

**UNIVERSIDADE REGIONAL DO NOROESTE
DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL**

DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA

Curso de Engenharia Civil

Jeancarlo Ribas

**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE UM TRECHO
EXPERIMENTAL DE PAVIMENTO FLEXÍVEL
CONSTRUÍDO COM ASFALTO-BORRACHA NA BR-285/RS**

Ijuí/RS

2010

Jeancarlo Ribas

**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE UM TRECHO
EXPERIMENTAL DE PAVIMENTO FLEXÍVEL
CONSTRUÍDO COM ASFALTO-BORRACHA NA BR-285/RS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil apresentado como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Civil.

Ijuí

2010

FOLHA DE APROVAÇÃO

Trabalho de conclusão de curso defendido e aprovado em sua forma final pelo professor orientador e pelos membros da banca examinadora.

Prof. Luciano Pivoto Specht, Doutor - Orientador
UNIJUÍ/DeTec

Banca Examinadora

Prof. Valdi Henrique Spohr, Mestre
UNIJUÍ/DeTec

2010

AGRADECIMENTOS

Aos senhores José Antônio Echeverria e Luiz Augusto Bassani, engenheiros civis do DNIT de Cruz Alta, que apoiaram e forneceram todos os subsídios técnicos para a implantação deste trecho experimental. Também a empresa TORC Engenharia pela disponibilidade de pessoal e equipamentos para realização dos ensaios.

Aos funcionários do laboratório de engenharia civil da UNIJUÍ, bem como aos colegas Fernando Boeira, Denis Silva e Moacir Soares, pelo auxílio na realização dos ensaios laboratoriais e de campo.

Por fim, agradeço especialmente aos professores José Crippa e Raquel Kohler, pelos ensinamentos e oportunidades fornecidas durante a graduação, e também, ao orientador deste trabalho, professor Luciano Pivoto Specht, pelo incentivo, suporte, e principalmente entusiasmo durante o andamento da pesquisa.

RESUMO

A implantação de sistemas viários modernos, com toda infraestrutura necessária para que o usuário trafegue com segurança e conforto, requer elevados níveis de investimentos financeiros. Como qualquer bem de consumo, os componentes do sistema viário têm uma vida útil limitada e, se deterioram e degradam numa variação não proporcional aos investimentos financeiros destinados à manutenção e reabilitação dos diversos elementos. Os gastos substanciais com manutenção e reconstrução precoce de nossos pavimentos são inaceitáveis, uma vez que podemos dispor de equipamentos de laboratório e de campo que permitam um melhor entendimento dos materiais e de métodos de projeto teórico-empíricos. Desta forma, esta pesquisa traz um estudo de previsão de desempenho de um trecho experimental de pavimento flexível, quanto as principais patologias apresentadas por este método construtivo, sendo elas as deformações permanentes ocorridas nas trilhas de roda, e também a fadiga na superfície do pavimento. As simulações de desempenho foram realizadas através dos softwares M-EPDG e SisPav. Os módulos resilientes das camadas constituintes foram obtidos por meio de retroanálise das bacias deflectométricas coletadas com viga Benkelman. A retroanálise apresentou módulos resilientes considerados satisfatórios para os diferentes revestimentos, e também para o sub-leito, no entanto os módulos das camadas granulares mostraram-se baixos. As medições de ruído demonstraram que neste trecho experimental o Asfalto Borracha é mais ruidoso, se comparado ao CBUQ Convencional. Quanto a defeitos de afundamento nas trilhas de roda, observaram-se valores bastante elevados, os quais não eram esperados, devido à estrutura robusta do pavimento. No entanto, os módulos resilientes baixos das camadas granulares, acusados na retroanálise, podem explicar o fenômeno, sendo respaldados pelas medições realizadas *in situ*, onde em aproximadamente seis meses de vida, o trecho já apresenta em torno de 60 % do limite de ATR para um pavimento ser considerado rompido. Quanto às análises de fadiga na superfície do pavimento, observaram-se também, valores elevados nas simulações, sendo a vida de fadiga consumida em aproximadamente 12 meses, porém, as medições *in situ* não comprovaram as simulações, estando o pavimento intacto quando ao trincamento.

Palavras-chave: desempenho de pavimentos, trecho experimental, retroanálise

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: SEÇÃO TRANSVERSAL TÍPIA DE UM PAVIMENTO FLEXÍVEL.....	22
FIGURA 2: TENSÕES, DEFORMAÇÕES E DESLOCAMENTOS EM UM PAVIMENTO ASFÁLTICO	25
FIGURA 3: DEFEITOS EM PAVIMENTOS FLEXÍVEIS	33
FIGURA 4: DEFORMAÇÃO PERMANENTE NA TRILHA DE RODA.....	34
FIGURA 5: DEFORMAÇÃO DEVIDO À APLICAÇÃO DE CARGA ESTÁTICA.....	35
FIGURA 6: DEFORMAÇÃO DEVIDO À APLICAÇÃO DE CARGA PULSANTE (VEÍCULO).....	35
FIGURA 7: FASES DA VIDA DE UM PAVIMENTO.....	38
FIGURA 8: DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES EM UMA CAMADA DE BASE	43
FIGURA 9: FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE DIMENSIONAMENTO DO GUIA DA AASHTO/2002..	46
FIGURA 10: TELA DO SOFTWARE M-EPDG DA AASHTO	46
FIGURA 11: TELA DO SOFTWARE SISPAV	48
FIGURA 12: EXTENSÃO E CONDIÇÕES BR - 285/RS	51
FIGURA 13: LOCALIZAÇÃO DO TRECHO EXPERIMENTAL	52
FIGURA 14: ESQUEMA DE CONSTRUÇÃO DO TRECHO EXPERIMENTAL	54
FIGURA 15: PERFIL TOPOGRÁFICO DA PISTA DE ROLAMENTO.....	56
FIGURA 16 - 1 A 36: RELATÓRIO FOTOGRÁFICO DA EXECUÇÃO DO TRECHO EXPERIMENTAL	62
FIGURA 17: EXTRAÇÃO DE AMOSTRAS DOS REVESTIMENTOS	64
FIGURA 18: APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS NO SOFTWARE SISPAV	66
FIGURA 19: MR DOS REVESTIMENTOS.....	68
FIGURA 20: MR DAS CAMADAS GRANULARES.....	68
FIGURA 21: MR DO SUB-LEITO.....	69
FIGURA 22: GRANULOMETRIA POR PENEIRAMENTO.....	74
FIGURA 23: RESULTADO PARA O ENSAIO DE PROCTOR	74
FIGURA 24: CURVA DE PRESSÃO X PENETRAÇÃO - IS/BR.....	75
FIGURA 25: LIMITES DE LIQUIDEZ.....	77
FIGURA 26: GRANULOMETRIA POR PENEIRAMENTO.....	79
FIGURA 27: RESULTADOS PARA OS ENSAIOS DE PROCTOR.....	80
FIGURA 28: CURVA DE PRESSÃO X PENETRAÇÃO - IS/BR.....	81
FIGURA 29: NÚMERO "N" ACUMULADO - USA/E.....	84
FIGURA 30: NÚMERO "N" ACUMULADO - AASHTO	84
FIGURA 31: TRELIÇA DE ALUMÍNIO PARA MEDIÇÃO DE ATR	85

FIGURA 32: EVOLUÇÃO DE ATR	87
FIGURA 33: INFLUÊNCIA DOS DIVERSOS FATORES NO RUÍDO	88
FIGURA 34: VALORES DE SPBI PARA OS DIFERENTES REVESTIMENTOS TESTADOS	89
FIGURA 35: EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NO ENSAIO DE MANEIRA DE AREIA	90
FIGURA 36: MACROTEXTURA DOS DIFERENTES TIPOS DE REVESTIMENTOS	90
FIGURA 37: EVOLUÇÃO DE ATR - M-EPDG	93
FIGURA 38: FADIGA NA SUPERFÍCIE DO PAVIMENTO - M-EPDG.....	93
FIGURA 39: EVOLUÇÃO DE ATR - SISPAV.....	94
FIGURA 40: FADIGA NA SUPERFÍCIE DO PAVIMENTO - SISPAV	94

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: CAMADAS CONSTITUINTES DO TRECHO EXPERIMENTAL.....	63
TABELA 2: BACIAS DE DEFLEXÕES OBTIDAS ATRAVÉS DA VIGA BENKELMAN	65
TABELA 3: MÓDULOS RESILIENTES RETROANALISADOS	67
TABELA 4: RESUMO DOS MÓDULOS RESILIENTES RETROANALISADOS	69
TABELA 5: PROPRIEDADES DOS REVESTIMENTOS	70
TABELA 6: CORPOS DE PROVA EXTRAÍDOS DO PAVIMENTO.....	71
TABELA 7: CARACTERIZAÇÃO DA BASE.....	75
TABELA 8: LEVANTAMENTO DEFLECTOMÉTRICO DAS CAMADAS GRANULARES.....	76
TABELA 9: CARACTERIZAÇÃO DO SUB-LEITO	82
TABELA 10: ATR VERIFICADO NO TRECHO EXPERIMENTAL.....	86
TABELA 11: RESUMO DOS RESULTADOS DA MACROTEXTURA.....	91
TABELA 12: ESTRUTURA UTILIZADA PARA AS SIMULAÇÕES DE DESEMPENHO	92

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

AASHTO: *AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS*

AB: ASFALTO-BORRACHA

ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS

ANIP: ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE PNEUMÁTICOS

ASTM: *AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS*

ATR: AFUNDAMENTO NA TRILHA DE RODA

CBR: *CALIFORNIA BEARING RATIO*

CBR: *CALIFORNIA BEARING RATIO*

CBQ: CONCRETO BETUMINOSO QUENADO A QUENTE

CNT: CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE

CRM: *CRUMB RUBBER MODIFIED*

CV: COEFICIENTE DE VARIAÇÃO

DAER/RS: DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO RS

DNER: DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM

DNIT: DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES

DP: DESVIO PADRÃO

FRN: FUNDO RODOVIÁRIO NACIONAL

FWD: *FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER*

HS: ALTURA DE AREIA

IBGE: INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA

IP: ÍNDICE DE PLASTICIDADE

ISC: ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA

LL: LIMITE DE LIQUIDEZ

LP: LIMITE DE PLASTICIDADE

MEAS: MASSA ESPECÍFICA APARENTE SECA

M-EPDG: *MECHANISTIC EMPIRICAL PAVEMENT DESIGN GUIDE*

MR: MÓDULO RESILIENTE

NCHRP: *NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM*

PCI: *PAVEMENT CONDITION INDEX*

PIN: PLANO DE INTEGRAÇÃO NACIONAL

PNV: PLANO NACIONAL DE VIAÇÃO

SAM: *STRESS ABSORBING MEMBRANE*

SAMI: *STRESS ABSORBING MEMBRANE INTERLAYER*

SPBI: *STATISTICAL PASS-BY INDEX*

TE: TRILHA EXTERNA

TI: TRILHA INTERNA

UNIT: UNIDADE DE INFRAESTRUTURA TERRESTRE

USACE: *UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS*

VB: VIGA BENKELMAN

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1 TEMA DA PESQUISA	13
1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA	13
1.3 FORMULAÇÃO DA QUESTÃO DE ESTUDO	13
1.4 OBJETIVOS	13
1.4.1 <i>Objetivo Geral</i>	13
1.4.2 <i>Objetivos Específicos</i>	13
1.5 JUSTIFICATIVAS.....	14
1.6 SISTEMATIZAÇÃO DO RELATÓRIO.....	19
2. REVISÃO DE LITERATURA	20
2.1 ESTRUTURA E MATERIAIS DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS.....	20
2.2 MISTURAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS COM BORRACHA.....	24
2.3 ANÁLISE ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS	26
2.3.1 <i>Retroanálise</i>	29
2.4 DESEMPENHO DE PAVIMENTOS.....	32
2.4.1 <i>Mecanismos de Degradação Estrutural de Pavimentos Flexíveis</i>	33
2.4.1.1 <i>Deformação Permanente na Trilha de Roda</i>	34
2.4.1.2 <i>Trincamento por Fadiga</i>	37
2.4.1.3 <i>Ruptura por Reflexão de Trincas</i>	39
2.4.1.4 <i>Outros Mecanismos de Degradação</i>	40
2.4.2 <i>Efeitos do Clima em Pavimentos Flexíveis</i>	41
2.4.2.1 <i>Variação da Temperatura</i>	42
2.4.2.2 <i>Ação Prejudicial da Água</i>	43
2.4.3 <i>Modelos de Previsão de Desempenho</i>	44
2.4.3.1 <i>Método do Guia da AASHTO/2002</i>	46
2.4.3.2 <i>SisPav (Franco, 2007)</i>	49
3. METODOLOGIA.....	51
3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA	51
3.2 DESCRIÇÃO DO LOCAL DO ESTUDO.....	51
3.3 PLANEJAMENTO DA PESQUISA	53
3.3.1 <i>Execução do Trecho Experimental</i>	53
3.3.2 <i>Análises de Previsão de Desempenho</i>	56
3.3.3 <i>Levantamentos de Desempenho e Contagem de Tráfego</i>	56
3.4 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS.....	56
4. RESULTADOS.....	57
4.1 TRECHO EXPERIMENTAL	57
4.1.1 <i>Topografia</i>	57
4.1.2 <i>Execução do Trecho Experimental</i>	58

4.1.3	<i>Estrutura do Pavimento</i>	64
4.1.3.1	<i>Retroanálise</i>	65
4.1.4	<i>Caracterização dos Materiais</i>	71
4.1.4.1	<i>Revestimentos</i>	71
4.1.4.2	<i>Camadas Granulares</i>	73
4.1.4.3	<i>Sub-leito</i>	78
4.2	TRÁFEGO.....	84
4.3	MONITORAMENTO.....	86
4.3.1	<i>Afundamento na Trilha de Roda</i>	86
4.3.2	<i>Ruído nos Diferentes Revestimentos</i>	88
4.3.3	<i>Macrotextura dos Diferentes Revestimentos</i>	90
4.4	SIMULAÇÕES DE DESEMPENHO	92
4.4.1	<i>Software M-EPDG</i>	93
4.4.1.1	<i>Afundamento na Trilha de Roda</i>	93
4.4.1.2	<i>Trincamento por Fadiga</i>	94
4.4.2	<i>Software SisPav</i>	95
4.4.2.1	<i>Afundamento na Trilha de Roda</i>	95
4.4.2.2	<i>Trincamento por Fadiga</i>	95
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	96
5.1	CONCLUSÕES	96
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	98
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99
	ANEXO A	105
	ANEXO B	119

1. INTRODUÇÃO

1.1 Tema da Pesquisa

O tema da pesquisa é infraestrutura do transporte rodoviário.

1.2 Delimitação do Tema

Esta pesquisa limita-se a estudar as avaliações de desempenho em pavimentos flexíveis.

1.3 Formulação da Questão de Estudo

Quais as condições locais para construção e provável desempenho de um trecho experimental de asfalto-borracha?

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo Geral

Acompanhar a execução de trecho experimental construído com asfalto-borracha na BR-285, obtendo os parâmetros das misturas e características dos materiais que possibilitem estimar o provável desempenho das estruturas do pavimento.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Documentar a execução de trecho experimental construído com asfalto-borracha na BR-285, por meio de fotos e ensaios de caracterização dos materiais.
- Obter os parâmetros volumétricos, mecânicos e de mistura dos materiais utilizados, bem como determinar a condição estrutural pelo ensaio de viga Benkelman de todas as camadas do pavimento;

- Determinar os módulos resilientes de todas as camadas do pavimento, através do processo de retroanálise das bacias deflectométricas;
- Realizar análises de previsão de desempenho através dos softwares M-EPDG (*Mechanistic Empirical Pavement Design Guide*) e SisPav;
- Executar levantamentos de danos, relativos a afundamentos na trilha de roda e fadiga na superfície do pavimento;
- Realizar medição de ruído nos diferentes tipos de revestimento, através do SPBI (*Statistical Pass-By Index*);
- Efetuar levantamento do tráfego na rodovia, por meio de contagem manual volumétrica classificada (por tipo de veículo e configuração dos veículos pesados).

1.5 Justificativas

A utilização da malha viária como meio de comunicação entre os povos, remete aos primórdios da civilização. A industrialização brasileira a partir da década de 30 trouxe a necessidade de maior integração do mercado interno e de maiores investimentos no transporte rodoviário. Aos poucos, foi sendo implantada uma malha rodoviária nacional, conectando os estados brasileiros as áreas industriais da região Sudeste, onde o crescimento se deu da costa leste em direção ao interior (MENDONÇA, 2010).

No entanto, apenas a partir dos anos 50, durante o governo de Juscelino Kubitschek, houve a consolidação das rodovias como principal forma de transporte na estruturação do espaço brasileiro, devido à implantação da indústria automobilística, do baixo preço dos combustíveis derivados de petróleo e também da crescente importância do automóvel no cotidiano. Deste ponto em diante, as rodovias passaram a ser quase exclusividade dos investimentos em transportes terrestres no país.

Na década de 1970 foi criado o Plano de Integração Nacional (PIN) direcionado à implantação de grandes rodovias, como parte de um projeto mais amplo dos governos

militares de ocupação do Centro-Oeste e de colonização da Amazônia. Fizeram parte do PIN a construção de grandes estradas como a Transamazônica, Perimetral Norte, Cuiabá - Santarém, Cuiabá - Porto Velho e outras, além da concessão de incentivos e financiamentos governamentais para projetos agrominerais.

Até este período, a malha rodoviária teve grande desenvolvimento e atendeu em parte a necessidade de integração nacional no seu primeiro período de expansão, contando com fonte financeira própria para a ampliação e manutenção das rodovias, através do Fundo Rodoviário Nacional (FRN).

Com a crise do petróleo na década de 1970 e a extinção do FRN em 1988, a política rodoviarista ficou profundamente abalada. A elevação do preço mundial do petróleo foi um duro golpe neste sistema de transporte. O petróleo não é apenas a matéria-prima dos derivados como a gasolina e óleo diesel, mas também a matéria-prima para a fabricação do asfalto que pavimenta as estradas. Outro problema é que a crise do sistema rodoviário não veio acompanhada do desenvolvimento significativo de outros meios de transporte, capaz de suprir a precariedade em que se encontra a maior parte das rodovias brasileiras.

A partir de 1990, diversas estradas passaram a ser administradas por empresas particulares, através do sistema de concessões. As concessionárias em troca de promoverem melhorias nas estradas (manutenção da pavimentação, sinalização, socorro médico e mecânico) arrecadam o pedágio. Os pedágios tornaram-se cada vez mais elevados e os postos de arrecadação multiplicaram-se pelos trechos das estradas entregues à concessão privada.

Em 2009, a malha rodoviária Brasileira tinha a extensão de 1.634.071 km, sendo que apenas aproximadamente 13% eram pavimentadas. Das pavimentadas cerca de 13000 km já estavam concedidas à exploração privada (CNT, 2009).

O processo de privatização das rodovias aconteceu devido o governo não possuir condições financeiras para ampliar a rede de transporte rodoviário ou para manter certo nível de qualidade. O sistema mostra-se impactante, porém democrático, pois através da cobrança de pedágios, só pagam pelas rodovias as pessoas que as utilizam e nos momentos em que estão, de fato, circulando por elas, mantendo as estradas bem conservadas, sem buracos e,

consequentemente, mais seguras. Com isso, ganham as empresas e os motoristas que acabam por economizar na manutenção dos veículos (VIANNA, 2007).

Obviamente que o pedágio não é a única, e pode não ser a melhor maneira de conservar as rodovias, no entanto mostra-se eficiente, principalmente num país como o Brasil, onde a administração das verbas arrecadadas pelo governo não é bem planejada e nem sempre cumpre sua destinação.

Segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) a produção de grãos no Brasil em 2010 deve atingir um novo recorde: mais de 140 milhões de toneladas. Esta safra para chegar a diferentes pontos do país e aos portos de exportação, enfrenta uma série de obstáculos, o principal está relacionado ao sistema de transporte.

O maior volume de carga escoada no Brasil é formado por *commodities*, como minérios, grãos, cimento, entre outras que precisam da combinação de mais de um meio de transporte para que se complete o ciclo que vai da produção ao consumo. São produtos de baixo valor agregado e, neste caso, é indispensável que todo sistema seja eficiente, para que o custo final dos produtos mantenha-se competitivo. O problema é que a maior parte do escoamento é feito por rodovias que, para médias e longas distâncias, constituem o sistema mais caro. Num país da dimensão do Brasil e com vasta extensão litorânea, outros meios seriam mais adequados ao transporte de carga e de passageiros, como ferrovias e hidrovias (MENDONÇA, 2010).

As rodovias são adequadas para o transporte em distâncias menores. Apresentam a vantagem de retirar a mercadoria no próprio local e transportá-la até o ponto desejado, desta forma, o transporte rodoviário não depende de várias operações de carga e descarga, até o produto chegar ao destino final, como acontece com os outros meios.

A implantação de sistemas viários modernos, pavimentados e com toda infraestrutura necessária para que o usuário trafegue com segurança e conforto, requer elevados níveis de investimentos financeiros. Como qualquer bem de consumo, os componentes do sistema viário têm uma vida útil limitada e, se deterioram e degradam numa variação exponencial e inversamente proporcional aos níveis de investimentos financeiros destinados à manutenção e reabilitação dos diversos componentes (MERIGUI *et al*, 2007).

Dentre as grandes preocupações que afligem os técnicos rodoviários, encontra-se a forma de operar de maneira segura e aceitável o sistema viário, racionalizando os recursos financeiros disponíveis nos órgãos públicos.

O grande desafio é então, administrar a falta de recursos, combinada com a demanda crescente do tráfego de veículos leves e pesados associados à variabilidade das propriedades mecânicas, reológicas e hidráulicas dos materiais disponíveis. Ainda é necessário administrar as constantes mudanças nas políticas rodoviárias bem como a escassez de informações relativas aos diversos serviços executados (MERIGUI *et al*, 2007, p. 3).

Segundo Bernucci *et al* (2008), os gastos substanciais com manutenção e reconstrução precoce de nossos pavimentos são inaceitáveis, uma vez que podemos dispor de equipamentos de laboratório e de campo que permitam um melhor entendimento dos materiais e de métodos de projeto teórico-empíricos.

A degradação dos pavimentos está associada a várias patologias, dentre elas: deformações permanentes excessivas, fissuras de fadiga e de retração térmica e desagregação. As duas primeiras estão mais relacionadas com o tráfego atuante e a estrutura do pavimento, enquanto as duas últimas com as características dos materiais utilizados e as condições climáticas atuantes (SPECHT, 2004).

Com o aumento do custo dos materiais de construção, entre eles os derivados de petróleo, a redução da disponibilidade de recursos naturais, aliado às novas exigências/limitações ambientais impostas na construção e manutenção de pavimentos, é imprescindível que os pesquisadores procurem materiais que possam apresentar bom desempenho, com custo relativamente baixo (BOCK, 2009, p. 11).

Durante as últimas décadas, tem-se desenvolvido diversas soluções para o prolongamento da vida útil dos pavimentos asfálticos, uma delas é a utilização de polímeros nas misturas, que elevam a resistência à fadiga e reduzem as deformações permanentes (NÚÑEZ, 2007).

Uma das formas de inclusão de polímeros em pavimentos flexíveis consiste na incorporação de borracha moída de pneu no cimento asfáltico, em condições controladas de temperatura, tempo, velocidade de rotação do misturador, granulometria e tipo da borracha (ODA, 2000; FAXINA, 2002; SPECHT, 2004).

Indiscutivelmente, o pneu é um elemento fundamental e insubstituível, principalmente em países onde o transporte rodoviário predomina. No Brasil, mais de 59 milhões de pneus foram produzidos em 2008, segundo levantamento da Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos (ANIP). Ainda que o tempo de sua vida útil dure cerca de sete anos, em algum momento ele será inservível (CONRADO, 2009).

Os pneus são produtos de degradação lenta e, quando abandonados em locais impróprios, oferecem riscos à saúde pública e danos ao meio ambiente, pois podem liberar substâncias tóxicas na atmosfera, transformarem-se em criadouros de mosquitos transmissores de doenças, entre outros fatores (CONRADO, 2009).

Além de ecologicamente corretas, misturas com asfalto-borracha (AB) vêm se mostrando eficientes na minimização dos principais defeitos encontrados nos pavimentos flexíveis. Conrado (2009) explica que a melhoria é causada, principalmente, pela elasticidade da borracha e pela redução do envelhecimento do produto em longo prazo. Pode-se obter também avanços, no que diz respeito a recapeamento de pavimentos, em termos de retardamento de reflexão de trincas, comparando-se a revestimentos construídos com ligante tradicional.

Segundo Pinheiro e Soares (2005), há mais de 40 anos, os Estados Unidos e vários países da Europa vêm adicionando borracha moída de pneu em ligantes asfálticos, buscando misturas mais flexíveis, com maior resistência ao envelhecimento e menor susceptibilidade térmica, trazendo melhores condições de rolamento durante a vida de serviço do pavimento.

Com base nos fatores descritos anteriormente, esta pesquisa traz um estudo da aplicação e do desempenho de um trecho experimental construído com asfalto-borracha, no estado do Rio Grande do Sul, com parceria entre o Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (DNIT), através da unidade de Cruz Alta, a empresa TORC Engenharia e a UNIJUÍ, visando contribuir para melhoria da técnica de pavimentação brasileira. A

conservação do sistema viário nacional, devido a sua importância socioeconômica, e a necessidade de proporcionar uma adequada infraestrutura viária a sociedade, aliado a preservação do meio ambiente, são parâmetros que norteiam este trabalho.

1.6 Sistematização do Relatório

O relatório da pesquisa está organizado da seguinte forma:

1º Capítulo: apresenta o tema da pesquisa e sua delimitação, a formulação da questão de estudo, o objetivo geral e os objetivos específicos a serem alcançados ao final deste trabalho, além de uma justificativa demonstrando a abrangência e importância do tema.

2º Capítulo: Aborda a revisão da literatura, subdividido em itens, onde são acometidos os seguintes temas:

- Estrutura e Materiais de Pavimentos Flexíveis
- Análise Estrutural de Pavimentos
- Misturas Asfálticas Modificadas com Borracha
- Desempenho de Pavimentos

3º Capítulo: trata da metodologia empregada para obtenção dos resultados, descrevendo o local de estudo, a forma de execução do trecho experimental, os ensaios laboratoriais realizados e os equipamentos utilizados, bem como os procedimentos relativos às análises de previsão de desempenho e medidas *in situ*.

4º Capítulo: debate os resultados obtidos relativos à execução do trecho experimental bem como sobre as análises de previsão de desempenho do trecho experimental.

5º Capítulo: apresenta as conclusões do trabalho, juntamente com sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Estrutura e Materiais de Pavimentos Flexíveis

De acordo com a ABNT NBR 7207 (1982), o pavimento é uma estrutura construída após a terraplenagem e destinada economicamente e simultaneamente em seu conjunto a:

- Resistir e distribuir ao subleito os esforços verticais produzidos pelo tráfego;
- Melhorar as condições de rolamento quanto à comodidade e segurança;
- Resistir aos esforços horizontais que nele atuam tornando mais durável a superfície de rolamento.

Bernucci *et al* (2008, p. 9) registrou que:

[...] pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplenagem, 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.

O documento “Manual de Pavimentação” do Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (DNIT) (2006) descreve os pavimentos flexíveis como sendo um tipo de estrutura constituída de uma ou mais camadas de espessura finita, assente sobre um semi-espaço infinito, cujo revestimento é do tipo betuminoso, onde o dimensionamento é comandado pela resistência do subleito.

Yoder e Witzack (1975), explicam que pavimento flexível é aquele em que as deformações, até certo limite, não levam ao rompimento. E dimensionado normalmente a compressão e a tração na flexão, provocada pelo aparecimento das bacias de deformação sob as rodas dos veículos, que levam a estrutura a deformações permanentes e ao rompimento por

fadiga. Em um pavimento flexível, o dimensionamento é comandado pela resistência do subleito.

O revestimento asfáltico pode ser composto por camada de rolamento - em contato direto com as rodas dos veículos e por camadas intermediárias ou de ligação, por vezes denominadas de *binder*. Dependendo do tráfego e dos materiais disponíveis, pode-se ter ausência de algumas camadas. As camadas da estrutura repousam sobre o subleito, ou seja, a plataforma da estrada terminada após a conclusão dos cortes e aterros.

A estrutura de pavimento é concebida para receber e transmitir esforços. Para que funcione adequadamente, todas as peças que a compõe, devem trabalhar a deformações compatíveis com sua natureza e capacidade de suporte, isto é, de modo que não ocorram processos de ruptura prematura nos materiais que constituem as camadas do pavimento.

As cargas que solicitam um pavimento são transmitidas por meio das rodas pneumáticas dos veículos. A área de contato entre os pneus e o pavimento tem a forma elíptica, e a pressão exercida tem uma distribuição parabólica, com a pressão máxima exercida no centro da roda. As pressões de contato com o pavimento são aproximadamente iguais a pressão interna dos pneus, sendo a diferença desprezível para efeitos de cálculo (SENÇO, 1997).

Cada uma das camadas do pavimento possui uma ou mais funções específicas, sendo que o conjunto das mesmas deve proporcionar aos veículos as condições adequadas de suporte e rolamento em qualquer condição climática. Uma seção transversal típica de um pavimento compreende as seguintes camadas com seus peculiares materiais de construção (SENÇO, 1997; BALBO, 2007; BERNARDINI *et al*, 2008):

- Subleito: É o terreno de fundação do pavimento, geralmente descrito como a superfície pós-terraplenagem, com espessura média considerada para o dimensionamento de um metro e meio de profundidade, devido às pressões de contato serem decrescentes com o aumento da profundidade. O subleito será constituído de material natural consolidado, por exemplo, nos cortes do corpo estradal, ou por um material transportado e compactado no caso dos aterros;

- Regularização do subleito: É uma camada de espessura irregular, construída sobre o subleito no intuito de conformá-lo transversal e longitudinalmente, geralmente utilizada para regularizar a plataforma de estradas de terra que serão pavimentadas;
- Reforço do Subleito: É uma camada de espessura constante, construída com materiais de maior nobreza comparando-se a regularização do subleito, tendo função de camada suplementar do subleito, contribuindo também na absorção e distribuição das tensões oriundas das camadas superiores. Tipicamente um solo argiloso de qualidades superiores a do subleito e da regularização;
- Sub-base: Camada complementar à base. Deve ser usada quando não for aconselhável executar a base diretamente sobre o leito regularizado ou sobre o reforço, por circunstâncias técnico-econômicas, também prevenindo o bombeamento do solo do subleito para a camada de base. Os materiais típicos de construção são os mesmos abaixo citados para as bases. Esta camada pode ser usada para regularizar a espessura da base;
- Base: Camada destinada a resistir e distribuir ao subleito, os esforços oriundos do tráfego e sobre a qual se construirá o revestimento. Podem ser divididas em dois grupos: bases granulares (não tem coesão, não resistem à tração, diluem as tensões de compressão principalmente devido a sua espessura) e bases coesivas (diluem as tensões de compressão também devido a sua rigidez, provocando tensões de tração em sua face inferior). As bases podem ser constituídas por solo estabilizado naturalmente, misturas de solos e agregados (solo-brita), brita graduada, brita graduada tratada com cimento, concreto compactado com rolo, solo estabilizado quimicamente com cimento ou betume, etc;
- Revestimento: É a camada tanto quanto possível impermeável, que recebe diretamente a ação do rolamento dos veículos, destinada econômica e simultaneamente a melhorar as condições do rolamento quanto ao conforto e segurança, e também a resistir aos esforços horizontais que nele atuam, tornando mais durável a superfície de rolamento, sendo resistente ao desgaste. Também chamada de capa de rolamento ou camada de desgaste. Dentre as misturas que podem compor a

camada de revestimento, destacam-se o concreto asfáltico usinado a quente (CBUQ), lama asfáltica, micro-concreto asfáltico, pré-misturado a frio, pré-misturado a quente e tratamentos superficiais simples, duplos e triplos;

- Acostamento: Parte da plataforma contígua à pista de rolamentos, destinado ao estacionamento de veículos, ao trânsito em caso de emergência e ao suporte lateral do pavimento.

Na figura 1, Senso (1997, p. 16) ilustra uma seção típica de pavimento flexível.

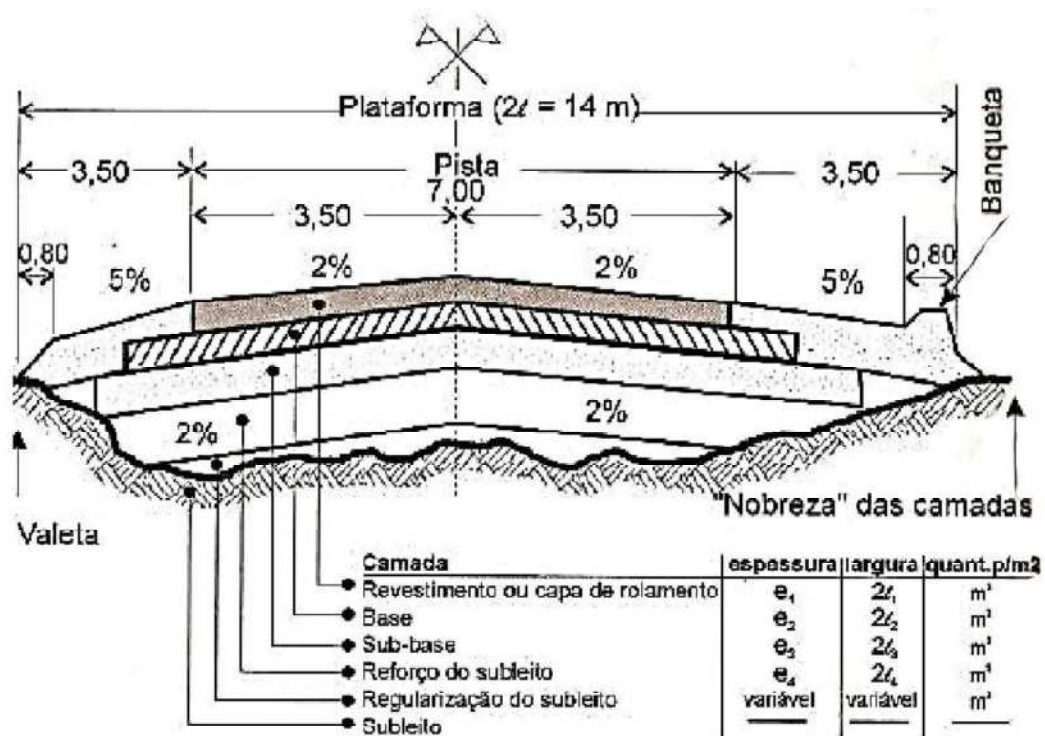


Figura 1: Seção transversal típica de um pavimento flexível.

Fonte: Senso, 1997.

