

Eduardo Schaefer Sombrio

**PROPOSIÇÃO DE SOLUÇÕES DE REVESTIMENTOS PARA
PAVIMENTOS FLEXÍVEIS E CONTROLE DE EXECUÇÃO COM BASE NA
DEFLEXÃO – ESTUDO DE CASO: OBRA DO CONTORNO RODOVIÁRIO
DE FLORIANÓPOLIS/SC**

Trabalho de conclusão do curso de Engenharia Civil do
Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa
Catarina como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Liseane Padilha Thives

Florianópolis
2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Sombrio, Eduardo Schaefer

Proposição de soluções de revestimentos para pavimentos flexíveis e controle de execução com base na deflexão – estudo de caso: obra do contorno rodoviário de Florianópolis/SC / Eduardo Schaefer Sombrio; orientadora, Liseane Padilha Thives - Florianópolis, SC, 2017.

160 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2017.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Controle deflectométrico. 3. Viga Benkelman. 4. Pavimento. I. , Liseane Padilha Thives. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

Eduardo Schaefer Sombrio

**PROPOSIÇÃO DE SOLUÇÕES DE REVESTIMENTOS PARA
PAVIMENTOS FLEXÍVEIS E CONTROLE DE EXECUÇÃO COM BASE NA
DEFLEXÃO – ESTUDO DE CASO: OBRA DO CONTORNO RODOVIÁRIO
DE FLORIANÓPOLIS/SC**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado e aprovado, em sua forma final, pelo Curso de Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 19 de junho de 2017.

Prof.^a Lia Caetano Bastos, Dr.^a.

Chefe de departamento

Banca Examinadora:



Prof.^a Liseane Padilha Thives, Dr.^a.

Orientadora

Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Rafael Augusto dos Reis Higashi, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.^a Keyla Junko Chaves Shinohara, Dr.^a.

Instituto de Ensino Superior da Grande Florianópolis - IESGF

“O homem que consagra suas horas com infatigável empenho a honrosos objetivos, traça luminosamente o seu destino. “

Edward Kong

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida e por ter me iluminado nessa caminhada.

A meus pais Elias e Hilda, por imensa e incomparável dedicação na busca para me proporcionar sempre o melhor, pela educação e ensinamentos constantes. Sempre foram e serão meus exemplos de inspiração. Se cheguei até aqui, grande parte foi devido a eles.

À professora e amiga Liseane, pela oportunidade de realização desse trabalho. Obrigado pela troca de experiências e conhecimentos, pela atenção, disponibilidade, correções, dedicação, atenção, paciência e confiança. Não posso deixar de citar as conversas e risadas durante a orientação desse trabalho. Muito obrigado!

À empresa Engevix e seus coordenadores, por liberarem a utilização do material para realização desse trabalho.

Aos colegas e amigos de trabalho, em especial à Camila Schmidt pela ideia inicial do trabalho, ajuda em obtenção dos materiais e troca de informações e ao Gian Carlo, pela ajuda nas simulações computacionais e troca de conhecimentos na área de pavimentação.

À equipe da Autopista Litoral Sul, que se disponibilizaram e foram atenciosos no esclarecimento de algumas dúvidas e ajudaram com os materiais.

Aos professores do Departamento de Engenharia Civil, pela dedicação, pelos conhecimentos transmitidos e por terem contribuído para a minha formação.

Por fim, agradeço a todos que de alguma maneira contribuíram para a realização desse trabalho.

RESUMO

A execução de obras de infraestrutura rodoviária requer grandes investimentos públicos, os quais influenciam de maneira determinante no desenvolvimento social e econômico de uma região. Obras executadas em desacordo com as exigências de projeto e projetos elaborados de forma inadequada resultam em desperdício e ao dolo ao erário. Nas obras rodoviárias, de relevante importância é a pavimentação. Da mesma maneira, pavimentos mal dimensionados ou com inadequado controle de qualidade representam um ônus tanto social quanto econômico, implicando na sua deterioração precoce e no aumento dos custos diretos e indiretos relacionados à operação rodoviária e à manutenção. Neste contexto, o presente trabalho trata da proposição de revestimentos com base em leis de fadiga de misturas asfálticas desenvolvidas em laboratório. Adicionalmente é avaliado o controle da compactação por meio da deflexão das camadas durante a execução. O estudo de caso foi realizado no Contorno Rodoviário de Florianópolis/SC, Estado de Santa Catarina. Foram propostas metodologias de controle e execução em campo e dimensionamento. Como resultado obteve-se o comparativo das deflexões obtidas em campo com os valores admissíveis, durante etapas diferentes de projeto, além da escolha da mistura asfáltica a ser utilizada na obra. Observou-se que o controle de compactação com métodos tradicionais deve ser utilizado como auxílio à deflectometria. Solos com elevada resistência devem ser considerados na análise, cujo desempenho não pode ser verificado pelo valor do CBR (*California Bearing Ratio*) e da expansão. A adoção de trechos experimentais auxilia no aprimoramento da execução e controle de pavimentos rodoviários.

Palavras-chave: pavimento, controle deflectométrico, viga Benkelman, revestimento.

ABSTRACT

The execution of road infrastructure projects requires large public investments which influence in the social and economic development of a region. Works performed in disagreement with the design requirements and inadequately designed projects result in waste and fraud to the treasury. In roadworks, paving is very relevant. In the same way, poorly dimensioned pavements or with bad quality control represent both social and economic onus, implying on its early deterioration and increasing the direct and indirect costs related to road operation and maintenance. In this context, the present work deals with the proposal of coatings based on fatigue laws of asphalt mixtures developed in laboratory. Additionally, it is evaluated the control of the compaction by the deflection of the layers during the execution. The case study was carried out in the Road Contour of Florianópolis County, State of Santa Catarina. Methodologies of field control and execution and design were proposed. As a result, a comparison was made of the deflections obtained in the field with the permissible values, during the different stages of the project, besides the choice of the asphalt mixture to be used in the work. It was observed that the compaction control using traditional methods should be used as an aid to deflectometry. Soils with high resistance that performance cannot be verified by the value of CBR (California Bearing Ratio) and expansion should be considered in the analysis. The adoption of test tracks helps to improve the execution and control of road pavements.

Keywords: pavements, deflection control, Benkelman beam, coating.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Seção típica do pavimento flexível e distribuição de tensões	26
Figura 2. Seção típica do pavimento rígido e distribuição de tensões	27
Figura 3. Seção típica do pavimento semirrígido	28
Figura 4. Curva de compactação.....	32
Figura 5. Curva pressão <i>versus</i> penetração - com correção.....	35
Figura 6. Indicação genérica dos equipamentos para compactação e materiais.....	37
Figura 7. Representação da aplicação da carga no pavimento e deflexão nas camadas.....	40
Figura 8. Viga Benkelman.....	41
Figura 9. Equipamento tipo FWD.....	43
Figura 10. Deflexões viga Benkelman entre estacas 3 e 35.....	48
Figura 11. Deflexões viga Benkelman entre estacas 1111 e 1126.....	49
Figura 12. Estruturas de pavimento analisadas.....	50
Figura 13. Deflexões calculadas para o ponto de avaliação X_1	51
Figura 14. Estrutura de referência do método DNER-PRO 269/94	55
Figura 15. Fluxograma do método empírico-mecanicista	57
Figura 16. Esquema de solicitações em um pavimento flexível.....	58
Figura 17. Testes para a realização de ensaios de resistência à fadiga.....	61
Figura 18. Deformação permanente estrutural	62
Figura 19. Diferentes formatos de geogrelha.....	63
Figura 20. Geocélula.....	65
Figura 21. Localização do estado de Santa Catarina no Brasil e dos municípios da Grande Florianópolis.....	66
Figura 22. Localização da rodovia BR-101 em Santa Catarina.....	67
Figura 23. Imagem aérea do Contorno Rodoviário de Florianópolis/SC.....	68
Figura 24. Localização dos trechos experimentais na obra	69
Figura 25. Fluxograma do estudo	71
Figura 26. Deflexões admissíveis - pré-dimensionamento.....	74
Figura 27. Seção transversal típica em aterro H2.....	76
Figura 28. Nivelamento da camada RSL.....	77
Figura 29. Medição das deflexões	77
Figura 30. Posição de leituras de deflexão H2.....	78
Figura 31. Execução da camada de bloqueio.....	79
Figura 32. Colocação da Geogrelha.....	79
Figura 33. Lançamento da 1ª camada de macadame seco	80
Figura 34. Execução da 2ª camada de macadame seco	80
Figura 35. Compactação da BGS.....	81
Figura 36. Seção transversal típica em aterro G2	82
Figura 37. Posição de leituras de deflexão G2.....	83
Figura 38. Seção transversal típica em aterro M2	86
Figura 39. Posição de leituras de deflexão RSL M2.....	87
Figura 40. Posição de leituras de deflexão M2 – pó de pedra	89
Figura 41. Posição de leituras de deflexão M2 – BGS	89
Figura 42. Deflexões admissíveis – novo projeto.....	91
Figura 43. Esquema da distribuição de carregamento	93
Figura 44. Dados de carregamento	94
Figura 45. Média dos resultados dos ensaios de GC	97
Figura 46. Estrutura trecho experimental H2.....	98
Figura 47. Estrutura trecho experimental G2.....	98
Figura 48. Estrutura trecho experimental M2.....	99
Figura 49. Deflexão admissível na camada de macadame seco – dimensionamento preliminar	99
Figura 50. Novas deflexões RSL H2	102
Figura 51. Novas deflexões rachão H2	102
Figura 52. Novas deflexões macadame H2	103
Figura 53. Novas deflexões BGS H2.....	103
Figura 54. Novas deflexões RSL G2	104
Figura 55. Novas deflexões rachão G2	105
Figura 56. Novas deflexões BGS G2.....	105
Figura 57. Novas deflexões Macadame G2	106
Figura 58. Novas deflexões RSL M2.....	108
Figura 59. Novas deflexões rachão M2	108
Figura 60. Novas deflexões macadame M2.....	109

Figura 61. Novas deflexões BGS M2	109
Figura 62. Comparativo das deflexões RSL H2	141
Figura 63. Comparativo das deflexões macadame H2	141
Figura 64. Comparativo das deflexões BGS H2	142
Figura 65. Comparativo das deflexões RSL G2	142
Figura 66. Comparativo das deflexões macadame G2	143
Figura 67. Comparativo das deflexões BGS G2	143
Figura 68. Comparativo das deflexões RSL M2.....	144
Figura 69. Comparativo das deflexões 1ª camada macadame M2	144
Figura 70. Comparativo das deflexões 2ª camada macadame M2	145
Figura 71. Comparativo das deflexões pó de pedra M2	145
Figura 72. Comparativo das deflexões BGS M2	146
Figura 73. Resumo novas deflexões RSL H2 (lote)	147
Figura 74. Resumo novas deflexões rachão H2 (lote)	149
Figura 75. Resumo novas deflexões macadame H2 (lote).....	150
Figura 76. Resumo novas deflexões BGS H2 (lote).....	152
Figura 77. Resumo novas deflexões RSL G2 (lote)	153
Figura 78. Resumo novas deflexões rachão G2 (lote).....	154
Figura 79. Resumo novas deflexões macadame G2 (lote).....	155
Figura 80. Resumo novas deflexões BGS G2 (lote).....	156
Figura 81. Resumo novas deflexões RSL M2 (lote).....	157
Figura 82. Resumo novas deflexões rachão M2 (lote)	158
Figura 83. Resumo novas deflexões macadame M2 (lote).....	159
Figura 84. Resumo novas deflexões BGS M2 (lote).....	160

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Características dos diferentes ensaios de compactação	33
Quadro 2. Correlação entre Viga Benkelman e FWD	44
Quadro 3. Deflexões para a estrutura sem revestimento primário	50
Quadro 4. Deflexões para a estrutura com revestimento primário	51
Quadro 5. Espessura mínima do revestimento asfáltico.....	53
Quadro 6. Coeficientes de equivalência estrutural	54
Quadro 7. Classificação dos solos	55
Quadro 8. Valores das constantes I_1 e I_2	56
Quadro 9. Diferenças entre tensão controlada e deformação controlada em testes de fadiga.....	60
Quadro 10. Fatores que atuam no afundamento de trilha de roda nos revestimentos asfálticos	62
Quadro 11. Número "N" utilizado no dimensionamento	71
Quadro 12. Dimensionamento preliminar do pavimento - segmentos em aterro	72
Quadro 13. Propriedades das camadas do pavimento proposto	73
Quadro 14. Deformações admissíveis - segmentos em aterro	74
Quadro 15. Deformações atuantes - segmentos em aterro	74
Quadro 16. Características dos solos - trechos experimentais.....	75
Quadro 17. Resultados VB RSL H2.....	78
Quadro 18. Resultados VB Macadame Seco H2	81
Quadro 19. Resultados VB BGS H2	82
Quadro 20. Resultados VB RSL G2.....	84
Quadro 21. Resultados VB Macadame Seco G2	84
Quadro 22. Resultados VB BGS G2	85
Quadro 23. Resultados VB RSL M2	87
Quadro 24. Resultados VB 1ª camada de Macadame Seco M2	88
Quadro 25. Resultados VB 2ª camada de Macadame Seco M2	88
Quadro 26. Resultados VB Pó de Pedra M2	89
Quadro 27. Resultados VB BGS M2.....	90
Quadro 28. Ensaio de grau de compactação	90
Quadro 29. Propriedades das camadas do novo pavimento proposto	91
Quadro 30. Misturas asfálticas utilizadas	92
Quadro 31. Leis de fadiga utilizadas	93
Quadro 32. Estruturas de pavimento simuladas	94
Quadro 33. Estrutura do pavimento e valores de deflexão admissível – dimensionamento preliminar.....	100
Quadro 34. Estrutura do pavimento e valores de deflexão admissível – novo projeto	100
Quadro 35. Resumo das novas deflexões – estacas trecho experimental H2	101
Quadro 36. Resumo novas deflexões (sem macadame) – estacas trecho experimental G2	104
Quadro 37. Resumo novas deflexões macadame – estacas trecho experimental G2	106
Quadro 38. Resumo novas deflexões – estacas trecho experimental M2.....	107
Quadro 39. Estrutura do pavimento e valores de deflexão admissível – novo projeto com CBR=8%.....	110
Quadro 40. Resultados estrutura do pavimento simulada – CBR=4%.....	111

Quadro 41. Resultados estrutura do pavimento simulada – CBR=8%.....	112
Quadro 42. Resultados obtidos de N em função da deformação ϵ_i e espessura – CBR=4%	113
Quadro 43. Resultados obtidos de N em função da deformação ϵ_i e espessura – CBR=8%	113
Quadro 44. Resumo novas deflexões RSL H2 (lote).....	147
Quadro 45. Resumo novas deflexões rachão H2 (lote)	148
Quadro 46. Resumo novas deflexões macadame H2 (lote).....	149
Quadro 47. Resumo novas deflexões BGS H2 (lote)	151
Quadro 48. Resumo novas deflexões RSL G2 (lote).....	152
Quadro 49. Resumo novas deflexões rachão G2 (lote)	153
Quadro 50. Resumo novas deflexões macadame G2 (lote).....	154
Quadro 51. Resumo novas deflexões BGS G2 (lote).....	155
Quadro 52. Resumo novas deflexões RSL M2 (lote).....	156
Quadro 53. Resumo novas deflexões rachão M2 (lote).....	157
Quadro 54. Resumo novas deflexões macadame M2 (lote)	158
Quadro 55. Resumo novas deflexões BGS M2 (lote)	159

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- AASHTO – *American Association of State Highway and Transportation Officials*
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ANTT – Agência Nacional de Transportes Terrestres
- ATR – Afundamento de trilha de roda
- BBB – Mistura convencional com betume CAP 50/70 e granulometria DNIT Faixa “C”
- BD – Bordo direito
- BE – Bordo esquerdo
- BISAR – *Bitumen Stress Analysis in Roads*
- BGS – Brita Graduada Simples
- CA – Concreto asfáltico
- CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo
- CAUQ – Concreto Asfáltico Usinado a Quente
- CBR – *California Bearing Ratio*
- CBUQ – Concreto Betuminoso Usinado a Quente
- CNT – Confederação Nacional do Transporte
- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
- DEINFRA – Departamento Estadual de Infraestrutura/SC
- DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
- ESRD – Eixo padrão de rodas duplas
- ESTIG – Escola Superior de Tecnologia e Gestão
- EUA – Estados Unidos da América
- EX – Eixo
- FHWA – *Federal Highway Administration*
- FWD – *Falling Weight Deflectometer*

IBBbB1 – Mistura *Asphalt Institute* com betume brasileiro e borracha brasileira mais 1% de betume em relação à porcentagem ótima

IPB – Instituto Politécnico de Bragança

ISC – Índice de Suporte Califórnia

MR – Módulo de resiliência

N – Número equivalente de eixos-padrão

NA – Nanoargila

NTC – Nanotubo de carbono

NBR – Norma brasileira, denominação de norma da ABNT

RS – Rio Grande do Sul

RP – Revestimento primário

RSL – Reforço do Subleito

SBS – *Styrene-Butadiene-Styrene* (Estireno-Butadieno-Estireno)

SNV – Sistema Nacional de Viação

SC – Santa Catarina

PN – Pista Norte

PS – Pista Sul

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

USACE – *United States Army Corps of Engineers*

VB – Viga Benkelman

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	21
1.1 OBJETIVOS.....	22
1.1.1 Objetivo geral.....	22
1.1.2 Objetivos específicos.....	22
1.2 CONTEÚDO E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	23
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	25
2.1 PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS.....	25
2.1.1 Tipos de pavimento.....	25
2.1.2 Camadas dos pavimentos flexíveis.....	28
2.2 COMPACTAÇÃO.....	30
2.2.1 Ensaios de laboratório.....	31
2.2.2 California Bearing Ratio (CBR).....	34
2.2.3 Compactação em campo.....	36
2.2.3.1 Equipamentos.....	36
2.2.3.2 Controle.....	37
2.3 AUSCULTAÇÃO ESTRUTURAL.....	39
2.3.1 Equipamentos.....	41
2.3.2 Controle das deflexões em campo.....	45
2.3.2.1 Retroanálise.....	46
2.4 ESTUDOS DE CASO.....	47
2.5 MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS.....	52
2.5.1 Método do DNIT.....	52
2.5.2 Método da Resiliência (TECNAPAV).....	54
2.5.3 Método empírico-mecanicista.....	56
2.6 CRITÉRIOS DE RUÍNA DOS PAVIMENTOS FLEXÍVEIS.....	57
2.6.1 Fadiga.....	57
2.6.1.1 Tipos de testes de resistência à fadiga.....	60
2.6.2 Deformação permanente.....	61
2.7 GEOGRELHAS E GEOCÉLULAS.....	62
3. MATERIAIS E MÉTODO.....	66
3.1. ENQUADRAMENTO.....	66
3.2 GEOLOGIA.....	69
3.3 MÉTODO.....	70
3.3.2 Execução dos trechos experimentais (pistas de teste).....	75

3.3.3 Novo projeto	91
3.3.4 Estudo para as estruturas de pavimento	92
4. RESULTADOS	97
4.1 TRECHOS EXPERIMENTAIS	97
4.2 DEFLEXÕES ADMISSÍVEIS	99
4.3 NOVAS DEFLEXÕES DE CAMPO	100
4.4 SIMULAÇÕES	110
4.5 PROPOSIÇÃO DE MELHORIAS PARA CONTROLE E DIMENSIONAMENTO	113
5. CONCLUSÕES	115
6. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	117
REFERÊNCIAS.....	115

ANEXOS

ANEXO A – DENSIDADE <i>IN SITU</i> SUBLEITO H2	125
ANEXO B – CARATECRIZAÇÃO DO SUBLEITO H2	126
ANEXO C – GRANULOMETRIA BRITA ¾”	127
ANEXO D – ESPECIFICAÇÃO FORNIT® J600-40	128
ANEXO E – PROJETO BASE BGS ARTERIS	129
ANEXO F – GRANULOMETRIA BGS H2.....	132
ANEXO G – DENSIDADE <i>IN SITU</i> BGS H2	135
ANEXO H – DENSIDADE <i>IN SITU</i> SUBLEITO G2	136
ANEXO I - CARATERIZAÇÃO DO SUBLEITO G2.....	137
ANEXO J – DENSIDADE <i>IN SITU</i> BGS G2	138
ANEXO K – DENSIDADE <i>IN SITU</i> SUBLEITO M2	139
ANEXO L – GRANULOMETRIA PÓ DE PEDRA	140

APÊNDICES

APÊNDICE A – COMPARATIVO ENTRE DEFLEXÕES DE CAMPO E ADMISSÍVEIS	141
APÊNDICE B – RESULTADOS DAS DEFLEXÕES DE CAMPO CONSIDERANDO O LOTE COMPLETO	147

1. INTRODUÇÃO

Por meio dos sistemas de transportes é viabilizada a integração entre produtores e consumidores, dos quais resultam diversos benefícios socioeconômicos e ambientais para um país. A infraestrutura dos sistemas de transporte deve fornecer condições adequadas e suporte necessário para o transporte de passageiros e cargas, caso contrário, os benefícios são reduzidos. No Brasil, o meio rodoviário é o mais utilizado e representa 61,1% do transporte de cargas e 95% de passageiros (CNT, 2016). Neste contexto, é importante que a infraestrutura rodoviária não apresente deficiências e atenda aos requisitos de segurança e conforto ao usuário.

De acordo com o Sistema Nacional de Viação (SNV), dos 1,7 milhões de quilômetros de estradas brasileiras, em torno de 212 mil está pavimentado, o que representa apenas 12,3% da malha. A pesquisa realizada em 2016 pela Confederação Nacional de Transporte (CNT) mostrou que, dos 103.259 quilômetros analisados entre rodovias federais e estaduais, 58,2% apresentam algum tipo de problema no estado geral, cuja avaliação considera as condições do pavimento, da sinalização e da geometria da via. Em relação ao pavimento, 48,3% dos trechos avaliados receberam classificação regular, ruim ou péssimo. Na sinalização, 51,7% das rodovias apresentaram algum tipo de deficiência. Na variável geometria da via foram constadas falhas em 77,9% da extensão pesquisada (CNT, 2016).

Os resultados pouco satisfatórios das condições das rodovias brasileiras são agravados pela sobrecarga, aliada à ausência de investimentos em manutenção e/ou conservação necessários. Estes fatores têm contribuído para a deterioração da malha rodoviária brasileira (CNT, 2016). Adicionalmente, outros fatores importantes que contribuem para o estado atual dos pavimentos das rodovias brasileiras são: o uso e dosagem de materiais de construção inadequados, dimensionamento por meio de métodos ultrapassados e excesso de carga atuante sem controle e fiscalização.

Neste sentido, a rede temática de asfalto, apoiada pela Petrobrás auxiliou algumas Universidades brasileiras na melhoria dos laboratórios de pavimentação e na construção de trechos experimentais monitorados para o desenvolvimento de uma metodologia de dimensionamento de pavimentos. Dentre estas, a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), por meio do laboratório de pavimentação do

Departamento de Engenharia Civil pôde adquirir um equipamento para determinação da vida de fadiga de misturas asfálticas. As leis de fadiga são utilizadas em metodologias empírico-mecanicistas para determinação da vida de projeto da estrutura do pavimento de maneira mais fidedigna em relação às metodologias empíricas de dimensionamento, caso das metodologias atualmente utilizadas e normatizadas no Brasil.

Além do adequado dimensionamento, uso de materiais de qualidade nas camadas que compõem o pavimento e controle de laboratório, o acompanhamento da execução em campo é de suma importância. As camadas que compõem o pavimento (base, sub-base, reforço e subleito) devem apresentar resistência definida em projeto de modo que este atenda à vida útil esperada.

Este trabalho trata da proposição de revestimentos com base em leis de fadiga de misturas asfálticas desenvolvidas em laboratório e do controle de execução por meio da deflexão das camadas do pavimento. O estudo de caso foi realizado no Contorno Rodoviário de Florianópolis/SC, na rodovia BR-101/SC, no qual uma série de trechos experimentais de 50 m de comprimento foi executada. Foram selecionados os trechos experimentais H2, G2 e M2 por apresentarem soluções geotécnicas diferentes, possibilitando a comparação dos resultados.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Analisar o controle pela deflectometria na execução das camadas adotadas em estruturas de pavimentos dos trechos experimentais da obra do Contorno Rodoviário de Florianópolis/SC e proposição de revestimentos com base em leis de fadiga.

1.1.2 Objetivos específicos

Com a finalidade de atingir o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos foram definidos:

- a) Avaliar os resultados dos ensaios de deflectometria em campo com o uso da viga

Benkelman;

- b) Comparar as deflexões admissíveis de projeto com as deflexões obtidas em campo;
- c) Simular estruturas de pavimento com diferentes misturas asfálticas, para encontrar a melhor opção a ser executada na camada final de revestimento da obra do Contorno Rodoviário de Florianópolis/SC;
- d) Analisar as deflexões das misturas asfálticas simuladas;
- e) Propor melhorias no controle, dimensionamento e execução de pavimentos.

1.2 CONTEÚDO E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado da seguinte forma:

Capítulo 1 – Introdução

No primeiro capítulo, faz-se a apresentação geral do assunto e dos objetivos geral e específicos, os quais delimitaram as diretrizes deste trabalho. É também apresentada a estrutura e a organização do trabalho.

Capítulo 2 – Revisão bibliográfica

O segundo capítulo aborda aspectos da literatura referentes ao tema do trabalho: conceito, função, constituição e tipos dos pavimentos. Compactação: conceito, como executar, equipamentos e controle (ensaios). Auscultação estrutural: conceito, equipamentos, controle e estudos de caso. Métodos de dimensionamento, critérios de ruína de pavimentos flexíveis, geogrelhas e geocélula.

A ênfase do trabalho será dada ao controle deflectométrico das camadas de pavimentos e às leis de fadiga de revestimentos.

Capítulo 3 – Método e área de estudo

No terceiro capítulo é exposta a caracterização da área de estudo, o método utilizado e os dados da execução dos trechos experimentais.

Capítulo 4 – Resultados

No quarto capítulo são apresentados como foram adotadas as deflexões

admissíveis, os comparativos entre os ensaios de deflectometria, as simulações realizadas com diferentes misturas asfálticas e a análise dos resultados.

Capítulo 5 – Conclusões

No quinto capítulo são apresentadas as conclusões fundamentadas a partir dos resultados obtidos.

Capítulo 6 – Recomendações para trabalhos futuros

No sexto capítulo são apresentadas as recomendações para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

Referências, apêndices e anexos

Por fim, são listadas as referências utilizadas durante a execução deste trabalho, os anexos e apêndices.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão abordados os temas principais que regem as diretrizes deste trabalho. Entre os temas estão: pavimentos, compactação, controle de execução com base na deflectometria, geogrelhas e geocélulas, métodos de dimensionamento e critérios de ruína de pavimentos flexíveis.

2.1 PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

De acordo com o Manual de Pavimentação do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), o termo pavimento significa:

Superestrutura constituída por um sistema de camadas de espessuras finitas, assentes sobre um semi-espaço considerado teoricamente como infinito – a infraestrutura ou terreno de fundação, a qual é designada de subleito (BRASIL, 2006b).

Bernucci *et al.* (2008) complementam que o pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplanagem, destinada técnica e economicamente a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, e a propiciar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança.

Segundo Santana (1993), pavimento é uma estrutura construída sobre a superfície obtida pelos serviços de terraplanagem com a função principal de fornecer ao usuário segurança e conforto, que devem ser conseguidos sob o ponto de vista da engenharia, isto é, com a máxima qualidade e o mínimo custo.

2.1.1 Tipos de pavimento

Os pavimentos rodoviários são classificados em rígidos, semirrígidos e flexíveis. Estas designações referem-se à diferença de comportamento quando solicitados por um carregamento em determinadas condições climáticas.

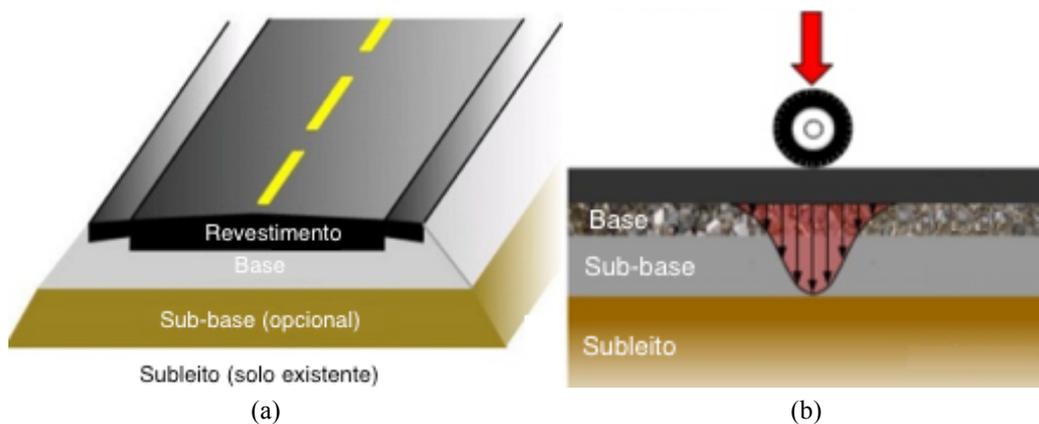
Pavimento flexível

Pavimento flexível (ou asfáltico) é aquele onde todas as camadas sofrem

deformação elástica significativa sob o carregamento aplicado e, portanto, a carga se distribui em parcelas aproximadamente equivalentes entre as camadas (BRASIL, 2006b). Os pavimentos asfálticos são aqueles onde o revestimento é composto por uma mistura formada basicamente por agregados e ligantes asfálticos, podendo conter aditivos (melhorador de adesividade, asfaltos modificados).

Em geral, estes pavimentos são compostos por quatro principais camadas: subleito, sub-base, base e revestimento asfáltico. Dependendo da capacidade de suporte do subleito, pode ainda apresentar uma camada denominada de reforço do subleito. A camada de revestimento pode ser composta pela camada de rolamento que está em contato direto com as rodas dos veículos e por camadas intermediárias ou de ligação, denominadas de *binder*. É possível a ausência de algumas camadas (sub-base e revestimento) dependendo do tráfego, da capacidade de suporte do subleito, da rigidez e espessura das camadas, das condições ambientais e da disponibilidade dos materiais (BRASIL, 2006b; BERNUCCI *et al.*, 2008). A Figura 1 ilustra a seção típica do pavimento flexível em (a) e a distribuição de tensões devida à aplicação de uma carga sobre o pavimento flexível em (b).

Figura 1. Seção típica do pavimento flexível e distribuição de tensões



Fonte: Adaptado de Muench (2003).

Pavimento rígido

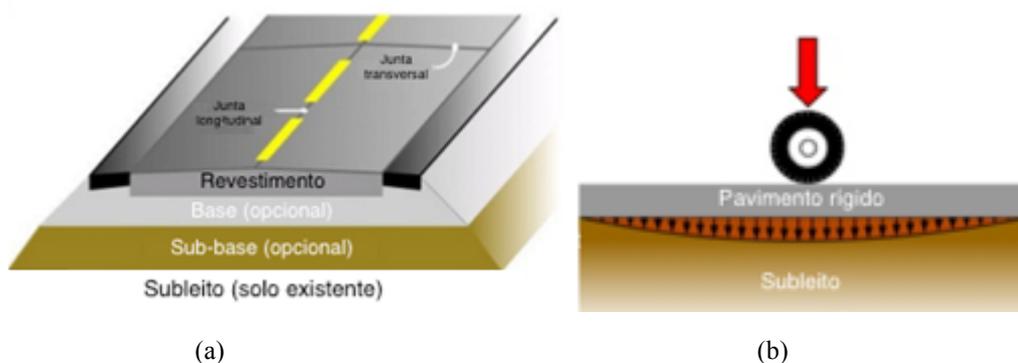
Pavimento rígido (ou de concreto) é aquele em que o revestimento apresenta uma elevada rigidez em relação às outras camadas absorvendo praticamente todas as tensões provenientes do carregamento aplicado (BRASIL, 2006b). O revestimento é composto por uma placa de concreto de cimento Portland, sendo a

espessura fixada de acordo com a resistência à flexão da mesma e das resistências das camadas subjacentes.

Bernucci *et al.* (2008) afirmam que no caso de pavimentos de concreto de cimento Portland, devido à elevada rigidez do revestimento em relação às demais camadas, as cargas de superfície são distribuídas por uma grande área em relação à área de contato pneu-pavimento, aliviando dessa forma as tensões transmitidas às camadas adjacentes.

Segundo Momm (1998), a camada de revestimento do pavimento em concreto asfáltico, deve apresentar uma superfície regular, não derrapante e resistente ao desgaste contínuo do tráfego. Deve ainda garantir um valor de ruído mínimo e assegurar uma rápida eliminação da água do pavimento em dias de chuva, conferindo as condições de segurança, conforto e economia aos usuários. A Figura 2 ilustra a seção típica do pavimento rígido em (a) e a distribuição de tensões devida a aplicação de uma carga sobre o pavimento rígido em (b).

Figura 2. Seção típica do pavimento rígido e distribuição de tensões



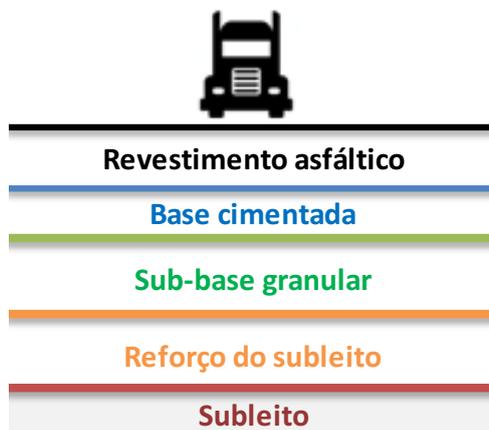
Fonte: Adaptado de Muench (2013).

Pavimento semirrígido

Os pavimentos semirrígidos caracterizam-se por uma base cimentada por algum aglutinante com propriedades cimentícias como, por exemplo, por uma camada de solo cimento revestida por uma camada asfáltica (BRASIL, 2006b) e as camadas de sub-base e base. Segundo Miranda (2009), pavimento semirrígido é aquele com camada superior em mistura asfáltica aplicada sobre uma ou diversas

camadas de materiais tratadas com ligantes hidráulicos. A Figura 3 ilustra a seção típica do pavimento semirrígido.

Figura 3. Seção típica do pavimento semirrígido



Fonte: Adaptado de ECivil (2016).

2.1.2 Camadas dos pavimentos flexíveis

Considerando que este trabalho trata do controle de execução de camadas de pavimentos flexíveis, a ênfase será dada às camadas componentes deste tipo de pavimento.

Segundo Balbo (2007), a estrutura do pavimento é configurada para receber e transmitir esforços, visando aliviar as tensões sobre as camadas inferiores. Cada camada do pavimento dispõe de uma ou mais atribuições, que tem como objetivo proporcionar aos veículos as condições adequadas de suporte e rolamento seja qual for a condição climática. As camadas e componentes de uma seção usual de pavimentos flexíveis são descritas como segue.

Subleito

A camada denominada subleito é onde serão apoiadas todas as outras camadas do pavimento, ou seja, é o terreno de fundação. Deve ser considerado e estudado até as profundidades em que atuam significativamente as cargas impostas pelo tráfego, o que varia de 0,60 m a 1,50 m de profundidade.

Após o término do serviço da equipe de terraplanagem é feita a regularização do subleito, que segundo a norma DNIT 137/2010-ES é a operação destinada a conformar o leito estradal, transversal e longitudinalmente, obedecendo às larguras e cotas constantes das notas de serviço de regularização de terraplanagem do projeto, compreendendo cortes ou aterros até 20 cm de espessura.

Senço (2007) afirma que a regularização deve dar à superfície as características geométricas do pavimento acabado. A regularização resume-se em reparar algumas falhas da superfície terraplanada quando os serviços de pavimentação são exercidos logo após a terraplanagem, pois já foram adotados os cuidados necessários ao acabamento da superfície e a compactação (PINTO; PREUSSLER, 2010).

Reforço do subleito

De acordo com a norma DNIT 138/2010-ES é a camada estabilizada granulometricamente, executada sobre o subleito devidamente compactado e regularizado, utilizada quando se torna necessário reduzir espessuras elevadas da camada de sub-base, originadas pela baixa capacidade de suporte do subleito.

Senço (2007) afirma que essa camada também resiste e distribui esforços verticais, não tendo as características de absorver definitivamente esses esforços, o que é característica específica do subleito. Ainda para o autor, o reforço do subleito poderia ser considerado indistintamente camada suplementar do subleito ou camada complementar da sub-base.

Os materiais constituintes do reforço do subleito devem apresentar as características estabelecidas na norma DNIT 108/2009-ES.

Bases e Sub-bases

A camada de base é a camada do pavimento situada imediatamente abaixo da camada de revestimento e acima da sub-base, quando existente, ou diretamente sobre o subleito (PINTO; PREUSSLER, 2010). É a camada destinada a resistir aos esforços verticais oriundos dos veículos, distribuindo-os adequadamente à camada subjacente (BRASIL, 2006b).

Sub-base é a camada de pavimentação, complementar à base e com as mesmas funções desta, executada sobre o subleito ou reforço do subleito, devidamente compactado e regularizado (BRASIL, 2006b). Para Balbo (2007), quando a camada de base é muito espessa, por razões de natureza construtiva e econômica, procura-se dividir a mesma em duas camadas, criando-se assim a sub-base, geralmente de menor custo.

Os materiais mais empregados em pavimentação da classe dos granulares e solos são: Brita Graduada Simples (BGS), bica ou brita corrida; macadame hidráulico; macadame seco; misturas estabilizadas granulometricamente; solo-agregado; solo natural e solo melhorado com cimento ou cal. Os materiais utilizados na execução da camada de sub-base constam na norma DNIT 139/2009-ES e na camada de base na norma DNIT 141/2010-ES.

Revestimento

A camada de revestimento de uma estrutura flexível consiste de uma mistura de agregados minerais e materiais asfálticos, sobreposta à camada de base (PINTO; PREUSSLER, 2010). As misturas asfálticas mais comumente empregadas na pavimentação são as misturas produzidas à quente e com ou sem asfaltos poliméricos. A exemplo: concreto asfáltico (CA), concreto asfáltico com borracha, concreto asfáltico com SBS, entre outros.

2.2 COMPACTAÇÃO

Segundo Fernandes (1994), compactação é o processo pelo qual uma massa de solo constituída por partículas sólidas, água e ar tem o seu índice de vazios diminuído devido à aplicação repetida de cargas. A compactação permite um aumento da resistência ao cisalhamento e uma redução da deformabilidade e permeabilidade do solo.

A compactação tem como objetivo fornecer ao solo homogeneização e melhoria de suas propriedades de engenharia, como o aumento da resistência ao cisalhamento e à erosão. Assim, tem-se a importância da compactação adequada de cada camada, a fim de minimizar os recalques, diminuir sua deformabilidade e

garantir certas condições mínimas de estabilidade (DAS, 2007; BRASIL, 2006b). Em laboratório são realizados ensaios para determinação da máxima densificação do material para uma dada energia de compactação, ou seja, determinação da massa específica aparente seca máxima e dos teores de umidade ótimos de cada camada. Esses dados servem de referência no controle da compactação em campo, onde cada camada compactada deverá atingir um determinado grau de compactação (GC), especificado em projeto, e uma variação percentual do teor de umidade em relação à umidade ótima, determinada em laboratório.

2.2.1 Ensaio de laboratório

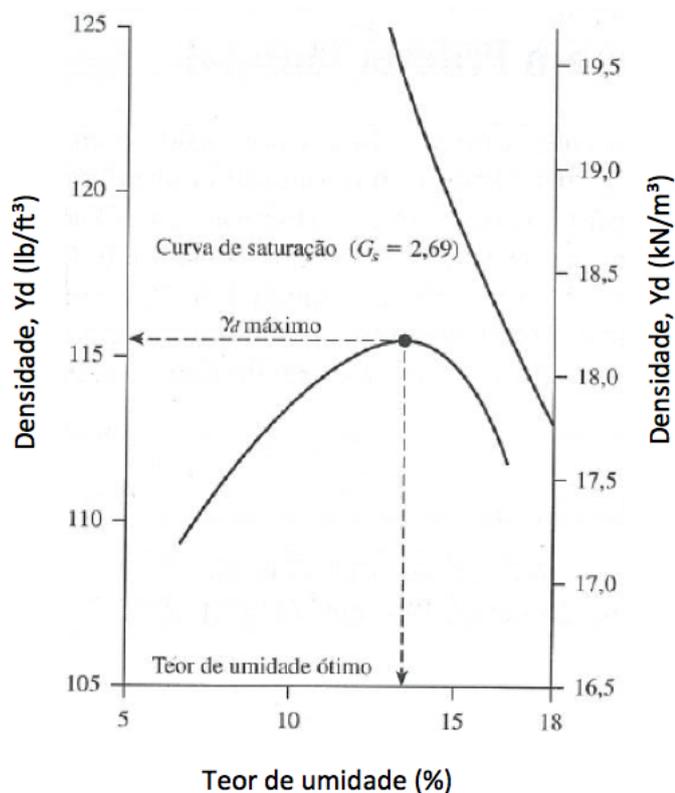
Ensaio Proctor

O ensaio de compactação mais utilizado em laboratório no Brasil para materiais argilosos e granulares é o ensaio Proctor. Em função da energia de compactação têm-se três níveis: Proctor Normal, Intermediário e Modificado. Dependendo do tipo de projeto, do tipo de camada e do tráfego, exige-se um determinado nível de energia em campo (DNIT, 2006).

Proctor em 1933, com os primeiros trabalhos sobre a compactação de aterros, tentou aprimorar a técnica de compactação. Ele desenvolveu um ensaio para a determinação experimental da curva de compactação, representada pela relação massa específica seca e teor de umidade, conhecido como ensaio Proctor Normal (DAS, 2007).

Com a utilização de um molde, o ensaio consiste na compactação em camadas do solo misturado com diferentes quantidades de água, através de um soquete que cai de uma altura padronizada. O resultado do ensaio é a curva de compactação (Figura 4).

Figura 4. Curva de compactação



Fonte: Adaptado de Das (2007).

Em seus trabalhos experimentais, Proctor verificou que existe um determinado teor de umidade onde a água impede a expulsão do ar, não sendo obtido qualquer acréscimo de densidade. Portanto, para uma dada energia de compactação tem-se uma densidade máxima para certo teor de umidade, que representa a relação ideal entre solo, água e ar. Esse teor de umidade é o teor de umidade ótimo (LIMA, 2013). A curva em geral pode ser representada em função da massa específica aparente seca máxima ou densidade máxima.

