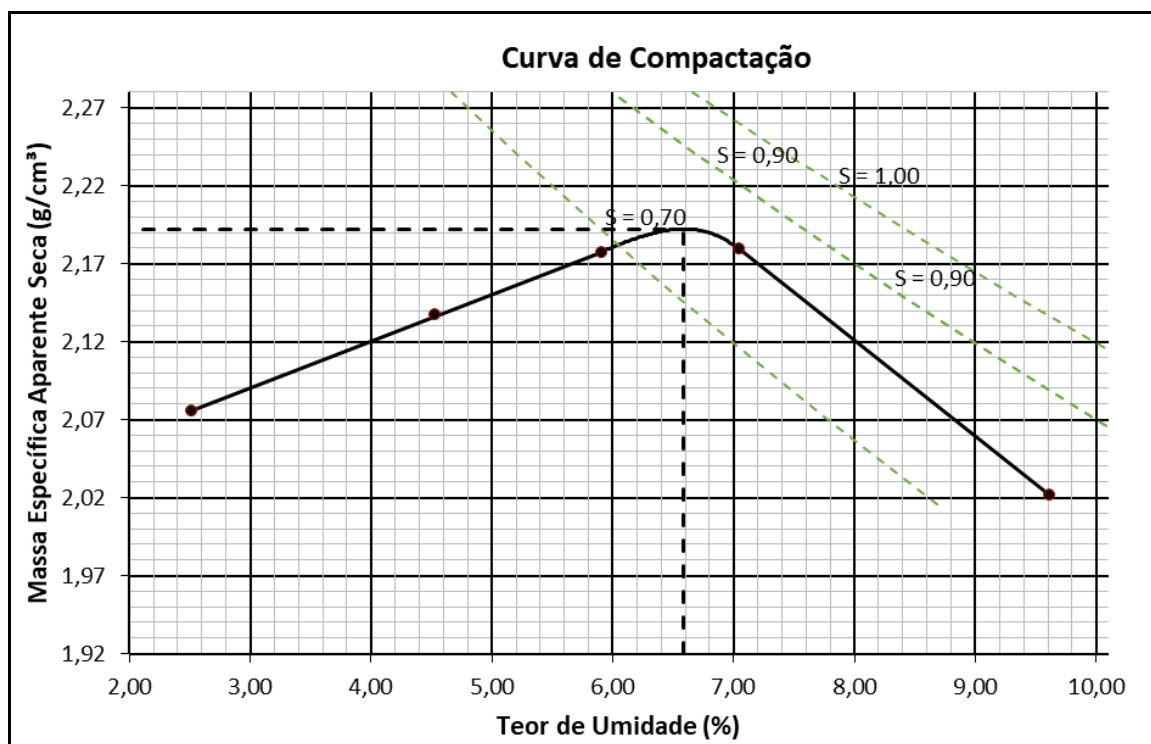
Mistura Km 51,60	SUCS	TRB
B+50%R+15%B ₁₉ +20%S	GW - GM	A-1-a

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Para o ensaio de compactação Proctor, com energia modificada, a curva de compactação apresentou a seguinte configuração, conforme Figura 57.



Figura 57 - Curva de compactação B+50%R+15%B₁₉+20%S, km 51,60



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

De acordo com a curva obtida, o material apresentou ρ_d máximo de 2,19 g/cm³ na umidade ótima ($W_{ótima}$) de 6,59%.

O ensaio de CBR e expansão realizado com o corpo de prova moldado na energia modificada e umidade ótima apresentou os seguintes resultados contidos na Tabela 66:

Tabela 66 - CBR e Expansão B+50%R+15%B₁₉+20%S, km 51,60

Ensaio			Mistura Km 51,60
			B+50%R+15%B ₁₉ +20%S
Energia Modificada 55 golpes	Compactação	$W_{ótima}$ (%)	6,59
		ρ_d máx (g/cm³)	2,19
	ISC	CBR (%)	95
		Expansão (%)	0,00

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Os resultados obtidos pelo ensaio de CBR e expansão demonstraram que a mistura **B+50%R+15%B₁₉+20%S** garantiu mais um incremento da capacidade de suporte e anulou a expansão do material. Assim como o km 51,16, a mistura **B+50%R+15%B₁₉+20%S**



conseguiu atender a todos os parâmetros de norma e apresentou um comportamento mecânico superior à mistura **B+50%R+40%B₁₆**, utilizando menos quantidade de adição de material.

Por fim, as misturas M1 e M2 para os km 51,16 e km 51,60 apresentaram a mesma composição, sendo **B+50%R+15%B₁₉+20%S** e **B+50%R+40%B₁₆**, respectivamente.

4.4.2.3 Tabela Resumo

Com os dados dispostos individualmente, foram geradas Tabela 67 e Tabela 68 dos parâmetros obtidos para uma melhor avaliação.

Tabela 67 - Tabela resumo índices físicos, km 51,60

Material Km 51,60	ρ_s (g/cm ³)	D ₁₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	CNU	CC	LL (%)	LP (%)	IP
Base	2,59	0,034	0,45	4,944	143,975	1,19	22	18	4
B+50%R+40%B ₁₆ (M1)	2,50	0,091	0,739	4,998	54,992	1,203	22	20	2
B+50%R+15%B ₁₉ +15%S	2,59	0,09	0,629	5,007	55,907	0,881	NP	NP	NP
B+50%R+15%B ₁₉ +20%S (M2)	2,69	0,225	1,416	5,898	26,270	1,515	NP	NP	NP

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Tabela 68 - Tabela resumo índices mecânicos, km 51,60

Ensaio			Amostra de Base	Mistura Km 51,60 B+%R+%B ₁₆	Mistura Km 51,60 B+%R+%B ₁₉ +%S	
			Km 51,60	B+50%R+40%B ₁₆ (M1)	B+50%R+15%B ₁₉ + 15%S	B+50%R+15%B ₁₉ + 20%S (M2)
Energia Modificada 55 golpes	Compactação	W _{ótima} (%)	5,65	6,17	5,27	6,59
		pd máx (g/cm ³)	2,27	1,16	2,30	2,19
	ISC	CBR (%)	48	73	69	95
		Expansão (%)	0,02	0,02	0,00	0,00

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

4.4.3 Módulos de Resiliência das Misturas M1 e M2

A partir da obtenção das misturas M1 (B+50%R+40%B₁₆) e M2 (B+50%R+15%B₁₉+20S) para os km 51,16 e km 51,60, foram realizados ensaios para a determinação do MR desses materiais a fim de avaliar os seus comportamentos resilientes com carregamentos cíclicos, de extrema importância para análise mecanicista do possível pavimento em que farão parte.



Os resultados dos valores de $MR_{\text{mínimo}}$, $MR_{\text{médio}}$, $MR_{\text{máximo}}$, parâmetros de regressão “k” e os coeficientes de determinação (R^2) dos modelos σ_3 (tensão confinante), σ_d (tensão de desvio) e composto (tensão confinante e tensão de desvio), para as misturas se encontram na Tabela 69.

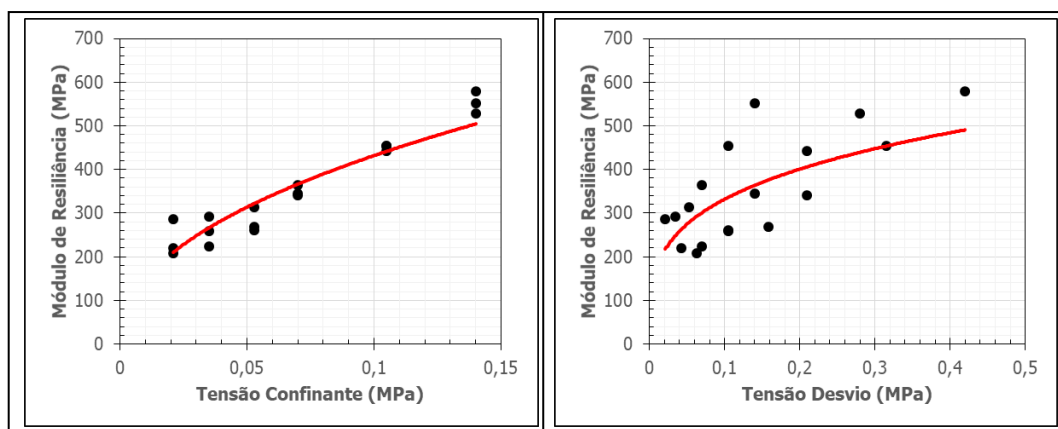
As curvas e superfícies de ajustes das misturas M1 e M2 se encontram da Figura 58 até a Figura 65.

