

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Renato Zulian Lunardi

**VERIFICAÇÃO DO PROJETO DE PAVIMENTAÇÃO DA
BR-101 TAVARES/BOJURU**

Porto Alegre
julho de 2008

RENATO ZULIAN LUNARDI

**VERIFICAÇÃO DO PROJETO DE PAVIMENTAÇÃO DA
BR-101 TAVARES/BOJURU**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientador: Washington Peres Núñez

Porto Alegre
julho de 2008

RENATO ZULIAN LUNARDI

**VERIFICAÇÃO DO PROJETO DE PAVIMENTAÇÃO DA
BR-101 TAVARES/BOJURU**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovada em sua forma final pelo Professor Orientador e pelo Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, julho de 2008

Prof. Washington Peres Núñez
Dr. pela UFRGS
Orientador

Prof. Inácio Benvegnu Morsch
Chefe do DECIV

BANCA EXAMINADORA

Prof. Washington Peres Núñez (UFRGS)
Dr. pela UFRGS

Profa. Suyen Matsamura Nakahara (UFRGS)
Dra. pela USP

Profa. Luciana Rhode (UFRGS)
Dra. pela UFRGS

Dedico este trabalho à memória do amigo Mário Sérgio S. Gonçalves, que me apoiou e participou ativamente na realização deste trabalho e nos deixou recentemente.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que de alguma forma colaboraram para a realização deste trabalho de conclusão de curso.

Ao Professor Orientador Washington Peres Núñez, pelos conhecimentos ministrados, pela paciência, pela disponibilidade, aconselhamento e dedicação.

Ao Professor Jorge Augusto Pereira Ceratti, por disponibilizar os recursos dos laboratórios que ele coordena e pelo apoio na realização dos ensaios.

À professora Carin Maria Schmitt, pela sua dedicação e entusiasmo e pela condução impecável das duas disciplinas de Trabalho de Diplomação, inspirando-nos na realização de trabalhos de qualidade.

À Construtora Sultepa S.A., ao seu Diretor de Planejamento Sérgio Mattos por permitir e incentivar a realização deste trabalho em um empreendimento da empresa, minha profunda gratidão.

Agradeço aos Engenheiros Alessandro Bones e Jaime Barrios, responsáveis pelas obras da BR-101, pela imensa colaboração e presteza, disponibilizando recursos indispensáveis para a realização deste trabalho.

Agradecimentos especiais aos laboratoristas e funcionários da Construtora Sultepa S.A., Elmiro Mota Bierei, Jéferson Marques Kober, Jair Miguel Saraiva e Rogerio Araujo da Silva, pelo grande auxílio na extração de material para os ensaios.

Agradeço ao colega Diego Treichel, bolsista do Laboratório de Pavimentação, pelo apoio na realização dos ensaios.

Posso não concordar com uma só palavra do que dizeis,
mas defenderei até a morte vosso direito de dizê-lo.

François Marie Arouet, dito Voltaire

RESUMO

LUNARDI, R. Z. **Verificação do Projeto de Pavimentação da BR-101 Tavares/Bojuru.** 2008. 47 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Este trabalho é focado na verificação do projeto de pavimentação do trecho da BR-101 entre a cidade de Tavares e a localidade de Bojuru, na planície litorânea do Rio Grande do Sul. Trata-se de um projeto de pavimentação não usual, pois a base e o revestimento desta rodovia serão executados com areia-asfalto usinada a quente. Esta solução foi adotada devido à inexistência de agregados pétreos nas proximidades do trecho, o que exigiria distâncias de transporte de até 200 km. Esta rodovia teve seu projeto realizado em 1997, sendo que as obras iniciaram em 1998. Em 2002 as obras foram paralisadas e só seriam retomadas cinco anos depois, em novembro de 2007. A verificação do projeto de pavimentação desta estrada leva em consideração que alguns trechos inacabados foram expostos ao tráfego, portanto ao desgaste, durante o período de paralisação dos trabalhos, e que os materiais de construção, por não serem os mesmos analisados na época do projeto, apresentam diferentes propriedades. Com o objetivo de avaliar o comportamento mecânico de amostras de areia-asfalto retiradas da rodovia, foram realizados ensaios de resistência à tração e módulo de resiliência. Com os resultados obtidos fez-se uma análise mecanicista da estrutura do pavimento através do programa Everstress 5.0. Através dos resultados dos cálculos computacionais, foi possível prever o número de eixos padrão que a rodovia suporta de acordo com modelos de fadiga presentes na literatura e comparar este resultado com o previsto no projeto. Além disso, a análise permitiu a comparação da carga máxima de tração sofrida pelo pavimento com a carga admissível medida em laboratório. Conclui-se que as camadas executadas atualmente não suportam as solicitações de projeto, sendo necessária a realização de estudos para se determinar uma mistura que atenda a tais solicitações.

Palavras-chave: pavimentação, areia-asfalto, análise mecanicista, módulo de resiliência.

ABSTRACT

LUNARDI, R. Z. **Verificação do Projeto de Pavimentação da BR-101 Tavares/Bojuru.** 2008. 47 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Verification of the Paving Project of the Road BR-101 Tavares/Bojuru

This work is focused on verifying the paving project of the road BR-101 between the city of Tavares and the town of Bojuru in the coastal plain of Rio Grande do Sul. This is an unusual pavement because the base and the road surface are being made with sand-asphalt hot mix. This solution was adopted due to the absence of stones or gravel near the site, which would require transportation distances of up to 200 km. This road had its project conducted in 1997, and the works started in 1998. In 2002 the works were paralyzed and would only be resumed five years later, in November 2007. The verification of this road's pavement design takes into account that some unfinished portions were exposed to traffic, so to weariness, during the stoppage of work, and that the construction materials, being not the same from the project period, present different properties. To evaluate the mechanical behavior of samples of sand-asphalt taken from the road, tests are made for tensile strength and resilient module. With the results, a mechanistic analysis of the structure have been made using the software Everstress 5.0. With the results of the mechanistic analysis, it was possible to predict the number of standard axles that the pavement would support in accordance with transfer functions present in the literature and compare the result with the project's determinations. Furthermore, the analysis allowed the comparison of the maximum load supported by the pavement with admissible loads measured in the laboratory. It follows that the layers currently used do not support the project's requests and require studies to determine one mixture that serves such requests.

Key-words: pavement, sand-asphalt, mechanistic analysis, resilient module.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: relevo do Rio Grande do Sul.....	13
Figura 2: províncias geomorfológicas do Rio Grande do Sul.....	14
Figura 3: trecho em areia-asfalto da BR-101.....	16
Figura 4: malha viária da Planície Costeira do Rio Grande do Sul.....	17
Figura 5: RST-101 entre Capivari do Sul e Mostardas.....	18
Figura 6: caminhão carregado de madeira trafegando próximo a Tavares.....	19
Figura 7: desenho da pesquisa.....	24
Figura 8: equipamento de ensaio de resistência à tração por compressão diametral.....	26
Figura 9: equipamento utilizado para a determinação do módulo de resiliência de misturas asfálticas.....	28
Figura 10: fluxograma do método mecanicista sul-africano de projeto de pavimentos....	30
Figura 11: detalhe da sonda rotativa.....	35
Figura 12: extração de corpos de prova.....	36
Figura 13: pontos de interesse do pavimento para análise computacional.....	41

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: variáveis de estado das três camadas do pavimento e do subleito.....	39
Quadro 2: resultados da primeira análise computacional.....	41
Quadro 3: parâmetros das camadas para a segunda análise computacional.....	42
Quadro 4: resultados da segunda análise computacional.....	42
Quadro 5: parâmetros das camadas para a terceira análise computacional.....	43
Quadro 6: resultados da terceira análise computacional.....	43
Quadro 7: parâmetros das camadas para a quarta análise computacional.....	44
Quadro 8: resultados da quarta análise computacional.....	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: resultados dos ensaios para os corpos de prova de primeira camada.....	37
Tabela 2: resultados dos ensaios para os corpos de prova de segunda camada.....	38
Tabela 3: resultados dos ensaios para os corpos de prova do trecho onde foram executadas três camadas antes da paralisação dos trabalhos.....	39

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 TEMA PRINCIPAL	12
1.2 CONTEXTUALIZAÇÃO.....	12
1.2.1 Contexto Geográfico da Região	13
1.2.2 Contexto Ambiental da Região	15
1.2.3 Histórico da Rodovia	15
1.2.4 Condições de Utilização da Rodovia	18
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	20
2 METODOLOGIA	21
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA.....	21
2.2 OBJETIVO PRINCIPAL.....	22
2.3 OBJETIVOS SECUNDÁRIOS.....	22
2.4 PRESSUPOSTO.....	22
2.5 DELIMITAÇÕES.....	23
2.6 LIMITAÇÕES.....	23
2.7 DELINEAMENTO DA PESQUISA.....	24
3 PROJETO DE PAVIMENTOS: ALGUNS CONCEITOS BÁSICOS	26
3.1 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO.....	26
3.2 MÓDULO DE RESILIÊNCIA.....	27
3.3 ANÁLISE MECANICISTA DE PAVIMENTOS.....	29
3.4 PROGRAMA EVERSTRESS 5.0.....	31
3.5 MODELOS DE FADIGA.....	32
4 DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS	34
4.1 ENSAIOS DE LABORATÓRIO.....	36
4.2 ANÁLISE COM O PROGRAMA EVERSTRESS.....	39
5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	45
REFERÊNCIAS.....	46

1 INTRODUÇÃO

1.1 TEMA PRINCIPAL

A construção de novas estradas e a conservação das existentes fazem parte das atribuições dos Engenheiros Civis e são de importância estratégica para o desenvolvimento do nosso país. Tendo em vista o alto custo de construção e manutenção de rodovias, a sociedade cada vez mais exige engenheiros capazes de atuar nesta área minimizando os custos e maximizando a vida útil da rodovia.

