

**AVALIAÇÃO DA ADERÊNCIA PNEU-PAVIMENTO
E TENDÊNCIAS DE DESEMPENHO
PARA A RODOVIA BR-290/RS**

João Rodrigo Guerreiro Mattos

Porto Alegre
Agosto 2009

JOÃO RODRIGO GUERREIRO MATTOS

**AVALIAÇÃO DA ADERÊNCIA PNEU-PAVIMENTO
E TENDÊNCIAS DE DESEMPENHO
PARA A RODOVIA BR-290/RS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul,
como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em
Engenharia na modalidade Acadêmico

Porto Alegre
Agosto 2009

M444a

Mattos, João Rodrigo Guerreiro

Avaliação da aderência pneu-pavimento e tendências de desempenho para a rodovia BR-290/RS / João Rodrigo Guerreiro Mattos. – 2009.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, BR-RS, 2009.

Orientação: Prof. Dr. Washington Peres Núñez

1. Rodovias. 2. Pavimentação. 3. Segurança viária. I. Núñez, Washington Peres, orient. II. Título.

CDU-625.8(043)

JOÃO RODRIGO GUERREIRO MATTOS

**AVALIAÇÃO DA ADERÊNCIA PNEU-PAVIMENTO
E TENDÊNCIAS DE DESEMPENHO
PARA A RODOVIA BR-290/RS**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 14 de agosto de 2009

Prof. Washington Peres Núñez
Dr. Pelo PPGEC/UFRGS
Orientador

Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Luciano Pivoto Specht (UNIJUÍ)
Dr. pelo PPGEC/UFRGS

Prof.a Christine Tessele Nodari (UFRGS)
Dra. pelo PPGEP/UFRGS

Prof.a Suyen Matsumura Nakahara (UFRGS)
Dra. pela Escola Politécnica /USP

Prof. Jorge Augusto Pereira Ceratti (UFRGS)
DSc. pela COPPE/UFRJ

Dedico este trabalho aos meus pais, Vili e Soeli,
e à minha noiva, Manu.

AGRADECIMENTOS

Estendo meus agradecimentos a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho, dentre os quais destaco as seguintes pessoas:

Ao Prof. Washington, orientador deste trabalho, pela confiança em mim depositada, bem como pela sua paciência e disponibilidade sempre nos momentos em que mais precisei.

Ao LAPAV que proporcionou o convívio com excelentes pesquisadores, tais como os doutorandos Klaus Theisen e Rodrigo Malysz, os bolsistas Andreas Ostermann e Diego Treichel, e o Prof. Ceratti, que coordena de forma brilhante o laboratório.

À CONCEPA, que forneceu o apoio logístico necessário para a coleta de dados. Destacando a colaboração dos Engenheiros Daniel Victorino e Fábio Hirsch. Não podendo deixar de fazer referência ao incansável Airton Coelho, que acompanhou a realização de todos os ensaios.

Aos colegas de mestrado em Geotecnia do PPGEC, em especial aos colegas da Pavimentação: Jose Echeverria, Leonardo Schmitt, Ricardo Cordovil, Leandro Nervis e, principalmente, ao Thiago Rozek, grande amigo que muito contribuiu para a realização deste trabalho.

À Emanuele, por todo seu amor e compreensão nessa fase da minha vida e por fazer com que meus dias sejam mais felizes. Sem dúvida ela é minha grande fonte de inspiração.

À Profa. Suyen, que foi a grande motivadora para que eu pesquisasse sobre o tema aderência pneu-pavimento. Deixo aqui o meu muito obrigado por todo o seu incentivo e auxílio.

Ao LASTRAN por ter possibilitado o meu ingresso na vida acadêmica. Às Prof.as. Helena e Piti, que tiveram papel fundamental na minha formação durante a graduação. Em especial, ao Prof. Albano, que, mais do que primeiro professor-orientador, é um grande amigo.