Das (2007) afirma que os fatores que influenciam a compactação, além do teor de umidade, são o tipo de solo e a energia de compactação. Para um mesmo material, a alteração da energia de compactação modifica a curva de compactação, uma vez que o aumento da energia eleva o peso específico seco máximo e causa redução no teor de umidade ótimo.

O Ensaio Proctor é padronizado no Brasil pela ABNT (NBR 7182/86) e pelo DNIT através da norma DNIT 164/2013-ME.

Devido à necessidade de representar melhor as condições de campo, foi desenvolvido o ensaio Proctor Modificado. O mesmo molde é utilizado nesse ensaio, diferindo do anterior pelo número de golpes, esforço de compactação e a quantidade de camadas de solo, que no Normal são três e no Modificado cinco. Segundo Das (2007), o ensaio Proctor Modificado aumenta o esforço de compactação e, portanto, resulta no aumento do peso específico máximo do solo, o qual é acompanhado por uma redução do teor de umidade ótimo.

O ensaio denominado Proctor Intermediário difere do Proctor Modificado também pelo número camadas, esforço de compactação e número de golpes por camada, sendo aplicados nas camadas intermediárias do pavimento, ou seja, apresenta um aumento da energia de compactação.

Outros ensaios de compactação além do ensaio de Proctor podem ser utilizados. O Quadro 1 apresenta as características dos diferentes ensaios.

Quadro 1. Características dos diferentes ensaios de compactação

Ensaio	Cilindro			Soquete			Nº de golpes	Nº de camadas	Energia (kg.cm/cm ³)
	h (cm)	φ (cm)	V (cm ³)	P (kg)	φ (cm)	AQ (cm)			
Proctor Normal	12,7	10	1000	2,5	5	30,5	26	3	6
Proctor Intermediário	12,7	10	1000	4,5	5	45,7	21	3	13
Proctor Modificado	12,7	10	1000	4,5	5	45,7	27	5	27,7
DNER Normal	11,4	15,2	2085	4,5	5	45,7	12	5	6
DNER Intermediário	11,4	15,2	2085	4,5	5	45,7	26	5	12,8
DNER Modificado	11,4	15,2	2085	4,5	5	45,7	55	5	27,1
Carlos de Sousa Pinto	5	5	98	2,25	4,9	30,5	10	1	7

Fonte: Adaptado de: NBR 7182/86; DNIT 164/2013-ME; PINTO (2006).

Legenda: h – altura; φ - diâmetro; V – volume; P – peso; AQ – altura de queda.

Speedy Moisture Test - Padronizado pelo Departamento Nacional de Estradas e Rodagens (DNER-ME 052/94) esse método consiste na utilização de um recipiente hermético, denominado *Speedy*, onde em seu interior ocorre a reação

química entre a água existente na amostra úmida e carbureto de cálcio, representada pela Equação 1.



Onde:

CaC_2 = Carbureto de Cálcio;

H_2O = Monóxido de Dihidrogênio (água);

C_2H_2 = Acetileno;

Ca(OH)_2 = Hidróxido de Cálcio.

A pressão resultante dessa reação é medida por um manômetro acoplado ao recipiente e, sendo função da quantidade de água existente na amostra, é correlacionada com valores de uma tabela onde se obtém a umidade da referida amostra.

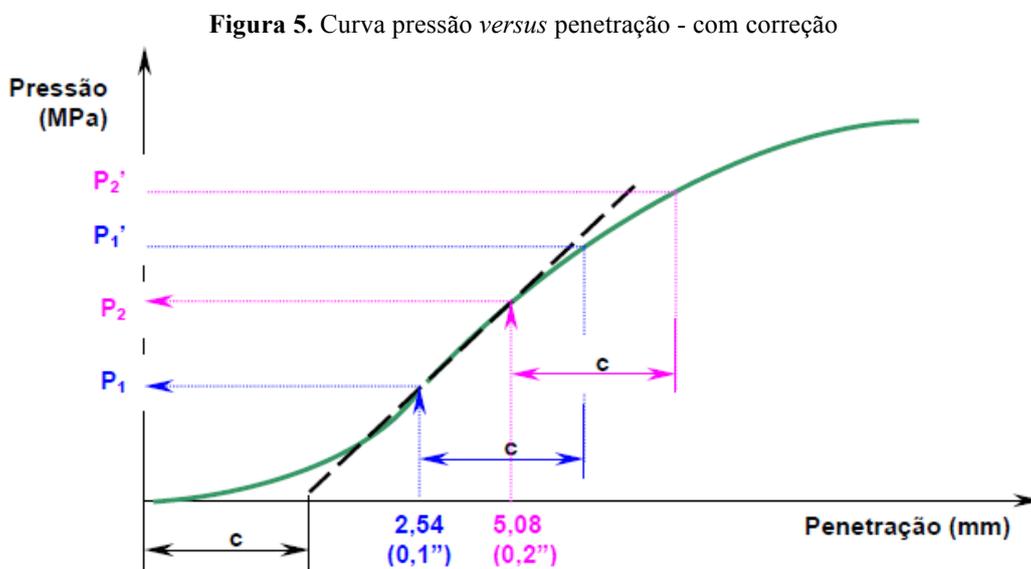
Método expedito da frigideira - Por ser um método de simples execução, é bastante empregado em obras. Neste ensaio, uma pequena porção de solo úmido é colocada em uma frigideira que por sua vez é colocada sobre uma fonte de calor. A amostra é revolvida até que a água presente em seu interior evapore. Para certificação da total evaporação da água é colocada uma placa de vidro sobre a frigideira e observa-se a existência de vapor formando-se na placa. Se não for constatada a presença de vapor a amostra está seca e, por diferença de massa, determina-se o teor de umidade do solo (MOURA, 2011).

2.2.2 California Bearing Ratio (CBR)

O ensaio *California Bearing Ratio* (CBR), ou Índice de Suporte Califórnia (ISC), foi idealizado na década de 1920 pelo engenheiro do Departamento de Estradas da Califórnia, O. J. Porter (BALBO, 2007). O valor do CBR é um indicador da resistência dos solos e materiais granulares ou de solos utilizados na pavimentação de rodovias.

O ensaio pode ser realizado em todos os tipos de solo e baseia-se no conceito da relação entre a pressão necessária para penetrar um pistão cilíndrico padronizado em um corpo de prova de determinado solo, e a pressão necessária para penetrar o mesmo pistão em uma brita graduada padrão. Para o cálculo são adotadas as pressões lidas entre as penetrações de 2,54 mm e 5,08 mm (FORTES, 2002).

Com as pressões e penetrações obtidas durante o ensaio é traçada a curva pressão *versus* penetração (Figura 5). A correção da curva é necessária quando ocorre ponto de inflexão, sendo necessário traçar a tangente até sua intersecção com eixo das abscissas, obtendo-se o valor do deslocamento (c), sendo que a curva corrigida iniciaria no ponto de intersecção da tangente com o eixo em questão.



Fonte: Fortes (2003).

Legenda: P_1 e P_2 – Pressões lidas para 2,54 e 5,08 mm; P_1' e P_2' – Pressões corrigidas para 2,54 e 5,08 mm; c – Deslocamento para correção da pressão.

O valor do CBR é determinado pela Equação 2.

$$\text{CBR} = \frac{\text{Pressão lida ou pressão corrigida}}{\text{Pressão padrão}} \times 100 \quad (2)$$

No Brasil os pavimentos são dimensionados com base no método do CBR. Assim, o pavimento é dimensionado de modo a proteger o subleito de deformações

permanentes excessivas. No Brasil o ensaio do CBR é padronizado pela ABNT (NBR 9895/2016) e pelo DNIT (DNIT 172/2016-ME).

2.2.3 Compactação em campo

Em campo as camadas são compactadas através de equipamentos como: soquete, rolo pé-de-carneiro, rolo liso e rolo pneumático. A compactação no campo é realizada em camadas e para a colocação de uma nova camada é necessário que seja feito o controle de parâmetros como o grau de compactação e teor de umidade, por exemplo. O controle é feito através dos resultados dos ensaios obtidos em laboratório.

Segundo Sousa Pinto (2000), em campo a umidade da porção de solo compactado pode apresentar pequena diferença com relação à umidade ótima, com limites estabelecidos em projeto ou norma. Quando a compactação é realizada com teor de umidade acima do ótimo, é convencionalmente denominada como compactação no ramo úmido e quando a mesma dá-se com teor abaixo do ótimo como sendo compactação no ramo seco.

2.2.3.1 Equipamentos

De acordo com Lima (2013), os equipamentos mais utilizados em campo para a compactação dos solos são descritos como segue.

Soquetes - São compactadores de impacto utilizados em locais de difícil acesso para os rolos compressores, como em valas e trincheiras. Para solos argilosos a camada compactada deve ter de 10 cm a 15 cm e para granulares em torno de 15 cm.

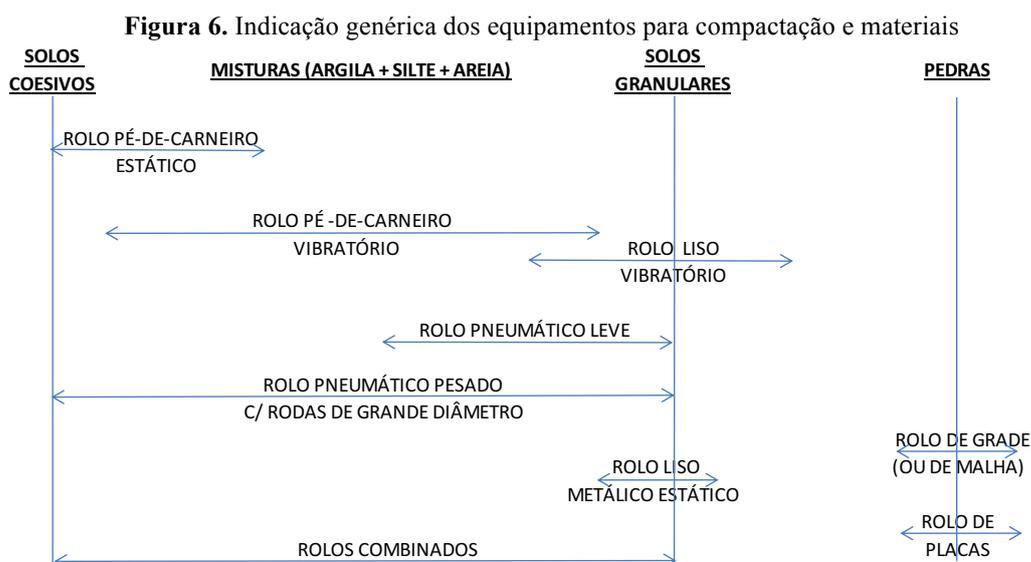
Rolos Pneumáticos - São eficientes na compactação de capas asfálticas, bases e sub-bases de estradas e indicados para solos arenosos ou argilosos. Podem ser utilizados em camadas de até 40 cm. Podem ou não ser vibratórios.

Rolos Pé-de-Carneiro - São eficientes na compactação de solos argilosos, promovendo um grande entrosamento entre as camadas compactadas. As camadas

possuem em torno de 15 cm, já o número de passadas varia entre 4 e 6 para solos argilosos e entre 6 e 8 para os granulares. Podem ou não ser vibratórios.

Rolos Lisos - São indicados para solos arenosos, pedregulhos e pedra britada, lançados em espessuras inferiores a 15 cm. É recomendado para a compactação de camadas finas de 5 a 15 cm, com 4 a 5 passadas. Podem ou não ser vibratórios.

A Figura 6 representa genericamente os tipos mais apropriados de equipamentos de compactação para os solos mais frequentes nos trabalhos de terraplenagem.



Fonte: Adaptado de Lima (2013).

2.2.3.2 Controle

Controlar a compactação em campo engloba a relação de parâmetros como o número de passadas do rolo, a velocidade, a espessura da camada solta e teor de umidade. Assim, estas relações devem resultar em um grau de compactação, que é a relação entre a massa específica de campo e a massa específica determinada em laboratório para a energia de compactação especificada em projeto. Em campo, esta relação é analisada e verificada, bem como o teor de umidade, e então especificada

como um percentual ($\pm 1\%$ ou $\pm 2\%$) em relação à umidade ótima. Em resumo, significa verificar se o grau de compactação e o desvio de umidade em relação à ótima (Δ_h) estão dentro dos limites especificados. Segundo a norma DNIT 108/2009-ES o grau de compactação (GC) especificado deve obedecer aos seguintes limites:

- Corpo do aterro: $GC \geq 100\%$;
- Camadas finais: $GC \geq 100\%$.

O controle de compactação tem por objetivo promover a execução satisfatória das camadas, através de ensaios laboratoriais e de campo. Os resultados de campo são correlacionados com os laboratoriais, possibilitando assim a verificação da qualidade dos serviços através de indicadores de desempenho definidos em projeto. Para tanto, devem ser observadas as seguintes recomendações (LIMA, 2013):

- A espessura da camada lançada não deve ser superior a 30 cm, sendo que a espessura da camada compactada deve ser menor que 20 cm;
- Deve-se realizar a homogeneização do solo a ser lançado, tanto no que se refere ao material quanto à umidade;
- Deve-se realizar a manutenção da umidade do solo o mais próximo da umidade ótima.

Na prática de campo, tem-se o seguinte procedimento usual de controle de compactação (LIMA, 2013):

- Coletam-se amostras de solo da área e realiza-se em laboratório o ensaio de compactação, obtendo-se a curva de compactação e daí a massa específica aparente seca máxima e o teor de umidade ótimo do solo;
- No campo, à proporção em que o aterro for sendo executado, faz-se necessário verificar, para cada camada compactada, quais são os valores do teor de umidade e da massa específica aparente seca e compará-los com os valores encontrados em laboratório.

Caso as recomendações não sejam atendidas, o solo terá que ser revolvido, o teor de umidade controlado, deverá ser feita uma nova compactação e, posteriormente, outra avaliação (controle) para a liberação da camada.

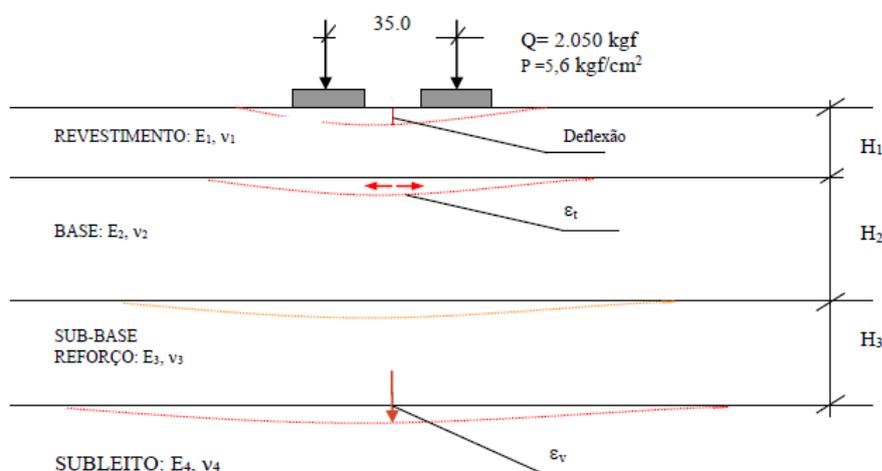
2.3 AUSCULTAÇÃO ESTRUTURAL

Os defeitos estruturais de um pavimento ocorrem principalmente devido à repetição de cargas e manifestam-se de duas maneiras: deformação elástica ou recuperável e deformação plástica ou permanente, que podem apresentar-se nos primeiros anos ou meses de vida do pavimento e, em geral, é o defeito chamado de afundamento de trilha de roda (ATR).

As deformações elásticas, ou recuperáveis, após a retirada da carga, não são perceptíveis. Causam então, a flexão do pavimento sob a ação do carregamento dinâmico, levando a ruptura por fadiga do revestimento asfáltico no caso dos pavimentos flexíveis. As deformações permanentes apresentam caráter residual e são perceptíveis mesmo ao interromper a ação da carga, constituindo um parâmetro de avaliação tanto estrutural quanto funcional do pavimento (BRASIL, 2006c).

A auscultação estrutural de um pavimento é realizada através da análise de um parâmetro chamado de deflexão, permitindo a avaliação estrutural do pavimento. É feita com o uso de equipamentos de deflectometria, que, em ensaios realizados em determinados trechos de estrada com a atuação de uma carga, permitem obter bacias de deflexão. A Figura 7 apresenta um esquema da aplicação da carga no pavimento e a respectiva deflexão em suas camadas.

Figura 7. Representação da aplicação da carga no pavimento e deflexão nas camadas



Fonte: Memória de cálculo de pavimentação do Contorno Rodoviário de Florianópolis (2011).

Legenda: Q – Esforço vertical; P – Pressão vertical de contato; ϵ_t – Deformação horizontal de tração; ϵ_v – Deformação vertical de compressão; H – Espessura da camada; E – Módulo de elasticidade; ν – Coeficiente de Poisson.

O DNIT define a deflexão como (BRASIL, 2006c):

“[...] a resposta das camadas estruturais e do subleito à aplicação do carregamento, sendo esta dependente de características do pavimento tais como: a espessura, o módulo de deformabilidade dos materiais e do ponto de aplicação da carga”.

O módulo de deformabilidade de cada camada e do solo de fundação do pavimento auscultado é medido em laboratório, e define a relação entre as tensões e deformações dos materiais que constituem as camadas do mesmo, sendo um parâmetro de suma importância na avaliação do comportamento estrutural do pavimento. Podem ser realizados ensaios monotônicos ou dinâmicos, como o ensaio de flexão em quatro pontos e o ensaio de compressão diametral.

Bernucci *et al.* (2008) definem que os equipamentos mais utilizados em ensaios no Brasil para a medição da deflexão são: a viga Benkelman, introduzida em 1950, e o deflectômetro de impacto (do inglês, *Falling Weight Deflectometer* – FWD), introduzido em 1944.

Ambos os equipamentos são utilizados em ensaios não destrutivos que avaliam a deflexão recuperável máxima na superfície do revestimento. Mesmo que

os resultados obtidos não representem bem às condições de serviço, visto que as velocidades do ensaio são baixas (BRANCO; PEREIRA e PICADO SANTOS, 2005), são amplamente utilizados na avaliação da capacidade estrutural do pavimento.

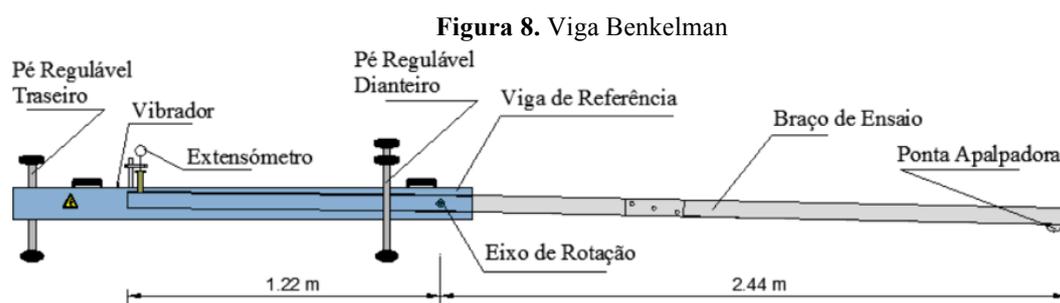
2.3.1 Equipamentos

Viga Benkelman

A viga Benkelman é um equipamento que permite medir deflexões reversíveis (deformações verticais) do pavimento, quando sobre o mesmo se aplica uma carga quase estática através de um caminhão com eixo traseiro simples de roda dupla (com pressão de insuflagem média nos pneus de 0,56 MPa) carregado com 8,2 toneladas-força (80 kN).

O funcionamento da viga Benkelman consiste no princípio da alavanca de braço simples, que no seu extremo possui uma ponta apalpadora e o conjunto funciona como uma sonda alongada de 2,44 m de comprimento, com a qual se obtém as deflexões do pavimento. O braço é sustentado por uma viga de referência fixa, que assenta no pavimento para fora da área de influência do ensaio (FRANCISCO, 2012).

Tendo como referência a viga Benkelman da ESTIG, IPB (Figura 8), a parte do braço de ensaio localizada para trás do eixo de rotação, tem um comprimento de 1,22 m, onde no seu extremo é instalado um extensômetro com precisão de 0,01 mm que mede o efeito das deflexões na ponta apalpadora. A viga vem equipada com um vibrador cuja função é de dissipar o atrito entre as peças móveis e evitar eventuais inibições do ponteiro do extensômetro (FRANCISCO, 2012).



Fonte: ESTIG, IPB (2016).

De acordo Bernucci *et al.* (2008), o ensaio completo consiste em:

- Colocar a ponta apalpadora entre os pneus da roda geminada traseira do caminhão, colocando-a exatamente sob o seu eixo;
- Fazer uma leitura inicial do extensômetro – leitura L_i ;
- Fazer o caminhão se afastar lentamente (2 a 3 km/h) até 10 m de distância da ponta apalpadora ou até o extensômetro não acusar mais variação na leitura;
- Fazer uma leitura final do extensômetro – leitura L_f ;
- Calcula-se a deflexão (d_0) pela Equação 3, sendo K a constante da viga dada pela relação entre o braço maior e o braço menor:

$$d_0 = (L_i - L_f) \cdot K \quad (3)$$

- Calculadas todas as deflexões é possível proceder ao traçado e à análise das deformadas levantadas.

No Brasil o ensaio com a viga Benkelman é padronizado segundo a norma DNER ME 024/94.

Deflectômetro de impacto (FWD)

Com a necessidade de aumentar a produtividade, a acurácia dos resultados, e ainda, de se utilizar procedimentos mais simples de operação e interpretação dos dados e reduzir os custos dos ensaios, foram desenvolvidos outros tipos de equipamentos com grande aceitação no meio rodoviário. No Brasil, um dos equipamentos que tem sido cada vez mais utilizado é o *Falling Weight Deflectometer* (FWD). As bacias de deformação são determinadas e registradas digitalmente de maneira rápida em cada ponto analisado, o que permite ao equipamento uma produtividade alta (de até 40 km/dia), além de uma precisão de cerca de $\pm 0,5$ centésimo de milímetro, resultando em uma determinação acurada de deflexões (BALBO, 2007).

Este equipamento emprega um peso que é elevado até uma altura pré-estabelecida e solto, em queda livre, para atingir uma placa apoiada sobre a superfície do pavimento. Esta placa transmite uma força de impulso à estrutura, a

qual pode ser modificada, alterando-se o peso e/ou a altura de queda (PINTO; PREUSSLER, 2010).

A grande vantagem desse tipo de equipamento é a capacidade de simulação das características de uma carga de tráfego em termos de magnitude e frequência. Branco, Pereira e Picado Santos (2005) afirmam que a velocidade de aplicação da força no ensaio simula a passagem de um veículo entre 60 e 80 km/h. A Figura 9 ilustra o equipamento do tipo FWD.

Figura 9. Equipamento tipo FWD



Fonte: Dynatest (2016).

Correlações entre os ensaios

No Brasil, os procedimentos de restauração têm como base de cálculo a viga Benkelman, e devido ao uso cada vez mais frequente de equipamentos como o deflectômetro de impacto (FWD), torna-se necessária a conversão dos valores de deflexão para valores equivalentes de deflexão da viga Benkelman.

Borges (2001) realizou um estudo na malha rodoviária catarinense e obteve modelos de correlação apresentados no Quadro 2.

Quadro 2. Correlação entre Viga Benkelman e FWD

Tipo	Camadas	Material / espessura (cm)	Correlação
I	Revestimento Base Sub-base	CAUQ (4 a 6) Brita graduada Macadame seco	$D_{VB} = 1,202D_{FWD} - 1,087$ $R^2 = 0,72$
			$D_{VB} = 1,224D_{FWD}$ $R^2 = 0,72$
II	Revestimento Base Sub-base	CAUQ (4 a 6) Brita graduada Brita graduada	$D_{VB} = 1,184D_{FWD} - 0,631$ $R^2 = 0,63$
			$D_{VB} = 1,173D_{FWD}$ $R^2 = 0,63$
III	Revestimento Base Sub-base	CAUQ (4 a 6) Brita graduada Solo estabilizado	$D_{VB} = 1,160D_{FWD} + 1,659$ $R^2 = 0,75$
			$D_{VB} = 1,185D_{FWD}$ $R^2 = 0,75$
IV	Revestimento Base Sub-base	CAUQ (4 a 6) Seixo britado Seixo parcialmente britado	$D_{VB} = 1,214D_{FWD} - 3,672$ $R^2 = 0,72$
			$D_{VB} = 1,132D_{FWD}$ $R^2 = 0,72$
V	Revestimento Base Sub-base	CAUQ (8 a 12) Brita graduada Macadame seco	$D_{VB} = 1,515D_{FWD} - 5,267$ $R^2 = 0,77$
			$D_{VB} = 1,388D_{FWD}$ $R^2 = 0,77$
VI	Revestimento Base Sub-base	CAUQ (8 a 12) Brita graduada Brita graduada	$D_{VB} = 1,320D_{FWD} - 10,435$ $R^2 = 0,76$
			$D_{VB} = 1,067D_{FWD}$ $R^2 = 0,73$
VII	Revestimento Base Sub-base	CAUQ (8 a 12) Brita graduada Solo estabilizado	$D_{VB} = 1,658D_{FWD} - 17,773$ $R^2 = 0,87$
			$D_{VB} = 1,335D_{FWD}$ $R^2 = 0,83$
VIII	Revestimento Base Sub-base	CAUQ (8 a 12) Seixo britado Seixo parcialmente britado	$D_{VB} = 1,325D_{FWD} - 4,455$ $R^2 = 0,58$
			$D_{VB} = 1,207D_{FWD}$ $R^2 = 0,58$

Fonte: Adaptado de Borges (2001).

Legenda: CAUQ – Concreto Asfáltico Usinado a Quente (atualmente CA – Concreto Asfáltico); D_{VB} – Deflexão viga Benkelman; D_{FWD} – Deflexão deflectômetro de impacto; R – Coeficiente de determinação.

É importante salientar que de acordo com a norma DNIT 031/2006-ES o Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CAUQ) passou a ser denominado de Concreto Asfáltico (CA).

2.3.2 Controle das deflexões em campo

Aspectos importantes como a temperatura da camada asfáltica e a umidade das camadas granulares influenciam as leituras durante a avaliação deflectométrica nas camadas do pavimento. Para que a avaliação seja realizada com acurácia através dos equipamentos deflectométricos, faz-se necessária definição de um limite de deflexão para cada camada. Esse limite é chamado de deflexão admissível (D_{adm}), que é a máxima deflexão que um pavimento ou suas camadas constituintes podem apresentar para suportar uma carga de tráfego conhecida ou projetada (FERREIRA, 2014).

As deflexões admissíveis podem ser definidas a partir da análise empírico-mecanicista do pavimento, que considera tanto os módulos de resiliência obtidos nos ensaios triaxiais de carga repetida, como a configuração das camadas. Para tanto, são utilizados *softwares* como o Everstress 5.0, que fornece como resultado dados de tensão, deformação e deslocamento elástico. Podem-se citar também como referência, os *softwares* BISAR (*Bitumen Stress Analysis in Roads*), *Weslea for Windows*, ELSYM5 (*Elastic Layered System*), RETRAN2CL, entre outros.

A norma DNIT 134/2010-ME define o módulo de resiliência (M_R) de acordo com a Equação 4:

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \quad (4)$$

Onde:

σ_d = tensão-desvio aplicada;

ε_r = deformação específica vertical recuperável ou resiliente.

De acordo com a norma DNER-PRO 269/94, o valor da deflexão admissível depende dos materiais constituintes do revestimento e da base do pavimento, bem como do número N , definido como número de solicitações equivalentes às de um eixo padrão de 8,2 toneladas-força para o período considerado de projeto. O valor de deflexão admissível para pavimentos flexíveis constituídos de concreto asfáltico executado sobre base granular é calculado pela Equação 5:

$$\log(D_{adm}) = 3,148 - 0,188 \cdot \log(N_{USACE}) \quad (5)$$

Onde:

D_{adm} = deflexão admissível (0,01 mm);

N_{USACE} = número de eixos equivalentes ao eixo padrão calculado pelo método do Corpo de Engenheiros dos Estados Unidos, do inglês, *United States Army Corps of Engineers* (USACE).

Os valores de deflexão admissível servem como referência na comparação com os valores medidos em campo. Caso o valor limite para deflexão de cada camada seja ultrapassado, medidas como: maior compactação ou escarificação do material e a realização de novos ensaios acerca do teor de umidade e grau de compactação devem ser tomadas, afim de que a deflexão não ultrapasse o valor admissível.

Através da análise do perfil deflectométrico das camadas executadas que se pode detectar qual camada contribui mais para as elevações da deflexão na camada final, facilitando a implantação de medidas corretivas e determinação dos segmentos que devem ser monitorados, com o objetivo de manter a estrutura e a funcionalidade em boas condições de serviço (SILVA, 1994). Desta forma, existem meios de limitar a contribuição de cada camada na deflexão total do pavimento, o que eleva a possibilidade de executar a camada final de revestimento dentro do limite admissível de deflexão para a estrutura acabada.

Porém, em muitos casos, somente a deflexão máxima não é suficiente para explicar o comportamento estrutural e o processo de distribuição de cargas no interior do pavimento, tornando-se necessária a incorporação de leituras adicionais que permitam o cálculo do raio de curvatura da deformada de superfície e o delineamento da linha elástica das deformações verticais reversíveis, isto é, a deformada do pavimento quando solicitado por uma carga (BORGES, 2001).

2.3.2.1 Retroanálise

A retroanálise faz uso da interpretação de bacias de deflexão e consiste na entrada de dados como: as espessuras das camadas do pavimento em um determinado *software* e arbitrar valores de módulos de elasticidade para cada

material, obtendo-se assim uma bacia de deflexão teórica, simuladas automaticamente pelo programa.

De acordo com Bernucci *et al.* (2008), o processo é repetido até que determinada combinação de módulos das camadas faça coincidir as bacias de deflexão teórica calculada e a de campo determinada. Ainda segundo os autores, a retroanálise justifica-se por permitir:

- Eliminar ou minimizar a coleta de amostras;
- Obter os módulos de elasticidade nas condições de campo;
- Verificar a condição estrutural das camadas e do subleito;

No caso de estruturas novas, os programas fornecem os valores de deflexão de cada camada. A partir destes valores o projetista assume o valor da deflexão admissível.

2.4 ESTUDOS DE CASO

Um estudo foi realizado em 1994, nas obras de duplicação da Rodovia Fernão Dias na BR-381/MG, objetivou interligar ferramentas auxiliares aos métodos convencionais de controle na construção de camadas de pavimento.

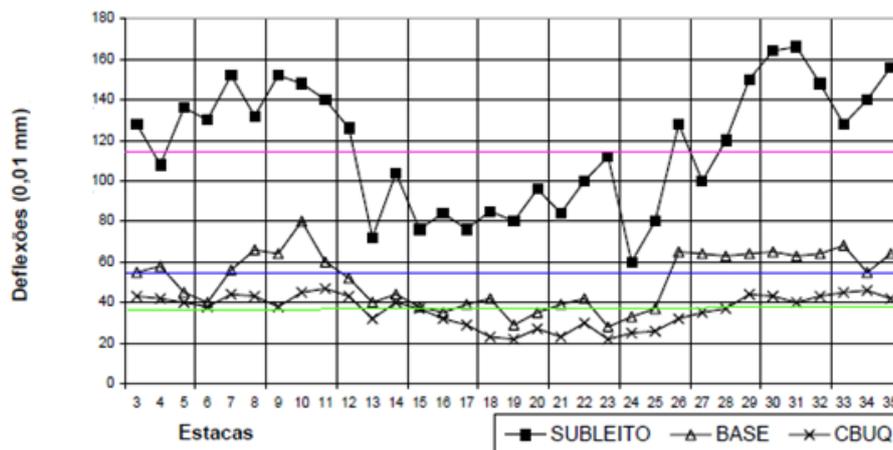
O controle da compactação em campo foi realizado com a viga Benkelman através da medida de deflexões em estações distanciadas ao longo do eixo de 20 m e alternadas em cada faixa de tráfego. A cada 200 m foram realizadas leituras intermediárias para delineamento da bacia de deformação. Neste estudo foram ainda realizadas medidas em rampas ascendentes, de forma a considerar a concentração de cargas no eixo traseiro do veículo (SILVA, 1994).

A análise dos resultados foi feita sob dois aspectos: o primeiro referiu-se à precisão do levantamento, onde podem ocorrer distorções em função do posicionamento inadequado da viga no solo, leitura incorreta ou avaria no equipamento. O segundo relacionou-se à natureza dos materiais, no qual, durante os processos de exploração, mistura, transporte, distribuição e confecção, houve alterações de suas características. A Figura 10 representa as deflexões medidas em campo entre as estacas 3 e 35 nas camadas de subleito, base e revestimento.

Observou-se que o segmento entre as estacas 13 e 25 do Lote 3 (Figura 10) apresentou significativa redução das deflexões, tomadas sobre a camada

regularizada do subleito. De acordo com o autor, esse decréscimo era esperado, devido à presença de corte em rocha que contribuiu como um suporte da camada (abaixo desta).

Figura 10. Deflexões viga Benkelman entre estacas 3 e 35

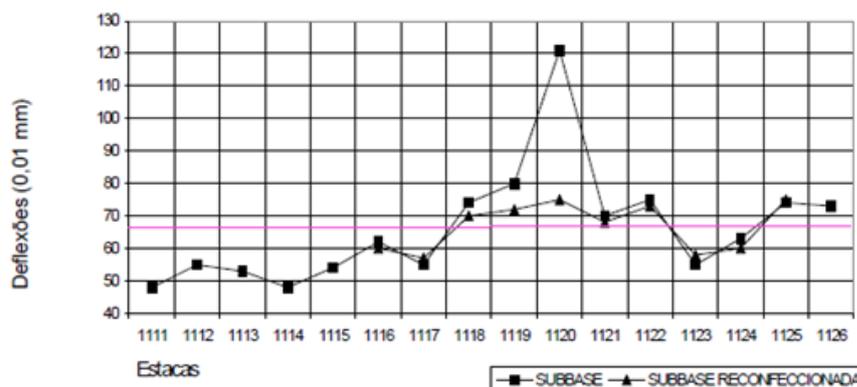


Fonte: Adaptado de Silva (1994).

Legenda: — Deflexão admissível do subleito;
 — Deflexão admissível da base;
 — Deflexão admissível do Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ), atual CA.

No segmento entre as estacas 1111 e 1126 (Figura 11), observou-se que a deflexão ficou na ordem de 120 centésimos de milímetros na camada de sub-base na estaca 1120. Neste local, de acordo com o autor, foi constatada a segregação do material graúdo e, conseqüentemente, ocorreu a compactação inadequada neste ponto. Após, a camada foi revolvida e novamente compactada. Após nova medição, verificou-se a redução da deflexão, atingindo assim os níveis admissíveis de projeto (SILVA, 1994).

Figura 11. Deflexões viga Benkelman entre estacas 1111 e 1126



Fonte: Adaptado de Silva (1994).

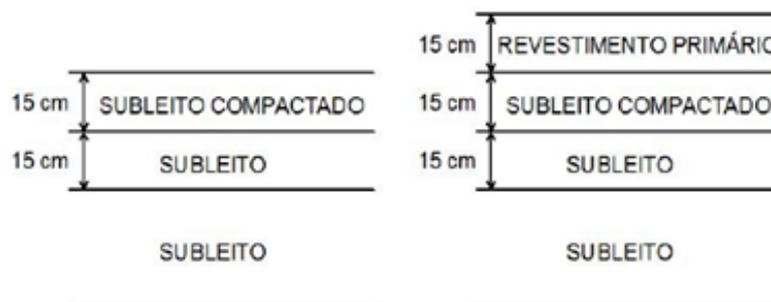
Legenda: — Deflexão admissível da sub-base reconfigurada.

Na análise do perfil deflectométrico das camadas executadas durante o estudo, foi possível verificar alguns segmentos cujas deflexões da camada final situam-se acima das dos demais segmentos, embora dentro dos limites admissíveis.

Outro estudo foi o realizado em 2011 nas estradas a serem construídas no interior do município de São Gabriel/RS. O estudo tratou da aplicação das deflexões admissíveis para o controle de compactação em estradas com revestimento primário, realizado também através de medidas de deslocamentos elásticos com a utilização da viga Benkelman.

As deflexões admissíveis foram definidas a partir da análise mecânica do pavimento, considerando os módulos de resiliência obtidos nos ensaios triaxiais de carga repetida, a configuração das camadas do pavimento e um carregamento causado por uma roda dupla de caminhão com 8,2 toneladas-força de carga distribuída no seu eixo traseiro. A análise mecânica para determinação das deflexões admissíveis foi realizada com auxílio do *software* Everstress 5.0.

Na análise mecânica foram consideradas duas estruturas diferentes, representadas na Figura 12.

Figura 12. Estruturas de pavimento analisadas

Fonte: Bittencourt (2011).

As deflexões para a estrutura sem revestimento primário (RP) foram determinadas no topo da camada mais próxima da superfície e consideraram combinações diferentes dos módulos de resiliência obtidos para o solo do subleito com as condições de compactação estudadas, conforme apresentados Quadro 3.

Quadro 3. Deflexões para a estrutura sem revestimento primário

Umidade de compactação da camada		Deflexão (10^{-2} mm)	
Subleito	Subleito compactado	X ₁	X ₂
-2%	-2%	136	97
	Umidade ótima	143	98
	2%	172	102
Umidade ótima	-2%	194	148
	Umidade ótima	203	149
	2%	228	151
2%	-2%	285	226
	Umidade ótima	298	228
	2%	320	230

Fonte: Bittencourt (2011).

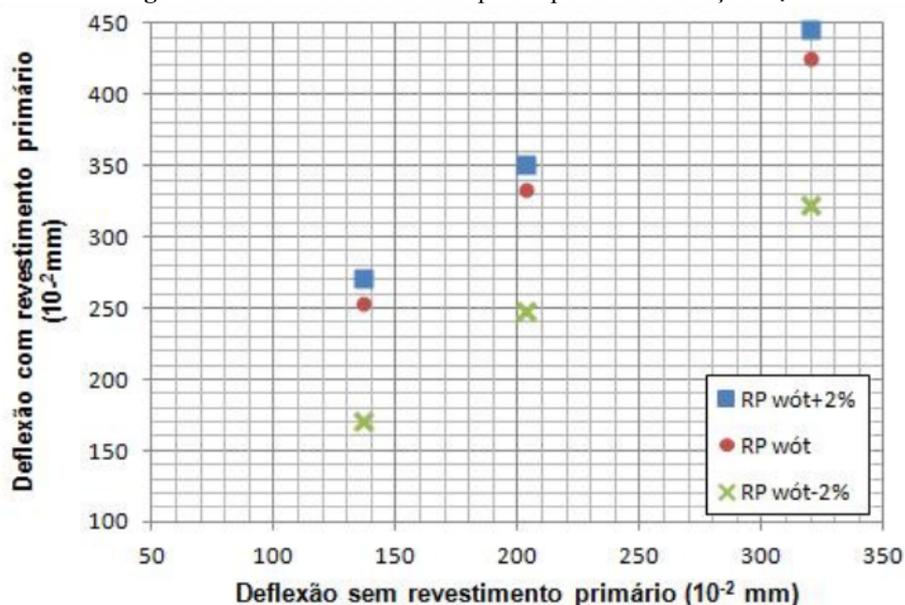
Os resultados dos cálculos de deflexão para a estrutura com revestimento primário estão apresentados no Quadro 4, no qual foram considerados apenas combinações de subleito com módulo de resiliência igual nas três camadas.

Quadro 4. Deflexões para a estrutura com revestimento primário

Umidade de compactação da camada		Deflexão X_1 (10^{-2} mm)		Deflexão X_2 (10^{-2} mm)	
Subleito	Subleito compactado	No topo do subleito (sem pista)	No topo do revestimento primário	No topo do subleito (sem pista)	No topo do revestimento primário
-2%	-2%	136	170	97	109
	Umidade ótima	136	253	97	116
	2%	136	270	97	118
Umidade ótima	-2%	203	248	149	186
	Umidade ótima	203	333	149	190
	2%	203	351	149	191
2%	-2%	320	322	230	261
	Umidade ótima	320	425	230	271
	2%	320	446	230	272

Fonte: Bittencourt (2011).

Com base nos resultados obtidos no cálculo das deflexões verifica-se que as deflexões no ponto de avaliação X_2 , correspondente ao ponto situado entre as rodas do semieixo, não variaram significativamente. No ponto de avaliação X_1 , correspondente ao ponto imediatamente inferior a uma das rodas do semieixo, a variação foi considerável principalmente quando se comparam os valores para a condição de revestimento primário compactados na umidade ótima (wót) e com desvio padrão de -2% em relação à umidade ótima, como ilustrado na Figura 13.

Figura 13. Deflexões calculadas para o ponto de avaliação X_1 

Fonte: Adaptado de Bittencourt (2011).

Analisando o estudo apresentado, pôde-se concluir que a adição da camada de revestimento primário nas estruturas analisadas contribuiu para o aumento das deflexões no pavimento quando comparada com os valores obtidos no topo do subleito sem revestimento primário. O autor explicou que foi devido ao fato de que o módulo de resiliência do revestimento primário é menor que o módulo de resiliência do subleito, fazendo com que as deflexões sejam “comandadas” pelo subleito. As deflexões admissíveis calculadas para o controle de compactação através das medidas de deslocamento elástico das camadas não indicaram variação considerável com as condições de compactação avaliadas para o revestimento primário estudado. O que se percebeu foi a variação de deflexões no ponto localizado abaixo da roda, no entanto essa informação não pode ser usada para medições com a viga Benkelman, uma vez que esta mede as deflexões no ponto localizado entre as rodas do semieixo padrão, conforme a norma DNER-ME 024/94.

2.5 MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

Para a elaboração do dimensionamento de uma estrutura de pavimento flexível deve-se compreender como ela atinge sua condição de ruína. Tal análise tem como princípio a adoção de cálculos das tensões e deformações, por meio da Teoria da Elasticidade, com o emprego de programas computacionais por facilidade e rapidez de cálculos. Considera-se, a partir da representação numérica de um sistema de camadas elásticas de espessuras finitas assentes sobre o subleito, semi-espaço infinito isotrópico, com seus respectivos valores de módulo de resiliência (M_R) e coeficiente de Poisson (μ) (VILLELA, 2012).

No Brasil os pavimentos flexíveis são dimensionados através de métodos como o do DNIT (DNER 1981) e o da Resiliência (TECNAPAV), porém tem sido cada vez mais utilizada a análise empírico-mecanicista para o dimensionamento.