Este trabalho tem por objetivo sintetizar os conhecimentos adquiridos ao longo do Curso através de um exercício completo de Engenharia na área de pavimentação. O tema deste trabalho é a verificação do projeto de pavimentação do trecho da BR-101, entre o município de Tavares e a localidade de Bojuru (município de São José do Norte), que teve suas obras retomadas em novembro de 2007 após interrupção de cinco anos. A solução adotada para a pavimentação do trecho foi o emprego da areia-asfalto usinada a quente, tanto para as duas camadas de base quanto para a camada de revestimento. Este tipo de solução não é usual no nosso Estado. Sendo assim, este trabalho não é apenas uma verificação de um projeto rotineiro, mas a verificação de um projeto que introduz uma inovação importante na área de pavimentação para o estado do Rio Grande do Sul. Esta verificação será feita através de uma análise mecanicista do pavimento, comparando os resultados obtidos com as especificações do projeto original.

1.2 CONTEXTUALIZAÇÃO

Os projetos de pavimentação exigem uma atenção especial na sua contextualização, pois devem ser realizados com materiais disponíveis na região em questão e devem atender a condições climáticas e de tráfego locais. Além disso, devem respeitar as limitações ambientais

específicas de cada região. Por isso, será dada uma dimensão especial para a contextualização neste trabalho.

1.2.1 Contexto Geográfico da Região

O trecho da BR-101, entre as localidades de Tavares e Bojuru, encontra-se inteiramente na Planície Litorânea Externa do Rio Grande do Sul, isto é, entre a Laguna dos Patos e o Oceano Atlântico. Seu clima é úmido ao longo de todo o ano e em especial no inverno. Esta região do Estado é caracterizada por um relevo bastante plano com altitudes próximas ao nível do mar. Pode-se observar através da figura 1 o relevo da planície litorânea do estado do Rio Grande do Sul.

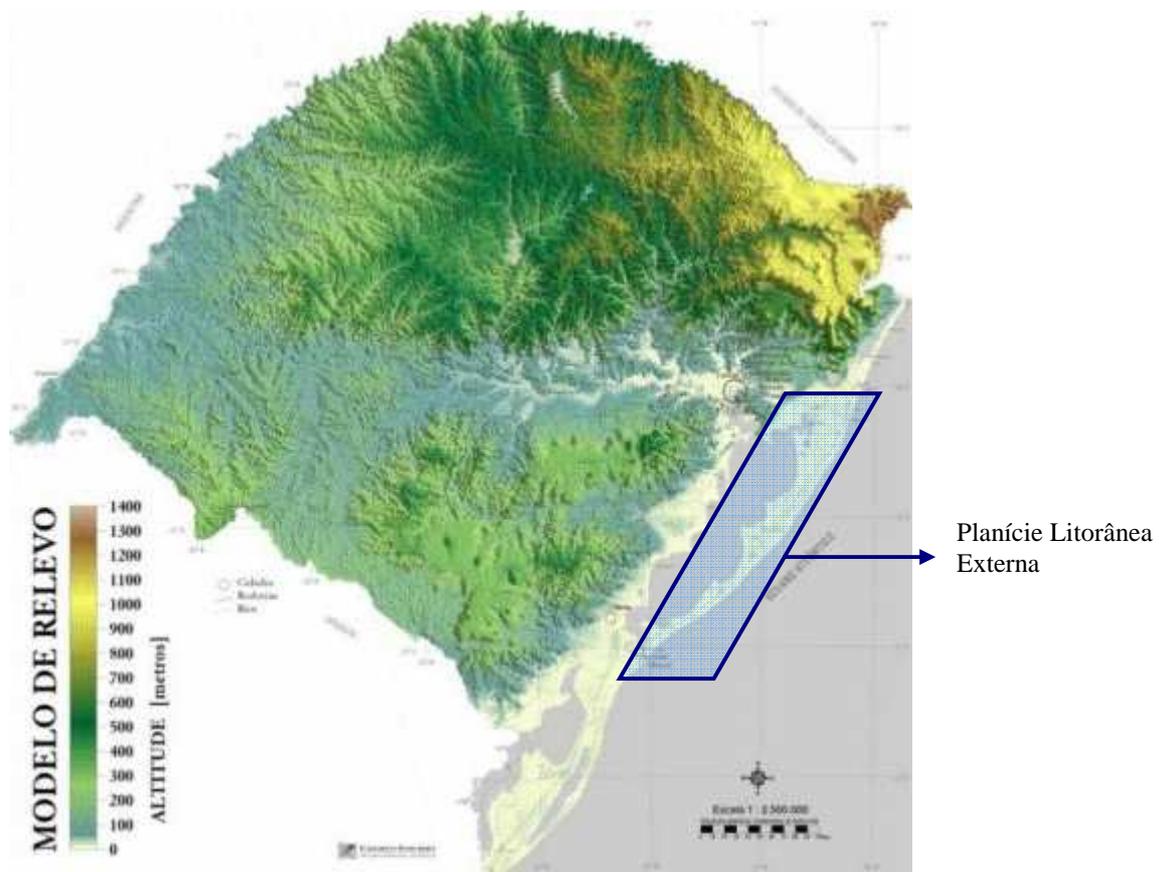


Figura 1: relevo do Rio Grande do Sul (Rio Grande do Sul, 2007)

Do ponto de vista geológico, a planície costeira, segundo Ceratti et al. (1997, p. 1), é formada basicamente por areias finas de origem sedimentar marinha-eólica, que possuem grandes

espessuras, de até 300 m, e que cobrem as formações rochosas subjacentes. A existência da Laguna dos Patos torna inviável economicamente o emprego de pedras britadas provenientes do Escudo Sul-Rio-Grandense na pavimentação de rodovias na Planície Litorânea Externa, pois as distâncias de transporte podem chegar a mais de 200 km. Além disso, segundo Ceratti et al. (1997, p. 2), as medidas de proteção da Mata Atlântica têm proibido a abertura de novas pedreiras e restringindo a exploração das pedreiras existentes na escarpa do Planalto Meridional, o que impediria o emprego da pedra britada também na Faixa Litorânea Norte. Pode-se observar na figura 2 a localização das diferentes províncias geomorfológicas do estado do Rio Grande do Sul.

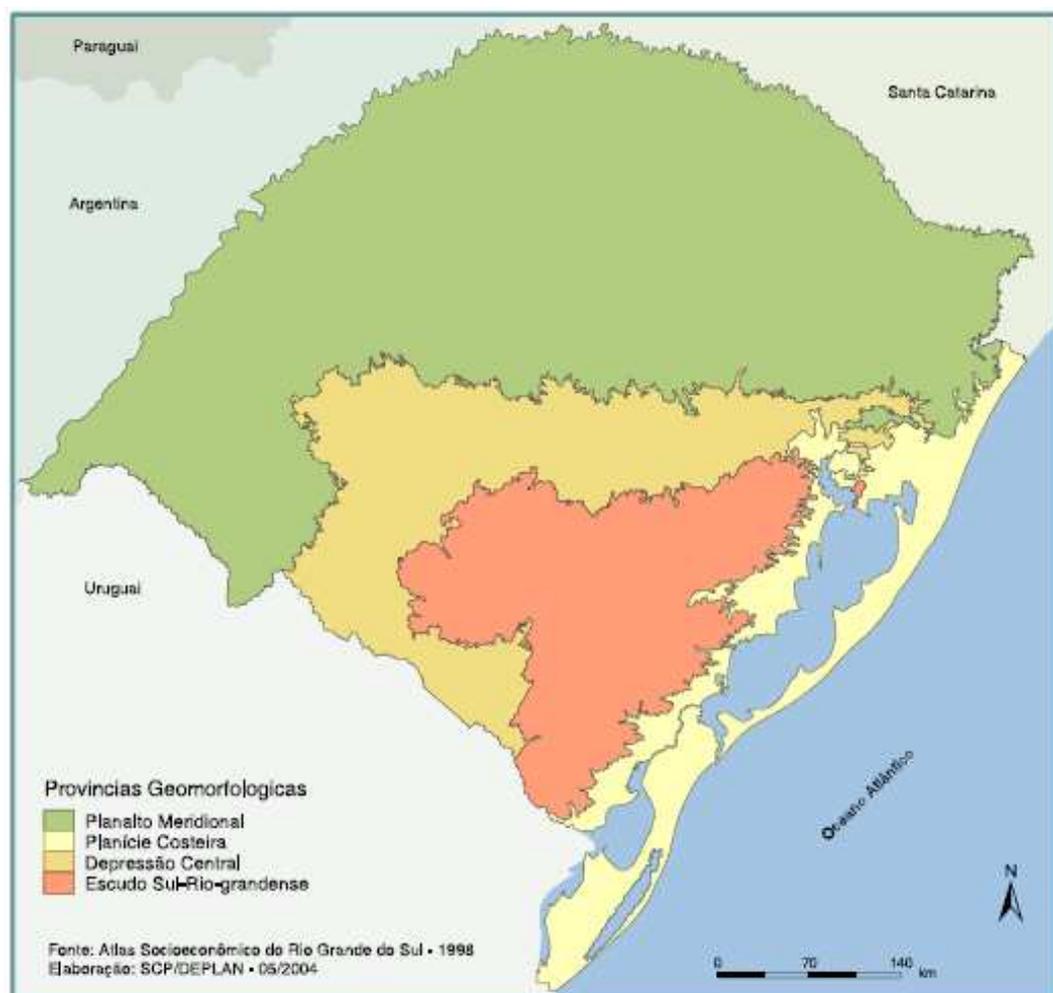


Figura 2: províncias geomorfológicas do Rio Grande do Sul (Rio Grande do Sul, 2008a)

1.2.2 Contexto Ambiental da Região

Segundo Kämpfl et al. (2001, p.14), a resistência do solo da faixa costeira do Rio Grande do Sul aos impactos ambientais é classificada pela Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler como baixa ou muito baixa. Além disso, o trecho de Tavares encontra-se nas proximidades do Parque Nacional da Lagoa do Peixe, que tem por objetivo proteger ecossistemas litorâneos e espécies de aves migratórias que dependem da região para seu ciclo vital. O Parque também apresenta fins científicos, culturais e recreativos (Brasil, 2007). O próprio Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis afirma através do seu site que o tráfego de veículos é um uso conflitante do Parque, afetando-o, assim como o seu entorno.