À Marcia Aps (IPT/SP), ao Paulo Roberto Farias Falcão (CEFTRU/UnB), à Cláudia Azevedo Pereira (UFPE), aos Professores Luciano Specht (UNIJUÍ/RS) e Leto Momm (UFSC) pela contribuição “virtual” na realização deste trabalho. Todos foram muito atenciosos ao responder os e-mails que eu enviava pedindo explicações com base na experiência deles, bem como solicitando materiais para consulta.

E por fim, agradeço à CAPES pela bolsa de estudos que possibilitou a minha total dedicação às atividades ligadas ao PPGEC.

O pessimista queixa-se do vento, o otimista espera que ele mude
e o realista ajusta as velas.

William George Ward

RESUMO

MATTOS, J. R. G. **Avaliação da Aderência Pneu-Pavimento e Tendências de Desempenho para a Rodovia BR-290/RS**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

A aderência pneu-pavimento é um dos parâmetros mais importantes da segurança viária e deve ser avaliada em duas escalas: microtextura e macrotextura. As medidas de textura da superfície de pavimentos podem ser obtidas por diversos equipamentos, sendo que os mais difundidos são o Pêndulo Britânico e a Mancha de Areia. Dessa forma, esta pesquisa pretende utilizar esses dois equipamentos para verificar o comportamento da textura em função do tempo/tráfego para diferentes tipos de revestimentos. Para tanto, foram realizados levantamentos dos valores de micro e macrotextura em pavimentos da rodovia BR-290/RS, trecho Osório-Porto Alegre, com uma frequência aproximadamente mensal durante um período inferior a um ano. Com base nos dados coletados, foi possível desenvolver tendências de desempenho da micro e macrotextura para pavimentos flexíveis e rígidos dessa rodovia. Os modelos propostos para a estimativa da textura podem ser usados como ferramentas auxiliares no Sistema de Gerência de Pavimentos (SGP), prevendo o momento oportuno para intervenções na superfície dos pavimentos de modo a garantir a segurança dos usuários. Após a análise dos resultados, constatou-se que, no geral, os pontos de monitoração da rodovia BR-290/RS apresentam boas condições de aderência pneu-pavimento quando avaliados pelo *International Friction Index* (IFI), que é um índice representativo da combinação entre a macro e microtextura do pavimento. Além dos modelos para estimativa da textura, desenvolveu-se nesta pesquisa um modelo de correlação entre os resultados dos ensaios de Mancha de Areia e de Drenabilidade, possibilitando, assim, a estimativa do IFI através do valor da vazão de água na superfície do pavimento.

Palavras-chave: aderência pneu-pavimento; segurança viária; gerência de pavimentos.

ABSTRACT

MATTOS, J. R. G. **Evaluation and Modeling of Tire-Road Friction in Brazilian Federal Road BR-290/RS**. 2009. MSc. Thesis – Department of Civil Engineering Federal University of Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, Brazil.

Tire-road friction is one of the most important parameters regarding the safety of vehicles under slippery road conditions. Road surface texture is currently evaluated using several devices. In Brazil, the British Pendulum and the sand-patch method are most frequently used to measure microtexture and macrotexture, respectively. They were used in the research reported in this dissertation that aimed at verifying texture evolution with time/traffic on different types of pavement wearing courses. Thus, micro and macrotexture values were monthly measured in surveys carried out during one year in Brazilian Federal Road BR-290/RS. Collected data allowed defining performance trends regarding micro and macrotexture of asphalt and Portland Cement Concrete (PCC) pavements. The models here proposed might be used as auxiliary tools in Pavement Management Systems (PMS) to estimate the time when a given rehabilitation action is necessary to assure vehicle and drivers safety. Results analysis showed that the surveyed pavements present adequate tire-road friction, when evaluated by the *International Friction Index* (IFI) which combines pavements macro and microtexture. In addition, a model relating results of the sand-patch method to drainability results is proposed. Such model allows the estimation of the IFI based on values of water inflow through the pavements wearing courses.