Tabela 69 - MR e coeficientes de regressão

Km	Mistura	$MR_{\text{mínimo}}$ (MPa)	$MR_{\text{médio}}$ (MPa)	$MR_{\text{máximo}}$ (MPa)	$MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2}$			$MR = k_1 \cdot \sigma_d^{k_2}$			$MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3}$			
					k_1	k_2	R^2	k_1	k_2	R^2	k_1	k_2	k_3	R^2
51,16	M1	209	355	579	1246,36	0,46	0,86	621,46	0,27	0,45	1527,42	0,57	-0,04	0,96
	M2	261	475	778	2055,77	0,54	0,94	960,52	0,34	0,57	2459,11	0,61	-0,01	0,96
51,60	M1	222	369	566	1322,43	0,47	0,93	686,96	0,3	0,58	1545,14	0,53	-0,01	0,96
	M2	180	354	604	1935,64	0,63	0,97	862,54	0,43	0,7	2131,17	0,61	0,07	0,99

Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

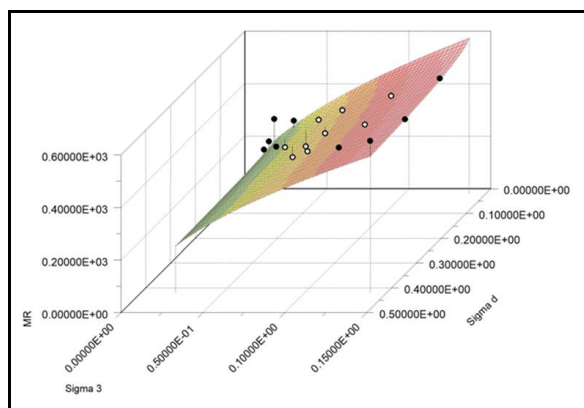
Figura 58 - Curvas de ajustes usando os modelos de σ_3 e σ_d para M1, km 51,16



Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

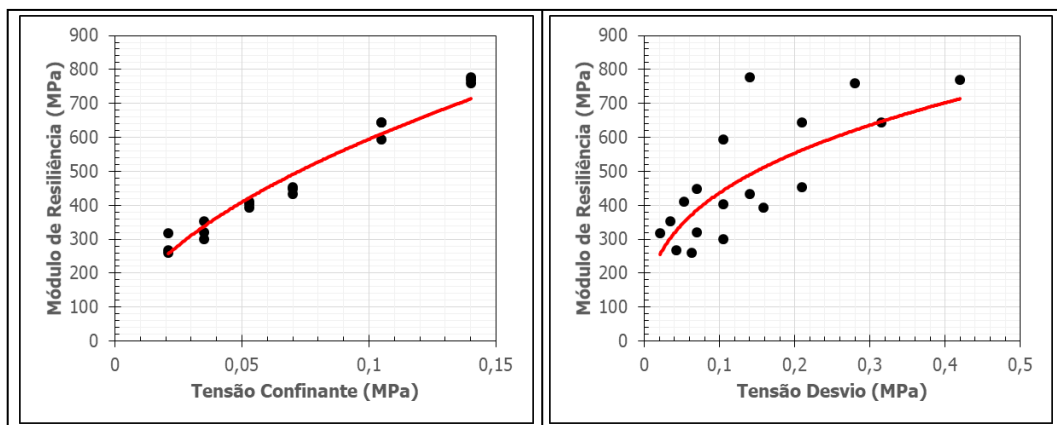


Figura 59 - Superfície de ajuste usando o modelo composto para M1, km 51,16



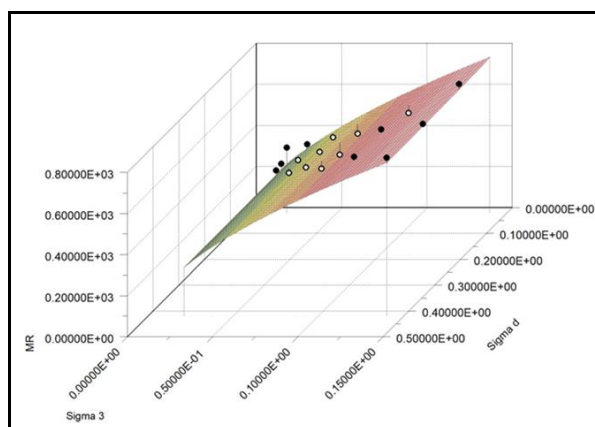
Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

Figura 60 - Curvas de ajustes usando os modelos de σ_3 e σ_d para M2, km 51,16



Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

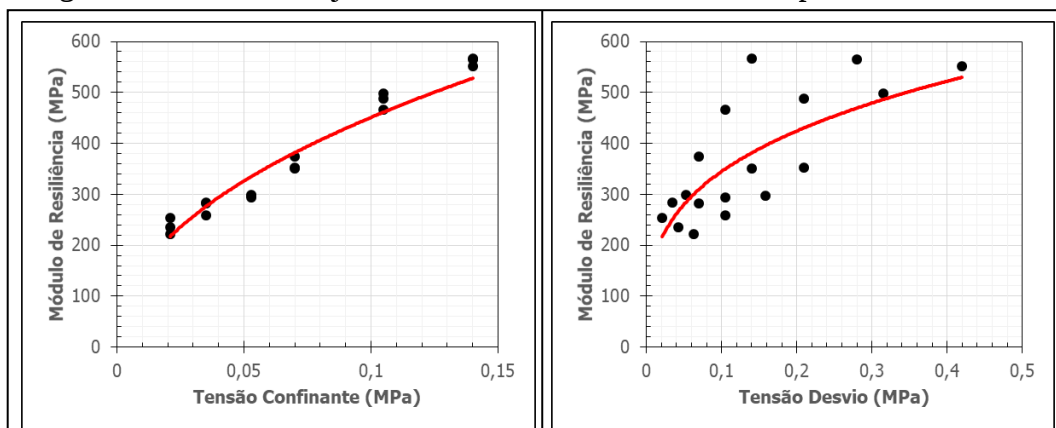
Figura 61 - Superfície de ajuste usando o modelo composto para M2, km 51,16



Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

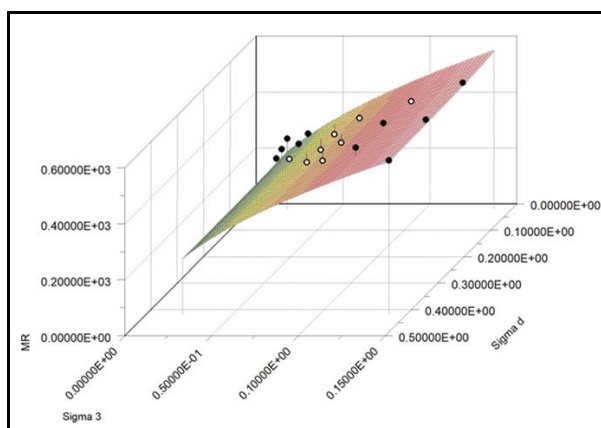


Figura 62 - Curvas de ajustes usando os modelos de σ_3 e σ_d para M1, km 51,60



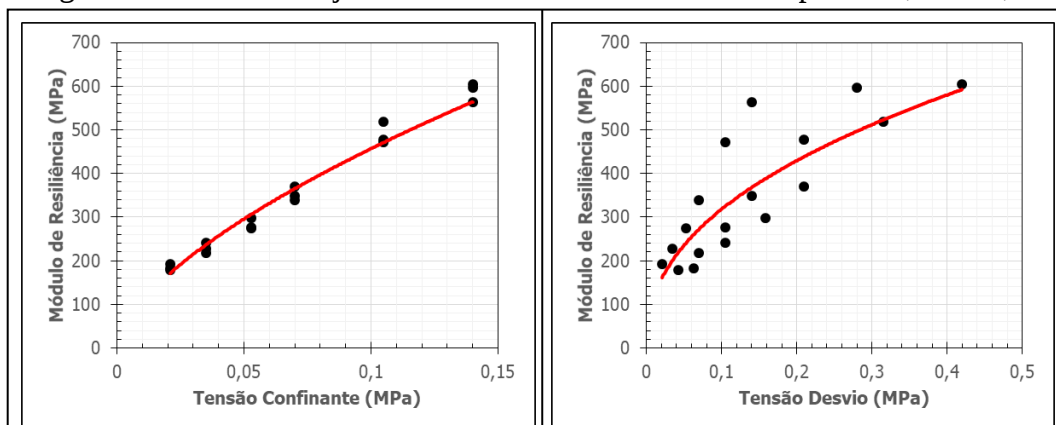
Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

Figura 63 - Superfície de ajuste usando o modelo composto para M1, km 51,60



Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

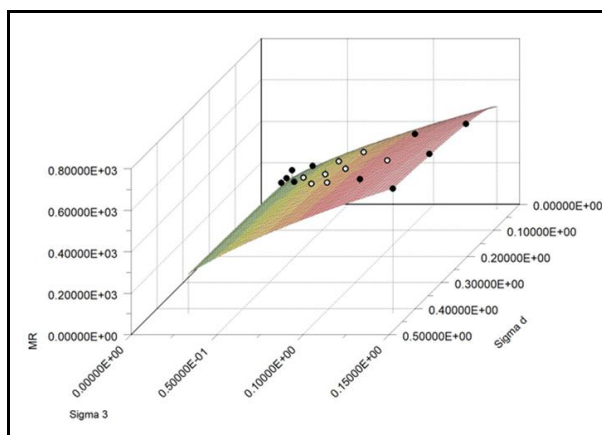
Figura 64 - Curvas de ajustes usando os modelos de σ_3 e σ_d para M2, km 51,60



Fonte: Elaborada pelo autor



Figura 65 - Superfície de ajuste usando o modelo composto para M2, km 51,60



Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

Examinando os resultados obtidos, as misturas recicladas M1 e M2 apresentaram valores médios satisfatórios para materiais granulares, conforme valores de referência dispostos na IP-DE-P00/001-B, do Departamento de Estrada de Rodagem de São Paulo (DER-SP, 2024), (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**). Vale salientar que esse materiais apresentaram módulos médios superiores à materiais comumente utilizados em camadas granulares como BGS, Solo-brita e Macadame. A mistura M2, com adição do resíduo, contendo menos adição de materiais à base natural, apresentou MR igual ou superior às misturas M1.