Segundo Ceratti et al. (1997, p. 9), “[...] as areias brancas junto a linha da costa e as das dunas litorâneas estão preservadas ecologicamente, sendo proibida a extração delas [...]”, e “[...] as escavações, abaixo do nível do lençol freático, dão origem a lagos artificiais, ferindo os princípios de proteção ao meio ambiente [...]”. Tais lagos artificiais aparecem às margens de toda a rodovia. Isso porque a extração de areia é permitida dentro da faixa de domínio. Porém, a uma certa profundidade, torna-se impossível retirar mais areia da faixa de domínio, sendo necessário extraí-la de jazidas nas proximidades. Tendo em vista que a topografia da região é bastante plana e nível do lençol freático é elevado, são raras as jazidas que não firam esses princípios de proteção ambiental. Embora o solo local seja totalmente arenoso, esta areia nem sempre está disponível para ser utilizada como material de construção. Tudo isso indica que são necessários cuidados ambientais redobrados para qualquer obra de pavimentação na região.

1.2.3 Histórico da Rodovia

Na ocasião do projeto da rodovia, deparou-se com o problema de inexistência de agregado graúdo na região. Este e outros fatores fizeram com que a base e o revestimento do trecho entre Tavares e Bojuru fossem realizados em areia-asfalto usinada a quente. Esta não é uma solução usual, principalmente no nosso Estado. De acordo com Bottin (1997, p.2), a areia-asfalto foi empregada com êxito em revestimentos asfálticos no nordeste do Brasil e em bases de pavimentos na Argentina.

O projeto do trecho Mostardas/Tavares/Bojuru foi realizado em 1997 pelo engenheiro Isatir Bottin Filho e foi objeto de sua dissertação de mestrado pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul. O projeto final previa três camadas idênticas de areia-asfalto executadas diretamente sobre o subleito de areia amarelada. As duas primeiras camadas serviriam de base e a última camada de revestimento. A espessura prevista de cada camada era de 6 cm.

Segundo Ceratti et al. (1997, p. 19), “[...] a grande vantagem da base de areia-asfalto a quente é que a areia amarelada empregada é facilmente seca num secador comum, porque tendo poucos finos e sem argila, retém muito pouca água. Portanto ela poderá ser executada ao longo de todo ano [...]”.

As obras iniciaram em 1998. A primeira parte (Mostardas/Tavares) foi totalmente concluída. O trecho entre Tavares e Bojuru teve suas obras interrompidas em 2002. Neste trecho, das três camadas de areia-asfalto previstas originalmente, apenas uma ou duas camadas foram executadas, conforme indicado na figura 3. Toda a extensão de terraplanagem foi concluída.

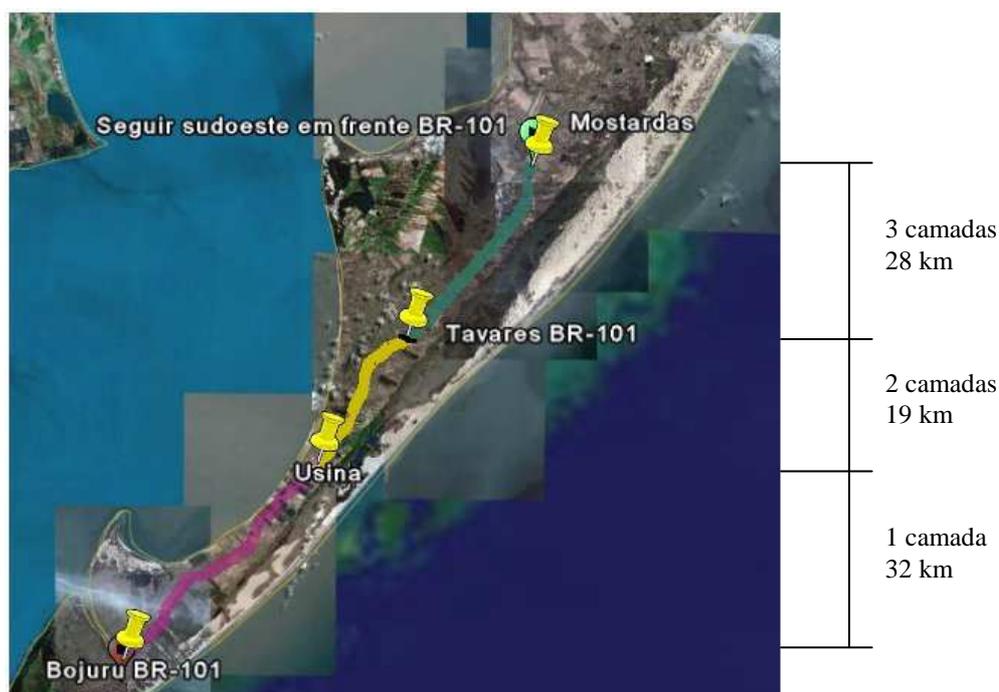


Figura 3: trecho em areia-asfalto da BR-101

Os trabalhos reiniciaram no mês de novembro de 2007. Sendo assim, o trecho inacabado (com menos de três camadas) foi submetido ao tráfego por cinco anos e apresenta deteriorações

importantes. Os trechos concluídos, ao contrário, apresentaram um comportamento muito satisfatório.

O trecho da BR-101 entre Mostardas e Bojuru está sendo executado pela Construtora Sultepa S.A. e o trecho entre Bojuru e São José do Norte, pela construtora J. Malucelli. A figura 4 indica a localização dos trechos da rodovia.

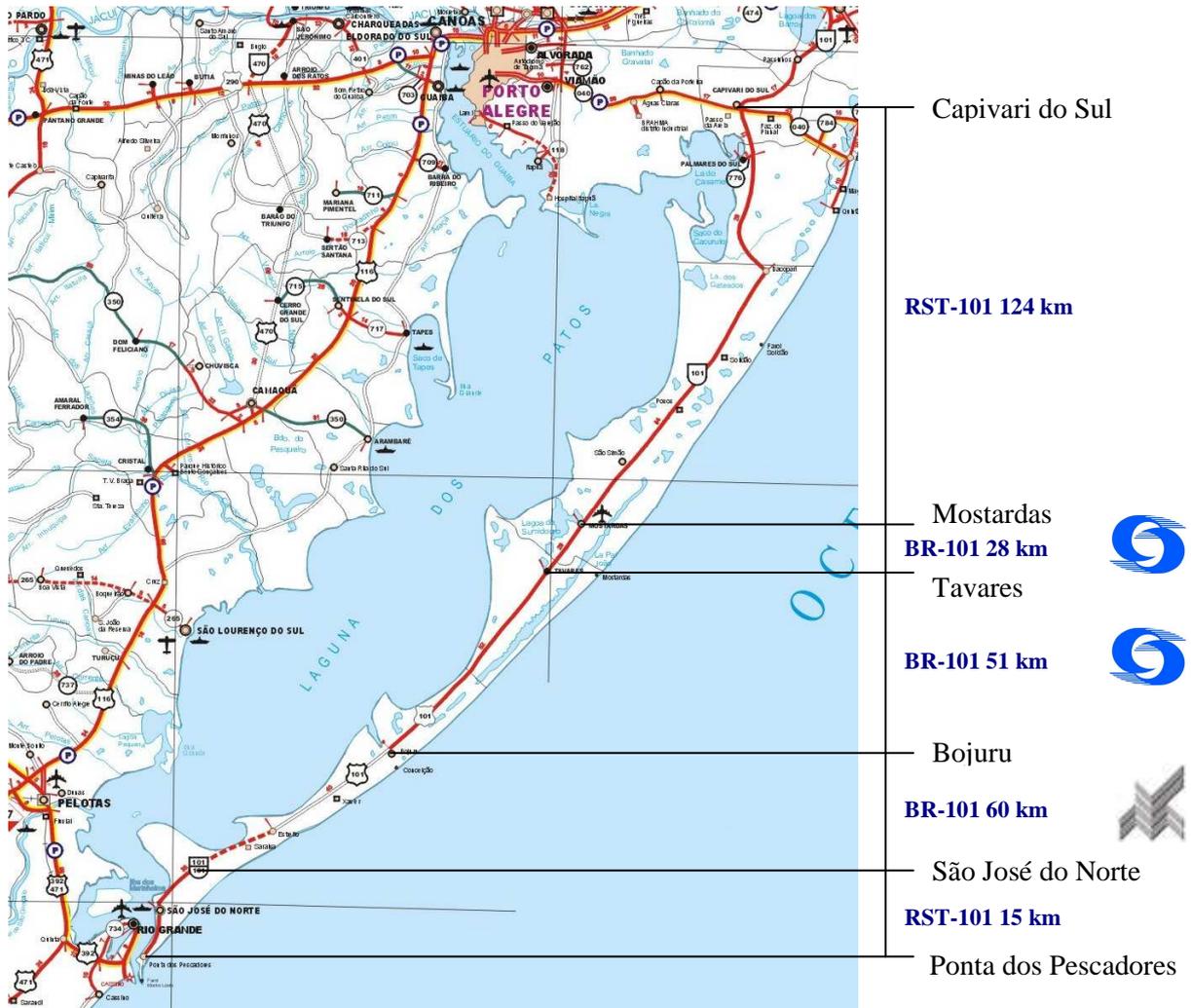


Figura 4: malha viária da Planície Costeira do Rio Grande do Sul (Rio Grande do Sul, 2008b)

Os 124 km da RST-101 entre Capivari do Sul e Mostardas são conhecidos com **Estrada do Inferno** e encontram-se totalmente esburacados (figura 5).



Figura 5: RST-101 entre Capivari do Sul e Mostardas

1.2.4 Condições de Utilização da Rodovia

Em seu projeto, o volume de tráfego da rodovia é classificado como leve. O número N utilizado pelo DAER no dimensionamento do pavimento foi de $7,3 \cdot 10^5$ eixos padrão. Este número é calculado com base em uma estimativa do número equivalente de eixos padrão que passará pela rodovia durante sua vida útil (SENÇO, 1997).