Key-words: tire-road friction; road safety; pavement management.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	10
LISTA DE TABELAS	12
LISTA DE SIGLAS	14
1 INTRODUÇÃO	15
1.1 PROBLEMA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA	17
1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA	18
1.3 LIMITAÇÕES DA PESQUISA	19
1.4 ESTRUTURA DA PESQUISA	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1 SEGURANÇA VIÁRIA	21
2.1.1 Componentes causais de acidentes viários	21
2.1.2 Contribuição dos elementos viários na ocorrência de acidentes	23
2.1.3 Classificação de projetos viários segundo critérios de segurança	26
2.1.4 Recomendações básicas para elaboração de projetos	27
2.2 ADERÊNCIA PNEU-PAVIMENTO	31
2.2.1 Conceitos	31
2.2.2 Textura da superfície do pavimento	37
2.3 AVALIAÇÃO DA SEGURANÇA ATRAVÉS DO <i>INTERNATIONAL FRICTION INDEX</i> (IFI)	41
2.3.1 Obtenção da resistência à derrapagem com equipamentos portáteis	41
2.3.2 Considerações sobre o IFI	43
3 MATERIAIS E MÉTODOS	49
3.1 MÉTODOS DE ENSAIOS PARA OBTER A TEXTURA	50
3.1.1 Ensaio com Pêndulo Britânico	51
3.1.2 Ensaio de Mancha de Areia	54
3.1.3 Ensaio de Drenabilidade	61
3.2 LOCAIS DE MONITORAÇÃO	65
3.3 PROCEDIMENTOS DE ANÁLISE	66
4 LEVANTAMENTO DE DADOS	68
4.1 LEVANTAMENTO DOS VALORES DE MICROTEXTURA	68
4.2 LEVANTAMENTO DOS VALORES DE MACROTEXTURA	73
4.3 LEVANTAMENTO DOS VALORES DE DRENABILIDADE	77
4.4 CÁLCULO DOS VALORES DE IFI	77

5 ANÁLISE DOS DADOS	82
5.1 AVALIAÇÃO DA ADERÊNCIA PNEU-PAVIMENTO	82
5.1.1 Avaliação quanto à microtextura	82
5.1.2 Avaliação quanto à macrotextura	86
5.1.3 Avaliação quanto ao IFI	89
5.2 ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DO ENSAIO DA MANCHA DE AREIA COM O ENSAIO DE DRENABILIDADE	92
5.2.1 Modelo de previsão da macrotextura determinada com a Mancha de Areia em função da vazão obtida com o Drenômetro	92
5.2.2 Proposta para a estimativa do IFI através de valores obtidos com o ensaio de Drenabilidade	95
5.3 MONITORAÇÃO DA ADERÊNCIA PNEU-PAVIMENTO	96
5.3.1 Acompanhamento da variação da textura em função do tempo	96
5.4 TENDÊNCIAS DE DESEMPENHO PARA A ADERÊNCIA PNEU- PAVIMENTO	104
5.4.1 Tendência de desempenho para a microtextura	104
5.4.2 Tendência de desempenho para a macrotextura	107
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	111
6.1 CONCLUSÕES	111
6.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	113
REFERÊNCIAS	114
APÊNDICE A – ANÁLISES ESTATÍSTICAS	119
APÊNDICE B – REGISTRO FOTOGRÁFICO DA TEXTURA DOS PONTOS MONITORADOS	130
ANEXO A – TABELA DE DISTRIBUIÇÃO F DE SNEDECOR	136