2.5.1 Método do DNIT

O método do DNIT de dimensionamento foi desenvolvido em 1966 e aprimorado até a sua última versão em 2006. O método baseia-se no cálculo de uma espessura, em termos de material granular e também na proteção do subleito contra

deformações excessivas. Primeiro é necessário o conhecimento dos materiais que serão empregados em cada camada, observando as seguintes recomendações (BRASIL, 2006b):

- Materiais para reforço do subleito: os que apresentarem CBR maior que o do subleito e expansão $\leq 1\%$ (medida com sobrecarga de 10 lb);
- Materiais para reforço do subleito: os que apresentarem CBR $\geq 20\%$, Índice de grupo = 0 e expansão $\leq 1\%$ (medida com sobrecarga de 10 lb);
- Materiais para base: os que apresentarem CBR $\geq 80\%$ e expansão $\leq 0,5\%$ (medida com sobrecarga de 10 lb); Limite de liquidez $\leq 25\%$ e Índice de plasticidade $\leq 6\%$.

O pavimento é dimensionado em função do número N. O Quadro 5 relaciona o número N com a espessura mínima de revestimento asfáltico. Em geral, os órgãos rodoviários adotam a espessura mínima, salvo quando estudos comprovam a necessidade de adoção de espessuras elevadas.

Quadro 5. Espessura mínima do revestimento asfáltico

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

Fonte: Brasil (2006b).

Mesmo que o CBR da sub-base seja superior a 20%, considera-se 20% para a determinação da espessura do pavimento a protegê-la. Por essa razão, usam-se o símbolo H_{20} e h_{20} para representar as espessuras de pavimento sobre a sub-base e da sub-base, respectivamente. Os símbolos H_m e K representam, respectivamente, a espessura total do pavimento e os coeficientes de equivalência estrutural de cada camada (K_R : revestimento; K_B : base; K_S : sub-base e K_{ref} : reforço). O Quadro 6 apresenta os coeficientes de equivalência estrutural para os diferentes materiais constituintes do pavimento.

Quadro 6. Coeficientes de equivalência estrutural

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

Fonte: Brasil (2006b).

Uma vez determinadas as espessuras H_n e H_{20} , através da Equação 6 é calculada a espessura total e proteção do subleito (H_m) em termos de material granular:

$$H_m = 77,67 \times N^{0,0482} \times \text{CBR}^{-0,598} \quad (6)$$

Calculam-se as espessuras do revestimento (R), da base (B), sub-base (h_{20}) e reforço do subleito (h_n) através da resolução das seguintes Inequações:

$$\bullet \quad R \cdot K_R + B \cdot K_B \geq H_{20} \quad (7)$$

$$\bullet \quad R \cdot K_R + B \cdot K_B + h_{20} \cdot K_s \geq H_{20} \quad (8)$$

$$\bullet \quad R \cdot K_R + B \cdot K_B + h_{20} \cdot K_s + h_n \cdot K_{ref} \geq H_m \quad (9)$$

2.5.2 Método da Resiliência (TECNAPAV)

O Método da Resiliência ou Método TECNAPAV foi proposto em 1982 pelos engenheiros Salomão Pinto e Ernesto Preussler (BRASIL, 2006c).

Este procedimento é baseado em modelos de resiliência, apresentando um método de análise simplificada que calcula a deflexão máxima prevista de uma estrutura proposta para uma determinada expectativa de vida de fadiga e levando em consideração os indicadores mais importantes na definição de uma estrutura de pavimento: deflexão na superfície, diferença entre as tensões horizontal de tração e vertical de compressão na fibra inferior do revestimento e tensão vertical no subleito (DNER, 1994).

Os solos de subleito devem ser submetidos a ensaios de caracterização, granulometria e CBR. O Quadro 7, apresenta a classificação dos solos quanto à resiliência, em função da porcentagem de silte e do índice CBR.

Quadro 7. Classificação dos solos

CBR (%)	Silte (%)		
	≤ 35	35 a 45	≥ 45
≥ 10	I	II	III
6 a 9	II	II	III
2 a 5	III	III	III

Fonte: DNER (1994).

Para fins de dimensionamento, o método considera como granulares as seguintes camadas: base, sub-base e/ou reforço do subleito, que contenham menos de 35%, em massa, passando na peneira de nº 200 (0,075 mm).

A estrutura de referência adotada neste procedimento é constituída por três camadas (Figura 14), sendo h_{ef} a espessura da primeira camada e h_{cg} a espessura da segunda camada, que engloba todas as camadas constituídas por solo granular.

Figura 14. Estrutura de referência do método DNER-PRO 269/94



Fonte: Autoria própria.

A espessura efetiva (h_{ef}) é calculada através da Equação 10:

$$h_{ef} = -5,737 + \frac{807,961}{D_p} + 0,972I_1 + 4,101I_2 \quad (10)$$

Onde:

D_p = deflexão de projeto característica.

Os valores das constantes I_1 e I_2 , relacionadas às características resilientes da terceira camada da estrutura de referência, estão apresentados no Quadro 8.

Quadro 8. Valores das constantes I_1 e I_2

h_{cg}	Tipo do solo	I_1	I_2
≤ 45 cm	I	0	0
	II	1	0
	III	0	1
> 45 cm	-	0	1

Fonte: DNER (1994).

A espessura do reforço em concreto asfáltico (H_R) é calculada pela Equação 11. A condição é $D_{adm} \leq D_p$.

$$H_R = -19,015 + \frac{238,14}{\sqrt{D_{adm}}} - 1,357h_{ef} + 1,016I_1 + 3,893I_2 \quad (11)$$

Onde:

h_{ef} = espessura efetiva da camada de reforço;

D_{adm} = deflexão máxima admissível (0,01 mm), calcula pela Equação 5.

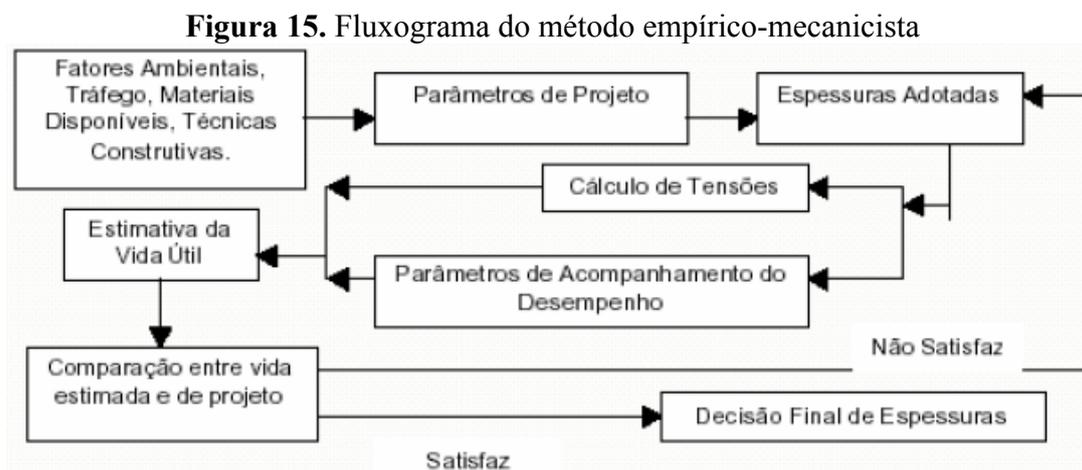
O Método da Resiliência (TECNAPAV) consta no Manual de Pavimentação do DNIT.

2.5.3 Método empírico-mecanicista

O método empírico-mecanicista recebe esta designação por integrar modelos de comportamento dos materiais e do pavimento, embora algumas das variáveis sejam ainda ponderadas com a experiência proveniente da observação do comportamento dos pavimentos, ou seja, empírica (LOPES, 2009).

Segundo Franco (2000), o dimensionamento empírico-mecanicista requer uma interação manual do projetista, ou seja, após a seleção de uma estrutura, o método permite analisar se a estrutura proposta satisfaz ou não os critérios de desempenho estabelecidos inicialmente. Caso a escolha não satisfaça tais critérios, uma nova tentativa é realizada pelo projetista até que os requisitos sejam satisfeitos. Em geral o critério é o atendimento do número N.

Os métodos empírico-mecanicistas foram desenvolvidos na década de 1980, mas ganharam visibilidade e aplicação prática depois dos anos 1990 com o desenvolvimento e utilização de *softwares* apropriados (BRASIL, 2006c). A Figura 15 ilustra o fluxograma do método empírico-mecanicista.



Fonte: Motta (1991) *apud* Ferreira (2002).

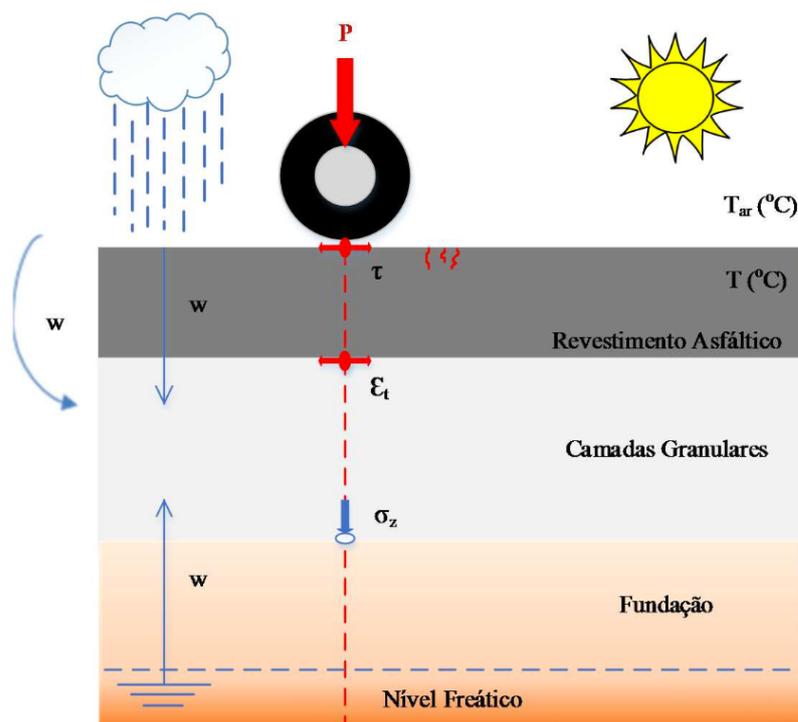
2.6 CRITÉRIOS DE RUÍNA DOS PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

Os critérios de ruína dos pavimentos flexíveis são definidos como situações limites em relação às quais os pavimentos são analisados nos métodos empírico-mecanicistas de dimensionamento. É de fundamental importância o conhecimento das características de ruptura dos materiais envolvidos na construção dos pavimentos, tendo em vista que o comportamento dos revestimentos asfálticos sob solicitações à flexão e a compressão é caracterizado pela lei de fadiga e pela lei de deformação permanente (MELO, 2014).

2.6.1 Fadiga

A fadiga é caracterizada pelo trincamento excessivo da camada de revestimento asfáltico. O critério de fadiga é controlado pela deformação específica de tração (ϵ_t) na base da camada asfáltica (fibra inferior). A Figura 16 ilustra as solicitações em um pavimento flexível.

Figura 16. Esquema de solicitações em um pavimento flexível



Fonte: Adaptado de Branco *et al.* (2005 *apud* Fontes, 2009).

Legenda: P – Carga da roda; τ – Força tangencial; ε_t – Deformação horizontal de tração; σ_z – Tensão vertical; T_{ar} – Temperatura do ar; T – Temperatura do revestimento asfáltico; w – Água nas camadas granulares e fundação.

De acordo com Santos (2009), a fadiga dos materiais, denominada lei de fadiga, relaciona o valor da deformação com o número de vezes que um determinado carregamento pode ser repetido até a ruína do material, ou seja, permite determinar a vida útil do pavimento.

Em geral as leis de fadiga de misturas asfálticas são estabelecidas a partir de ensaios de laboratório de cargas repetidas que são conduzidos a diferentes níveis de tensão ou de extensão, devendo reproduzir o quanto possível as condições das misturas asfálticas em camadas de pavimentos em serviço (FONTES, 2009).

Os principais fatores que afetam a resistência à fadiga, relativos à composição das misturas asfálticas, são o volume de vazios e a porcentagem de asfalto. Comparado com essas duas variáveis, o tipo de agregado tem menor influência e quanto maior for a porcentagem de asfalto, maior é a capacidade da mistura asfáltica para resistir à fadiga (FONTES, 2009).

De acordo com Monismith *et al.* (1971), as leis de fadiga são expressas na forma da Equação 12, onde o número de ciclos é comparado ao número N (8,2 toneladas-força).

$$N = a \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^b \quad (12)$$

Onde:

N = número de ciclos;

ε_t = deformação específica de tração;

a e b = constantes determinadas experimentalmente em laboratório.

No ensaio à tensão controlada (força), o critério de fadiga está associado à ruptura do corpo de prova. A amplitude da tensão é mantida constante ao longo do ensaio e as deformações atingem um valor máximo até o estágio de colapso do corpo de prova. Assim, a vida de fadiga (N) é definida como o número total de aplicações de uma carga necessária à ruptura completa do corpo de prova. No ensaio à deformação controlada (deslocamento), o critério de fadiga não está condicionado à ruptura completa do corpo de prova (FONTES, 2009). De modo que a amplitude de deformação seja mantida constante ao longo do ensaio, é necessário que haja uma diminuição do carregamento aplicado (PREUSSLER; PINTO, 2001).

O Quadro 9 apresenta a diferença entre os dois tipos de ensaios de fadiga e a sua influência sobre as características medidas no ensaio.

Quadro 9. Diferenças entre tensão controlada e deformação controlada em testes de fadiga

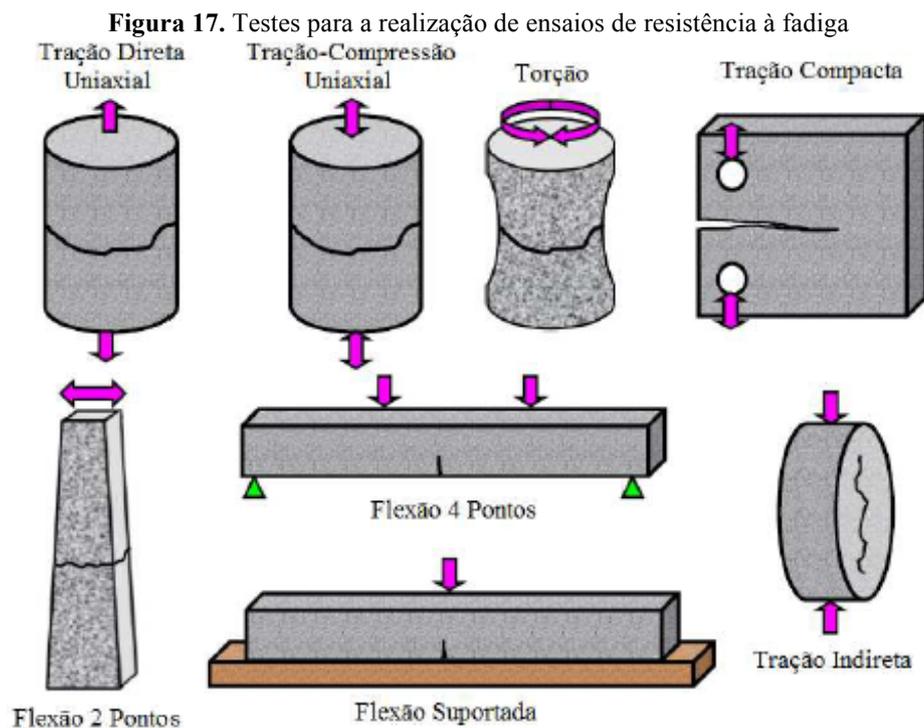
Variáveis	Tensão controlada	Deformação controlada
Espessuras da camada de concreto asfáltico	Vinculada à camadas relativamente espessas	Vinculada à camadas relativamente espessas
Definição de falha (número de ciclos)	Bem definida a partir de fraturas no corpo de prova	Arbitrária, o ensaio é interrompido quando o nível de carga foi reduzido, em certa proporção do seu valor inicial
Dispersão dos resultados	Maior dispersão	Menor dispersão
Número necessário de corpos de prova	Menor número	Maior número
Magnitude da vida à fadiga (N)	Vida geralmente menor	Vida geralmente maior
Efeito das variáveis da mistura	Mais sensível	Menos sensível
Taxa de dissipação de energia	Mais rápida	Mais lenta
Taxa de propagação de trincas	Mais rápido do que ocorre em campo	Mais representativos das condições de campo
Efeitos benéficos de períodos de repouso	Maiores efeitos benéficos	Menores efeitos benéficos

Fonte: Souliman *et al* (2012 *apud* Melo, 2014).

2.6.1.1 Tipos de testes de resistência à fadiga

Nas últimas décadas diversos métodos de ensaio foram desenvolvidos para obter o comportamento de misturas de concreto asfáltico em relação à fadiga.

De acordo com Melo (2014), a qualidade de predição da resistência à fadiga utilizando qualquer um destes métodos de ensaio depende do grau de precisão em que o ensaio simula o carregamento, os apoios, o estado de tensão e o meio ambiente. No Brasil, o ensaio mais utilizado de resistência à fadiga é realizado por compressão diametral à tensão controlada, com carga aplicada através de um equipamento (PINTO, 1991; RODRIGUES 1991; MEDINA, 1997). Na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), o laboratório de pavimentação dispõe de equipamentos em flexão alternada 2 pontos (francês) e 4 pontos (norte-americano). A Figura 17 ilustra diferentes tipos de testes para a realização de ensaios de resistência à fadiga.

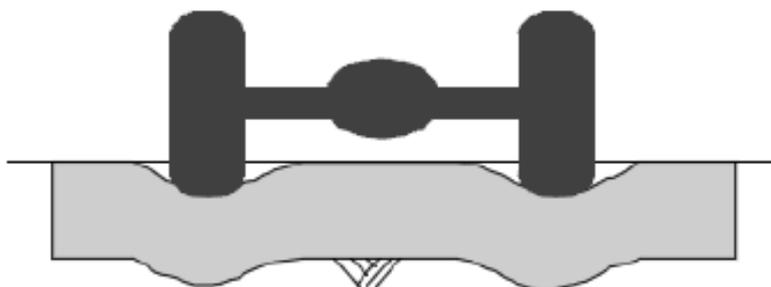


Fonte: Zeiada (2012 apud Melo, 2014).

Segundo Zeiada (2012), existem variáveis que não são consideradas nos testes de fadiga realizados em laboratório, o que dificulta a simulação das condições de campo, fazendo com que haja diferença na resistência à fadiga. Como exemplo dessas variáveis pode-se citar: fabricação das amostras, carregamento composto, períodos aleatórios de descanso, ação do meio ambiente e multiestado de tensão.

2.6.2 Deformação permanente

A deformação permanente, em inglês *rutting*, é um defeito caracterizado pela deformação vertical excessiva do revestimento asfáltico, originando o Afundamento de Trilha de Roda (ATR). Ocorre de forma mais severa em misturas que possuem pequena resistência ao cisalhamento e que estão submetidas a altas temperaturas. Além de diminuir a vida útil do pavimento, a patologia de deformação permanente reduz consideravelmente o conforto ao rolamento e a segurança dos usuários (VILLENA *et al.*, 2015). A Figura 18 ilustra a deformação permanente estrutural no pavimento.

Figura 18. Deformação permanente estrutural

Fonte: Adaptado de *U.S. Department of Transportation* (2010).

O desenvolvimento da deformação permanente pode ser evitado por meio da seleção adequada dos materiais, compactação satisfatória, elaboração de um projeto de pavimento adequado e rigoroso controle de qualidade de construção (BERNUCCI *et al.*, 2007).

Mahmoud e Bahia (2004) relacionam os fatores influentes e seus efeitos na resistência ao afundamento de trilha de roda, apresentados no Quadro 10.

Quadro 10. Fatores que atuam no afundamento de trilha de roda nos revestimentos asfálticos

	Fator	Variação do fator	Resistência ao ATR
Agregados	Textura superficial	Lisa para rugosa	Aumento
	Granulometria	Descontínua para densa	Aumento
	Forma	Arredondada para angular	Aumento
	Tamanho	Aumento do tamanho máximo	Aumento
Ligante	Rigidez	Aumento	Aumento
Mistura asfáltica	Teor de ligante	Aumento	Redução
	Percentual de vazios	Aumento	Redução

Fonte: Adaptado de Mahmoud e Bahia (2004).

2.7 GEOGRELHAS E GEOCÉLULAS

No Brasil, a maioria dos pavimentos classificadas como flexível, onde em algumas situações percebe-se o emprego de camadas granulares diretamente sobre subleitos de baixa capacidade de suporte (ou mal compactados), gerando a manifestação de patologias como o Afundamento de Trilha de Roda (ATR) e o trincamento por fadiga (TRICHÊS e BERNUCCI, 2004).

Para controle ou mesmo redução dessas patologias, têm-se utilizado no meio rodoviário os geossintéticos como camada de auxílio e reforço da base. Um dos geossintéticos mais utilizados são as geogrelhas.

Aguiar e Vertamatti (2004) definem que:

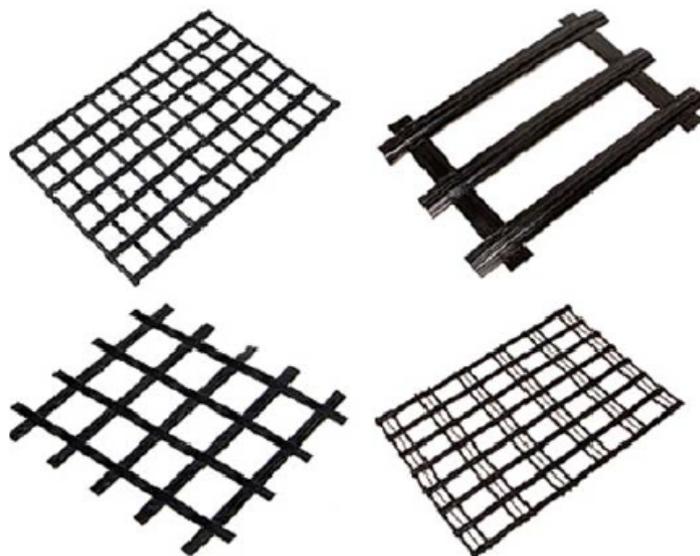
“ [geogrelha é um] produto com estrutura em forma de grelha com função predominante de reforço, cujas aberturas permitem a interação do meio em que estão confinadas, e constituído por elementos resistentes à tração. Em função da fabricação as geogrelhas podem ser extrudadas, soldadas ou tecidas. “

Koerner (1994) *apud* Antunes (2008) afirmam que geogrelhas também são caracterizadas como:

“[...] materiais planares flexíveis formados por uma rede regular de elementos com aberturas de tamanho suficiente para interagir com o material de enchimento circundante. “

A Figura 19 ilustra os diferentes formatos de geogrelha.

Figura 19. Diferentes formatos de geogrelha



Fonte: Medeiros (2008).

Algumas características e vantagens das geogrelhas são listadas como segue (AGUIAR e VERTAMATTI, 2004):

- Alto módulo de rigidez;
- Interação com o solo;
- Elevada resistência à tração na ruptura;

- Aumento da capacidade de suporte da camada reforçada;
- Diminuição das deflexões do pavimento;
- Evita a mistura (no caso, contaminação) de materiais com granulometrias distintas.

Perkins (1999) e Antunes (2008) afirmam que função de reforço é desenvolvida pela interação entre as camadas de solo e de geossintético contida no interior ou na parte inferior da camada granular de base. Os quatro mecanismos principais são (TRICHÊS e BERNUCCI, 2004):

- Intertravamento: o aumento do intertravamento entre os grãos na interface com o subleito inibe o movimento lateral dos agregados;
- Tensão de tração: proporciona uma “resistência à tração” com baixas deformações na camada de base;
- Confinamento: propicia um confinamento uniforme do agregado na interface com o subleito;
- Separação: inibe a cravação dos agregados da camada no subleito, mantendo a efetiva espessura da camada granular.

Devido às vantagens da aplicação deste material o seu uso tem sido cada vez mais frequente, não só em pavimentação, como também na criação de estruturas de contenção, aterros sobre solos de baixa capacidade, entre outros.

No final da década de 1970, o *United States Army Corps of Engineers* (USACE) desenvolveu um sistema tipo plataforma, para ser apoiado sobre solos de baixa capacidade de suporte e permitir o acesso de equipamentos militares pesados. O resultado desse desenvolvimento foi a invenção da geocélula, outro geossintético que ao ser preenchido com areia ou pedra suportaria cargas elevadas, quando colocada sobre esses solos pouco resistentes. Desde então, a geocélula tem sido utilizada em projetos e obras no mundo todo, inclusive no meio rodoviário (GEOACADEMY, 2016).

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), em sua norma NBR 12553/2003, geocélula é um geossintético constituído por tiras sobrepostas, de polietileno de alta densidade extrudado, unidas entre si por meio de solda em intervalos descontínuos, de forma que, quando separadas ou expandidas, durante a instalação, apresentam-se como um painel de estrutura tridimensional de células contíguas, de paredes verticais, semelhante a uma colmeia. O seu aspecto está ilustrado na Figura 20.

Figura 20. Geocélula



Fonte: *Webtec* (2003).

3. MATERIAIS E MÉTODO

Neste capítulo serão apresentados os materiais e o método utilizado para realização deste trabalho.

3.1. ENQUADRAMENTO

O Estado de Santa Catarina é um dos três Estados que fazem parte da Região Sul do Brasil, juntamente com o Paraná e o Rio Grande do Sul. A Figura 21 ilustra a localização do Estado de Santa Catarina no Brasil e dos municípios que compõem a região metropolitana de Florianópolis, capital do Estado, denominada de Grande Florianópolis.

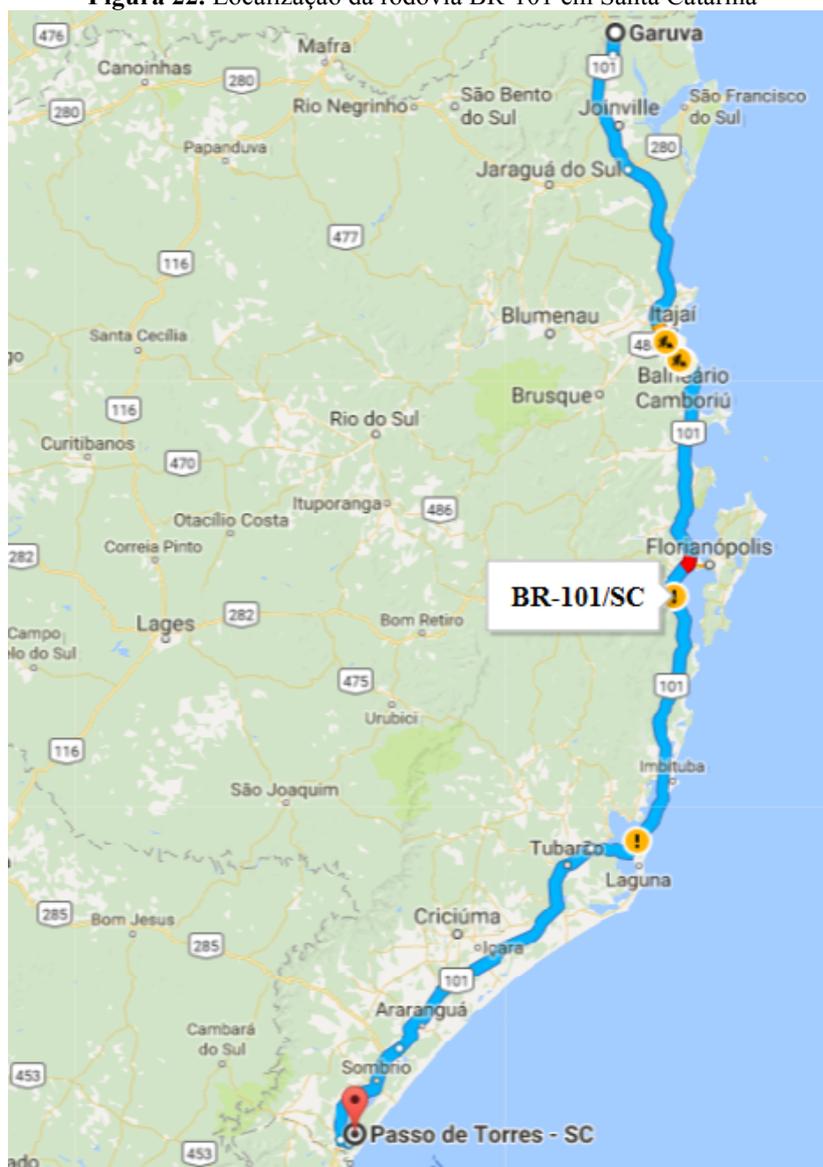
Figura 21. Localização do estado de Santa Catarina no Brasil e dos municípios da Grande Florianópolis



Fonte: Relatório de Impacto Ambiental do Contorno Rodoviário de Florianópolis (2013).

Em território catarinense, com 463 km predominantemente em pista dupla, a rodovia BR-101/SC atravessa o Estado de Santa Catarina contemplando a ligação entre Garuva/SC (divisa com o Estado do Paraná) e Passo de Torres/SC (divisa com o Estado do Rio Grande do Sul), conforme Figura 22.

Figura 22. Localização da rodovia BR-101 em Santa Catarina



Fonte: Google Maps (2016).

Devido ao elevado volume de tráfego e ao tráfego pesado que atravessa os trechos urbanos da BR-101/SC na região da Grande Florianópolis, gerando inúmeros problemas relacionados à mobilidade, fez-se necessário a implementação de um projeto com o intuito de minimizar esses agravantes.

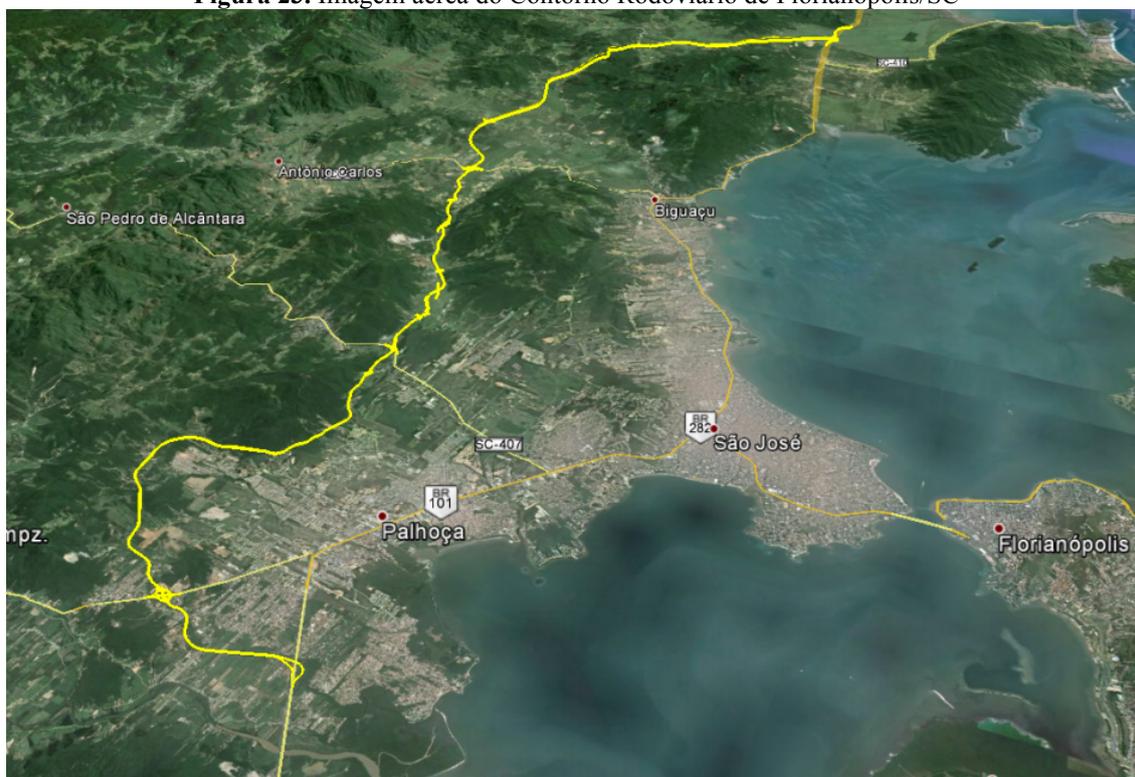
A obra do Contorno Rodoviário de Florianópolis/SC é a principal obra da Concessionária Autopista Litoral Sul S/A, do Grupo Arteris. Com início no km 177+760 da BR-101/SC e fim no km 220+000, num total de ± 50 quilômetros de extensão de pista dupla, está dividida em 06 subtrechos. O Contorno Rodoviário de Florianópolis/SC atravessa os municípios de Governador Celso Ramos/SC, Biguaçu/SC, São José/SC e Palhoça/SC, e tem como objetivo principal desviar o

tráfego pesado de longa distância, do eixo principal da BR-101/SC, da região metropolitana da Grande Florianópolis. Desta forma, a construção do Contorno contribuirá para minimizar os efeitos negativos dos congestionamentos ao longo do trecho da BR-101/SC, melhorando a fluidez do tráfego de passagem e criando uma nova alternativa de acesso ao tráfego que se destina/origina das demais rodovias próximas (Figura 23).

Ao longo dos 50 quilômetros, além das duas interseções com a BR-101/SC, estão projetados quatro cruzamentos com rodovias estaduais e quatro túneis, para reduzir o impacto social das desapropriações e evitar que a estrada atravesse bairros. Os túneis, por enquanto, estão em fase de projeto.

A execução dos serviços teve início em março de 2015 e a conclusão está prevista para 2019, prazo este acertado com a Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT).

Figura 23. Imagem aérea do Contorno Rodoviário de Florianópolis/SC

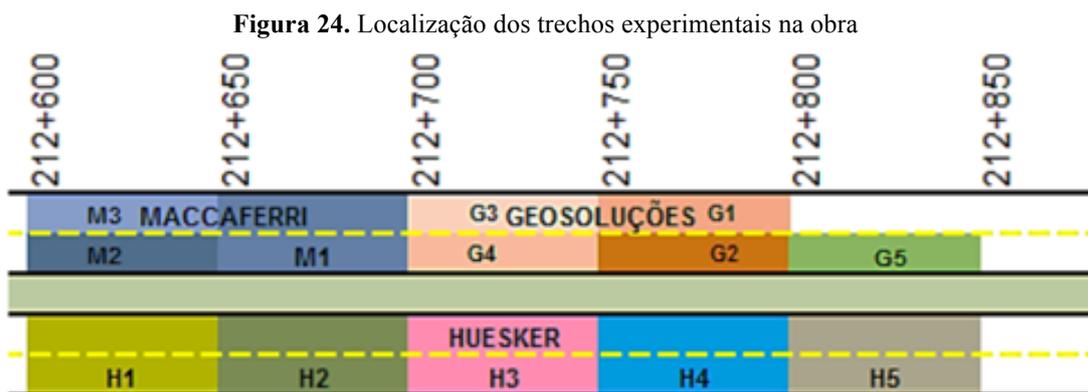


Fonte: RIMA Contorno Rodoviário de Florianópolis (2013).

O subtrecho III compreende o segmento entre os quilômetros 211+543 e 215+682 em pista dupla (Norte e Sul). A empresa responsável pela execução deste subtrecho é a Construtora Consórcio Ferroviário/Toniolo Busnello S.A. No subtrecho

III foram executados 13 trechos experimentais (pistas de teste) com 50 m de extensão, totalizando 650 m (Figura 24).

Os trechos experimentais escolhidos para o estudo foram: H2, G2 e M2, devido ao tipo de solução geotécnica adotada em cada um. A simbologia H, G e M são referentes às empresas fornecedoras dos geossintéticos utilizados.



Fonte: Relatório de soluções geotécnicas Engevix (2016).

3.2 GEOLOGIA

O traçado por onde se desenvolve a obra do Contorno Rodoviário de Florianópolis/SC, apresenta perfil do subsolo constituído por três unidades geológicas, sendo do topo para a base: depósitos tecnogênicos (aterros); sedimentos inconsolidados de idade Terciária/Quaternária e embasamento cristalino (pré-Cambriano).

Em níveis mais superficiais, os aterros constituídos por materiais diversos ocupam o primeiro metro do perfil. Abaixo dos aterros ocorrem extensos depósitos de sedimentos com idade quaternária/terciária.

Nas partes de topografia mais plana e baixa predominam aluviões depositados em período geológico recente, associados às calhas de drenagens e suas planícies de inundação. Os aluviões são compostos por sedimentos inconsolidados, mal classificados, constando de cascalheiras, areias (finas a grossas), materiais siltico-argilosos e argilas orgânicas moles. Uma vez que esses depósitos estão relacionados às calhas de drenagens, o nível d'água é pouco profundo em todo o trecho (de 1 a 3 m da superfície).

Em subsuperfície, os sedimentos atuais podem transicionar para depósitos de idade terciária relacionados à ambiente transicional, com sedimentos fluvio-lagunares, de mangue e praias. Os materiais guardam semelhança com os sedimentos recentes aluvionares, com possível e importante diferença nos valores de resistência.

Lateralmente em direção aos morros e elevações, nas encostas e junto à escarpas, ocorrem sedimentos mais grossos, por vezes com blocos rochosos de diversos tamanhos, que preenchem a cobertura dos vales na forma de rampas, muitas vezes abruptas.

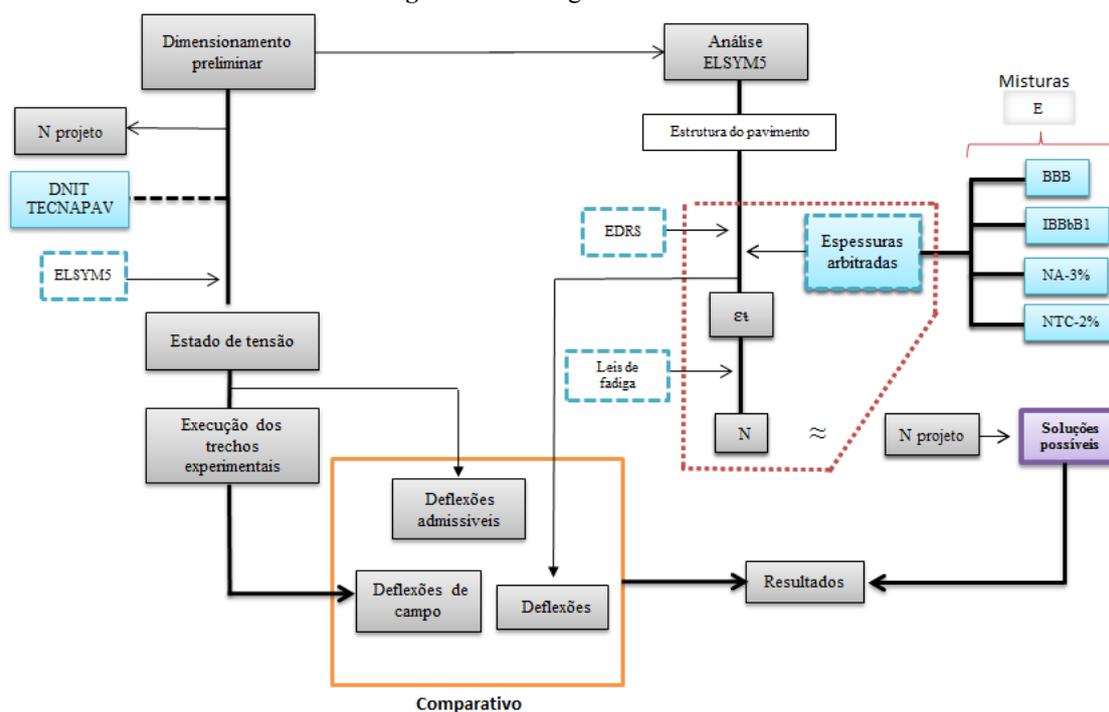
Sob estas unidades e/ou nas regiões de topografia mais elevada (porção central do traçado) estão as rochas do embasamento cristalino (pré-Cambriano) e seus produtos de alteração representados pelos solos residuais de granito, em geral constituídos por silte arenoso, pouco argiloso. Ao longo desta unidade deverá ocorrer a presença de estruturas das rochas, do tipo fraturas, que se encontram preservadas no solo de alteração e são chamadas de estruturas reliquiárias que, dependendo de seus mergulhos, podem implicar em taludes desfavoráveis em relação à estabilidade natural.

Todas as informações a respeito da geologia do local estão presentes no relatório geotécnico realizado pela Concessionária Autopista Litoral Sul.

3.3 MÉTODO

A Figura 25 ilustra o fluxograma das etapas desenvolvidas durante o estudo, onde a partir do dimensionamento preliminar foram obtidas as deflexões admissíveis e a partir dos trechos experimentais as deflexões de campo, sendo ambas comparadas. Através de análise pelo *software* ELSYM5 foram simuladas quatro misturas asfálticas com leis de fadiga já estabelecidas, extraindo do programa computacional os valores de deflexão de cada camada, comparando com os valores admissíveis e de campo, obtendo assim os resultados, juntamente com a análise da vida útil de cada mistura. A seguir as etapas do método são apresentadas.

Figura 25. Fluxograma do estudo



Fonte: Autoria própria.

3.3.1 Dimensionamento preliminar do pavimento

O tráfego considerado para o dimensionamento foi caracterizado através da determinação do número N para o período de projeto de 10 anos, considerando a abertura ao tráfego a partir de 2017. O Quadro 11 apresenta os valores dos números N calculados pelos métodos *United States Army Corps of Engineers* (USACE) e *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO).

Quadro 11. Número "N" utilizado no dimensionamento

$N_{USACE} =$	$1,23 \times 10^8$	Pista (faixa de rolamento/refúgio)
$N_{AASHTO} =$	$3,50 \times 10^7$	

Fonte: Memória de cálculo de pavimentação do Contorno de Florianópolis (2011).

O dimensionamento preliminar da estrutura do pavimento a ser adotado na obra do Contorno Rodoviário de Florianópolis/SC, foi realizado pelo Método do DNIT e pelo Método da Resiliência. Os cálculos foram realizados pelo Consórcio que reúne as empresas HBO Engenharia e Consultoria Ltda.; Engeti Consultoria e Engenharia S/S Ltda. e Sondasolo.

Os trechos experimentais selecionados no estudo foram executados em segmentos em aterro. As estruturas dimensionadas através dos dois métodos estão apresentadas no Quadro 12.