Tabela 70 - Valores referenciais de MR

Material	Intervalos de Valores de Módulo de Resiliência (MPa)
Misturas asfálticas:	
- revestimento (CAP 50-70)	3000 - 6500
- revestimento (CAP 30-45)	2500 - 4500
- revestimento (ligante modificado com polímero)	3500 - 10500
- revestimento (ligante modificado com borracha)	1600 - 6500
- binder (CAP 50-70)	(2500 - 4000)
- binder (CAP 30-45)	(2000 - 3000)
- pré-misturado a quente	2000 - 2500
- pré-misturado a frio	1000 - 1400
Materiais granulares:	
- brita graduada sobre camada granular	200 - 380
- brita graduada sobre camada cimentada	350 - 450
- macadame seco	100 - 300
- solo-brita	150 - 350
Materiais estabilizados quimicamente:	
- solo-cimento	400 - 11000
- brita graduada tratada com cimentado	7000 - 15000
- reciclado com cimento	4000 - 7000
- reciclado com espuma	800 - 2000
- concreto compactado com rolo	7000 - 29500
Concreto de cimento <i>Portland</i>	30000 - 35000
Solos finos em base e sub-base	150 - 300
Solos finos em subleito e reforço do subleito	
- solos de comportamento laterítico LA, LA', LG'	100 - 200
- solos de comportamento não laterítico	25 - 75
Solos finos melhorados com cimento para reforço de subleito	200 - 400

Fonte: Adaptado de DER-SP (2024)

Quando analisados os modelos de regressão devido às variáveis de tensão (σ_3 , σ_d e composto), todas as misturas apresentaram ótimos modelos em função de σ_3 e também o composto, visto que seus R^2 se encontraram acima de 0,86 e 0,96, respectivamente. O R^2 para os modelos em função de σ_d não apresentaram valores satisfatórios, mostrando que as regressões em função da tensão de desvio não possuem um bom ajuste.

No mais, os modelos obtidos nos fornecem que o MR das misturas possuem uma grande influência de σ_3 , pois os modelos dependentes dessa tensão se encontraram bem ajustados. Em relação ao modelo composto, os coeficientes k_2 , relacionados a σ_3 foi sempre positivo e maior do que os coeficientes k_3 , para σ_d , que para as misturas M1 e M2, para o km 51,16, e M1 para km 51,60 apresentaram valores negativos, indicando diminuição do MR em função dessa tensão. Essa grande dependência da tensão confinante e pouca influência da tensão de desvio em relação ao MR é característico de materiais granulares (Dushmanta et al., 2025; Quintana et al., 2025), no qual o aumento dessa tensão, responsável pela deformação



volumétrica, proporciona um aumento do atrito e melhora do intertravamento entre os seus grãos, acarretando no aumento da sua rigidez (Farias, 2023).

4.4.4 Análise mecanicista comparativa do pavimento restaurado com a utilização da M2 no km 51,16 e com a substituição da camada de base por um BGS.

Nesse tópico foi realizada uma análise mecanicista do pavimento restaurado com a reciclagem da base utilizando a dosagem da M2, a fim de corroborar a viabilidade da solução considerando os critérios empíricos e mecanicistas. Também foi feita uma análise com a adoção de uma solução com a troca da base degradada por um BGS, a fim de comparação

Os dados defletoométricos e de estudo de tráfego, executados pela supervisora Alta Engenharia Ltda, foram disponibilizados pelo DNIT e trouxeram uma veracidade à análise realizada.

A estrutura existente hoje na rodovia foi retronalisada a partir dos dados defletoométricos disponibilizados, com espessuras do revestimento e camada de base medidas durante a sondagem e rodados no software BackMeDiNa, que forneceu os MR das camadas da estrutura existente pela sua bacia de deflexão.

O MR da mistura M2 foi o obtido pelo ensaio e utilizado o modelo composto devido ao melhor ajuste encontrado ($R^2 = 0,96$). O MR para o revestimento asfáltico utilizado na análise foi de 4000 Mpa, valor dentro da faixa de referência do DER-SP para um CBUQ com CAP 30-45, visto que não foi realizada uma dosagem de uma mistura asfáltica nessa pesquisa. Os dados do BGS foram obtidos por ensaios realizados na tese de Manoel Farias em 2023.

A análise mecanicista foi realizada com a utilização do Software de múltiplas camadas elásticas AEMC, que forneceu os dados de deflexões, tensões e deformações utilizados nas equações de desempenho para os critérios de falha de um determinado pavimento flexível.

4.4.4.1 Estudo de tráfego e Número N - Posto 3, BR-427/RN

Por meio do DNIT, foi disponibilizado o estudo de tráfego realizado em 2024 no posto 3 da BR-427/RN, que abrange o trecho entre os km 40,54 e km 54,58, onde está situado o ponto do estudo e análise da mistura reciclada com adição do resíduo da scheelita (Figura 66).

Os dados forneceram o Numero N para um horizonte de projeto de 10 anos, que é a quantidade de solicitações de um eixo padrão rodoviário de 8,2 Tf sobre aquele pavimento.



Em função do estudo ter sido feito em 2024, para a análise foi utilizado o VMD do ano de abertura ao tráfego de 2026, considerando uma projeção de taxa de crescimento de 3% anual em relação ao VMD de 2024. Com isso, o Valor de N para um projeto de 10 anos entre o período de 2026 – 2036 é de $1,46 \times 10^7$ pelo método da *U.S. Army Corps of Engineers* (USACE) e de $3,33 \times 10^6$ pelo método da *Association of state Highway and Transportation Officials* (AASHTO).

Figura 66 - Número N, Posto 3, BR-427/RN

Número N							
Ano		VMD		USACE		AASHTO	
		Ônibus	Carga	N	N Acumulado	N	N Acumulado
0	2024	36	336	1,07E+06	1,07E+06	2,45E+05	2,45E+05
1	2025	37	346	1,11E+06	2,18E+06	2,52E+05	4,97E+05
2	2026	38	356	1,14E+06	3,32E+06	2,60E+05	7,57E+05
3	2027	39	367	1,17E+06	4,49E+06	2,68E+05	1,02E+06
4	2028	41	378	1,21E+06	5,70E+06	2,76E+05	1,30E+06
5	2029	42	389	1,24E+06	6,94E+06	2,84E+05	1,58E+06
6	2030	43	401	1,28E+06	8,22E+06	2,93E+05	1,88E+06
7	2031	44	413	1,32E+06	9,54E+06	3,01E+05	2,18E+06
8	2032	46	425	1,36E+06	1,09E+07	3,10E+05	2,49E+06
9	2033	47	438	1,40E+06	1,23E+07	3,20E+05	2,81E+06
10	2034	49	451	1,44E+06	1,37E+07	3,29E+05	3,14E+06
11	2035	50	465	1,49E+06	1,52E+07	3,39E+05	3,48E+06
12	2036	52	479	1,53E+06	1,68E+07	3,49E+05	3,83E+06
13	2037	53	493	1,58E+06	1,83E+07	3,60E+05	4,19E+06
Taxa de crescimento anual			3,00% % a. a.				
Fator de veículo ônibus USACE			5,7447				
Fator de veículo ônibus AASHTO			2,1358				
Fator de veículo carga USACE			16,8979				
Fator de veículo carga AASHTO			3,7691				
Percentual na faixa de projeto			0,5000				

Fonte: DNIT (2026)

4.4.4.2 Retroanálise do pavimento do km 51,16 pelo BackMeDiNa

Os dados defletoométricos para o km 51,16 se encontram na Figura 67.