2.2 Misturas Asfálticas Modificadas com Borracha

Um revestimento asfáltico pode ter sua durabilidade incrementada com a utilização de ligantes asfálticos de melhor qualidade. Para melhorar as propriedades físicas, mecânicas e químicas dos cimentos asfálticos, podem ser adicionados produtos (aditivos e modificadores) como agentes rejuvenescedores, polímeros (SBR, SBS, EVA), e também borracha de pneus moída.

A borracha proporciona aumento da flexibilidade e da resistência aos raios ultravioletas, tornando a mistura asfáltica mais resistente ao envelhecimento, ao aparecimento e propagação de trincas e à deformação permanente. Além disso, quando utilizada uma curva granulométrica adequada, reduz o nível de ruído causado pelo fluxo de veículos e auxilia na drenagem em dias de chuva. Pode-se dizer que uma pista com asfalto-borracha proporciona maior conforto, economia e segurança aos usuários, além do desempenho e da durabilidade serem superiores aos de uma pista construída com asfalto convencional (EDEL, 2005).

Diversas pesquisas têm verificado os benefícios da adição de materiais poliméricos aos ligantes asfálticos. As propriedades esperadas com adição destes materiais são a redução da suscetibilidade térmica e aumento da ductilidade, proporcionando estabilidade em altas temperaturas e reduzindo o risco de fratura em baixas temperaturas, também podendo contribuir para o aumento da resistência ao intemperismo e uma melhor adesão ligante/agregado (SPECHT, 2004).

As aplicações típicas do asfalto-borracha são tanto em pavimentos novos quanto em restaurações. O ligante é empregado em praticamente todas as utilizações comuns a ligantes asfálticos, entretanto seus benefícios são mais evidentes quando utilizados em SAM (*Stress Absorbing Membrane*), em SAMI (*Stress Absorbing Membrane Interlayer*) ou em CBUQ, utilizado para recuperação de pavimentos com fissuração excessiva.

Segundo Bertollo *et al* (2002) existem dois métodos de incorporação dos pneus nas misturas asfálticas. No processo úmido são adicionadas partículas finas de borracha ao cimento asfáltico, produzindo um novo tipo de ligante denominado asfalto-borracha. No processo seco, partículas de borracha substituem parte dos agregados pétreos na mistura. Após a adição do ligante, formam um produto denominado concreto asfáltico modificado com

adição de borracha. Estas misturas podem conter aditivos ou modificadores adicionais como diluentes, óleos, cales, etc.

No processo seco, os grânulos da borracha representam de 0,5 a 3,0 % da massa do agregado, enquanto que no processo úmido, o pó de pneu representa aproximadamente 15 % da massa do ligante ou menos que 1,5 % da massa da mistura. O processo seco utiliza, em média, 2 a 4 vezes mais CRM (*Crumb Rubber Modified*) que o processo úmido (SPECHT, 2004).

A reciclagem de pneus envolve um ciclo que compreende a coleta, transporte, trituração e separação de seus componentes (borracha, aço e lona). O desmonte dos pneus pode ser feito de várias maneiras, incluindo o cisalhamento mecânico da borracha à temperatura ambiente, o congelamento do material e posterior cisalhamento e o processo de extrusão com o uso de aditivos, transformando sucatas em matérias-primas que serão direcionadas ao mercado (BERTOLLO *et al*, 2002).

A incorporação de borracha reciclada em pavimentos asfálticos se destaca pelo potencial de consumo de pneus inservíveis, mostrando-se como um promissor destino para os pneus velhos - parte importante dos resíduos sólidos que poluem o ambiente. Estima-se que cada quilômetro pavimentado com asfalto-borracha consuma entre 500 e 1000 pneus. Portanto, além de contribuir para o melhoramento das propriedades dos revestimentos asfálticos, o emprego de borracha reciclada também corrobora com a preservação do meio ambiente.

2.3 Análise Estrutural de Pavimentos Flexíveis

Bernucci *et al* (2008) observa que, principalmente a partir da década de 1970, houve maior utilização de métodos de dimensionamento de pavimentos que buscaram compatibilizar as ações solicitantes do tráfego com a capacidade dos materiais por meio de análise estrutural de sistemas em camadas.

Para a solução de problemas estruturais, por métodos numéricos ou analíticos é necessário que se definam basicamente: a geometria do problema, as condições de contorno (carga e deslocamento) e as propriedades dos materiais, geralmente determinadas em laboratório (ALLEN E HAISLER, 1985, *apud* BERNUCCI *et al*, 2008).

Segundo Franco (2007, p. 23), “a estrutura de um pavimento asfáltico é representada por um meio estratificado, submetido a um carregamento superficial distribuído em uma área circular podendo ser modelada por meio da teoria da elasticidade”. A figura 2 apresenta a forma mais comum de representação de um pavimento e as principais deformações e deslocamentos atuantes no interior da estrutura.

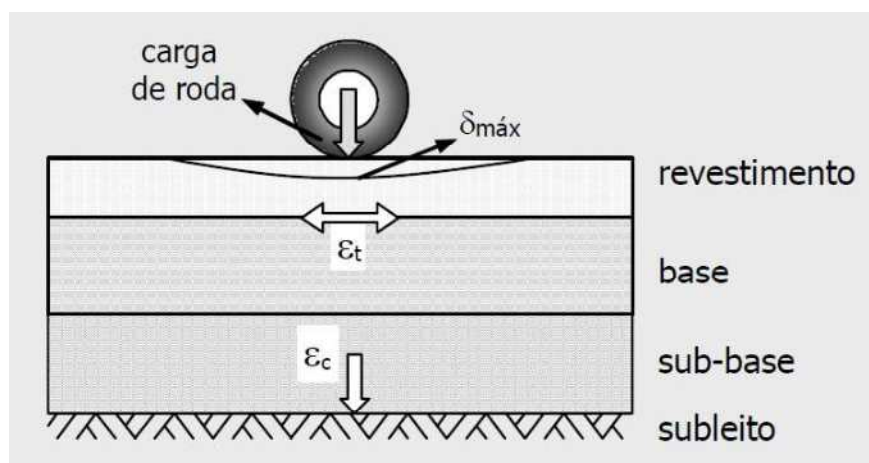


Figura 2: Tensões, deformações e deslocamentos em um pavimento asfáltico.

Fonte: FRANCO, 2007.

A partir da caracterização da estrutura, incluídas as espessuras das camadas, os módulos de resiliência e os coeficientes de Poisson dos diversos materiais; e da composição do tráfego atuante, a resposta do pavimento pode ser estimada via cálculo das tensões, deformações e deslocamentos gerados na estrutura. A teoria da elasticidade é largamente

utilizada como ferramenta para o cálculo dessas tensões, deformações e deslocamentos e os métodos atualmente em uso, consideram os materiais segundo dois comportamentos tensão-deformação distintos, sendo eles: comportamento elástico linear e comportamento elástico-não linear.

Balbo (2007) defende a teoria de sistemas de camadas elásticas para a análise mais completa e detalhada das estruturas de um pavimento, porque permite a determinação de estados de deformações e tensões em vários pontos das camadas e, desta maneira, possibilita a aplicação dos modelos de degradação por fadiga ou deformação plástica dos materiais.

Boussinesq formulou em 1885 um conjunto de equações para o cálculo de tensões e deformações em um meio semi-infinito, linear, elástico, homogêneo e isotrópico submetido a um carregamento pontual. A partir da teoria de Boussinesq, Burmister apresentou em 1943 um método para determinar tensões e deformações em sistemas de duas e três camadas. (BALBO, 2007).

Os modelos que utilizam a solução de Burmister resolvem problemas de elasticidade linear em sistemas de multicamadas e contínuos, com carga distribuída numa área circular e considerando, ainda, as seguintes hipóteses (MEDINA, 1997):

- Os materiais são elásticos lineares, isotrópicos e homogêneos; a lei de Hooke é válida e o módulo de compressão é semelhante ao módulo de tração;
- As camadas não têm peso;
- As camadas são ilimitadas na direção horizontal;
- Todas as camadas possuem uma espessura finita, à exceção da camada inferior que é considerada semi-infinita;
- A superfície da camada superior não está sujeita a tensões fora da área carregada;
- Na área carregada ocorrem apenas tensões normais;

- A carga aplicada é considerada estática, uniformemente distribuída em toda a área circular de contato;
- Em grandes profundidades as tensões e deformações são nulas;
- As condições de aderência na interface das camadas podem variar de totalmente aderida para lisa ou sem aderência.

Muitos métodos de dimensionamento consideram a solução pela elasticidade linear, apesar do comportamento da maioria dos materiais de pavimentação sob carregamento repetido ser comprovadamente elástico não linear, como é o caso dos materiais granulares e dos solos finos. A escolha pela solução da elasticidade linear se faz pelos seguintes motivos (MOTTA, 1991):

- É comum admitir um modelo elástico linear para as misturas asfálticas, para uma determinada temperatura;
- A teoria da elasticidade linear tem sido a base para a maior parte das aplicações práticas, podendo ser utilizada com um grau de confiança razoável, principalmente quando o pavimento possui espessas camadas asfálticas ou camadas cimentadas;
- Os parâmetros necessários para a análise podem ser facilmente obtidos com os recursos disponíveis em laboratórios de solos existentes no Brasil.

O método dos elementos finitos possui interesse especial nos problemas de elasticidade não linear. Nos pavimentos asfálticos que possuem camadas granulares espessas, a consideração da não linearidade é essencial (MEDINA e MOTTA, 2005).

Teoricamente, o método dos elementos finitos realiza uma melhor modelagem do comportamento elástico não linear, apesar dos materiais serem considerados homogêneos, o módulo de resiliência pode assumir valores diferentes em cada um dos elementos da malha em função do estado de tensões, o que não é possível na análise elástica de múltiplas camadas (FRANCO, 2007).

2.3.1 Retroanálise

A retroanálise é um processo que permite a obtenção dos módulos de resiliência (M_r) das camadas do pavimento e subleito. Esta determinação é feita a partir das bacias deflectométricas que o pavimento apresenta quando submetido ao carregamento externo, que é simulado através de ensaios não destrutivos, podendo utilizar-se equipamentos como a viga Benkelman, universalmente difundida ou o *Falling Weight Deflectometer* (FWD), instrumento mais sofisticado capaz de obter determinações mais precisas (VILLELA e MARCON, 2001).

O objetivo principal da retroanálise é fornecer as propriedades das camadas do pavimento *in situ*, dados estes que são utilizados na manutenção e/ou restauração das características aceitáveis do pavimento (VILLELA e MARCON, 2001).

Segundo Nóbrega, a retroanálise é realizada com o objetivo de obterem-se os módulos de resiliência dos materiais na condição em que se encontram no campo e também minimizar o número de sondagens para determinação das espessuras e coletas de amostras para determinação dos parâmetros desejados, que são de difícil reprodução em laboratório, além de serem onerosas perigosas e demoradas.

Os métodos usuais de dimensionamento de pavimentos foram desenvolvidos de forma empírica, tendo como principal desvantagem a limitação do seu uso, podendo ser utilizados apenas em casos similares ao do seu desenvolvimento. Com o surgimento dos programas computacionais, o dimensionamento passou a ser baseado na teoria da elasticidade, onde os principais parâmetros necessários ao cálculo são o módulo de resiliência e o coeficiente de Poisson (MEDINA, 1997).

Segundo Souza (200x) os materiais utilizados em pavimentação, tendem a uma estabilização das deformações após diversas aplicações de carga. Ou seja, as deformações decorrentes do carregamento repetido tendem a se tornar recuperáveis ou elásticas, e por isso, o material pode ser considerado como tendo um comportamento linear sobre certas condições. Desta forma, o M_r é a razão entre a tensão aplicada e a deformação recuperável correspondente.

De acordo com Nóbrega (2007), o módulo de resiliência pode ser determinado em laboratório, através do ensaio triaxial dinâmico (solos) e de compressão diametral (misturas asfálticas, materiais cimentados) e também analiticamente, através de retroanálise a partir das bacias deflectométricas obtidas sob a superfície do pavimento.

O coeficiente de Poisson define a relação entre as deformações específicas radiais (horizontais) e axiais (verticais) dos materiais. Sua influência nos valores das tensões e deformações calculadas é pequena, salvo no caso das deformações radiais, as quais lhe são proporcionais. Na maioria das vezes este valor é adotado para cada material quando são usados programas de cálculo de tensões e deformações em pavimentos. Segundo MAINA *et al* (2002), na maioria dos casos de retroanálise são adotados a espessura e o coeficiente de Poisson para cada camada.

Segundo ALBERNAZ (1997), a retroanálise é importante porque permite a avaliação estrutural comparativa entre trechos de uma mesma rodovia ou de rodovias diferentes, também fornecendo dados para projetos de drenagem, indicando a presença de possíveis camadas rígidas no subleito. Além disso, proporciona a elaboração de projetos mais racionais e confiáveis, que se convertem em pavimentos mais duráveis e de menor custo evitando restaurações prematuras.

PREUSSLER *et al* (2000) explica que a retroanálise dos módulos de resiliência de um pavimento apresenta vantagens em relação a outros processos de avaliação, sendo elas a eliminação ou minoração da necessidade de ensaios destrutivos para a coleta de amostras do pavimento e subleito; a representação do estado real da estrutura; a determinação de estimativas dos módulos resilientes dos materiais nas condições reais de campo; grande rapidez e acurácia na obtenção das propriedades elásticas das camadas do pavimento, bem como a redução de gastos.

Os ensaios de cargas repetidas realizados em laboratório são de fundamental importância para balizar os programas de retroanálise, utilizados com dados resultantes de ensaios não destrutivos de pavimentos (MEDINA *et. al.*, 1994).

Atualmente, existe uma série de métodos computacionais que proporciona a análise de estruturas de pavimentos compostos por n camadas. Tais programas comparam as deflexões

medidas e calculadas, apresentando como resultado final os módulos e espessuras de cada camada, somatório de erros, diferenças percentuais, etc (FONSECA, 2002).

Dentre os vários equipamentos utilizados para a avaliação estrutural dos pavimentos, um dos que mais se difundiu foi à viga Benkelman, idealizada pelo Engenheiro A. C. Benkelman, do *Bureau of Public Roads*, e utilizada pela primeira vez nas pistas experimentais da AASHTO, em 1953 (Carneiro, 1965). O ensaio de viga Benkelman permite avaliar as deflexões no pavimento, sendo que estas deflexões podem ser entendidas como os deslocamentos verticais recuperáveis que ocorrem no pavimento submetido à carga aplicada por um veículo.

A viga Benkelman compõe-se essencialmente de uma viga móvel e uma parte fixa, sendo que esta última se apóia sobre a camada do pavimento sob análise por meio de pés reguláveis. A viga móvel se une à parte fixa por meio de uma articulação, ficando uma de suas extremidades, a ponta de prova, em contato com o pavimento no local onde se deseja medir as deflexões. A outra extremidade da viga móvel fica em contato com um extensômetro, sendo este responsável por acusar qualquer movimento vertical na ponta de prova. Ainda, a parte fixa da viga é provida de um vibrador, cuja função é reduzir o atrito entre as peças que formam a viga e evitar inibições no extensômetro.

Utilizando-se dos dados obtidos por meio do ensaio de Viga Benkelman é possível avaliar a qualidade estrutural do pavimento. A grande vantagem deste equipamento é o seu baixo custo, bem como o baixo custo para aquisição de informações por meio dele. No entanto, de acordo com Rocha Filho e Rodrigues (1998), a dispersão dos resultados obtidos com o ensaio fora do ponto de deflexão máxima mostra-se como uma desvantagem do equipamento.

2.4 Desempenho de Pavimentos

O desempenho adequado do conjunto de camadas e do subleito relaciona-se à capacidade de suporte e à durabilidade compatível com o padrão da obra e o tipo de tráfego, bem como o conforto ao rolamento e a segurança dos usuários (DNIT, 2006).

O controle dos mecanismos principais de deterioração e o estabelecimento de modelos de previsão de desempenho dos pavimentos são atividades essenciais para a eficácia da gerência de uma determinada rede pavimentada. De acordo com Gonçalves (2007), entende-se por desempenho de um pavimento o grau com que o mesmo atende as funções que lhe são impostas ao longo de sua vida de serviço. A interpretação do desempenho oferecido por um determinado pavimento busca identificar de maneira objetiva a sua condição atual e futura, possibilitando definir de forma racional as ações de prevenção e manutenção do mesmo.

Segundo Rodrigues (1997), a engenharia de pavimentação moderna envolve a concepção, o projeto, a construção, a manutenção e a avaliação de pavimentos dentro de fatores e condicionantes técnicos, econômicos, operacionais e sociais. Sendo, neste contexto fundamental para uma real otimização, a aplicação de modelos de previsão de desempenho mecanístico-empíricos, cuja tecnologia se encontra hoje em condições operacionais.

Muitos fatores afetam o desempenho a ser oferecido por um determinado pavimento, dentre estes destacam-se: o número e a magnitude das cargas do tráfego, as propriedades dos materiais componentes das camadas e a sua heterogeneidade ao longo da via, a natureza do solo de subleito, a frequência e as práticas de manutenção aplicadas ao longo do tempo, as condições de drenagem e aspectos ambientais (GONÇALVES, 2007).

Diversos indicadores podem ser utilizados para se quantificar o desempenho de um pavimento, variando desde aqueles que caracterizam a sua condição funcional até aqueles que consistem simplesmente do registro de defeitos de superfície ou das deformações plásticas. O desempenho estrutural pode ser avaliado através da variação do módulo de elasticidade efetivo de uma ou mais camadas com o tráfego acumulado.

2.4.1 Mecanismos de Degradação Estrutural de Pavimentos

No decorrer dos anos foram observadas muitas mudanças e avanços na filosofia de projeto de pavimentos asfálticos. Atualmente pode-se afirmar que os mesmos rompem por diversas causas, principalmente devido à repetição de cargas sobre as estruturas de pavimentos, correspondendo ao fenômeno de fadiga, responsável pela fissuração de revestimentos betuminosos e de bases cimentadas e o acúmulo de deformações plásticas (permanentes) devido à ação das deformações cisalhantes que ocorrem em camadas granulares e no subleito (SEVERI *et al*, 199?).

Deformações plásticas irreversíveis que resultam da passagem das cargas levam a deformações permanentes acumuladas em todas as camadas do pavimento, que correspondem ao surgimento do fenômeno conhecido como afundamento na trilha de roda na superfície do revestimento (MOTTA, 1991).

O fenômeno de fadiga corresponde à degradação progressiva na micro-estrutura cristalina dos materiais sujeitos a tensões inferiores às resistivas. Balbo (2007) explica que a ruptura por fadiga acontece devido ao fato de que muitos materiais, sendo sucessivamente solicitados em níveis de tensão inferiores àqueles de ruptura, pouco a pouco desenvolvem alterações em sua estrutura interna, resultando na perda das características estruturais originais. Isso gera um processo de microfissuração progressiva que culmina no desenvolvimento de fraturas e, conseqüentemente, no rompimento do material.

Huber (1999, *apud* MERIGHI, 1999, p. 3) salientou que após a análise de mais de trezentos artigos técnicos sobre degradação de pavimentos, publicados entre 1988 e 1996, aproximadamente 38 % dos defeitos são do tipo trincas por fadiga, 17 % tem origem na deformação permanente, 11 % são problemas originados na execução do pavimento e em 34% não foi possível identificar a causa.

Problemas como escorregamento do revestimento e exsudação do ligante, dentre outros encontrados em pavimentos de concreto asfáltico são esquematicamente mostrados na figura 3, estando agrupados em três categorias principais: fissuras, deformações do revestimento e defeitos de superfície.

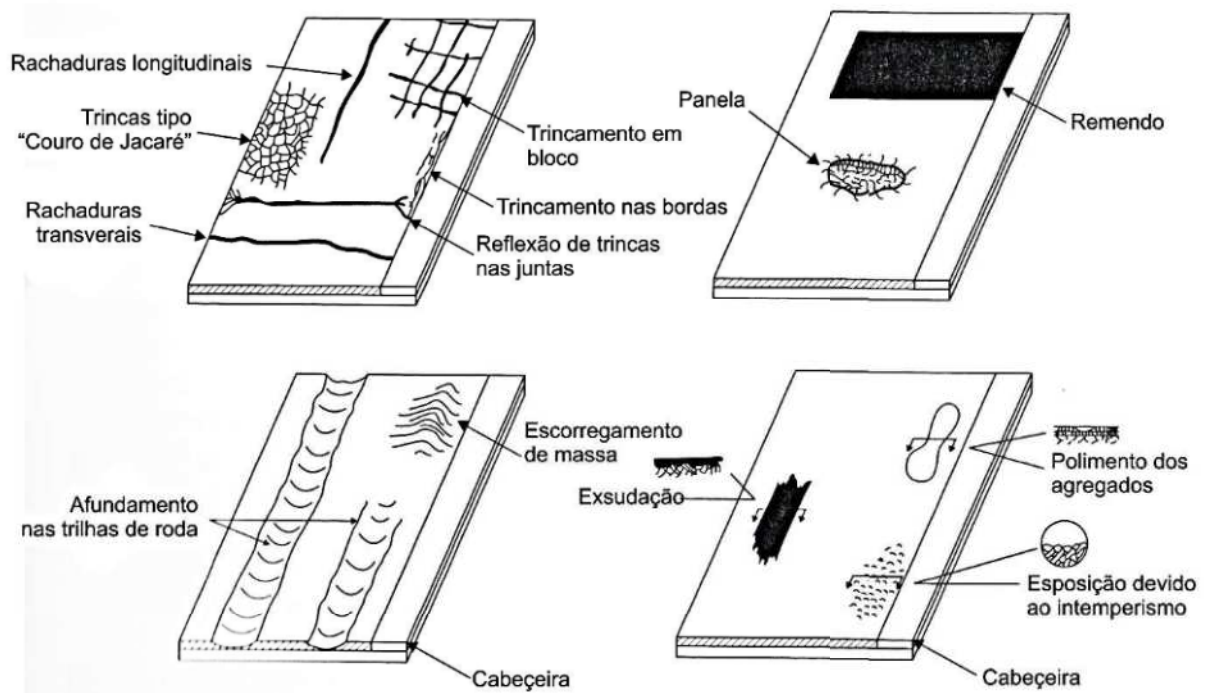


Figura 3: Defeitos em pavimentos flexíveis.

Fonte: Adaptado de Papagiannakis e Masad, 2008.

2.4.1.1 Deformações Permanentes na Trilha de Roda

Segundo Specht (2004), as deformações plásticas em trilhas de roda causadas pelo tráfego pesado, especialmente lento e canalizado, conjugado a altas temperaturas, representam uma patologia comum nas rodovias brasileiras. Afundamentos acentuados indicam a ruptura do pavimento, bem como acentuam os fenômenos de hidroplanagem e *spray*.

A norma americana ASTM D 5340 (1997), define esse defeito como uma depressão superficial na trilha de roda, podendo ocorrer o levantamento das bordas ao longo da trilha, e complementa que um aumento excessivo da deformação permanente pode provocar a ruptura da estrutura do pavimento.

O documento “Defeitos nos Pavimentos Flexíveis e Semi-Rígidos”, publicado pelo antigo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER) (1978), atualmente DNIT, define como afundamento a deformação permanente caracterizada por depressão da superfície do pavimento, acompanhada ou não de solevamento. O solevamento corresponde à diferença de altura entre o perfil original da superfície do pavimento, e a protuberância que se forma na lateral do sulco da roda conforme pode ser visualizado na figura 4 (MERIGHI, 1999).

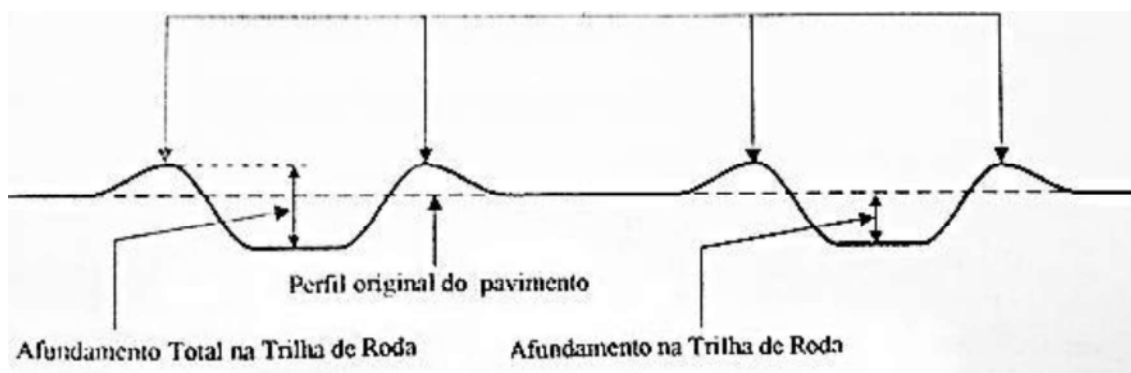


Figura 4: Deformação permanente na trilha de roda.

Fonte: Adaptado de Merigui, 1999.

Deformação permanente na trilha de roda, de acordo com Yoder e Witczak (1975), pode ser definida como uma distorção na superfície do pavimento causada pela consolidação de uma ou mais camadas desse pavimento, ou também devido ao esborregamento de massa (deslocamento horizontal da massa asfáltica).

Papagiannakis e Masad (2008) descrevem o esborregamento de massa como o deslocamento longitudinal de uma área localizada da superfície do pavimento, causado pelas forças de frenagem ou aceleração dos veículos, geralmente localizado em colinas, curvas e cruzamentos.

As deformações permanentes podem acontecer devido a diversos fatores, como problemas no subleito, camadas mal compactadas ou ruptura por fissalhamento, tipo de ligante e dosagem errônea da mistura asfáltica, causando afundamento por fluência do revestimento, entre outros.

Bernuzzi (2009) explica que deformações permanentes em trilha de roda afetam drasticamente o conforto dos usuários, aumentando consideravelmente os custos operacionais. Também afetam a segurança do mesmo, prejudicando a dirigibilidade em qualquer condição, perdendo aderência em períodos de chuva (hidroplanagem). Tais deformações refletem problemas estruturais e/ou de projeto de revestimentos asfálticos, além de dificultar a manutenção/reabilitação dos pavimentos.

De maneira geral, a proporção de qualquer deformação ocorrida no revestimento devido à viscosidade do ligante, aumenta devido à temperatura e ao período de carregamento. Tal fato pode ser verificado nas figuras 5 e 6.

A figura 5 apresenta o resultado da aplicação de uma carga estática. Nota-se que a deformação resultante da aplicação da carga mostra uma resposta elástica instantânea, seguida por um aumento gradual na deformação com o tempo, até o carregamento ser removido. A alteração gradual na deformação ocorre devido às propriedades viscoelásticas do ligante. Com a remoção da carga, a deformação elástica é recuperada instantaneamente e parte se recupera com o passar do tempo. Observa-se também que parte da deformação é mantida, isto se deve ao comportamento elástico do material (WHITEOAK, 1990).

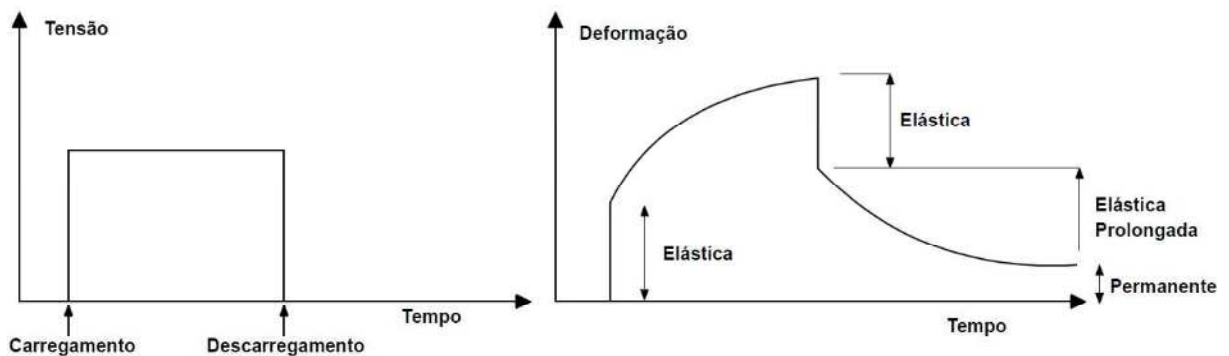


Figura 5: Deformação devido à aplicação de carga estática.

Fonte: Whiteoak, 1990.

A resposta da deformação do pavimento devido a um carregamento pulsante (veículo em movimento) encontra-se na figura 6. Observa-se que ao fim do carregamento ocorreu uma deformação não recuperável, que por mínima que seja para um pulso único, se tornará uma deformação considerável ao somatório de milhares de aplicações de carga.

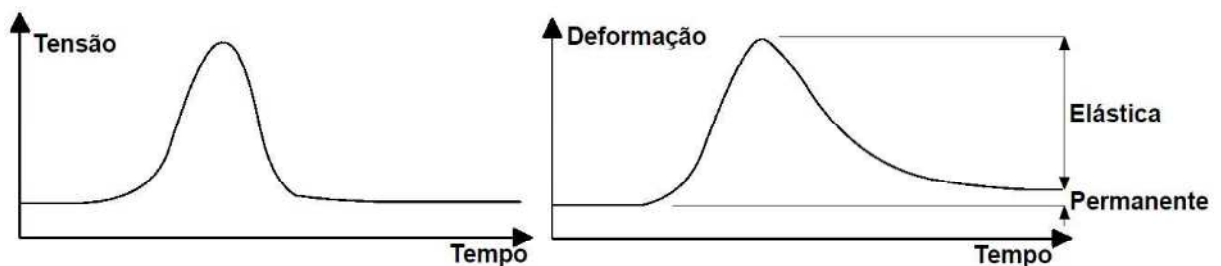


Figura 6: Deformação devido à aplicação de carga pulsante (veículo).

Fonte: Whiteoak, 1990.

2.4.1.2 Trincamentos por Fadiga

Segundo Rodrigues (1991) no Brasil, o trincamento configura-se como a principal causa de ruptura dos pavimentos rodoviários, devido à flexão repetida, levando os materiais do revestimento e camadas cimentadas a fadiga.

É um processo de mudança estrutural permanente, progressiva e localizada que ocorre em um ponto do material sujeito a tensões de amplitudes variáveis que produzem as fissuras que conduzem para totalizar a falha após um determinado número de ciclos (ASTM, 1979).

De acordo com Specht (2004), o trincamento por fadiga é uma das mais comuns manifestações de mau desempenho ou ruptura de um pavimento. Manifesta-se através do aparecimento de trincas longitudinais nas trilhas de roda e propaga-se pela superfície do pavimento na forma de trincas interligadas tipo couro de jacaré. As trincas podem ter seu início, através de forças cisalhantes, na superfície do pavimento ou de tensões de tração, na fibra inferior da camada asfáltica. As características à fadiga são comumente expressas em relação à tensão ou deformação inicial atuante e o número de repetições de carga até a ruptura.

O trincamento é o início de uma fase de deterioração estrutural que modifica o estado de tensões e de deformações do sistema estratificado e, assim, o seu desempenho. Portanto, é fundamental conhecer as características de ruptura dos materiais envolvidos na construção dos pavimentos, tendo em vista que o comportamento dos revestimentos sob solicitações à flexão e à compressão é caracterizado por leis específicas: lei de fadiga e lei de deformação permanente. Essas constituem as regras de comportamento mecânico e devem ser abordadas em um projeto estrutural de pavimentos (PINTO, 1991).

O trincamento por fadiga é comumente associado a cargas muito elevadas para a estrutura do pavimento ou demasiadas repetições, além das estimadas em projeto. Muitas vezes agrava-se o problema devido a drenagem inadequada, que faz com que as camadas do pavimento se tornem saturadas e percam rigidez e resistência (HARTMANN, 2009).

Pinto (1991, p. 119), relacionou os principais fatores que afetam a vida de fadiga em misturas betuminosas utilizadas como materiais de construção de pavimentos, sendo eles:

- Fatores de Carga:
 - Magnitude do carregamento;
 - Tipo do carregamento; tensão ou deformação controlada;
 - Frequência, duração e intervalo de tempo entre aplicações sucessivas do carregamento;
 - Histórico de tensões: carregamento simples ou composto.

- Fatores de Mistura:
 - Tipo do agregado, forma e textura;
 - Granulometria do agregado;
 - Penetração do asfalto;
 - Teor de asfalto;
 - Temperatura.

- Fatores ambientais:
 - Temperatura;
 - Umidade.

- Outras Variáveis:
 - Módulo resiliente ou de rigidez;
 - Índice de vazios.

O DNER, através do documento “Avaliação Estrutural de Pavimentos Flexíveis”, descreve as fases da vida de um pavimento flexível (Figura 7), constituídas pela fase de consolidação (logo após a construção), fase elástica (onde a deflexão mantém-se constante) e a fase de fadiga, caracterizada por um crescimento do valor de deflexão do pavimento, na medida em que a estrutura começa a exteriorizar os efeitos de fadiga, representados por fissuras, trincas e acúmulo de deformações devido ao acentuado número de repetições de carga.

O documento salienta que, caso não se tome medidas para a recuperação do pavimento, geralmente na fase de fadiga ocorrerá um processo acelerado de degradação do mesmo, que em certos casos, inviabilizará a revitalização.

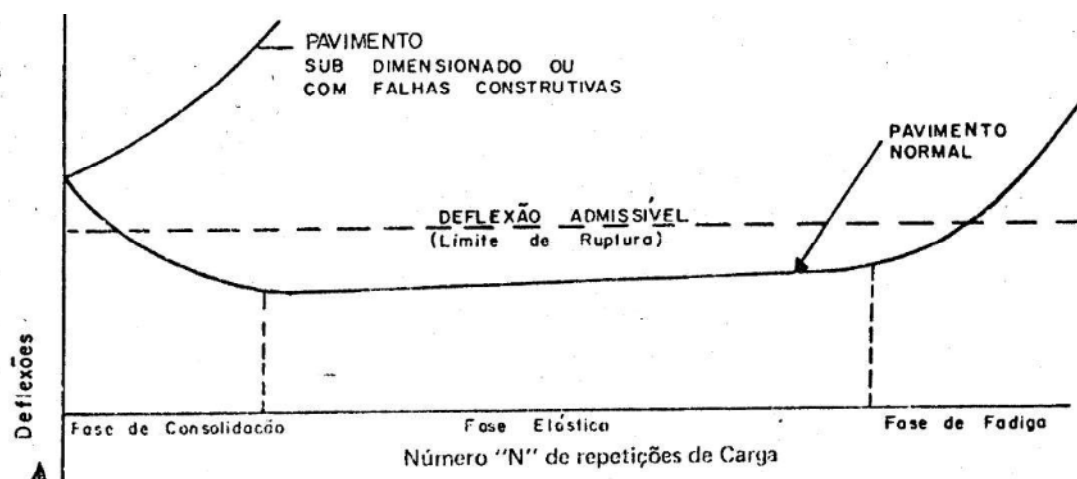


Figura 7: Fases da vida de um pavimento.