Quadro 12. Dimensionamento preliminar do pavimento - segmentos em aterro

CAMADA	ESPESSURA	
	DNIT	RESILIÊNCIA
Concreto Asfáltico Usinado à Quente (CAUQ)	17,0	14,5
Brita Graduada Simples (BGS)	15,0	15,0
Macadame Seco	25,0	25,0
Subleito ($CBR \geq 8\%$, $Exp. \leq 2\%$ e $MR \geq 800 \text{ kgf/cm}^2$)	-	-

Fonte: Memória de cálculo de pavimentação do Contorno Rodoviário de Florianópolis (2011).

Observa-se que no Quadro 12 a espessura adotada para o método de dimensionamento do DNIT é de 17,0 cm. O método recomenda a espessura mínima desta camada para este tráfego de 12,5 cm (Quadro 5). Este procedimento não é comumente adotado pelos órgãos rodoviários brasileiros. No entanto, trata-se, neste caso, de uma concessionária de rodovias e prioriza o melhor desempenho do pavimento em serviço.

Para o dimensionamento preliminar da estrutura do pavimento, a capacidade de suporte de projeto (CBR_p) foi obtida através de análise estatística dos dados obtidos dos ensaios laboratoriais de CBR (método das diferenças finitas) e calculada pela Equação 13.

$$CBR_p = \overline{CBR} - \frac{S \times 1,30}{\sqrt{n}} \quad (13)$$

Onde:

\overline{CBR} = CBR médio;

S = desvio padrão;

n = número de amostras.

Assim, para o dimensionamento preliminar da estrutura do pavimento, a capacidade de suporte de projeto resultou no valor $CBR_p = 8\%$. Com isso entende-

se que o subleito apresente $CBR \geq 8\%$ e módulo de resiliência (M_R) dado pela Equação 14, empírica, proposta por Heukelom e Foster (1960):

$$M_R = 10 \cdot CBR \quad (14)$$

Logo, $M_R = 800 \text{ kgf/cm}^2$. Estes parâmetros foram constatados durante a execução.

Atendendo aos critérios de resistência e resiliência, a análise empírico-mecanicista, utilizando as estruturas ilustradas no Quadro 13, seguiu o modelo elástico de camadas múltiplas. Para a determinação dos efeitos internos e externos originados na estrutura do pavimento (deslocamentos, tensões e deformações) empregou-se o programa computacional ELSYM5 (*Elastic Layered System*).

Quadro 13. Propriedades das camadas do pavimento proposto

CAMADA	ESPESSURA	E (kgf/cm ²)	Coefficiente de Poisson
Concreto Asfáltico Usinado à Quente (CAUQ)	17	37500	0,30
Brita Graduada Simples (BGS)	15	3000	0,35
Macadame Seco	25	2500	0,40
Subleito ($CBR \geq 8\%$, Exp. $\leq 2\%$ E $MR \geq 800 \text{ kgf/cm}^2$)	-	800	0,45

Fonte: Memória de cálculo de pavimentação do Contorno Rodoviário de Florianópolis (2011).

Para a determinação dos valores admissíveis foram utilizados os seguintes parâmetros:

- Deflexão na superfície do pavimento (D_0): DNER-PRO 269/64.
- Deformação horizontal de tração na fibra inferior do revestimento (ϵ_t):
FHWA (1976): $N_{AASHTO} = 1,092 \times 10^{-6} \cdot \left(\frac{1}{\epsilon_t}\right)^{3,512}$
- Deformação vertical de compressão no topo da camada do subleito (ϵ_v):
SHELL (1977): $N_{USACE} = 6,15 \times 10^{-7} \cdot \left(\frac{1}{\epsilon_v}\right) \cdot 4$

Através das estruturas apresentadas, dos tráfegos demonstrados pelo número N e dos parâmetros descritos, obtiveram-se os resultados ilustrados no Quadro 14 para os valores admissíveis.

Quadro 14. Deformações admissíveis - segmentos em aterro

LOCAL	D ₀ (10 ⁻² mm)	ε _t (10 ⁻⁴ cm/cm)	ε _v (10 ⁻⁴ cm/cm)
Pista	42,37	1,43	2,66

Fonte: Memória de cálculo de pavimentação do Contorno Rodoviário de Florianópolis (2011).

Com base nas espessuras do pavimento e características dos materiais constituintes e utilizando o mesmo *software*, obtiveram-se os resultados para as deformações atuantes (Quadro 15) e os valores admissíveis para as deflexões de cada camada do pavimento (Figura 26).

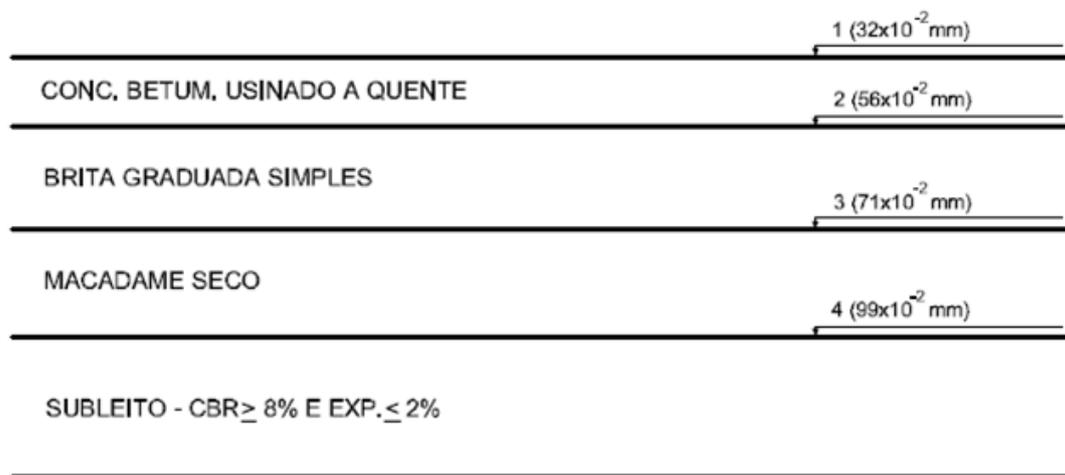
Quadro 15. Deformações atuantes - segmentos em aterro

LOCAL	D ₀ (10 ⁻² mm)	ε _t (10 ⁻⁴ cm/cm)	ε _v (10 ⁻⁴ cm/cm)
Pista	41,05	1,39	2,28

Fonte: Memória de cálculo de pavimentação do Contorno Rodoviário de Florianópolis (2011).

As deformações atuantes são menores que os valores admissíveis, o que mostra que as estruturas propostas dos pavimentos estão aptas à função estabelecida previamente segundo o período de projeto adotado.

Durante a execução dos trechos experimentais, o objetivo da equipe de execução é fazer com que cada camada do pavimento apresente deflexão menor do que a considerada como admissível.

Figura 26. Deflexões admissíveis - pré-dimensionamento

Fonte: Memória de cálculo de pavimentação do Contorno Rodoviário de Florianópolis (2011).

Os dados de espessuras, módulo de resiliência e coeficientes de Poisson estão apresentados no Quadro 13.

3.3.2 Execução dos trechos experimentais (pistas de teste)

Após o dimensionamento preliminar do pavimento e a análise do estado de tensões e deformações para determinação da deflexão admissível de cada camada, iniciou-se em campo a execução dos trechos experimentais.

Em campo, o controle e liberação das camadas foram realizados por meio dos ensaios de deflectometria de campo, utilizando a viga Benkelman. Os valores das deflexões das vigas características para os trechos experimentais foram obtidos conforme procedimento da norma DNER-PRO 010/79.

O controle foi ainda realizado por métodos destrutivos, sendo o frasco de areia para determinação da massa específica *in situ* e teor de umidade por meio do Método *Speedy*.

O Quadro 16 apresenta o resumo das características dos solos presentes nas camadas do subleito e de brita graduada estabilizada granulometricamente (brita graduada simples) dos trechos experimentais, realizados em laboratório.

Quadro 16. Características dos solos - trechos experimentais

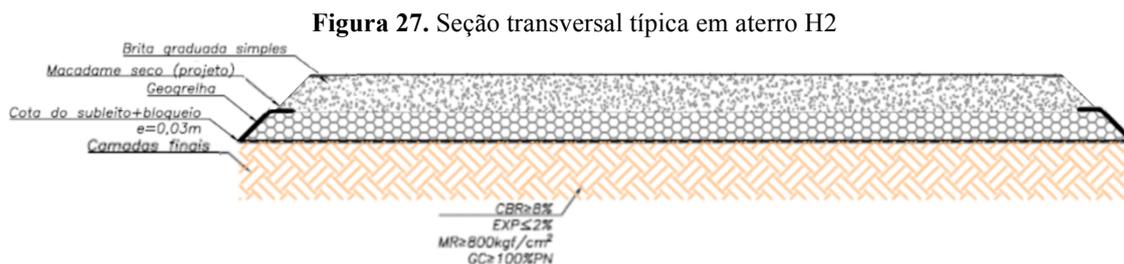
Trecho experimental	Camada	CBR (%)	Densidade máxima seca (g/cm ³)	Umidade ótima (%)
H2	BGS	> 100	2,154	5,7
	Subleito	20	1,695	16,6
G2	BGS Arteris	> 100	2,084	5,6
	Subleito	20	1,801	15,5
M2	BGS Arteris	> 100	2,084	5,6
	Subleito	20	1,755	11,1

Fonte: Adaptado do Relatório de soluções geotécnicas Engevix (2016).

Para as camadas de: macadame seco, pó de pedra e camada de bloqueio foram realizados ensaios de granulometria, não se aplicando, portanto, controle e ensaios de compactação. O controle adotado foi de espessura.

Trecho experimental H2 (km 212+650 ao km 212+700) – Pista Sul

A Figura 27 ilustra a seção transversal típica do trecho experimental H2.



Fonte: Relatório de soluções geotécnicas Engevix (2016).

Metodologia executiva

A execução das camadas do trecho experimental H2, e os ensaios de deflectometria com a viga Benkelman, seguiram a seguinte sequência:

- Delimitação da área de estudo;
- Remoção das camadas superiores à regularização do subleito;
- Preparação do subleito;
- Execução da camada de bloqueio;
- Colocação de geogrelha tipo Fornit® J600-40;
- Execução de duas camadas de macadame seco;
- Execução da camada de Brita Graduada Simples (BGS).

Após a delimitação da área de estudo pela equipe de topografia, que identificou e delimitou o início e o fim do subtrecho, iniciou-se a remoção das camadas superiores à regularização do subleito (RSL), previstas em projeto para promover o recalque do solo natural, abaixo do aterro. Foram retirados em média 0,90 m de material (sobrecarga/simulação de pavimento), sendo este disposto em bota-fora determinado em projeto.

A etapa seguinte foi preparação do subleito, através do processo de escarificação, gradeamento, nivelamento e posterior aplicação de doze passadas de rolo pé-de-carneiro para promover a compactação de modo a atingir o grau de compactação exigido. Posteriormente, foram realizados os ensaios (deflectométricos e destrutivos) para liberação das camadas de compactação, de acordo com os parâmetros da norma DNIT 108/2009-ES. A Figura 28 ilustra a compactação do subleito com rolos do tipo pé-de-carneiro.

Os resultados dos ensaios de densidade *in situ* estão apresentados no Anexo A – Densidade *in situ* H2 e a caracterização do material de subleito no Anexo B – Caracterização do subleito H2.

Figura 28. Nivelamento da camada RSL



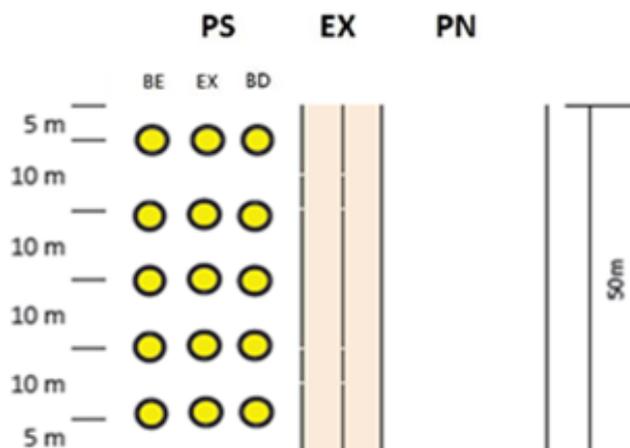
Fonte: Relatório de soluções geotécnicas Engevix (2016).

A medição das deflexões (Figura 29) para a camada de regularização do subleito (RSL), assim como para as outras camadas do trecho experimental H2, foi executada através do ensaio da viga Benkelman com a posição de leitura de acordo com a Figura 30, onde foram feitas três medições (bordo esquerdo, eixo e bordo direito) a cada 10 m de distância.

Figura 29. Medição das deflexões



Fonte: Relatório de soluções geotécnicas Engevix (2016).

Figura 30. Posição de leituras de deflexão H2

Fonte: Adaptado do relatório de soluções geotécnicas Engevix (2016).

Os resultados das deflexões medidas com a viga Benkelman (VB) conforme posições determinadas (Figura 30) para a camada de RSL estão apresentadas no Quadro 17. É importante salientar que no momento da realização do ensaio da viga Benkelman, a umidade *in situ* estava com variação média de (-) 1,5% em relação à umidade ótima, como pode ser observado no Anexo B – Caracterização do subleito H2.

Quadro 17. Resultados VB RSL H2

ESTACA	Deflexão (10^{-2} mm)		
	BE	EX	DB
212+655	179	131	125
212+660	224	105	135
212+670	371	248	163
212+680	449	224	135
212+690	357	274	185
212+695	238	246	189
Média dos resultados = 221×10^{-2} mm			
Viga característica = 315×10^{-2} mm			

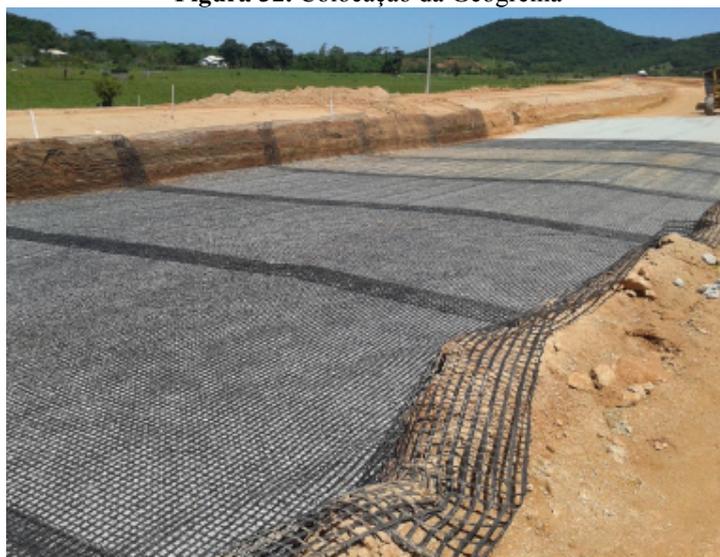
Fonte: Adaptado do relatório de soluções geotécnicas Engevix (2016).

Após a liberação da camada, foi executada a camada de bloqueio (Figura 31), com espessura média de 3 cm de brita $\frac{3}{4}$ ". A granulometria do material pode ser observada no Anexo C – Granulometria brita $\frac{3}{4}$ ".

Figura 31. Execução da camada de bloqueio

Fonte: Relatório de soluções geotécnicas Engevix (2016).

Após a execução da camada de bloqueio foi feita a colocação da geogrelha, (Figura 32) sendo esta disposta no sentido transversal da pista, com sobreposição de 50 cm entre os cortes e com sobras laterais de 1,20 m. A fixação da manta foi feita com grampeamento nas sobreposições e entre elas longitudinalmente à pista. Para promover uma melhor fixação também foi grampeado o centro da manta (eixo da pista). A especificação da geogrelha pode observada no Anexo D – Especificação Fornit® J600-40.

Figura 32. Colocação da Geogrelha

Fonte: Relatório de soluções geotécnicas Engevix (2016).

Sobre a geogrelha foram executadas duas camadas de macadame seco (Figuras 33 e 34) com aproximadamente 12,5 cm. O material foi pré-misturado na

proporção três partes de macadame seco para uma parte de material de enchimento. Na camada inferior foram aplicadas duas passadas com rolo liso para promover a compactação e acomodação, e na superior, foram seis, totalizando oito passadas com rolo liso. Após a finalização da compactação, procedeu-se à regularização da superfície a fim de eliminar pontos ou locais com segregação de material e possibilitar a execução do ensaio de deflexão com a viga Benkelman.

Figura 33. Lançamento da 1ª camada de macadame seco



Fonte: Relatório de soluções geotécnicas Engevix (2016).

Figura 34. Execução da 2ª camada de macadame seco



Fonte: Relatório de soluções geotécnicas Engevix (2016).

Os resultados das deflexões medidas com a viga Benkelman (VB) conforme posições determinadas (Figura 30) para as camadas de macadame seco estão representados no Quadro 18.

Quadro 18. Resultados VB Macadame Seco H2

ESTACA	Deflexão (10^{-2} mm)		
	BE	EX	DB
212+655	149	93	119
212+660	189	89	71
212+670	129	115	109
212+680	199	119	137
212+690	262	131	121
212+695	143	135	113
Média dos resultados = 135×10^{-2} mm			
Viga característica = 179×10^{-2} mm			

Fonte: Adaptado do relatório de soluções geotécnicas Engevix (2016).

Por fim, foi lançada a camada de Brita Graduada Simples (BGS), conforme projeto (Apêndice E – Projeto base BGS Arteris). Sua compactação feita através da aplicação de oito passadas com rolo liso (Figura 35). A granulometria da BGS pode ser vista no Apêndice F – Granulometria BGS H2.

Figura 35. Compactação da BGS

Fonte: Relatório de soluções geotécnicas Engevix (2016).

Por determinação da equipe de controle tecnológico a liberação da camada deu-se através de seis ensaios de densidade *in situ* que, assim como na camada de subleito, foram realizados dois no bordo esquerdo e dois no bordo direito (km 212+670 e km 212+690) e dois no eixo (km 212+280). Os resultados destes ensaios podem ser observados no Anexo G – Densidade *in situ* BGS H2.

Os resultados das deflexões medidas com a viga Benkelman conforme posições determinadas (Figura 30) para a camada BGS estão apresentados no Quadro 19.

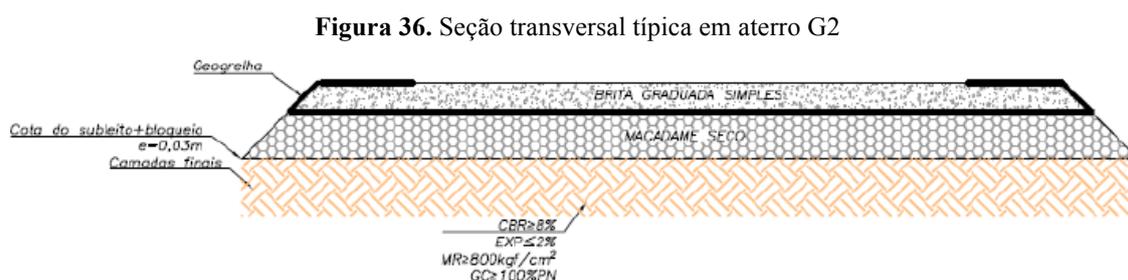
Quadro 19. Resultados VB BGS H2

ESTACA	Deflexão (10^{-2} mm)		
	BE	EX	DB
212+655	79	62	99
212+660	89	54	70
212+670	127	60	62
212+680	159	64	60
212+690	155	73	70
212+695	-	-	-
Média dos resultados = 86×10^{-2} mm			
Viga característica = 120×10^{-2} mm			

Fonte: Adaptado do relatório de soluções geotécnicas Engevix (2016).

Trecho experimental G2 (km 212+750 ao km 212+800) – Pista Norte

A Figura 36 ilustra a seção transversal típica do trecho experimental G2.



Fonte: Relatório de soluções geotécnicas Engevix (2016).

Metodologia executiva

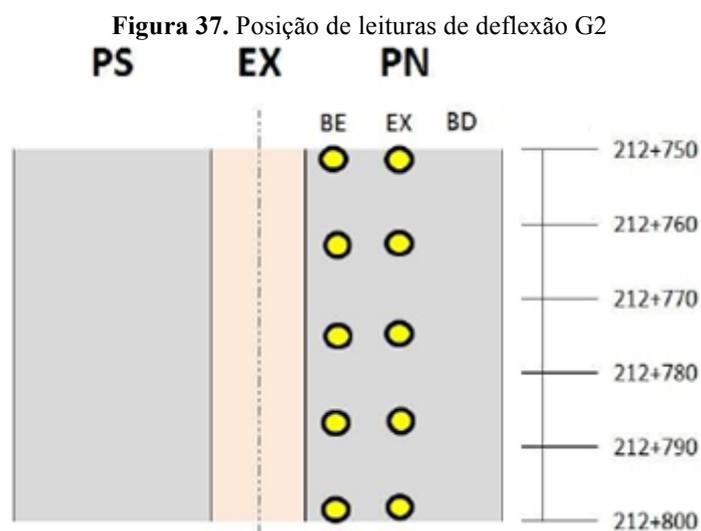
A execução das camadas do trecho experimental G2, e os ensaios de deflectometria com a viga Benkelman, seguiram a seguinte sequência:

- Delimitação da área de estudo;
- Remoção das camadas superiores à regularização do subleito;
- Preparação do subleito;
- Execução da camada de bloqueio;
- Execução de duas camadas de macadame seco;
- Colocação de geogrelha tipo Fornit® J600-40;
- Execução da camada de Brita Graduada Simples (BGS).

No trecho experimental G2 após a delimitação da área de estudo pela equipe de topografia, que identificou e delimitou o início e o fim do subtrecho, iniciou-se a remoção das camadas superiores à regularização do subleito (RLS). Foram também, assim como no trecho experimental H2, retirados em média 0,90 m de solo.

Na preparação do subleito foram aplicadas onze passadas com rolo pé-de-carneiro para promover a compactação e liberação da camada de acordo com os parâmetros da norma DNIT 108/2009-ES. Os ensaios de densidade *in situ* e a caracterização do material do subleito podem ser verificados no Anexo H - Densidade *in situ* subleito G2 e no Anexo I – Caracterização do subleito G2, respectivamente.

A medição das deflexões para a camada de RSL, assim como para as outras camadas do trecho experimental G2, foi executada através do ensaio da viga Benkelman com a posição de leitura de acordo com a Figura 37, onde foram feitas duas medições (bordo esquerdo e eixo) a cada 10 m de distância.



Fonte: Adaptado do relatório de soluções geotécnicas Engevix (2016).

Nos resultados das deflexões para a camada de RSL (Quadro 20) é importante salientar que no momento da realização do ensaio da viga Benkelman, a umidade *in situ* estava com variação média de (-) 0,6% em relação à umidade ótima, como pode ser observado Apêndice I – Caracterização do subleito G2.

Quadro 20. Resultados VB RSL G2

ESTACA	Deflexão (10^{-2} mm)		
	BE	EX	BD
212+750	258	270	-
212+760	282	209	-
212+770	308	306	-
212+780	294	264	-
212+790	260	246	-
Média dos resultados = 270×10^{-2} mm			
Viga característica = 300×10^{-2} mm			

Fonte: Adaptado do relatório de soluções geotécnicas Engevix (2016).

Foi executada a camada de bloqueio, com espessura média de 3 cm de brita $\frac{3}{4}$ ", cuja granulometria do material consta no Anexo A – Granulometria brita $\frac{3}{4}$ ".

Após a camada de bloqueio foram executadas duas camadas de macadame seco com aproximadamente 12,5 cm, o material foi pré-misturado na proporção três partes de macadame seco para uma parte de material de enchimento. Na camada inferior foram aplicadas seis passadas com rolo liso para promover a compactação e acomodação, e na superior, foram oito, totalizando quatorze passadas, com rolo liso. Após a finalização da compactação, procedeu-se à regularização da superfície a fim de eliminar pontos ou locais com segregação de material e possibilitar a execução do ensaio com a viga Benkelman.

Os resultados das deflexões medidas com a viga Benkelman (VB) conforme posições determinadas (Figura 37) para a camada de macadame seco estão apresentadas no Quadro 21.

Quadro 21. Resultados VB Macadame Seco G2

ESTACA	Deflexão (10^{-2} mm)		
	BE	EX	BD
212+750	365	248	-
212+760	328	272	-
212+770	346	350	-
212+780	330	324	-
212+790	318	268	-
Média dos resultados = 315×10^{-2} mm			
Viga característica = 354×10^{-2} mm			

Fonte: Adaptado do relatório de soluções geotécnicas Engevix (2016).

A etapa seguinte foi a colocação da geogrelha. A geogrelha, assim como no trecho experimental H2, foi disposta no sentido transversal da pista, com sobreposição de 50 cm entre os cortes e com sobras laterais de 1,20 m. A fixação da manta foi feita com grampeamento nas sobreposições, entre elas longitudinalmente à pista e para promover uma melhor fixação foi grampeado o centro da manta (eixo da pista). A especificação da geogrelha pode observada no Anexo D – Especificação Fornit® J600-40.

Sobre a geogrelha foi lançada a camada de Brita Graduada Simples (BGS), conforme projeto (Anexo E – Projeto base BGS Arteris), com 15 cm de espessura e compactada com a aplicação de oito passadas com rolo liso. Por determinação da equipe de controle tecnológico a liberação da camada se deu através de três ensaios de densidade *in situ*, realizados nos km 212+760, 212+770 e 212+780. Os resultados destes ensaios podem ser observados no Anexo J – Densidade *in situ* BGS G2.

Seguindo o procedimento definido para o trecho experimental G2, continuou-se verificando as deflexões a fim de avaliar o comportamento deflectométrico. Os resultados das deflexões medidas com a viga Benkelman (VB) conforme posições determinadas (Figura 37) para a camada de BGS estão apresentadas no Quadro 22.

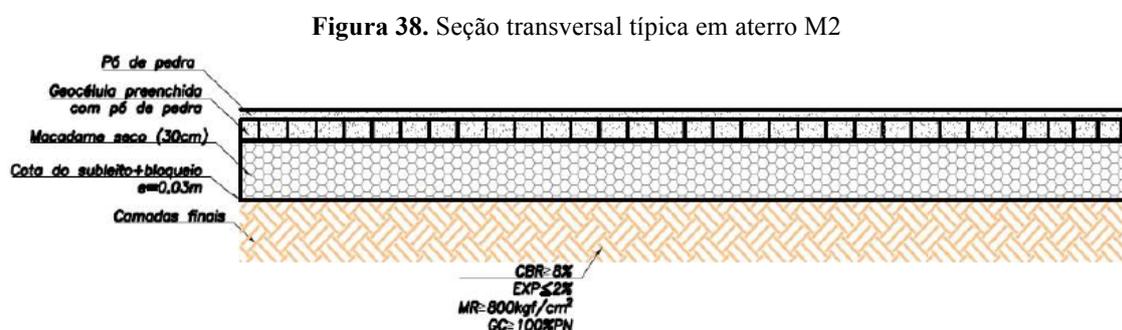
Quadro 22. Resultados VB BGS G2

ESTACA	Deflexão (10^{-2} mm)		
	BE	EX	BD
212+760	258	123	-
212+770	240	193	-
212+780	191	183	-
212+790	220	203	-
Média dos resultados = 201×10^{-2} mm			
Viga característica = 242×10^{-2} mm			

Fonte: Adaptado do relatório de soluções geotécnicas Engevix (2016).

Trecho experimental M2 (km 212+600 ao km 212+650) – Pista Norte

A Figura 38 ilustra a seção transversal típica do trecho experimental M2.



Fonte: Relatório de soluções geotécnicas Engevix (2016).

Metodologia executiva

A execução das camadas do trecho experimental M2, foi a seguinte:

- Delimitação da área de estudo;
- Remoção das camadas superiores à regularização do subleito;
- Preparação do subleito;
- Execução da camada de bloqueio;
- Execução de duas camadas de macadame seco;
- Colocação e preenchimento da geocélula;

Assim como nos trechos experimentais H2 e G2, após a delimitação da área de estudo pela equipe de topografia, que identificou e delimitou o início e o fim do subtrecho, foi feita a remoção das camadas superiores à regularização do subleito (RSL). Em média também foram retirados 0,90 m de solo. O subleito foi preparado através do processo de escarificação, gradeamento, nivelamento e posterior aplicação de dez passadas de rolo pé-de-carneiro para promover a compactação e liberação da camada de acordo com os parâmetros da norma DNIT 108/2009-ES.

A medição das deflexões para as camadas de RSL e macadame seco foi executada através do ensaio da viga Benkelman com a posição de leitura de acordo com a Figura 39, onde foram feitas três medições (bordo esquerdo, eixo e bordo direito) a cada 10 m de distância.

Figura 39. Posição de leituras de deflexão RSL M2

Fonte: Adaptado do relatório de soluções geotécnicas Engevix (2016).

Nos resultados das deflexões para a camada de RSL (Quadro 23) é importante salientar que no momento da realização do ensaio da viga Benkelman, a umidade *in situ* estava com variação média de (+) 0,6% em relação à umidade ótima, como pode ser observado Anexo K – Densidade *in situ* do subleito M2.

Quadro 23. Resultados VB RSL M2

ESTACA	Deflexão (10^{-2} mm)		
	BE	EX	BD
212+600	179	163	151
212+610	147	127	113
212+620	179	125	115
212+630	151	175	159
212+640	133	141	155
Média dos resultados = 148×10^{-2} mm			
Viga característica = 169×10^{-2} mm			

Fonte: Adaptado do relatório de soluções geotécnicas Engevix (2016).

Foi executada a camada de bloqueio, com espessura média de 3 cm de brita $\frac{3}{4}$ ", onde granulometria do material pode ser observada no Anexo A – Granulometria brita $\frac{3}{4}$ ".

A etapa seguinte foi o lançamento de duas camadas de macadame seco, pré-misturados na proporção três partes de macadame seco para uma parte de material de enchimento. Na primeira camada foram aplicadas seis passadas com rolo liso e na segunda, oito, totalizando quatorze passadas. Após a finalização da compactação, procedeu-se à regularização da superfície e execução do ensaio com a viga Benkelman com a posição de leitura ilustrada na Figura 39.

Os resultados das deflexões para a 1ª e 2ª camada de macadame seco estão representados nos Quadro 24 e 25, respectivamente.

Quadro 24. Resultados VB 1ª camada de Macadame Seco M2

ESTACA	Deflexão (10^{-2} mm)		
	BE	EX	BD
212+610	149	93	93
212+620	109	95	113
212+630	139	103	109
212+640	159	107	89
Média dos resultados = 113×10^{-2} mm			
Viga característica = 136×10^{-2} mm			

Fonte: Adaptado do relatório de soluções geotécnicas Engevix (2016).

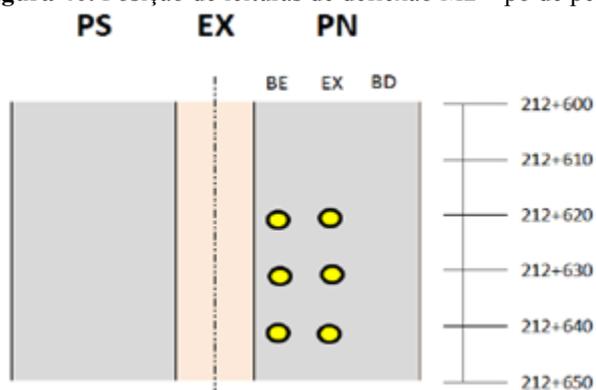
Quadro 25. Resultados VB 2ª camada de Macadame Seco M2

ESTACA	Deflexão (10^{-2} mm)		
	BE	EX	BD
212+610	87	139	99
212+620	93	135	137
212+630	83	139	169
212+640	97	169	109
Média dos resultados = 121×10^{-2} mm			
Viga característica = 152×10^{-2} mm			

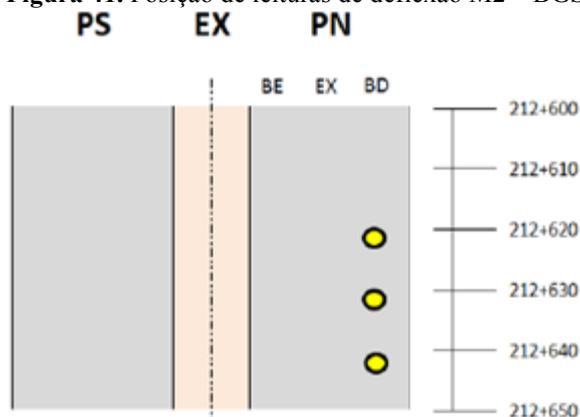
Fonte: Adaptado do relatório de soluções geotécnicas Engevix (2016).

A diferença desse trecho experimental para os demais é a utilização da geocélula (Maccaferri) preenchida com dois tipos de materiais: BGS e pó de pedra. O trecho foi dividido em dois, no bordo esquerdo foi lançado pó de pedra, conforme projeto (Anexo L – Granulometria pó de pedra), no bordo direito e acostamento lançou-se BGS com 15 cm de espessura, conforme projeto (Anexo E – Projeto base BGS Arteris). A compactação deu-se com a aplicação de oito passadas com rolo liso.

Seguindo o procedimento definido para o trecho experimental M2, foi realizada a verificação das deflexões a fim de avaliar o comportamento deflectométrico. A posição de leitura das deflexões das camadas de pó de pedra e BGS estão representadas nas Figuras 40 e 41, respectivamente. No pó de pedra foram realizadas duas medições (bordo esquerdo e eixo) nas estacas 212+620, 212+630 e 212+640 e na BGS apenas uma (bordo direito), nas mesmas estacas.

Figura 40. Posição de leituras de deflexão M2 – pó de pedra

Fonte: Adaptado do relatório de soluções geotécnicas Engevix (2016).

Figura 41. Posição de leituras de deflexão M2 – BGS

Fonte: Adaptado do relatório de soluções geotécnicas Engevix (2016).

Os resultados das deflexões medidas com a viga Benkelman conforme posições determinadas (Figura 40 e 41) para as camadas pó de pedra e de BGS estão apresentados nos Quadros 26 e 27, respectivamente.

Quadro 26. Resultados VB pó de pedra M2

ESTACA	Deflexão (10^{-2} mm)		
	BE	EX	BD
212+620	101	139	-
212+630	113	113	-
212+640	101	89	-
Média dos resultados = 109×10^{-2} mm			
Viga característica = 126×10^{-2} mm			

Fonte: Adaptado do relatório de soluções geotécnicas Engevix (2016).

Quadro 27. Resultados VB BGS M2

ESTACA	Deflexão (10 ⁻² mm)		
	BE	EX	BD
212+620	-	-	109
212+630	-	-	103
212+640	-	-	79
Média dos resultados = 97x10 ⁻² mm			
Viga característica = 113x10 ⁻² mm			

Fonte: Adaptado do relatório de soluções geotécnicas Engevix (2016).

Durante a execução dos trechos experimentais verificou-se que as deflexões medidas em campo apresentaram valores muito superiores aos adotados como admissíveis na fase de projeto, como pode ser observado no Apêndice A – Comparativo entre deflexões de campo e admissíveis.

Como os trechos eram experimentais, ou seja, havia possibilidade de alteração, os engenheiros responsáveis pela execução tomaram como parâmetro de liberação das camadas os ensaios de compactação, uma vez que o procedimento é normatizado.

Os resultados dos ensaios de grau de compactação obtidos nos trechos experimentais estão apresentados no Quadro 28. A norma DNIT 108/2009-ES exige que o grau de compactação seja $GC \geq 100\%$ na energia do ensaio Proctor Normal.

Quadro 28. Ensaio de grau de compactação

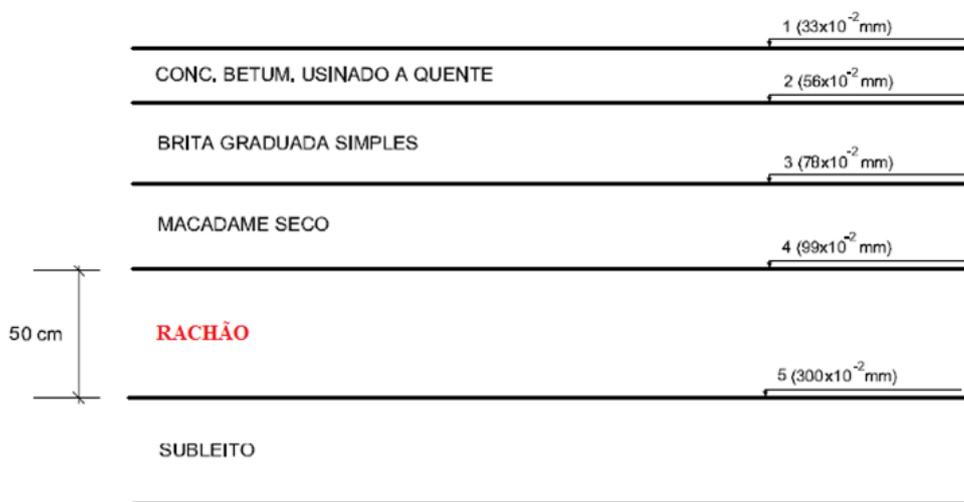
Trecho experimental	Camada	Resultados dos ensaios (%)					
		1°	2°	3°	4°	5°	6°
H2	BGS	109,4	104,4	101,3	104,9	103,8	102,7
	Subleito	100,0	101,6	100,7	100,6	101,1	100,6
G2	BGS Arteris	101,6	100,9	102,1	-	-	-
	Subleito	102,5	101,3	100,3	103,1	100,8	-
M2	BGS Arteris	101,6	100,9	102,1	-	-	-
	Subleito	100,8	101,2	102,0	101,4	-	-

Fonte: Adaptado do relatório de soluções geotécnicas Engevix (2016).

3.3.3 Novo projeto

Considerando os resultados de deflexão de campo obtidos, foi verificado que as soluções utilizadas não foram viáveis, já que os resultados apresentaram valores muito superiores aos adotados como admissíveis. Por conta disso, os engenheiros responsáveis decidiram fazer uma alteração na estrutura do pavimento do projeto inicial, adicionando uma camada de 50 cm de rachão, obtendo assim novos valores admissíveis de deflexão (Figura 42).

Figura 42. Deflexões admissíveis – novo projeto



Fonte: Autoria própria.

A nova estrutura proposta com as novas propriedades das camadas (Quadro 29), foi adotada para toda a extensão do subtrecho III (km 211+543,06 ao km 215+683,38) da obra, sendo os trechos experimentais removidos para a execução da mesma.

Quadro 29. Propriedades das camadas do novo pavimento proposto

CAMADA	ESPESSURA	E (kgf/cm ²)	Coefficiente de Poisson
Concreto Asfáltico Usinado à Quente (CAUQ)	17	37500	0,30
Brita Graduada Simples (BGS)	15	3000	0,35
Macadame Seco	25	2500	0,40
Rachão	50	2000	0,40
Subleito (CBR ≥ 8%, Exp. ≤ 2 % E MR ≥ 800 kgf/cm ²)	-	400	0,45

Fonte: Memória de cálculo de pavimentação do Contorno Rodoviário de Florianópolis (2011).

Nota-se que o CBR do solo no pré-dimensionamento era de 8%. Para poder obter as deflexões consideradas como admissíveis foi necessário que houvesse uma redução no seu valor, passando a ser de 4% e conseqüentemente o módulo de resiliência passou a ter um valor de 400 kgf/cm². Esta alteração foi realizada para efeitos de cálculo.

Durante a execução do subtrecho III com a mudança de projeto proposta, houve novas verificações a respeito das deflexões de cada camada. Os novos valores de deflexão do trecho considerado (lote completo) estão ilustrados no Apêndice B – Resultados das deflexões de campo considerando o lote completo.

3.3.4 Estudo para as estruturas de pavimento

A análise e verificação do comportamento estrutural e deflectométrico do pavimento partiu do estudo envolvendo simulações de estruturas de pavimento similares as que foram utilizadas no subtrecho III.

Foram utilizados quatro tipos diferentes de misturas asfálticas, com leis de fadiga já estabelecidas. Os Quadros 30 e 31 apresentam as misturas asfálticas e as leis de fadiga utilizadas, respectivamente.

O comportamento mecânico das misturas asfálticas foi avaliado através dos seguintes ensaios de laboratório: (i) módulo dinâmico; (ii) fadiga (flexão alternada em 4 pontos em extensão controlada); (iii) deformação permanente (cisalhamento simples repetido a altura constante).

Quadro 30. Misturas asfálticas utilizadas

Mistura	Volume de vazios (%)	Porcentagem de betume (%)	Tipo de asfalto	Módulo de resiliência (MPa)	Temperatura e frequência do ensaio	Referência
BBB - DNIT Faixa "C"	4,00	5,50	CAP 50/70	6314	20° C e 10 Hz	Fontes (2009)
IBBbB1	5,00	7,00	CAP 50/70	5014	20° C e 10 Hz	Fontes (2009)
Nanoargila 3% - DNIT Faixa "B"	4,00	4,10	CAP 50/70 modificado com 3% de Nanoargila	7865	20° C e 10 Hz	Melo (2014)
Nanotubo de carbono 2% - DNIT Faixa "B"	4,04	4,10	CAP 50/70 modificado com 3% de Nanotubo de carbono	11486	15° C e 10 Hz	Melo (2014)

Fonte: Autoria própria.

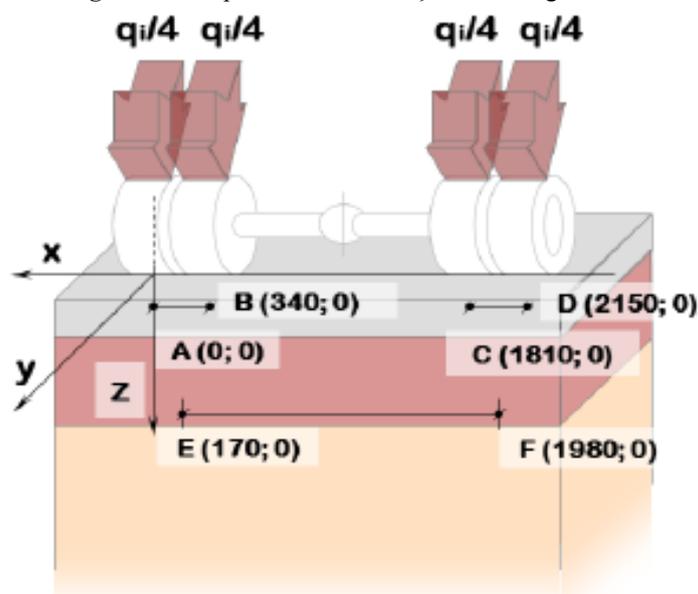
Quadro 31. Leis de fadiga utilizadas

Mistura	Lei de fadiga	Parâmetro a	Parâmetro b	Referência
BBB - DNIT Faixa "C"	$N = a \cdot \varepsilon^b$	1,185E+15	-4,037	Fontes (2009)
IBBbB1	$N = a \cdot \varepsilon^b$	6,986E+18	-5,164	Fontes (2009)
Nanoargila 3% - DNIT Faixa "B"	$N = a \cdot \varepsilon^b$	1,09E+16	-4,920	Melo (2014)
Nanotubo de carbono 2% - DNIT Faixa "B"	$N = a \cdot \varepsilon^b$	5,3E+15	-4,880	Melo (2014)

Fonte: Autoria própria.