Porém, há uma série de indícios que apontam para um importante aumento do volume de tráfego na região. O primeiro deles é a construção do terminal marítimo da companhia Aracruz na cidade de São José do Norte. A pedra fundamental desta obra foi lançada dia 17 de maio de 2008 (SANTOS, 2008). Este porto, que se beneficiará da estrutura existente dos molhes de Rio Grande, deve mudar o contexto econômico da região. Outro indício importante de aumento de tráfego é a iminente recuperação dos 124 km da RST-101. Com a conclusão da recuperação da RST-101 e com a pavimentação dos trechos entre Tavares e São José do Norte, pela primeira vez esta cidade terá um acesso totalmente pavimentado, sem necessidade

de travessias por balsa. Sendo assim, é muito difícil estimar com alguma precisão o verdadeiro volume de tráfego ao qual o trecho estudado neste trabalho estará exposto.

Outro aspecto relevante das condições de utilização da rodovia é o peso dos caminhões que trafegam na região. O volume de tráfego expresso pelo número N está intimamente ligado ao colapso do pavimento por fadiga devido a cargas repetidas. Porém, a carga máxima que o pavimento resiste deve ser menor do que a carga aplicada pelo peso dos caminhões. Embora o volume de tráfego seja classificado como leve, pode-se constatar que caminhões muito pesados fazem uso desta estrada. Um exemplo disso são os caminhões carregados de madeira bruta (toras), que fazem o transporte deste material até as madeireiras. Como não há fiscalização por balanças e como as distâncias de transporte são curtas, há a possibilidade de esses caminhões excederem o peso máximo estipulado na legislação, de 100 kN por eixo simples de roda simples (Brasil, 1998). A figura 6 mostra um caminhão carregado de madeira, um dos principais produtos da economia local.



Figura 6: caminhão carregado de madeira trafegando próximo a Tavares

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Tendo em vista os aspectos apresentados na contextualização do problema, propõe-se uma pesquisa aplicada com o objetivo de verificar o dimensionamento do pavimento. Para isso, realizou-se uma análise mecanicista, utilizando parâmetros medidos em laboratório através de corpos de prova extraídos diretamente da rodovia. A pesquisa é apresentada neste trabalho composto por 6 capítulos separados conforme suas particularidades.

O capítulo 1 apresenta o tema principal do estudo e seus objetivos. Além disso, este capítulo traz uma contextualização da rodovia, que subsidia a justificativa da pesquisa, abordada no capítulo seguinte.

No capítulo 2 são abordados o delineamento e a metodologia da pesquisa, questão de pesquisa, objetivos, pressuposto, delimitações e limitações.

O capítulo 3 descreve o referencial teórico do assunto abordado através de uma revisão bibliográfica.

No capítulo 4 são descritos os ensaios de laboratório e a análise computacional realizada a partir dos resultados dos ensaios, utilizando-se o programa Everstress 5.0.

Com o capítulo 5, são relatadas as considerações finais com as conclusões da pesquisa.

2 METODOLOGIA

A metodologia utilizada para a realização deste trabalho é a pesquisa aplicada. Esta pesquisa sofre de uma série de limitações de ordem prática que serão abordadas a seguir. Tais limitações foram determinantes para a elaboração da questão de pesquisa, seus objetivos e delimitações.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

O pavimento da BR-101, entre Tavares e Bojuru, está apto a suportar as tensões e deformações admissíveis estabelecidas no projeto?

Esta questão está de acordo com as limitações do trabalho expostas na seqüência. Para se responder esta pergunta serão levados em consideração dois critérios de falha do pavimento: o número N calculado deve ser maior ou igual ao número N especificado no projeto da rodovia, e nenhum ponto do pavimento pode apresentar tensões de tração calculadas superiores às tensões de tração admissíveis do revestimento. O número N é calculado a partir de deformações do pavimento aplicadas aos modelos de fadiga. As tensões e deformações calculadas são obtidas através da análise mecanicista.

Esta questão se justifica por uma série de razões. Primeiramente, as jazidas de areia não são mais as mesmas da época do projeto, ou seja, podem não ter as mesmas características das areias originalmente consideradas. Além disso, de acordo com Bottin (1997, p. 39), o ligante utilizado no projeto do pavimento foi o CAP-20, sendo que este produto sofreu alterações de suas especificações desde a época do projeto. Ao mesmo tempo, a cinza utilizada atualmente não tem a mesma proveniência da cinza original (Sultepa, 2008). Por fim, uma parte da rodovia não concluída foi exposta ao tráfego prematuramente, como exposto no capítulo de contextualização, alterando possivelmente suas características de trabalho. Desta forma, é essencial a realização de uma verificação do projeto.

2.2 OBJETIVO PRINCIPAL

O objetivo principal desta pesquisa é a verificação do dimensionamento do pavimento através de uma análise mecanicista, utilizando parâmetros medidos em laboratório das camadas já executadas.

2.3 OBJETIVOS SECUNDÁRIOS

Este trabalho apresenta os seguintes objetivos secundários:

- a) verificação da capacidade dos materiais que estão sendo utilizados a resistir aos esforços previstos no projeto original;
- b) comparação das características mecânicas das camadas que estão sendo executadas atualmente com as características mecânicas das camadas executadas anteriormente.

2.4 PRESSUPOSTO

Admite-se como pressuposto para esta pesquisa que a areia-asfalto usinada a quente seja a solução mais adequada para a pavimentação de estradas na região em questão.

A escolha da areia-asfalto usinada a quente foi amplamente estudada na fase de anteprojeto, levando-se em consideração aspectos técnicos e econômicos. Este estudo incluiu uma dissertação de mestrado e pesquisas realizadas pela Fundação Luiz Englert. Além disso, a construtora responsável pelo trecho já reiniciou as obras, incluindo a mobilização da sua usina de areia-asfalto usinada a quente (conforme figura 3). Modificar esta solução exigiria estudos mais aprofundados e também exigiria que o contratante (Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes) e a contratada (Construtora Sultepa) tivessem interesses particulares em abandonar a solução inicial, o que não é o caso. Desta forma, neste trabalho não serão propostas soluções para eventuais problemas do pavimento que fujam do escopo do projeto original.

2.5 DELIMITAÇÕES

Por se tratar de uma obra de pavimentação, que deve ser construída com os materiais disponíveis localmente, os resultados obtidos neste trabalho são delimitados geograficamente, tendo como referência a planície litorânea do Rio Grande do Sul entre as localidades de Tavares e Bojuru.

2.6 LIMITAÇÕES

Este trabalho apresenta uma série de limitações significativas. Na verdade, todo o projeto de pavimentação apresenta limitações importantes, sendo de responsabilidade do engenheiro contornar tais limitações para se chegar a um projeto satisfatório tanto no ponto de vista técnico quanto no ponto de vista econômico.

Uma das limitações mais flagrantes, que inclusive já foi abordada no capítulo anterior, é a falta de estudos atualizados de tráfego na região. Além disso, seria muito difícil fazer qualquer tentativa de estudo de tráfego no âmbito de um trabalho de diplomação, pois exigiria muito tempo e recursos financeiros. Isso limita esta pesquisa a verificar se o pavimento atende às especificações originais do projeto, mas não assegura que o pavimento resistirá às solicitações reais às quais ele será submetido. Outra limitação ligada ao tráfego que atinge a quase totalidade dos projetos de pavimentação é o dimensionamento conforme a carga máxima do eixo prevista na legislação. A grande maioria das estradas não possui balanças para fiscalizar o peso dos caminhões. Deste modo, é impossível assegurar que a estrada será submetida a carregamentos compatíveis com o projeto. Em outras áreas da Engenharia Civil este tipo de limitação não existe, e a estrutura deve ser capaz de suportar todos os carregamentos aos quais ela será submetida, sem a existência de um carregamento legal.

A escassez de experiência no emprego de areia-asfalto é outra limitação importante. Esta limitação se reflete principalmente na ausência de modelos de fadiga próprios para a areia-asfalto, sendo necessário a utilização de modelos de fadiga que foram desenvolvidos inicialmente para outros tipos de revestimentos asfálticos.

Há também limitações orçamentárias e de cronograma. Os trabalhos de conclusão são pesquisas curtas e que não dispõem de qualquer orçamento, sendo necessário escolher com

sabedoria os tipos de ensaios que serão efetuados. Muitos outros ensaios poderiam ser realizados para enriquecer esta pesquisa, mas por esses motivos simplesmente não foram feitos. Isso se reflete principalmente na adoção de valores tabelados para certos parâmetros de projeto, como o coeficiente de Poisson da areia-asfalto e o módulo de resiliência do subleito.

2.7 DELINEAMENTO DA PESQUISA

A pesquisa apresenta sete etapas principais, conforme ilustrado na figura 7.



Figura 7: desenho da pesquisa

A primeira etapa, de pesquisa bibliográfica, consiste na busca de conhecimentos específicos na área de pavimentação e no uso da areia-asfalto usinada a quente. Esta etapa traz elementos para a realização das duas etapas seguintes: definição dos parâmetros que caracterizam os materiais (incluindo a definição dos ensaios necessários para a obtenção desses parâmetros) e definição do método adequado para a verificação do pavimento em questão.

Com o método de dimensionamento definido, são realizados os ensaios de caracterização dos materiais, para em seguida verificar o dimensionamento do pavimento e confrontá-lo com o projeto original.

Destaca-se que, na prática, não existe um único método consagrado para a verificação do dimensionamento de pavimentos flexíveis. Em pavimentação, como em outras áreas da geotecnia, existem muitos métodos difundidos e bastante diversificados de dimensionamento. A escolha e a compreensão do método adequado para se realizar este trabalho foi, então, uma das mais importantes etapas da pesquisa.

3 PROJETO DE PAVIMENTOS: ALGUNS CONCEITOS BÁSICOS

Neste capítulo serão abordados alguns conceitos teóricos que servem de base para esta pesquisa.

3.1 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral, conhecido como *Brazilian Test*, é normalizado pelo Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes através da DNER-ME 138/94 (Brasil, 1994a). Este ensaio foi empregado inicialmente com concreto na década de 1950, por proposição do professor Luís Fernando Lobo Carneiro, da Universidade Federal do Rio de Janeiro (BALBO, 2007, p. 229). O equipamento utilizado para a realização destes testes pode ser visto na figura 8.