Fonte DNER PRO - 011, 1979.

2.4.1.3 Ruptura por Reflexão de Trincas

A reflexão de trincas é considerada um dos principais problemas para o projeto de restauração de pavimentos, sendo que o padrão de trincamento de uma camada asfáltica pode ser utilizado para a determinação da estimativa da vida de fadiga de uma mistura asfáltica, auxiliando na escolha do tipo de restauração. Rodrigues (1991) considera que o fenômeno de reflexão de trincas é um processo normal de trincamento por fadiga, no qual ocorre um crescimento da interligação das microfissuras da massa asfáltica, devido à repetição de ciclos de carga e descarga.

O surgimento de trincas na camada de restauração muitas vezes pode ser devido à incapacidade do concreto asfáltico convencional de resistir às deformações elevadas que são geradas em torno da extremidade das trincas na camada asfáltica deteriorada, sendo que os movimentos causadores da propagação de trincas são os deslocamentos verticais diferenciais entre as paredes de uma trinca na passagem da carga de roda, ocorrendo deformações cisalhantes na camada de recapeamento, e os movimentos horizontais de abertura e fechamento da trinca devido aos ciclos térmicos ou a expansão e retração do solo de subleito, sob variações de umidade. Nesses processos pode ocorrer que as tensões de cisalhamento ou de tração geradas por eles superaram as tensões admissíveis dos revestimentos asfálticos (RODRIGUES, 1991).

Muitas vezes, medidas de restauração executadas por meio de recapeamentos simples podem apresentar vidas de serviço extremamente curtas por não resistirem aos movimentos das camadas subjacentes, causando trincamento prematuro da camada de recapeamento, devido a propagação das trincas da camada do pavimento existente. A reflexão de trincas em recapeamentos de concreto asfáltico não somente permite que a água percole para dentro da estrutura do pavimento e danifique a sub-base, mas também contribui para a rápida deterioração do pavimento (DEMPSEY, 2002 *apud* AZAMBUJA e CERATTI, 2009).

Azambuja e Ceratti (2009, p. 8) explicam que:

Para retardar o processo de reflexão de trincas podem-se adotar vários procedimentos como camadas intermediárias de geotexteis impregnados com asfalto, asfalto-borracha, misturas asfálticas abertas ou também o emprego de uma membrana absorvedora de tensões - SAM (*Stress Absorbing Membrane*) constituída de um tratamento superficial duplo utilizando emulsão modificada por polímero.

2.4.1.4 Outros Mecanismos de Degradação

Além de fissuras, trincamentos e deformações permanentes, existem outros problemas que contribuem para degradação dos pavimentos. Fatores como a suscetibilidade a umidade e problemas devido a variações de temperatura, podem causar o envelhecimento do ligante, que fragiliza a mistura asfáltica e facilita seu trincamento e o arrancamento de agregados (GONÇALVES, 2007).

Em decorrência da abrasão provocada pelo tráfego dos veículos, acelerado pelo intemperismo (oxidação do asfalto), pode ocorrer também o desgaste da superfície do pavimento, com exposição dos agregados e perda da macrotextura, levando à queda do coeficiente de atrito. Este problema é especialmente grave nos revestimentos em tratamento superficial.

Domingues (1993) aponta outros defeitos de ordem superficial, que também contribuem para degradação dos pavimentos:

- **Exsudação:** Consiste no aparecimento localizado do ligante ou de argamassa betuminosa na superfície do pavimento, formando manchas de dimensões variadas que apresentam um brilho vítreo de cor preta, e superfície lisa de baixa resistência à derrapagem, podendo ocorrer nas trilhas de roda ou em qualquer porção da superfície do pavimento.
- **Empolamento:** É um inchaço na superfície do pavimento que pode ocorrer sobre uma pequena área ou como uma onda longa e gradual em qualquer porção da superfície do pavimento, podendo ser acompanhado de trincamento da superfície.
- **Desintegração:** Decorre da perda progressiva de materiais do revestimento caracterizada pelo desalojamento progressivo de partículas do agregado, apresentando uma aspereza superficial anormal, podendo ocorrer ao longo ou imediatamente abaixo da superfície do pavimento.
- **Desagregação:** É a corrosão do revestimento em virtude da perda da adesão asfalto-agregado, podendo ocorrer ao longo de toda superfície do pavimento.
- **Panelas:** São cavidades de tamanhos variados, podendo ocorrer em qualquer porção da superfície do revestimento e principalmente nas trilhas de roda (por serem mais solitadas).

2.4.2 Efeitos do Clima em Pavimentos Flexíveis

Os dois principais fatores ambientais que influenciam no desempenho de pavimentos flexíveis são a presença de água nas camadas do pavimento e do subleito, e a variação de temperatura ao longo do ano (PAPAGIANNAKIS e MASAD, 2008).

Tais condições devem ser muito bem conhecidas para proceder-se corretamente no dimensionamento. Embora o envelhecimento por oxidação dos agentes aglutinantes e os danos causados pela água tenham sido bem pesquisados, a validação dos procedimentos de testes de laboratório no contexto do desempenho em campo, continua a ser problemática. Isto

acontece devido à dificuldade de correlacionar-se o desempenho *in situ* aos testes de laboratório (BROWN, 1997).

Um mesmo pavimento apresentará resistências diferentes em diferentes condições climáticas. Este fato deve-se a constatação de que a umidade presente no subleito e no interior de uma estrutura de pavimento é variável em função do regime de chuvas de determinada região. Conseqüentemente, são diferentes as respostas estruturais de pavimentos com a mesma estrutura e submetidos ao mesmo carregamento, mas sob condições de umidade diferentes, refletindo isto no aumento ou diminuição da sua vida útil de serviço.

2.4.2.1 Variação de Temperatura

Como descrito anteriormente, os pavimentos flexíveis são formados pela mistura de agregados e ligantes asfálticos. O material asfáltico é termo-sensível, tornando-se rígido a temperaturas baixas e fluido a altas temperaturas. “Assim, a deformabilidade maior ou menor do pavimento é condicionada pelas variações da temperatura do ar ou das condições meteorológicas de um modo geral” (MEDINA, 1997, p.59).

“A temperatura é um dos aspectos do clima que deve ser destacado no projeto de pavimentos, tendo em vista sua atuação específica nos revestimentos e conseqüente efeito na deformabilidade da estrutura bem como no desempenho” (MOTTA, 1991, p. 59).

Modificações sofridas pelo asfalto, como oxidação e polimerização, tornam as misturas asfálticas mais sensíveis, principalmente a baixas temperaturas, já que estas misturas são enrijecidas. Em regiões de clima temperado é comum encontrar-se pavimentos com fissuração por retração térmica e pavimentos com fissuração por fadiga induzida por variações de temperatura. As fissuras de retração ocorrem em temperaturas muito baixas (abaixo de 7 °C negativos) ou, então, quando ocorre grande queda de temperatura. Já as fissuras térmicas de fadiga ocorrem em temperaturas entre -7 °C e 21 °C (EPPS, 1997).

Em altas temperaturas podem ocorrer o descolamento e o envelhecimento do ligante. Devido à diminuição da viscosidade do ligante, este pode fluir ou exsudar, formando assim, trilhas de roda ou escorregamentos da camada tratada, que podem ser acompanhados de ruptura. Devido às altas temperaturas, os materiais tratados com ligantes betuminosos perdem

parte de sua capacidade de distribuição das cargas, em contrapartida, se tornam mais flexíveis (DNER, 1978).

2.4.2.2 Ação Prejudicial da Água

Segundo Papagiannakis e Masad (2008), existem três fontes de água nas camadas do pavimento: o escoamento das águas subterrâneas, a ação capilar, e a precipitação.

O escoamento das águas subterrâneas é um problema onde o lençol freático atravessa as camadas do pavimento, como no caso de terraplenagem em cortes. A drenagem através das camadas do pavimento não pode acomodar o escoamento das águas subterrâneas, portanto, o lençol freático deve ser rebaixado para além das camadas do pavimento, através de trincheiras longitudinais e drenos.

A ação capilar pode resultar em condições de saturação das camadas que estão logo acima do lençol freático. Pressões capilares são o resultado da tensão superficial da água nos vazios interligados de subleitos finos. O aumento real capilar acima do lençol freático pode ser computado como inversamente proporcional ao diâmetro efetivo de poros do solo (PAPAGIANNAKIS e MASAD, 2008).

A principal fonte de água nas camadas do pavimento é a precipitação. As chuvas podem ocasionar o umedecimento do subleito, tornando este menos resistente e mais flexível, o que acarreta maior fadiga dos materiais constituintes da estrutura. Quando o leito da estrada é formado por material expansivo, em presença de água, este pode inchar e/ou retrair, provocando deformações na estrutura e podendo vir a rompê-la (DNER, 1978).

Já o umedecimento das camadas que constituem a estrutura do pavimento pode reduzir suas características mecânicas, o atrito e a coesão, podendo também ocasionar o deslocamento da película do ligante (DNER, 1978).

Em um pavimento flexível, as implicações estruturais para uma camada de base saturada estão demonstradas na Figura 8. Devido à incompressibilidade da água, a dissipação das tensões com a profundidade é impedida (como suposto pela teoria elástica linear), prejudicando assim o subleito.

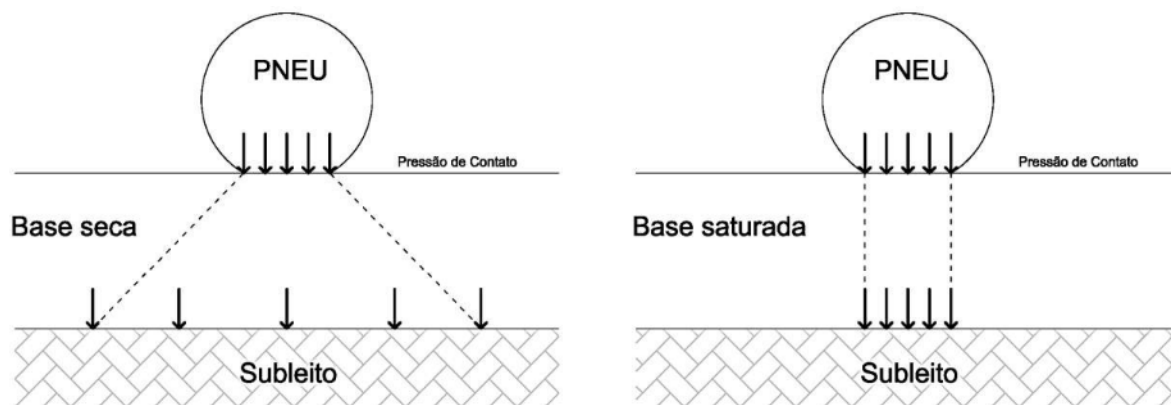


Figura 8: Distribuição de tensões em uma camada de base.

Fonte: Adaptado de Papagiannakis e Masad, 2008.

O polimento dos agregados pelo tráfego torna os revestimentos mais susceptíveis à água na derrapagem. Quando as superfícies estão molhadas, diminuem a resistência à derrapagem. O acúmulo de óleo e resíduos dos pneumáticos também torna os pavimentos escorregadios quando chove (MEDINA, 1997).

2.4.3 Modelos de Previsão de Desempenho

Os modelos de previsão de desempenho estimam a evolução da condição do pavimento ao longo do tempo, considerando geralmente fatores como idade, tráfego, clima e número estrutural. Os mesmos são utilizados pelos sistemas de gerência de pavimentos como ferramenta de auxílio na tomada de decisões, como por exemplo, para a escolha de ações de manutenção e reabilitação, para a determinação da data de intervenção e para a seleção de projetos prioritários (BALBO, 2007).

Estes modelos de desempenho devem retratar, da melhor forma possível, as condições locais, uma vez que cada região apresenta características distintas como tráfego, clima, capacidade de suporte do subleito, tipo de materiais empregados na construção, além de diferentes técnicas e controles construtivos. Portanto, a decisão sobre qual modelo de previsão que será utilizado pode definir o sucesso das atividades desenvolvidas pelos sistemas de gerência.

As ações de manutenção e reabilitação envolvem o uso de uma quantia considerável de recursos financeiros que é gasta periodicamente com a conservação dos pavimentos

rodoviários. Para utilizar com eficiência esses recursos, é necessário estimar as condições ou o nível de serventia futuro de diferentes trechos de pavimentos de uma rede viária, o que destaca a importância de modelos de previsão de desempenho confiáveis.

Os modelos de desempenho podem ser divididos em dois grupos principais, sendo eles puramente empíricos ou empírico-mecanísticos. Gonçalves (1999) comenta que modelos empíricos resultam da observação do desempenho de rodovias em serviço, e são funções de alguns poucos parâmetros ou índices que procuram caracterizar a estrutura do pavimento, o tráfego e o clima. Uma abordagem puramente empírica para previsão do desempenho de pavimentos é baseada em observações que não satisfazem as contribuições dos vários fatores influentes, restringindo assim seu uso, as condições para as quais foram desenvolvidas, onde qualquer extrapolação desses limites podem resultar em interpretações grosseiras.

Os modelos mecanístico-empíricos tendem a ser mais confiáveis, especialmente quando se trata de aplicá-los a condições de clima, tráfego e materiais de construção diferentes ou fora das faixas referentes aos trechos experimentais em que foram calibrados.

São constituídos por um modelo teórico que procura explicar ou prever a deterioração da estrutura sob a repetição das cargas do tráfego, baseando-se no comportamento mecânico dos materiais das camadas e da própria estrutura sob a ação das cargas dinâmicas dos veículos em movimento, e por funções de transferência, que calibram o modelo teórico de modo a que este reproduza o desempenho real de pavimentos em serviço.

Segundo Gonçalves (1999), os modelos de previsão de desempenho do tipo mecanístico-empíricos, consistem essencialmente da associação de três componentes fundamentais:

1. Um modelo mecânico para o cálculo das respostas da estrutura do pavimento à passagem das cargas do tráfego, respostas estas na forma de tensões, deformações e deflexões em toda estrutura;
2. Uma teoria que associe as respostas calculadas à geração e progressão de defeitos, tais como trincas de fadiga nas camadas asfálticas e cimentadas e deformações plásticas por acúmulo de deformações permanentes em todas as camadas;

3. Uma calibração experimental, para adicionar os efeitos de fatores que não puderam ser tratados de forma adequada ou explícita pelo modelo teórico, onde se incluem principalmente as variáveis ambientais (clima, drenagem) e características específicas do tráfego.

Shahin (1994) afirma que, o grau de acurácia necessário para um modelo de previsão de desempenho depende da função na qual ele será empregado. Por exemplo, modelos de desempenho utilizados em análises em nível de projeto necessitam maior precisão do que aqueles que serão empregados em análises em nível de gerenciamento.

2.4.3.1 Método do Guia da AASHTO/2002

A AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*), por meio dos estudos NCHRP 1-37A e 1-40D (*National Cooperative Highway Research Program*), desenvolveu recentemente um novo guia de dimensionamento de pavimentos, denominado *AASHTO Design Guide/2002*, que incorpora a análise mecânica para o dimensionamento de pavimentos asfálticos.

De acordo com Franco (2007), o dimensionamento mecânico-empírico proposto neste guia requer uma interação manual do projetista, ou seja, após a seleção de uma estrutura teste, o método permite analisar detalhadamente se o dimensionamento está satisfazendo os critérios de desempenho estabelecidos inicialmente. Caso a escolha não os satisfaça, novas tentativas são realizadas até que os requisitos sejam atendidos. O desempenho do pavimento asfáltico é medido em termos de deformação permanente (afundamento na trilha de roda), trincamento por fadiga, trincamento térmico e nível de irregularidade.

A figura 9 ilustra o fluxograma do processo de dimensionamento desenvolvido pela AASHTO. (FRANCO, 2007).

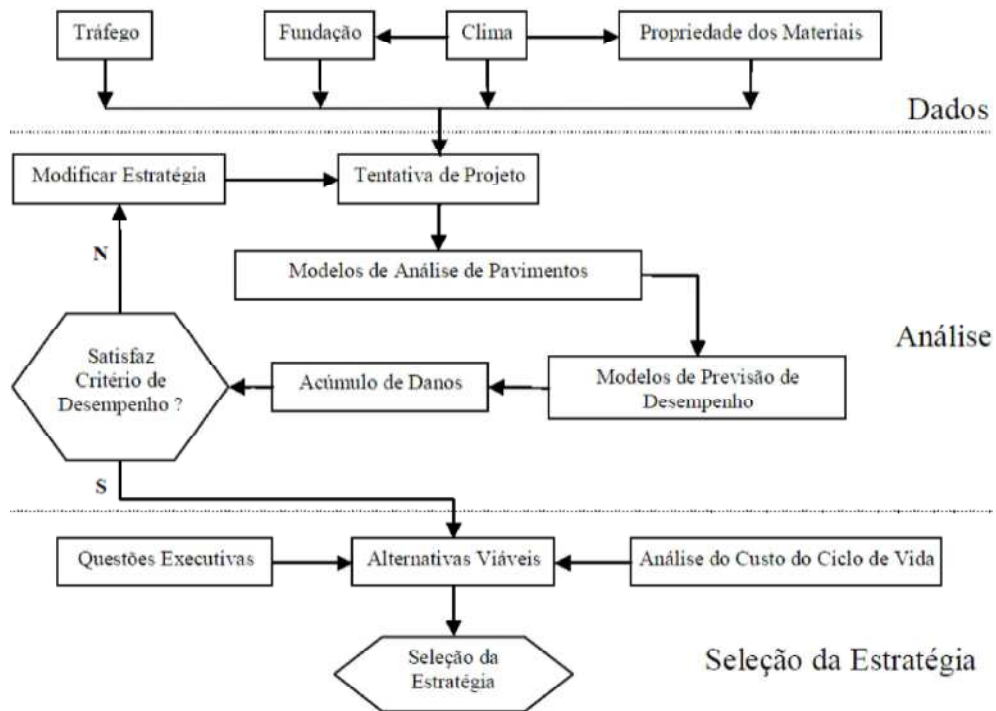


Figura 9: Fluxograma do processo de dimensionamento do Guia da AASTHO/2002.

Fonte: Franco, 2007.

O programa desenvolvido pela AASHTO chama-se *Mechanistic Empirical Pavement Design Guide* (M-EPDG). A tela do programa, apresentada na figura 10, resume os dados de entrada (*Inputs*) que precisam ser inseridos para obtenção dos resultados (*Results*).

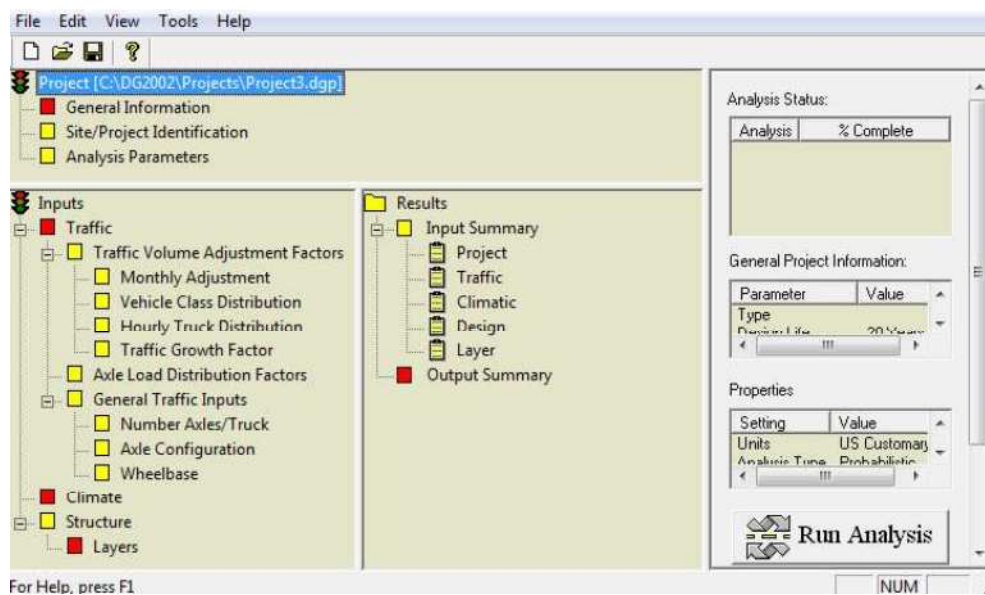


Figura 10: Tela do software M-EPDG da AASHTO.

Fonte: Franco, 2007.

Segundo Franco (2007, p. 13) em estudos utilizando esta metodologia, uma análise para projeto deve considerar como critério mínimo os seguintes parâmetros:

- Configurações de rodas múltiplas com diferentes níveis de carregamento;
- Variações sazonais das propriedades dos materiais;
- Comportamento não linear dos materiais não-estabilizados;
- Confiabilidade do projeto (preferencialmente).

Dois tipos de análise para determinar a resposta do pavimento asfáltico foram implementadas no Guia de Projeto da AASHTO. Nos casos em que todos os materiais da estrutura podem ser considerados de comportamento elástico linear, a teoria elástica de multicamadas de Burmister é utilizada. Nos casos em que o comportamento tensão-deformação de algum material for considerado elástico não linear, um procedimento não linear, por elementos finitos, é utilizado para a determinação das tensões, deformações e deslocamentos.

De acordo com Balbo (2007, p. 394), o Guia de Projeto da AASHTO é o mais moderno critério disponível na atualidade, com abordagem francamente empírico-mecanicista, trazendo muito avanço comparado aos outros métodos já existentes. Sua maior novidade é o emprego de uma abordagem de dano incremental, permitindo a variação de inúmeros parâmetros de projeto ao longo do período de análises.

Os efeitos do clima são avaliados em termos de variações sazonais em módulos de resiliência dos materiais, na ocorrência de fissuras de retração térmica, na modelagem à fadiga e da deformação permanente de camadas, bem como dos efeitos da umidade na deformação permanente de materiais não tratados. O tráfego, por sua vez é analisado em nível de detalhamento de cargas por tipo de eixo, bem como em termos de seus efeitos em vista de sua variação lateral em uma mesma faixa de rolamento (BALBO, 2007, p. 395).

2.4.3.2 SisPav (Franco, 2007)

O sistema computacional SisPav, desenvolvido na COPPE/UFRJ, por Franco (2007), incorpora confiabilidade, a análise de tensões e deformações e interfaces gráficas para visualização dos resultados.

Segundo Souza (2007), o software adota formulação elástico-linear e não linear, sendo os danos estimados por modelos de previsão de fadiga, deformação permanente e deformação máxima admissível no topo do subleito, adequados às condições do país, tanto quanto possível atualmente, e considerados diversos tipos de configuração de eixos. Desenvolvido em Visual C++, versão 6.0, o programa busca aliar a praticidade e simplificação na entrada de dados, a agilidade e velocidade nos cálculos e processamento com a apresentação em gráficos e tabelas de fácil manipulação dos resultados. O intuito, além da disponibilidade pública do programa, é facilitar o contato de estudantes e projetistas com o processo de análise e dimensionamento mecânico-empírico de pavimentos.

O projetista pode contemplar ações climáticas para o local onde existe ou será construída a estrutura do pavimento. Ao selecionar o local, as informações sobre as temperaturas médias mensais do ar são apresentadas na tabela e no gráfico da tela. Caso o local do projeto não se encontre disponível no banco de dados interno do software, as informações poderão ser inseridas manualmente. O banco de dados interno foi obtido a partir das Normas Climatológicas (BRASIL, 1992). O detalhamento de tráfego é feito por eixo e por volume de tráfego no mês.

A tela do programa, apresentada na figura 11, é dividida em abas, nas quais devem ser inseridos os dados necessários para obtenção dos resultados.

Camada	Tipo	Espessura (m)	Coef Poisson	Modelo	k1 / Mr / Ei (MPa)	k2 / Ef (MPa)	k3	k4	k5	Aderência	
1	Mistura asfáltica	0.075	0.337	3	4193.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00	
×	2	Material granular	0.180	0.350	1	1000.00	0.3000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00
3	Solo laterítico	0.200	0.350	3	130.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00	
SL	Solos finos, siltosos ou argilosos	0.000	0.400	3	52.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00	

Figura 11: Tela do software SisPav.

Fonte: Franco, 2007.

As três primeiras abas referem-se aos dados da estrutura do pavimento, tráfego e condições climáticas, respectivamente. A quarta aba permite a visualização e alteração dos parâmetros relativos aos modelos de comportamento quanto à deformação permanente e fadiga, utilizados no cálculo da vida útil do pavimento. A quinta aba, demonstra os resultados obtidos, por meio de gráficos e tabelas, permitindo a exportação dos dados para outros softwares, como o Microsoft Excel.

O propósito do sistema é contribuir para o dimensionamento mecanístico-empírico de estruturas de pavimentos asfálticos, com base nas informações detalhadas de tráfego, das condições ambientais e das características dos materiais disponíveis. Para tanto, um conjunto de programas de computador para análise e verificação de vida de projeto de pavimentos foram desenvolvidos, o de Análise Elástica de Múltiplas Camadas (AEMC), o de Análise por Elementos Finitos Tridimensional (EFin3D), um módulo para retroanálise e o de dimensionamento e verificação de estruturas de pavimentos, o SisPav.

3. METODOLOGIA

3.1 Classificação da Pesquisa

Esta pesquisa pode ser classificada como estudo de caso, visto que os procedimentos técnicos serão realizados em campo, com observação e coleta de dados no local do estudo, e também por meio de ensaios laboratoriais. Quanto à forma de abordagem, pode ser definida como de ordem quantitativa, devido às análises e simulações de desempenho dos trechos pavimentados serem de caráter numérico.

3.2 Descrição do Local do Estudo

O trecho experimental está localizado na rodovia federal BR - 285, no Estado do Rio Grande do Sul, a qual inicia na divisa com Santa Catarina (km zero), próximo à cidade de São José dos Ausentes, e, desenvolvendo-se no sentido leste-oeste, termina na cidade de São Borja, às margens do rio Uruguai, na fronteira com a Argentina, totalizando a extensão de 676,3 km, sendo classificada pelo Plano Nacional de Viação (PNV) como rodovia transversal. Desta forma, essa rodovia atravessa várias regiões do Estado, dentre as quais 107 km da Microrregião das Missões, situada entre Ijuí e São Luiz Gonzaga.

A BR - 285, sob jurisdição da 10ª Unidade de Infraestrutura Terrestre (UNIT), é uma das espinhas dorsais do sistema rodoviário gaúcho, sendo uma das rotas dos produtos comercializados com a Argentina, o Paraguai e o Chile, que se destinam ou provêm do restante do país. Cruza vários polos econômicos e culturais, além de zonas agrícolas, de pecuária e de parques fabris ligados à agroindústria.

Na região das Missões, por razões estratégicas, a rodovia foi implantada e pavimentada pelo III Exército, através da Companhia de Estradas de Rodagem do 3º Batalhão de Engenharia Rodoviária, e alguns trechos por empreiteiras, entre os anos de 1965 e 1974.

A plataforma de terraplenagem executada é de 14 m, com pista de rolamento de 7 m e acostamento de 2,5 m. A estrutura do pavimento é constituída de sub-base de macadame

hidráulico, brita graduada ou macadame betuminoso usinado a quente, com espessuras da ordem de 20 cm; de base de macadame betuminoso usinado a quente, com espessura de 10 cm e revestimento de 5 cm de CBUQ (CANABARRO, 2004).

Os serviços de restauração e manutenção da rodovia têm sido executados através de contratos específicos firmados com empresas particulares. Segundo relatório do DAER (2009) atualmente dois trechos da rodovia estão concessionados para empresas privadas, sendo eles:

- Trecho entre a cidade de Vacaria e a cidade e Lagoa Vermelha, com extensão de 67 km, onde 59,1 km são operados pela empresa RODOSUL e 7,9 km pelo Estado.
- Trecho entre a cidade de Passo Fundo e o cruzamento com a RS - 158, próximo a Panambi, com extensão de 126 km, onde 92,5 km são operados pela empresa COVIPLAN e 33,5 km pelos Estado.

O restante da malha da rodovia é de operado pelo governo federal através do DNIT. A figura 12 mostra esquematicamente a extensão da rodovia federal BR - 285 e os contratos de concessões vigentes.



Figura 12: Extensão e concessões BR - 285/RS.

3.3 Planejamento da Pesquisa

O andamento do estudo dividiu-se em três momentos distintos, sendo eles: o acompanhamento da execução de um trecho experimental em asfalto borracha, onde foram observados os procedimentos de construção do pavimento, bem como os ensaios laboratoriais pertinentes; as análises de desempenho relativas às deformações permanentes e trincamentos por fadiga dos materiais e por fim a realização de medidas *in situ* de desempenho, no intuito de verificar a eficácia dos modelos de previsão comparando-se à realidade do campo.

3.3.1 Execução do Trecho Experimental

O trecho experimental escolhido para aplicação do revestimento em asfalto borracha está localizado entre as cidades de Ijuí e Coronel Barros, no Estado do Rio Grande do Sul, iniciando-se no km 470+500 da Rodovia Federal BR 285 (Figura 13).

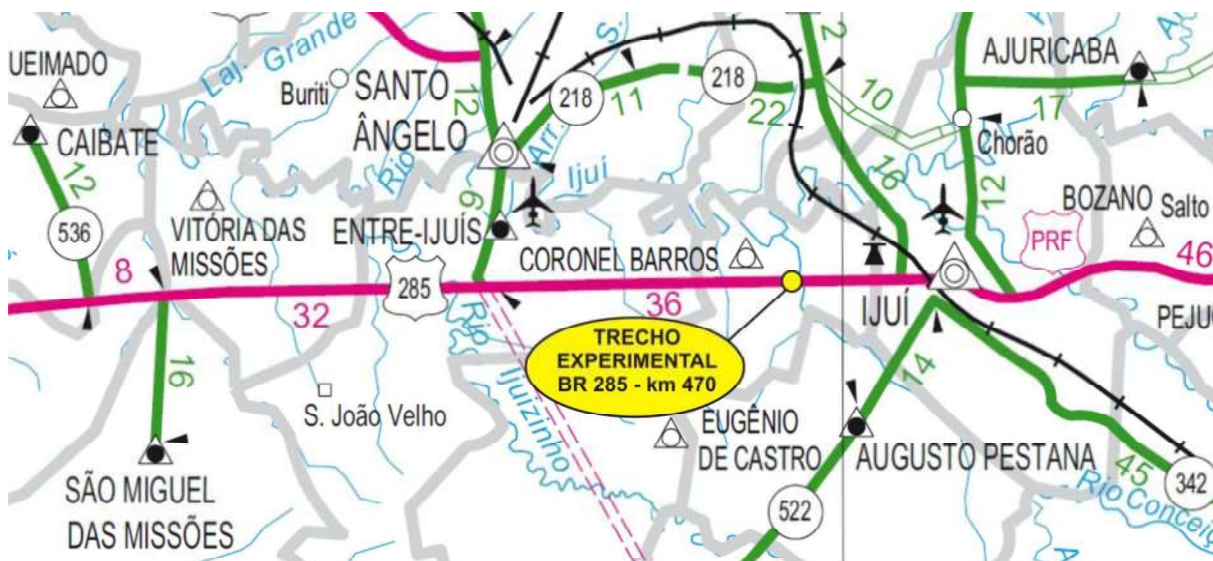


Figura 13: Localização do trecho experimental.

O trecho experimental é constituído por uma terceira pista, construída pela empresa TORC Engenharia. É caracterizado por uma tangente em active (sentido Coronel Barros - Ijuí), com 3,6 m de largura, dividido em 6 seções, onde, para melhor visualização dos mecanismos de degradação e comparações de desempenho serão intercalados para o revestimento, CBUQ convencional e AB.

O trecho é localizado em zona rural, com vegetação rasteira e algumas árvores de pequeno e médio porte isoladas. Também corta alguns pequenos cursos d'água, sendo que suas travessias já estavam executadas pelo projeto original da rodovia. O percurso pode ser considerado de alta velocidade, localizado no centro de uma longa reta, possuindo ampla visão para ultrapassagens. O relatório de tráfego do Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem do Rio Grande do Sul (DAER-RS) (2009) acusa um volume médio diário (VMD) de 5400 veículos passantes na rodovia, contabilizados no km 475 (ponto mais próximo do trecho experimental). A construção deste trecho visou melhorar as condições de tráfego, aumentando a velocidade operacional da rodovia, deslocando os veículos pesados para a terceira faixa, evitando assim a formação de comboios.

Para proceder-se com avaliações de desempenho das seções revestidas em CBUQ e AB foi necessário o conhecimento das camadas sobre as quais eles estão assentados, como também do processo construtivo do pavimento. Neste sentido, foram realizados ensaios para caracterização mecânica, volumétrica, de mistura e condição estrutural de todos os materiais constituintes das camadas, executados em campo e em laboratório, compreendidos pelos seguintes procedimentos:

- Subleito:
 - Curva de compactação (Proctor - NBR 7182/86);
 - Expansão por saturação - Índice de suporte Califórnia (NBR 9885/87);
 - Granulometria por peneiramento (NBR 7182/82);
 - Limites de Atterberg (LL - NBR 6459/84; LP - NBR 7180/84);

- Base:
 - Levantamento deflectométrico da bacia (viga Benkelman - NBR 8547/84);
 - Ensaio de curva de compactação (Proctor - NBR 7182/86);
 - Expansão por saturação - Índice de suporte Califórnia (NBR 9885/87);
 - Granulometria por peneiramento (NBR 7182/82).

- Revestimentos:
 - Coleta de material (extração de betume na usinagem);
 - Controle de extração de amostras no trecho;

- Ensaio de massa específica (NBR 15619/08);
- Ensaio de módulo de resiliência condicionado (DNER-ME 133/94);
- Ensaio de resistência à tração por compressão diametral (NBR 15087/04);

A figura 14 exibe um *croqui* para melhor entendimento do trecho estudado.