Figura 67 - Dados defletoométricos, km 51,16, BR-427/RN

EQUIPAMENTO Falling Weight Deflectometer				Distancia Geofones (cm) 0 Df1 20 Df2 30 Df3 45 Df4 60 Df5 90 Df6 120 Df7							Dc	Raio de Curvatura (m)
km	Força (KN)	Temp Pav.	Temp Ar	VALORES DE DEFLEXÃO (0,01mm)								
				Df1 (D0)	Df2 (D20)	Df3 (D30)	Df4 (D45)	Df5 (D65)	Df6 (D90)	Df7 (120)		
51.16	41.00	39.00	34.1	91.2581	69.4012	48.3967	29.2731	15.1656	5.32	2.61	91.26	55.25

Fonte: DNIT (2026)



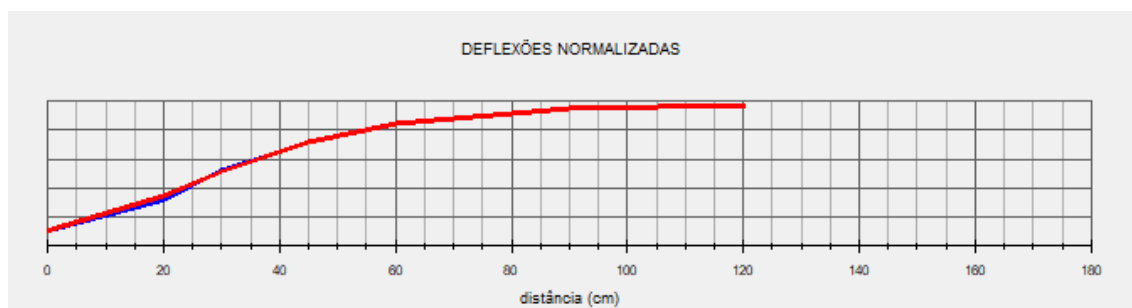
Analisando os dados deflectométricos antes da retroanálise, pode-se observar que há uma degradação estrutural do pavimento em função da Deflexão Característica (DC) de 91,26 (0,01mm) estar acima da Deflexão Admissível (D_{adm}) de 56,75 (0,01 mm) para o Número N calculado e Raio de Curvatura (RC) com valor abaixo de 100 m.

Inserindo esses dados no BackMeDiNa, demonstrada na Figura 68, com as espessuras encontradas em campo, o Software forneceu os seguintes dados de MR para a camada asfáltica, a base granular (material a ser reciclado), e o material remanescente (subjacente à camada de base que será tratada).

Figura 68 - Retroanálise da bacia de deflexão, km 51,16

CARGA (kgf):	4100,00							T AR:	34	°C
RAIO (cm):	15							T PAV:	39	°C
SENSORES:	0	1	2	3	4	5	6	7	8	
DISTÂNCIA (cm):	0	20	30	45	60	90	120			
DEFLEXÕES (µm):	913	694	484	293	152	53	26			
CALCULADAS (µm):	910	662	492	291	161	49	27			
DIFERENÇAS (µm):	3	32	-8	2	-9	4	-1			
ERRO (%):	4,1%									

CAMADA	MATERIAL	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEF POISSON	ADERÊNCIA
1	Camadas Asfálticas	12	1828	0,30	NÃO ADERIDO
2	Camadas Granulares	15	19	0,35	NÃO ADERIDO
3	Subleito	0	264	0,40	-



Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

Os dados da retroanálise mostraram que a camada asfáltica já alcançou a sua vida útil, devido ao seu valor de MR abaixo do esperado de 2500 MPa. A camada de base se encontra bastante degradada em função do valor muito baixo do seu MR, o que também pode ser embasado pela sua baixa capacidade de suporte obtido nos ensaios de caracterização (CBR = 39%). No entanto, a camada subjacente às essas estruturas se encontrou com boa capacidade estrutural, MR de 264 MPa, não necessitando de uma intervenção para restaurar a sua integridade.



4.4.4.3 Análise mecanicista da estrutura restaurada com a base composta por M2

Considerando o número N da USACE de $1,46 \times 10^7$, recomenda-se a utilização de um revestimento asfáltico com espessura mínima de 10 cm, conforme o Quadro 4 apresentado pelo DNIT em seu manual de pavimentação (DNIT, 2006).

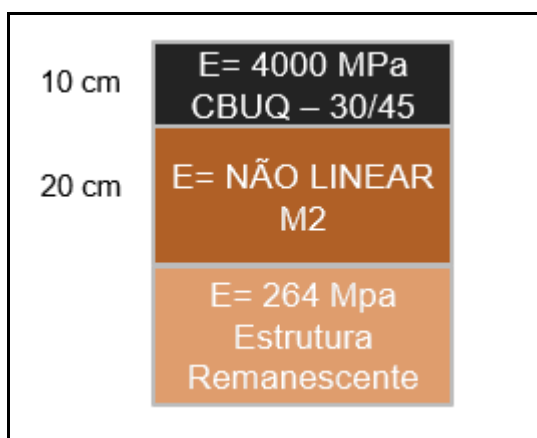
Quadro 4 - Espessura mínima em função de N

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: DNIT (2006)

A mistura M2, conforme sua dosagem, considerando a reciclagem dos 15 cm da base existente com a incorporação de 50% de peso de revestimento asfáltico, totaliza a reciclagem de 20 cm do pavimento existente do local. Assim, a estrutura restaurada com M2 compoando a nova base e com seu MR em função do modelo composto (equação 10) apresentará a configuração da Figura 69:

Figura 69 - Pavimento restaurado com M2, km 51,16



Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

$$MR = 2459,11 \times \sigma_3^{0,57} \times \sigma_d^{-0,01} \quad R^2 = 0,96$$

(10)

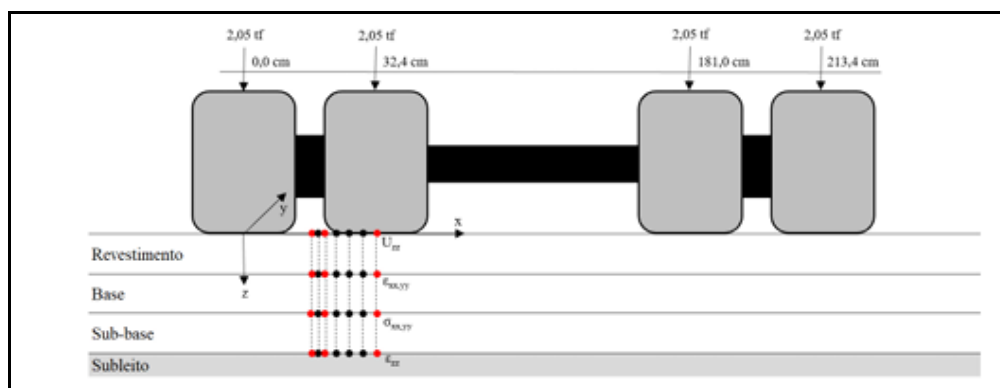


O pavimento por possuir uma camada asfáltica, camada de base granular e uma estrutura remanescente também granular, sendo ela o subleito da nova estrutura, terá que ser analisado pelos critérios de falha referentes à deflexão na superfície do revestimento asfáltico, à fadiga da camada asfáltica derivada das deformações de tração em suas fibras inferiores e a deformação vertical no topo do subleito, considerando os pontos entre as rodas do semi-eixo e debaixo de uma das rodas (Figura 70).

Inserindo os dados da estrutura do pavimento no Software AEMC conforme a Figura 71, foram analisadas as deflexões, tensões e deformações em dois pontos: embaixo de uma das rodas, e entre as rodas de um semi-eixo padrão.

Não foram consideradas aderência entre as camadas do revestimento asfáltico e de base, e da camada de base e do subleito, a fim de atender as condições recomendadas pelo MeDiNa (Quadro 5).

Figura 70 - Eixo rodoviário padrão e pontos de análise



Fonte: DER-SP (2024)

Quadro 5 - Condições de aderência entre camadas

CAMADA	CONDIÇÃO
Camadas asfáltica sobre outra camada asfáltica	ADERIDO
Camada asfáltica sobre camada cimentada	NÃO ADERIDO
Camada asfáltica sobre camada antirreflexão de trincas	ADERIDO
Camada asfáltica sobre camadas de solos ou granulares	NÃO ADERIDO
Tratamento superficial sobre camadas asfálticas	ADERIDO
Tratamento superficial sobre camadas de solos ou granulares	NÃO ADERIDO
Camada estabilizada sobre outra camada estabilizada	NÃO ADERIDO
Camada estabilizada sobre camadas de solos ou granulares	NÃO ADERIDO
Camada antirreflexão de trincas sobre camadas estabilizadas	NÃO ADERIDO
Camada de solos ou granulares sobre camadas asfálticas, cimentadas, de solos ou granulares	NÃO ADERIDO

Fonte: DNIT (2025)



Figura 71 - Interface AEMC com os dados de M2

CAMADA	ESPESSURA (cm)	MASSA ESP (g/cm³)	COMPORTAMENTO	MÓDULO (MPa)	k1	k2	k3	k4	COEF POISSON	RIGIDEZ (k)
1	10	2,4	LINEAR	4000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,30	0,0
2	20,0	1,6	NÃO LINEAR	(246)	2459,11	0,61	-0,01	0,0	0,35	0,0
3	0,0	1,6	LINEAR	264	0,0	0,0	0,0	0,0	0,40	0,0

Tipo de carregamento:

Eixo padrão rodoviário

Eixo simples

Dois eixos simples (direcional)