Figura 8: equipamento de ensaio de resistência à tração por compressão diametral

Segundo Bottin (1997, p. 83):

O ensaio consiste em romper as amostras com o auxílio de uma prensa hidráulica. A amostra é cuidadosamente encaixada em um suporte, recebendo uma leve pressão de ajustamento. A carga é então aplicada e a resistência à tração é registrada com o auxílio de um defletômetro.

Segundo Cardoso (2002, p. 104), a resistência à tração é obtida através da expressão $\sigma_t = 2F/(100\pi Dh)$, onde F designa a carga de ruptura, D o diâmetro do corpo de prova e h sua altura. Este ensaio é de grande importância para análises mecanicistas, visto que a maioria dos pavimentos flexíveis rompe devido aos esforços de tração de suas fibras inferiores causados pelo tráfego. Os resultados deste ensaio serão as tensões de tração admissíveis das camadas do pavimento.

3.2 MÓDULO DE RESILIÊNCIA

De acordo com Medina (1997, p. 158), o primeiro estudo sistemático de deformabilidade dos pavimentos deve-se a Francis Hveem. Este entendia que o trincamento progressivo dos revestimentos asfálticos se devia à deformação resiliente (elástica) das camadas do pavimento. Hveem preferiu usar este termo ao invés de deformações elásticas sob o argumento de que as deformações nos pavimentos são muito maiores do que nos sólidos elásticos com que lida o engenheiro, como concreto e aço.

Balbo (2007, p. 227) explica que:

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

As constantes elásticas (parâmetros) empregadas habitualmente e mais pesquisadas para a formalização de análises de sistemas de camadas são o módulo de elasticidade ou módulo de resiliência (a capacidade de o material não resguardar deformações depois de cessada a ação da carga) dos materiais de pavimentação, bem como seus respectivos coeficientes de Poisson, este para a consideração dos efeitos da Lei de Hooke generalizada.

O módulo de deformação resiliente é, por definição, a relação entre a tensão desvio aplicada e a deformação específica axial resiliente (medida num plano ortogonal ao do carregamento). De acordo com Bottin (1997, p. 79): “A partir dos ensaios de carregamento diametral de carga repetida, as misturas são submetidas a cargas repetidas de duração e frequência comparáveis às que ocorrem nos pavimentos.”.

A norma DNER-ME 133/94 padroniza este ensaio no Brasil. Ela define que a carga aplicada no ensaio de módulo de resiliência deve ter frequência de 1 Hz e uma intensidade de 30% da resistência à tração do material. A temperatura deve ser mantida a 25°C. Inicialmente, as amostras devem ser submetidas a 200 ciclos de carga com o objetivo de eliminar os efeitos de acomodação inicial do corpo de prova. (Brasil, 1994b)

A figura 9 mostra o equipamento de compressão diametral de cargas repetidas do Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.



Figura 9: equipamento utilizado para a determinação do módulo de resiliência de misturas asfálticas

No caso deste equipamento, as cargas repetidas são aplicadas por um sistema pneumático controlado por computador e os deslocamentos medidos por um transdutor mecânico-eletromagnético do tipo LVDT (*linear variable differential transducer*) ligado a uma placa de aquisição de dados de um computador (CARDOSO, 2002, p. 99). Ao fim do ensaio lê-se três medidas de módulo de resiliência fornecidas automaticamente pelo sistema. O módulo da amostra é a média dessas três medidas.

3.3 ANÁLISE MECANICISTA DE PAVIMENTOS

Análises mecanicistas de pavimentos, ao contrário dos métodos empíricos, “[...] são métodos que procuram determinar as condições das camadas do pavimento com base em análise matemática aplicada ao estudo das tensões e deformações [...]” (SENÇO, 1997, p. 622). O pavimento é dimensionado com espessuras de camadas e materiais que a alteração no estado de tensões não leve a deformações indesejáveis ou a ruptura.

Medina (1997, p. 11) explica que :

A Mecânica dos Pavimentos é uma disciplina da Engenharia Civil que permite estudar o pavimento como uma estrutura do engenheiro, tal como se aborda o estudo de fundações, muros de contenção, aterro, etc.

Repetem-se (no Brasil) os métodos de dimensionamento empíricos de origem estrangeira, esquecendo-se de que foram desenvolvidos para condições de solos e climas diferentes do nosso meio físico tropical.

De acordo com Balbo (2007, p. 297), “Um ferramental básico para a análise mais completa das estruturas de pavimento é a Teoria de Sistemas de Camadas Elásticas, que permite a determinação de estados de deformações e tensões em vários pontos das camadas.”. Conhecidos tais estados, eles podem ser relacionados com os modelos de degradação por fadiga e com valores de tensões máximas admissíveis.

No âmbito deste trabalho não seria judicioso fazer a verificação do pavimento através de métodos empíricos, pois não há na literatura tais métodos que tenham sido desenvolvidos especialmente para areia-asfalto usinada a quente. Os métodos empíricos consagrados teriam aplicações pouco acuradas na análise do pavimento em questão.

O método mecanicista sul-africano de projeto de pavimentos (SAMDM), segundo Theyse et al. (1996, p. 6), inicia com a caracterização do carregamento e dos materiais, incluindo espessura das camadas e propriedades elásticas dos materiais para cada camada da estrutura do pavimento. A análise estrutural, envolvendo um modelo de múltiplas camadas elásticas, resulta na resposta do pavimento expressa em termos de tensões e deformações em pontos críticos da estrutura. A resposta do pavimento serve de entrada para funções de transferência para cada tipo de material, relacionando o estado de tensões e deformações com o número de cargas de um eixo padrão (N) suportadas pelo pavimento. Este método é esquematizado na figura 10.

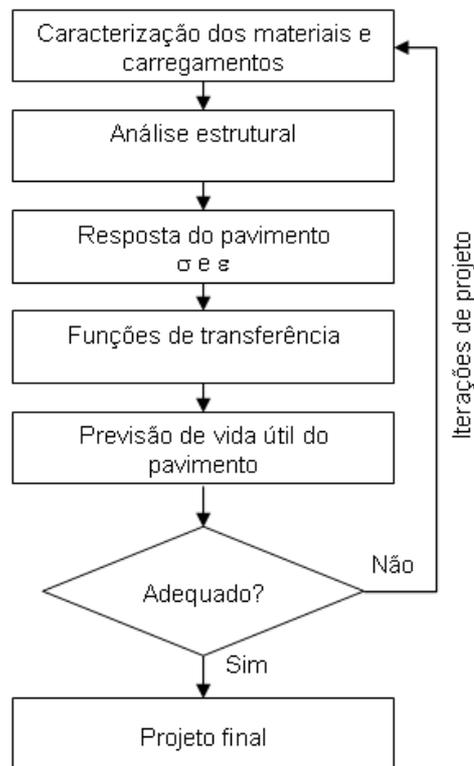


Figura 10: fluxograma do método mecanicista sul-africano de projeto de pavimentos (Theyse et al., 1996, p. 6)

A análise estrutural dos pavimentos teve seu ponto de partida em 1885 com a publicação de um trabalho no qual Joseph Boussinesq apresentava equações que descreviam as inter-relações entre forças de contato sobre o contorno de um sólido semi-infinito. “Estas equações foram utilizadas e expandidas para outras formas geométricas de aplicação de forças e serviram de fundamento para o estabelecimento da Teoria de Sistemas de Camadas Elásticas (TSCE), proposta por Burmister em 1945.” (BALBO, 2007, p. 297). As equações de Boussinesq assumem as hipóteses de que o material é homogêneo e isotrópico e que as tensões ficam caracterizadas por duas propriedades do material (módulo de resiliência e coeficiente de Poisson), o qual obedece a Lei de Hooke generalizada.

Segundo Balbo (2007, p. 302), o grande salto qualitativo nas análises de pavimentos ocorreu em 1945 com a publicação de uma série de artigos desenvolvidos por Donald Burmister. Estes trabalhos traziam a solução analítica para o sistema de três camadas. Esta solução foi graficada para algumas faixas de variação dos parâmetros por diversos engenheiros. Estes ábacos eram muito úteis em uma época em que computadores não eram disponíveis.

Atualmente existem vários programas computacionais que trazem soluções numéricas para a teoria de sistemas de camadas elásticas, tais como Elsym 5 e Everstress 5.0.

A análise mecanicista permite que o engenheiro compreenda o funcionamento do pavimento como estrutura, porém, para que seja utilizada como método de dimensionamento é fundamental conhecer certos parâmetros das camadas que serão construídas, como o módulo de resiliência e a resistência à tração. Estes parâmetros nem sempre estão muito bem definidos na fase de ante-projeto, o que dificulta a utilização desses métodos.

3.4 PROGRAMA EVERSTRESS 5.0

O programa Everstress 5.0, desenvolvido pelo *Washington State Department of Transportation*, faz parte do pacote Everseries de análise de pavimentos. De acordo com o Estados Unidos (2005), o programa Everstress 5.0 é capaz de calcular tensões, deformações e deflexões em um sistema de camadas elásticas semi-infinito sob a ação de cargas estáticas circulares em sua superfície. O programa pode analisar uma estrutura de pavimento contendo até 5 camadas, 20 cargas e 50 pontos de avaliação. O módulo de elasticidade (resiliência), a espessura, e o coeficiente de Poisson devem ser definidos para cada camada. Além disso, a magnitude do carregamento, a pressão de contato e a localização devem ser determinadas para cada carga (roda) considerada.

O programa também é capaz de ajustar o módulo de resiliência de camadas constituídas por materiais não-cimentados de forma iterativa utilizando as seguintes relações:

$$E_b = K_1 \cdot \theta \cdot K_2$$

$$E_s = K_3 \cdot \sigma_d \cdot K_4$$

Onde E_b é o módulo resiliente de materiais granulares e E_s o de materiais britados, θ representa a tensão normal média (*bulk stress*) e σ_d a tensão desvio. Os termos K_1 , K_2 , K_3 e K_4 são constantes de regressão definidas em ensaios laboratoriais com os materiais em questão (Estados Unidos, 2005).