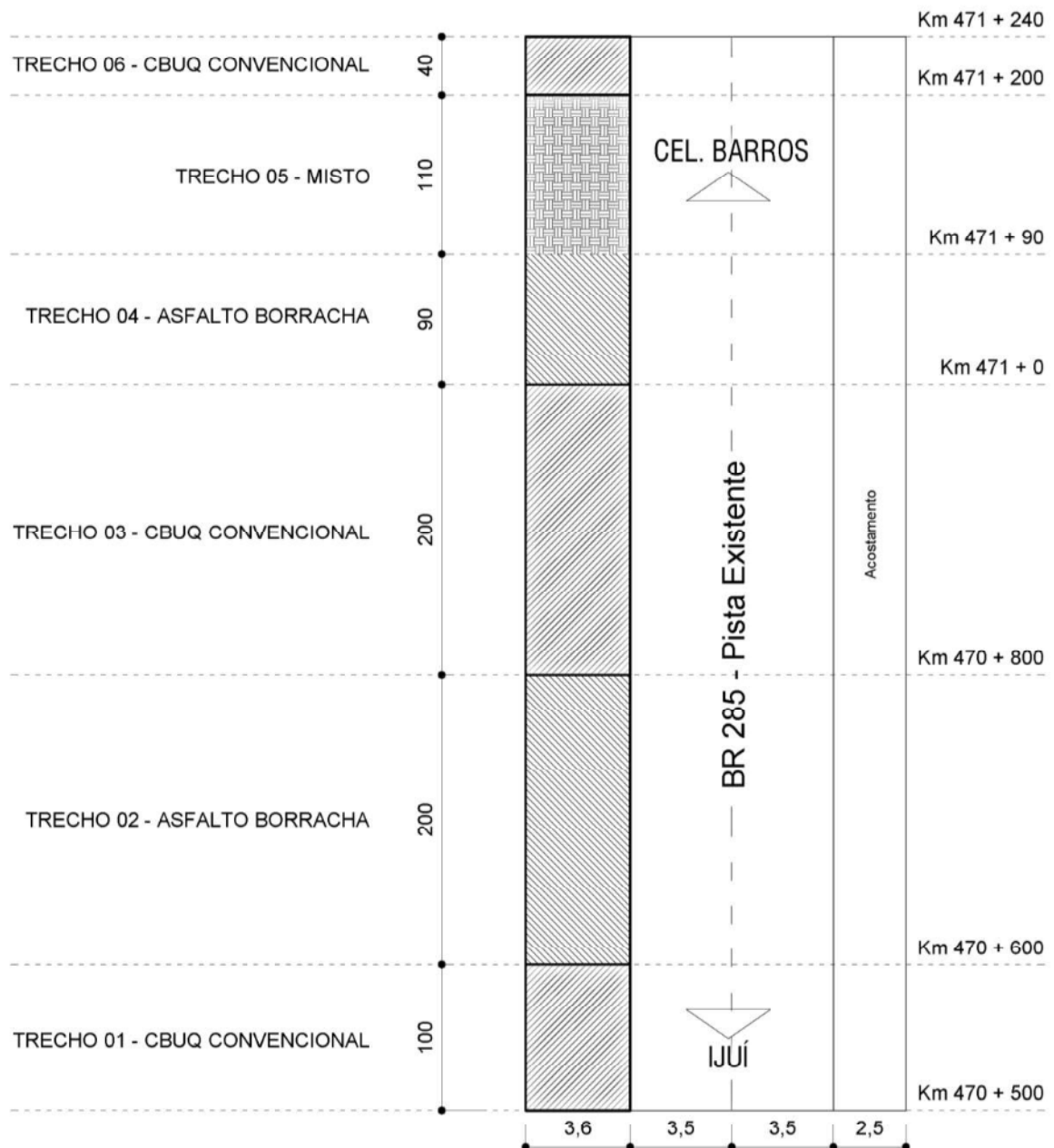


Figura 14: Esquema de construção do trecho experimental.

3.3.2 Análises de Previsão de Desempenho

A etapa de análises de previsão de desempenho aconteceu após a execução do trecho experimental, tendo em mãos todos os resultados dos ensaios e levantamentos de dados pertinentes. Nesta fase foi estimada a vida útil do pavimento em estudo, com relação aos principais mecanismos de degradação, sendo eles as deformações permanentes e trincamentos por fadiga, previamente revisados.

Para realizar-se estas estimativas, utilizou-se o método de previsão de desempenho do Guia da AASHTO de 2002, por meio do estudo NCHRP 1-37A (via software denominado M-EPDG) e também o software SisPav, que atualmente configuram-se como as mais avançadas ferramentas de previsão de vida útil de pavimentos flexíveis.

3.3.3 Levantamentos de Desempenho e Contagem de Tráfego

A fim de comparar as análises de previsão de desempenho com a resposta real do pavimento, foram efetuados levantamentos relativos aos danos provocados pelo tráfego, sendo eles as deformações permanentes e trincamentos por fadiga. Também realizou-se contagens de tráfego, por tipo e configuração dos veículos pesados, no intuito de determinar a porcentagem de veículos que utilizam a terceira pista.

3.4 Materiais e Equipamentos

Para a realização desta pesquisa, os materiais coletados e os equipamentos utilizados nos ensaios foram fornecidos pela empresa TORC Engenharia e também pelo DNIT de Cruz Alta, sendo alguns dos ensaios realizados no laboratório de engenharia civil da UNIJUÍ. Para as análises de desempenho e posterior tratamento dos dados foi utilizado um computador pessoal com os seguintes softwares:

- Autodesk Autocad 2010;
- M-EPDG da AASHTO;
- SisPav 2009;
- Microsoft Office 2010;

4. RESULTADOS

4.1 Trecho Experimental

A seguir são apresentados os dados obtidos nesta pesquisa, relativos à topografia, execução do trecho experimental, constituição estrutural e materiais utilizados.

4.1.1 Topografia

A fim de caracterizar o trecho quanto à inclinação da pista de rolamento, realizou-se o levantamento topográfico através de um GPS de navegação, marca BAK, modelo 4306. Em função da margem de erro do equipamento, o perfil topográfico do terreno foi obtido através das médias aritméticas de quatro levantamentos, com um ajuste polinomial de grau três para determinação da curvatura. Observa-se uma inclinação média de aproximadamente 4%, como pode ser visto na figura 15.

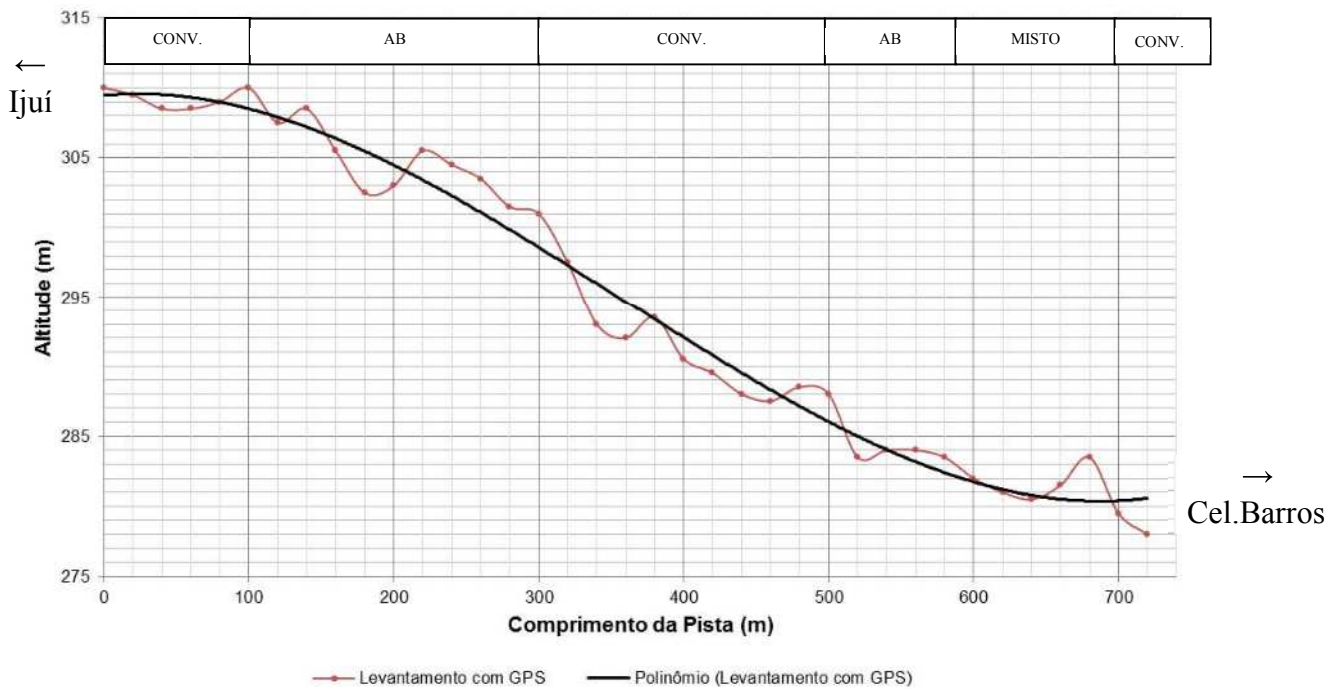


Figura 15: Perfil topográfico da pista de rolamento.

4.1.2 Execução do Trecho Experimento □

O trecho experimental foi executado durante o mês de maio de 2010, tendo como marco de sua finalização a concretagem dos revestimentos asfálticos, realizada no dia 27/05/2010. A seguir é apresentado um relatório fotográfico das etapas acompanhadas.



Figura 16 - 1



Figura 16 - 2



Figura 16 - 3



Figura 16 - 4



Figura 16 - 5



Figura 16 - 6



Figura 16 - 7



Figura 16 - 8



Figura 16 - 9



Figura 16 - 10



Figura 16 - 11



Figura 16 - 12



Figura 16 - 13



Figura 16 - 14



Figura 16 - 15



Figura 16 - 16



Figura 16 - 17



Figura 16 - 18



Figura 16 - 19



Figura 16 - 20



Figura 16 - 21



Figura 16 - 22



Figura 16 - 23



Figura 16 - 24



Figura 16 - 25



Figura 16 - 26



Figura 16 - 27



Figura 16 - 28



Figura 16 - 29



Figura 16 - 30



Figura 16 - 31



Figura 16 - 32



Figura 16 - 33



Figura 16 - 34



Figura 16 - 35



Figura 16 - 36

Figura 16 - 1 a 36: Relatório fotográfico da execução do trecho experimental.

4.1.3 Estrutura do Pavimento

O trecho experimental é caracterizado por uma terceira pista em aclave, com 3,6 m de largura, constituída por cinco camadas de materiais sendo elas: revestimento (CBUQ Convencional e Asfalto Borracha), base (brita graduada), sub-base (macadame seco), reforço do subleito (rachão) e sub-leito (solo argiloso local). A tabela 1 elucida a constituição estrutural do trecho experimental, demonstrando a variação das espessuras de cada camada.

Tabela 1: Camadas constituintes do trecho experimental.

Trecho	km	Estaca (m)	Revestimento (cm)	Base (cm)	Sub-base (cm)	Ref. do Sub-leito (cm)	Sub-leito (cm)
CBUQ Conv.	470	500	11,5	17	30	0	∞
	470	520	11,5	19	30	0	∞
	470	540	13	16	30	15	∞
	470	560	12,5	19	30	25	∞
	470	580	13,5	19	30	40	∞
	470	600	13	19	30	40	∞
Asfalto Borracha	470	620	12,5	16	30	40	∞
	470	640	12	16	25	40	∞
	470	660	13,5	16	25	65	∞
	470	680	12,5	16	25	65	∞
	470	700	13,5	16	25	65	∞
	470	720	13,5	16	25	65	∞
	470	740	13,5	17	25	40	∞
	470	760	13	17	30	40	∞
	470	780	13	17	30	40	∞
	470	800	13	17	20	40	∞
CBUQ Conv.	470	820	13	17	20	40	∞
	470	840	13	16	20	20	∞
	470	860	12	16	20	20	∞
	470	880	13	16	20	20	∞
	470	900	10	15	20	20	∞
	470	920	13	15	20	20	∞
	470	940	12	15	20	20	∞
	470	960	13	15	20	20	∞
	470	980	13,5	15	20	20	∞
	471	0	13	16	20	20	∞
Asfalto Borracha	471	20	13	16	20	17	∞
	471	40	13,5	17	20	17	∞
	471	60	13	17	20	20	∞
	471	80	13	19	20	20	∞
	471	90	marco de transição para o trecho misto				
Misto	471	100	12	19	20	20	∞
	471	120	12	17	20	20	∞
	471	140	12	17	20	20	∞
	471	160	12	16	20	20	∞
	471	180	11,5	17	30	40	∞
	471	200	12	17	30	40	∞
CBUQ Conv.	471	220	12	17	30	40	∞
	471	240	12	19	30	40	∞

As determinações das espessuras dos revestimentos em cada estaca foram feitas através de sondagens rotativas, como demonstra a figura 17.



Figura 17: Extração de amostras dos revestimentos.

As espessuras das camadas granulares foram obtidas através das cadernetas de campo do topógrafo da empresa TORC Engenharia, responsável pelo controle dimensional das camadas do pavimento.

4.1.3.1 Retroanálise

Com o intuito de determinar os módulos resilientes das camadas constituintes do pavimento através do processo de retroanálise, realizou-se o levantamento deflectométrico das bacias de deformação, utilizando-se para tal, o ensaio de viga Benkelman. A tabela 2 mostra os resultados obtidos pelo referido ensaio.

Tabela 2: Bacias de deflexões obtidas através da viga Benkelman.

Trecho	km	Estaca	Do (mm/100)	0,25 m (mm/100)	0,50 m (mm/100)	0,75 m (mm/100)	1,00 m (mm/100)	1,25 m (mm/100)	1,50 m (mm/100)	1,75 m (mm/100)	Temp. Amb. (°C)	Temp. da Pista (°C)
CBUQ Conv.	470	500	63,45	54,99	38,07	38,07	21,15	8,46	4,23	4,23	15,0	17,3
	470	520	42,3	33,84	21,15	12,69	4,23	4,23	4,23	4,23	14,2	16,3
	470	540	63,45	59,22	42,3	29,61	21,15	16,92	8,46	4,23	14,9	18,4
	470	560	63,45	59,22	42,3	29,61	21,15	16,92	8,46	4,23	15,0	18,4
	470	580	67,68	59,22	46,53	21,15	12,69	8,46	4,23	0	14,6	17,1
	470	600	54,99	42,3	29,61	21,15	12,69	12,69	4,23	0	14,7	17,4
Asfalto Borracha	470	620	54,99	50,76	33,84	21,15	12,69	8,46	8,46	4,23	16,0	16,9
	470	640	54,99	50,76	38,07	21,15	12,69	12,69	12,69	8,46	14,4	17,1
	470	660	63,45	54,99	42,3	29,61	21,15	12,69	8,46	8,46	14,2	16,7
	470	680	59,22	50,76	33,84	21,15	16,92	12,69	8,46	4,23	14,1	17,3
	470	700	50,76	46,53	29,61	16,92	8,46	8,46	4,23	0	13,9	18,1
	470	720	46,53	42,3	29,61	21,15	12,69	8,46	8,46	4,23	14,2	18,0
	470	740	46,53	42,3	25,38	12,69	4,23	0	0	0	15,8	17,5
	470	760	50,76	42,3	33,84	25,38	16,92	12,69	12,69	8,46	13,5	18,7
	470	780	42,3	38,07	25,38	16,92	8,46	4,23	4,23	4,23	14,6	17,1
	470	800	63,45	54,99	42,3	38,07	25,38	16,92	8,46	4,23	14,4	16,9
CBUQ Conv.	470	820	67,68	54,99	38,07	25,38	16,92	12,69	8,46	4,23	12,5	15,9
	470	840	71,91	63,45	42,3	29,61	21,15	8,46	4,23	4,23	13,2	15,1
	470	860	54,99	46,53	33,84	16,92	8,46	4,23	4,23	0	13,5	15,0
	470	880	50,76	42,3	21,15	12,69	8,46	4,23	0	0	14,0	14,1
	470	900	67,68	59,22	42,3	25,38	16,92	12,69	8,46	4,23	15,0	16,5
	470	920	54,99	46,53	33,84	16,92	12,69	8,46	4,23	0	14,7	18,0
	470	940	54,99	46,53	33,84	21,15	12,69	8,46	4,23	4,23	16,0	17,4
	470	960	50,76	46,53	33,84	25,38	16,92	8,46	4,23	0	16,1	17,9
	470	980	59,22	54,99	33,84	16,92	12,69	12,69	8,46	8,46	13,8	16,0
	471	0	54,99	50,76	46,53	33,84	29,61	16,92	16,92	12,69	13,0	16,0
Asfalto Borracha	471	20	54,99	46,53	29,61	21,15	16,92	8,46	8,46	0	12,4	13,3
	471	40	50,76	46,53	42,3	29,61	25,38	12,69	8,46	0	12,1	13,4
	471	60	67,68	63,45	54,99	42,3	29,61	16,92	4,23	0	13,5	15,8
	471	80	50,76	46,53	29,61	25,38	12,69	8,46	4,23	0	12,3	14,4
	471	90	marc de transição para trecho misto									
Misto	471	100	54,99	50,76	42,3	29,61	12,69	8,46	4,23	0	11,4	14,4
	471	120	67,68	59,22	42,3	29,61	16,92	8,46	4,23	0	11,6	13,0
	471	140	59,22	54,99	42,3	33,84	21,15	8,46	8,46	0	12,1	11,7
	471	160	42,3	38,07	29,61	25,38	16,92	12,69	8,46	0	11,6	12,4
	471	180	25,38	16,92	16,92	12,69	8,46	4,23	4,23	0	12,3	11,6
	471	200	63,45	54,99	38,07	33,84	21,15	8,46	4,23	0	11,7	12,7
CUBUQ inv.	471	220	59,22	50,76	38,07	29,61	16,92	8,46	4,23	0	11,5	11,4
	471	240	67,68	42,3	38,07	29,61	16,92	4,23	0	0	10,3	10,7

O processo de retranálise das camadas do pavimento é baseado na interpretação da magnitude e forma das bacias de deflexão fornecidas pelos equipamentos deflectométricos. A resposta estrutural de um pavimento à solicitação de um carregamento depende de muitos fatores, dentre eles, das relações tensão-deformação dos vários materiais que o compõem, da intensidade, duração, da frequência de aplicação desse carregamento e ainda de fatores externos como temperatura, umidade, etc.

O software SisPav utiliza como dados de entrada, levantamentos realizados com o equipamento FWD (*Falling Weight Deflectometer*). Desta forma, foi necessário converter as bacias deflectométricas levantadas com viga Benkelman, utilizando-se para tal, formulação proposta por Ramos *et al* (2003), correlacionando as deflexões através da equação 1, descrita a seguir:

$$D_{FWD} = \frac{D_{VBK}}{0,84}$$

onde: D_{FWD} : Deflexão obtida para o equipamento FWD
 D_{VBK} : Deflexão medida com a viga Benkelman

Após a obtenção das bacias corrigidas para o equipamento FWD, partiu-se para a realização da retroanálise. Os dados de entrada necessários foram à quantidade e espessuras das camadas do pavimento, as coordenadas e deflexões das bacias medidas em campo, a temperatura ambiente medida no momento do levantamento, o coeficiente de Poisson característico de cada material e o intervalo provável de variação dos módulos das camadas. Após carregar as informações e rodar a análise, o software automaticamente gera um gráfico, plotando a bacia deflectométrica medida em campo (em vermelho) sobre a bacia teórica (em azul), e também os valores dos módulos encontrados, com pode ser visto na figura 18.

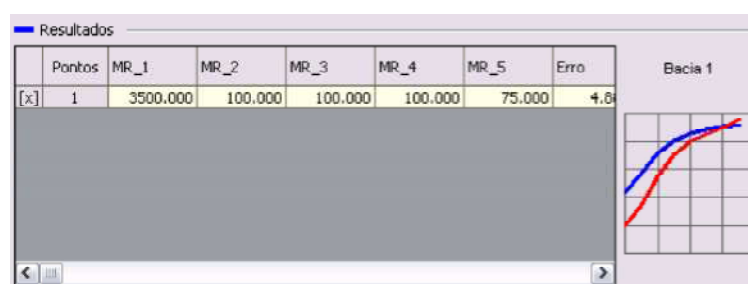


Figura 18: Apresentação dos resultados no software SisPav.

Desta forma, foi realizado o ajuste do intervalo de variação dos módulos, no intuito de obter-se o menor erro possível para as bacias teóricas, executando-se então a retroanálise para os pontos localizados num intervalo de 20 m em 20 m, para todo o trecho experimental.

A tabela 3 descreve os valores dos módulos resilientes encontrados, para todos os materiais constituintes do pavimento, nas diferentes seções transversais (estacas).

Tabela 3: Módulos resilientes retroanalizados.

Trecho	km	Estaca (m)	Mr Revest. (MPa)	Mr Base (MPa)	Mr Sub-base (MPa)	Mr Ref. do Sub-leito (MPa)	Mr Sub-leito (MPa)	Erro %
CBUQ Conv.	470	500	3500	150,0	50,0	0	50,0	2,63
	470	520	3500	100,0	100,0	0	150,0	1,18
	470	540	3500	100,0	100,0	100,0	40,0	2,50
	470	560	3000	100,0	100,0	100,0	40,0	2,59
	470	580	2500	30,0	50,0	50,0	120,0	2,54
	470	600	4000	70,0	50,0	50,0	120,0	1,32
Asfalto Borracha	470	620	4500	72,5	50,0	70,0	70,0	1,56
	470	640	4500	72,5	50,0	70,0	70,0	1,56
	470	660	4250	30,0	40,0	50,0	70,0	1,16
	470	680	5000	30,0	50,0	50,0	100,0	0,89
	470	700	4250	30,0	50,0	70,0	135,0	1,08
	470	720	4000	115,0	50,0	70,0	80,0	0,93
	470	740	3500	30,0	50,0	100,0	200,0	1,34
	470	760	5000	157,5	50,0	102,5	50,0	0,64
	470	780	5000	72,5	50,0	70,0	137,5	0,84
	470	800	4500	157,5	57,5	10,0	120,0	1,68
CBUQ Conv.	470	820	4500	30,0	30,0	30,0	100,0	0,63
	470	840	5000	105,0	10,0	10,0	142,5	0,82
	470	860	5000	30,0	30,0	40,0	150,0	1,12
	470	880	3500	72,5	30,0	72,5	150,0	0,97
	470	900	5000	140,0	30,0	30,0	70,0	1,24
	470	920	5000	30,0	30,0	30,0	130,0	0,92
	470	940	5000	115,0	30,0	30,0	100,0	0,75
	470	960	5000	150,0	45,0	10,0	150,0	1,28
	470	980	4500	10,0	200,0	200,0	80,0	1,31
	471	0	8000	50,0	50,0	50,0	40,0	1,43
Asfalto Borracha	471	20	5000	50,0	30,0	20,0	120,0	1,17
	471	40	9000	30,0	20,0	10,0	100,0	1,75
	471	60	7000	12,5	12,5	12,5	120,0	2,71
	471	80	8000	50,0	12,5	25,0	162,5	0,96
	471	100	8000	50,0	12,5	12,5	200,0	1,60
	471	90	marco de transição para o trecho misto					
Misto	471	120	8000	25,0	12,5	12,5	162,5	0,76
	471	140	9000	200,0	7,5	7,5	200,0	1,27
	471	160	7000	50,0	35,0	100,0	100,0	2,14
	471	180	5000	500,0	200,0	100,0	150,0	1,06
	471	200	7000	200,0	20,0	10,0	300,0	1,29
CBUQ Conv.	471	220	6000	157,5	20,0	20,0	170,0	1,09
	471	240	4000	200,0	20,0	25,0	150,0	2,19

Devido a grande variabilidade das espessuras, tipos de revestimentos e tamanho dos trechos, optou-se por retirar dois segmentos considerados homogêneos, para determinação dos módulos resilientes característicos. Para o revestimento Asfalto Borracha, utilizou-se o trecho que inicia na estaca 470 + 600 e termina na estaca 470 + 800. Para o CBUQ convencional utilizou-se o trecho seguinte, iniciando na estaca 470 + 800 com fim localizado na estaca 471

+ 0. As figuras 19, 20 e 21, demonstram a variação dos módulos resilientes nas diferentes camadas, dos segmentos a cima citados, respectivamente para os revestimentos, camadas granulares e sub-leito.

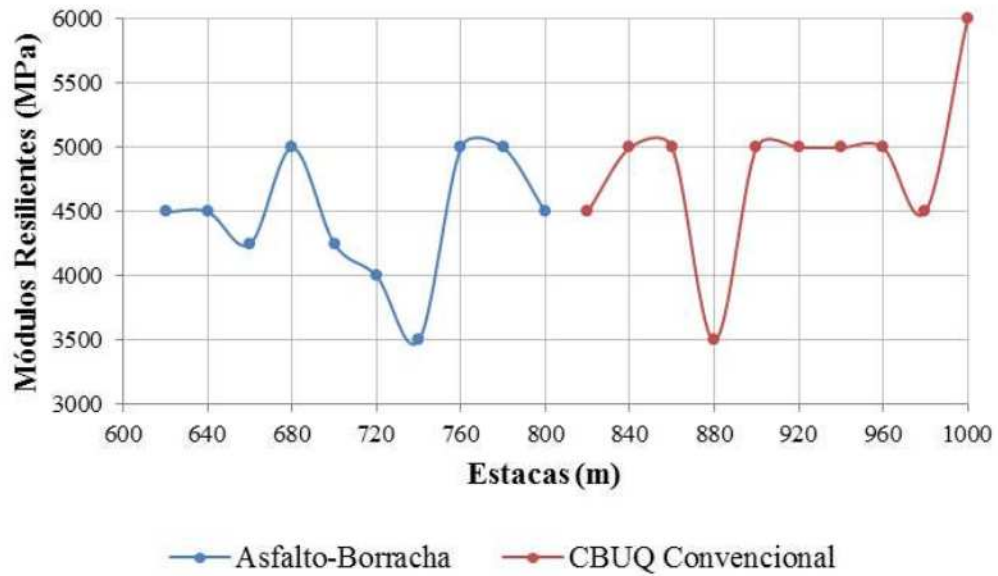


Figura 19: Mr dos revestimentos.

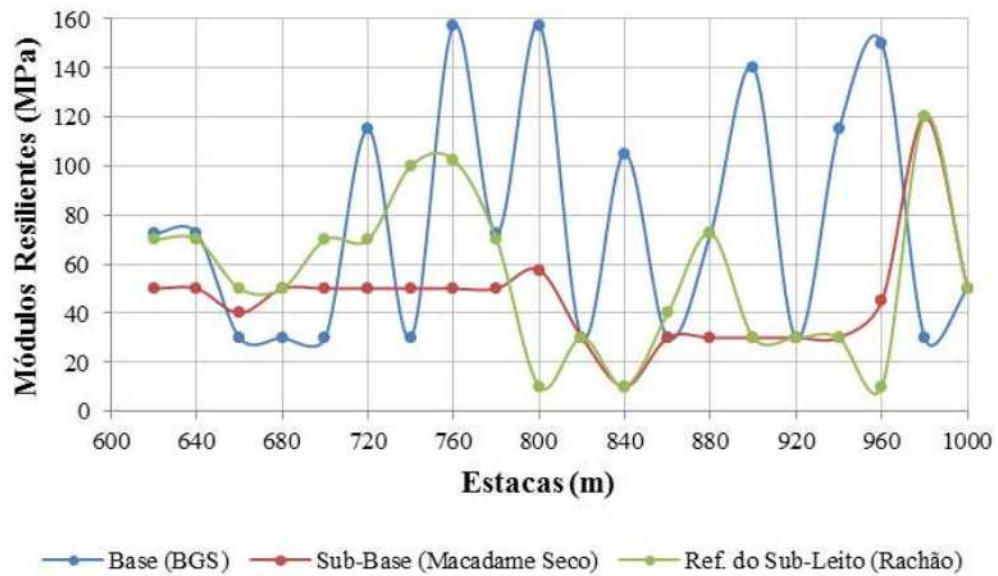


Figura 20: Mr das camadas granulares.



Figura 21: Mr do sub-leito.

A tabela 4 apresenta a média aritmética e os valores máximos e mínimos dos módulos resilientes retroanalisados, bem como o erro percentual obtido.

Tabela 4: Resumo dos módulos resilientes retroanalisados.

Descrição	Mr Méd. (MPa)	Mr Máx. (Mpa)	Mr Min. (Mpa)
Asfalto Borracha	4450	5000	3500
CBUQ Conv.	4850	6000	3500
Base	76	158	30
Sub-Base	45	120	10
Ref. do Sub-Leito	54	120	10
Sub-Leito	107	200	40
Erro (%)	Médio: 1,11	Máx: 1,68	Mín: 0,63

4.1.4 Caracterização dos Materiais

4.1.4.1 Revestimentos

Neste trecho experimental foram utilizados dois tipos de revestimentos asfálticos, sendo eles o Asfalto Borracha e o CBUQ Convencional. A tabela 5 exibe o resumo das informações extraídas dos projetos das misturas. Os projetos completos podem ser observados no anexo A.

Tabela 5: Propriedades dos revestimentos.

Revestimento	Parâmetros
Mistura Asfáltica Asfalto Borracha	Tipo de CAP = Ecoflex B
	Penetração 100g 5s 25°C 0,1mm = 49
	Ao (visc x T) = 10,53
	VTSO (visc x T) = -3,51
	VOLUME de vazios (%) = 4,24
	Teor de asfalto (%) = 6,2
	RBV (%) = 73,5
	Faixa Granulométrica (DNIT) = Faixa C
	% passando #3/4 = 100
	% passando #3/8 = 84,93
	% passando #4 = 52,01
	% passando #200 = 7,08
	Massa específica (kg/m³) = 2,554
Mistura Asfáltica CBUQ Convencional	Tipo de CAP = CAP 50/70
	Penetração 100g 5s 25°C 0,1mm = 66
	Ao (visc x T) = 10,65
	VTSO (visc x T) = -3,55
	VOLUME de vazios (%) = 3,9
	Teor de asfalto (%) = 4,8
	RBV (%) = 76,01
	Faixa Granulométrica (DNIT) = Faixa C
	% passando #3/4 = 100
	% passando #3/8 = 86
	% passando #4 = 54,5
	% passando #200 = 6,5
	Massa específica (kg/m³) = 2.591

A tabela 6 apresenta os dados dos corpos de prova extraídos do pavimento por sondagem rotativa.

Tabela 6: Corpos de prova extraídos do pavimento.

Trecho	km	Est. c	Cm d	Altur (mm)			Diâmetro	M _{ss} (g)		Gmb (kg/m ³)	VV	GC
				Inferior	Superior	Média		Ao Ar	Submersa			
CBUQ CONVENCIONAL	470	500	SUPERIOR	57	59	58	102	1115,8	680,3	2,562	5,42%	98,89%
	470	500	INFERIOR	curto	curto	curto	curto	curto	curto	curto	curto	curto
	470	520	SUPERIOR	55	57	56	102	1101,5	667,3	2,537	6,08%	97,91%
	470	520	INFERIOR	curto	curto	curto	curto	curto	curto	curto	curto	curto
	470	540	SUPERIOR	56	58	57	102	1102,74	676,5	2,587	4,22%	99,85%
	470	540	INFERIOR	56	58	57	102	1151,7	701	2,555	5,39%	98,62%
	470	560	SUPERIOR	52	53	52,5	102	1021,94	615,1	2,512	7,00%	96,95%
	470	560	INFERIOR	55	56	55,5	102	1130,61	692,9	2,583	4,37%	99,69%
	470	580	SUPERIOR	57	59	58	102	1090,44	667,4	2,578	4,57%	99,48%
	470	580	INFERIOR	54	56	55	102	1125,41	686,1	2,562	5,15%	98,87%
	470	600	SUPERIOR	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	470	600	INFERIOR	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CBUQ ECOFLEX B	470	620	SUPERIOR	52	53	52,5	102	1079,34	650,1	2,515	5,72%	98,45%
	470	620	INFERIOR	50	53	51,5	102	1126,22	696,6	2,621	1,71%	102,64%
	470	640	SUPERIOR	53	55	54	102	1088,88	655,1	2,510	5,88%	98,29%
	470	640	INFERIOR	52	55	53,5	102	1122,73	688,4	2,585	3,08%	101,21%
	470	660	SUPERIOR	55	56	55,5	102	1137,26	685,9	2,520	5,53%	98,65%
	470	660	INFERIOR	57	60	58,5	102	1227,05	748,3	2,563	3,90%	100,35%
	470	680	SUPERIOR	55	53	54	102	1129,25	683	2,531	5,12%	99,08%
	470	680	INFERIOR	56	53	54,5	102	1156,84	707,2	2,573	3,53%	100,74%
	470	700	SUPERIOR	56	57	56,5	102	1176,99	711,4	2,528	5,21%	98,98%
	470	700	INFERIOR	54	57	55,5	102	1160,05	703,6	2,541	4,71%	99,51%
	470	720	SUPERIOR	54	58	56	102	1137,64	682,8	2,501	6,22%	97,93%
	470	720	INFERIOR	57	59	58	102	1225,2	747,8	2,566	3,77%	100,49%
	470	740	SUPERIOR	57	59	58	102	1168,67	698,5	2,486	6,80%	97,32%
	470	740	INFERIOR	58	61	59,5	102	1245,56	757,9	2,554	4,23%	100,01%
	470	760	SUPERIOR	56	58	57	102	1203,14	731,5	2,551	4,35%	99,88%
	470	760	INFERIOR	50	51	50,5	102	1010,61	601,8	2,472	7,31%	96,79%
	470	780	SUPERIOR	53	55	54	102	1094,96	655,5	2,492	6,58%	97,56%
	470	780	INFERIOR	56	57	56,5	102	1178,09	713,5	2,536	4,92%	99,29%
	470	800	SUPERIOR	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	470	800	INFERIOR	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CBUQ CONVENCIONAL	470	820	SUPERIOR	56	58	57	102	1080,9	664,7	2,597	3,85%	100,23%
	470	820	INFERIOR	53	55	54	102	1064,5	662,7	2,649	1,91%	102,25%
	470	840	SUPERIOR	52	53	52,5	102	999,04	604,5	2,532	6,25%	97,73%
	470	840	INFERIOR	59	59	59	102	1189,29	732,1	2,601	3,69%	100,40%
	470	860	SUPERIOR	50	52	51	102	993,13	603,7	2,550	5,58%	98,43%
	470	860	INFERIOR	51	52	51,5	102	1047,69	647,7	2,619	3,03%	101,09%
	470	880	SUPERIOR	54	57	55,5	102	1056,68	633,1	2,495	7,64%	96,28%
	470	880	INFERIOR	56	58	57	102	1147,78	706,1	2,599	3,79%	100,30%
	470	900	SUPERIOR	54	56	55	102	1044,98	640,6	2,584	4,33%	99,74%
	470	900	INFERIOR	curto	curto	curto	curto	curto	curto	curto		curto
	470	920	SUPERIOR	54	56	55	102	1059,47	636,5	2,505	7,26%	96,67%
	470	920	INFERIOR	56	57	56,5	102	1112,04	684,4	2,600	3,72%	100,36%
	470	940	SUPERIOR	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	470	940	INFERIOR	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	470	960	SUPERIOR	57	59	58	102	1116,92	673,13	2,517	6,82%	97,14%
	470	960	INFERIOR	57	59	58	102	1078,19	656,2	2,555	5,40%	98,61%
	470	980	SUPERIOR	57	57	57	102	1095,6	668,1	2,563	5,12%	98,91%
	470	980	INFERIOR	58	59	58,5	102	1193,41	719,9	2,520	6,69%	97,27%
	471	0	SUPERIOR	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	471	0	INFERIOR	-	-	-	-	-	-	-	-	-

CUBQ ECOFLEX B	471	20	SUPERIOR	58	60	59	102	1191,3	717,3	2,513	5,76%	98,41%
	471	20	INFERIOR	curto	curto	curto	curto	curto	curto	curto		curto
	471	40	SUPERIOR	58	59	58,5	102	1160,76	687,5	2,453	8,04%	96,03%
	471	40	INFERIOR	56	58	57	102	1199,06	727,9	2,545	4,58%	99,64%
	471	60	SUPERIOR	54	56	55	102	1128,72	680,3	2,517	5,62%	98,56%
	471	60	INFERIOR	54	57	55,5	102	1186,2	725	2,572	3,56%	100,70%
	471	80	SUPERIOR	53	54	53,5	102	1119,13	678,3	2,539	4,81%	99,40%
	471	80	INFERIOR	57	59	58	102	1231,96	751,8	2,566	3,80%	100,46%
CUBQ MISTO	471	100	SUPERIOR	misto	misto	misto	misto	misto	misto	misto		misto
	471	100	INFERIOR	57	58	57,5	102	1195,78	728,6	2,560	4,03%	100,22%
	471	120	SUPERIOR	misto	misto	misto	misto	misto	misto	misto		misto
	471	120	INFERIOR	58	59	58,5	102	1236,3	759,9	2,595	2,70%	101,61%
	471	140	SUPERIOR	misto	misto	misto	misto	misto	misto	misto		misto
	471	140	INFERIOR	57	60	58,5	102	1214,97	739,6	2,556	4,17%	100,07%
	471	160	SUPERIOR	misto	misto	misto	misto	misto	misto	misto		misto
	471	160	INFERIOR	55	57	56	102	1129,6	690	2,570	3,65%	100,61%
	471	180	SUPERIOR	misto	misto	misto	misto	misto	misto	misto		misto
	471	180	INFERIOR	54	57	55,5	102	1161,24	705,1	2,546	4,54%	99,68%
	471	200	SUPERIOR	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	471	200	INFERIOR	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CONV.	471	220	SUPERIOR	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	471	220	INFERIOR	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	471	240	SUPERIOR	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	471	240	INFERIOR	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Foram enviados ainda, uma seleção de corpos de prova extraídos da pista, moldados em laboratório e também massa asfáltica usinada dos diferentes tipos de revestimentos, para a Universidade de São Paulo - USP, no intuito de realizar-se ensaios de módulo de resiliência condicionado, de resistência à tração por compressão diametral, e também de deformações permanentes. Os ensaios estão em andamento.