Eixo duplo

Dois eixos duplos

Dois eixos duplos em tandem

EIXO DUPLO

Análise

Número de rodas: 4

Carga do eixo (ton): 8,20

Carga de roda (ton): 2,05

Pressão de pneus (MPa): 0,56

Ty (cm): 0,00

Tx (cm): 32,40

Lx (cm): 181,00

Área (cm²): 366,07

Raio (cm): 10,79

Pontos de análise e resultados

Calcular

Ferramentas >>

Ponto	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)	Ux (µm)	Uy (µm)	Uz (µm)	Sx (MPa)	Sy (MPa)	Sz (MPa)	Sxy (MPa)	Sy
1	0	0	0	0,27905	0,00000	333,45254	0,286156	1,018923	0,000000	0,000000	0,
2	0	16,2	0	0,28106	-24,85337	274,53020	0,249812	0,249674	0,000000	0,000012	0,
3	0	0	9,99	-0,99376	0,00000	332,17336	-0,291362	-1,097599	0,130672	0,000000	0,
4	0	16,2	9,99	-0,98316	27,89875	273,72481	-0,237045	-0,241346	0,077393	-0,000399	0,
5	0	0	30,01	3,85743	0,00000	244,84814	0,098387	0,103678	0,112343	0,000000	0,
6	0	16,2	30,01	3,82562	-10,22843	216,59362	0,072767	0,073574	0,081345	0,000075	0,
7											
8											
9											
10											
11											
12											
13											
14											
15											
16											
17											
18											

Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

Após a execução do programa, o AEMC forneceu os seguintes dados nas cotas de análise para a verificação dos critérios de falha (Tabela 71):

Tabela 71 - Tensões, deflexão e deformação com M2

Critério de falha	Cota (m)	Valor crítico
Deflexão (D) (0,01 mm)	0	33,35
Fadiga do revestimento asfáltico (εt) (m/m)	9,99	2,62E-04
Deformação Subleito (εv) (m/m)	30,01	1,19E-04

Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

Inicialmente foi verificado o atendimento à D_{adm} para pavimentos flexíveis, que para o número N da USACE de $1,46 \times 10^7$, foi calculado conforme a equação 11, com dos coeficientes demonstrados na Tabela 72:



$$\log D_{adm} = k - n \times \log N \quad (11)$$

Onde:

N: Número equivalente de operações de eixo simples padrão de rodas duplas de 80 kN acumulado para o período de projeto;

k e n: Coeficientes de determinados por regressões lineares

Tabela 72 - Deflexão em função do Número N para pavimentos flexíveis

Equação	Procedimento	K	n
1	DNER-PRO 011/79	3,01	0,176

Fonte: Adaptado de DER-SP (2024)

$$D_{adm} = 56,11 \text{ (0,01 mm)}$$

Conforme dados da Tabela 71, a deflexão obtida para o pavimento analisado foi 33,35 (0,01 mm), sendo menor do que o D_{adm} calculado de 56,11 (0,01 mm).

Posteriormente foi verificado o atendimento à deformação no topo do subleito conforme equação 12 e coeficientes da Tabela 73:

$$N = K \times \left(\frac{1}{\epsilon_v} \right)^n \quad (12)$$

Onde:

N: Número equivalente de operações de eixo simples padrão de rodas duplas de 80 kN acumulado para o período de projeto;

ϵ_v : deformação específica vertical na compressão

K e n: Coeficientes de determinados por regressões lineares

Tabela 73 - Número N em função da Deformação específica de compressão no topo do subleito

Equação	Autor	Ano	K	n
1	Dormon & Metcalf	1965	$6,069 \times 10^{-10}$	4,762



Fonte: Adaptado de DER-SP (2024)

$$N = 2,96 \times 10^9$$

Para o pavimento falhar devido à deformação de compressão no topo do subleito, conforme deformação constada na Tabela 71, é necessária a solicitação de $2,96 \times 10^9$ eixos padrões, considerando o método da USACE, acima do número N de projeto de $1,46 \times 10^7$.

Por fim, com a utilização de um revestimento asfáltico, foi verificado o critério de falha para a fadiga desse material por meio da equação 13 e coeficientes da Tabela 74:

$$N = K \times \left(\frac{1}{\epsilon_t} \right)^n \quad (13)$$

Onde:

N: Número equivalente de operações de eixo simples padrão de rodas duplas de 80 kN acumulado para o período de projeto;

ϵ_t : deformação específica horizontal de tração na fibra inferior

K e n: Coeficientes de determinados por regressões lineares

Tabela 74 - Número N em função da deformação específica de tração da fibra inferior do revestimento asfáltico

Equação	Autor	Ano	K	n
1	FHWA (Federal Highway Administration)	1976	$1,092 \times 10^{-6}$	3,512

Fonte: Adaptado de DER-SP (2024)

$$N = 4,14 \times 10^6$$

Conforme calculado, para que o revestimento asfáltico atinja o critério de falha de fadiga com as tensões de tração das fibras inferiores da Tabela 71, será necessária a solicitação de $4,14 \times 10^6$ de eixos padrões conforme o método da ASSHTO, valor acima da solicitação para o projeto de $3,36 \times 10^6$.

Feitas as análises, o pavimento restaurado com a camada de base reciclada M2 e um revestimento asfáltico de CBUQ com 10 cm de espessura e MR de 4000 Mpa atende a todos os critérios de falha de uma análise mecanicista. Com isso, para um período de projeto de 10



anos com abertura ao tráfego em 2026, o pavimento chegará nesse horizonte dentro da sua vida útil.

Tabela 75 - Verificação ao atendimento dos critérios de falha com M2

Critério de falha	Cota (m)	Valor crítico	N falha	N projeto	Atendimento
Deflexão (D) (0,01 mm)	0	33,35	2,03E+08	1,46E+07	ATENDE
Fadiga do revestimento asfáltico (ϵt) (m/m)	9,99	2,62E-04	4,14E+06	3,36E+06	ATENDE
Deformação Subleito (ϵv) (m/m)	30,01	1,19E-04	2,96E+09	1,46E+07	ATENDE

Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

4.4.4.4 Análise mecanicista da estrutura restaurada com uma Brita Graduada Simples (BGS)

Uma das alternativas para a restauração do pavimento também pode ser a troca da camada de base deteriorada por um outro material granular, comumente o BGS. Com isso, a fim de comparar diversas alternativas, foi realizada uma análise mecanicista com a mesma estrutura de pavimento, porém com a camada sendo composta por um BGS ensaiado por Manoel Farias em sua tese: Estudo e Classificação de Solos Lateríticos Finos, Arenosos e Pedregulhosos Naturais e Melhorados com Ligantes Hidráulicos para Utilização em Camadas de Pavimentos Flexíveis (Farias, 2023).

O BGS ensaiado apresentou os seus parâmetros de MR e modelos de regressão conforme Tabela 76, trazendo o modelo composto com o melhor ajuste entre os três analisados.



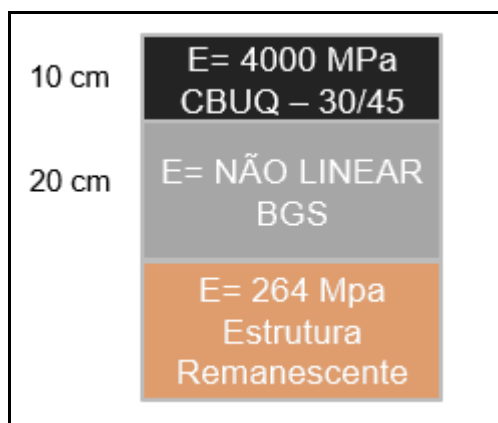
Tabela 76 - MR e coeficientes de regressão do BGS de análise

Parâmetro	PE-1	PE-1 2%	PB-2	PB-2 2%	PB-3	PB-3 2%	BGTC	BGS (BGTC 0%)
Módulo								
MR _{mínimo} (MPa)	299	675	319	515	536	607	576	155
MR _{média} (MPa)	462	843	451	1270	760	898	1522	322
MR _{máximo} (MPa)	618	1028	649	2215	1329	1494	2754	521
Modelo de regressão								
MR = $k_1 \cdot \sigma_d^{k_2}$								
Coefficiente de regressão (k_1)	298,44	1344,10	762,99	9335,38	670,76	2197,88	12686,16	1414,78
Coefficiente de regressão (k_2)	-0,15	0,17	0,19	0,74	-0,03	0,32	0,79	0,54
R ²	0,16	0,79	0,40	0,98	0,01	0,72	0,95	0,88
MR = $k_1 \cdot \sigma_d^{k_2}$								
Coefficiente de regressão (k_1)	274,24	1008,76	468,46	3565,99	495,35	1216,44	4549,43	620,60
Coefficiente de regressão (k_2)	-0,22	0,08	0,03	0,51	-0,18	0,15	0,55	0,32
R ²	0,63	0,31	0,01	0,63	0,35	0,22	0,67	0,46
MR = $k_1 \cdot \sigma_d^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3}$								
Coefficiente de regressão (k_1)	412,95	1408,32	932,98	9348,81	771,13	2803,03	14268,26	1767,34
Coefficiente de regressão (k_2)	0,25	0,24	0,51	0,75	0,41	0,59	0,78	0,68
Coefficiente de regressão (k_3)	-0,36	-0,07	-0,32	-0,02	-0,50	-0,23	0,07	-0,07
R ²	0,85	0,87	0,94	0,98	0,81	0,90	0,97	0,94

Fonte: Modificada de Farias (2023)

A estrutura composta pelo mesmo tipo de revestimento asfáltico da análise anterior, tendo o BGS substituindo a camada de base deteriorada e possuindo a mesma espessura, e mantendo a mesma estrutura remanescente possuirá a seguinte configuração da Figura 72 com o MR do BGS em função do modelo composto 13:

Figura 72 - Pavimento restaurado com camada de BGS, km 51,16



Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

$$MR = 1767,34 \times \sigma_3^{0,68} \times \sigma_d^{-0,07} \quad R^2 = 0,94 \quad (13)$$

Utilizando os mesmos pontos de análise da verificação anterior e inserindo os dados da estrutura no AEMC (Figura 73), foram obtidas as deflexões, tensões e deformações dispostas na Tabela 77, utilizadas nas equações de desempenho.