O *software* escolhido para realização das simulações foi o ELSYM5. Sendo o eixo simples de rodas duplas (ESRD) o eixo considerado padrão, com 8,2 toneladas-força (80 kN), é informado ao programa a carga de cada pneu, com o valor de 2,05 toneladas-força (2050 kgf). A pressão de insuflagem de cada pneu adotada foi de 0,56 MPa (5,6 kgf/cm²). A distância entre aplicações de carga entre as rodas duplas é de 34 cm (Figura 43). A configuração descrita foi estabelecida como dado de entrada no *software* (Figura 44).

Figura 43. Esquema da distribuição de carregamento



Fonte: Adaptado de Villela (2012).

Figura 44. Dados de carregamento

```

LOAD DATA
Enter two of the following, the third is calculated.
Load:    2050.00    Pressure:    5.60
Number of load locations: 4
Location number =          Coordinates
                                X =          Y =
1                                .00          .00
2                                34.00         .00
3                                181.00        .00
4                                215.00        .00

```

Fonte: Adaptado do *software* ELSYM5.

O Quadro 32 ilustra as diferentes estruturas de pavimento utilizadas nas simulações.

Quadro 32. Estruturas de pavimento simuladas

Mistura	Camada	Espessura (cm)	Módulo de resiliência (MPa)	Coefficiente de Poisson
BBB - DNIT Faixa "C"	Revestimento	Variável	6314	0,35
	BGS	15	300	0,35
	Macadame seco	25	250	0,40
	Rachão	50	200	0,40
	Subleito	∞	40 e 80	0,45
IBBbB1	Revestimento	Variável	5014	0,30
	BGS	15	300	0,35
	Macadame seco	25	250	0,40
	Rachão	50	200	0,40
	Subleito	∞	40 e 80	0,45
Nanoargila 3% - DNIT Faixa "B"	Revestimento	Variável	7865	0,30
	BGS	15	300	0,35
	Macadame seco	25	250	0,40
	Rachão	50	200	0,40
	Subleito	∞	40 e 80	0,45
Nanotubo de carbono 2% - DNIT Faixa "B"	Revestimento	Variável	11486	0,30
	BGS	15	300	0,35
	Macadame seco	25	250	0,40
	Rachão	50	200	0,40
	Subleito	∞	40 e 80	0,45

Fonte: Autoria própria.

As espessuras das camadas de BGS, macadame seco e rachão foram mantidas iguais às de projeto. Foi variada a espessura do revestimento e o tipo de mistura asfáltica. Achou-se conveniente também variar o valor do CBR da camada de subleito, utilizando os valores de 4% da nova fase de projeto e de 8% do dimensionamento preliminar, e conseqüentemente provocando uma variação no módulo de resiliência (Equação 14).

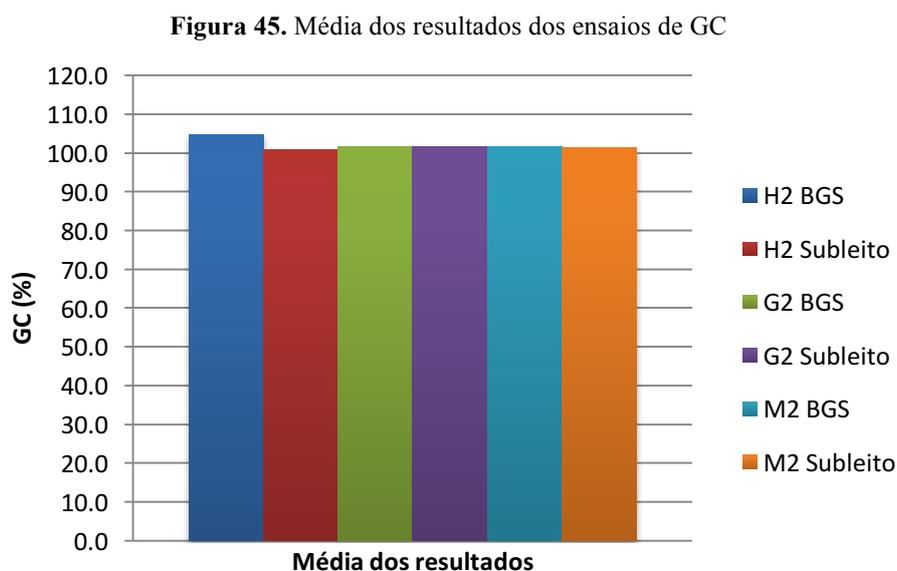
4. RESULTADOS

Neste capítulo, apresentam-se as análises das diferentes soluções geotécnicas adotadas nos trechos experimentais, valores de deflexão admissível adotados, resultados das novas deflexões de campo obtidas nas estacas onde originalmente encontravam-se os trechos experimentais, além das simulações através do *software* ELSYM5 para as quatro misturas asfálticas utilizadas.

Os resultados de deflexão foram comparados com os resultados admissíveis obtidos durante a nova fase de projeto e execução do subtrecho III. Foi também apresentada qual mistura simulada apresenta maior vida de fadiga. Com base nisso, foi feita a escolha da mistura asfáltica simulada para a estrutura de pavimento executada no subtrecho III.

4.1 TRECHOS EXPERIMENTAIS

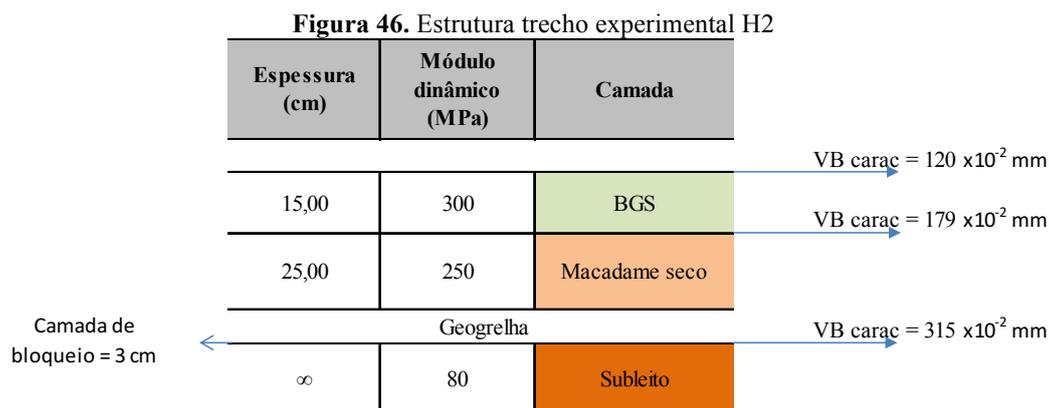
A Figura 45 ilustra a média dos resultados dos ensaios de grau de compactação para os trechos experimentais. É possível observar que em todos os trechos o GC \geq 100% como determinado pela norma, atendendo ao parâmetro de liberação das camadas adotado.



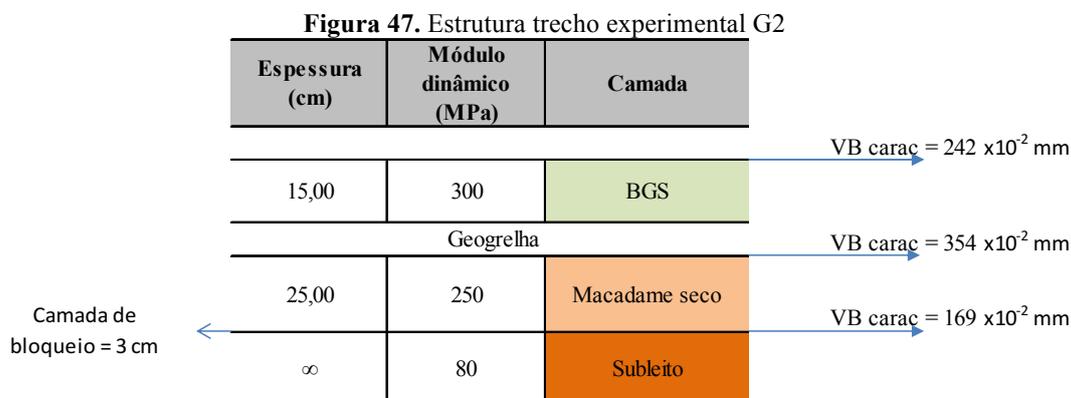
Fonte: Autoria própria.

Nota-se que a compactação foi realizada além do valor exigido o que gera um custo adicional (horas de equipamento, operários, tempo de obra).

Após a execução dos trechos experimentais, observou-se que a utilização da geogrelha atendeu melhor a função por ela designada no trecho experimental H2 (Figura 46), uma vez que os valores das deflexões nas camadas de macadame seco e BGS apresentaram uma redução em torno de 50%, se comparadas com os valores do trecho experimental G2 (Figura 47), onde a geogrelha foi posicionada acima da camada de macadame seco.



Fonte: Adaptado do relatório de soluções geotécnicas Engevix (2016).



Fonte: Adaptado do relatório de soluções geotécnicas Engevix (2016).

Adicionando 5 cm na espessura da camada de macadame seco, observou-se na estrutura do trecho experimental M2 (Figura 48), uma redução considerável na deflexão dessa camada, comparada com a do trecho experimental G2. Se comparada com o trecho experimental H2 a redução foi mínima, devido à presença da geogrelha.

A geocélula posicionada em cima da camada de macadame seco no trecho M2 apresentou resultados melhores de deflexão que a geogrelha no trecho G2, reduzindo em 50% os valores.

Figura 48. Estrutura trecho experimental M2

Espessura (cm)	Módulo dinâmico (MPa)	Camada	
15,00	300	BGS / Pó de pedra	VB carac = 126×10^{-2} mm VB carac = 113×10^{-2} mm
Geocélula			
30,00	250	Macadame seco	VB carac = 152×10^{-2} mm VB carac = 136×10^{-2} mm
∞	80	Subleito	VB carac = 169×10^{-2} mm

Camada de bloqueio = 3 cm

Fonte: Adaptado do relatório de soluções geotécnicas Engevix (2016).

O objetivo de execução dos trechos experimentais foi analisar qual seria a melhor estrutura a ser adotada para o subtrecho III da obra do Contorno Rodoviário de Florianópolis/SC.

4.2 DEFLEXÕES ADMISSÍVEIS

Em duas diferentes etapas do projeto, os engenheiros responsáveis, com o auxílio do *software* ELSYM5, precisaram adotar valores admissíveis de deflexão, uma vez que o projeto foi readaptado.

A Figura 49 exemplifica o resultado do valor da deflexão para a camada de macadame seco do dimensionamento preliminar, onde o *software* traz como dado de saída o valor de $0,878 \times 10^{-1}$ cm, ou seja, $87,8 \times 10^{-2}$ mm. O valor adotado como admissível pela concessionária foi de 71×10^{-2} mm.

Figura 49. Deflexão admissível na camada de macadame seco – dimensionamento preliminar

```

Displacements
  XP      YP      UX      UY      UZ
  .00     .00     .426E-02  .000E+00  .878E-01
  17.00   .00     .743E-03  .000E+00  .708E-01

RESULTS MENU FOR ELSYM5
-----
LAYER = 1      Z = .01

1. - Stresses Normal & Shear & Principal
2. - Strains Normal & Shear & Principal
3. - Displacements
4. - Return or Continue with Next Layer

Selection ==> _

```

Fonte: Adaptado do *software* ELSYM5.

O Quadro 33 ilustra a estrutura do pavimento simulada, os valores de deflexão admissível calculados pelo programa computacional e os valores de deflexão admissível adotados para o dimensionamento preliminar. O Quadro 34 apresenta os mesmos dados para o a nova fase de projeto.

Quadro 33. Estrutura do pavimento e valores de deflexão admissível – dimensionamento preliminar

Camada	Espessura (cm)	Módulo de resiliência (MPa)	Coefficiente de Poisson	Deflexão admissível ELSYM5 (mm)	Deflexão admissível adotada (mm)
Revestimento	17,00	3750	0,30	37,9E-02	32,0E-02
BGS	15,00	300	0,35	75,5E-02	56,0E-02
Macadame seco	25,00	250	0,40	87,8E-02	71,0E-02
Subleito	∞	80	0,45	147,0E -02	99,0E-02

Fonte: Autoria própria.

Quadro 34. Estrutura do pavimento e valores de deflexão admissível – novo projeto

Camada	Espessura (cm)	Módulo de resiliência (MPa)	Coefficiente de Poisson	Deflexão admissível ELSYM5 (mm)	Deflexão admissível adotada (mm)
Revestimento	17,00	3750	0,30	52,8E-02	33,0E-02
BGS	15,00	300	0,35	88,1E-02	56,0E-02
Macadame seco	25,00	250	0,40	95,9E-02	78,0E-02
Rachão	50,00	200	0,40	115,0E -02	99,0E-02
Subleito	∞	40	0,45	293,0E -02	300,0E -02

Fonte: Autoria própria.

Nota-se que os valores adotados como admissíveis não são os mesmos calculados pelo programa computacional, tendo sido feitos arredondamentos. Isto porque o programa apenas simula a estrutura, cabendo ao projetista adotar um valor admissível que lhe seja conveniente, geralmente menor do que o valor calculado pela simulação. Esta prática é comum por segurança.

4.3 NOVAS DEFLEXÕES DE CAMPO

A seguir são apresentados os novos valores de deflexão para as estacas do subtrecho III onde originalmente encontravam-se os trechos experimentais. Os valores em vermelho representam os que ficaram fora do intervalo de aceitação considerado, ou seja, (média - desvio padrão) até (média + desvio padrão).

Trecho experimental H2

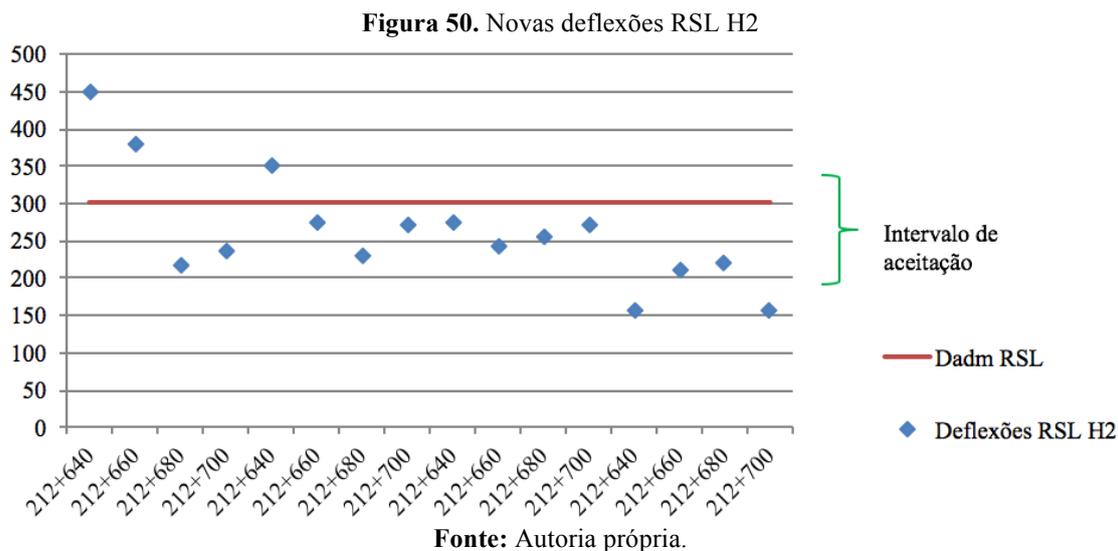
O Quadro 35 apresenta os novos valores de deflexão obtidos em campo para as camadas do pavimento, medidos através da viga Benkelman, nas estacas do subtrecho III onde originalmente encontrava-se o trecho experimental H2.

Quadro 35. Resumo das novas deflexões – estacas trecho experimental H2

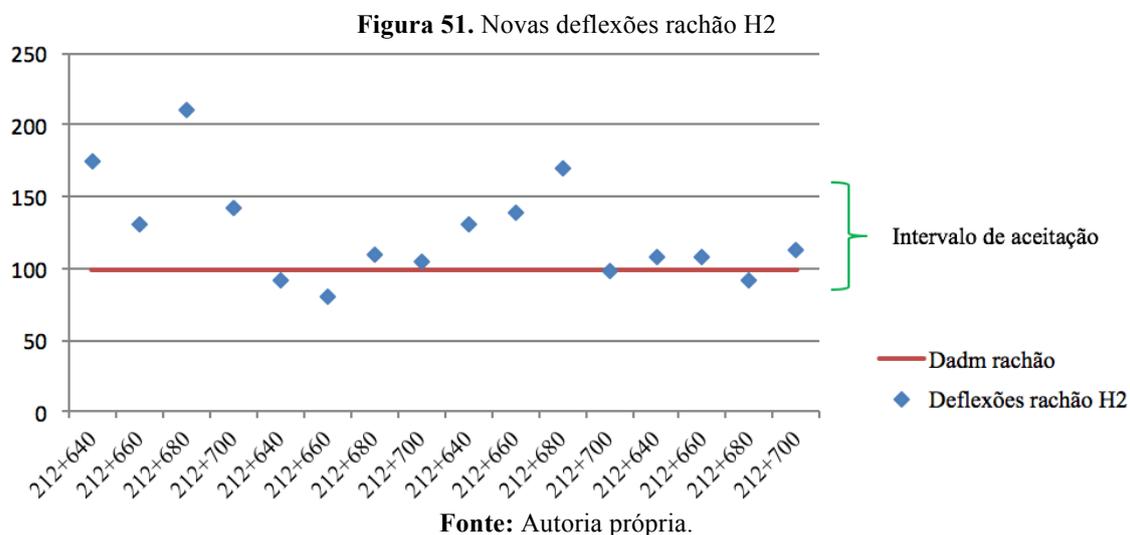
Faixa	ESTACA	Deflexões			
		RSL	Rachão	Macadame	BGS
Faixa 1 BE	212+640	448	174	60	54
	212+660	380	130	62	64
	212+680	218	210	50	68
	212+700	236	142	60	50
Faixa 1 BD	212+640	350	92	26	56
	212+660	276	80	40	54
	212+680	230	110	58	56
	212+700	272	104	74	48
Faixa 2 BE	212+640	274	130	54	64
	212+660	242	138	58	54
	212+680	256	170	72	56
	212+700	270	98	70	68
Faixa 2 BD	212+640	158	108	48	46
	212+660	210	108	100	46
	212+680	220	92	62	70
	212+700	156	112	64	52
Intervalo de aceitação		186x10 ⁻² mm a 339x10 ⁻² mm	90x10 ⁻² mm a 160x10 ⁻² mm	44x10 ⁻² mm a 76x10 ⁻² mm	49x10 ⁻² mm a 62x10 ⁻² mm

Fonte: Autoria própria.

A Figura 50 apresenta a comparação dos novos valores de deflexão da camada de reforço do subleito com o valor de deflexão admissível para essa camada. Nota-se que cinco valores ficaram fora do intervalo de aceitação, sendo esses pontos corrigidos com melhor compactação.

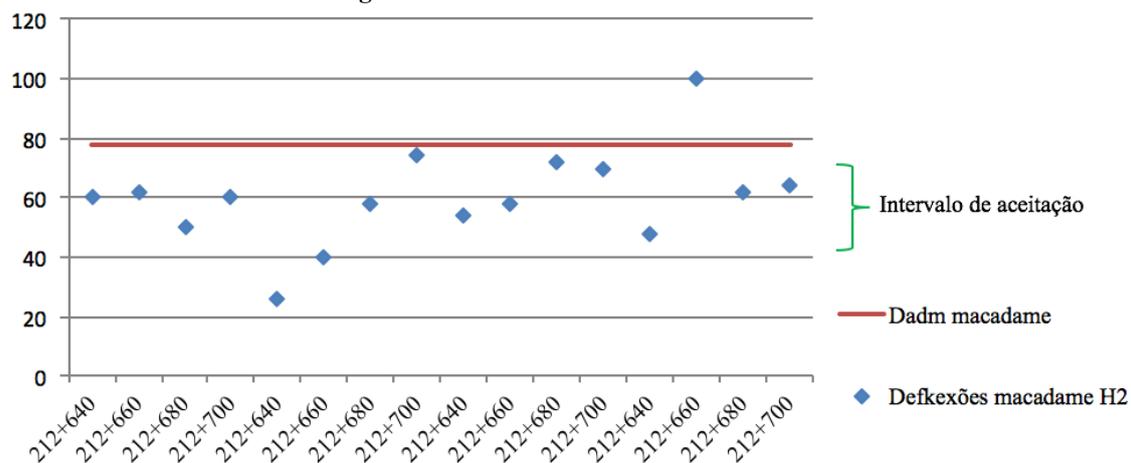


A Figura 51 apresenta a comparação dos novos valores de deflexão da camada de rachão com o valor de deflexão admissível para essa camada. Observa-se na Figura 50 que essa camada foi a que apresentou o menor número de medições fora do intervalo de aceitação, sendo esses pontos também corrigidos com mais passadas do rolo, ou seja, melhor compactação.



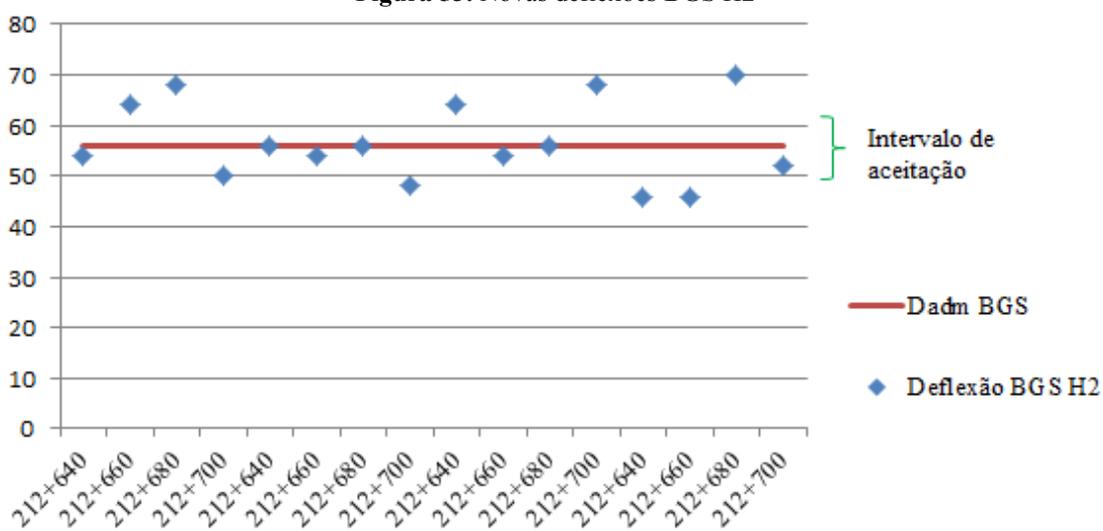
Os novos valores de deflexão da camada de macadame e de BGS estão comparados com o valor de deflexão admissível para essas camadas nas Figuras 52 e 53, respectivamente. Analisando as Figuras, observa-se que no macadame três valores ficaram fora do intervalo de aceitação, e na BGS seis pontos. Os pontos fora do intervalo de aceitação foram corrigidos com melhor compactação.

Figura 52. Novas deflexões macadame H2



Fonte: Autoria própria.

Figura 53. Novas deflexões BGS H2



Fonte: Autoria própria.

Trecho experimental G2

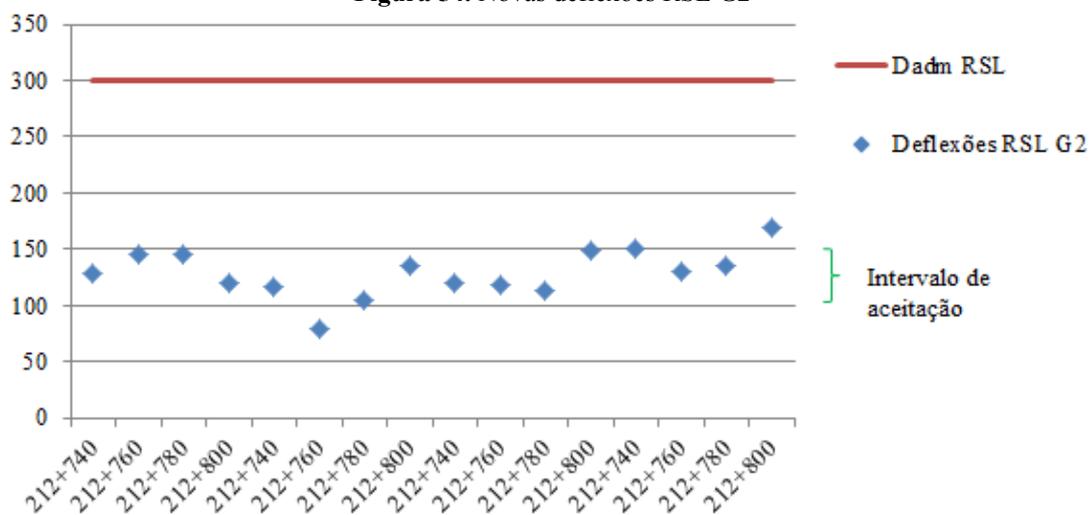
O Quadro 36 apresenta os novos valores de deflexão obtidos em campo para as camadas de RSL, rachão e BGS do pavimento, medidos através da viga Benkelman, nas estacas do subtrecho III onde originalmente encontrava-se o trecho experimental G2.

Quadro 36. Resumo novas deflexões (sem macadame) – estacas trecho experimental G2

Faixa	ESTACA	Deflexões		
		RSL	Rachão	BGS
Faixa 1 BE	212+740	128	200	62
	212+760	146	164	48
	212+780	146	294	48
	212+800	120	92	108
Faixa 1 BD	212+740	116	560	42
	212+760	80	270	40
	212+780	104	298	54
	212+800	136	96	86
Faixa 2 BE	212+740	120	326	46
	212+760	118	114	58
	212+780	114	378	52
	212+800	148	144	52
Faixa 2 BD	212+740	150	180	62
	212+760	130	114	64
	212+780	136	180	56
	212+800	170	104	70
Intervalo de aceitação		107x10 ⁻² mm a 150x10 ⁻² mm	92x10 ⁻² mm a 348x10 ⁻² mm	42x10 ⁻² mm a 77x10 ⁻² mm

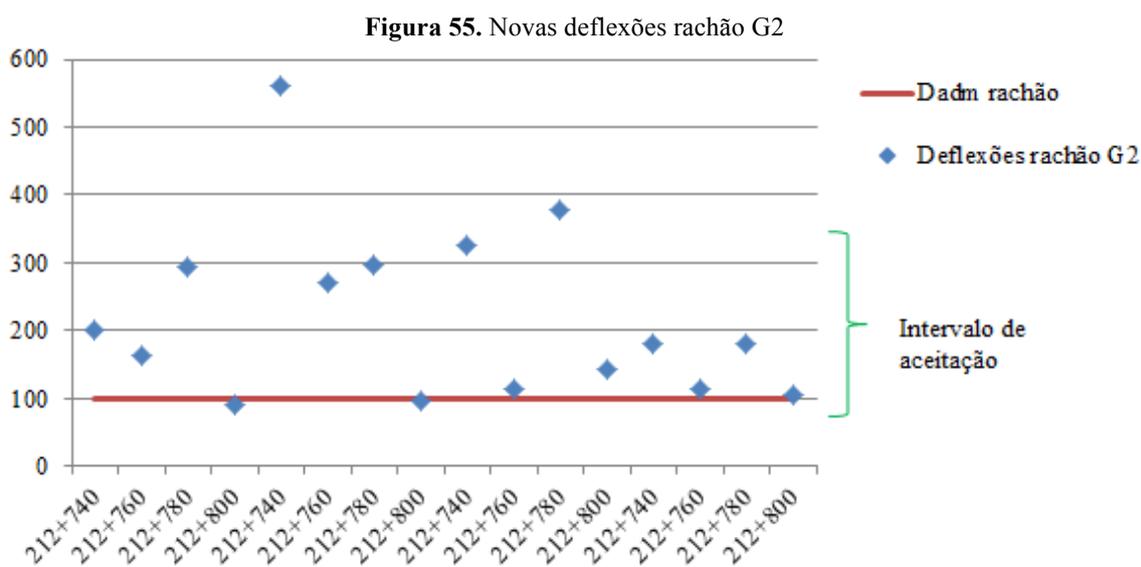
Fonte: Autoria própria.

A Figura 54 apresenta a comparação dos novos valores de deflexão da camada de reforço do subleito com o valor de deflexão admissível para essa camada. Nota-se que apenas três valores ficaram fora do intervalo de aceitação, mostrando satisfatórios os resultados. Os pontos fora do intervalo de aceitação foram pontos corrigidos com melhor compactação.

Figura 54. Novas deflexões RSL G2

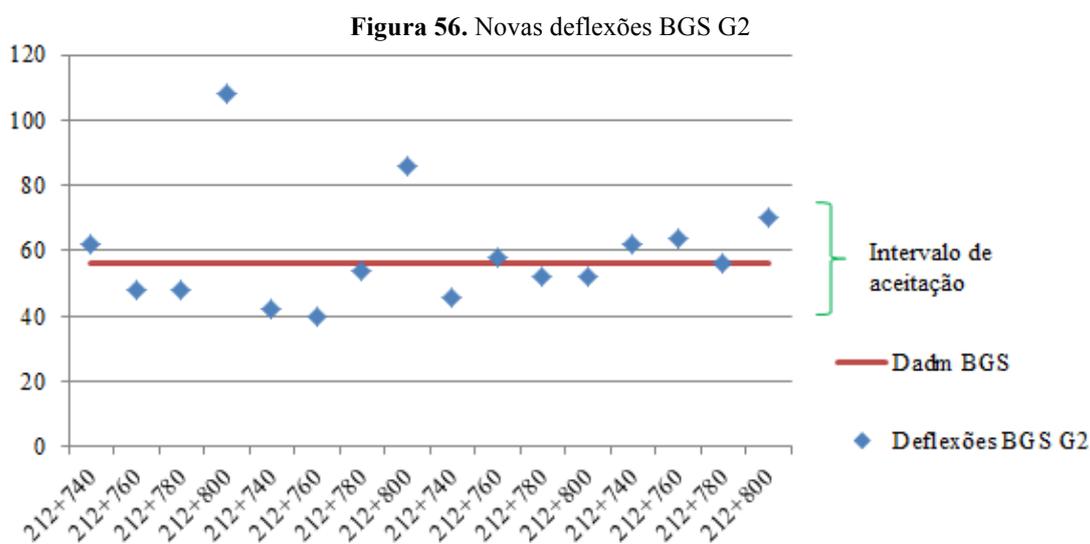
Fonte: Autoria própria.

Na Figura 55 tem-se um comparativo entre os novos valores de deflexão da camada de rachão com o valor de deflexão admissível para essa camada. Pela análise da Figura 55 observou-se que essa camada foi a que apresentou o menor número de medições fora do intervalo de aceitação, sendo esses pontos corrigidos com melhor compactação.



Fonte: Autoria própria.

Para a camada de BGS (Figura 56), assim como na camada de RSL, três valores foram corrigidos com uma melhor compactação, pois se apresentaram fora do intervalo de aceitação.



Fonte: Autoria própria.

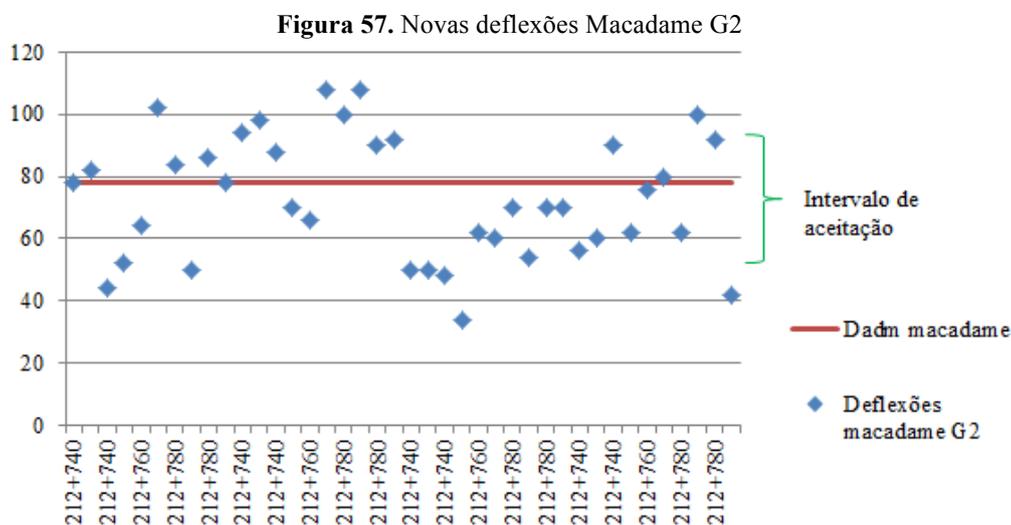
O Quadro 37 apresenta os novos valores de deflexão obtidos em campo para a camada de macadame seco do pavimento, medidos através da viga Benkelman, nas estacas do subtrecho III onde originalmente encontrava-se o trecho experimental G2.

Quadro 37. Resumo novas deflexões macadame – estacas trecho experimental G2

ESTACA	Deflexão			
	Faixa 1 BE	Faixa 1 BD	Faixa 2 BE	Faixa 2 BD
212+740	78	94	50	56
212+740	82	98	50	60
212+740	44	88	48	90
212+760	52	70	34	62
212+760	64	66	62	76
212+760	102	108	60	80
212+780	84	100	70	62
212+780	50	108	54	100
212+780	86	90	70	92
212+800	78	92	70	42
Intervalo de aceitação	$53 \times 10^{-2} \text{ mm}$ a $93 \times 10^{-2} \text{ mm}$			

Fonte: Autoria própria.

Na camada de macadame foram realizadas seis medições a mais em cada faixa do que nas demais camadas. Os novos valores de deflexão estão comparados com a deflexão admissível para essa camada na Figura 57, onde se pode observar que das quarenta medições, quinze ficaram fora com intervalo de aceitação, mas foram corrigidas com melhor compactação.



Fonte: Autoria própria.

Trecho experimental M2

O Quadro 38 apresenta os novos valores de deflexão para as camadas do pavimento, medidos através da viga Benkelman, nas estacas do subtrecho III onde originalmente encontrava-se o trecho experimental M2.

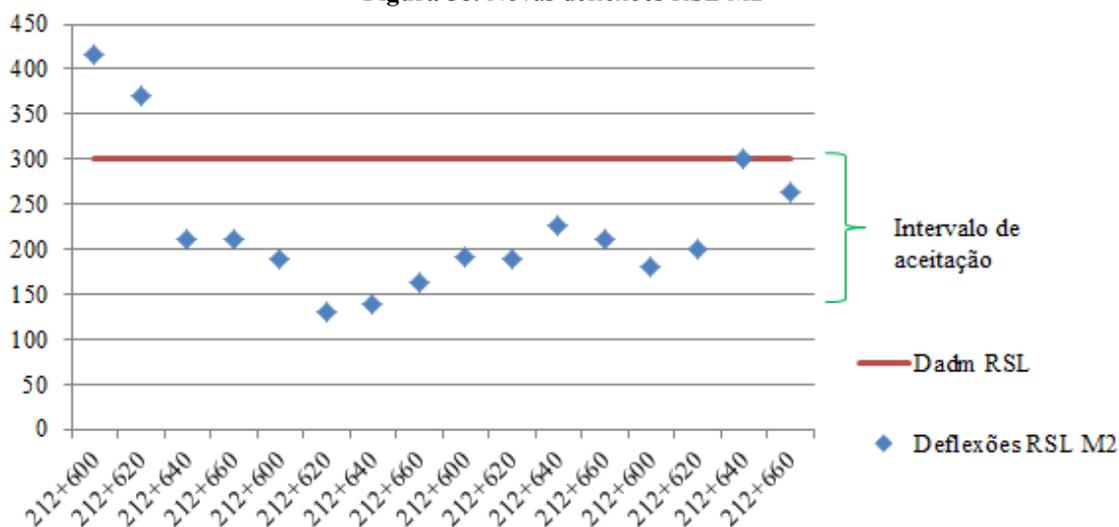
Quadro 38. Resumo novas deflexões – estacas trecho experimental M2

Faixa	ESTACA	Deflexões			
		RSL	Rachão	Macadame	BGS
Faixa 1 BE	212+600	416	64	110	50
	212+620	370	84	88	62
	212+640	210	70	72	56
	212+660	210	82	92	62
Faixa 1 BD	212+600	190	70	108	48
	212+620	130	74	82	58
	212+640	140	72	84	50
	212+660	164	44	86	70
Faixa 2 BE	212+600	192	76	84	46
	212+620	190	68	66	62
	212+640	226	76	102	50
	212+660	210	82	56	56
Faixa 2 BD	212+600	180	76	96	36
	212+620	200	98	104	50
	212+640	300	82	98	42
	212+660	264	96	102	52
Intervalo de aceitação		146x10 ⁻² mm a 303x10 ⁻² mm	63x10 ⁻² mm a 88x10 ⁻² mm	74x10 ⁻² mm a 105x10 ⁻² mm	45x10 ⁻² mm a 62x10 ⁻² mm

Fonte: Autoria própria.

A Figura 58 apresenta a comparação dos novos valores de deflexão da camada de reforço do subleito com o valor de deflexão admissível para essa camada. Nota-se que quatro valores ficaram fora do intervalo de aceitação, dois deles nas estacas iniciais do trecho apresentaram valores mais elevados. Os pontos foram corrigidos com melhor compactação.

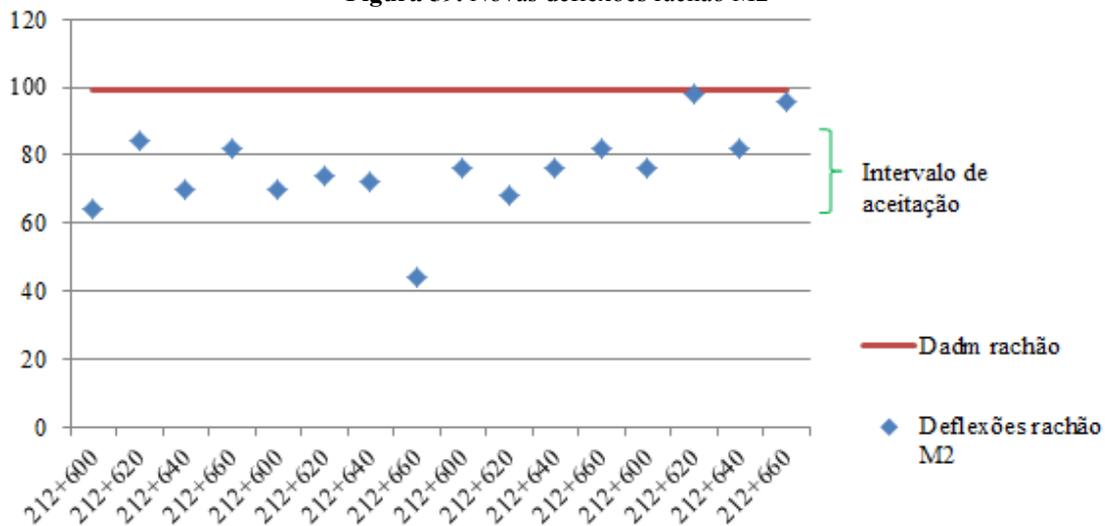
Figura 58. Novas deflexões RSL M2



Fonte: Autoria própria.

Para a camada de rachão os resultados também se mostraram satisfatórios (Figura 59), ficando três deles fora do intervalo de aceitação e corrigidos com melhor compactação no local.

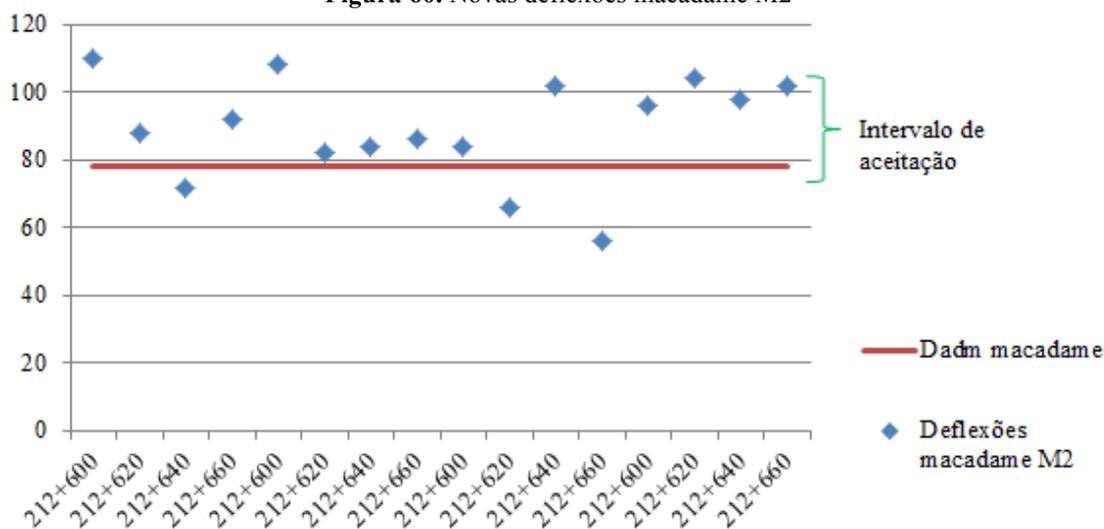
Figura 59. Novas deflexões rachão M2



Fonte: Autoria própria.