4.1.4.2 Camadas Granulares

As camadas granulares do trecho experimental são divididas em três materiais distintos, sendo eles:

- Brita Graduada Simples (Base);
- Macadame Seco (Sub-base);
- Rachão (Reforço do sub-leito);

A camada de base, constituída por brita graduada simples, possui a função de conceder suporte estrutural aliviando as tensões nas camadas inferiores, e com a sua rigidez minimizar as tensões de flexão no revestimento. Seus principais parâmetros de classificação são o ISC/CBR, a plasticidade, o Mr e a granulometria. Para a construção do trecho experimental, estes parâmetros foram observados, através da especificação de serviço ES 303/97.

A camada de sub-base, constituída por macadame seco (material de granulometria grosseira estabilizado com pó de pedra) tem como objetivo aliviar as pressões das camadas superiores, distribuindo-as adequadamente ao reforço do sub-leito, e também distribuir a drenagem sub-superficial no pavimento. Os principais parâmetros para caracterização e controle são o ISC/CBR, a plasticidade, o Mr e a granulometria. Para a construção do trecho experimental, estes parâmetros foram observados, através da especificação de serviço ES 301/97, do DNIT.

Para caracterização da base, coletou-se uma amostra diretamente da pista, no momento da execução, sendo posteriormente realizados os seguintes ensaios:

- Granulometria por peneiramento (NBR 7217/87);
- Curva de compactação (Proctor - NBR 7182/86);
- CBR - Expansão por saturação - Índice de suporte Califórnia (NBR 9885/87).

A figura 22 apresenta os resultados obtidos para os ensaios de granulometria por peneiramento.

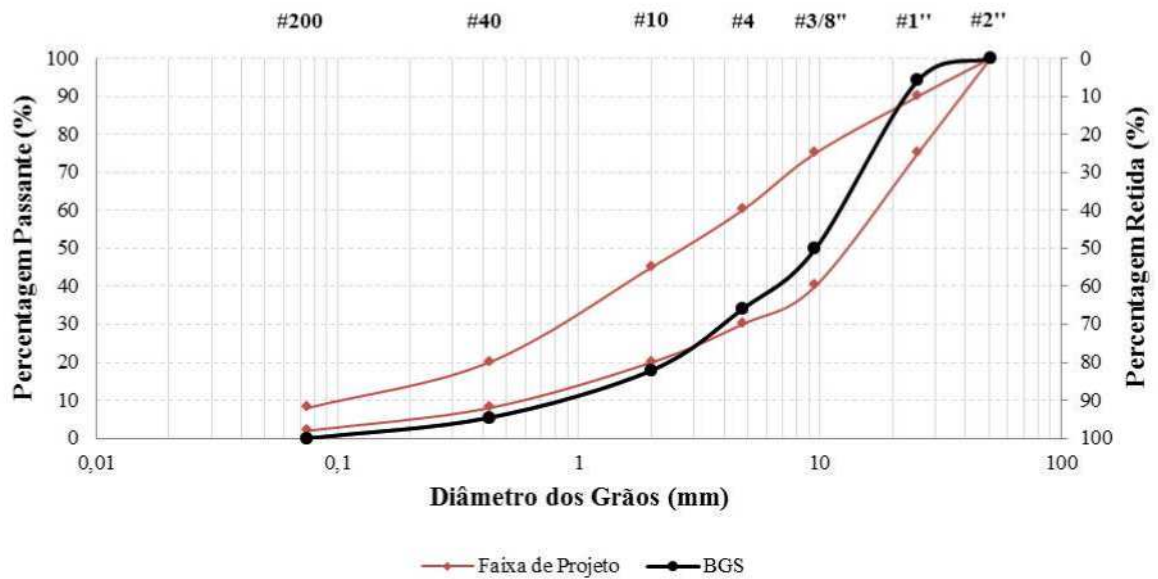


Figura 22: Granulometria por peneiramento.

A figura 23 demonstra os resultados obtidos para os ensaios de Proctor.

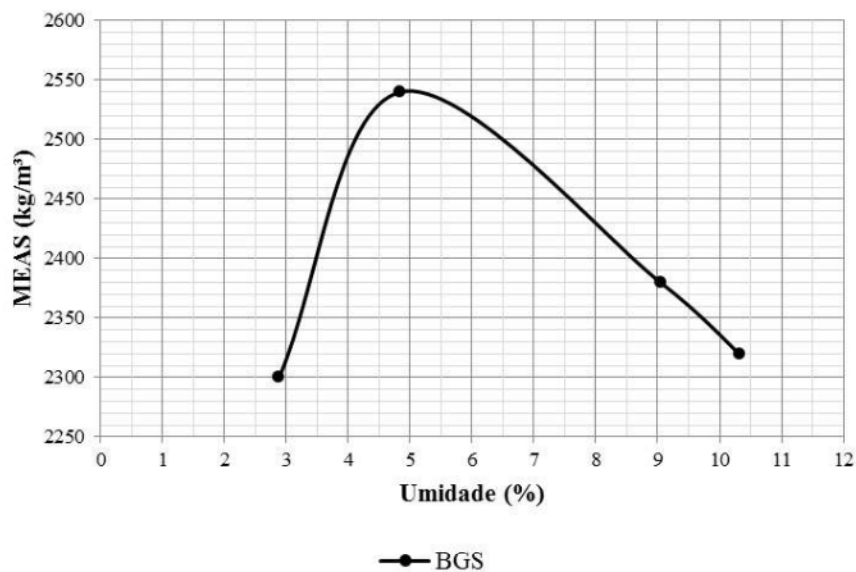


Figura 23: Resultado para o ensaio de Proctor.

O ensaio de Proctor apresentou uma umidade ótima média de aproximadamente 4,8 % e massa específica aparente seca (MEAS) em torno de 2540 kg/m³.

A figura 24 demonstra o resultado obtido para a curva de pressão x penetração, relativo ao ensaio do índice de suporte Califórnia - ISC/CBR.

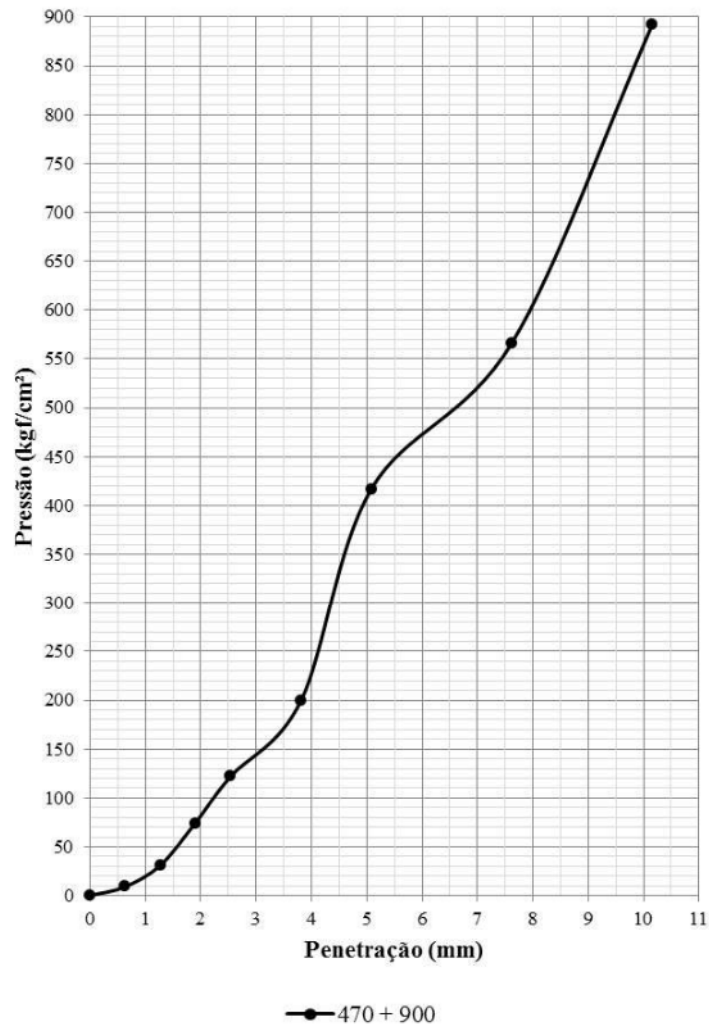


Figura 24: Curva de pressão x penetração - ISC/CBR.

Obeve-se para o ensaio de ISC/CBR um valor de aproximadamente 403 %, com expansão de 0,03 %. A tabela 7 apresenta o resumo dos ensaios realizados para a base.

Tabela 7: Caracterização da base.

Ensaio	Parâmetros	Brita Graduada Simples
Granulometria por Peneiramento	Passante # 2" (%)	100,00
	Passante # 1" (%)	94,18
	Passante # 3/8" (%)	49,83
	Passante # 4 (%)	33,96
	Passante # 10 (%)	17,89
	Passante # 40 (%)	5,43
	Passante # 200 (%)	0,00
Proctor	MAES (kg/m³)	2540
	Umidade Ótima (%)	4,80
CBR	Expansão (%)	0,03
	CBR (%)	403

A camada de reforço do sub-leito, constituída por rachão (material resultante da primeira britagem, granulometria grosseira, variando em torno de 150 mm), tem como objetivo aumentar a capacidade portante do sub-leito. Esta camada é variável longitudinalmente, servindo também como regularização. Os principais parâmetros para caracterização e controle são o ISC/CBR, a expansibilidade e o grau de compactação. Para a construção do trecho experimental, estes parâmetros foram observados, através da especificação de serviço ES 300/97, do DNIT.

Além de atender as especificações das normas de serviço do DNIT, as camadas granulares passaram por um controle deflectométrico após sua construção, que pode ser observado na tabela 8.

Tabela 8: Levantamento deflectométrico das camadas granulares.

km	Estaca(m)	Do (mm/100)	0,25 m (mm/100)	0,50 m (mm/100)	0,75 m (mm/100)	1,00 m (mm/100)	1,25 m (mm/100)	1,50 m (mm/100)	1,75 m (mm/100)
470	620	500	42,30	80,37	80,37	80,37	80,37	80,37	80,37
470	660	500	42,30	76,14	84,60	84,60	84,60	84,60	84,60
470	700	500	59,22	76,14	80,37	84,60	84,60	84,60	84,60
470	740	500	16,92	42,30	59,22	67,68	67,68	67,68	67,68
470	780	500	21,15	67,68	71,91	84,60	84,60	84,60	84,60
471	40	500	59,22	80,37	84,60	84,60	84,60	84,60	84,60
471	80	500	21,15	63,45	71,91	76,14	84,60	84,60	84,60
471	120	500	38,07	84,60	84,60	88,83	88,83	88,83	88,83
471	160	500	54,99	67,68	71,91	76,14	76,14	76,14	84,60

Segundo o Manual de Pavimentação (2006) do DNIT, deflexões em bases granulares na ordem de 80 mm^{-2} indicam boas condições de execução para pavimentos novos. Para este levantamento obteve-se uma deflexão média de $82,72 \text{ mm}^{-2}$, um pouco acima do recomendado, no entanto na mesma ordem de grandeza.

4.1.4.3 Sub-leito

Para caracterização do solo do sub-leito, coletou-se quatro amostras de solo, ao longo dos 740 metros da terceira pista, nas estacas 470+540, 470+700, 470+900 e 471+100, sendo posteriormente realizados os seguintes ensaios:

- Limites de Atterberg (LL - NBR 6459/84; LP - NBR 7180/84);
- Granulometria por peneiramento (NBR 7182/82);
- Curva de compactação (Proctor - NBR 7182/86);
- CBR - Expansão por saturação - Índice de suporte Califórnia (NBR 9885/87).

A figura 25 apresenta os resultados obtidos para os ensaios de limite de liquidez, relativos aos limites de Atterberg.

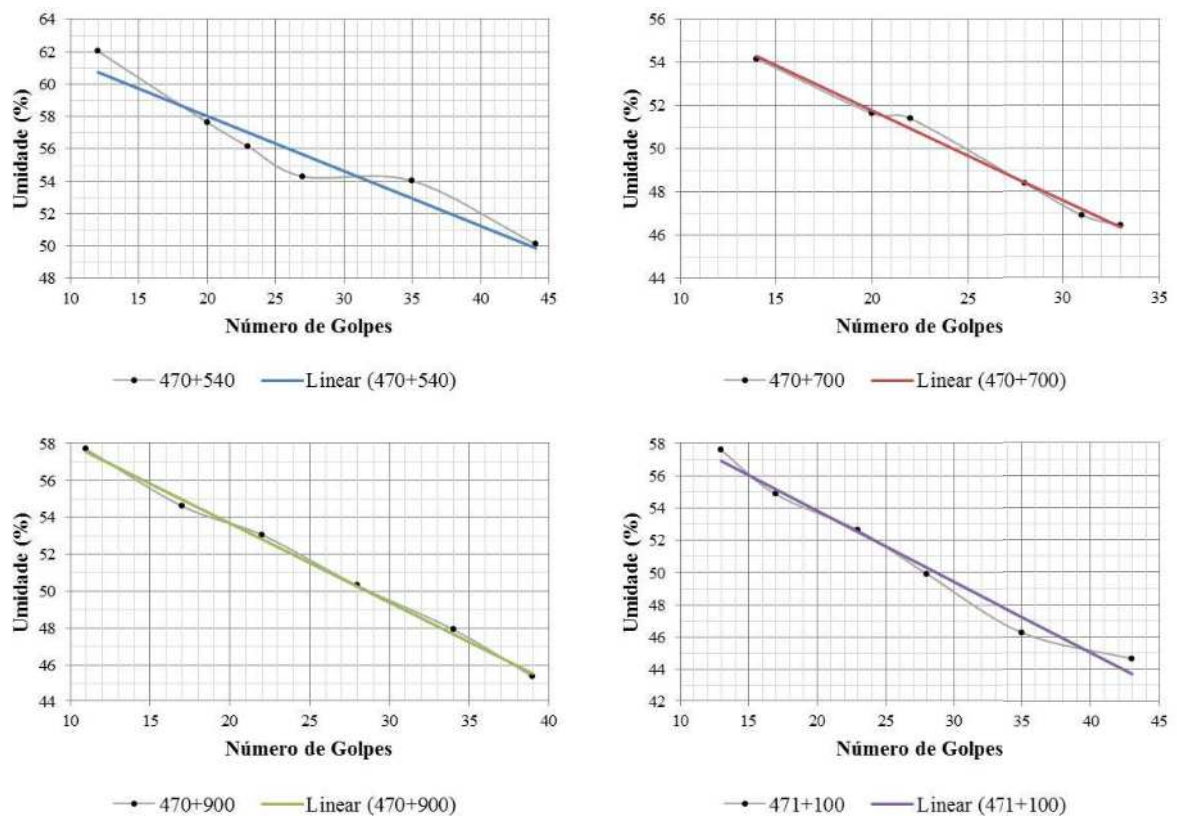
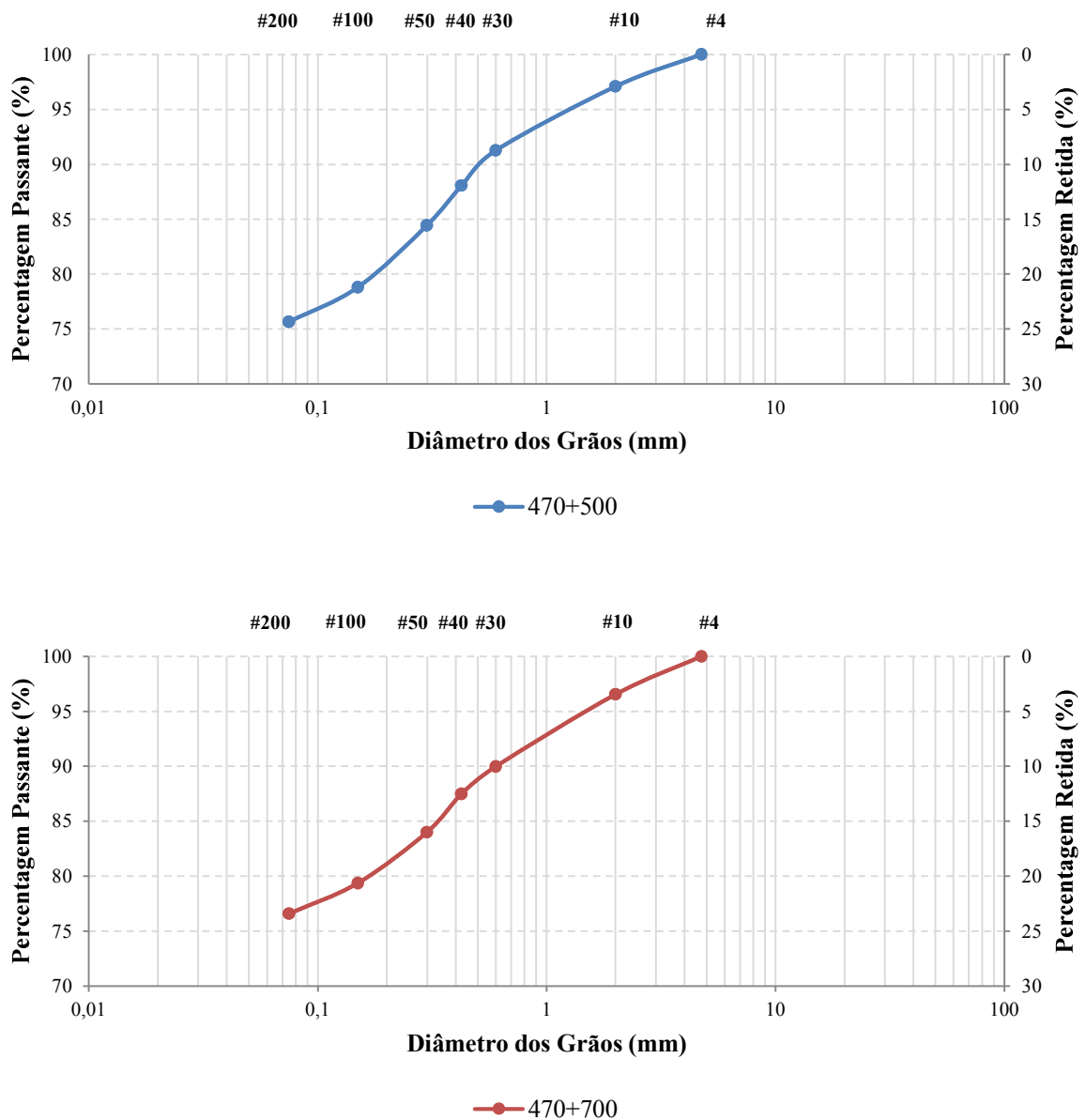


Figura 25: Limites de liquidez.

Os limites de plasticidade encontrados foram de 37 %, 29 %, 31% e 29%, respectivamente para os pontos de coletas nas estacas 470+540, 470+700, 470 +900 e 471+100.

A partir dos resultados para os limites de Atterberg, pode-se determinar o índice de plasticidade das amostras (IP). Para este conjunto de amostras do sub-leito, obteve-se um IP médio de 21 %.

A figura 26 apresenta os resultados obtidos para os ensaios de granulometria por peneiramento.



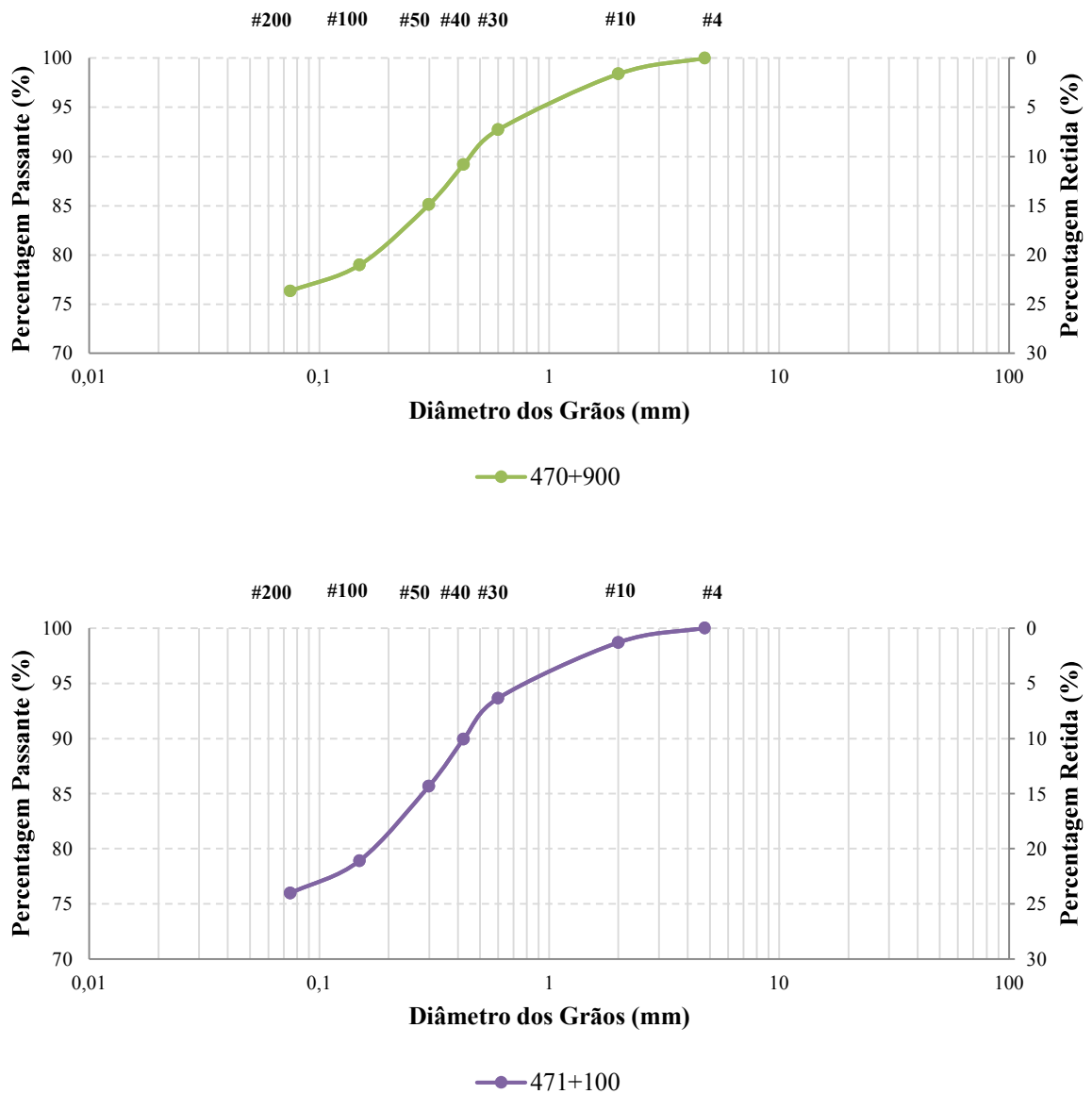


Figura 26: Granulometria por peneiramento.

Todas as amostras demonstraram comportamento similar para granulometria, com percentagem de finos (passante na peneira 200) sempre acima de 75 %.

A figura 27 demonstra os resultados obtidos para os ensaios de Proctor.

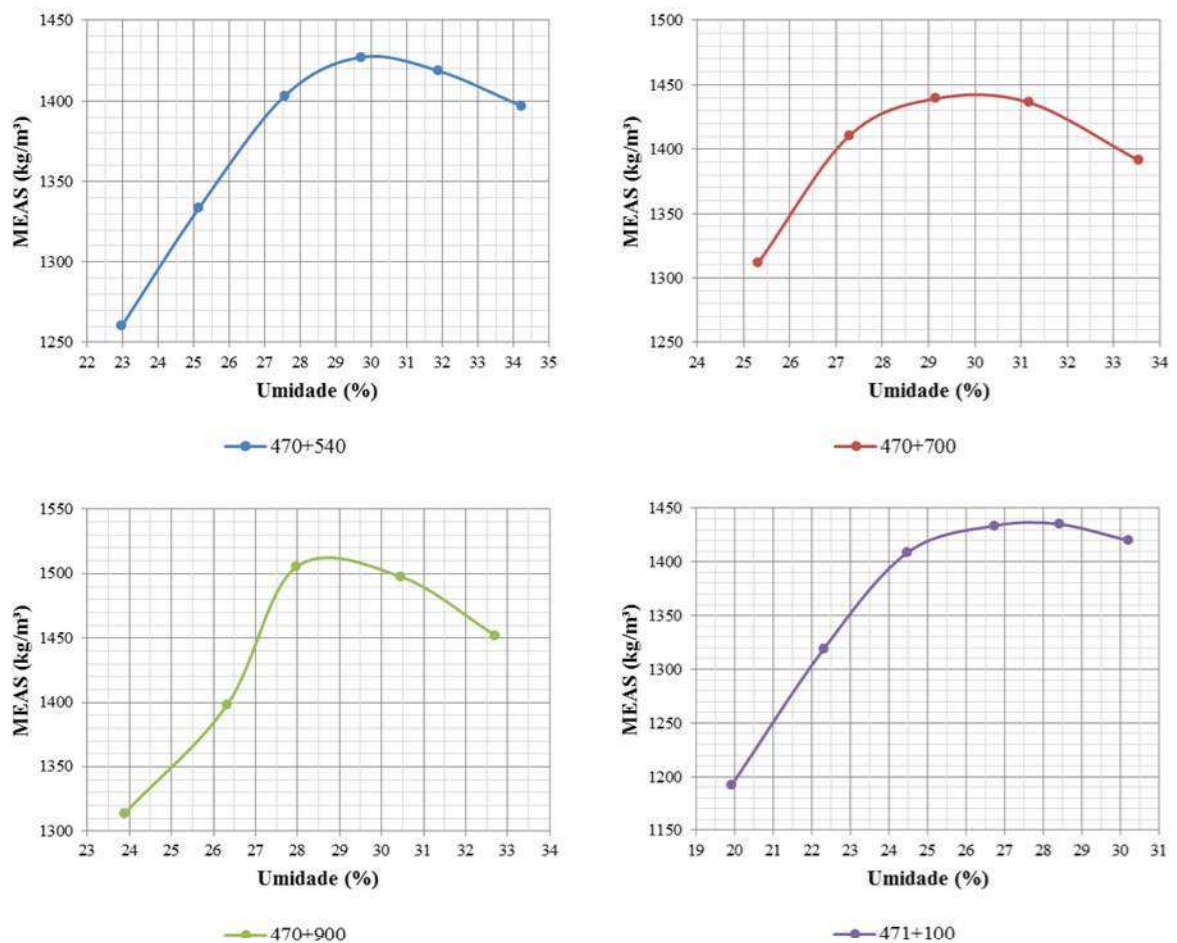


Figura 27: Resultados para os ensaios de Proctor.

Novamente no ensaio de Proctor as amostras demonstraram similaridade, com a umidade ótima média de aproximadamente 29% e massa específica aparente seca (MEAS) em torno de 1455 kg/m^3 .

A figura 28 demonstra os resultados obtidos para a curva de pressão x penetração, relativo aos ensaios do índice de suporte Califórnia - ISC/CBR. A NBR 9885/87 impõe um limite de 50 kg/m^3 na diferença entre a massa específica aparente seca (MEAS) obtida no ensaio de Proctor e a MEAS obtida no ensaio de ISC/CBR, desta forma, os pontos das estacas 470+540 e 470+700 foram retirados do conjunto de amostras.

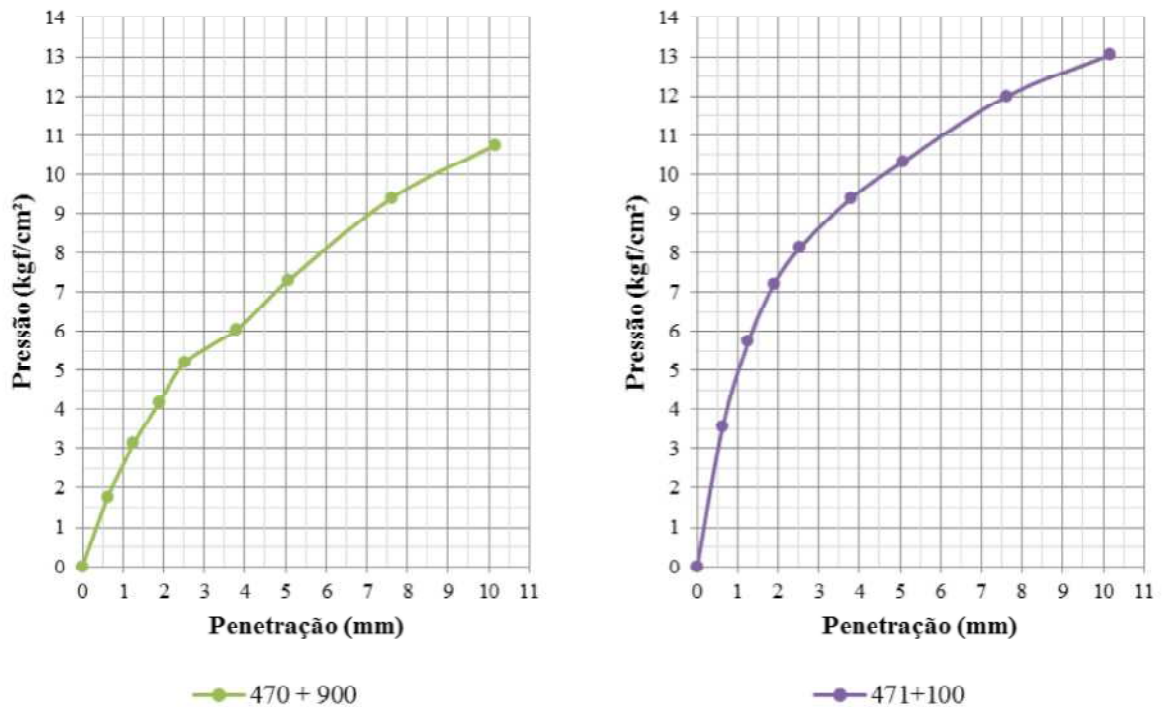


Figura 28: Curva de pressão x penetração - ISC/CBR.

Obeve-se para o ensaio de ISC/CBR um valor médio de 9,67 % (determinação 1: 7,5%; determinação 2: 11,3%). Para fins de validação da retroanálise, Papagianakis e Masad (2008) propõe a formulação demonstrada pela equação 2, correlacionando o módulo resiliente e o ISC/CBR.

$$M_r = 1500 \times ISC/CBR$$

onde: M_r : Módulo resiliente em psi;
 ISC/CBR : Índice de suporte Califórnia em %.

Realizando-se as devidas conversões, obtém-se para um ISC/CBR médio de 9,67 % um módulo resiliente de aproximadamente 100 MPa, sendo o encontrado pela retroanálise de 107 MPa, vindo desta forma, a corroborar com a validação dos resultados obtidos na retroanálise previamente demonstrada.

A tabela 9 apresenta o resumo dos ensaios realizados para o sub-leito.

Tabela 9: Caracterização do sub-leito.

Ensaio	Parâmetros	Pontos de Coleta			
		470+540	470+700	470+900	471+100
Limites de Atterberg	Limite de Liquidez (%)	56	50	52	52
	Limite de Plasticidade (%)	37	29	31	29
	Índice de Plasticidade (%)	19	21	21	23
Granulometria por Peneiramento	Passante # 4 (%)	100,00	100	100	100
	Passante # 10 (%)	97,08	96,55	98,40	98,68
	Passante # 30 (%)	91,26	89,98	92,70	93,63
	Passante # 40 (%)	88,06	87,48	89,16	89,94
	Passante # 50 (%)	84,44	84,00	85,09	85,67
	Passante # 100 (%)	78,81	79,36	78,97	78,91
	Passante # 200 (%)	75,65	76,59	76,32	75,99
Proctor	MAES (kg/m ³)	1430	1440	1510	1440
	Umidade Ótima (%)	30	30	28,5	28
CBR	Expansão (%)	-	-	0,26	0,32
	CBR (%)	-	-	7,55	11,78

A partir dos resultados obtidos nos ensaios, realizou-se a classificação do solo, de acordo com o sistema de classificação unificado e o sistema rodoviário. No sistema unificado todos os solos são identificados pelo conjunto de duas letras, sendo que a letra inicial corresponde ao tipo principal do solo, e a segunda letra a dados complementares. Todas as amostras do sub-leito foram classificadas como MH que corresponde a um silte de alta compressibilidade. No sistema rodoviário, os solos são identificados por um conjunto de letras e algarismos. Todas as amostras do sub-leito enquadraram-se no conjunto A-7-5.