A análise do pavimento feita pelo programa consiste no cálculo de tensões, deformações e deflexões em cada ponto desejado do pavimento. Os pontos de inspeção são tipicamente a base das camadas asfálticas, a profundidade média das camadas não cimentadas da base e o topo do subleito. Ao fim dos cálculos, pode-se avaliar, por exemplo, as deformações normais horizontais na base das camadas asfálticas (ϵ_t), que indicam potencial ruptura por fadiga, a deformação normal vertical (ϵ_v) no meio das camadas de base, que indica potencial deformação permanente dessas camadas, e as tensões horizontais no fundo das camadas (σ_t) asfálticas, que indicam potencial ruptura por excesso de carga.

3.5 MODELOS DE FADIGA

As análises mecanicistas necessitam de critérios de falha dos pavimentos que, muitas vezes, são desenvolvidos experimentalmente, através da observação do comportamento dos diferentes tipos de pavimentos. Sendo assim, estes procedimentos podem receber a denominação de métodos mecanístico-empíricos ou semiteóricos de projeto. De acordo com Balbo (2007, p. 376), “[...] estes métodos são, atualmente, o esquema mais promissor de evolução dos critérios de projeto, mesmo porque é o único a permitir que futuramente aspectos relacionados à progressão de fratura dos materiais sejam absorvidos.”.

A principal porção empírica dos métodos semiteóricos de projeto são as equações usadas para se calcular o número de ciclos de carga necessários para se levar o pavimento ao colapso. Estas equações podem estar relacionadas a vários critérios de falha, como ruptura por fadiga, ou deflexões excessivas. As equações que definem os critérios de falha por fadiga são conhecidas como modelos de fadiga ou *transfer functions* e relacionam o número de ciclos de carga (N) com as deformações que o pavimento sofre quando submetido a uma carga equivalente ao eixo padrão. Estas deformações são calculadas através da análise estrutural.

Na literatura, existem muitos modelos de fadiga que foram desenvolvidos para descrever o comportamento dos diferentes tipos de revestimentos asfálticos. Theyse et al. (1996, p. 25) explicam que no método mecanicista sul-africano de projeto de pavimentos (SAMDM), a forma geral do modelo de fadiga para camadas espessas de materiais asfálticos é dada pela seguinte expressão:

$$N = 10 \wedge \left[A \cdot \left(1 - \frac{\text{Log} \varepsilon_t}{B} \right) \right]$$

Onde N representa o número de aplicações de carga suportadas pelo pavimento e ε_t representa a deformação horizontal crítica sofrida pelo pavimento quando submetido a uma carga igual à do eixo padrão. Os coeficientes de regressão A e B são tabelados e variam de acordo com o módulo de resiliência do material e a categoria da rodovia.

Embora este modelo de fadiga não tenha sido desenvolvido especificamente para revestimentos do tipo areia-asfalto, é possível encontrar coeficientes de regressão tabelados para revestimentos asfálticos com módulos de resiliência compatíveis com os módulos da areia-asfalto que está sendo executada na obra em questão. Por isso, este será o modelo de fadiga adotado nesta pesquisa.

4 DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS

Tendo em vista todo o contexto desta rodovia, os conhecimentos desenvolvidos na área de mecânica dos pavimentos e os equipamentos disponíveis no Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, foi desenvolvida uma pesquisa aplicada com a intenção de responder a questão de pesquisa descrita anteriormente. Esta pesquisa compreendeu ensaios de laboratório com corpos de prova extraídos da própria rodovia e análise computacional baseada nos resultados desses ensaios.

De acordo com o que foi descrito no capítulo anterior, as variáveis de estado das camadas do pavimento para a realização de análise mecanicista são o coeficiente de Poisson, o módulo de resiliência e a espessura das camadas. Esta será admitida inicialmente como a espessura prevista no projeto: 3 camadas de 6 cm da areia-asfalto. O coeficiente de Poisson é um parâmetro difícil de ser medido em laboratório e que varia muito pouco entre os diferentes tipos de revestimentos asfálticos, portanto, serão admitidos os mesmos valores utilizados por Bottin (1997) em sua dissertação: 0,30 tanto para as camadas de areia-asfalto usinada a quente quanto para o subleito. O módulo de resiliência, ao contrário, é um parâmetro que varia sensivelmente de acordo com os materiais e procedimentos de construção. A medição deste parâmetro é fundamental para se verificar se o revestimento que está sendo executado hoje em conjunto com o revestimento antigo, que foi exposto prematuramente ao tráfego, atende às solicitações de projeto.

Em conjunto com o orientador, desenvolveu-se um plano de extração de corpos de prova para a realização de ensaios de módulo de resiliência que descrevessem a rodovia de forma representativa. Conforme apresentado na figura 3, a maior parte inacabada da rodovia apresentava na ocasião do reinício das obras apenas uma camada. No dia 1/7/2008, já haviam sido executados aproximadamente 10 km de segunda camada sobre este trecho. Desta forma, conclui-se que esta parte da rodovia seria a mais representativa para se analisar tanto a camada envelhecida quanto a camada recém construída. Sua localização é entre os quilômetros 30 e 40 da BR-101. Destaca-se que a rodovia finalizada terá três camadas de areia-asfalto e a parte analisada apresenta duas camadas. Porém, como a terceira camada será construída, a princípio, da mesma maneira que a segunda, pode-se caracterizá-la com o

mesmo módulo de resiliência. Desta forma, será possível saber *a priori* se a estrada finalizada estará apta a suportar as solicitações de projeto. No caso negativo, torna-se necessário atuar sobre a terceira camada para evitar reduções de vida útil da rodovia.

Sendo assim, decidiu-se extrair conjuntos de corpos de prova de 10 cm de diâmetro a cada 2 km deste trecho. As amostras foram retiradas com sonda rotativa especialmente mobilizada pela Construtora para a realização desses ensaios. Os corpos de prova têm a espessura igual à espessura do revestimento asfáltico. Cada conjunto compreende 3 extrações. As extrações são tão próximas umas das outras quanto possível, para que os corpos de prova de um mesmo conjunto tenham as mesmas características. Foram feitos 5 conjuntos de três extrações de areia-asfalto com duas camadas, totalizando 30 corpos de prova entre os quilômetros 32 e 40. O processo de extração de corpos de prova com sonda rotativa é ilustrado nas figuras 11 e 12. Além disso, foi extraído um conjunto no quilômetro 14, onde as 3 camadas tinham sido executadas antes da paralisação dos trabalhos. Estes corpos de prova servirão principalmente para verificar se há diferença entre os módulos de resiliência das diferentes camadas quando a rodovia é executada sem paralisações.



Figura 11: detalhe da sonda rotativa



Figura 12: extração de corpos de prova

4.1 ENSAIOS DE LABORATÓRIO

O ensaio de laboratório mais importante para a realização desta pesquisa é o de módulo de resiliência. Para a prática deste ensaio, é necessário realizar-se antes o ensaio de resistência à tração, cujos resultados também serão de grande importância para a verificação do projeto de pavimentação da estrada.

Além disso, foi realizado anteriormente o ensaio de peso específico aparente seco das amostras. Este ensaio é não-destrutivo e constitui-se na pesagem dos corpos de prova a seco e imersos em água. Conhecendo-se o peso específico da água é possível calcular o volume do corpo de prova. O peso específico aparente seco é definido como a relação entre o peso dos sólidos e o volume da amostra, incluindo o volume dos vazios (PINTO et al., 1998). A principal utilidade deste ensaio é verificar se não há falhas na compactação da massa asfáltica, o que se refletiria num valor baixo de peso específico do trecho com tal falha.

Ao término dos ensaios de peso específico, os corpos de prova foram serrados com o objetivo de não ultrapassar os 6,50 cm de espessura, limite superior imposto pelo equipamento de ensaio de módulo de resiliência. O limite inferior, respeitado por todos os corpos de prova, é de 4 cm.

Como foi mencionado anteriormente, cada conjunto de amostra compreende 3 corpos de prova por camada. O primeiro destes é submetido ao ensaio de resistência à tração. Como o ensaio é destrutivo, este não pode passar por outros testes. Os outros dois corpos de prova são submetidos ao ensaio de módulo de resiliência com 30% da carga que foi obtida no ensaio de resistência à tração, conforme a norma DNER-ME 133/94. Como o ensaio de módulo de resiliência é não-destrutivo, estes dois corpos de prova podem ser submetidos à resistência à tração para serem em seguida descartados. Deste modo, para cada conjunto, temos três valores de resistência à tração e dois valores de módulo de resiliência.

A tabela 1 apresenta os resultados dos testes para os corpos de prova da camada mais inferior (que será designada de primeira camada). A tabela 2 traz os resultados dos ensaios dos corpos de prova da segunda camada e a tabela 3 para os corpos de prova do trecho com três camadas executadas sem interrupções. Os valores de módulo de resiliência apresentados nas tabelas abaixo são a média de 3 medidas de módulo efetuadas em cada corpo de prova.