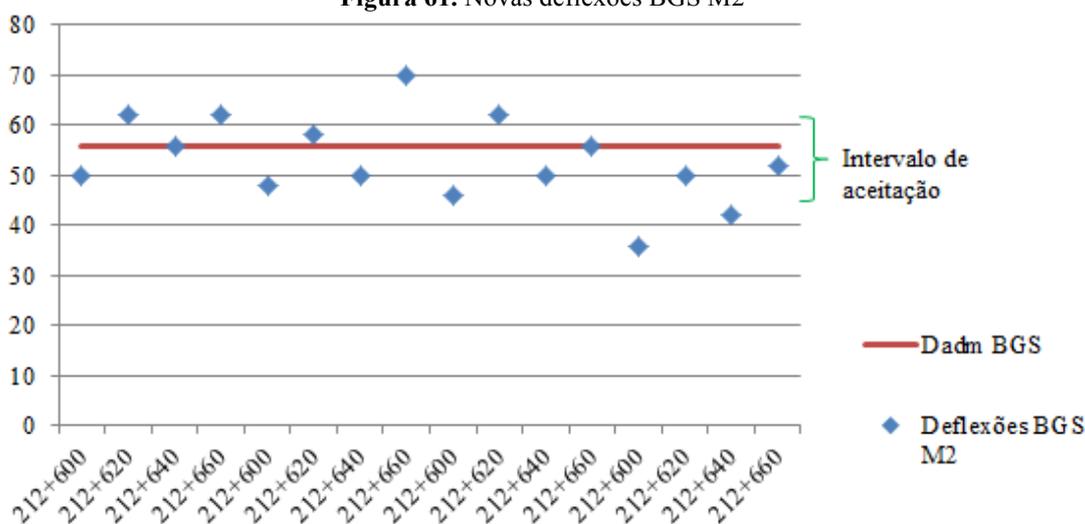
A mesma satisfação dos resultados mostrou-se presente nas camadas de macadame (Figura 60) e BGS (Figura 61), sendo quatro pontos corrigidos no macadame e três na BGS.

Figura 60. Novas deflexões macadame M2



Fonte: Autoria própria.

Figura 61. Novas deflexões BGS M2



Fonte: Autoria própria.

Portanto, diferentemente das medições de campo realizadas na execução dos trechos experimentais, onde quase a totalidade dos valores de deflexão foram superiores aos valores adotados como admissíveis, durante a execução do subtrecho III, nas estacas onde originalmente encontravam-se os trechos experimentais, a grande maioria dos valores ficaram inferiores aos valores admissíveis e dentro do intervalo de aceitação considerado. Isso mostra que os resultados para a nova estrutura adotada, após a adaptação do projeto, mostraram-se bastante satisfatórios.

4.4 SIMULAÇÕES

Além das estruturas de pavimento simuladas para a obtenção dos valores de deflexão admissível no dimensionamento preliminar (Quadro 33) e na fase nova de projeto (Quadro 34), outra estrutura também foi simulada para analisar qual seriam as deflexões admissíveis com a nova estrutura proposta, porém mantendo o CBR=8% do dimensionamento preliminar. Os resultados estão expostos no Quadro 39.

Quadro 39. Estrutura do pavimento e valores de deflexão admissível – novo projeto com CBR=8%

Camada	Espessura (cm)	Módulo de resiliência (MPa)	Coefficiente de Poisson	Deflexão admissível ELSYM5 (mm)	Deflexão admissível adotada (mm)
Revestimento	17,00	3750	0,30	35,7E-02	33,0E-02
BGS	15,00	300	0,35	66,0E-02	56,0E-02
Macadame seco	25,00	250	0,40	71,1E-02	78,0E-02
Rachão	50,00	200	0,40	83,6E-02	99,0E-02
Subleito	∞	80	0,45	147,0E -02	300,0E -02

Fonte: Autoria própria.

Observa-se que com o aumento do CBR de 4% (Quadro 34) para 8% (Quadro 39) existe uma redução de praticamente 50% na deflexão admissível da camada de subleito, devido ao aumento de resistência do solo.

A cada simulação foi extraído do *software* o valor da deflexão de cada camada, além do valor da tensão de deformação horizontal de tração na fibra inferior do revestimento (ϵ_t) e da deformação vertical de compressão no topo da camada de subleito (ϵ_v). Foram testadas diferentes espessuras de revestimento, analisando principalmente a tensão de deformação horizontal de tração na fibra inferior do revestimento, uma vez que, juntamente com os parâmetros da lei de fadiga, seu valor é introduzido na mesma para a obtenção do número N.

A simulação da estrutura do pavimento foi cessada quando para determinada espessura de revestimento o número N chegou o mais próximo possível do número N de projeto, com o valor de $1,23 \times 10^8$. A espessura de revestimento de 17 cm foi simulada com todas as misturas asfálticas escolhidas, como forma de comparação com a espessura do revestimento de projeto.

O Quadro 40 mostra os resultados para a simulação da estrutura do pavimento com CBR=4% da nova fase de projeto.

Quadro 40. Resultados estrutura do pavimento simulada – CBR=4%

Mistura	Espessura revestimento (cm)	D _{revestimento} (mm)	ε _t	D _{BGS} (mm)	D _{macadame} (mm)	D _{rachão} (mm)	D _{subleito} (mm)	ε _v	N
BBB - DNIT Faixa "C"	17	49,8E-02	89,00	49,9E-02	47,3E-02	44,0E-02	39,4E-02	0,06250	1,60E+07
	25	43,6E-02	59,00	43,5E-02	41,9E-02	39,8E-02	36,4E-02	0,05080	8,41E+07
	28	42,4E-02	53,70	42,3E-02	40,8E-02	38,9E-02	35,7E-02	0,04840	1,23E+08
	30	40,7E-02	47,40	40,6E-02	39,3E-02	37,6E-02	34,6E-02	0,04530	2,04E+08
IBBbB1	14	54,4E-02	124,00	54,4E-02	50,9E-02	46,6E-02	41,2E-02	0,07010	1,08E+08
	15	53,3E-02	116,00	53,3E-02	50,0E-02	46,0E-02	40,8E-02	0,06830	1,53E+08
	17	51,3E-02	102,00	51,3E-02	48,4E-02	44,8E-02	40,0E-02	0,06470	2,96E+08
Nanoargila 3% - DNIT Faixa "B"	17	48,9E-02	79,80	48,9E-02	46,5E-02	43,5E-02	39,1E-02	0,06100	4,78E+06
	30	39,8E-02	42,10	39,7E-02	38,5E-02	36,9E-02	34,2E-02	0,04380	1,11E+08
	32	38,7E-02	38,80	38,6E-02	37,5E-02	36,1E-02	33,5E-02	0,04190	1,66E+08
Nanotubo de carbono 2% - DNIT Faixa "B"	17	47,0E-02	63,80	47,0E-02	45,0E-02	42,4E-02	38,3E-02	0,05790	8,26E+06
	28	39,0E-02	36,00	38,9E-02	37,9E-02	36,5E-02	33,8E-02	0,04260	1,35E+08
	30	37,9E-02	33,00	37,8E-02	36,9E-02	35,6E-02	33,1E-02	0,04060	2,06E+08

Fonte: Autoria própria.

Nota-se que a mistura BBB com 28 cm de revestimento apresentou um número N igual ao de projeto. As misturas modificadas com 3% de Nanoargila e 2% de Nanotubo de carbono, com espessuras de 32 cm e 28 cm respectivamente, apresentaram leve variação do número N em relação do de projeto. A mistura com asfalto borracha (IBBbB1) também apresentou uma pequena variação no número N, porém sua espessura foi praticamente metade das outras misturas simuladas, apresentando 15 cm. Apesar disso, a deformação de tração horizontal foi a mais elevada para essa mistura, indicando que a mistura tem maior retorno e parcela elástica.

Em relação à deflexão da camada de revestimento, todas as misturas apresentaram valores superiores ao adotado como admissível de 33×10^{-2} mm (Quadro 34), sendo a mistura com asfalto borracha a que apresentou maior diferença. Na nova fase de projeto a simulação com 17 cm de espessura para o revestimento resultou em uma deflexão de $52,8 \times 10^{-2}$ mm (Quadro 34), já com as misturas utilizadas os resultados foram menores.

O Quadro 41 expõe os resultados para a simulação da estrutura do pavimento com o CBR=8% do pré-dimensionamento.

Quadro 41. Resultados estrutura do pavimento simulada – CBR=8%

Mistura	Espessura revestimento (cm)	D _{revestimento} (mm)	ϵ_t	D _{BGS} (mm)	D _{macadame} (mm)	D _{rachão} (mm)	D _{subleito} (mm)	ϵ_v	N
BBB - DNIT Faixa "C"	17	32,8E-02	88,10	32,8E-02	30,2E-02	26,9E-02	22,7E-02	0,08410	1,67E+07
	25	27,7E-02	57,40	27,6E-02	26,0E-02	23,9E-02	20,9E-02	0,06770	9,40E+07
	27	26,7E-02	52,20	26,7E-02	25,2E-02	23,3E-02	20,5E-02	0,06450	1,38E+08
	30	25,6E-02	45,60	25,4E-02	24,1E-02	22,5E-02	19,9E-02	0,06030	2,38E+08
IBBbB1	14	36,6E-02	125,00	36,6E-02	33,1E-02	28,9E-02	23,8E-02	0,95000	1,04E+08
	15	35,7E-02	116,00	35,7E-02	32,4E-02	28,4E-02	23,5E-02	0,92300	1,53E+08
	17	34,0E-02	102,00	33,9E-02	31,0E-02	27,5E-02	23,0E-02	0,08710	2,96E+08
Nanoargila 3% - DNIT Faixa "B"	17	32,0E-02	78,70	32,0E-02	29,6E-02	26,6E-02	22,5E-02	0,08200	5,12E+06
	30	24,9E-02	40,30	24,7E-02	22,6E-02	22,1E-02	19,7E-02	0,05830	1,38E+08
	32	24,1E-02	37,00	24,0E-02	22,9E-02	22,1E-02	19,4E-02	0,05550	2,10E+08
Nanotubo de carbono 2% - DNIT Faixa "B"	17	30,3E-02	62,40	30,3E-02	28,3E-02	25,7E-02	22,1E-02	0,07750	9,20E+06
	28	24,2E-02	34,30	24,1E-02	23,1E-02	21,7E-02	19,5E-02	0,05690	1,71E+08
	30	23,5E-02	31,30	23,4E-02	22,4E-02	21,2E-02	19,1E-02	0,05420	2,67E+08

Fonte: Autoria própria.

A mistura BBB e a modificada com 3% de Nanoargila apresentaram o mesmo número N, próximo ao de projeto, com uma espessura de 27 cm e 30 cm, respectivamente. A mistura modificada com 2% de Nanotubo de carbono foi a que apresentou maior variação em relação ao número N de projeto, com uma espessura de 28 cm, porém a menor deformação de tração horizontal.

A mistura com asfalto borracha continuou apresentando uma pequena variação em relação ao número N de projeto e espessura de praticamente metade das outras misturas simuladas, também com 15 cm. Além disso, manteve o maior valor de deformação de tração horizontal.

No quesito deflexão da camada de revestimento, assim como quando o CBR foi de 4%, todas as misturas apresentaram valores superiores ao adotado como admissível de 33×10^{-2} mm (Quadro 39), sendo a mistura com asfalto borracha a que continuou apresentando maior diferença. Para o CBR=8% as misturas com 17 cm também apresentaram valores de deflexão menores que o simulado de $35,7 \times 10^{-2}$ mm (Quadro 39).

O Quadro 42 e o Quadro 43 apresentam os valores de da vida útil do pavimento (N) obtidos através das leis de fadiga, em função da deformação de tração na fibra inferior da camada asfáltica, para cada mistura e para cada espessura atribuída à camada de revestimento com o CBR=4% e CBR=8%, respectivamente.

Quadro 42. Resultados obtidos de N em função da deformação ϵ_t e espessura – CBR=4%

Espessura (cm)	N			
	BBB	IBBbB1	NA-3%	NTC-2%
14	-	1,08E+08	-	-
15	-	1,53E+08	-	-
17	1,60E+07	2,96E+08	4,78E+06	8,26E+06
25	8,41E+07	-	-	-
28	1,23E+08	-	-	1,35E+08
30	2,04E+08	-	1,11E+08	2,06E+08
32	-	-	1,66E+08	-

Fonte: Autoria própria.

Quadro 43. Resultados obtidos de N em função da deformação ϵ_t e espessura – CBR=8%

Espessura (cm)	N			
	BBB	IBBbB1	NA-3%	NTC-2%
14	-	1,04E+08	-	-
15	-	1,53E+08	-	-
17	1,67E+07	2,96E+08	5,12E+06	9,20E+06
25	9,40E+07	-	-	-
28	1,38E+08	-	-	1,71E+08
30	2,38E+08	-	1,38E+08	2,67E+08
32	-	-	2,10E+08	-

Fonte: Autoria própria.

De acordo com os resultados obtidos na análise das misturas simuladas, a mistura que resultou em uma maior vida de fadiga para os dois valores de CBR foi a mistura com asfalto borracha (IBBbB1), com um valor de $2,96 \times 10^8$ para uma espessura de 17 cm. Podemos afirmar que essa mistura seria a melhor opção a ser empregada no subtrecho III da obra do Contorno Rodoviário de Florianópolis/SC, pois a mistura com asfalto borracha além de prolongar a vida do pavimento em relação ao quesito fadiga, protege melhor a camada de subleito.

4.5 PROPOSIÇÃO DE MELHORIAS PARA CONTROLE E DIMENSIONAMENTO

Com base no estudo realizado neste trabalho, foi possível observar determinados procedimentos adotados no controle da compactação e no dimensionamento do pavimento. Assim, foram propostas as melhorias que seguem.

No controle de compactação:

- Controlar o grau de compactação e teor de umidade por método tradicional e

com o controle deflectométrico;

- Adotar a deflexão admissível como parâmetro de liberação da camada;
- Investigar o motivo pelo qual trechos apresentam elevadas deflexões mesmo com elevado grau de compactação;
- Controlar o número de passadas por meio de trechos experimentais de modo a atingir a compactação com custo controlado.

No dimensionamento:

- Determinação de leis de fadiga de misturas asfálticas em laboratório;
- Determinação dos módulos resilientes das camadas de solo;
- Diversos solos podem apresentar elevados valores de CBR e baixa expansão, porém alta deformabilidade em campo (alta resiliência);
- Usar os métodos tradicionais como estrutura de entrada para o dimensionamento com métodos mecanicistas;
- Determinação das deflexões admissíveis com valores reais dos módulos de resiliência das camadas.

5. CONCLUSÕES

De acordo com os objetivos propostos neste trabalho, foram levantados subsídios teóricos e práticos a respeito do controle deflectométrico na execução das camadas de pavimento. Os conhecimentos foram aplicados em um estudo de caso na obra do Contorno Rodoviário de Florianópolis/SC na BR-101 em Santa Catarina, visando discutir as diferentes soluções geotécnicas utilizadas nos trechos experimentais, aliadas com a análise dos resultados dos ensaios de deflectometria utilizando a viga Benkelman. Foi realizada uma comparação entre os resultados das deflexões de campo e as deflexões admissíveis, tanto para a fase de pré-dimensionamento quanto para a nova fase de projeto, além das simulações de estruturas de pavimento no *software* ELSYM5 com quatro misturas asfálticas diferentes com base em leis de fadiga já estabelecidas. Considerando os resultados apresentados, conclui-se que, de maneira geral, os objetivos demonstrados durante o desenvolvimento deste trabalho de conclusão de curso foram alcançados.

Para a adequada realização de um projeto com controle de deflectometria faz-se necessária a definição de diversos parâmetros. Cada material possui diferentes características, sendo necessário o dimensionamento adequado por meio da análise tensão-deformação, sem utilizar leis de cálculo de deflexão admissível que não foram determinadas para aquele material, o que chama a atenção para o fato de que as deflexões admissíveis determinadas por meio de programas de camadas elásticas necessitam de um estudo mais aprofundado em trechos experimentais.

A determinação das deflexões de campo com o auxílio da viga Benkelman pode apresentar grande variabilidade quando realizadas em camadas de solo e brita, pois além do pouco “efeito de placa” na transmissão do carregamento, essas camadas apresentam irregularidades em sua superfície. Tendo isso em vista, aconselha-se fazer um controle estatístico durante as medições, ao invés de considerar apenas os valores médios.

Faz-se sempre necessário buscar as causas do problema e suas possíveis soluções. Elevados valores de deflexão podem ser devido a fatores como solos mal compactados no aterro ou pelo fato das camadas granulares terem a tendência de acomodação nos primeiros anos de vida. Para a camada de subleito ao invés da adoção do ensaio Proctor Normal, recomenda-se o Intermediário ou Modificado, aumentando

assim o esforço de compactação. Com isso é importante comparar o grau de compactação com a deflexão obtida em campo, ou seja, verificar se locais com deflexões menores possuem maior grau de compactação e vice-versa.

Fica evidente que as diferentes espessuras no revestimento são oriundas tanto da estrutura do pavimento, como das características dos materiais e da maneira como o conjunto se comporta. É de suma importância que as leis de fadiga sejam determinadas em laboratório, já que os métodos mais modernos e dinâmicos permitem não só fazer a análise tensão-deformação, como também avaliar a variável característica dos materiais e de execução. Cabe ao engenheiro projetista tomar conhecimento e aprofundar-se nas características estruturais e funcionais dos materiais, na interação entre eles e nos métodos de dimensionamento. Principalmente, é muito importante a execução e acompanhamento de trechos experimentais de modo a contribuir para a melhoria dos pavimentos brasileiros.

6. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Tendo como referência os resultados obtidos, entende-se fundamental o aprofundamento do tema por meio de trabalhos futuros. Assim, torna-se pertinente expor sugestões, tais como:

- Acompanhamento do trecho estudado após a execução do revestimento asfáltico;
- Desenvolvimento de leis de fadiga para novos materiais que possam ser empregados na camada de revestimento asfáltico da obra;
- Levantamento das deflexões ao longo da vida útil do pavimento;
- Controle e acompanhamento do número N ao longo da vida de projeto;
- Retroanálise dos valores de módulo de resiliência durante a vida de projeto.

REFERÊNCIAS

AASHTO *Guide for Design of Pavement Structures*. American Association of State Highway and Transportation Officials: Washington, DC, 1986.

AGUIAR, P. R.; VERTEMATTI, J. C. Introdução. In: VERTEMATTI, J. C. (Coord.). **Manual brasileiro de geossintéticos**. São Paulo: Edgard Blücher, 2004.

ANTUNES, L. G. S. **Reforço de pavimentos rodoviários com geossintéticos**. 2008. 158 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília.

ASSALI, M. P; FORTES, R.M. e CYMROT, R. “**Comparação da Incerteza de Medição entre os ensaios CBR e Mini CBR**”, 34ª Reunião Anual de Pavimentação, ABPv – Associação Brasileira de Pavimentação, Campinas – SP, Brasil, 24 a 28 de agosto de 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT): **NBR7185**: Solo – determinação da massa específica aparente “in situ” com emprego do frasco de areia. Rio de Janeiro, 1986.

_____. **NBR7182**: Solo – determinação da massa específica aparente “in situ” com emprego do cilindro cortante. Rio de Janeiro, Brasil. ABNT, 1987.

_____. **NBR9813**: Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, Brasil. ABNT, 1986.

_____. **NBR9895**: Solo – Índice de suporte Califórnia (ISC) – Método de ensaio. Rio de Janeiro, Brasil. ABNT, 2016.

_____. **NBR9895**: Geossintéticos - Terminologia. Rio de Janeiro, Brasil. ABNT, 2003.

BARBOSA, Guilherme Souza. **Pavimentos com base reforçada com geogrelha: Análise de resultados**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

BRANCO, Fernando; PEREIRA, Paulo; PICADO SANTOS, Luís. **Pavimentos Rodoviários**. Portugal, Coimbra: Almedina, 2005.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de pavimentação**. Rio de Janeiro, 2006b.

_____. **Manual de Restauração de pavimentos asfálticos**. 2. Ed. – Rio de Janeiro, 2006c.

_____. **Norma DNIT 164/2013-ME: Solos – Compactação utilizando amostras não trabalhadas**. Norma rodoviária. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **Norma DNIT 108/2009-ES: Terraplanagem – Aterros**. Especificação de Serviço. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **Norma DNIT 134/2010-ME: Pavimentação – Solos - Determinação do módulo de resiliência**. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **Norma DNIT 137/2010-ES: Pavimentação – Regularização do subleito**. Especificação de Serviço. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **Norma DNIT 138/2010-ES: Pavimentação – Reforço do subleito.** Especificação de Serviço. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **Norma DNIT 139/2010-ES: Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente.** Especificação de Serviço. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **Norma DNIT 141/2010-ES: Pavimentação – Sub-base estabilizada granulometricamente.** Especificação de Serviço. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **Norma DNIT 172/2016-ME: Solos – Determinação do índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas – Método de ensaio.** Norma rodoviária. Brasília, 2016.

BERNUCCI, Liedi Bariani *et al.* **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros.** Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABED A, 2008.

BITTENCOURT, Bem-Hur Kummer. Estradas com revestimento primário: **Definição das deflexões admissíveis para o controle de compactação através de medidas de deslocamentos elásticos das camadas.** Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

BORGES, Clarissa Beatriz Sandoval. **Estudo comparativo entre medidas de deflexão com a viga Benkelman e FWD em pavimentos da malha rodoviária estadual de Santa Catarina.** 2001. 197 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

CNT. Confederação Nacional de Transportes. 2017. Pesquisa Rodoviária 2016.

BRANCO, Fernando; PEREIRA, Paulo; PICADO SANTOS, Luís. **Pavimentos Rodoviários.** Portugal, Coimbra: Almedina, 2005.

DAS, Braja M. **Fundamentos de engenharia geotécnica.** São Paulo: Thomson Learning, 2007.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT.

_____. **DNER-ME 129/94: Solos – compactação utilizando amostras não trabalhadas.** Norma rodoviária. Rio de Janeiro: IPR, 1994.

_____. **DNER-ME 024/94: Pavimento – determinação das deflexões pela viga Benkelman.** Norma rodoviária. Rio de Janeiro: IPR, 1994.

_____. **DNER-ME 052/94: Solos e agregados miúdos – determinação da umidade com emprego do “Speedy”.** Norma rodoviária. Rio de Janeiro: IPR, 1994.

_____. **DNER-ME 092/94: Solos – determinação da massa específica aparente do solo “in situ”, com o emprego do frasco de areia.** Norma rodoviária. Rio de Janeiro: IPR, 1994.

_____. **DNER-PRO 010: Avaliação estrutural de pavimentos flexíveis – Volume I.** Norma rodoviária. Rio de Janeiro: IPR, 1979.

_____. **DNER-PRO 011: Avaliação estrutural de pavimentos flexíveis.** Norma rodoviária. Rio de Janeiro: IPR, 1979.

_____. **DNER-PRO 269: Projeto de restauração de pavimentos flexíveis - TECNAPAV.** Norma rodoviária. Rio de Janeiro: IPR, 1994.

_____. **DNER-PRO 273: Determinação de deflexões utilizando deflectômetro de impacto tipo “Falling Weight Deflectometer (FWD)”.** Norma rodoviária. Rio de Janeiro: IPR, 1996.

Engevix Engenharia e Projetos S/A. **Relatório de soluções geotécnicas do Contorno Rodoviário de Florianópolis/SC.** Subtrecho 3. Segmento: 212+600 – 212+850. Pista Sul e Norte. Maio 2016.

FERNANDES, M. **Sebenta de Mecânica dos Solos**, Vol. I. FEUP, Porto, 1994.

FERREIRA, Clovis Madruga. **Trabalhando com a viga Benkelman**. Disponível em <<https://pt.slideshare.net/castilloaroni/deflectometra-pavimentos-trabajando-con-viga-benkelman>>. Acesso em: 14 de Fev. 2017.

FRANCISCO, Ana Paula Santos. **Comportamento Estrutural de Pavimentos Rodoviários Flexíveis**. 112 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia da Construção, Escola Superior de Tecnologia e de Gestão - Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, 2012.

FRANCO, F.A.C.P. **Método de Dimensionamento Mecânico-Empírico de Pavimentos Asfálticos – SISPAV**. 2007. 315 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

FRANCO, F.A.C.P., 2000, **Um Sistema para Análise Mecânica de Pavimentos Asfálticos**. Dissertação de MSc., COPPE/ UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

FONTES, Liseane Padilha Thives da Luz. **Optimização do desempenho de misturas betuminosas com betume modificado com borracha para reabilitação de pavimentos**. 2009. 581 f. Tese (Doutorado) – Universidade do Minho, Portugal e Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

FORTES, R. M.. **Índice de Suporte Califórnia (ISC ou CBR (California Bearing Ratio))**. 2002.

Geoacademy – **Uso de geocélulas em obras de engenharia**. Disponível em: <<http://geoacademy.com.br/courses/uso-de-geocelulas-em-obras-de-engenharia/lectures/1566764>>. Acesso em: 10 Abr. 2016.

KOERNER, R. M. **Designing with Geosynthetics**. 3rd ed. Englewood Cliff. Prentice Hall, 1994.

LIMA, André P. **Notas de Aula – Compactação dos solos**. Universidade Veiga de Almeida, Rio de Janeiro, 2013.

Mahmoud, A.F.F e BAHIA, H.; **Using the gyratory compactor to measure mechanical stability of asphalt mixtures**. Wisconsin Highway Research Program, Project Number 0092-1-02. 2004.

MARCACCINI, Gian Carlo Schmitz. **Estudo experimental de laboratório para emprego da escória de aciaria como agregado em camadas de base de pavimento flexível**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

MARQUES, Geraldo Luciano de Oliveira. **Notas de Aula – Disciplina Pavimentação**. Minas Gerais, 2005.

MEDEIROS, H. Reforço plástico. Revista Técnica. N 138, set. 2008. Disponível em: <<http://www.revistatechne.com.br/engenharia-civil/138/imprime101848.asp>>. Acesso em: 29 Nov. 2016.

MEDINA, J.; MOTTA, L.M.G. **Mecânica dos Pavimentos**. 2. ed. Rio de Janeiro, RJ, 2005.

MELO, João Victor Staub de. **Desenvolvimento e estudo do comportamento reológico e desempenho mecânico de concretos asfálticos modificados com nanocompósitos**. 2014. 414 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

MIRANDA, Henrique. Pavimentos Rodoviários. Disponível em <<http://www.pavimentosrodoviarios.blogspot.com.br>>. Acesso em: 18 Out. 2016.

MOMM, L., DOMINGUES, F.A.A. Comportamento das Misturas Asfálticas à Deflexão: Módulo, um Dilema não Resolvido. 30ª Reunião Anual de Pavimentação, Salvador, BA, nov. 1996.

MOMM, Leto. **Estudo dos efeitos da granulometria sobre a macrotextura superficial do concreto asfáltico e seu comportamento mecânico.** 1998. 259 f. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade de São Paulo, São Paulo.

MONISMITH, C.L.; EPPS J.A.; KASIANCHUK A.; MCLEAN D.B. **Asphalt Mixture Behaviour on Repeated Flexure.** Report No. TE 70-5, University of California, Berkeley, USA, 1971.

MOURA, Edson de. **Notas de Aula – Projeto de pavimento.** São Paulo, 2011.

MOTTA, L.M.G. **Método de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis; Critério de Confiabilidade e Ensaio de Cargas Repetidas.** Tese de Doutorado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro. 1991.

MOTTA, L.M.G, MACÊDO, J.A.G., MEDINA, J., et. al. (1995). “**Avaliação Estrutural de Trechos Experimentais na Rodovia Carvalho Pinto – Análise Preliminar**”. In: 29ª Reunião Anual de Pavimentação. V. 2, pp.282-309, Cuiabá, MG, Brasil.

MPB Engenharia. **Relatório de Impacto Ambiental do Contorno Rodoviário de Florianópolis/SC (RIMA).** Florianópolis, 2013.

NÓBREGA, Eduardo Suassuna. **Comparação entre métodos de retroanálise em pavimentos asfálticos.** 2003. 365 f. Dissertação (Mestrado) - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

PERKINS, S.W. **Mechanical Response of Geosynthetic-Reinforced Flexible Pavements,** London, v. 6, n. 5, p. 347-382, 1999.

Pavimento semirrígido. Ecivil. Disponível em: <<http://www.ecivilnet.com/dicionario/o-que-e-pavimento-semi-rigido.html>>. Acesso em: 13 nov. 2016.

PINTO, Carlos de Sousa. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas.** São Paulo: Oficina de Textos, 2000.

PINTO, Salomão; PREUSSLER, Ernesto. **Pavimentação Rodoviária: conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis.** Rio de Janeiro: Synergia: IBP, 2010.

PINTO, C S. **Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas.** São Paulo, Brasil. Oficina de Textos, 3ª Ed, 367p, IL., 2006.

PREUSSLER, Leonardo Appel. **Contribuição ao Estudo de Deformabilidade de Camadas de Pavimento.** 2007. 129 f. Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

RODRIGUES, R.M. **Estudo do Trincamento dos Pavimentos.** 1991. Tese (Doutorado) - Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

RIBEIRO, Simão Pedro Tavares. **Terraplanagem: Metodologias e técnicas de compactação.** 2008. 101 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Porto, Porto.

SANTANA, H. **Manual de Pré-Misturados a Frio.** Instituto Brasileiro de Petróleo, Comissão de Asfalto, Rio de Janeiro-RJ, 1993. 298p.

SCHMIDT, Camila. **Melhoramento de solos com adição de cal para obras de infraestrutura rodoviária**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade do Sul de Santa Catarina, Palhoça, 2016.

SENÇO, Wlastermiler de. **Manual de Técnicas de Pavimentação**: volume 1. 2. ed. ampl. São Paulo: Pini, 2007.

SILVA, César Augusto Rodrigues da. **Controle deflectométrico na execução de camadas de pavimento**. [S.I.], 1994.

SOARES, Jéssica Santiago. **Investigação da relação entre parâmetros da compactação giratória e de deformação permanente em misturas asfálticas densas**. 110 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de pós-graduação em Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

SOULIMAN, Mena. **Integrated predictive model for healing and fatigue endurance limit for asphalt concrete**. Tese (Doutorado). Arizona State University, 235 f. 2012.

TRICHÊS, G.; BERNUCCI, L. B. Reforço de base de pavimentos. In: VERTEMATTI, J. C. (Coord.). **Manual brasileiro de geossintéticos**. São Paulo: Edgard Blücher, 2004.

VILLELA, Assis Rodrigues Abbud. **Estudo de camada de base asfáltica de módulo elevado para restauração de rodovias de tráfego muito pesado**. 2012. 206 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

VILLENA, João *et al.* **Deformação permanente de misturas asfálticas com pigmentos de óxidos metálicos mistos**. Disponível em http://www.sinicesp.com.br/44rapv/trabalhos/TrabalhoFinal_144.pdf. Acesso em: 05 Abr. 2016.

ZANINI, Luiz Fernando Pardi. **Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil**. Florianópolis. (Folha SG.22-Z-D-V) e Lagoa (Folha SG.22-Z-D-VI). Estado de Santa Catarina. Escala 1:100.000. Brasília: CPRM, 1997.

Webtec (2003) – **“Cellular Confinement System”**, Webtec Inc. Geosynthetics Disponível em: <www.webtecgeos.harborwebs.com>. Acesso em: 13 fev. 2017.

ANEXO A – DENSIDADE IN SITU SUBLEITO H2

CONSORCIO		DENSIDADE " IN SITU "						
ferrovial								
TONIOLO BUSNELLO								
TUNELIS, TERRAPLENAGENS E PAVIMENTAÇÕES								
REGISTRO CAMADA		Nº						
FURO		Nº						
PROFUNDIDADE	DE							
CM	A	0,00	900	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
DATA			20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
ESTACA			18-01-16	18-01-16	18-01-16	18-01-16	18-01-16	18-01-16
POSICÃO		E-X-D	212+610	212+610	212+680	212+690	212+690	212+700
PESO DO FRASCO COM	ANTES	A	B.D	B.E	E.X	B.D	B.E	E.X
	DEPOIS	B	2920	2950	2914	2922	2930	2948
	DIFERENÇA	A-B	988	988	988	988	988	988
FUNIL		Nº	1932	1962	1926	1934	1942	1930
PESO DA AREIA NO FUNIL		C	-	-	-	-	-	-
PESO DA AREIA NO FURO		A-B-C=P	980	980	980	980	980	980
DENSIDADE DA AREIA		d						
VOLUME DO FURO		V=P/d						
UMIDADE		h%						
PESO DO SOLO ÚMIDO		Ph	1971	2002	1965	1973	1987	1969
PESO DO SOLO SECO		Ps=Ph/100+h	-	-	-	-	-	-
DENSIDADE DO SOLO SECO		Ds=Ps/V	1699	1726	1710	1708	1716	1709
ENSAIO LABORATO RIAL	REGISTRO	Nº	642	642	642	642	642	642
	DENS. MAX. (g/dm³)	DM	1698	1698	1698	1698	1698	1698
	UMIDADE ÓTIMA	h%	16,7	16,7	16,7	16,7	16,7	16,7
GRAU DE COMPACTAÇÃO		%=Ds/DM	100,0	101,6	100,7	100,6	101,1	100,6
UMIDADE								
CÁPSULA		Nº						
PESO DO SOLO ÚMIDO (g)		Phl	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
PESO DO SOLO SECO (g)		Psl	86,2	86,2	87,0	86,6	86,6	86,8
PESO DA ÁGUA (g)		Pa Phl-Psl	13,8	13,8	13,0	13,4	13,4	13,2
UMIDADE		h%=Pa/Psl	16,0	16,0	14,9	15,5	15,5	15,2
OBSERVAÇÕES:								
TESTE H 2								
REG. sub leito								
RODOVIA	TRECHO	SUB - TRECHO						
BR 101	CONT. FLORIPA	Km 212+650 A Km 212+700						
CONTRATANTE	OPERADOR	CALCULISTA	VISTO					
ARTCORIS	LOUIPE	FRANCISCO						
P. 542		DENSIDADE "IN SITU"						
		MÉTODO DO FRASCO DE AREIA						
		Assinado						

ANEXO B – CARATECRIZAÇÃO DO SUBLEITO H2

ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA UTILIZANDO AMOSTRAS NÃO TRABALHADAS (DNER-ME 049/94) ENERGIA Normal DE COMPACTAÇÃO 12 GOLPES ** 5 CAMADAS



Concessionária: Autopista Litoral Sul - Rodovia BR 101 - CONTORNO

CONSTRUTORA: Consórcio Ferrovial Toniolo Busnello

ESTUDO : 3º C. Final

CERTIFICADO : Reg 633

PROCEDÊNCIA : Pista

RESPONSÁVEL PELA COLETA : Moisés

DATA DA AMOSTRAGEM 06/01/2016

km : 212+680

ENSAIO - I.S.C

DATA INÍCIO ENSAIO 08/01/2016

PISTA : Sul

FAIXA DE TRÁFEGO: -

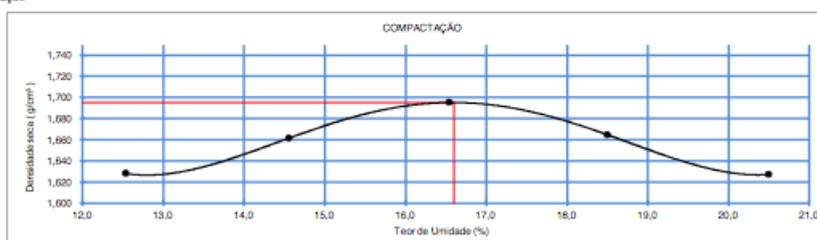
CARRO -

DATA DA EMISSÃO 20/01/2016

COMPACTAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Ponto	Densidade Úmida (g/cm³)	Teor de Umidade(%)	Densidade Seca(g/cm³)
1	1,832	12,5	1,628
2	1,904	14,6	1,662
3	1,976	16,5	1,695
4	1,973	18,5	1,665
5	1,961	20,5	1,627

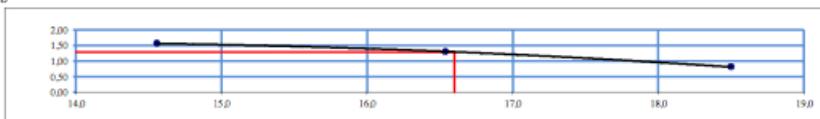
Gráfico de Compactação



ENSAIO DE EXPANSÃO

Ponto	Data	Leitura (mm)	Data	Leitura (mm)	Expansão	Tempo Decorrido (dias)
2	08/01/2016	0,00	12/01/2016	1,78	1,56	4
3	08/01/2016	0,00	12/01/2016	1,49	1,30	4
4	08/01/2016	0,00	12/01/2016	0,92	0,80	4

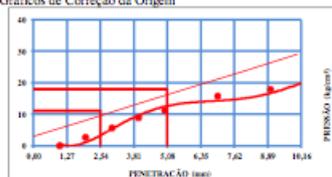
Gráfico de Expansão



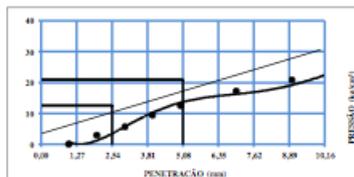
ENSAIO DE PENETRAÇÃO

Ponto	PENET. (mm)	Pressão (kg/cm²)	Pressão Corrigida	CBR(%)	PENET. (mm)	Pressão (kg/cm²)	Pressão Corrigida	CBR(%)
2	2,54	11,1	11,1	15,8	5,08	17,9	17,9	16,9
3	2,54	12,5	12,5	17,8	5,08	20,9	20,9	19,8
4	2,54	5,6	5,6	7,9	5,08	12,2	12,2	11,5

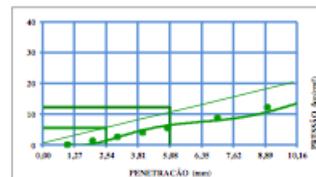
Gráficos de Correção da Origem



Ponto 2

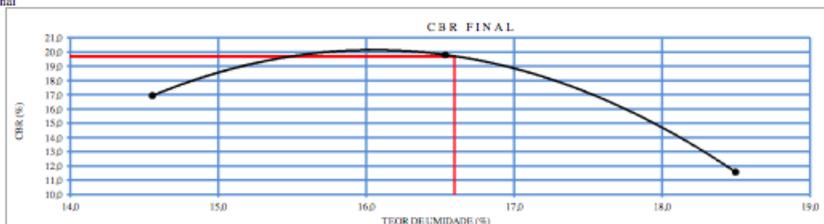


Ponto 3



Ponto 4

Gráfico de CBR Final



NOTAS:

CORREÇÃO DA PRESSÃO PARA 2,54 mm (PADRÃO = 70,31 kg/cm²) -> CORREÇÃO DA PRESSÃO PARA 5,08 mm (PADRÃO = 105,46 kg/cm²)

Volume da amostra: 2084 cm³

Altura de queda do soquete: 45,7 cm -> Peso do soquete: 4,5 kg

Energia de compactação aplicada: 6 kg/cm/cm²

A memória de cálculo está arquivada no CDT e está disponível para consulta sempre que for necessário.

ENERGIA Normal

RESULTADOS:

Densidade Máxima Seca= 1,695 g/cm³ ** Umidade Ótima= 16,6 %

CBR Final = 20 % ** Expansão= 1,3 %

São José, 19 de Janeiro de 2016

Moisés da Silva Rosa Rodrigues
 Laboratorista
 Laboratório Controle de Qualidade

ANEXO C – GRANULOMETRIA BRITA 3/4”

CONTRATANTE: AUTOPISTA LITORAL SUL		SUBTRECHO: -		MATERIAL: 3/4”	
OBRA: CONTORNO DE FLORIANÓPOLIS		ESTACA: -		DATA: 27/01/2016	
FORNECEDOR: LATINA MANUTENÇÃO		CAMADA: -		REGISTRO: -	

ENSAIO DE EQUIVALENTE DE AREIA (DNIT ME 164/2013)		
DETERMINAÇÕES	AMOSTRA 01	LEITURA
LEITURA DO TOPO DE AREIA	A	
LEITURA DO TOPO DA ARGILA	B	
EQUIVALENTE DE AREIA	A : B x 100	
DETERMINAÇÕES	AMOSTRA 02	LEITURA
LEITURA DO TOPO DE AREIA	A	
LEITURA DO TOPO DA ARGILA	B	
EQUIVALENTE DE AREIA	A : B x 100	
DETERMINAÇÕES	AMOSTRA 03	LEITURA
LEITURA DO TOPO DE AREIA	A	
LEITURA DO TOPO DA ARGILA	B	
EQUIVALENTE DE AREIA	A : B x 100	
RESUMO		
AMOSTRA 1 - E. A =		
AMOSTRA 2 - E. A =		
AMOSTRA 3 - E. A =		
EQUIVALENTE DE AREIA (MÉDIA) =		

Equivalente de Areia

ENSAIO DE GRANULOMETRIA (NBR 7217)										
PENEIRA		PESO	PORCENTAGENS RETIDAS							
Nº	mm	g	ENSAIO			LIMITES RECOMENDADOS - NBR 7217 (ACUMULADAS)				
			Porcentagem da amostra total	Porcentagem acumulada	Porcentagem passada	ZONA 1	ZONA 2	ZONA 3	ZONA 4	CLASS.
3/4”	19,10	319,70	16,5	16,5	83,5					
1/2”	12,70	929,70	48,1	64,6	35,4					
3/8”	9,50	548,30	28,3	92,9	7,1					
Nº 4	4,75	122,70	6,3	99,3	0,7					
Nº 10	2,00	0,40	0,0	99,3	0,7					
Nº 40	0,42	0,60	0,0	99,3	0,7					
Nº 80	1,42	0,00	0,0	99,3	0,7					
Nº 200	0,074	1,70	0,1	99,4	0,6					
FUNDO		11,5	0,6	100,0	0,0					
TOTAIS		1934,60								

ZONA 1 = PRETO
ZONA 2 = VERDE
ZONA 3 = AZUL
ZONA 4 = LARANJA
RESULTADO = VERMELHO TRACEJADO

ANEXO D – ESPECIFICAÇÃO FORNIT® J600-40



Rua Romualdo Davoli, 375 - Centro Empresarial Eldorado
 São José dos Campos - SP - Brasil / CEP: 12238-577
 Tel. : +55 (12) 3903-9300 / Fax: +55 (12) 3903-9301
 huesker@huesker.com.br / www.huesker.com.br

Fornit® J600-40

Descrição do material: Geogrelha biaxial flexível especificamente desenvolvida para reforço de base e sub-base de pavimentos, bidirecionais, fabricadas a partir de filamentos de polipropileno de alta tenacidade e baixa fluência, o que possibilita a obtenção de elevadas resistências e baixas deformabilidades.

Principais Aplicações: Reforço de estruturas de pavimentos e pisos, estruturas ferroviárias e de estruturas submetidas a cargas cíclicas ou de curta duração.

Propriedades (*)	Fornit J600-40
Matéria-prima principal	Filamentos de Polipropileno (PP) de alta tenacidade
Abertura da malha nominal	40 mm
Módulo de rigidez à tração a 2% de deformação (ABNT 12.824)	
-Longitudinal	≥ 600 kN/m
-Transversal	≥ 600 kN/m
Deformação máxima na resistência nominal (ABNT 12.824)	
-Longitudinal	≤ 10,0 %
-Transversal	≤ 10,0 %
Coefficiente de Interação (ASTM D 6706)	≥ 0,95
Dimensões dos rolos	
-Largura	5,2 m
-Comprimento (**)	200m

(*) Materiais Certificados ISO 9001. (**) Comprimentos especiais são possíveis.