Embora discutíveis, os sistemas de classificação são necessários para a transmissão do conhecimento, relatando as experiências de forma prática e sucinta. Desta forma, para efeito comparativo, Diemer *et al* (2008), classificou oito amostras de solo residual basáltico ijuiense, todas como MH e A-7-5, respectivamente para o sistema unificado e rodoviário.

4.2 Tráfego

Os estudos de tráfego na BR-285 visam detectar propriedades e características do fluxo de veículos no segmento, determinar os indicadores dos níveis de serventia, bem como as condições operacionais e funcionais para elaboração dos projetos de engenharia para restauração do pavimento.

Os levantamentos foram realizados pelas empresas consultoras ECOPLAN Engenharia e SKILL Engenharia, seguindo as indicações do edital de licitação, bem como as recomendações da norma IS-201 - Estudos de Tráfego em Rodovias (Área Rural).

Os relatórios foram fornecidos pelo DNIT-UL de Cruz Alta - RS, sendo a coleta de dados realizada no posto 2, entre Ijuí e Santo Ângelo, km 475 + 560. Para a caracterização do tráfego foram realizadas contagens volumétricas classificatórias, durante sete dias, ininterruptamente, durante 24 horas por dia, sendo os veículos discretizados em categorias, sendo elas: automóveis, utilitários, caminhões e ônibus. Cada categoria foi subdividida em seções, de acordo com a quantidade e tipo de eixos dos veículos.

Após coletados os dados, com as devidas formulações foi obtido o número “N” de operações de um eixo padrão (8,2 toneladas), o qual é utilizado para definir o número de veículos que transita pela rodovia em termos médios. A seguir apresenta-se as figuras 29 e 30, que demonstram o aumento do número “N” ao longo do tempo, a partir do mês de abertura do tráfego, para os métodos USACE e AASHTO, adotando-se para tal uma taxa linear de crescimento de 3% ao ano, de acordo com o projeto de restauração da rodovia.

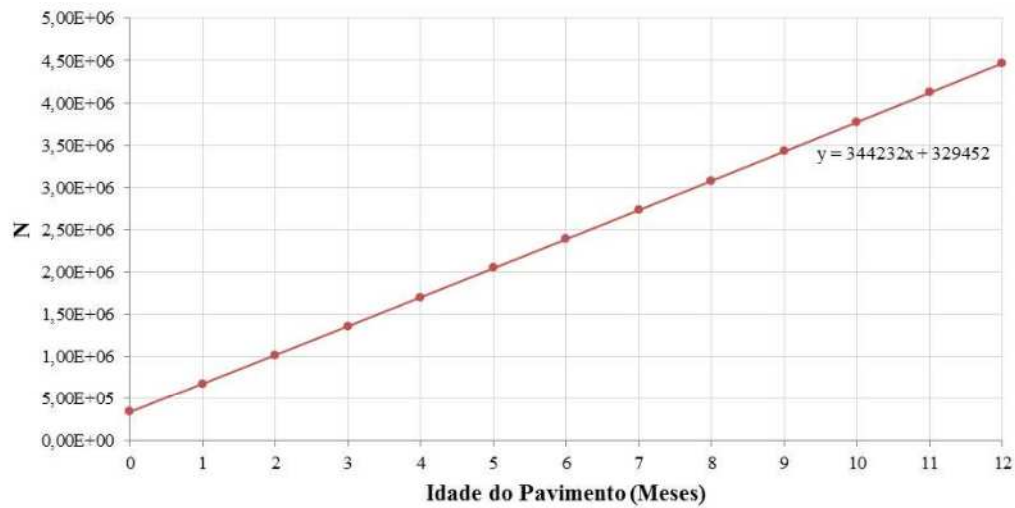


Figura 29: Número "N" acumulado - USACE.

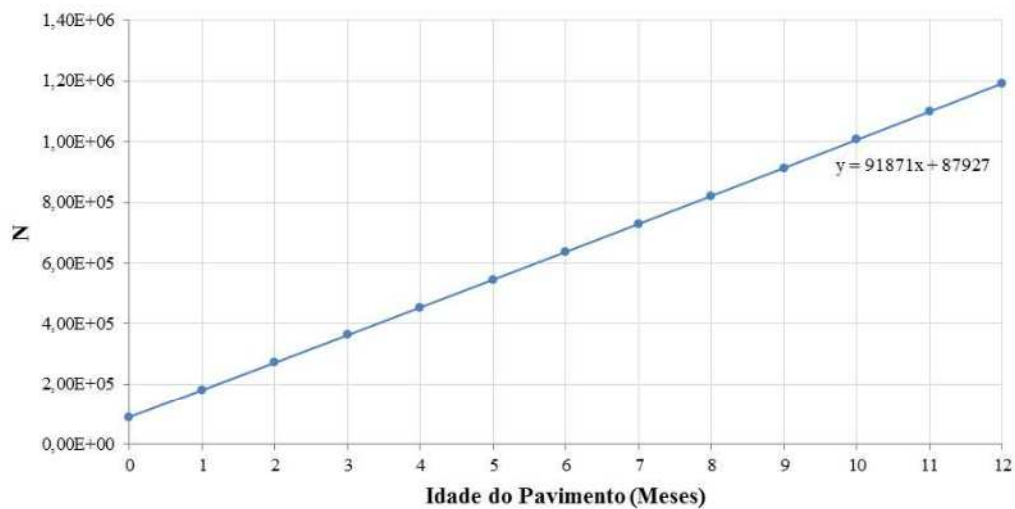


Figura 30: Número "N" acumulado - AASHTO.

Os gráficos acima demonstram o número de operações do eixo padrão em um sentido da rodovia. Para a determinação do percentual de veículos que utilizam a terceira faixa, foram realizadas duas contagens classificatórias de 4 horas cada, obtendo-se então, uma taxa média aproximada de 91,7 % de utilização dos veículos que compõe o número "N". Informações detalhadas sobre os dados de tráfego podem ser obtidas no Anexo B.

4.3 Monitoramento

4.3.1 Afundamento na trilha de roda

Os afundamentos de trilha de roda são deformações permanentes ocorridas no pavimento deixando como consequência um sulco onde passam os pneus dos veículos. São causadas pela consolidação inicial relativo ao grau de compactação das camadas granulares, por deformações estruturais e deformações plásticas.

O afundamento de trilha de roda pode ser levantado por dois procedimentos diferentes, sendo eles, o perfilômetro a laser e a treliça de alumínio. Para este levantamento foi utilizado o segundo procedimento, em função do menor custo e facilidade de operação. Este método é regido pela norma DNIT 006/2003-PRO, que determina a utilização de uma treliça de alumínio, padronizada, tendo 1,20 m de comprimento na base, dotada de régua móvel instalada em seu ponto médio, que permite medir, em milímetros, as flechas de trilha de roda. A figura 31 demonstra o equipamento.

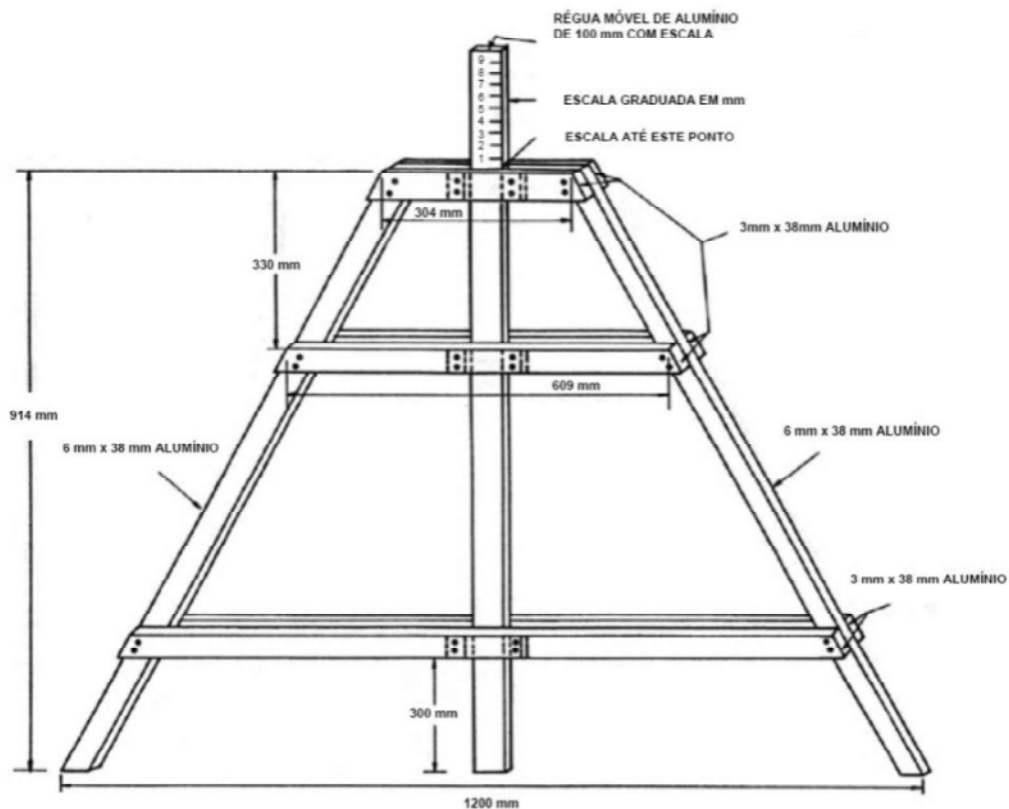


Figura 31: Treliça de Alumínio para medição de ATR.

Desta forma, realizou-se dois levantamentos de ATR, com um intervalo de 50 dias entre as medições. Foram avaliadas todas as seções (estacas) de 20 em 20 metros, com medições nas trilhas internas (TI) e externas (TE) da 3ª pista, como mostra a tabela 10.

Tabela 10: ATR verificado no trecho experimental.

Trecho	km	Estaca (m)	26/09/2010		14/11/2010	
			TI (mm)	TE (mm)	TI (mm)	TE (mm)
CBUQ Conv.	470	500	0,0	0,0	0,0	0,0
	470	520	0,0	0,0	0,0	0,0
	470	540	0,0	0,0	1,0	0,0
	470	560	0,0	0,0	1,0	0,0
	470	580	4,0	0,0	6,0	0,0
	470	600	3,0	0,0	9,0	5,0
Asfalto Borracha	470	620	1,0	0,0	4,0	0,0
	470	640	2,0	0,0	9,0	2,0
	470	660	2,0	0,0	4,0	3,0
	470	680	1,0	3,5	4,0	5,0
	470	700	3,5	0,0	7,0	0,0
	470	720	3,0	4,5	11,0	14,0
	470	740	4,0	3,0	10,0	3,0
	470	760	3,0	3,5	10,0	9,0
	470	780	2,0	3,5	8,0	13,0
	470	800	5,0	3,0	9,0	7,0
CBUQ Conv.	470	820	10,0	4,0	14,0	8,0
	470	840	9,0	9,0	15,0	14,0
	470	860	5,0	3,0	8,0	6,0
	470	880	5,0	2,0	8,0	6,0
	470	900	5,0	3,0	9,0	6,0
	470	920	5,0	4,0	8,0	7,0
	470	940	5,0	6,0	8,0	8,0
	470	960	4,0	10,0	6,0	11,0
	470	980	5,0	10,0	6,0	12,5
	471	0	3,5	5,0	7,0	8,0
Asfalto Borracha	471	20	3,0	0,0	6,0	1,0
	471	40	2,0	2,0	3,0	3,0
	471	60	1,0	0,0	3,0	1,0
	471	80	1,0	0,0	1,0	6,0
	471	100	3,0	4,0	5,0	8,0
	471	90	marco de transição para o trecho misto			
Misto	471	120	3,0	3,0	4,0	5,0
	471	140	1,5	3,0	2,0	5,0
	471	160	1,0	0,0	2,0	2,0
	471	180	2,0	0,0	2,0	0,0
	471	200	0,0	0,0	0,0	0,0
CBUQ Conv.	471	220	0,0	0,0	0,0	2,0
	471	240	0,0	0,0	0,0	0,0

A figura 32 demonstra a magnitude das deformações, bem como a tendência e a evolução das mesmas. Nota-se um aumento médio de aproximadamente 4 mm de ATR, no período entre as medições.

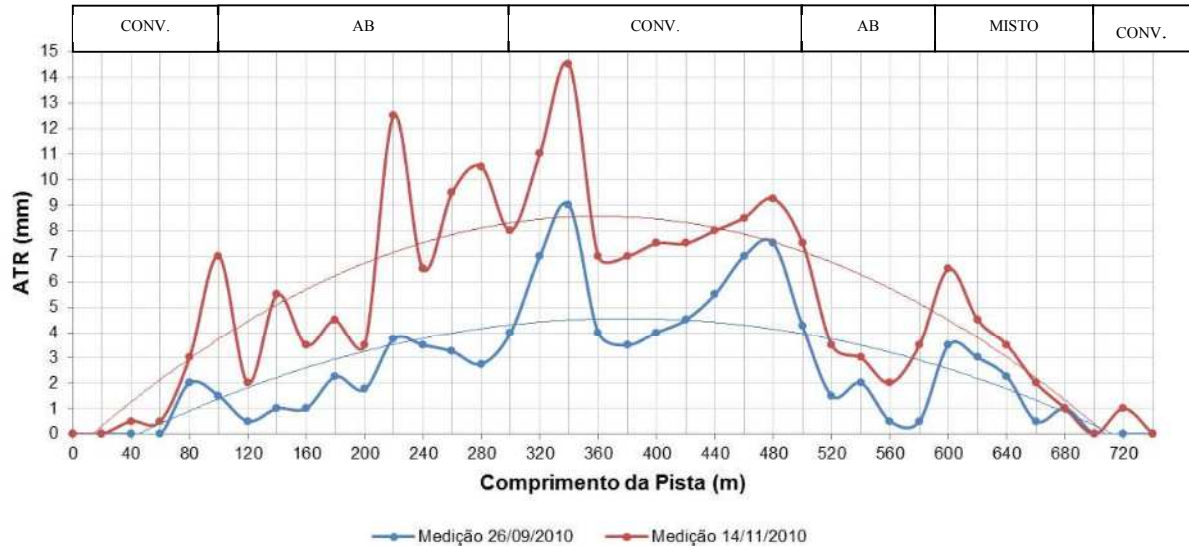


Figura 32: Evolução de ATR.

4.3.2 Ruído nos diferentes revestimentos

O modal rodoviário exerce um papel indiscutível na economia do país e no dia-a-dia das pessoas, sendo que 63% das cargas e 97% dos passageiros são transportados por meios rodoviários, de acordo com Specht *et al* (2009). Recentemente, o Brasil tem experimentado um expressivo aumento nas taxas de motorização, passando de 122 habitantes/veículo na década de 1950, para 6 habitantes/veículo em 1995, conforme descrito pela ANTP (2003), fato este, que exhibe o agravamento do problema do tráfego, principalmente nos grandes centros urbanos, tendo a poluição sonora, gerada pelo tráfego, relevante participação na questão (Soares, 2010).

De acordo com a Specht *et al* (2009), o ruído dos veículos é uma combinação do sistema de motor, escapamento, sistema de transmissão, efeito aerodinâmico e contato pneu/pavimento, significando este último o de maior contribuição, conforme ilustra a figura 33.

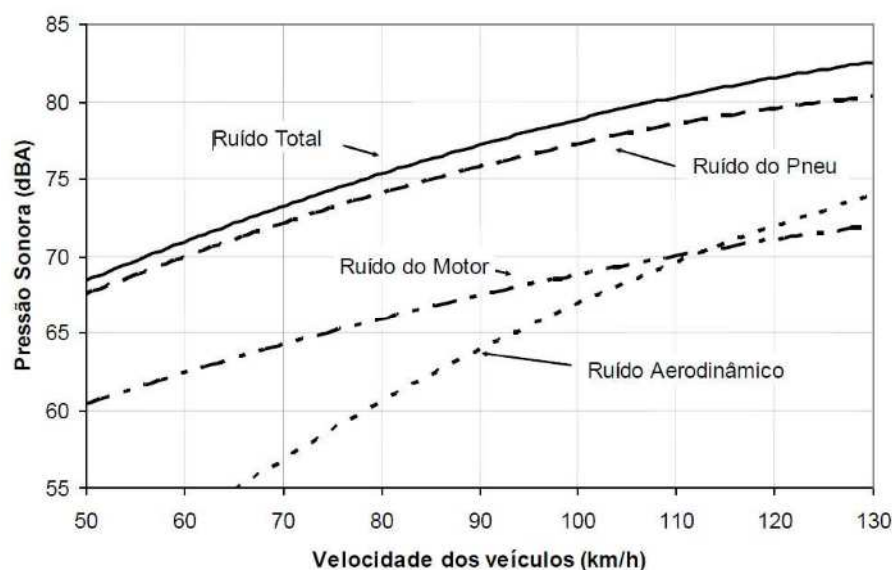


Figura 33: Influência dos diversos fatores no ruído.

Fonte: Specht *et al.*, 2009.

A NBR-10151/2000 fixa como valores máximos de ruído flutuante para áreas externas no período diurno, 40 dBA para sítios e fazendas, e até 70 dBA para áreas predominantemente industriais. O ruído pode ser resolvido ou amenizado, com práticas de engenharia, dentre elas soluções no próprio revestimento do pavimento, utilizando-se técnicas já pesquisadas no meio acadêmico.

Neste trecho experimental foi avaliado o ruído causado pelo tráfego, nos dois tipos de revestimentos (CBUQ Convencional e AB), através do SPBI (*Statistical Pass-By Index*), adotando-se a metodologia prescrita na Norma ISO 11819-1, utilizando o processo *pass-by*, no qual um decibelímetro é instalado na lateral da via e mede o ruído máximo causado pela passagem de um veículo. A figura 34 demonstra os índices encontrados para os dois tipos de revestimentos.

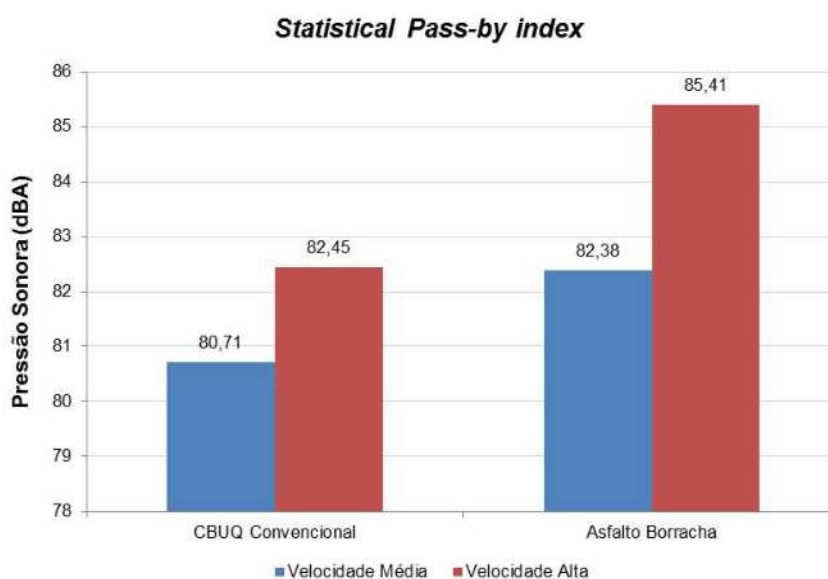


Figura 34: Valores de SPBI para os diferentes revestimentos testados.

O segmento revestido em AB apresentou maiores valores de ruído médio (83,93 dBA), entre velocidade média e alta, seguido do CBUQ Convencional (82,81 dBA), estando ambos acima do limite preconizado pela NBR 10151/2000.

4.3.3 Macrotextura dos diferentes revestimentos

As irregularidades superficiais dos pavimentos influenciam de sobremaneira o desempenho de um pavimento, desde o conforto de rolamento e a segurança em pista molhada até o desgaste do sistema de suspensão e a deterioração e danificação de cargas, além de aspectos relacionados com ruído. Segundo Specht *et al* (2007) a macrotextura de um pavimento consiste nas asperezas superficiais causadas pelas protuberâncias do agregado com comprimento de onda de 0,5 a 50 mm e amplitude de 0,2 a 10 mm.

A macrotextura é relacionada ao atrito em altas velocidades; a capacidade de o pavimento drenar a água superficial evitando o fenômeno da hidroplanagem; a formação de spray; a formação do espelho noturno; o aumento no consumo de combustível; o desgaste dos pneumáticos e a excessivos níveis de ruído.

A maneira mais difundida de medição da macrotextura é através do ensaio de mancha (ou altura) de areia normalizado pela norma ASTM D965-96. Desta forma, foram realizados

ensaios para determinação da macrotextura dos diferentes tipos de revestimentos do trecho experimental. A figura 35 apresenta os equipamentos utilizados.



Figura 35: Equipamentos utilizados no ensaio de mancha de areia.

Na Figura 36, apresentam-se graficamente as medidas de macrotextura para cada ensaio realizado, nos diferentes tipos de revestimentos.

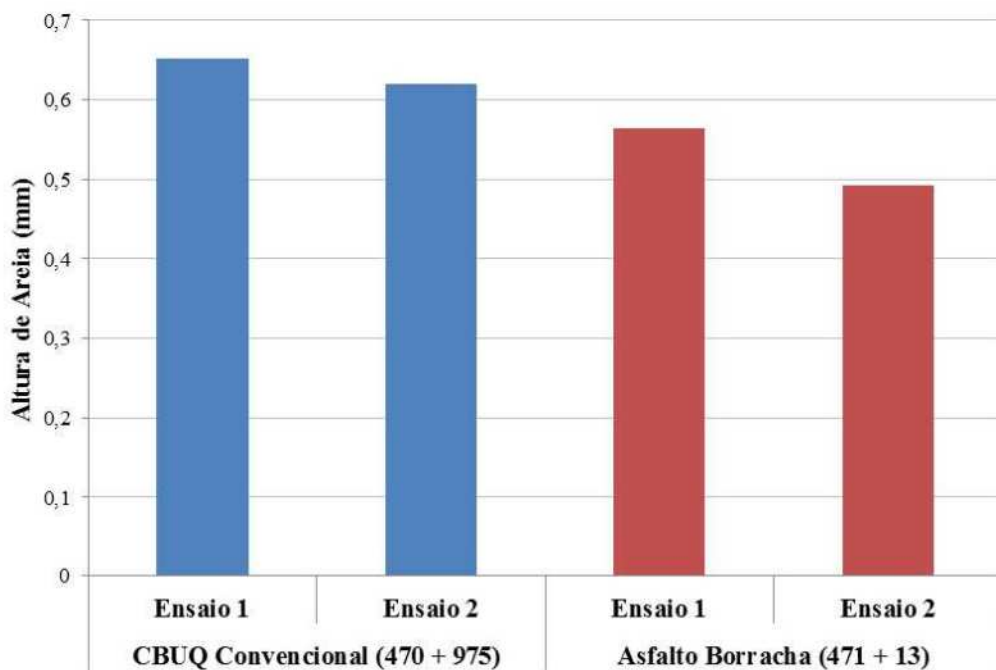


Figura 36: Macrotextura dos diferentes tipos de revestimentos.

Determinaram-se a média aritmética dos valores da altura de areia (HS) e do desvio padrão (DP) para cada tipo de superfície de rolamento. Para verificar a homogeneidade da amostra, calculou-se o coeficiente de variação (CV). A tabela 11 demonstra os resultados obtidos para caracterização da macrotextura dos revestimentos monitorados e a verificação quanto à homogeneidade das amostras.

Tabela 11: Resumo dos resultados da macrotextura.

Tipo de Revestimento	Média HS (mm)	Média DP (mm)	Média CV (%)
CBUQ Convencional	0,635	0,054	8,59
Asfalto Borracha	0,528	0,032	6,29

Os resultados apresentados na tabela 11 mostram que a variabilidade da macrotextura é aceitável nos dois tipos de revestimentos, sendo inferior a 10%. Desta forma, existe um padrão de homogeneidade destes materiais quanto à macrotextura da superfície do pavimento. Ainda, classificaram-se os resultados de macrotextura adotando-se as classes indicadas no Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos (DNIT, 2006), estando os dois tipos de revestimentos dentro da classe média ($0,40 \text{ mm} < \text{HS} < 0,79 \text{ mm}$).

4.4 Simulações de desempenho

A partir dos dados coletados durante a execução do trecho experimental, realizaram-se simulações de desempenho, no intuito de prever a vida útil média do pavimento. Para isto, utilizou-se dois softwares de dimensionamento mecanístico-empíricos de pavimentos, sendo eles os SisPav e o M-EPDG.

Para as simulações utilizou-se uma estrutura padrão, obtida a partir da média aritmética das espessuras das camadas dos trechos considerados homogêneos, variando-se os dados relativos ao revestimento (AB e CBUQ Convencional). Os módulos resilientes utilizados foram os obtidos através da retroanálise. As especificações das misturas dos revestimentos foram retiradas dos projetos de dosagens, que podem ser consultados no anexo A.

A tabela 12 demonstra o resumo da estrutura simulada, bem como suas propriedades.

Tabela 12: Estrutura utilizada para as simulações de desempenho.

Material	Espessura (m)	Coef. de Poisson	Módulo Resiliente (Mpa)	Parâmetros
Mistura Asfáltica Asfalto Borracha	0,12	0,3	4450	Tipo de CAP = Ecoflex B
				Penetração 100g 5s 25°C 0,1mm = 49
				Ao (visc x T) = 10,53
				VTSO (visc x T) = -3,51
				Volume de vazios (%) = 4,24
				Teor de asfalto (%) = 6,2
				RBV (%) = 73,5
				Faixa Granulométrica (DNIT) = Faixa C
				% passando #3/4 = 100
				% passando #3/8 = 84,93
				% passando #4 = 52,01
				% passando #200 = 7,08
Massa específica (kg/m³) = 2,554				
Mistura Asfáltica CБУQ Convencional	0,12	0,3	4850	Tipo de CAP = CAP 50/70
				Penetração 100g 5s 25°C 0,1mm = 66
				Ao (visc x T) = 10,65
				VTSO (visc x T) = -3,55
				Volume de vazios (%) = 3,9
				Teor de asfalto (%) = 4,8
				RBV (%) = 76,01
				Faixa Granulométrica (DNIT) = Faixa C
				% passando #3/4 = 100
				% passando #3/8 = 86
				% passando #4 = 54,5
				% passando #200 = 6,5
Massa específica (kg/m³) = 2.591				
Material granular	0,18	0,35	76	Base - Brita Graduada Simples
Material granular	0,2	0,35	45	Sub-base - Macadame Seco
Material granular	0,36	0,35	54	Ref. Do Sub-leito - Rachão
Solos finos, siltosos ou argilosos	0	0,4	107	Sub-leito: Silte de alta compressibilidade (A-2-5)

4.4.1 Software M-EPDG

4.4.1.1 Afundamento na trilha de roda

A figura 37 apresenta os resultados obtidos para afundamento na trilha de roda simulados pelo software M-EPDG, e também para as medições executadas.

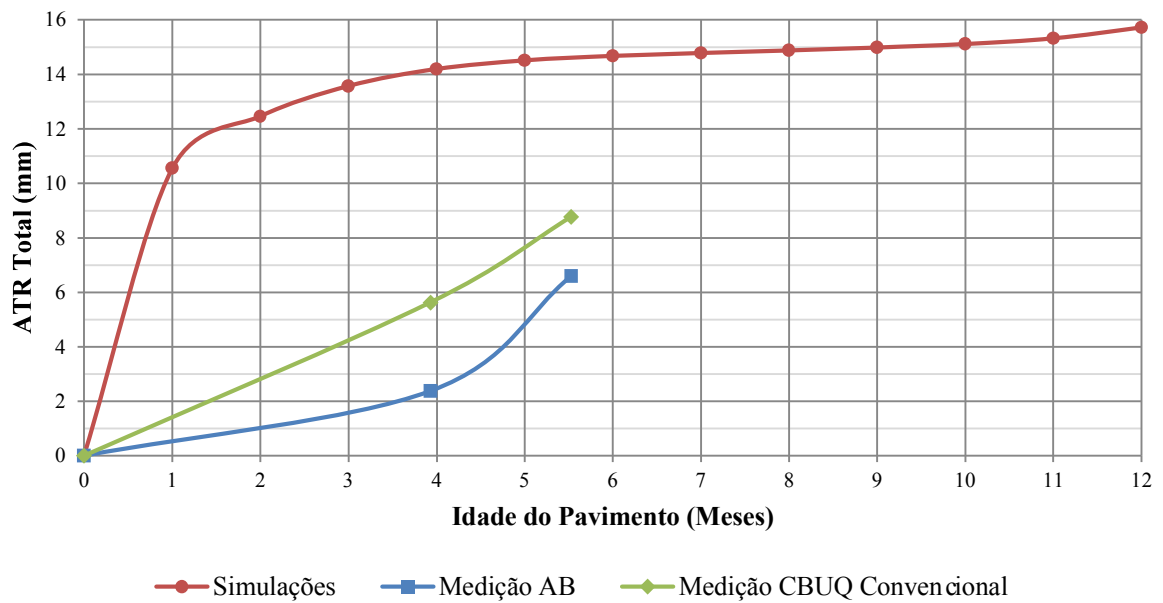


Figura 37: Evolução de ATR - M-EPDG.

4.4.1.2 Trincamento por fadiga

A figura 38 apresenta os resultados obtidos para trincamento por fadiga na superfície do pavimento, simulado pelo software M-EPDG. Não foram observadas trinças no trecho.

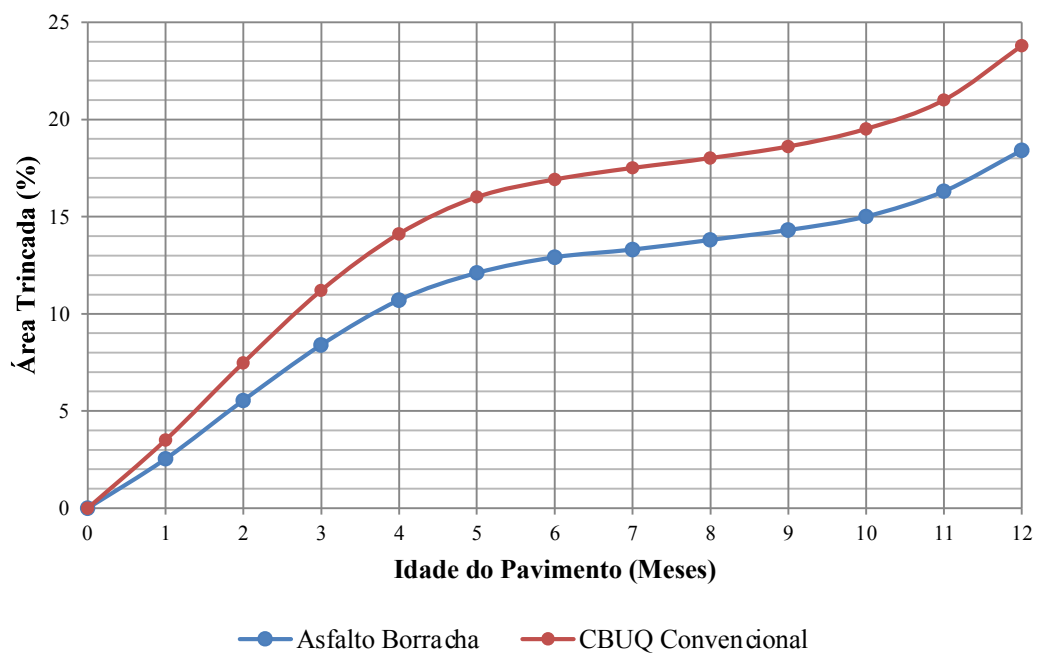


Figura 38: Fadiga na superfície do pavimento - M-EPDG.

4.4.2 Software SisPav

4.4.2.1 Afundamento na trilha de roda

A figura 39 apresenta os resultados obtidos para afundamento na trilha de roda simulados pelo software SisPav, e também para as medições executadas.

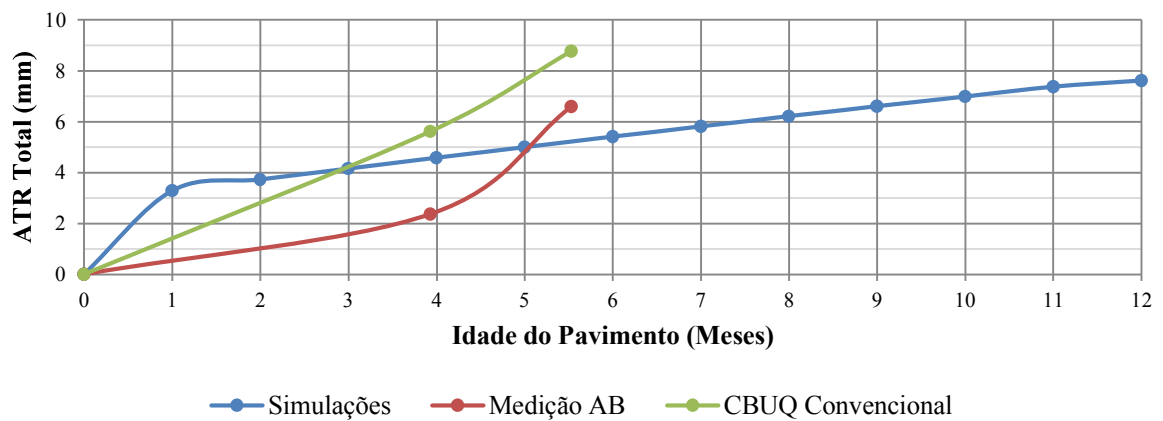


Figura 39: Evolução de ATR - SisPav.

4.4.2.2 Trincamento por fadiga

A figura 40 apresenta os resultados obtidos para trincamento por fadiga na superfície do pavimento, simulado pelo software SisPav. Ainda não foram observadas trincas no trecho.