Tabela 1: resultados dos ensaios para os corpos de prova de primeira camada

CORPO DE PROVA	km	PESO ESPECÍFICO APARENTE SECO (kN/m ³)	MÓDULO DE RESILIÊNCIA (MPa)	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (MPa)
1	40+000	19,06		0,881
3	40+000	19,11	3533	0,824
5	40+000	18,39	3468	0,917
7	38+000	19,26		0,886
9	38+000	19,23	3334	0,858
11	38+000	19,21	3863	0,885
13	36+000	18,98		0,639
15	36+000	19,23	2187	0,695
17	36+000	19,33	2077	0,585

19	34+000	19,26		0,764
21	34+000	19,42	3229	0,750
23	34+000	19,42	2783	0,761
25	32+000	19,00		0,816
27	32+000	19,04	3404	0,838
29	32+000	18,97	cp deteriorado	cp deteriorado
VALOR MÉDIO		19,13	3097	0,793

Tabela 2: resultados dos ensaios para os corpos de prova de segunda camada

CORPO DE PROVA	km	PESO ESPECÍFICO	MÓDULO DE	RESISTÊNCIA À
		APARENTE SECO (kN/m ³)	RESILIÊNCIA (MPa)	TRAÇÃO (MPa)
2	40+000	17,99		0,282
4	40+000	17,99	1157	0,287
6	40+000	18,22	1588	0,330
8	38+000	19,14		0,420
10	38+000	19,26	1635	0,450
12	38+000	19,11	1505	0,402
14	36+000	18,40		0,259
16	36+000	18,82	1462	0,342
18	36+000	18,90	1662	0,399
20	34+000	18,75		0,394
22	34+000	18,77	1396	0,439
24	34+000	18,80	1639	0,403
26	32+000	19,29		0,392
28	32+000	19,39	1678	0,438
30	32+000	19,29	1828	0,417
VALOR MÉDIO		18,81	1555	0,377

Tabela 3: resultados dos ensaios para os corpos de prova do trecho onde foram executadas três camadas antes da paralisação dos trabalhos

CORPOS DE PROVA	CAMADA	km	PESO ESPECÍFICO	MÓDULO DE	RESISTÊNCIA À
			APARENTE SECO (kN/m ³)	RESILIÊNCIA (MPa)	TRAÇÃO (MPa)
33, 36, 39	3 ^a	14+000	19,40	2939	0,978
32, 35, 38	2 ^a	14+000	19,25	2460	0,723
31, 34, 37	1 ^a	14+000	19,08	2474	0,711

Para a caracterização do subleito de areia amarelada foram adotados os mesmos parâmetros utilizados por Bottin (1997) em sua dissertação. Sendo assim, pode-se resumir as variáveis de estado das camadas conforme o quadro 1.

CAMADA	ESPESSURA (cm)	MÓDULO DE	COEFICIENTE
		RESILIÊNCIA (MPa)	DE POISSON
3	6	1555	0,30
2	6	1555	0,30
1	6	3097	0,30
subleito	∞	150	0,30

Quadro 1: variáveis de estado das três camadas do pavimento e do subleito

4.2 ANÁLISE COM O PROGRAMA EVERSTRESS 5.0

Neste trabalho serão feitas duas verificações estruturais do pavimento: resistência à fadiga devido a cargas repetidas e resistência à ruptura devido a excesso de carga. Para isso, é necessário definir o carregamento ao qual o pavimento será submetido, os pontos do pavimento que serão analisados e as variáveis de interesse que serão calculadas com o programa Everstress e que servirão para a realização das verificações. O programa Everstress calcula automaticamente uma série de tensões, deformações e deflexões no pavimento baseado no modelo de camadas elásticas. Porém, as variáveis de saída necessárias nesta pesquisa são apenas as tensões e deformações normais de tração. As tensões normais de

tração calculadas (σ_t) serão comparadas com os valores admissíveis estabelecidos nos ensaios para se verificar a resistência do pavimento à ruptura devido a excesso de carga. As deformações normais devidas à tração (ϵ_t) serão utilizadas no modelo de fadiga para se estimar o número N de eixos padrão que a rodovia suporta. A verificação da resistência à fadiga da rodovia consistirá em analisar se este valor calculado de N é maior ou igual ao valor estabelecido no projeto.

Além de variáveis de saída distintas, as duas verificações exigem carregamentos distintos. Para a resistência à fadiga utiliza-se como carregamento o eixo padrão, pois o número N é uma estimativa do número de eixos padrão que a rodovia suporta antes de colapsar por fadiga. O carregamento será constituído então por duas cargas de 20,5 kN espaçadas de 30 cm. A pressão dos pneus do eixo padrão é de 560 kPa. Já para a resistência ao trincamento, deve-se utilizar a carga máxima à qual a rodovia será submetida. Para isso será utilizado como carregamento um eixo com as mesmas características geométricas do eixo padrão, porém com a carga máxima prevista na legislação: 26,9 kN em cada pneu (Brasil, 1998).

A próxima etapa necessária para se iniciar a análise é a definição dos pontos do pavimento que serão verificados. Tendo em vista que a deterioração dos revestimentos asfálticos é devida essencialmente aos esforços de tração, é necessário analisar os pontos em que as tensões e deformações devidas à tração são máximas. Esses pontos são as fibras inferiores de cada camada asfáltica. A análise do subleito é feita na sua fibra superior, já que é considerado no modelo como uma camada de espessura infinita. Existem duas regiões abaixo do eixo padrão que merecem ser analisadas: abaixo de um dos pneus e no ponto médio entre os dois pneus. Esta configuração com oito pontos de análise é ilustrada na figura 13.

O último passo antes do início das simulações numéricas é a definição dos coeficientes A e B que serão empregados no modelo de fadiga descrito anteriormente. Para rodovias rurais com revestimentos asfálticos apresentando módulos de resiliência na faixa dos mostrados nas tabelas 1, 2 e 3, são adotados coeficientes A de 16,71 e B de 3,487 (Theyse et al., 1996, p. 26). O modelo de fadiga fica, então:

$$N = 10 \wedge \left[16,71 \cdot \left(1 - \frac{\text{Log} \epsilon_t}{3,487} \right) \right]$$

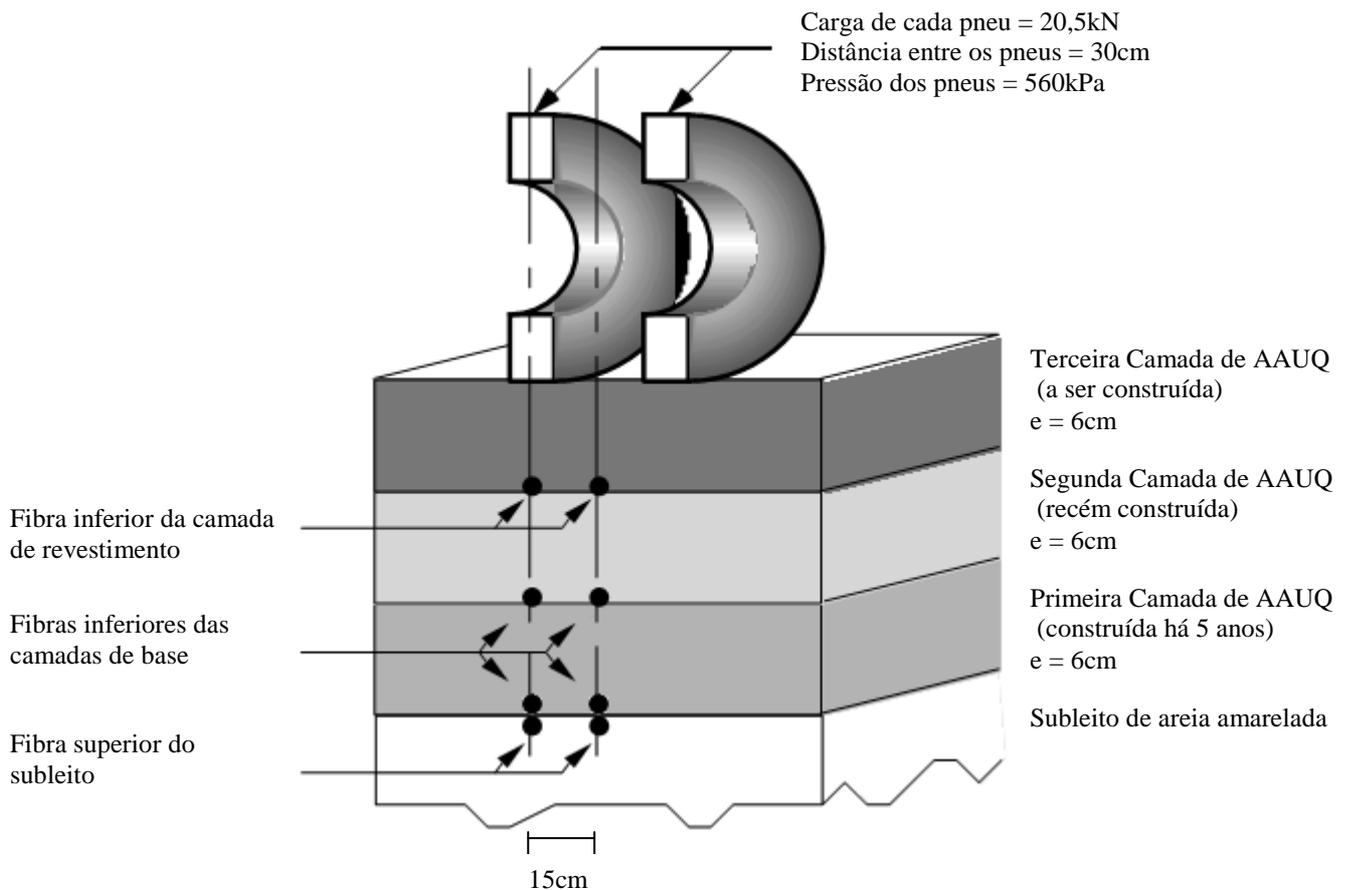


Figura 13: pontos de interesse do pavimento para análise computacional, baseada na figura 31 do manual do programa Everseries (Estados Unidos, 2005, p. 60)

Com todas as variáveis de entrada e saída definidas, passa-se à análise computacional. Os resultados obtidos são apresentados no quadro 2.

PROFUNDIDADE Z (cm)	$\sigma_{t,adm}$ (kPa)	$\sigma_{t,calc}$ (kPa)	ϵ_t (10^{-6})	$N_{projeto}$	$N_{calculado}$
5,999 (terceira camada)	377	-359,53	-129,38		
11,999 (segunda camada)	377	-63,56	31,55		
17,999 (primeira camada)	793	857,81	189,87	$7,3 \cdot 10^5$	$6,5 \cdot 10^5$
18,001 (subleito)	0	-22,35	189,89		

Quadro 2: resultados da primeira análise computacional

Com esta primeira análise verifica-se que o pavimento não passa por nenhuma das verificações: a tensão de tração calculada é maior do que e a tensão admissível na profundidade de 17,999 cm e o número N calculado é um pouco menor do que o de projeto.

A segunda verificação proposta será realizada utilizando como parâmetros das camadas os valores obtidos nos ensaios dos corpos de prova do quilômetro 14. Esta parte da rodovia foi construída sem interrupções e teve as três camadas executadas em 2002. Os quadros 3 e 4 apresentam os parâmetros das camadas e os resultados da análise. Os parâmetros de carregamento são os mesmos utilizados anteriormente.