ANEXO E – PROJETO BASE BGS ARTERIS

		Código LS-SJO-BGS-FXII-CDT104/2015	REV. 0
		Emissão 17/12/2015	Folha 01/04
Lote :	Rodovia : BR 101	Firma Projetista: Latina Manutenção de Rodovias	
Trecho : Corredor Curitiba a Florianópolis		Concessionária: Autopista Litoral Sul	
Objetivo: PROJETO - BGS FAIXA 2 "ESTABILIZADA" PEDREIRA LATINA SÃO JOSÉ		ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA UTILIZANDO AMOSTRAS NÃO TRABALHADAS (DNER-ME 049/94) ENERGIA MODIFICADA DE COMPACTAÇÃO ** 5 CAMADAS	
Documentos de Referência:			
Particular para Execução de Base Estabilizada - Brita Graduada Simples - BGS Designação ARTERIS ES 008- Rev. 4 (Novembro/2015).			
Análise granulométrica (DNIT-ME-051/94)			
Limites Físicos (DNIT-ME-122/94) e (DNIT-ME-082/94)			
Classificação dos Solos - designação ARTERIS ET-145/91			
Classificação dos Solos Finos - designação ARTERIS ET-006			
Certificados CDT: CERTIFICADO N° 587/2015 - CERTIFICADO N° 588/2015 - CERTIFICADO N° 589/2015			
Observações:			
-			
As porcentagens de agregados indicadas são válidas para as granulometrias dos agregados utilizados para a elaboração da dosagem, e devem ser ajustadas em função das granulometrias dos agregados da mesma origem, disponíveis no estoque em cada dia de produção da usina, para manter a granulometria resultante fielmente na faixa de trabalho definida.			
0	17/12/2015	0	
Rev.	Data	Latina Manutenção de Rodovias	Autopista Litoral Sul

PROJETO - BGS FAIXA 2 "ESTABILIZADA" PEDREIRA LATI 104

Latina Manutenção
Yartens

Base Estabilizada

LS-SJO-BGS-FXII-CDT104/2015

BGS FAIXA 2 "ESTABILIZADA"

Resumo do Projeto

Mencionar este código sempre que enviar amostras desta mistura para ensaios :

LS-SJO-BGS-FXII-CDT104/2015

Concessionária Autopista Litoral Sul - Rodovia BR 101

Contratada: Latina Manutenção de Rodovias

Particular para Execução de Base Estabilizada - Brita Graduada Simples - BGS Designação ARTERIS ES 008- Rev. 4 (Novembro/2015).

Índice de Suporte Califórnia (DNER-ME 049/94)

UMIDADE ÓTIMA 5,6%

Identificação dos Materiais Utilizados

Usina: -

Agregado Mineral Tipo:	Procedência :	Percentual (%)	Procedência :
BRITA I	Pedreira Pedreira São José	30	Pedreira Pedreira São José
PEDRISCO	Pedreira Pedreira São José	20	
PÓ DE PEDRA	Pedreira Pedreira São José	50	

Quadro Resumo das Características do Projeto

DENSIDADE MÁXIMA SECA	2,084	EXPANSÃO	0%
UMIDADE ÓTIMA	5,6%	CBR FINAL	> 100%

Observações:

As porcentagens de agregados indicadas são válidas para as granulometrias dos agregados utilizados para a elaboração da dosagem, e devem ser ajustadas em função das granulometrias dos agregados da mesma origem, disponíveis no estoque em cada dia de produção da usina, para manter a granulometria resultante fielmente na faixa de trabalho definida.

A memória de cálculo está arquivada no CDT e está disponível para consulta sempre que for necessário.

PROJETO - BGS FAIXA 2 "ESTABILIZADA"**PEDREIRA LATINA SÃO JOSÉ**

Latina Manutenção
Yartens

Base Estabilizada**BGS FAIXA 2 "ESTABILIZADA"**

Mencionar este código sempre que enviar amostras desta mistura para ensaios :

LS-SJO-BGS-FXII-CDT104/2015

Concessionária Autopista Litoral Sul - Rodovia BR 101

Contratada: Latina Manutenção de Rodovias

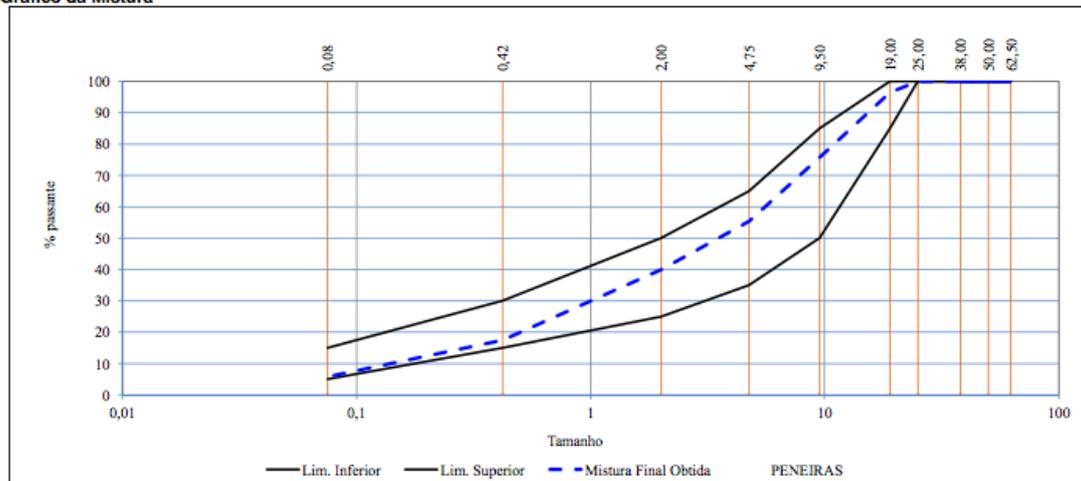
Particular para Execução de Base Estabilizada - Brita Graduada Simples - BGS Designação ARTERIS ES 008- Rev. 4 (Novembro/2015).

Índice de Suporte Califórnia (DNER-ME 049/94)

Usina: -

Ganulometria dos Materiais (Porcentagem em peso passando na peneira)

Peneiras	Certificado ASTM	mm	BRITA 1	PEDRISCO	PÓ DE PEDRA	-	Mistura Final Obtida	Faixa Especificada		Faixa de Trabalho	
			CERTIFICADO Nº 587/2015	CERTIFICADO Nº 588/2015	CERTIFICADO Nº 589/2015	-		Lim. Inferior	Lim. Superior	Lim. Inferior	Lim. Superior
			30,0%	20,0%	50,0%	-	100,0%				
1 1/2"	38		100,0	100,0	100,0	0,0	100	100	100	100	100
2 1/2"	62,5		100,0	100,0	100,0	0,0	100	100	100	100	100
2"	50,0		100,0	100,0	100,0	0,0	100	100	100	100	100
1"	25		100,0	100,0	100,0	0,0	100	100	100	100	100
3/4"	19		88,3	100,0	100,0	0,0	96	85	100	89	100
3/8"	9,5		19,3	99,4	100,0	0,0	76	50	85	69	83
Nº 4	4,8		0,7	26,2	99,9	0,0	55	35	65	50	60
Nº 10	2		0,6	2,6	78,5	0,0	40	25	50	35	45
Nº 40	0,42		0,5	1,4	34,0	0,0	17	15	30	15,4	19,4
Nº 200	0,075		0,4	1,0	10,9	0,0	6	5	15	3,8	7,8

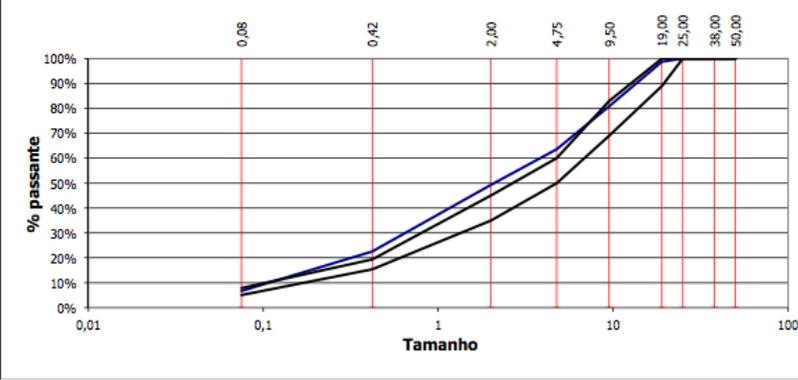
Gráfico da Mistura

As porcentagens de agregados indicadas são válidas para as granulometrias dos agregados utilizados para a elaboração da dosagem, e devem ser ajustadas em função das granulometrias dos agregados da mesma origem, disponíveis no estoque em cada dia de produção da usina, para manter a granulometria resultante fielmente na faixa de trabalho definida.

A memória de cálculo está arquivada no CDT e está disponível para consulta sempre que for necessário.

17/12/2015

ANEXO F – GRANULOMETRIA BGS H2

DESIGNAÇÃO- ARTERIS ES-003-REV04 (Novembro/2014)										
BRITA GRADUADA SIMPLES (BGS)										
RODOVIA:		BR- 101			DSU-OB-		RG:		684	
CONSTRUTORA:		Consórcio Ferroviária			Data Coleta:		21/01/2016			
OBRA:		Contorno de Florianópolis			Data Ensaio:		22/01/2016			
KM / TRECHO:		212+650 - 212+700 - Pista H2			AMOSTRA:		B,g,s			
LOCAL DA COLETA:		212+680			RESP. COLETA:		Alessandro			
PENEIRA		PESO DA AMOSTRA: 1.573,2 g				PROJETO	ARTERIS ME-27 FAIXA- 2		EQUIVALENTE DE AREIA	
ASTM	mm	Peso	Peso acum.	% retida	% Passan.		Min	Max	ABNT-NBR-12052 ≥ 30%	
2"	50				100,0%		100,0%	100,0%	AREIA	#DIV/0!
1 1/2"	38				100,0%		100,0%	100,0%	ARGILA	#DIV/0!
1"	25				100,0%		100,0%	100,0%	AREIA	#DIV/0!
3/4"	19	19,12	19,1	1,2%	98,8%		89,0%	100,0%	ARGILA	#DIV/0!
3/8"	9,5	281,55	300,7	19,1%	80,9%		69,0%	83,0%	MÉDIA=	#DIV/0!
Nº 4	4,8	271,16	571,8	36,3%	63,7%		50,0%	60,0%		
Nº 10	2,00	226,48	798,3	50,7%	49,3%		35,0%	45,0%		
Nº 40	0,42	419,80	1.218,1	77,4%	22,6%		15,4%	19,4%		
Nº 200	0,08	249,23	1.467,3	93,3%	6,7%		5,0%	7,8%		
						ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA (CBR) DNIT ME- 049 CBR FINAL → - UMIDADE ÓTIMA → 5,7 EXPANSÃO → - DENSIDADE MÁXIMA SÊCA → 2,154		DADOS DO PROJETO CBR FINAL → >100 UMIDADE ÓTIMA → 5,7 EXPANSÃO → DENSIDADE MÁXIMA SÊCA → 2,084		
										OBSERVAÇÕES:
Registro, sexta-feira, 29 de janeiro de 2016										
Marlon da Silva Rosa Rodrigues Laboratorista Laboratório Controle de Qualidade										

DESIGNAÇÃO- ARTERIS ES-003-REV04 (Novembro/2014)											
BRITA GRADUADA SIMPLES (BGS)											
RODOVIA:	BR- 101				DSU-OB-		RG:	682			
CONSTRUTORA:	Consórcio Ferrovia					Data Coleta:	21/01/2016				
OBRA:	Contorno de Florianópolis					Data Ensaio:	22/01/2016				
KM / TRECHO:	212+650 - 212+750 - Pista H2				AMOSTRA:	B.g.s.					
LOCAL DA COLETA:	212+690				RESP. COLETA:	Alessandro					
PENEIRA		PESO DA AMOSTRA:		1.642,6 g		PROJETO		ARTERIS ME-27 FAIXA- 2		EQUIVALENTE DE AREIA	
ASTM	mm	Peso	Peso acum.	% retida	% Passan.	Min	Max	ABNT-NBR-12052 ≥ 30%			
2"	50				100,0%	100,0%	100,0%	AREIA #DIV/0! %			
1 1/2"	38				100,0%	100,0%	100,0%	ARGILA #DIV/0! %			
1"	25				100,0%	100,0%	100,0%	AREIA #DIV/0! %			
3/4"	19				100,0%	100,0%	89,0%	ARGILA #DIV/0! %			
3/8"	9,5	337,84	337,8	20,6%	79,4%	69,0%	83,0%	MÉDIA= #DIV/0! %			
Nº 4	4,8	352,88	690,7	42,1%	57,9%	50,0%	60,0%				
Nº 10	2,00	230,17	920,9	56,1%	43,9%	35,0%	45,0%				
Nº 40	0,42	381,40	1.302,3	79,3%	20,7%	15,4%	19,4%				
Nº 200	0,08	234,79	1.537,1	93,6%	6,4%	5,0%	7,8%				
<p>O gráfico mostra a curva de peneiração da amostra B.g.s. em comparação com as especificações de projeto. O eixo X representa o tamanho da peneira em milímetros (0,01 a 100), e o eixo Y representa o percentual de material que passa (% passante) de 0% a 100%. A amostra apresenta uma curva muito próxima da especificação, com 100% de material passando por peneiras de 25 mm e maiores, e apenas 6,4% restando na peneira de 0,08 mm.</p>										ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA (CBR) DNIT ME- 049 CBR FINAL → - UMIDADE ÓTIMA → 5,7 EXPANSÃO → - DENSIDADE MÁXIMA SÉCA → 2,154	
OBSERVAÇÕES: 										DADOS DO PROJETO CBR FINAL → > 100 UMIDADE ÓTIMA → 5,7 EXPANSÃO → DENSIDADE MÁXIMA SÉCA → 2,084	
Registro, sexta-feira, 29 de janeiro de 2016										 Marlon da Silva Rosa Rodrigues Laboratorista Laboratório Controle de Qualidade	

ANEXO G – DENSIDADE *IN SITU* BGS H2

CONSORCIO		DENSIDADE "IN SITU"					
ferrovial							
TONIOLO BUSNELLO							
TUNEL, TERRAPLENAGENS E PAVIMENTAÇÕES							
REGISTRO CAMADA		Nº					
FURO		Nº	-	-	-	-	-
PROFUNDIDADE	DE	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CM	A	-	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0
DATA		-	21-01-16	21-01-16	21-01-16	21-01-16	21-01-16
ESTACA		-	212+660	212+690	212+690	212+660	212+690
POSICÃO		E-X-D	B.E	B.D	B.E	A.C	X
PESO DO FRASCO COM	ANTES	A	7000	7000	7000	7000	7000
	DEPOIS	B	4460	4040	4458	4180	4480
	DIFERENÇA	A-B	2540	2960	2542	2820	2620
FUNIL		Nº	-	-	-	-	-
PESO DA AREIA NO FUNIL		C	545	545	545	545	545
PESO DA AREIA NO FURO		A-B-C=P	1995	2415	1997	2275	2065
DENSIDADE DA AREIA		d	1354	1354	1354	1354	1354
VOLUME DO FURO		V=P/d	1473	1781	1475	1680	1525
UMIDADE		h%	-	-	-	-	-
PESO DO SOLO ÚMIDO		Ph	3578	4178	3386	3952	3590
PESO DO SOLO SECO		Ps=Ph/100+h	3470	4010	3216	3793	3409
DENSIDADE DO SOLO SECO		Ds=Ps/V	2356	2248	2180	2258	2235
ENSAIO LABORATORIO	REGISTRO	Nº					
	DENS.MAX.(g/dm³)	DM	2153	2153	2153	2153	2153
	UMIDADE ÓTIMA	h%	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7
GRAU DE COMPACTAÇÃO		%=Ds/DM	109,4	104,1	101,3	104,9	103,8
UMIDADE							
CÁPSULA		Nº	-	-	-	-	-
PESO DO SOLO ÚMIDO (g)		Phi	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
PESO DO SOLO SECO (g)		Psi	97,0	96,0	95,0	96,0	95,0
PESO DA ÁGUA (g)		Pa Phi-Psi	3,0	4,0	5,0	4,0	5,0
UMIDADE		h%=Pa/Psi	3,1	4,2	5,3	4,2	5,3
OBSERVAÇÕES:							
TESTE H2 BASE							
RODOVIA	TRECHO	SUB - TRECHO					
BR 101	CONT. FLORIPA	Km 212+650			A Km 212+700		
CONTRATANTE	OPERADOR	CALCULISTA	VISTO				
ARTCOR	W. P.	J. M. S.					
P. S. U. 2.		DENSIDADE "IN SITU"					
		MÉTODO DO FRASCO DE AREIA					

ANEXO H – DENSIDADE *IN SITU* SUBLEITO G2

ENGEVIX		ENGEVIX ENGENHARIA S/A LABORATÓRIO DE CONTROLE TECNOLÓGICO SOLOS, CONCRETO E PAVIMENTAÇÃO				
Obra:	Contorno de Florianópolis	Data: 07/10/16			Registro:	
Trecho:	03	Sub-trecho: 212+750 a 212+800				
Local	Estaca	212+760	212+770	212+780	212+790	212+800
	Posição	B0	B6	E X	AC	
	Camada	R.S.L.	-	-	-	
Cilindro de Cravação	Cilindro+Solo+Água (g)	3067	3027	3031,4	3031,8	3058,7
	Peso do cilindro (g)	993,1	964,0	991,4	971,8	998,7
	Peso do Solo úmido (g)	2074	2063	2034	2054	2060
	Volume do cilindro (cm ³)	976,4	984,9	984,9	966,1	984,9
Umidade	Cápsula+Solo+Água (g)					
	Peso da cápsula (g)					
	Peso do solo úmido (g)	124,56	118,76	112,87	113,72	115,71
	Peso da água (g)	16,24	15,31	14,12	14,40	15,26
	Peso do solo seco (g)	108,32	103,45	98,75	99,32	100,45
Densidade no Campo	Densidade úmida (g/cm ³)	2124	2095	2065	2126	2092
	Densidade seca (g/cm ³)	1847	1825	1807	1857	1816
Elementos do Laboratório	Registro					
	Laboratório					
	Umidade ótima (%)	15,4				
	Densidade máxima (g/cm ³)	1802				
GC	Grau de compactação (%)	102,5	101,3	100,3	103,1	100,8
	Umidade (%)	15,0	14,8	14,3	14,5	15,2
OBSERVAÇÕES:						

ANEXO I - CARATERIZAÇÃO DO SUBLEITO G2

Ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas DNIT ME 162/94
ENERGIA NORMAL DE COMPACTAÇÃO 12 GOLPES ** 3 CAMADAS

Autopista
Litoral Sul
arteris

Concessionária: Autopista Litoral Sul - Rodovia BR 101
 CONSTRUTORA: Consórcio Ferrovia/Tb
 PROCEDÊNCIA : Pista Teste (212+700 a 212+800)
 km : 212+750
 PISTA : Norte
 MATERIAL : Saibro Variegado

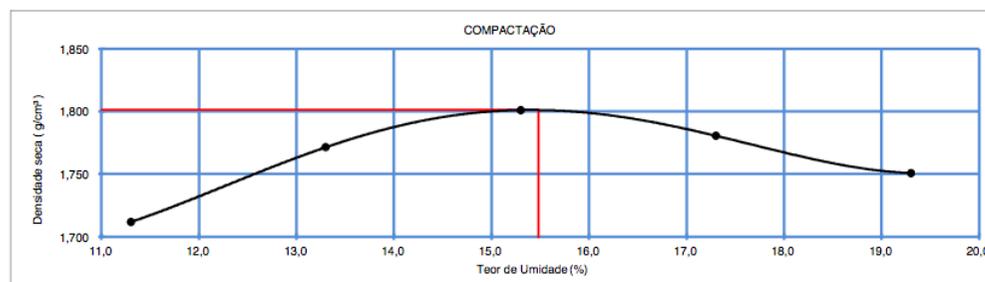
ESTUDO : 3ª C. Final
 OUTRAS INFORMAÇÕES :

CERTIFICADO : Reg 802
 DATA DA AMOSTRAGEM : 06/04/2016
 DATA INÍCIO ENSAIO : 06/04/2016
 DATA DA EMISSÃO: 07/04/2016

COMPACTAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Ponto	Densidade Úmida (g/cm ³)	Teor de Umidade(%)	Densidade Seca(g/cm ³)
1	1,905	11,3	1,712
2	2,007	13,3	1,771
3	2,077	15,3	1,801
4	2,089	17,3	1,781
5	2,089	19,3	1,751

Gráfico de Compactação



NOTAS:

RESULTADOS:

Densidade Máxima Sêca= 1,801 g/cm³ ** Umidade Ótima= 15,5 %

Registro, quinta-feira, 7 de abril de 2016


 Alessandro Amorim Cruz
 Laboratorista
 Laboratório Controle de Qualidade

ANEXO J – DENSIDADE *IN SITU* BGS G2

ENGEVIX		ENGEVIX ENGENHARIA S/A LABORATÓRIO DE CONTROLE TECNOLÓGICO SOLOS, CONCRETO E PAVIMENTAÇÃO		
Obra:	Contorno de Florianópolis	Data:	17/04/16	Registro:
Trecho:	03 G2	Sub-trecho:	212+750 a 212+800	
Local	Estaca	212+760	212+770	212+780
	Posição			
	Camada	BGS		
Frasco de Areia	Peso do frasco antes (g)	12135	11951	11779
	Peso do frasco depois (g)	6351	6273	6084
	Peso da areia deslocada (g)	5784	5678	5695
	Peso da areia no cone (g)	1368	1368	1368
	Peso da areia no furo (g)	4416	4310	4324
	Densidade da areia (g/cm³)	1318	1318	1318
	Volume (cm³)	3351	3270	3283
Furo	Peso do material extraído + tara (g)			
	Tara (g)			
	Peso do material extraído (g)	7474	7229	7305
Umidade	Peso do solo úmido (g)	106,4	106,2	108,1
	Peso da água (g)	5,9	5,8	5,3
	Peso do solo seco (g)	100,5	100,4	102,8
Densidade no Campo	Densidade úmida (g/cm³)	2230	2211	2225
	Densidade seca (g/cm³)	2107	2092	2117
Elementos do Laboratório	Umidade ótima (%)	5,6		
	Densidade máxima (g/cm³)	2074		
	Registro			
	Laboratório			
GC	Grau de compactação (%)	104,6	100,9	102,1
	Umidade (%)	5,8	5,7	5,1
OBSERVAÇÕES:				

ANEXO K – DENSIDADE *IN SITU* SUBLEITO M2

ENGEVIX		ENGEVIX ENGENHARIA S/A LABORATÓRIO DE CONTROLE TECNOLÓGICO SOLOS, CONCRETO E PAVIMENTAÇÃO			
Obra:	Contorno de Florianópolis	Data:	05/05/2016		Registro:
Trecho:	03 Pista Teste M2	Sub-trecho:	212-600A 212-650		
Local	Estaca	212-610	212-630	212-640	212-620
	Posição	BE	EX	BD	BE
	Camada	R.S.L.			
Cilindro de Cravação	Cilindro+Solo+Água (g)	2885,8	2940,4	2908,8	2920,4
	Peso do cilindro (g)	977,8	991,4	977,8	991,4
	Peso do Solo úmido (g)	1908	1943	1931	1923
	Volume do cilindro (cm ³)	966,1	984,9	966,1	984,9
Umidade	Cápsula+Solo+Água (g)				
	Peso da cápsula (g)				
	Peso do solo úmido (g)	100	100	100	100
	Peso da água (g)	10,5	10	10,5	9,0
	Peso do solo seco (g)	89,5	90,0	89,5	91,0
Densidade no Campo	Densidade úmida (g/cm ³)	1915	1913	1999	1953
	Densidade seca (g/cm ³)	1769	1776	1790	1779
Elementos do laboratório	Registro				
	Laboratório	H55			
	Umidade ótima (%)	11,1			
	Densidade máxima (g/cm ³)	1755			
GC	Grau de compactação (%)	100,8	101,2	102,0	101,4
	Umidade (%)	11,7	11,1	11,7	9,8
SERVAÇÕES:					

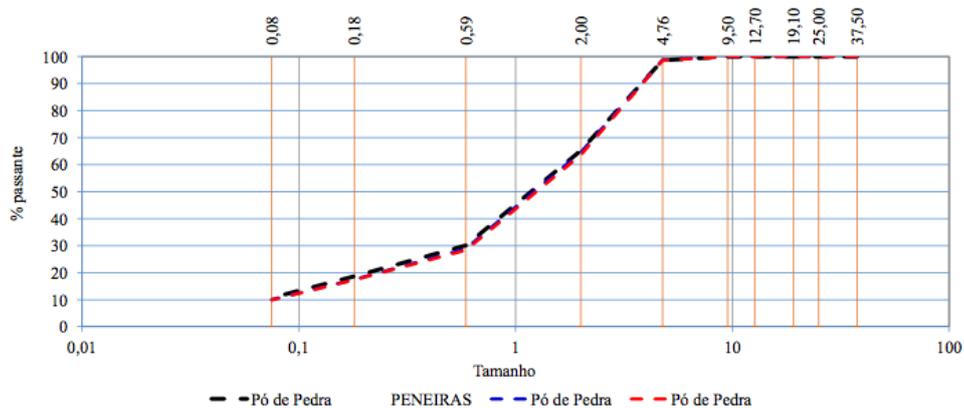
ANEXO L – GRANULOMETRIA PÓ DE PEDRA

ARTERIS T. 27-15 - Análise Granulométrica de Agregados Finos e Graúdos				
Concessionária	Autopista Litoral Sul	Data da Emissão	10/05/2016	Nº Certificado
Construtora:	Latina Manutenção	Data da Coleta	10/05/2016	SJ-037/2016
Rodovia:	BR-101	Data de Recebimento	10/05/2016	Nº Contrato.
Obra:	Contorno viário de Florianópolis			-----
Local:	-			
Outras Informações:	Material coletado do estoque			
Pista:	-			
Usina:	Latina São José			

Ensaio

Materiais

Peneiras (Pol) mm		Pó de Pedra		Pó de Pedra		Pó de Pedra	
		Peso retido acumulado (g)	% Passante encontrada	Peso retido acumulado (g)	% Passante encontrada	Peso retido acumulado (g)	% Passante encontrada
		1155,52		1147,3		1311,03	
1 1/2"	37,5		100,0		100,0		100,0
1"	25,0		100,0		100,0		100,0
3/4"	19,1		100,0		100,0		100,0
1/2"	12,7		100,0		100,0		100,0
3/8"	9,5		100,0		100,0		100,0
Nº 4	4,8	16,26	98,6	14,37	98,7	19,02	98,5
Nº 10	2	402,45	65,2	406,11	64,6	477,32	63,6
Nº 40	0,59	807,65	30,1	816,06	28,9	939,46	28,3
Nº 80	0,18	940,7	18,6	946,87	17,5	1084,02	17,3
Nº 200	0,075	1031,59	10,7	1031,84	10,1	1180,87	9,9



NOTA:

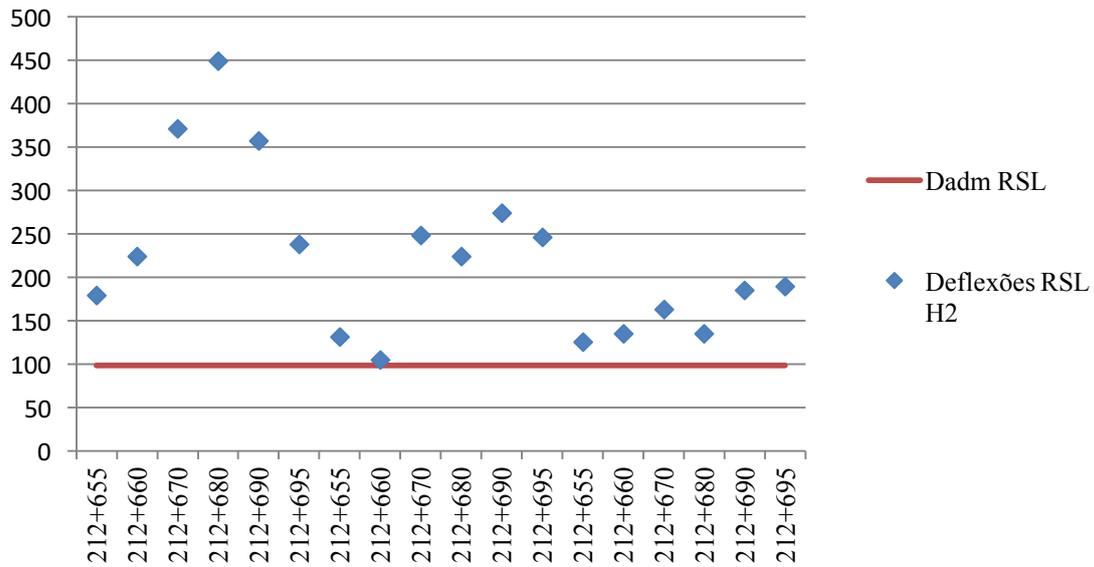
A memória de cálculo esta arquivada no laboratório de São José, disponível para a consulta sempre que for necessário.

São José terça-feira, 10 de maio de 2016

APÊNDICE A – COMPARATIVO ENTRE DEFLEXÕES DE CAMPO E ADMISSÍVEIS

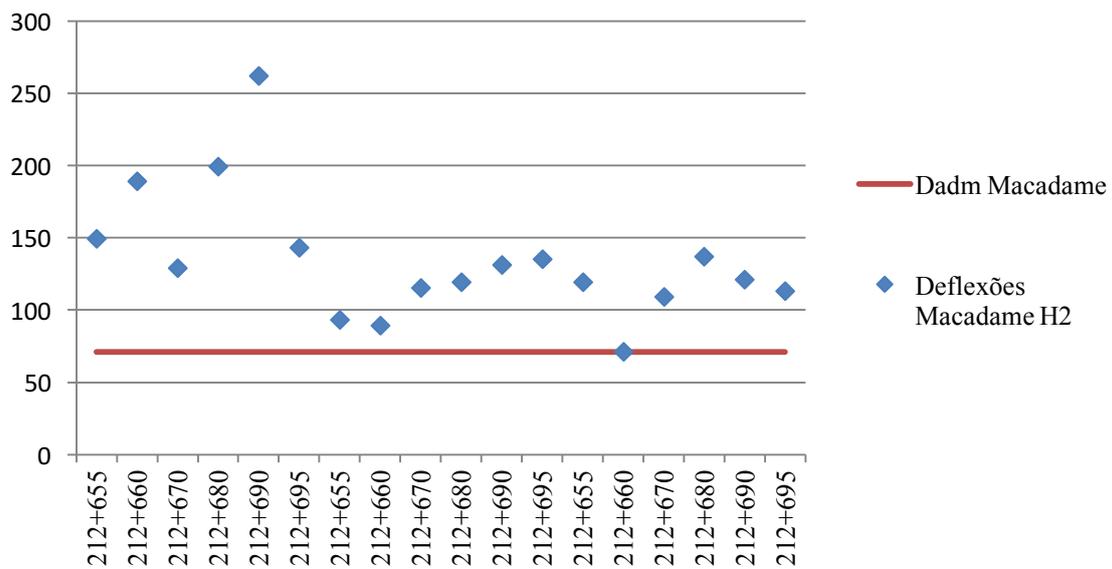
Trecho experimental H2

Figura 62. Comparativo das deflexões RSL H2



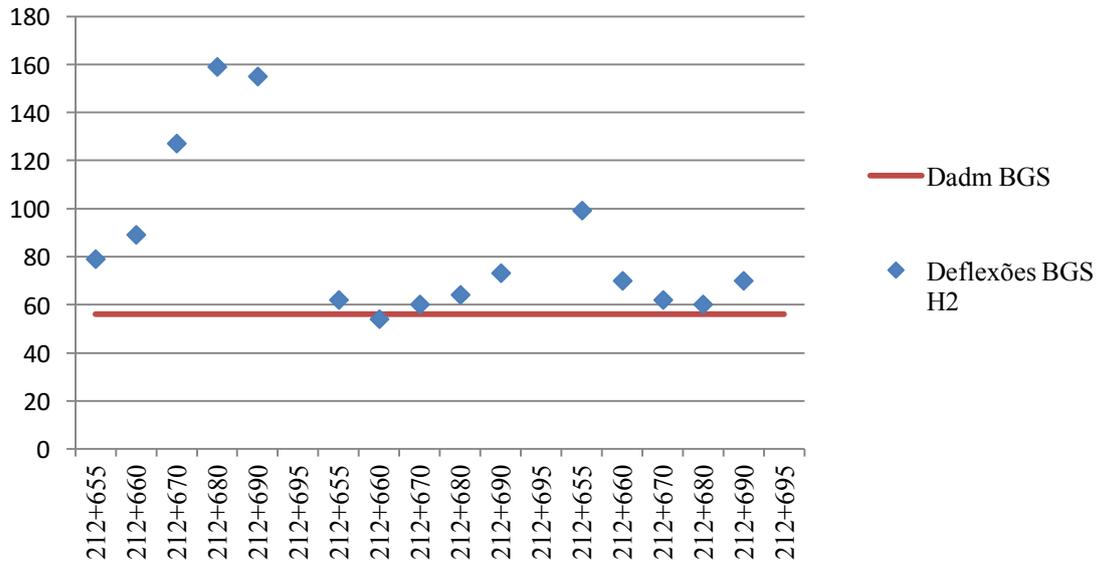
Fonte: Autoria própria.

Figura 63. Comparativo das deflexões macadame H2



Fonte: Autoria própria.

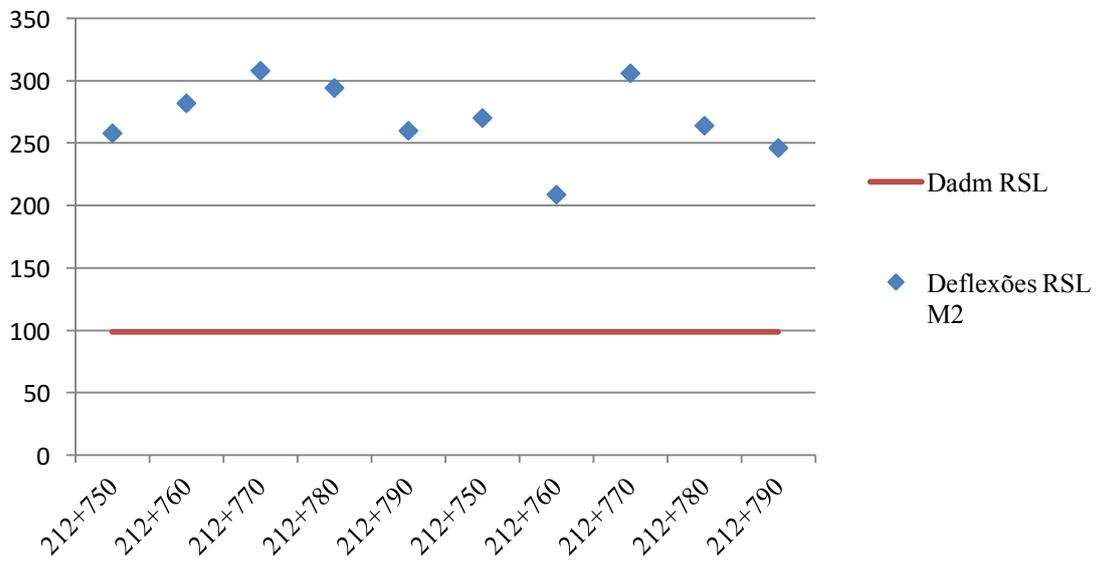
Figura 64. Comparativo das deflexões BGS H2



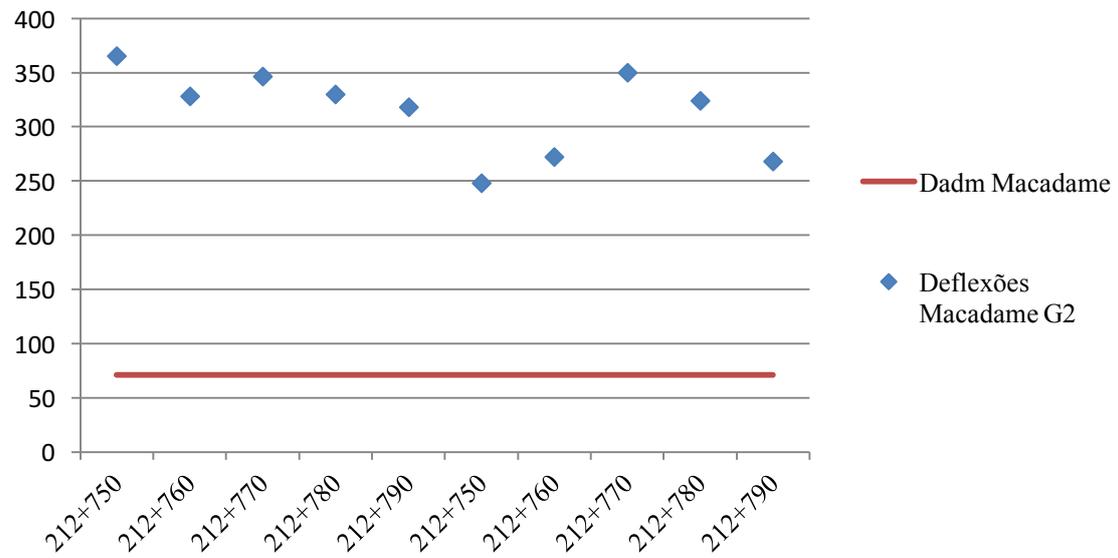
Fonte: Autoria própria

Trecho experimental G2

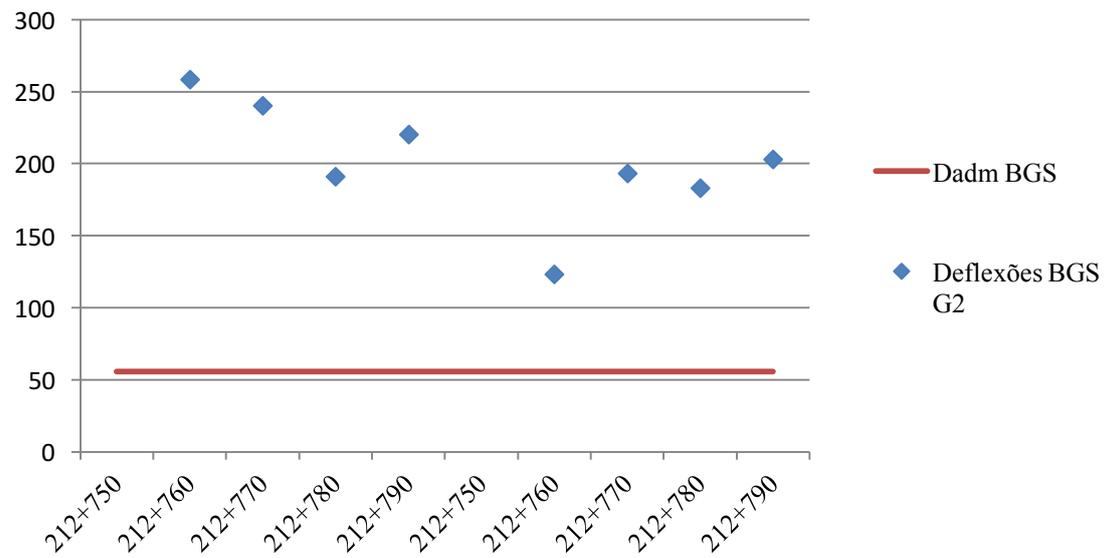
Figura 65. Comparativo das deflexões RSL G2



Fonte: Autoria própria.

Figura 66. Comparativo das deflexões macadame G2

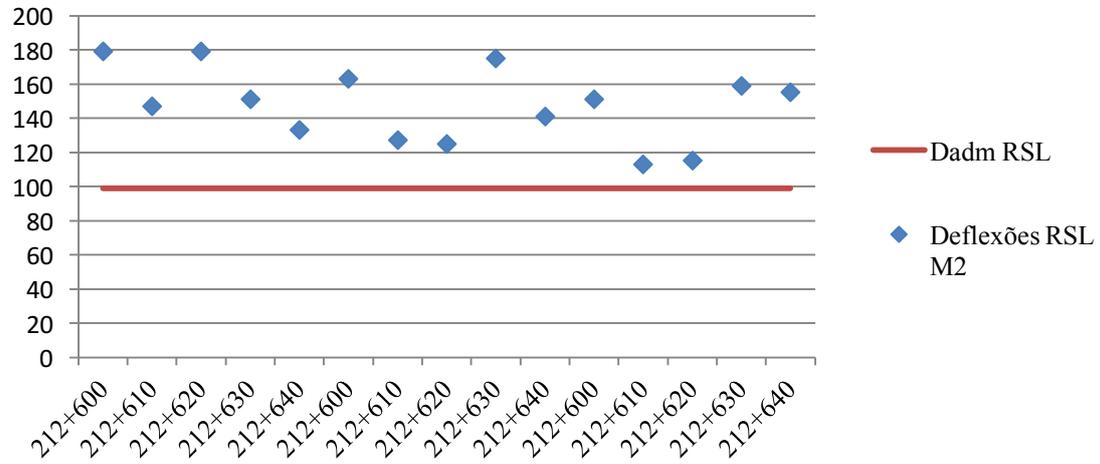
Fonte: Autoria própria.