Figura 73 - Interface AEMC com dados do BGS

CAMADA	ESPESSURA (cm)	MASSA ESP (g/cm³)	COMPORTAMENTO	MÓDULO (MPa)	k1	k2	k3	k4	COEF POISSON	RIGIDEZ (k)
1	10	2,4	LINEAR	4000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,30	0
2	20	1,8	NÃO LINEAR	(149)	1767,34	0,68	-0,07	0,0	0,35	0
3	0,0	1,6	LINEAR	264	0,0	0,0	0,0	0,0	0,40	0

Tipo de carregamento:

Eixo padrão rodoviário

Eixo simples

Dois eixos simples (direcional)

Eixo duplo

Dois eixos duplos

Dois eixos duplos em tandem

EIXO DUPLO

Análise

Número de rodas: 4

Carga do eixo (ton): 8,20

Carga de roda (ton): 2,05

Pressão de pneus (MPa): 0,56

Ty (cm): 0,00

Tx (cm): 32,40

Lx (cm): 181,00

Área (cm²): 366,07

Raio (cm): 10,79

Pontos de análise e resultados

Calcular

Ferramentas >>

Ponto	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)	Ux (µm)	Uy (µm)	Uz (µm)	Sx (MPa)	Sy (MPa)	Sz (MPa)	Sxy (MPa)	Sy ^
1	0	0	0	0,27300	0,00000	375,59436	0,392323	1,178747	0,000000	0,000000	0,
2	0	16,2	0	0,27540	-28,86498	308,61367	0,323231	0,322942	0,000000	-0,000002	0,
3	0	0	9,99	-0,96756	0,00000	374,43871	-0,399824	-1,256590	0,119602	0,000000	0,
4	0	16,2	9,99	-0,97736	31,78227	307,80333	-0,309547	-0,313696	0,077963	-0,000384	0,
5	0	0	30,01	3,85519	0,00000	240,38529	0,094283	0,098980	0,107448	0,000000	0,
6	0	16,2	30,01	3,82301	-9,76106	214,46722	0,071432	0,072235	0,079859	0,000074	0,
7											
8											
9											
10											
11											
12											
13											
14											
15											
16											
17											
18											

Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

Tabela 77 - Tensões, deflexão e deformações com BGS

Critério de falha	Cota (m)	Valor crítico
Deflexão (D) (0,01 mm)	0	37,60
Fadiga do revestimento asfáltico (εt) (m/m)	9,99	2,93E-04
Deformação Subleito (εv) (m/m)	30,01	1,41E-04

Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

Para a deflexão, o valor calculado para D_{adm} manteve o mesmo em função do mesmo número N de projeto, considerado pela USACE. A deflexão encontrada na superfície da estrutura [$D = 37,60$ (0,01 mm)] foi menor do que o D_{adm} de 56,11 (0,01 mm), atendendo a esse critério de falha.

$$\log D_{adm} = k - n \times \log N$$

$$D_{adm} = 56,11 \text{ (0,01 mm)}$$



Para a deformação vertical de compressão no topo do subleito, considerando o valor disposto na Tabela 77, o pavimento falhará a partir do número N de $1,32 \times 10^9$, maior do que o N de projeto de $1,46 \times 10^7$ da USACE, atendendo também a esse critério de falha.

$$N = K \times \left(\frac{1}{\varepsilon_v} \right)^n$$

$$N = 1,32 \times 10^9$$

Por fim, para o critério de falha de fadiga do revestimento asfáltico, considerando a deformação de tração na fibra inferior do revestimento asfáltico da Tabela 77, o pavimento falhará com o número N de $2,80 \times 10^6$, número menor do que o N de projeto da ASSHTO de $3,36 \times 10^6$. Em função disso, o pavimento falhará por fadiga do revestimento antes do período de projeto de 10 anos.

$$N = K \times \left(\frac{1}{\varepsilon_t} \right)^n$$

$$N = 2,80 \times 10^6$$

A análise mecanicista, com a estrutura apresentada, constatou que o pavimento não atingirá a sua vida útil projetada, visto que o critério de falha de fadiga do revestimento não foi atendido (Tabela 78). Para que o pavimento restaurado com troca do material de base por BGS alcance a vida útil de 10 anos, são necessários ajustes na composição de sua estrutura.

Tabela 78 - Verificação ao atendimento dos critérios de falha com BGS

Critério de falha	Cota (m)	Valor crítico	N falha	N projeto	Atendimento
Deflexão (D) (0,01 mm)	0	37,60	1,04E+08	1,46E+07	ATENDE
Fadiga do revestimento asfáltico (ε_t) (m/m)	9,99	2,93E-04	2,80E+06	3,36E+06	NÃO ATENDE
Deformação Subleito (ε_v) (m/m)	30,01	1,41E-04	1,32E+09	1,46E+07	ATENDE

Fonte: Elaborada pelo autor (2026)



4.4.5 Viabilidade Técnica

A Tabela 79 demonstra que as misturas M2, para os km 51,16 e km 51,60, geraram uma melhora das características dos materiais naturais de base e atendem a todos os requisitos de norma, mesmo com menor quantidade de material adicionado em comparação com as misturas M1 desses mesmos locais.

Também foi verificado por análise mecanicista que o pavimento restaurado, no km 51,16, com uma reciclagem de base de 20 cm, dosado conforme composição M2, e um revestimento asfáltico com CAP - 30/45 de 10 cm atende a todos os critérios de falha para um tráfego calculado para um período de projeto de 10 anos, conforme dados da contagem de tráfego. Salientando que também foi feita uma análise de um pavimento na mesma localidade adotando uma solução menos sustentável, a troca do solo por uma camada de BGS e aplicação de um mesmo revestimento, e que essa estrutura não alcançou a vida útil esperada, conforme pode ser verificado na Tabela 80. Em suma, a adoção da reciclagem de base com a incorporação do resíduo do beneficiamento da scheelita não só garantiu a melhora do material de base natural, como também garantiu que o pavimento restaurado, considerando essa estrutura, com essa solução alcance a sua vida útil de projeto com menos necessidade de manutenções e menor capacidade de danos ambientais com exploração de materiais virgens e destinação de resíduos da construção.

Tabela 79 - CBR e Expansão da base natural, M1 e M2, dos km 51,16 e km 51,60

Ensaio			Km 51,16			Km 51,60		
			Base	B+50%R+40%B ₁₆ (M1)	B+50%R+15%B ₁₉ + 20%S (M2)	Base	B+50%R+40%B ₁₆ (M1)	B+50%R+15%B ₁₉ + 20%S (M2)
Energia Modificada 55 golpes	Compactação	W _{ótima} (%)	4,75	5,08	4,81	5,65	6,17	6,59
		ρ _d máx (g/cm ³)	2,30	2,29	2,28	2,27	2,21	2,19
	ISC	CBR (%)	39	75	99	48	73	95
		Expansão (%)	0,08	0,02	0,02	0,02	0,02	0,00

Fonte: Elaborada pelo autor (2026)



Tabela 80 - Atendimento aos critérios de falha dos pavimentos restaurados com M2 e BGS, km 51,16

	Critério de falha	Cota (m)	Valor crítico	N falha	N projeto	Atendimento
M2	Deflexão (D) (0,01 mm)	0	33,35	2,03E+08	1,46E+07	ATENDE
	Fadiga do revestimento asfáltico (ϵt) (m/m)	9,99	2,62E-04	4,14E+06	3,36E+06	ATENDE
	Deformação Subleito (ϵv) (m/m)	30,01	1,19E-04	2,96E+09	1,46E+07	ATENDE
BGS	Deflexão (D) (0,01 mm)	0	37,6	1,04E+08	1,46E+07	ATENDE
	Fadiga do revestimento asfáltico (ϵt) (m/m)	9,99	2,93E-04	2,80E+06	3,36E+06	NÃO ATENDE
	Deformação Subleito (ϵv) (m/m)	30,01	1,41E-04	1,32E+09	1,46E+07	ATENDE

Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

5 CONCLUSÕES

Esse trabalho teve como objetivo utilizar o resíduo proveniente do beneficiamento da scheelita como componente em uma mistura reciclada *in-situ* de um pavimento, no qual além da reutilização do próprio resíduo da mineração, foram reaproveitados os materiais de base e revestimento asfáltico da rodovia.