CAMADA	ESPESSURA (cm)	MÓDULO DE	COEFICIENTE
		RESILIÊNCIA (MPa)	DE POISSON
3	6	2939	0,30
2	6	2460	0,30
1	6	2474	0,30
subleito	∞	150	0,30

Quadro 3 parâmetros das camadas para a segunda análise computacional

PROFUNDIDADE Z (cm)	$\sigma_{t,adm}$ (kPa)	$\sigma_{t,calc}$ (kPa)	ε_t (10^{-6})	$N_{projeto}$	$N_{calculado}$
5,999	978	-374,51	-75,90		
11,999	723	199,60	72,69		
17,999	711	697,44	190,51	7,3.10⁵	6,1.10⁵
18,001	0	-14,92	190,53		

Quadro 4 resultados da segunda análise computacional

Com os resultados desta análise verifica-se que o pavimento apresenta tensões de tração menores do que as tensões admissíveis, no entanto, o N calculado é menor que o N de projeto. Porém, deve-se levar em consideração que este número N é calculado de forma aproximada, utilizando-se um modelo de fadiga que pode não ser totalmente adequado para este revestimento. Além disso, o pavimento já foi exposto ao tráfego durante 5 anos, sendo normal um certo desgaste. Sendo assim, estes resultados podem ser considerados satisfatórios até certo ponto, pois a verificação mais precisa, que relaciona as tensões calculadas com as admissíveis, é validada e o número N calculado é da mesma ordem de grandeza do número N de projeto.

Como os resultados da análise do pavimento construído atualmente é bastante insatisfatória, propõe-se uma terceira verificação, em que a terceira camada (ainda não executada) apresente parâmetros mais nobres do que os parâmetros da segunda camada (recém executada). Para se realizar esta verificação, utilizou-se parâmetros típicos de camadas que já foram executadas no passado. Os quadros 5 e 6 apresentam os parâmetros das camadas e os resultados da análise. Os parâmetros de carregamento são os mesmos utilizados anteriormente.

CAMADA	ESPESSURA (cm)	MÓDULO DE	COEFICIENTE
		RESILIÊNCIA (MPa)	DE POISSON
3	6	2400	0,30
2	6	1555	0,30
1	6	3097	0,30
subleito	∞	150	0,30

Quadro 5 parâmetros das camadas para a terceira análise computacional

PROFUNDIDADE Z (cm)	$\sigma_{t,adm}$ (kPa)	$\sigma_{t,calc}$ (kPa)	ϵ_t (10^{-6})	$N_{projeto}$	$N_{calculado}$
5,999	700	-416,13	-110,58		
11,999	377	24,20	41,03		
17,999	793	832,88	182,38	$7,3 \cdot 10^5$	$7,5 \cdot 10^5$
18,001	0	-18,79	182,40		

Quadro 6 resultados da terceira análise computacional

A partir desses resultados observa-se que o critério de tensão admissível ainda não é satisfeito, ou seja, mesmo que o módulo de resiliência da terceira camada seja muito superior ao módulo das camadas construídas atualmente, isso refletiria pouco na capacidade do pavimento de suportar cargas pesadas.

Sendo assim, propõe-se agora uma quarta simulação, mantendo-se o módulo de resiliência da terceira camada nos mesmos níveis analisados na terceira simulação, porém, aumentando-se a espessura desta última camada. O quadro 7 apresenta os parâmetros das camadas utilizados nesta simulação, e o quadro 8 os resultados obtidos.

CAMADA	ESPESSURA (cm)	MÓDULO DE RESILIÊNCIA (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
3	7	2400	0,30
2	6	1555	0,30
1	6	3097	0,30
subleito	∞	150	0,30

Quadro 7 parâmetros das camadas para a quarta análise computacional

PROFUNDIDADE Z (cm)	$\sigma_{t,adm}$ (kPa)	$\sigma_{t,calc}$ (kPa)	ϵ_t (10^{-6})	$N_{projeto}$	$N_{calculado}$
6,999	700	-178,38	-21,17		
12,999	377	-38,77	44,46		
18,999	793	792,07	171,62	$7,3 \cdot 10^5$	$1,0 \cdot 10^6$
19,001	0	-16,31	171,64		

Quadro 8 resultados da quarta análise computacional

Observa-se que os dois critérios de verificação são satisfeitos, porém, sem qualquer margem de segurança para a carga máxima suportada pelo pavimento.

5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com os resultados obtidos neste trabalho pode-se concluir que o pavimento da BR-101 entre Tavares e Bojuru não estará apto a suportar as solicitações previstas no projeto caso não seja feita uma modificação importante na qualidade do revestimento asfáltico que será executado na seqüência. É necessário aumentar o módulo de resiliência da mistura para níveis próximos aos que foram executados no passado (aproximadamente 2400 MPa) e ainda aumentar a espessura da última camada para 7 cm, com a finalidade de compensar os prejuízos causados pela segunda camada, que apresenta propriedades mecânicas inferiores.

Observa-se que tanto o módulo de resiliência como a resistência à tração da camada executada recentemente apresentam valores muito inferiores aos medidos em camadas executadas anteriormente. Para se melhorar as propriedades mecânicas do revestimento, é necessário que sejam feitos estudos com os materiais disponíveis para se chegar a uma dosagem de areia, cinza e cimento asfáltico que maximize o módulo de resiliência e a resistência à tração da mistura. Além disso, sugere-se que os procedimentos de usinagem e compactação da massa asfáltica sejam revistos visando assegurar a qualidade do produto final.

Conclui-se também que há diferenças significativas entre as propriedades mecânicas da parte do pavimento que foi exposta ao tráfego com apenas uma camada de areia-asfalto e as propriedades mecânicas do pavimento que teve suas três camadas executadas sem interrupções. A camada que foi exposta prematuramente ao tráfego apresenta módulo de resiliência mais elevado, pelo envelhecimento do ligante e por ter sido mais exposta à compactação causada pelo tráfego de caminhões. Porém, este trecho apresenta sinais de degradação importantes, enquanto que o trecho finalizado está bem conservado. O trecho finalizado, inclusive, apresentou resultados satisfatórios no ponto em que se realizou a análise mecânica.

REFERÊNCIAS

- BALBO, J. D. **Pavimentação Asfáltica: materiais, projeto e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.
- BOTTIN FILHO, I. A. **Estudo de Misturas de Areia-Asfalto Pré-Misturadas a Quente**. 1997. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- BRASIL. Conselho Nacional de Trânsito: **Resolução n. 12 de 6 de fevereiro de 1998**. Disponível em <<http://www.denatran.gov.br/resolucoes.htm>>. Acesso em: 15 mar. 2008.
- BRASIL. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes: **Misturas betuminosas - determinação da resistência à tração por compressão diametral**, 1994a. Disponível em <http://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/normas/DNER-ME138-94.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2008.
- BRASIL. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes: **Misturas betuminosas - determinação do módulo de resiliência**, 1994b. Disponível em <http://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/normas/DNER-ME133-94.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2008.
- BRASIL. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis: **Parques Nacionais**, 2007. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/siucweb/mostraUc.php?seqUc=66>>. Acesso em: 18 nov. 2007.
- CARDOSO, A. P. P. **Estudo em Laboratório do Comportamento Mecânico de Misturas Betuminosas Utilizadas em Pistas Experimentais**. 2002. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- CERATTI, J. A. P.; BOTTIN FILHO, I. A.; AZAMBUJA, M. A. E. **Pré-Misturados de Areia-Asfalto a Quente: Uma Alternativa para as Bases e Revestimentos dos Pavimentos da Faixa Litorânea do RS**. Porto Alegre: Fundação Luiz Englert, 1997. 2 v.
- ESTADOS UNIDOS. Washington State Department of Transportation: **Everseries User's Guide**, 2005. Disponível em <<http://www.wsdot.wa.gov/biz/mats/pavement/EVERSERS/EverseriesUserGuide.pdf>>. Acesso em: 15 mar. 2008.
- KÄMPF, N. et al. **Mapa de Classificação dos Solos do Estado do Rio Grande do Sul Quanto à Resistência a Impactos Ambientais**. Porto Alegre: Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luis Roessler, 2001. 14 p. Disponível em: <http://www.fepam.rs.gov.br/biblioteca/mapa_solos.pdf>. Acesso em: 22 nov. 2007.
- MEDINA, J. **Mecânica dos Pavimentos**. Rio de Janeiro: UFRJ, 1997.
- PINTO, C. S. et al. **Fundações: teoria e prática**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1998.

RIO GRANDE DO SUL. Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem: **Mapa Rodoviário**, 2008b. Disponível em: < http://www.daer.rs.gov.br/daer_maparodoviario.htm >. Acesso em: 15 jun. 2008.

RIO GRANDE DO SUL. Secretaria do Planejamento e Gestão: **Atlas Socioeconômico do Rio Grande do Sul**, 2008a. Disponível em: <<http://www.seplag.rs.gov.br/atlas/atlas.asp?menu=339>>. Acesso em: 2 jun. 2008.

RIO GRANDE DO SUL. Secretaria de Energia, Minas e Comunicação: **Atlas Eólico do Rio Grande do Sul**, 2007. Disponível em: <<http://www.semc.rs.gov.br/atlas/metodo.htm>>. Acesso em: 18 nov. 2007.

SANTOS, R. Porto Cresce para São José do Norte. **Zero Hora**. Porto Alegre, n. 15603, 16 de maio de 2008.

SENÇO, W. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. São Paulo: Pini, 1997. 2 v.

SULTEPA. **Relatório de Reinício de Obra da BR-101**, 2008. Disponível no arquivo da Construtora Sultepa S/A.

THEYSE, H. L.; BEER, M.; RUST, F.C. **Overview of the South African Mechanistic Pavement Design Analysis Method**. In: Annual Transportation Research Board Meeting, n. 75, 1996, Washington, paper n. 961294. Disponível em < <http://www.gautrans-hvs.co.za/popup/mechht.PDF> >. Acesso em 26 de maio de 2008.