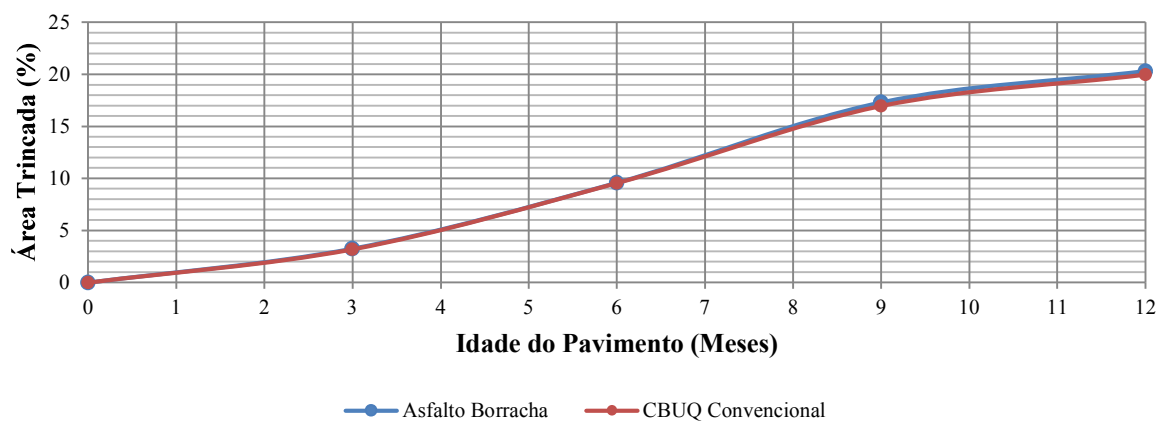


Figura 40: Fadiga na superfície do pavimento - SisPav.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões desta pesquisa, alcançadas através da análise gráfica e estatística dos resultados.

Também são feitas propostas para trabalhos futuros, de modo a dar continuidade à pesquisa.

5.1 Conclusões

Com o término do presente trabalho conclui-se quanto à (os):

- **Objetivos:** Os objetivos puderam ser completados de maneira geral, com grande satisfação, apesar das dificuldades encontradas para a coleta de dados durante e execução do trecho experimental.
- **Metodologia:** Pode-se verificar que os softwares utilizados nas simulações possibilitam uma análise completa e atual, pois tem incluso em seus modelos, métodos modernos de previsão de desempenho de pavimentos flexíveis.

Quanto à caracterização dos materiais em laboratório, observou-se que os métodos utilizados no Brasil ainda satisfazem as necessidades, no entanto com um dispêndio de tempo elevado.

Para realização da retroanálise ressalta-se a dificuldade em utilizar os dados obtidos através da viga Benkelman, devido aos softwares existentes para este fim utilizarem apenas dados de entrada do equipamento FWD, necessitando assim de conversões, as quais podem comprometer a fidelidade do levantamento.

- Resultados: Quanto aos resultados pôde-se observar:

a) Estrutura do pavimento: Controle de espessuras devidamente realizado, comprovado pelas amostras rotativas retiradas do pavimento.

b) Caracterização dos materiais: Os materiais apresentaram características esperadas, encontradas na bibliografia, e de acordo com as especificações de projeto;

c) Retroanálise: Apesar da necessidade de conversão dos dados de entrada, a retroanálise mostrou-se extremamente satisfatória, tendo sua confiabilidade respaldada por diversas correlações de autores da área, pelas simulações de desempenho bem como pelas medições de danos realizadas *in situ*;

d) Ruído: Embora a bibliografia traga indícios de que, devido ao Asfalto Borracha promover melhor envolvimento dos agregados com o ligante na mistura, o ruído causado pelo tráfego pudesse ser reduzido, as medições realizadas provaram que isto não se aplica para este trecho experimental, sendo o CBUQ Convencional menos ruidoso.

e) Simulações de desempenho: Os resultados obtidos pelos softwares nas simulações foram considerados satisfatórios. Quanto a defeitos de ATR, observaram-se valores bastante elevados, os quais não eram esperados, devido à estrutura robusta do pavimento. No entanto, os módulos resilientes baixos das camadas granulares, acusados na retroanálise, podem explicar o fenômeno, sendo respaldados pelas medições realizadas *in situ*, onde em aproximadamente seis meses de vida, o trecho já apresenta em torno de 60 % do limite de ATR para um pavimento ser considerado rompido.

Quanta as análises de fadiga na superfície do pavimento, observou-se também valores elevados nas simulações, sendo a vida de fadiga consumida em aproximadamente 12 meses, porém, as medições *in situ* não comprovaram as simulações, estando o pavimento intacto quando ao trincamento.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

- Para este trecho experimental, continuar o monitoramento de ATR e fadiga na superfície, a fim de estabelecer modelos de evolução;
- Executar outros trechos experimentais, realizando os levantamentos deflectométricos camada por camada, com o equipamento FWD, evitando conversões, aumentando assim o nível de precisão da retroanálise;
- Caracterizar as camadas granulares com mais eficiência, por meio de ensaios de módulo resiliente, verificando também o grau de compactação *in situ*;
- Instalar instrumentação na pista, com medidores de nível d'água, piezômetros, tensiômetros para medição de sucção, sensores de temperatura e células de pressão (*strain gauges*).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Standard Test Method for Airport Pavement Condition Index Surveys*. ASTM D 5340-93. West Conshohocken, 1997. 54 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Terminologia e classificação de pavimentação**. NBR 7207. Rio de Janeiro, 1982. 22 p.

AZAMBUJA, Diana Morussi; CERATTI, Jorge Augusto Pereira. Estudo de recapeamentos asfálticos utilizando a técnica de ensaios acelerados. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 18. 2007, Vitória. **Anais...** Vitória: ANPET, 2009. 14 p.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação Asfáltica**: materiais, projetos e restauração. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 558p., il. color.

BERNUCCI, Liedi Bariane et al. **Pavimentação Asfáltica**: formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: Petrobras; Abeda, 2006. 501 p., il. color.

BERNUCCI, Liedi Bariane. Deformações permanentes em pavimentos asfálticos. In: ENCONTRO TÉCNICO DER/PR, 11., 2009, [Londrina]. **Apresentação...** [Londrina]:[DER/PR], Disponível em: <
<http://www.der.pr.gov.br/arquivos/File/11EncontroTecnico/DeformacoesPermanentesemPavAsfalticosLiediBernucci.pdf>> Acesso em: 17 maio 2010.

BERTOLLO, et al. Benefícios da incorporação de borracha de pneus em pavimentos asfálticos. In: CONGRESO INTERAMERICANO DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL. 18. 2002, Cancún. **Anais...** Cancún:[s.n], 2002. 8 p.

BOCK, André Luis. **Desempenho à fadiga de misturas em concreto asfáltico com diferentes formas de incorporação de cal**. 2009. 78 f. Trabalho de conclusão de curso

(Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul - UNIJUÍ, Ijuí, 2009.

BRASIL. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Estatística da Produção Agrícola**, 2010. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/lspa/default.shtm>> Acesso em: 17 maio 2010.

BRASIL. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **Defeitos nos Pavimentos Flexíveis e Semi-Rígidos**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, TER - 001, 1978. 4 p.

BRASIL. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **Avaliação estrutural de pavimentos flexíveis**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, PRO - 011, 1979. 16 p.

BRASIL. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes. **Manual de Pavimentação**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, IPR - 719, 2006. 274 p., il.

BROWN, Stephen F.. *Achievements and challenges in asphalt pavement engineering*. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ASPHALT PAVEMENTS, 8. 1997, Seattle. **Anais...** Seattle: [s.n.], 2007. 23 p. il.

CANABARRO, Francisco. Missões. **Estradas**, Porto Alegre, ano 4, n. 7, p. 7-8, nov. 2004.

CNT - Confederação Nacional dos Transportes. **Boletim Estatístico**, 2009. Disponível em: <<http://www.cnt.org.br/porta1/img/arquivos/Boletim%20Estatístico%20CNT%20-%202009.pdf>> Acesso em: 17 maio 2010.

CONRADO, Mariana. Um caminho para os pneus inservíveis. **Pneus e Cia.**, São Paulo, ano 1, n. 9, p. 16-20, mar./abr. 2009.

DOMINGUES, F. A. A. **Manual para identificação de defeitos de revestimentos asfálticos de pavimentos**. São Paulo: [s.n], 1993, 96 p., il.

EDEL, Guilherme. **Novas tecnologias - asfalto borracha**. Partilha de Conhecimento. Construção Civil na Prática. São José dos Campos: ANCOVAP, 2005.

EPPS, A. L. *Thermal Behavior of crumb-rubber modified asphalt concrete mixtures*. 1997. Paginação irregular. Tese (Doutorado em Filosofia) - Berkeley Institute of Transportation Studies - ITS/UCB, Berkeley, 1997.

FAXINA, Adalberto Leandro. **Estudo em laboratório do desempenho de concreto asfáltico usinado a quente empregando ligante tipo asfalto-borracha**. 2002. 180 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia de São Carlos - EESC, São Carlos, 2002.

FRANCO, Filipe A. C. de Proença. **Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos – SisPav**. 2007. 294 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, 2007.

GONÇALVES, Fernando José Pugliero. **Desempenho de pavimentos**. Passo Fundo: Universidade de Passo Fundo, 1999. 150 p.

GONÇALVES, Fernando José Pugliero. **Diagnóstico e manutenção de pavimentos: ferramentas auxiliares**. Passo Fundo: Universidade de Passo Fundo, 2007. 208 p., il.

HARTMANN, Diego Arthur. **Análise dos defeitos e da irregularidade de pavimentos flexíveis a partir do guia da AASHTO de 2004**. 2009. 75 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul - UNIJUÍ, Ijuí, 2009.

MEDINA, Jacques de. **Mecânica dos Pavimentos**. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 1997. 421 p., il.

MEDINA, Jacques de; MOTTA, Laura Maria Goretti da. **Mecânica dos Pavimentos**. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 2005. 574 p., il.

MENDONÇA, Cláudio. Transporte rodoviário - Porque o Brasil depende tanto desse sistema. **UOL Educação**, 2010. Disponível em: <<http://educacao.uol.com.br/geografia/ult1701u50.jhtm?action>>. Acesso em : 17 maio 2010.

MERIGUI, João Virgílio et al. Projeto: simulador de campo para analisar desempenho de pavimentos asfálticos e de concreto de cimento Portland - pista experimental. In: JORNADAS LUSO-BRASILEIRAS DE PAVIMENTOS, 6., 2007, [São Paulo]. **Anais Eletrônicos...** [São Paulo]:[Mackenzie], 2007. Disponível em: <http://meusite.mackenzie.com.br/rmfortes/estradas3/pistas_experimentais.pdf> Acesso em: 17 maio 2010.

MERIGUI, João Virgílio. **Estudo da deformação permanente de misturas asfálticas em ensaios de laboratório**. 1999. 256 pg. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro, 1999.

MOTTA, Laura Maria Goretti da. **Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis: critério de confiabilidade e ensaios de cargas repetidas**. 1991. 365 pg. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro, 1991.

NÚÑEZ, Washington Peres et al. Produzindo misturas asfálticas de elevado desempenho com emprego de cal hidratada. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 38. 2007, Manaus. **Anais...** Manaus: ABPv, 2007. 15 p.

ODA, Sandra. **Análise da viabilidade técnica da utilização do ligante asfalto- borracha em obras de pavimentação**. 2000. 251 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Escola de Engenharia de São Carlos - EESC, São Carlos, 2000.

PAPAGIANNAKIS, A. T.; MASAD, E. A.. **Pavement design and materials**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2008. 541 p., il.

PINHEIRO, Jorge Henrique Magalhães; SOARES, Jorge Barbosa. Realização e acompanhamento de dois trechos experimentais com asfalto-borracha no estado do Ceará. **Transportes**, São Paulo, v. 8, n. 1, p. 57-66, jun. 2005.

PINTO, S. **Estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos**. 1991. 477 pg. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação - COPPE, Rio de Janeiro, 1991.

RIO GRANDE DO SUL. Secretaria de Infraestrutura e Logística. Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem. **Número de veículos passantes por local**. Porto Alegre: Divisão de Trânsito, 2008. 5 p.

RODRIGUES, Régis Martins. **Estudo do trincamento dos pavimentos**. 1991. 256 pg. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação - COPPE, Rio de Janeiro, 1991.

RODRIGUES, Régis Martins. *Prediction of fatigue cracking on flexible highway pavements: Recent Developments in Soil and Pavement Mechanics*. 1997, Balkema: Rotterdam. p. 381 - 385.

SENÇO, Wlastermiler de. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. São Paulo: Pini, 1997. v. 1., il.

SEVERI, Andréa Arantes et al. **Verificação à fadiga de revestimentos asfálticos e bases cimentadas**: Programa Pavimentos Asfálticos v. 1.0. São Paulo: [s.n]. [199?]. 27 p., il. color.

SHAHIN, M. Y.. *Pavement management for Airports, roads, and parking lots*. Kluwer Academic Publishers, Norwell - Massachusetts. 1994.

SPECHT, Luciano Pivoto. **Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de Pneus**, 2004. 279 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, 2004.

VIANNA, Geraldo. **O Mito do rodoviarismo brasileiro**. São Paulo: Curiosidades, 2007. 61 p., il. color.

WHITEOAK, David. *The SHELL bitumen handbook*. England: SHELL, 1990. 445 p., il.

YODER, E. J.; WITCZACK, M. W. *Principles of pavement design*. 2 ed. New York: John Wiley & Sons, 1975. 711 p., il.

ANEXO A

Camada de rolamento
RP 09225
Torc
BR-285
Coronel Barros
DNIT 031/2006-ES Faixa C
Projeto de Mistura Asfáltica com
CAP 50/70



Betunel

Tecnologia em Asfaltos

10 junho, 2009

CENTRO DE DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO

RIBEIRÃO PRETO/SP

RELATÓRIO DO DEPARTAMENTO TÉCNICO

Relatório técnico n° RP 09225
 Cliente: Torc
 Obra: BR-285

1- Identificação dos materiais utilizados

Tipo		Procedência	Natureza
A	Brita 3/4"	Coronel Barros	Basalto
B	Pedrisco 3/8"	Coronel Barros	Basalto
C	Pó de Pedra	Coronel Barros	Basalto
D	Cal CH-I	Cal CH-I	Cal CH-I
E			
F			

2 - Ensaio sobre agregados

2.1 - Granulometria dos materiais individuais (DNER-ME 083/98), combinados (ABNT NBR 7217) e especificação adotada (DNIT 031/2006-ES Faixa C)

Peneiras	A	B	C	D	E	F	Mistura	Faixa	Faixa Trab.
1"	100,0	100,0	100,0	100,0			100,0	100 - 100	100 - 100
3/4"	100,0	100,0	100,0	100,0			100,0	100 - 100	100 - 100
1/2"	64,9	100,0	100,0	100,0			93,0	80 - 100	86 - 100
3/8"	29,9	100,0	100,0	100,0			86,0	70 - 90	79 - 90
Nº 4	2,2	16,0	98,5	100,0			54,5	44 - 72	49,5 - 59,5
Nº 10	1,0	2,0	60,1	100,0			31,4	22 - 50	26,4 - 36,4
Nº 40	0,5	1,9	24,1	100,0			13,9	8 - 26	8,9 - 18,9
Nº 80	0,5	1,6	16,5	100,0			10,1	4 - 16	7,1 - 13,1
Nº 200	0,4	1,1	9,9	85,0			6,5	2-10	4,5-8,5

2.2 - Composição da mistura e densidades

Agregado	%	Densidade - ASTM C 127, ASTM C-128		
		Seca	Saturada	Efetiva
Brita 3/4"	20,0	3,009	2,930	2,970
Pedrisco 3/8"	30,0	3,051	2,931	2,991
Pó de Pedra	48,5	3,008	2,859	2,934
Cal CH-I	1,5	2,455	2,455	2,455

2.3 - Equivalente de Areia - DNER ME 054/97

Especificação	Agregado	Resultado
mínimo 55%	Pó de Pedra	71%

2.4 - Adesividade do Agregado Graúdo - ABNT NBR 14329

Especificação	Ligante	Resultado
90% de Recobrimento do Agregado	CAP 50/70	> 90% Satisfatória

2.5 - Desgaste de Agregado por Abrasão (Los Angeles) - DNER-ME 035/98

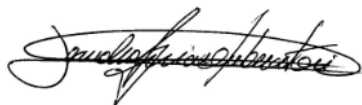
Especificação	Graduação	Resultado
máximo 50%	B	17%

2.6 - Absorção de água - ASTM C-127, ASTM C-128 e ASTM C 1252

Tipo de agregado	A	B	C	D	E	F
Resultado do ensaio	0,90%	1,34%	1,73%			

Os resultados referem-se as amostras recebidas.

Atenciosamente



LEANDRO AGUIAR LIBERATORI
 Engenheiro Civil. CREA-SC 439841
 Supervisor de Projetos

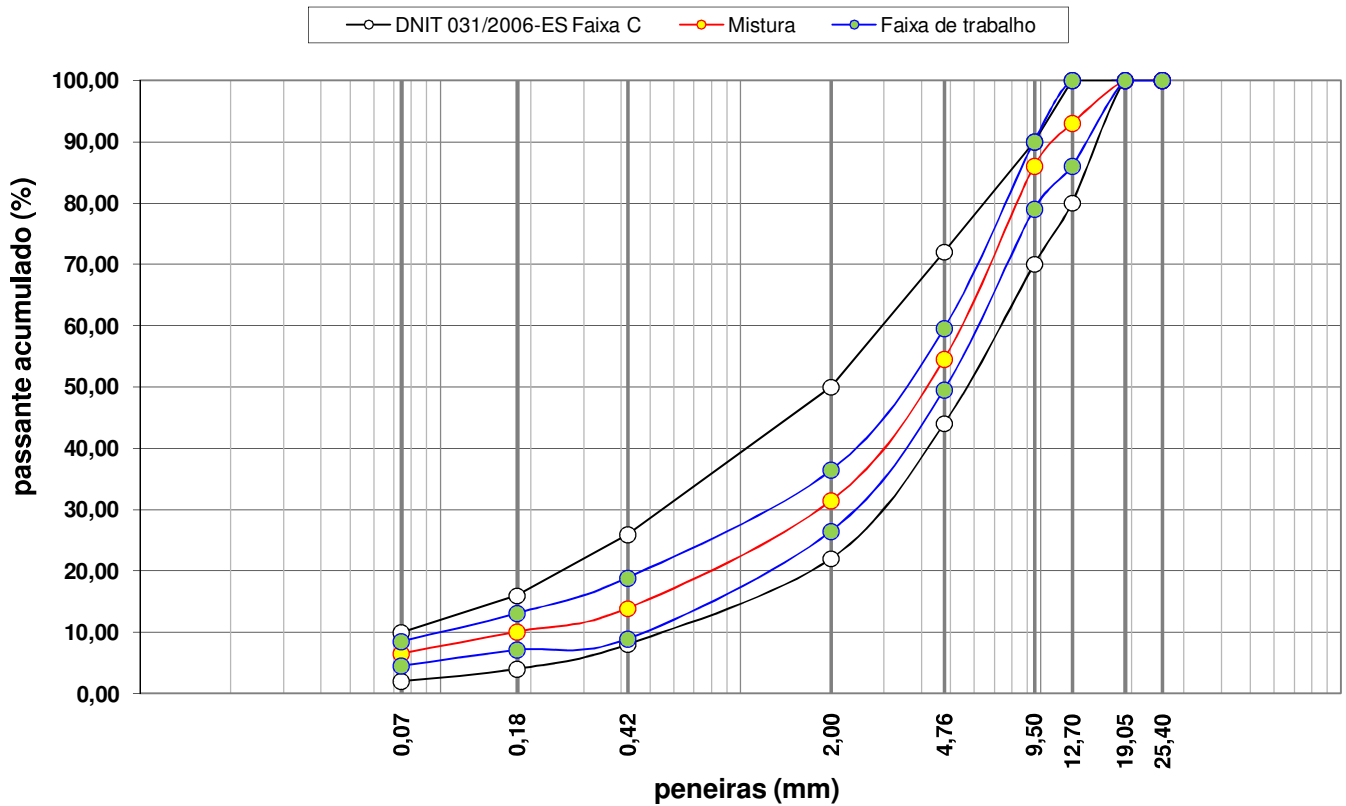


RAPHAEL REBELO
 Coordenador de Projetos
 E-mail: raphael.rebelo@betunel.com.br

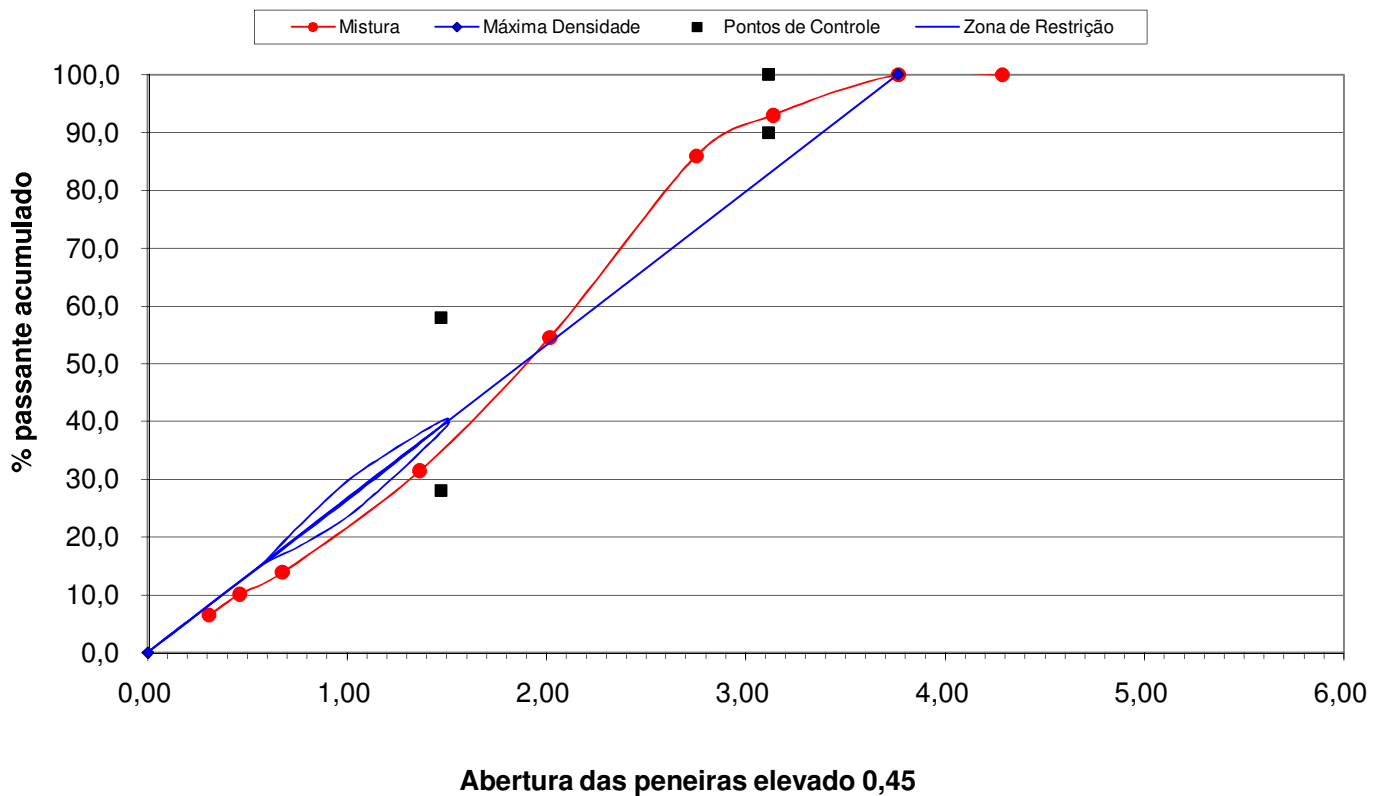
RELATÓRIO DO DEPARTAMENTO TÉCNICO

Relatório técnico nº RP 09225
 Cliente: Torc
 Obra: BR-285

DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA



TAMANHO NOMINAL 12,5 mm



RELATÓRIO DO DEPARTAMENTO TÉCNICO

Relatório técnico n° RP 09225
 Cliente: Torc
 Obra: BR-285

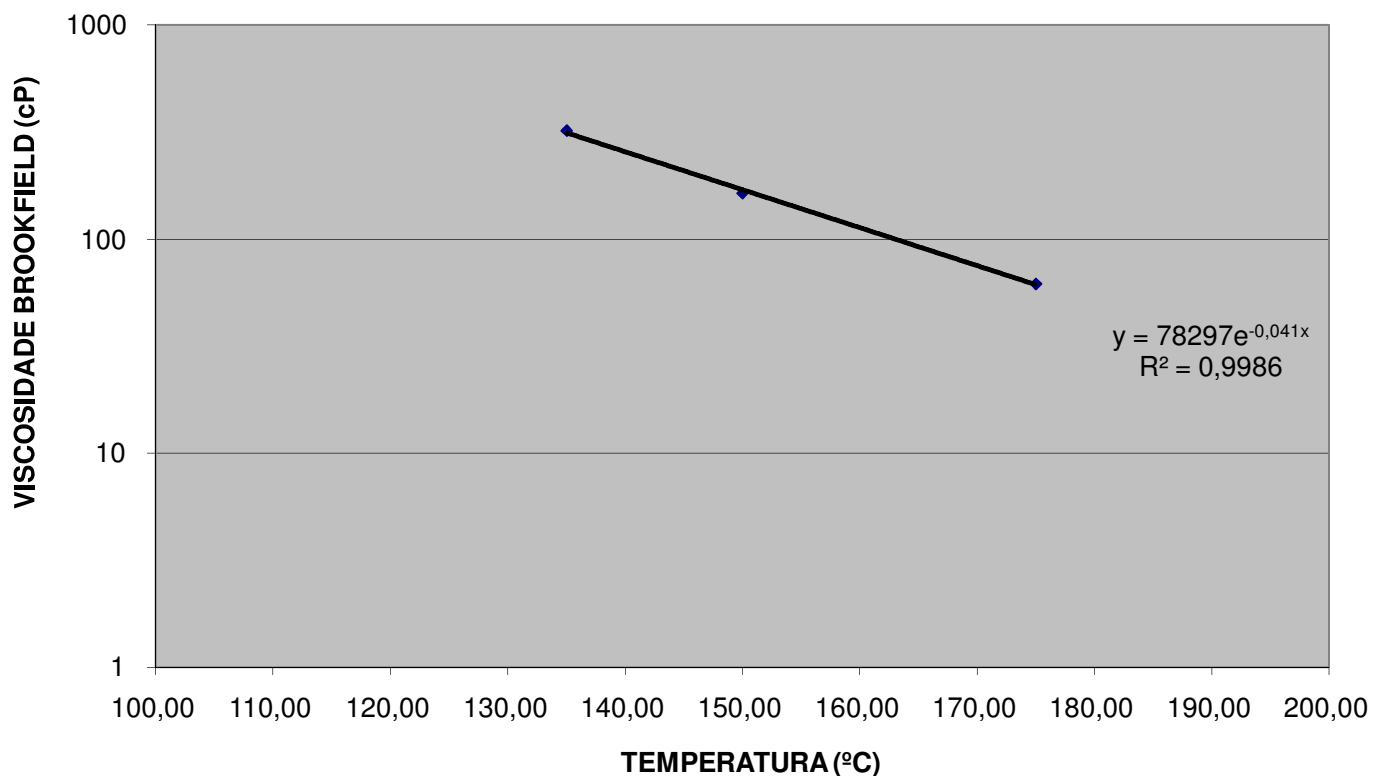
Certificado do asfalto CAP 50/70

Características(*)	Especificação		Método de ensaio	Encontradas na elaboração do projeto de mistura
	Mínimo	Máximo		
Viscosidade BROOKFIELD, a 135;°C, 20 RPM, cP	274	-	NBR-15184	321
Viscosidade BROOKFIELD, a 150;°C, 50 RPM, cP	112	-	NBR-15184	164
Viscosidade BROOKFIELD, a 175;°C, 100 RPM, cP	57	285	NBR-15184	62
Temperatura de mistura, °C (**)	INDICATIVO		CÁLCULO	143 a 149
Temperatura de compactação, °C (**)	INDICATIVO		CÁLCULO	133 a 139
Ponto de fulgor, °C	235	-	NBR-11341	>235
Estabilidade a estocagem, dif. ponto de amolecimento, °C	-	-	NBR-15166	-
Recuperação elástica, 20 cm, 25°C, %	-	-	NBR-15086	-
Índice de susceptibilidade térmica (IST)	-1,5	0,7	CÁLCULO	-1,1
Penetração, 100g, 5s, 25°C, 0,1mm	50	70	NBR-6576	66
Ponto de amolecimento, °C	46	-	NBR-6560	48

(*)Características do produto utilizado na elaboração deste projeto. Durante a execução da obra as temperaturas de usinagem e compactação deverão ser as indicadas no certificado que acompanha o produto ou de acordo com a curva de viscosidade versus temperatura elaborada na obra.

(**) A temperatura de usinagem deverá ser ajustada em função das condições operacionais e climáticas de forma a atender a temperatura mínima de início de compactação.

GRÁFICO DE TEMPERATURA X VISCOSIDADE



RELATÓRIO DO DEPARTAMENTO TÉCNICO

Relatório técnico nº RP 09225
 Cliente: Torc
 Obra: BR-285

RESUMO DO PROJETO

Composição da Mistura			
Origem do Material	Material	Somente agregados(%)	Agregados e ligante(%)
Coronel Barros	Brita 3/4"	20,0%	19,0%
Coronel Barros	Pedrisco 3/8"	30,0%	28,5%
Coronel Barros	Pó de Pedra	48,5%	46,2%
Cal CH-I	Cal CH-I	1,5%	1,4%
	-		
Betunel	CAP 50/70		4,8%
Total		100,0%	100,0%

Características da Mistura DNIT 031/2006-ES Faixa C			
Ensaio	Valor obtido	Mínimo	Máximo
Teor ótimo de CAP 50/70	4,8 %	4,5%	5,1%
Densidade do asfalto	1,017 *	-	-
Densidade real teórica da mistura	2,701 *	-	-
Densidade real da mistura - Rice - ABNT NBR 15619	2,694 *	-	-
Densidade aparente do corpo-de-prova - ABNT NBR 15573	2,591 *	-	-
Vazios (VV)	3,9 %	3%	5%
Relação Betume Vazios (RBV)	76,1 %	75%	82%
Vazios de Agregado Mineral (VAM)	16,2 %	14%	-
Resistência a Tração por Compressão Diametral	MPa	0,65 MPa	-
Estabilidade Marshall	kgf	500 kgf	-
Fluência	mm	-	-
Relação Filler Betume	1,3 *	-	-

* Valores adimensionais, conforme os métodos de ensaio adotados.

Comentários sobre os métodos de ensaio adotados:

- a) Preparação dos corpos de prova Marshall conforme método ASTM D 6926-04 com condicionamento em estufa à temperatura de compactação por um período de 1 a 2 horas; esse período de condicionamento permite levar em consideração a absorção de ligante e o envelhecimento de curto prazo durante o transporte da mistura no cálculo do teor
- b) Determinação da densidade aparente dos corpos de prova calculada pelo método ABNT NBR 15573, que no caso de misturas densas, a definição do volume é feita através da pesagem do corpo de prova nas condições, seca (no ar), hidrostática (peso submerso em água) e com superfície saturada seca (SSS). A densidade aparente por esse método é menor do que a definida pelo método DNER ME-117-94.
- c) Volume de vazios da mistura e demais propriedades volumétricas calculada a partir da densidade máxima teórica da mistura definida pelo ensaio Rice - ABNT NBR 15619. A partir do ensaio rice é possível calcular uma densidade combinada dos agregados média que é utilizada no cálculo da densidade máxima teórica da mistura.

Concreto Asfáltico Borracha Usinado a Quente - CABUQ

Cliente: Torc Engenharia
Utilização: Camada de Rolamento
Obra: Pavimentação Rodoviária

Faixa C - DNIT 112/2009-ES

Resumo da Dosagem

Materiais Utilizados
Ligante Asfáltico

Origem: Greca Distribuidora de Asfaltos
 Local: Araucária - PR
 Tipo: ECOFLEX B (Asfalto-Borracha)

Filler

Origem: Caltec
 Local: Itaperuçu - PR
 Tipo: Cal Hidratada CH-1

Agregado Mineral

Origem: Coronel Barros
 Local: Ijuí - RS

Granulometria dos Agregados

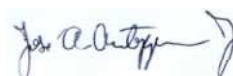
Peneiras	Brita 3/4	Pedrisco	Pó de Pedra	Cal	Mistura	Faixa de Trabalho		Especificação	
Pol (mm)	19,5%	38,0%	41,0%	1,5%	100%	L. Inf.	L. Sup.	L. Inf.	L. Sup.
1"	25,40	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
3/4"	19,10	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1/2"	12,70	61,0	100,0	100,0	100,0	85,4	99,4	80,0	100,0
3/8"	9,52	22,7	100,0	100,0	100,0	84,9	77,9	70,0	90,0
n.º4	4,76	1,7	26,2	98,1	100,0	52,0	47,0	44,0	72,0
n.º10	2,00	1,2	5,3	62,3	100,0	29,3	24,3	22,0	50,0
n.º40	0,42	0,9	3,5	26,9	99,3	14,0	9,0	8,0	26,0
n.º80	0,18	0,9	3,2	19,0	96,8	10,6	7,6	4,0	16,0
n.º200	0,075	0,9	2,4	11,5	85,3	7,1	5,1	2,0	10,0

Ensaio Marshall DNER-ME 043/95		Especificações	
		mínimo	máximo
Teor %	6,2%	5,9%	6,5%
D (g/cm³)	2,667	-	-
d (g/cm³)	2,554	-	-
Vv %	4,24	3,00	5,00
RBV %	77,26	65,00	78,00
Estabilidade (Kgf)	1234,05	800,00	-
Fluência (mm)	3,07	-	-
VAM %	19,24	15,00	-
RTCD (Kg/cm²)	11,58	7,65 (0,75MPa)	-

Obs.: Esta dosagem inicial refere-se as amostras enviadas. Um ajuste de campo pode ser necessário com o avanço da obra.

Normalmente é necessária uma checagem constante da dosagem, devido a possível variação da matriz pétreia, do processo de usinagem e de compactação.

O cálculo do Teor Ótimo desta dosagem se baseia nas Densidades Máximas Teóricas determinadas pelo método da ponderação das densidades dos agregados e do ligante asfáltico.