Figura 67. Comparativo das deflexões BGS G2

Fonte: Autoria própria

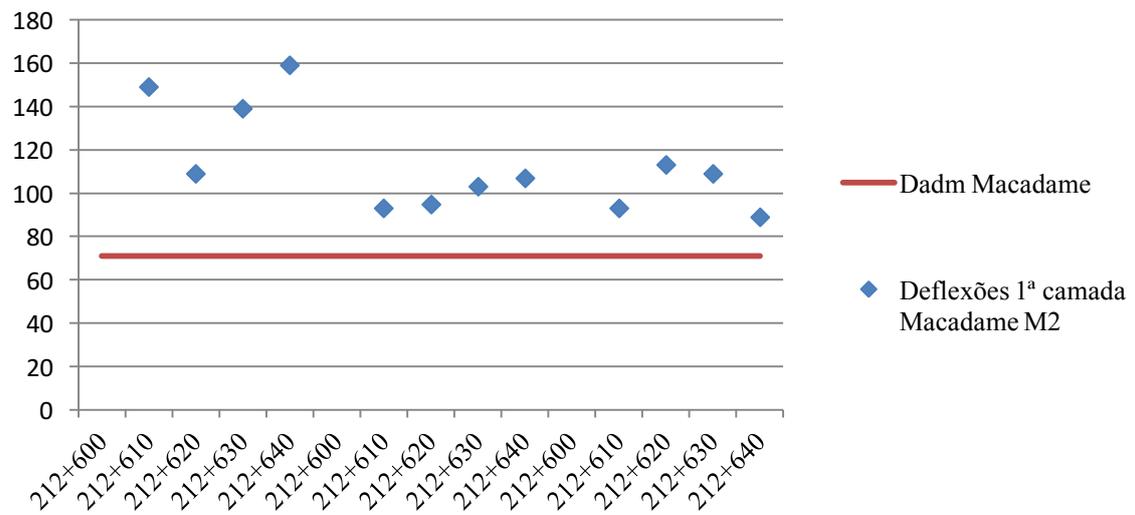
Trecho experimental M2

Figura 68. Comparativo das deflexões RSL M2

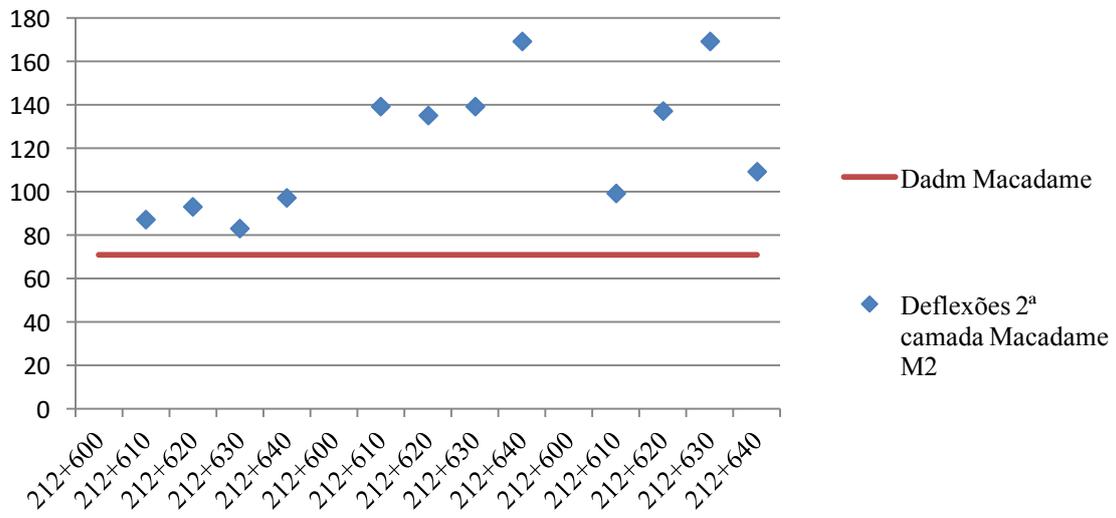


Fonte: Autoria própria.

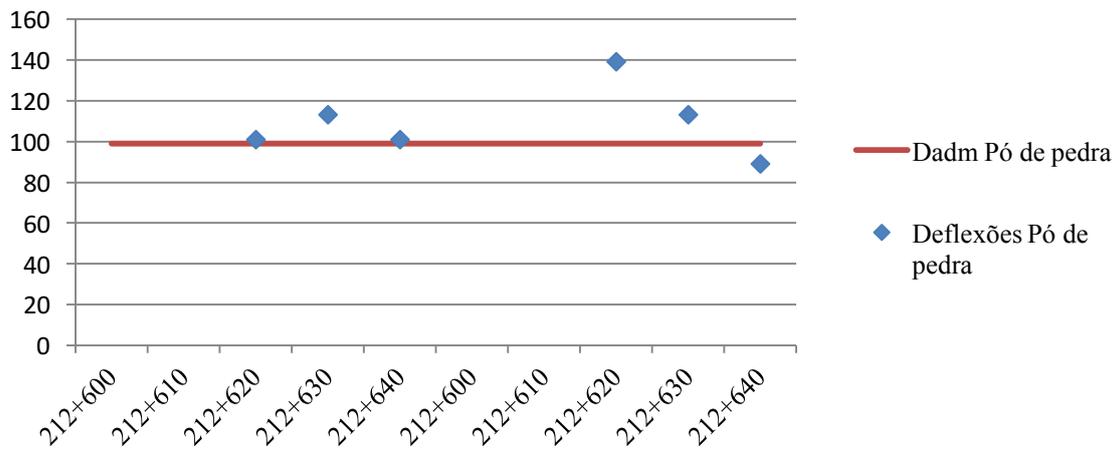
Figura 69. Comparativo das deflexões 1ª camada macadame M2



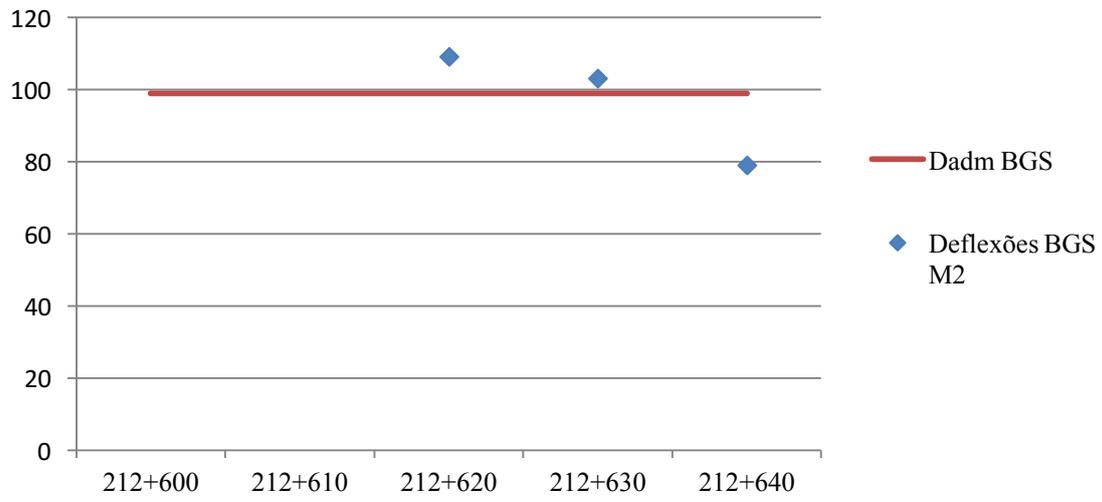
Fonte: Autoria própria.

Figura 70. Comparativo das deflexões 2ª camada macadame M2

Fonte: Autoria própria

Figura 71. Comparativo das deflexões pó de pedra M2

Fonte: Autoria própria.

Figura 72. Comparativo das deflexões BGS M2

Fonte: Autoria própria.

APÊNDICE B – RESULTADOS DAS DEFLEXÕES DE CAMPO CONSIDERANDO O LOTE COMPLETO

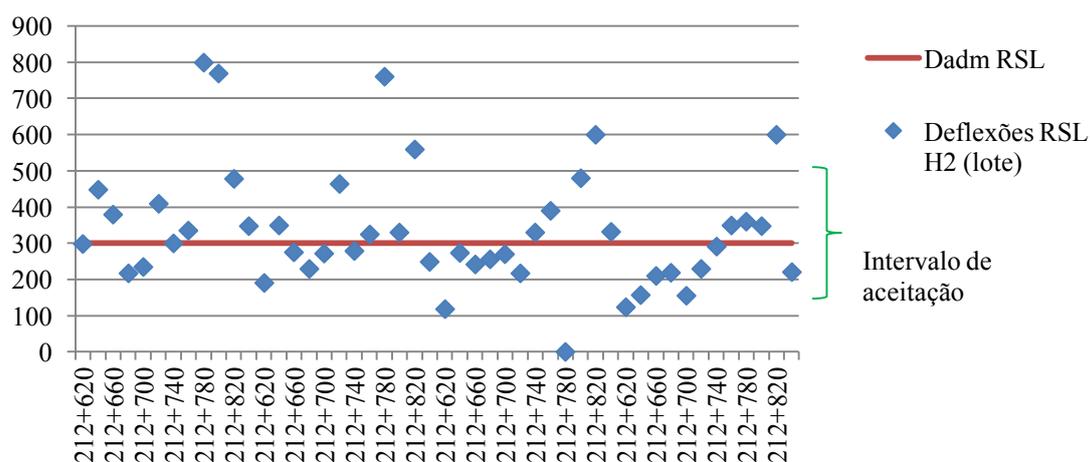
Trecho experimental H2

Quadro 44. Resumo novas deflexões RSL H2 (lote)

ESTACA	Deflexão			
	Faixa 1 BE	Faixa 1 BD	Faixa 2 BE	Faixa 2 BD
212+620	298	192	118	124
212+640	448	350	274	158
212+660	380	276	242	210
212+680	218	230	256	220
212+700	236	272	270	156
212+720	410	464	218	230
212+740	300	280	330	292
212+760	336	326	390	350
212+780	800	760	0	360
212+800	770	330	480	348
212+820	478	560	600	600
212+840	348	250	332	222
Média dos resultados = 262×10^{-2} mm				
Intervalo de aceitação: 169×10^{-2} mm a 501×10^{-2} mm				
Deflexão admissível camada = 300×10^{-2} mm				

Fonte: Autoria própria.

Figura 73. Resumo novas deflexões RSL H2 (lote)



Fonte: Autoria própria.

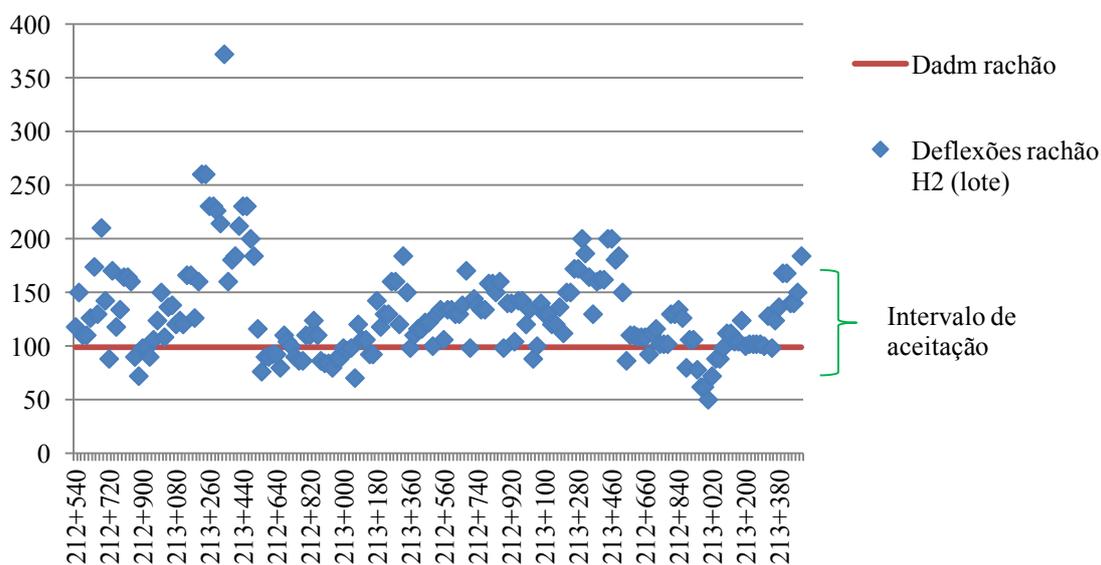
Quadro 45. Resumo novas deflexões rachão H2 (lote)

ESTACA	Deflexão			
	Faixa 1 BE	Faixa 1 BD	Faixa 2 BE	Faixa 2 BD
212+540	118	116	134	150
212+560	150	76	106	86
212+580	110	90	134	110
212+600	110	90	134	110
212+620	126	92	130	108
212+640	174	92	130	108
212+660	130	80	138	108
212+680	210	110	170	92
212+700	142	104	98	112
212+720	88	100	144	116
212+740	170	90	138	102
212+760	118	86	134	102
212+780	134	86	134	102
212+800	164	110	158	130
212+820	164	110	158	130
212+840	160	124	150	134
212+860	90	110	160	126
212+880	72	86	98	80
212+900	98	84	140	106
212+920	98	84	140	106
212+940	90	80	104	78
212+960	106	88	142	62
212+980	124	88	142	62
213+000	150	98	120	50
213+020	108	96	134	72
213+040	136	98	88	88
213+060	138	70	100	88
213+080	120	120	140	98
213+100	124	106	130	112
213+120	120	106	130	112
213+140	166	92	120	104
213+160	166	92	120	104
213+180	126	142	136	124
213+200	160	118	112	100
213+220	260	130	150	102
213+240	260	130	150	102
213+260	230	160	172	102
213+280	230	160	172	102
213+300	226	120	200	100
213+320	214	184	186	128
213+340	372	150	164	98
213+360	160	98	130	124

213+380	180	110	160	136
213+400	184	116	162	168
213+420	212	116	162	168
213+440	230	122	200	140
213+460	230	122	200	140
213+480	200	100	180	150
213+500	184	130	184	184
Média dos resultados = 130×10^{-2} mm				
Intervalo de aceitação: 88×10^{-2} mm a 173×10^{-2} mm				
Deflexão admissível camada = 99×10^{-2} mm				

Fonte: Autoria própria.

Figura 74. Resumo novas deflexões rachão H2 (lote)



Fonte: Autoria própria.

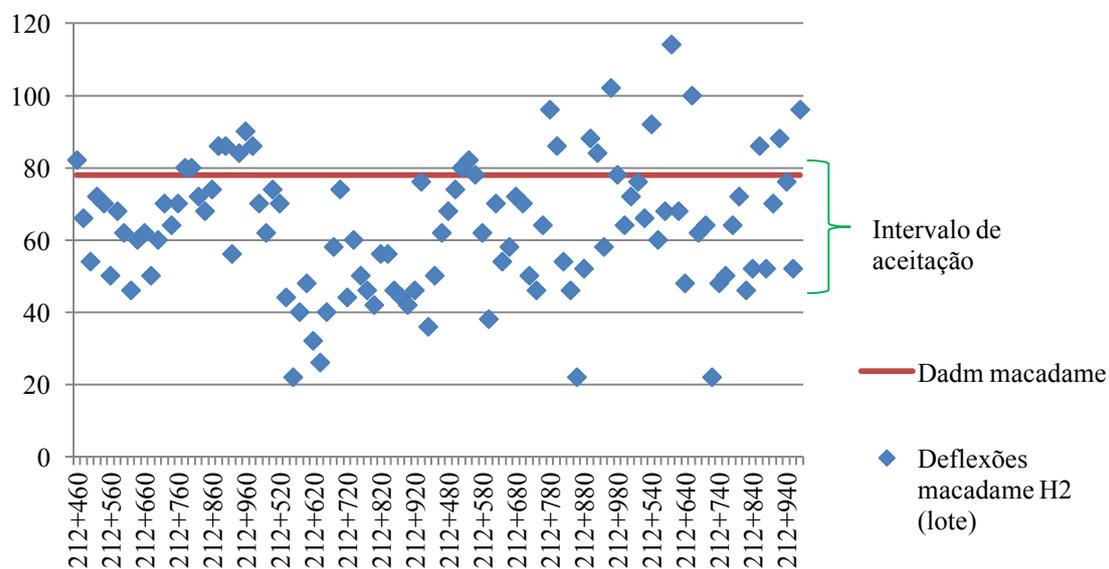
Quadro 46. Resumo novas deflexões macadame H2 (lote)

ESTACA	Deflexão			
	Faixa 1 BE	Faixa 1 BD	Faixa 2 BE	Faixa 2 BD
212+460	82	70	62	64
212+480	66	62	68	72
212+500	54	74	74	76
212+520	72	70	80	66
212+540	70	44	82	92
212+560	50	22	78	60
212+580	68	40	62	68
212+600	62	48	38	114
212+620	46	32	70	68
212+640	60	26	54	48
212+660	62	40	58	100

212+680	50	58	72	62
212+700	60	74	70	64
212+720	70	44	50	22
212+740	64	60	46	48
212+760	70	50	64	50
212+780	80	46	96	64
212+800	80	42	86	72
212+820	72	56	54	46
212+840	68	56	46	52
212+860	74	46	22	86
212+880	86	44	52	52
212+900	86	42	88	70
212+920	56	46	84	88
212+940	84	76	58	76
212+960	90	36	102	52
212+980	86	50	78	96
Média dos resultados = 63×10^{-2} mm				
Intervalo de aceitação: 45×10^{-2} mm a 81×10^{-2} mm				
Deflexão admissível camada = 78×10^{-2} mm				

Fonte: Autoria própria.

Figura 75. Resumo novas deflexões macadame H2 (lote)



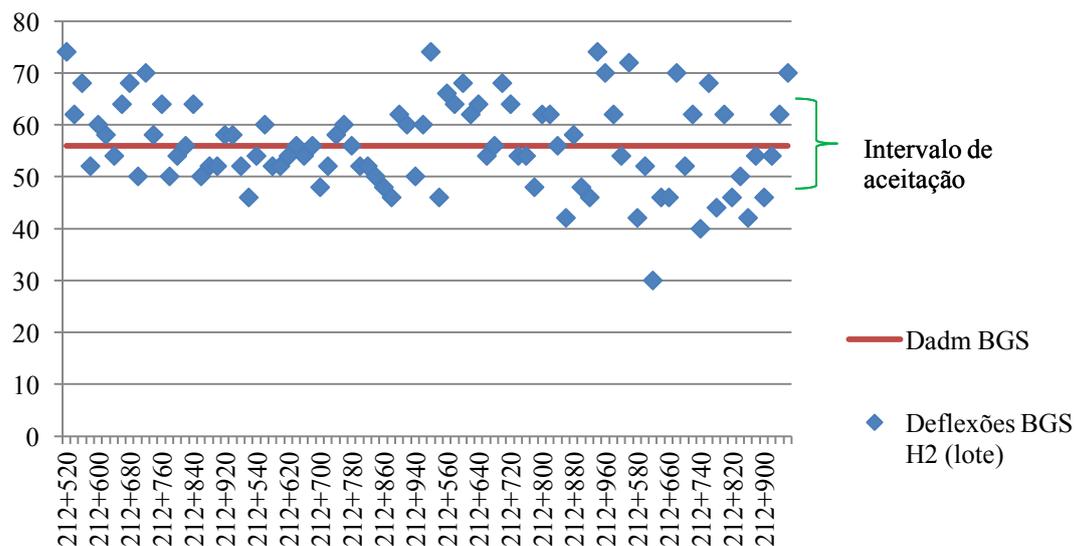
Fonte: Autoria própria.

Quadro 47. Resumo novas deflexões BGS H2 (lote)

ESTACA	Deflexão			
	Faixa 1 BE	Faixa 1 BD	Faixa 2 BE	Faixa 2 BD
212+520	74	46	74	62
212+540	62	54	46	54
212+560	68	60	66	72
212+580	52	52	64	42
212+600	60	52	68	52
212+620	58	54	62	30
212+640	54	56	64	46
212+660	64	54	54	46
212+680	68	56	56	70
212+700	50	48	68	52
212+720	70	52	64	62
212+740	58	58	54	40
212+760	64	60	54	68
212+780	50	56	48	44
212+800	54	52	62	62
212+820	56	52	62	46
212+840	64	50	56	50
212+860	50	48	42	42
212+880	52	46	58	54
212+900	52	62	48	46
212+920	58	60	46	54
212+940	58	50	74	62
212+960	52	60	70	70
Média dos resultados = 56×10^{-2} mm				
Intervalo de aceitação: 48×10^{-2} mm a 65×10^{-2} mm				
Deflexão admissível camada = 56×10^{-2} mm				

Fonte: Autoria própria.

Figura 76. Resumo novas deflexões BGS H2 (lote)



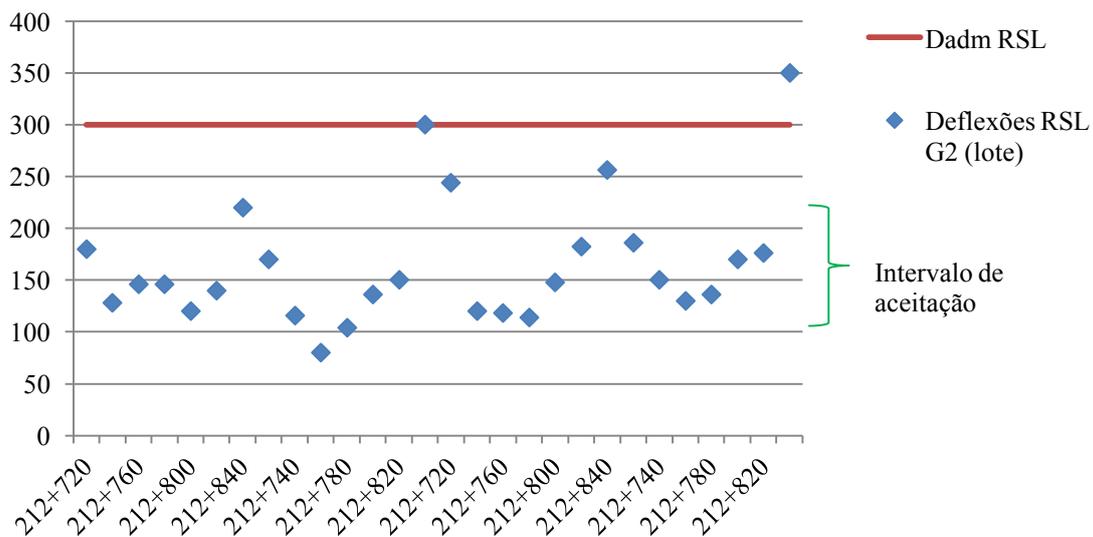
Trecho experimental G2

Quadro 48. Resumo novas deflexões RSL G2 (lote)

ESTACA	Deflexão			
	Faixa 1 BE	Faixa 1 BD	Faixa 2 BE	Faixa 2 BD
212+720	180	170	244	186
212+740	128	116	120	150
212+760	146	80	118	130
212+780	146	104	114	136
212+800	120	136	148	170
212+820	140	150	182	176
212+840	220	300	256	350
Média dos resultados = 165×10^{-2} mm				
Intervalo de aceitação: 104×10^{-2} mm a 226×10^{-2} mm				
Deflexão admissível camada = 300×10^{-2} mm				

Fonte: Autoria própria.

Figura 77. Resumo novas deflexões RSL G2 (lote)



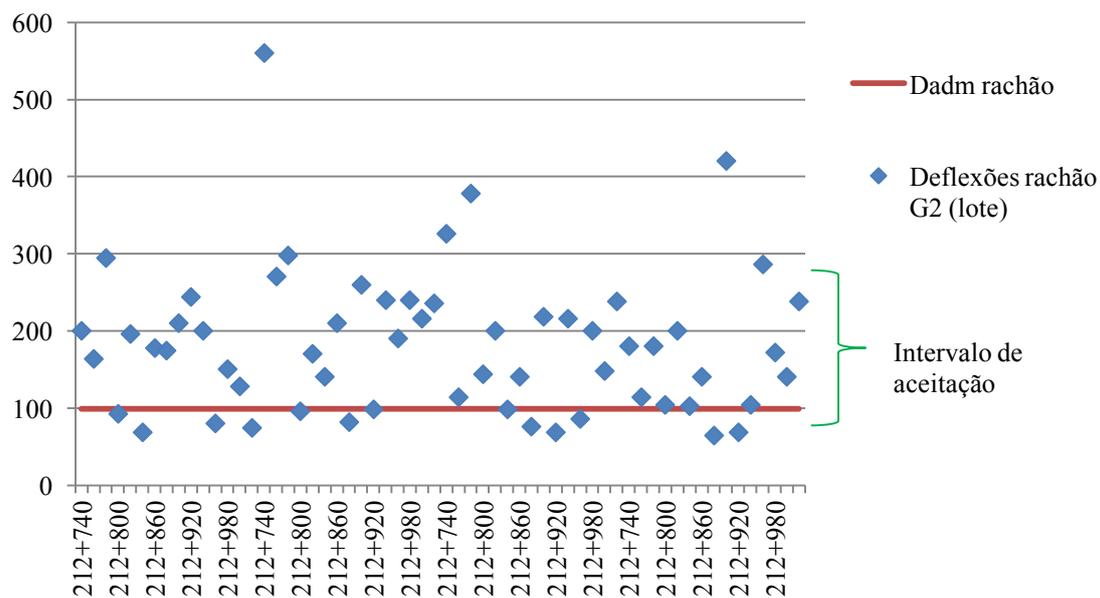
Fonte: Autoria própria.

Quadro 49. Resumo novas deflexões rachão G2 (lote)

ESTACA	Deflexão			
	Faixa 1 BE	Faixa 1 BD	Faixa 2 BE	Faixa 2 BD
212+740	200	560	326	180
212+760	164	270	114	114
212+780	294	298	378	180
212+800	92	96	144	104
212+820	196	170	200	200
212+840	68	140	98	102
212+860	178	210	140	140
212+880	174	82	76	64
212+900	210	260	218	420
212+920	244	98	68	68
212+940	200	240	216	104
212+960	80	190	86	286
212+980	150	240	200	172
213+000	128	216	148	140
213+020	74	236	238	238
Média dos resultados = 182×10^{-2} mm				
Intervalo de aceitação: 89×10^{-2} mm a 275×10^{-2} mm				
Deflexão admissível camada = 99×10^{-2} mm				

Fonte: Autoria própria.

Figura 78. Resumo novas deflexões rachão G2 (lote)



Fonte: Autoria própria.

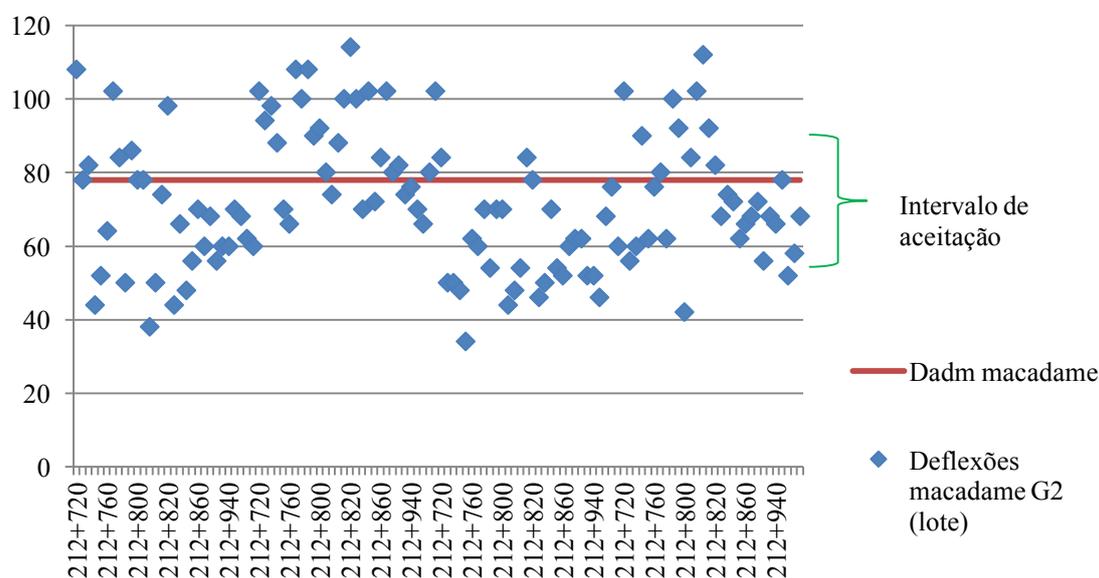
Quadro 50. Resumo novas deflexões macadame G2 (lote)

ESTACA	Deflexão			
	Faixa 1 BE	Faixa 1 BD	Faixa 2 BE	Faixa 2 BD
212+720	108	102	84	102
212+740	78	94	50	56
212+740	82	98	50	60
212+740	44	88	48	90
212+760	52	70	34	62
212+760	64	66	62	76
212+760	102	108	60	80
212+780	84	100	70	62
212+780	50	108	54	100
212+780	86	90	70	92
212+800	78	92	70	42
212+800	78	80	44	84
212+800	38	74	48	102
212+820	50	88	54	112
212+820	74	100	84	92
212+820	98	114	78	82
212+840	44	100	46	68
212+840	66	70	50	74
212+840	48	102	70	72
212+860	56	72	54	62
212+860	70	84	52	66
212+860	60	102	60	68
212+880	68	80	62	72

212+900	56	82	62	56
212+920	60	74	52	68
212+940	60	76	52	66
212+960	70	70	46	78
212+980	68	66	68	52
213+000	62	80	76	58
212+860	60	102	60	68
Média dos resultados = 72×10^{-2} mm				
Intervalo de aceitação: 54×10^{-2} mm a 90×10^{-2} mm				
Deflexão admissível camada = 78×10^{-2} mm				

Fonte: Autoria própria.

Figura 79. Resumo novas deflexões macadame G2 (lote)



Fonte: Autoria própria.

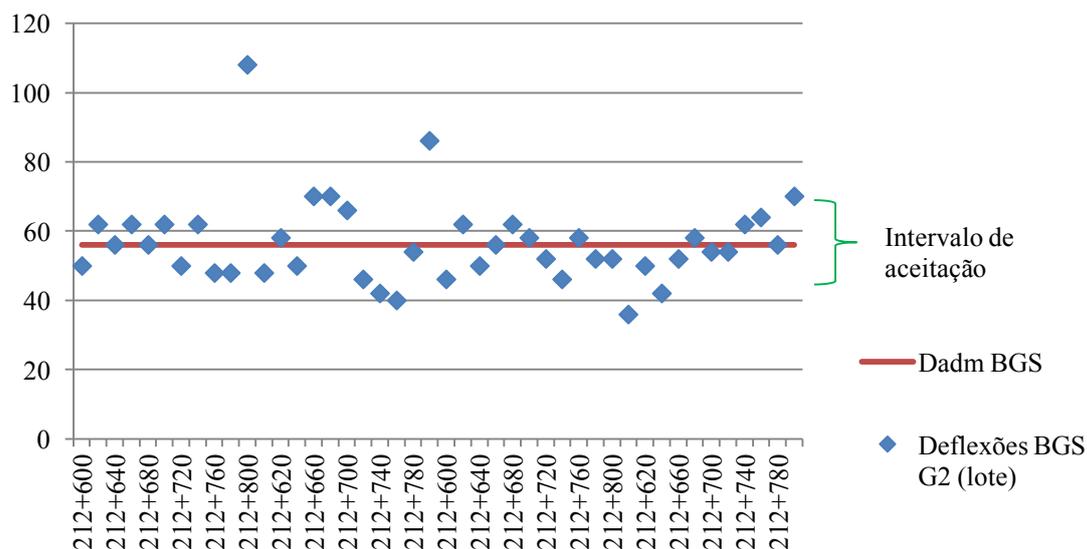
Quadro 51. Resumo novas deflexões BGS G2 (lote)

ESTACA	Deflexão			
	Faixa 1 BE	Faixa 1 BD	Faixa 2 BE	Faixa 2 BD
212+600	50	48	46	36
212+620	62	58	62	50
212+640	56	50	50	42
212+660	62	70	56	52
212+680	56	70	62	58
212+700	62	66	58	54
212+720	50	46	52	54
212+740	62	42	46	62
212+760	48	40	58	64
212+780	48	54	52	56
212+800	108	86	52	70

Média dos resultados = 72×10^{-2} mm
Intervalo de aceitação: 44×10^{-2} mm a 69×10^{-2} mm
Deflexão admissível camada = 56×10^{-2} mm

Fonte: Autoria própria.

Figura 80. Resumo novas deflexões BGS G2 (lote)

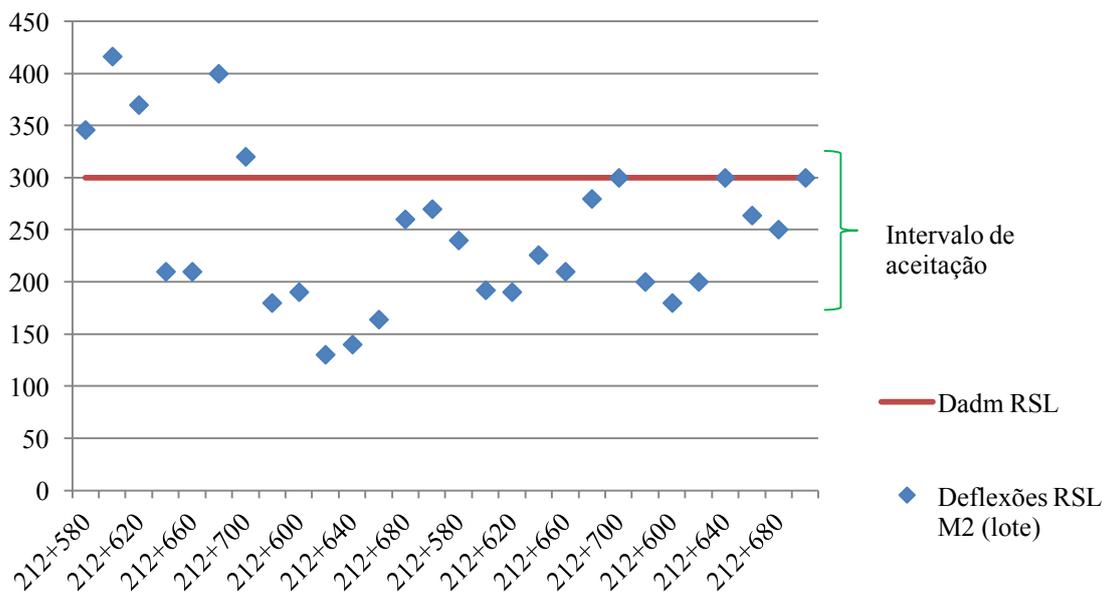


Trecho experimental M2

Quadro 52. Resumo novas deflexões RSL M2 (lote)

ESTACA	Deflexão			
	Faixa 1 BE	Faixa 1 BD	Faixa 2 BE	Faixa 2 BD
212+580	346	180	240	200
212+600	416	190	192	180
212+620	370	130	190	200
212+640	210	140	226	300
212+660	210	164	210	264
212+680	400	260	280	250
212+700	320	270	300	300
Média dos resultados = 165×10^{-2} mm				
Intervalo de aceitação: 173×10^{-2} mm a 323×10^{-2} mm				
Deflexão admissível camada = 300×10^{-2} mm				

Fonte: Autoria própria.

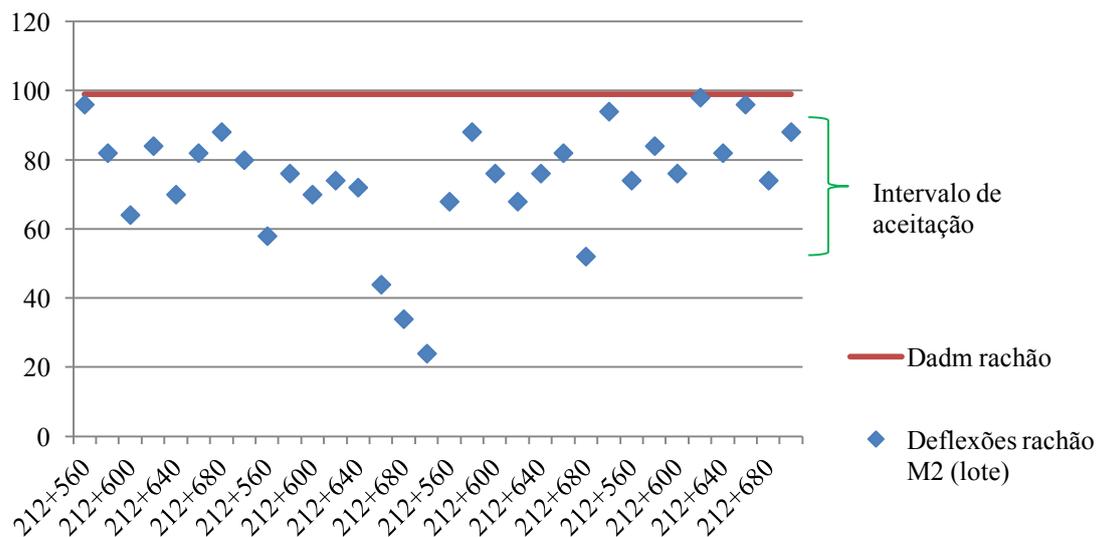
Figura 81. Resumo novas deflexões RSL M2 (lote)

Fonte: Autoria própria.

Quadro 53. Resumo novas deflexões rachão M2 (lote)

ESTACA	Deflexão			
	Faixa 1 BE	Faixa 1 BD	Faixa 2 BE	Faixa 2 BD
212+560	96	58	68	74
212+580	82	76	88	84
212+600	64	70	76	76
212+620	84	74	68	98
212+640	70	72	76	82
212+660	82	44	82	96
212+680	88	34	52	74
212+700	80	24	94	88
Média dos resultados = 74×10^{-2} mm				
Intervalo de aceitação: 57×10^{-2} mm a 91×10^{-2} mm				
Deflexão admissível camada = 99×10^{-2} mm				

Fonte: Autoria própria.

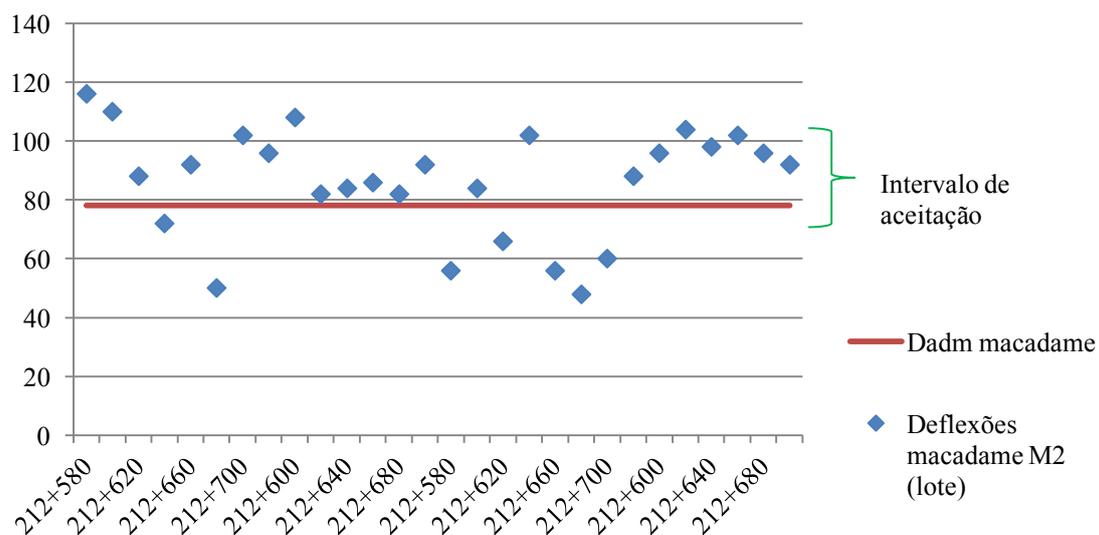
Figura 82. Resumo novas deflexões rachão M2 (lote)

Fonte: Autoria própria.

Quadro 54. Resumo novas deflexões macadame M2 (lote)

ESTACA	Deflexão			
	Faixa 1 BE	Faixa 1 BD	Faixa 2 BE	Faixa 2 BD
212+580	116	96	56	88
212+600	110	108	84	96
212+620	88	82	66	104
212+640	72	84	102	98
212+660	92	86	56	102
212+680	50	82	48	96
212+700	102	92	60	92
Média dos resultados = 86×10^{-2} mm				
Intervalo de aceitação: 67×10^{-2} mm a 105×10^{-2} mm				
Deflexão admissível camada = 78×10^{-2} mm				

Fonte: Autoria própria.

Figura 83. Resumo novas deflexões macadame M2 (lote)

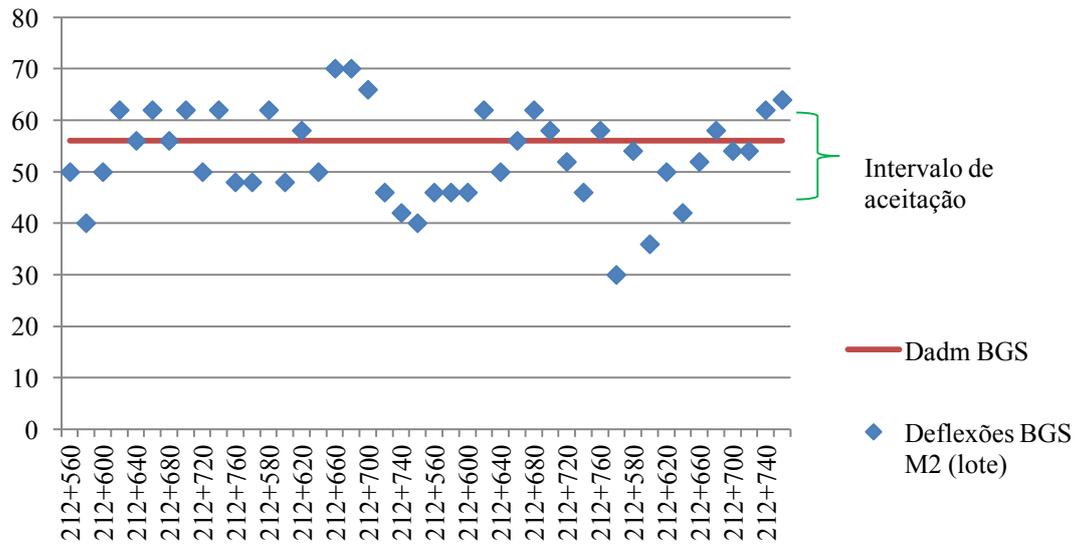
Fonte: Autoria própria.

Quadro 55. Resumo novas deflexões BGS M2 (lote)

ESTACA	Deflexão			
	Faixa 1 BE	Faixa 1 BD	Faixa 2 BE	Faixa 2 BD
212+560	50	48	46	30
212+580	40	62	46	54
212+600	50	48	46	36
212+620	62	58	62	50
212+640	56	50	50	42
212+660	62	70	56	52
212+680	56	70	62	58
212+700	62	66	58	54
212+720	50	46	52	54
212+740	62	42	46	62
212+760	48	40	58	64
Média dos resultados = 53×10^{-2} mm				
Intervalo de aceitação: 44×10^{-2} mm a 62×10^{-2} mm				
Deflexão admissível camada = 56×10^{-2} mm				

Fonte: Autoria própria.

Figura 84. Resumo novas deflexões BGS M2 (lote)



Fonte: Autoria própria.