As misturas recicladas com diferentes proporções de adição de revestimento asfáltico, britas e resíduo foram ensaiadas com a finalidade de verificação ao atendimento de todos os parâmetros da norma DNIT 141/2022 – Base estabilizada granulometricamente (DNIT, 2022).

Foi confirmado que a adição do resíduo na mistura **Base + 50% Revestimento + 15% Brita 19 + 20% Resíduo (M2)**, gerou uma melhora das qualidades dos materiais de base dos km 51,16 e 51,60, a ponto de atender a todos os parâmetros preconizados. Em contrapartida, somente a adição de britas aos materiais de base e revestimento asfáltico não foi suficiente para a aceitação, visto que os parâmetros mecânicos das misturas **Base + 50%**



Revestimento + 40% Brita 16 (M1) para os pontos citados não conseguiram obter um valor de $\text{CBR} \geq 80\%$.

Também foram realizados ensaios para a determinação dos Módulos de Resiliência das misturas M1 e M2, das duas localidades pesquisadas. Os resultados, para as duas misturas, mostraram módulos de resiliência médio da mesma ordem de grandeza (350 – 475 MPa), acima de valores referenciais para materiais granulares comumente utilizados, como BGS, Solo-Brita e Macadame seco. Em relação aos seus comportamentos, os modelos de regressão, em função dos estados de tensões, indicaram que a tensão confinante exerce a principal influência no MR, tendo a tensão de desvio com pouco impacto nos resultados, como esperado para materiais de natureza granular.

A fim de analisar o comportamento da mistura com adição do resíduo no pavimento em que foi coletado o material de base, foi realizada uma análise mecanicista considerando a restauração da estrutura local com a reciclagem da camada de base com a dosagem da M2 e a aplicação de um revestimento asfáltico, no km 51,16. A análise mecanicista garantiu o atendimento a todos os critérios de falha, fornecendo o resultado que o pavimento com essa solução chegaria ao final do período de projeto dentro da sua vida útil. Em contrapartida, também foi realizada uma análise mecanicista da mesma estrutura considerando a troca da base degradada por um BGS com boas características, e que esse pavimento falharia antes do mesmo período considerado.

Considerando que a mistura M2, com adição de 20% do resíduo, atendeu a todos os parâmetros de norma considerando um pavimento a ser dimensionado empiricamente e que também desempenhou de forma satisfatória em uma análise mecanicista considerando fatores levantados da própria rodovia, além da questão da reutilização de um rejeito de mineração em um serviço que também reutiliza materiais da própria rodovia, garantindo menos impactos ambientais, conclui-se pela viabilidade técnica do estudo.

5.1 Sugestões para futuros trabalhos

- Realização do ensaio de Deformação Permanente, a fim de analisar o impacto da incorporação do resíduo nesse parâmetro e inserir o material no banco de dados do MeDiNa;
- Dimensionar a restauração do pavimento pelo método do MeDiNa e comparar com o dimensionado pela Instrução de Projeto do DER-SP;



- Executar um trecho experimental e monitorar, a fim de avaliar o comportamento do material em campo e determinar uma calibração campo-laboratório.
- Realizar novas dosagens com mais incorporação de RAP e resíduo, além de reduzir a quantidade de incorporação de brita, a fim de aumentar o fator sustentável da solução. Também dosar com adição de estabilizantes hidráulicos e asfálticos.



6 REFERÊNCIAS

ANGELIM, L. A. A. (org.). **Geologia e recursos minerais do estado do Rio Grande do Norte: texto explicativo dos mapas geológico e de recursos minerais do estado do Rio Grande do Norte**. Recife: CPRM; FAPERN, 2006. Escala 1:500.000. Programa Geologia do Brasil (PGB). Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/10234>. Acesso em: 23 jan.2026

ARAÚJO, A. L. de. *et al.*. Poder de mitigação da cinza de casca de arroz ao ataque por sulfatos em argamassas confeccionadas com resíduos de scheelita. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 26, n. 3, p. e13046, 2021.

ARAÚJO E FARIAS, M. L., OLIVEIRA ARAÚJO, H. A., GUEDES RODRIGUES, J. K. Análise da aplicabilidade de Sistema de Classificação Universal para solos lateríticos utilizados em camadas de pavimentos, **Transportes**, v. 31, n. 1, p. 2750., 2023. 10.58922/transportes.v31i1.2750.

ASPHALT RECYCLING AND RECLAIMING ASSOCIATION - ARRA. **Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments Participant's Reference Book**. Washington, D.C: U.S. Department of Transportation, FHWA-SA-98-042, 1997.

ASPHALT RECYCLING AND RECLAIMING ASSOCIATION - ARRA. **Basic Asphalt Recycling Manual**. Washington, D.C: U.S. Department of Transportation, FHWA-SA-98-042, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2024. **NBR 6457: Solos – Preparação de amostras para ensaios de compactação, caracterização e determinação do teor de umidade**. Rio de Janeiro, 2024

_____, 2016. **NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro, 2016.

_____, 2016. **NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro, 2016.

_____, 2019. **NBR 7809: Agregado Graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2019.

_____, 2025. **NBR 7181: Solo – Análise granulométrica**. Rio de Janeiro: ABNT, 2025

_____, 2016. **NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação**. Rio de Janeiro, 2016.

_____, 2016. **NBR 9895: Solo – Índice de Suporte Califórnia**. Rio de Janeiro, 2016.

_____, 2004. **NBR 10004: Resíduos sólidos – Classificação**, Rio de Janeiro, 2004



_____, 1991. **NBR 12051: Solo – Determinação do índice de vazios mínimo de solos não-coesivos**, Rio de Janeiro, 1991

_____, 2021. **NBR 13292: Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante**. Rio de Janeiro, 2021.

_____, 2020. **NBR 16840: Solo – Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos**, Rio de Janeiro, 2020.

_____, 2021. **NBR 16917: Agregado graúdo – Determinação da densidade e da absorção de água**, Rio de Janeiro, 2021.

_____, 2025. **NBR 17212: Solos – Determinação da massa específica dos sólidos da fração passante na peneira com abertura de 2,0 mm**. Rio de Janeiro, 2025.

_____, 2001. **NBR NM 51: Agregado graúdo – Ensaio de abrasão “Los Angeles”**, Rio de Janeiro, 2001.

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

ASTM 2017. **D2487-17: Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)**. ASTM international. West Conshohocken, 2017.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração**. Oficina de Textos, 2007.

BASU, D., MISRA, A., PUPPALA, A. J. Sustainability and geotechnical engineering: Perspectives and review. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 52, n. 1, p. 96–113, 2014. <https://doi.org/10.1139/cgj-2013-0120>

BATISTA, L. S., SILVA, O. S. da, SOUZA, L. D. P. de, GUALBERTO FILHO, A. L., & SILVA, M. A. L.. Planejamento experimental para viabilização da utilização do resíduo da scheelita como agregado miúdo em pavimentos intertravados. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 5., e25111527929, 2022 <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i5.27929>

BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. 4. ed. Rio de Janeiro: ABEDA, 2010.

BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. 2. ed. Rio de Janeiro: ABEDA, 2022.

CNT – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Pesquisa CNT de rodovias**, 2025. Brasília-DF, 2025.



CNT – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Plano CNT de transporte e logística 2018**. Brasília-DF, 2018.

DANTAS, E. P. **Geologia e recursos minerais do estado do Rio Grande do Norte: escala 1:500.000: nota explicativa dos mapas geológico e de recursos minerais do estado do Rio Grande do Norte**. Recife: CPRM; SEDEC-RN, 2024. 2 mapas. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/25192>. Acesso em: 21. Jan. 2026

DANTAS, E. P, CAVALCANTE, R. **Mapa de recursos minerais do estado do Rio Grande do Norte**. Recife: Serviço Geológico do Brasil – CPRM, 2021; 1 mapa, color. 152,84 cm x 85,05 cm. Escala 1:500.000. Programa Geologia, Mineração e Transformação Mineral. Ação Levantamentos Geológicos e Integração Geológica Regional. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/22401>. Acesso em: 21. Jan. 2026

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DO PARANÁ. **DER-PR.(2005) Pavimentação: Reciclagem de pavimento in situ com estabilização granulométrica**. DER/PR ES-P 34/05. Curitiba.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DE SÃO PAULO. **DER-SP.(2024) PROJETO DE PAVIMENTAÇÃO**. DER/SP IP-DE-P00/001-B. São Paulo.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 141/2022-ES: base estabilizada granulometricamente: especificação de serviço**. Rio de Janeiro, 2022.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Implantação Básica**. 3. ed. Rio de Janeiro: [s.n], 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de pavimentação**. 3. ed. Rio de Janeiro: [s.n.], 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT. **Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto e Pesquisas Rodoviárias 2ª ed.**, Rio de Janeiro, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 141/2022-ES: base estabilizada granulometricamente: especificação de serviço**. Rio de Janeiro, 2022.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 134/2018-ME: Solos - Determinação do módulo de resiliência - Método de Ensaio**. Rio de Janeiro, 2018.

DESA, U.N. **Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development**; United Nations: New York, NY, USA, 2016.