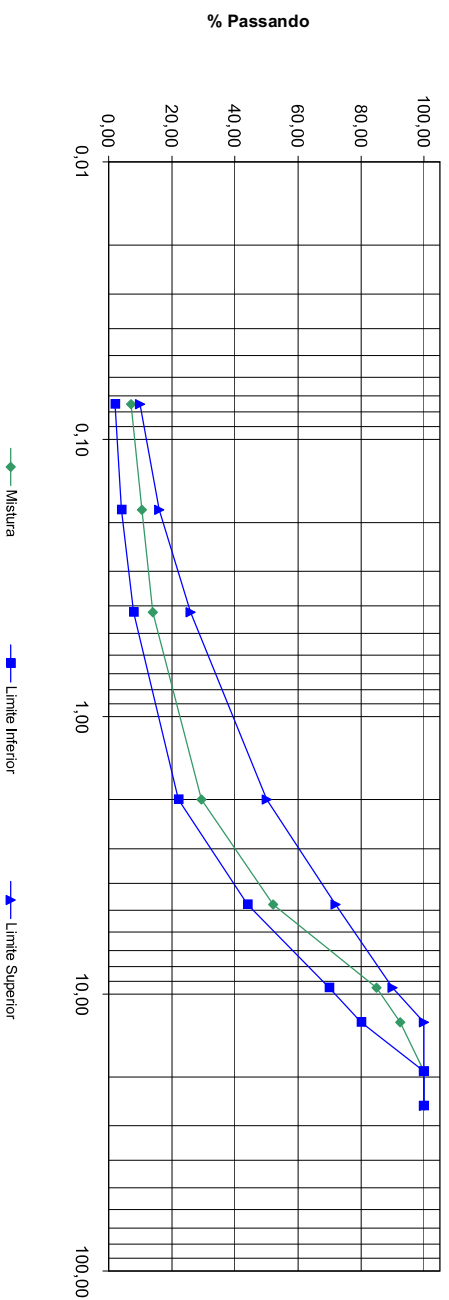


José Antonio Antoszczem Jr
 Engenheiro Responsável

02) Granulometria da Mistura de Agregados

Peneira (mm)	Brita 3/4 19,5%		Pedrisco 38,0%		Pó de Pedra 41,0%		Cal 1,5%		Total 100%	Faixa C - DNIT 112/2009-ES		Média (%)
	% Passando	Fator	% Passando	Fator	% Passando	Fator	% Passando	Fator		L Inferior	L Superior	
1"	100,00	0,20	100,00	0,38	100,00	0,41	100,00	0,015	100,00	100,00	100,00	100,00
3/4"	100,00	0,20	100,00	0,38	100,00	0,41	100,00	0,015	100,00	100,00	100,00	100,00
1/2"	61,00	0,20	100,00	0,38	100,00	0,41	100,00	0,015	92,40	80,00	100,00	90,00
3/8"	22,70	0,20	100,00	0,38	100,00	0,41	100,00	0,015	84,93	70,00	90,00	80,00
n.º4	4,76	0,20	26,20	0,38	98,10	0,41	100,00	0,015	52,01	44,00	72,00	58,00
n.º10	2,00	0,20	5,30	0,38	62,30	0,41	100,00	0,015	29,29	22,00	50,00	36,00
n.º40	0,42	0,90	0,90	0,38	26,90	0,41	99,30	0,015	14,02	8,00	26,00	17,00
n.º80	0,18	0,90	0,20	0,38	19,00	0,41	96,80	0,015	10,63	4,00	16,00	10,00
n.º200	0,08	0,90	0,20	0,38	11,50	0,41	85,30	0,015	7,08	2,00	10,00	6,00

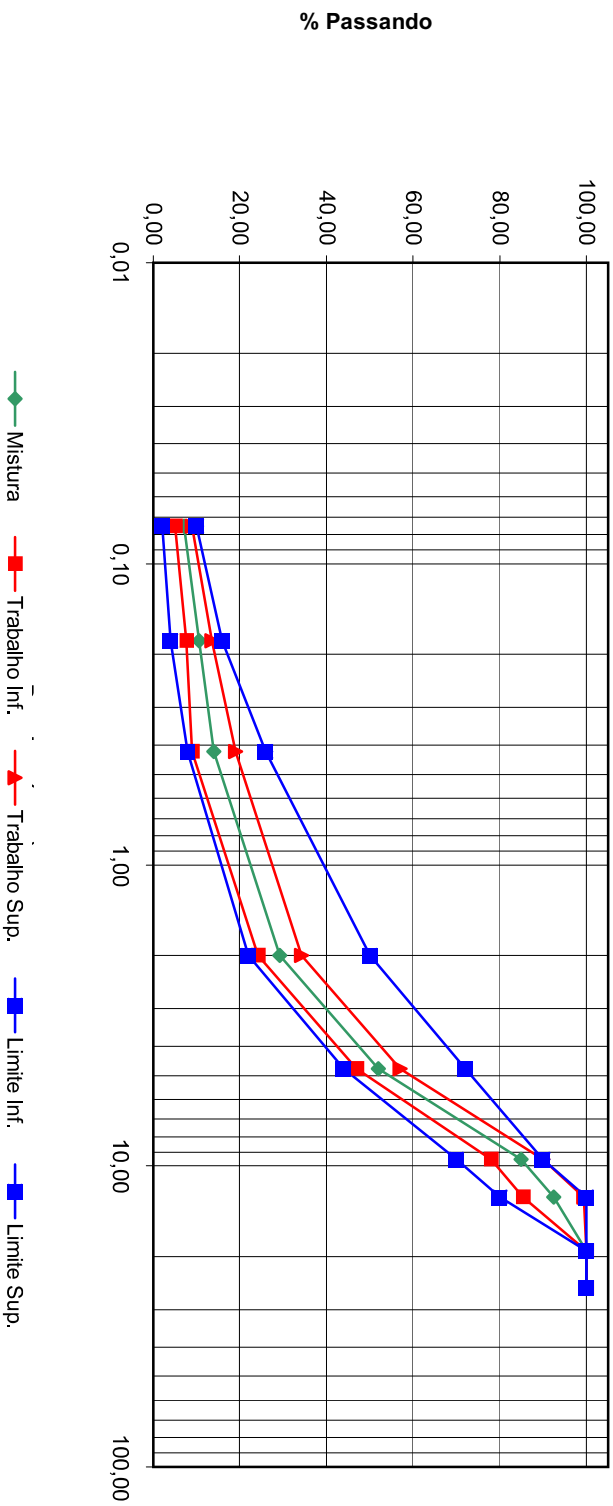
Granulometria da Mistura de Agregados







03) Granulometria da Mistura de Agregados - Faixa de Trabalho

Peneira	Mistura	Faixa de Trabalho		Tolerância	Faixa C - DNIT 112/2009-ES		Média (%)
		L. Inferior	L. Superior		L. Inferior	L. Superior	
1"	25,40	100,00	100,00	7	100,00	100,00	100,00
3/4"	19,10	100,00	100,00	7	100,00	100,00	100,00
1/2"	12,70	85,40	99,40	7	80,00	100,00	90,00
3/8"	9,52	84,93	90,00	7	70,00	90,00	80,00
n.º4	4,76	52,01	57,01	5	44,00	72,00	58,00
n.º10	2,00	29,29	34,29	5	22,00	50,00	36,00
n.º40	0,42	14,02	19,02	5	8,00	26,00	17,00
n.º80	0,18	10,63	13,63	3	4,00	16,00	10,00
n.º200	0,08	7,08	9,08	2	2,00	10,00	6,00





Granulometria da Mistura de Agregados







04) Frações da Granulometria da Mistura

%G - Fração pass. 1" e ret. n° 04		47,99%
%M - Fração pass. n° 04 e ret. n° 200		44,93%
%M - Fração pass. n° 200		7,08%
Total		100,00%

05) Densidades das Frações da Mistura (g/cm³)

Dr - Fração pass. 1" e ret. n° 04		3,030
Da - Fração pass. n° 04 e ret. n° 200		2,971
Dt - Fração pass. n° 200		2,990
μ - Fração pass. n° 200		2,792




06) Ensaio de Abrasão Los Angeles (L.A.) e Equivalente de Areia (E.A.)

Abrasão Los Angeles (%)		28,40%
Especificação		≤ 50,00%
Equivalente de Areia Médio (%)		72,20%
Especificação		> 55,00%

07) Absorção (Ab)

Absorção Média (%)		0,65
----------------------	--	------

08) Densidades Médias da Mistura de Agregados (g/cm³)

$Dr_{(mist.)} = \frac{100}{\frac{\%G}{Dr} + \frac{\%M}{Dt} + \frac{\%F}{\mu}} = \frac{100}{\frac{0,480}{3,030} + \frac{0,449}{2,990} + \frac{0,071}{2,792}}$		2,994
$Da_{(mist.)} = \frac{100}{\frac{\%G}{Da} + \frac{\%M}{Dt} + \frac{\%F}{\mu}} = \frac{100}{\frac{0,480}{2,971} + \frac{0,449}{2,990} + \frac{0,071}{2,792}}$		2,966
$Dm_{(mist.)} = \frac{Dr_{(mist.)} + Da_{(mist.)}}{2} = \frac{2,994 + 2,966}{2}$		2,980

09) Densidade de Materiais Betuminosos (g/cm³)

ECOFLEX B (Asfalto-Borracha)		1,03
------------------------------	--	------

10) Preparo e Fracionamento dos Agregados para Moldagem dos Corpos de Prova

Frações		% da Fração	Peso para 1150 g	Mistura	% de CAP	Peso de CAP (g)
Passando	Retido					
1"	3/4"	0,00	0,00	M1	5,5%	66,93
3/4"	1/2"	7,61	87,46	M2	6,0%	73,40
1/2"	n.º4	40,39	464,44	M3	6,5%	79,95
n.º4	n.º10	22,72	261,25	M4	7,0%	86,56
n.º10	n.º40	15,27	175,57	M5	7,5%	93,24
n.º40	n.º80	3,39	38,99			
n.º80	fundo	10,63	122,29			
Total:		100,00	1150,00			

11) Teor Utilizado nas Misturas

Misturas	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅
Teor	5,5%	6,0%	6,5%	7,0%	7,5%

11.1) Determinação da Densidade Máxima Teórica

	%b	100 - %b	D _{m (mist.)}	D _{Betume}	D
M ₁	5,5%	94,5%	2,980	1,033	2,700
M ₂	6,0%	94,0%	2,980	1,033	2,677
M ₃	6,5%	93,5%	2,980	1,033	2,655
M ₄	7,0%	93,0%	2,980	1,033	2,633
M ₅	7,5%	92,5%	2,980	1,033	2,611

11.2) Dens. Aparente Expressa como Porcentagem da Dens. Máx. Teórica (d%)

11.3) Porcentagem de Vazios da Mistura (%Vv)

	%b	d	D	d%	%Vv
M ₁	5,5%	2,538	2,700	94,00	6,00
M ₂	6,0%	2,549	2,677	95,21	4,79
M ₃	6,5%	2,561	2,655	96,47	3,53
M ₄	7,0%	2,554	2,633	97,01	2,99
M ₅	7,5%	2,547	2,611	97,56	2,44

11.4) Porcentagem de Vazios do Agregado Mineral (VAM %)

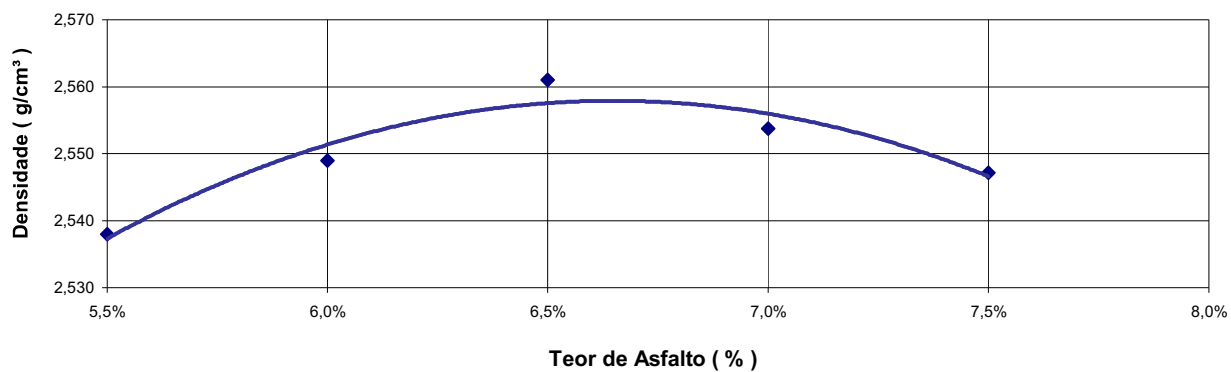
Relação Betume-Vazios (RBV %)

	%b	d	D _{a (mist.)}	VAM %	RBV %
M ₁	5,5%	2,538	2,966	19,14	68,63
M ₂	6,0%	2,549	2,966	19,22	75,08
M ₃	6,5%	2,561	2,966	19,27	81,67
M ₄	7,0%	2,554	2,966	19,93	84,97
M ₅	7,5%	2,547	2,966	20,56	88,13

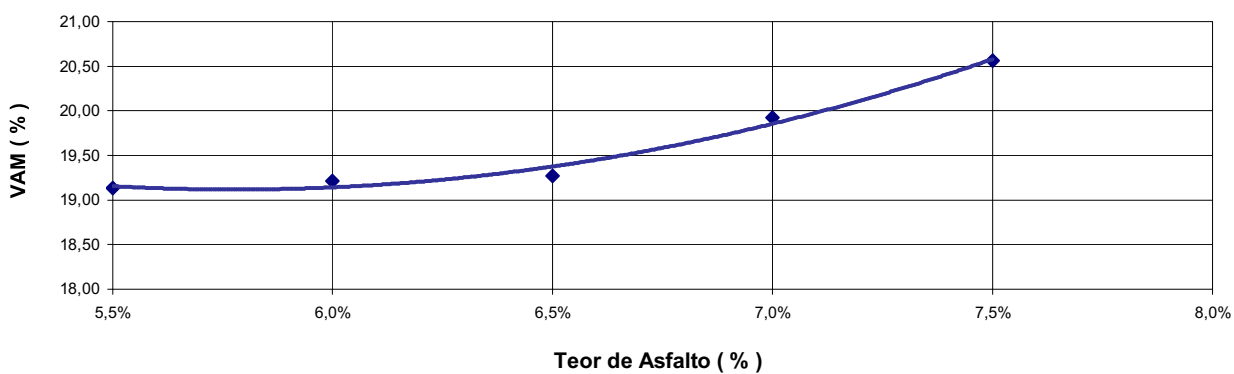
11.5) Quadro Resumo

Teor %	5,5%	6,0%	6,5%	7,0%	7,5%
D (g/cm ³)	2,700	2,677	2,655	2,633	2,611
d (g/cm ³)	2,538	2,549	2,561	2,554	2,547
Vv %	6,00	4,79	3,53	2,99	2,44
RBV %	68,63	75,08	81,67	84,97	88,13
Estabilidade (Kgf)	1241,27	1341,07	1172,35	989,25	949,56
Fluência (mm)	2,63	2,92	3,25	3,42	3,50
VAM %	19,14	19,22	19,27	19,93	20,56
RTCD (Kg/cm ²)	10,75	10,87	12,18	11,23	11,02

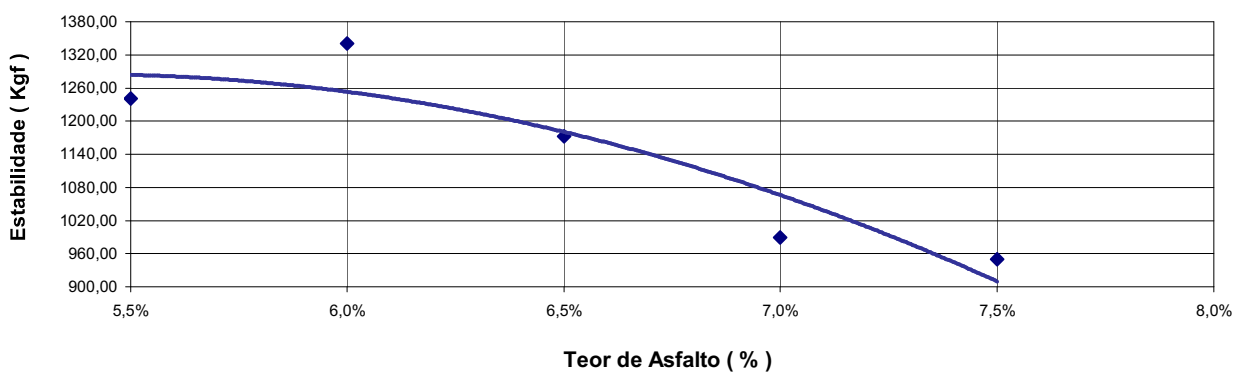
12.1) Densidade Aparente (g/cm³)



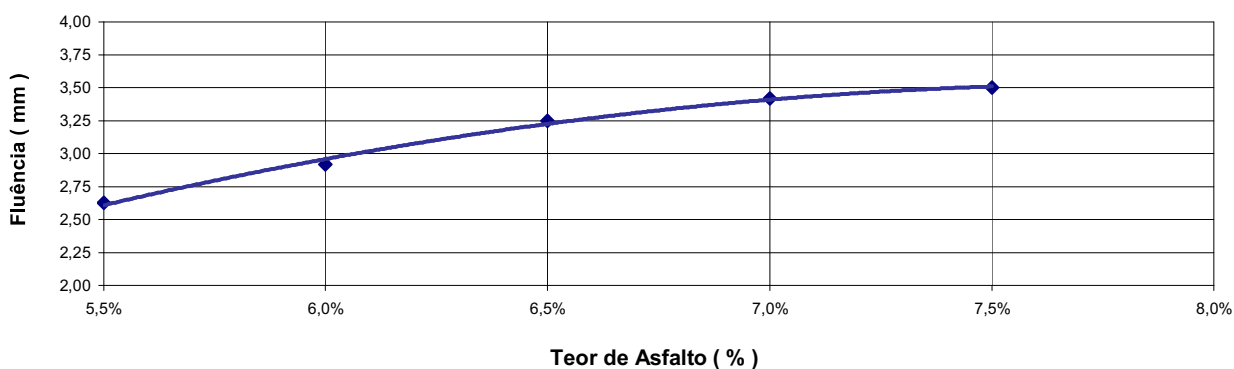
12.2) Vazios do Agregado Mineral (%)



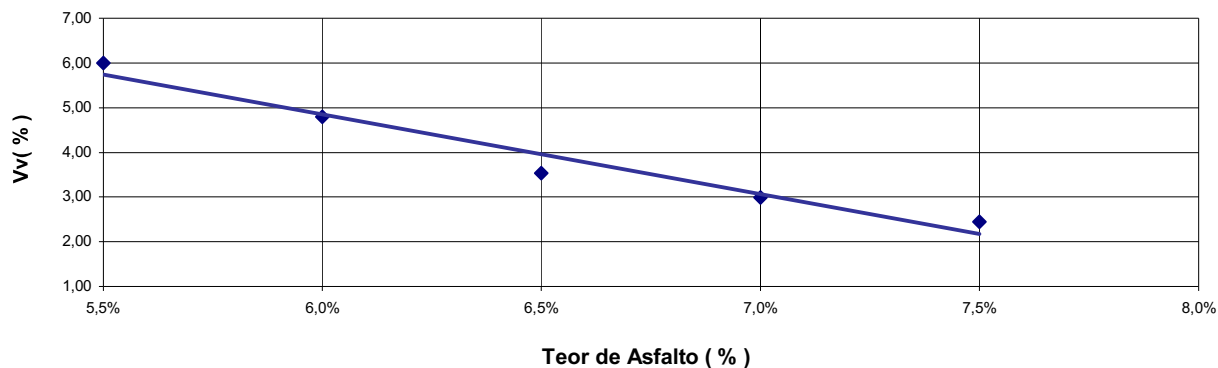
12.3) Estabilidade (Kgf)



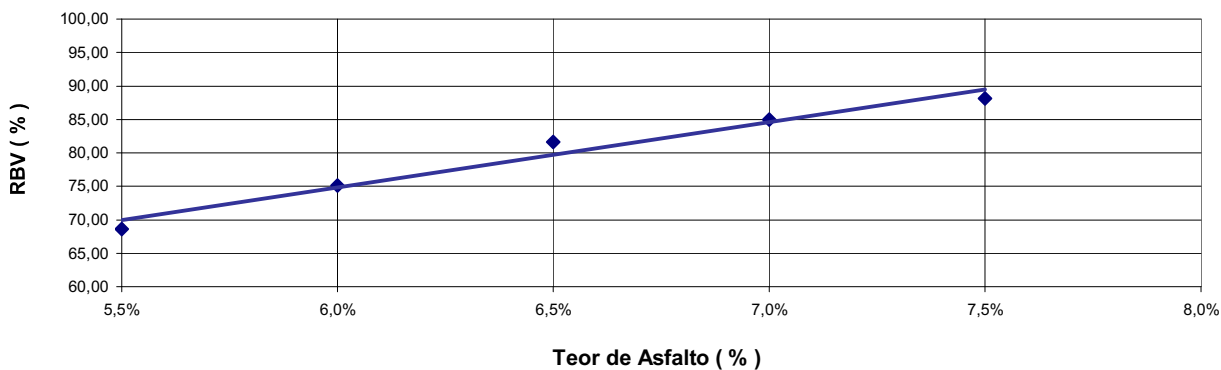
12.4) Fluência (mm)



12.5) Volume de Vazios (%)



12.6) Relação Betume-Vazios (%)



13) Cálculo do Teor Ótimo de CAP (%)

Valores Limites				
	Vv (%)	Teor	RBV (%)	Teor
mínimo ->	3	6,748%	65	5,258%
máximo ->	5	5,895%	78	6,210%
média ->		6,322%		5,734%

Teor Encontrado -> 6,2%

13.1) Cálculo dos índices em função do Teor Ótimo de CAP

Índices		Especificações	
		mínimo	máximo
Teor %	6,2%	5,9%	6,5%
D (g/cm ³)	2,667	-	-
d (g/cm ³)	2,554	-	-
Vv %	4,24	3,00	5,00
RBV %	77,26	65,00	78,00
Estabilidade (Kgf)	1234,05	800,00	-
Fluência (mm)	3,07	-	-
VAM %	19,24	15,00	-
RTCD (Kg/cm ²)	11,58	7,65 (0,75MPa)	-

ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA DO LIGANTE ASFÁLTICO UTILIZADO NESTA DOSAGEM

ECOFLEX B - ASFALTO MODIFICADO POR BORRACHA MOÍDA DE PNEUS INSERVÍVEIS

CARACTERÍSTICA	UNIDADE	MÉTODO	RESULTADOS	ESPECIFICAÇÃO DNIT 111/09-EM
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1mm	NBR 6576	49	30 - 70
Ponto de Amolecimento, mín.	°C	NBR 6560	57,5	55
Recuperação Elástica por Torção, mín.	%	NLT 329 / 91	69,0	-
Recuperação Elástica Ductilômetro (25°C, 10cm), mín.	%	NBR 15086	68,0	50
Ponto de Fulgor, mín.	°C	NBR 11341	235	235
Viscosidade Brookfield à 175°C Spindle 3, 20 rpm	cP	ASTM D 2196	1540	800 - 2000
Estabilidade a Estocagem, máx.	°C	NBR 15166	4,5	9
Densidade Relativa, 25°C	g/cm ³	NBR 6296	1,031	-
Ensaios no Resíduo após o RTFOT:				
Varição de massa do RTFOT, máx.	%	NBR 15235	0,32	1,0
Varição do Ponto de Amolecimento, máx.	°C	NBR 6560	6	10
Porcentagem de Penetração Original, mín.	%	NBR 6576	70	55
Porcentagem da Recuperação Elástica Original, (25°C, 10cm), mín.	%	NBR 15086	115	100

(*) De acordo com a Especificação DEINFRA-SC-ES-P-05B/05 - Pavimentação: Camadas de Misturas Asfálticas Usinadas a Quente com Asfalto-Borracha.

(**) De acordo com a Resolução N°039 de 24/12/09 da ANP, publicada no Diário Oficial da União (DOU) em 26/12/09.

Dados sobre a mistura e compactação	Laboratório	Campo
Temperatura de mistura - ECOFLEX B (°C)	175	173 - 178
Temperatura de mistura - Agregado (°C)	183	180 - 185
Temperatura de Compactação (°C)	175	mínimo 150

Número de Golpes por Face em cada Corpo-de-Prova	75
--	----

ANEXO B



2.1 ESTUDOS DE TRÁFEGO E CAPACIDADE

2.1.1 INTRODUÇÃO

Os estudos de tráfego na rodovia BR-285/RS visam detectar propriedades e características do fluxo de veículos no segmento, determinar os indicadores dos Níveis de Serventia, condições operacionais e funcionais, bem como elementos necessários a Elaboração de Projeto Básico e Executivo de Engenharia para Restauração de Rodovia do tipo CREMA – 2ª Etapa.

Para efetivação deste estudo, a consultora seguiu as indicações do edital, bem como as recomendações da IS-201 – Estudos de Tráfego em Rodovias (Área Rural), em conformidade com a metodologia recomendada para cada tarefa determinada.

2.1.2 COLETA DE DADOS

2.1.2.1 Dados de tráfego existentes e Correção da Sazonalidade

Tendo em vista que a anos o DNIT não realiza contagens de tráfego em postos permanentes, para a correção da sazonalidade considerou-se o fator de correção mensal como sendo 1.

2.1.3 PESQUISAS DE CAMPO

2.1.3.1 Introdução

Para atendimento das recomendações e coleta dos dados necessários para perfeita caracterização do tráfego, foi programada a execução de pesquisas volumétricas e classificatórias de tráfego em 4 (quatro) postos localizados na BR-285/RS, apresentados a seguir:

- Posto 1 – entre Ijuí – Panambi – Km 443+460;
- Posto 2 – entre Ijuí – Santo Ângelo – Km 475+560;
- Posto 3 – entre Santo Ângelo – São Luiz Gonzaga – Km 535+120;
- Posto 4 – entre São Luiz Gonzaga – São Borja - Km 667+700.



Para estes postos descritos, foram realizadas Pesquisas Volumétricas e Classificatórias durante 7 dias ininterruptamente, durante 24 horas por dia.

Para caracterização do tráfego em função de interseções significativas, foram realizadas complementarmente contagens direcionais em 9 (nove) postos. As contagens direcionais foram realizadas durante 1 dia, no período de 4 horas (das 16:00 às 20:00 hrs) , nos seguintes locais:

- 1ª Interseção São Luiz Gonzaga – km 563+860
- 2ª Interseção São Luiz Gonzaga – km 565+700
- 3ª Interseção São Luiz Gonzaga – km 568+260
- Interseção Cruz Alta- km 460+080
- Interseção Ijuí - Rs-155 - km 455+200
- Interseção Panambi - km 417+200
- Interseção São Borja - km 669+800
- Interseção Santa Bárbara do Sul - km 389+850
- Interseção Santo Ângelo - km 495+520

2.1.3.2 Metodologia Adotada nas Pesquisas de Campo

Para as pesquisas volumétricas e classificatórias, realizadas nos postos P1, P2, P3 e P4, os veículos foram discretizados nas seguintes categorias: automóveis, utilitários, caminhões (2C(16), 2C(20), 3C, 2C2, 2C3, 2S1, 2S2, 2S3, 3C2, 3C3, 3S1, 3S2, 3S3, 4CD, 3S2S2 e 3S2C4) e ônibus (2C, 3C e 4C). As contagens de veículos foram totalizadas a cada quarto de hora de modo a possibilitar a determinação do fator horário de pico (FHP).

Para os postos de contagem direcional, os veículos foram discretizados em três categorias: passeio, ônibus e caminhões, uma vez que estes postos destinam-se à caracterização dos fluxos horários de pico das interseções em unidades de passeio (UCP).

Nos postos de pesquisa volumétrica e classificatória P1, P2, P3 e P4, onde foi realizada contagem durante 24 horas, os veículos foram pesquisados e classificados da seguinte forma:

a) Veículos de Passeio (P):



Automóveis diversos (pequenos, médios e grandes);

b) Utilitários:

Caminhonetes, furgões, "pick-ups", "Kombi", "Besta", "vans" e outros veículos leves, com capacidade de carga menor que 3,0 toneladas;

c) Ônibus (O):

Coletivos urbanos e ônibus intermunicipais, o "Tribus" (ônibus com eixo simples de rodas simples dianteiro e um eixo "tandem" duplo traseiro) e os microônibus; e,

d) Veículos de Carga:

Os veículos de carga foram classificados de acordo com o número, tipo e disposição dos eixos, conforme a "Configuração de Eixos" recomendada pelo Manual de Estudos de Tráfego do DNIT;

➤ **Caminhões Simples : 2C**

Caminhão leve/médio, composto de um eixo simples de rodas simples dianteiro e um eixo simples de rodas duplas traseiro, conhecido como caminhão "foco". Foram incluídos nesta categoria o "F - 4.000" da Ford, o "MB - 600" da Mercedes Benz e outros caminhões pequenos (conhecidos como "três quartos") semelhantes (AGRALE, VOLKSWAGEN, etc.);

➤ **Caminhões Duplos : 3C**

Caminhão pesado, composto por um eixo simples de rodas simples dianteiro e um eixo "tandem" duplo de rodas duplas traseiro;

➤ **Semi-reboques : 2S1 / 2S2 / 2S3 / 3S2 / 3S3**

Veículos articulados compostos de um "cavalo mecânico" que traciona uma unidade (semi-reboque) com um eixo simples ou "tandem" (duplo ou triplo) de rodas de rodas duplas traseiro (são as denominadas "carretas", "jamantas", "cegonheiras", etc.), com diversas configurações de eixo.

➤ **Reboques : 2C2 / 2C3 / 3C2 / 3C3**

Veículos articulados compostos por uma unidade tratora (geralmente um caminhão 2C ou 3C) que traciona um "reboque" com dois eixos, sendo um eixo simples de rodas simples ou duplas dianteiro e um eixo simples ou "tandem" (duplo ou triplo) de rodas duplas traseiro.











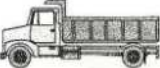



















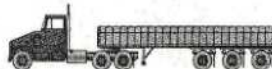


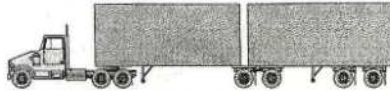

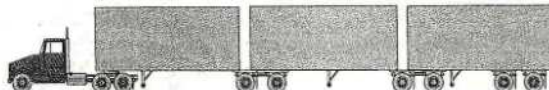


➤ **Composição de Veículos de Carga - CVC (Bitrem - 3S2S2; Rodotrem - 3S2C4; Tritrem - 3S2S2S2)**











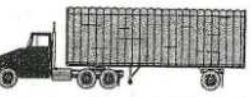
Veículos articulados compostos por uma unidade tratora (geralmente um caminhão 3S2) que traciona 2 (dois) “reboques”, ambos com eixos tandem duplo (Bitrem); ou 1 (uma) unidade tratora (geralmente um caminhão 3S2) que traciona 2 (dois) “reboques”, o primeiro dotado de 1 (um) eixo tandem duplo e o outro dotado de 2 (dois) eixos tandem duplo (Rodotrem); uma unidade tratora (geralmente um caminhão 3S2) que traciona 3 (três) “reboques”, todos dotados de 1 (um) eixo tandem duplo (Tritrem).

Apresenta-se, a seguir, a “Classificação de Veículos” adotada nas Pesquisas de Campo.

MODELO "I" - CLASSIFICAÇÃO DE VEÍCULOS PELA CONFIGURAÇÃO DOS EIXOS

PASSEIO		UTILITÁRIOS		3C		
		 		 		
ÔNIBUS	2C			3C		
	COLETIVO URBANO		COLETIVO INTERMUNICIPAL		TRIBUS	
						
CAMINHÃO	2C					
	3C					
REBOQUES	2C2					
	2C3					
	3C2					
	3C3					
SEMI-REBOQUES	2S1					
	2S2					
	2S3					
	3S2					
	3S3					
	BITREM 3S2S2					
	RODOTREM 3S2C4					
	TRITREM 3S2S2S2					

MODELO "I" (CONTINUAÇÃO)
CLASSIFICAÇÃO DE VEÍCULOS PELA CONFIGURAÇÃO DOS EIXOS

CAMINHÃO	4C		
	4CD		
SEMI-REBOQUES	2I2		EIXOS TRASEIROS DO SEMI-REBOQUE ISOLADOS
	2I3		EIXOS TRASEIROS DO SEMI-REBOQUE ISOLADOS
	2J3		EIXOS TRASEIROS DO SEMI-REBOQUE 1º ISOLADO/ 2º TANDEM DUPLO
	2C		CAMINHÃO TRATOR
	3C		CAMINHÃO TRATOR
	3I2		EIXOS TRASEIROS DO SEMI-REBOQUE ISOLADOS
	3I3		EIXOS TRASEIROS DO SEMI-REBOQUE ISOLADOS
	3J3		EIXOS TRASEIROS DO SEMI-REBOQUE 1º ISOLADO/ 2º TANDEM DUPLO
	3S1		EIXO TRASEIRO DO SEMI-REBOQUE ISOLADO



2.1.4 EXPANSÃO E CORREÇÕES DAS CONTAGENS

Para levar em consideração as variações de sazonalidade e ajuste dos Volumes de Tráfego apurados nas Pesquisas de Campo, foram calculados os “Fatores de Correção”, a saber:

a) Fator de Expansão Diária - FD:

Fator que corrige os volumes contados em 4 horas para a referência do dia de 24 horas. Este fator é calculado dividindo-se o volume de tráfego de cada tipo de veículo, apurado no período de 24 horas, pelo volume correspondente ao período de 4 horas do Posto de Referência, considerado para a expansão diária das pesquisas realizadas em períodos parciais:

$$\text{FD} = \text{Volume de 24:00 horas} / \text{Volume de 4:00 horas}$$

Os valores dos Fatores de Correção Diária “FD” adotados foram obtidos através das “Contagens Volumétricas e Classificatórias” realizadas nos postos P1, P2, P3 e P4, no período integral de 24 horas, durante 7 dias. Os Fatores de Expansão Diária – “FD” e os Resumos da Contagem Volumétrica e Classificatória estão apresentados adiante.

b) Fator de Correção Semanal – FS

Fator que corrige os volumes obtidos nas pesquisas de campo, considerando-se o dia da semana em que estas foram realizadas. Para o cálculo do FS utilizou-se o Volume do dia da semana em relação ao Volume Médio Semanal. Para o cálculo o FS utilizou-se a seguinte expressão:

$$\text{FS} = \text{Volume do dia da semana} / \text{volume médio da semana}$$

Os valores dos Fatores de Correção Semanal “FS” adotados foram obtidos através das “Contagens Volumétricas e Classificatórias” realizadas nos postos P1, P2, P3 e P4, no período de 7 dias, durante 24 horas.

c) Fator de correção mensal - FM

Fator que corrige os volumes obtidos nas pesquisas de campo, considerando-se o mês em que foram realizadas.



Adotou-se o Fator de Correção Mensal – FM igual a 1, já que a anos o DNIT não realiza contagens de tráfego em postos permanentes

2.1.5 RESULTADOS DAS PESQUISAS VOLUMÉTRICAS E CLASSIFICATÓRIAS

A seguir, apresenta-se os Resultados das Contagens Volumétricas e Classificatórias, Fator de Correção Semanal e o Cálculo do VMD, o Resumo da Contagem e o Fator de Expansão Horária:



2.1.5.2

IJUÍ – SANTO ÂNGELO – km 475+560

5	18	1
6	20	
1	40	
10	20	
11	16	
22	18	
18	1 24	1
14	3 24	
16	10	
19	1 22	
253	1 14 339	3