DINIZ, M. T. M., VASCONCELOS, F. P. A. A produção de sal marinho no Brasil e sua correção com a pluviometria anual e o crescimento econômico nacional. **Revista Caminhos da Geografia**, Uberlândia, v. 20, n. 69, p. 20-35, mar. 2019.

DIEFENDERFER, B.K., FLINTSCH, G., XUE, W., MERONI, F., BOZ, I., TIMM, D.. Structural performance of an asphalt pavement containing cold central plant recycling and full- depth reclamation. **Transp. Res. Rec**, v. 2677, n 1, p. 409–419, 2023
<https://doi.org/10.1177/03611981221099511>

DUSHMANTHA, D., JAYAKODY, S., GUI, Y., GALLAGE, C. A comprehensive review of the resilient behaviour of unbound granular pavement materials, **Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)**, v. 12, n. 3, p. 522-50, ISSN 2095-7564, 2025
<https://doi.org/10.1016/j.jtte.2024.06.004>.

FARIAS, M. L. A. e. **Estudo e Classificação de Solos Lateríticos Finos, Arenosos e Pedregulhosos Naturais e Melhorados com Ligantes Hidráulicos para Utilização em Camadas de Pavimentos Flexíveis**. 2023. 372 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2023.

Federal Highway Administration (FHWA). **Pavement Sustainability 101**. In: TRIBAL TRANSPORTATION PROGRAM WEBINAR, 2021. Sustainable pavement systems. Disponível em: <https://highways.dot.gov/sites/fhwa.dot.gov/files/images/Final-PDF-%20TTP%20Webinar%20Pavement%20Sustainability%20101%20PP%20LCCA%202.17.2021.pdf>.

GERAB, A. T. F. S. C. **Utilização do resíduo grosso do beneficiamento da scheelita em aplicações rodoviárias**. 2014. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

GONDIM, T. F., INGUNZA, M. del P. D., FREITAS NETO, O. de, & SANTOS JÚNIOR, O. F. dos.. Potencialidade de uso do resíduo da scheelita em sistemas de cobertura de aterro de resíduos. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 27, n. 3, p. 597-606, 2022.
<https://doi.org/10.1590/S1413-4152202000073>

HILL, R., & BRAHAM, A. Investigating the raveling test for full-depth reclamation. **Frontiers of Structural and Civil Engineering**, v. 12, n. 2, p. 222–226, 2018.
<https://doi.org/10.1007/s11709-017-0423-9>

QUINTANA, H., A. R, LIZCANO, F., A., R., MARTÍNEZ, J., G., B. Resilient behavior of unbound granular material: A review. **Journal of Road Engineering**, v. 5, n. 3, p. 394-413, ISSN 2097-0498, 2025.
<https://doi.org/10.1016/j.jreng.2025.01.004>.

INGUNZA, M.d.D, DOS SANTOS JÚNIOR, O.F. & GERAB, A.T.F.d.C. Potential Use of Sandy Mining Wastes as Raw Material in Road Construction. **Geotech Geol Eng**, v. 38, p. 5681–5691, 2020.



<https://doi.org/10.1007/s10706-020-01382-7>

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). **Anuário IBRAM: mineração do Brasil 2024**. Brasília, DF: IBRAM, 2025. Disponível em: <https://www.ibram.org.br>. Acesso em 25/01/2026

KAMPALA, A., SUEBSUK, J., DAPROM, P., ARNGBUNTA, A., & CHINDAPRASIRT, P. Strength characteristics and mix design of full-depth reclamation of asphalt pavement with cement. **Construction and Building Materials**, v. 438, p. 136901, 2024 <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2024.136901>

KARA, S., M., TERZI, S. Evaluation of marble waste dust in the mixture of asphaltic concrete. **Constr. Build. Mater**, v. 21, p. 616–620, 2007 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.12.001>

KASEER, F., ARÁMBULA-MERCADO, E., EPPS, J., MARTIN, A. E., & CECCOVILLI, R. Full-depth reclamation (FDR) mix design: Proposed revisions to the indirect tensile strength thresholds. **Construction and Building Materials**, v. 254, p. 119283, 2020. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.119283>

KHALLAGHI, F., & MALLICK, R. B. Sustainable pavement recycling with the use of different binders in full depth reclamation (FDR). **Journal of Cleaner Production**, v. 515, p. 145838, 2025. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2025.145838>

KHAN, S., LI, H., NCUBE, M. H., BUTT, A. A., HAN, Y., HARVEY, J. Environmental implications of recycled materials in pavement construction: A comprehensive review and future research directions. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 140, p. 104642, 2025. <https://doi.org/10.1016/J.TRD.2025.104642>

MACEDO, J. W. N. de; SOUZA, J. M. de; SILVA, V. M. da; ACCHAR, W. Argamassa de revestimento produzida a partir da substituição do agregado natural por subproduto de scheelita e pó de pedra. **Revista Principia**, [S. l.], v. 61, n. 4, p. 1099–1120, 2024. 10.18265/1517-0306a2022id7413.

MACHI, C. T., EVERS, E., SCHMIDT, J., CRAYTON, A. **Pavement Rehabilitation Analysis: A Life-Cycle Cost and Long-Term Performance Comparison of Full Depth Reclamation and Overlays**. University of Colorado Boulder, 2024

Medina, J.; Motta, L. M. G. **Mecânica dos pavimentos**. 1. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2015.

NETA, M. de L. X. de F.; BARROS, S. V. A., DANTAS, G. C. B., MELO, S. B. de, NEVES, G. de A., SANTOS, V. da S., SILVA, W. G. da. Avaliação da reatividade ao ataque químico de resíduo oriundo da mineração da scheelita utilizado como agregado em argamassas cimentícias. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 26, n. 6, p. 1135–1142, nov. 2021.



10.1590/s1413-415220200183

RAMOS FILHO, R. E. B. **Estudo da combinação de resíduo de scheelita, pó de pedra e manipueira com aglomerantes para produção de tijolos ecológicos**. 2021. 155 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2021.

RIO GRANDE DO NORTE. **Multinacional quer pesquisar a existência de scheelita no RN**. Secretaria do Desenvolvimento Econômico. 2016. Disponível em: <http://www.consecti.org.br/giro-nos-estados/multinacional-quer-pesquisar-existencia-de-scheelita-no-rn/>. Acesso em: 21 fev. 2025.

OLIVEIRA, J., SILVA, H., MARTINS, A., CORREIA, E., PRAGOSA, J., MENDES, P. A pavement full-depth reclamation case study using cold in situ recycling with foamed bitumen. **Transportation Research Procedia**, v.72, p. 4183-4190, ISSN 2352-1465, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.356>.

OLIVEIRA, P.C.A. **Reciclagem Profunda de Pavimentos: Conceitos e aplicações**. Crasa Infraestrutura, 2025. *E-Book*.

ORDEN, H. G., UNAMUNZAGA, A. L., ACEBO, H. P., MINGUELA, J. D. Advances in the study of the behavior of full-depth reclamation (FDR) with cement. **Applied Sciences**, Switzerland, v. 9, n. 15, p. 3055, 2019. <https://doi.org/10.3390/app9153055>

PRATICÒ, F., SARIDE, S., PUPPALA, A. Comprehensive life cycle cost Analysis for the selection of stabilization alternative for better performance of low volume roads. In Proceedings of the 10th Low Volume Roads Conference. **Transportation Research Board**, Washington, v. 2, p. 120–129, 2011. 10.3141/2204-16.

SARGIN, S.; SALTAN, M.; MOROVA, N.; SERIN, S.; TERZI, S. Evaluation of rice husk ash as filler in hot mix asphalt concrete. **Constr. Build. Mater**, v. 48, p. 390–397, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.029>

SHARHOLY, M., AHMAD, K., MAHMOOD, G., TRIVEDI, R.C. Municipal solid waste management in Indian cities—a review. **Waste Manag**, v. 28, n. 2, p. 459–467, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.02.008>

SILVA, G. A. et al. (org.). **Estudo geo econômico do Estado do Rio Grande do Norte**. Natal: CPRM, 2025. 1 recurso eletrônico (PDF). (Informe de Recursos Minerais, Série Economia Mineral, 4).

SOUZA, G. M. de, AMORIM, E. F., ANJOS, M. A. S. dos, FRANÇA, F. A. N. de.. Estudo de misturas compostas por resíduos de scheelita e solos destinados a pavimentação. **Ambiente Construído**, v. 23, n. 3, 2023. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212023000300679>



SOUZA, M. M. de. **Desenvolvimento de agregados leves a partir de resíduo de scheelita, lodo de esgoto e cinza da casca do arroz**. 2019. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

VALVERDE, F. M. O “novo normal” na indústria de agregados. **Revista Areia & Brita**, São Paulo, ed. 76, p. 15-17, dez. 2020. Disponível em: <https://anepac.org.br/revistas/edicao-76-dezembro-2020/>. Acesso em: 21 fev. 2022.

YODER, E. J.; WITCZAK, M. W. **Principles of pavement design**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1975

ZHANG, D.Q., TAN, S.K., GERSBERG, R.M. Municipal solid waste management in China: status, problems and challenges. **J. Environ. Manage**, v. 91, n. 8, p. 1623–1633, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.03.012>