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Interações entre os componentes causais dos acidentes	22
Figura 2: Influência do raio da curva no índice de acidentes em rodovias	25
Figura 3: Relação entre o coeficiente de atrito transversal e a taxa de acidentes em pavimentos molhados	26
Figura 4: Interação pneu-fluido-pavimento	33
Figura 5: Variação da área de contato pneu-pavimento com o aumento da velocidade de tráfego	34
Figura 6: Diferença entre microtextura e macrotextura do pavimento	38
Figura 7: Tipos de superfícies possíveis em função da micro e macrotextura	40
Figura 8: Taxa de acidentes em função dos valores de micro e macrotextura	43
Figura 9: Curva de referência do modelo IFI	47
Figura 10: Etapas envolvidas na pesquisa	49
Figura 11: Elementos constituintes do Pêndulo Britânico	52
Figura 12: Etapas envolvidas no ensaio com Pêndulo Britânico	53
Figura 13: Esquema representativo do ensaio de Mancha de Areia	56
Figura 14: Etapas envolvidas no Ensaio da Mancha de Areia	57
Figura 15: Microesferas de vidro utilizadas no ensaio de Mancha de Areia	58
Figura 16: Valores de macrotextura encontrados para diferentes revestimentos	60
Figura 17: Dimensões do Drenômetro ISETH	62
Figura 18: Etapas envolvidas no ensaio de Drenabilidade	63
Figura 19: Comparação dos valores iniciais e finais de microtextura na TRD	83
Figura 20: Comparação dos valores iniciais e finais de microtextura na TRE	83
Figura 21: Classificação da microtextura nos pontos monitorados em 18/12/2008	85
Figura 22: Classificação da microtextura nos pontos monitorados em 22/04/2009	85
Figura 23: Comparação dos valores iniciais e finais de macrotextura na TRD	86
Figura 24: Comparação dos valores iniciais e finais de macrotextura na TRE	86
Figura 25: Classificação da macrotextura nos pontos monitorados em 18/12/2008	88
Figura 26: Classificação da macrotextura nos pontos monitorados em 22/04/2009	88
Figura 27: Valores de IFI nas trilhas de roda de cada ponto monitorado	89
Figura 28: Classificação do IFI nos pontos monitorados	90
Figura 29: Tipo de intervenção recomendada com base no valor do IFI	91
Figura 30: Correlação entre HS e Q considerando os dados obtidos com um cronômetro incorporado ao Drenômetro	93

Figura 31: Correlação entre HS e Q considerando apenas os dados obtidos ao acionar manualmente o cronômetro no ensaio de Drenabilidade	94
Figura 32: Comportamento da microtextura no MR do km 68+800	97
Figura 33: Comportamento da microtextura no CA do km 65+500	97
Figura 34: Comportamento da microtextura no CA do km 49+500	98
Figura 35: Comportamento da microtextura no MR do km 41+400	98
Figura 36: Comportamento da microtextura no CA do km 36+300	98
Figura 37: Comportamento da microtextura no MR do km 27+660	99
Figura 38: Comportamento da microtextura na PC do km 24+880	99
Figura 39: Comportamento da microtextura na PC do km 33+080	99
Figura 40: Comportamento da microtextura na PC do km 50+600	100
Figura 41: Comportamento da macrotextura no MR do km 68+800	100
Figura 42: Comportamento da macrotextura no CA do km 65+500	101
Figura 43: Comportamento da macrotextura no CA do km 49+500	101
Figura 44: Comportamento da microtextura no MR do km 41+400	101
Figura 45: Comportamento da macrotextura no CA do km 36+300	102
Figura 46: Comportamento da macrotextura no MR do km 27+660	102
Figura 47: Comportamento da macrotextura na PC do km 24+880	102
Figura 48: Comportamento da macrotextura na PC do km 33+080	103
Figura 49: Comportamento da macrotextura na PC do km 50+600	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Fatores contribuintes para a ocorrência de acidentes	22
Tabela 2: Valores máximos admissíveis de coeficiente de atrito transversal	28
Tabela 3: Valores do coeficiente de atrito tangencial	29
Tabela 4: Classificação da textura na superfície do pavimento	38
Tabela 5: Valores médios de resistência à derrapagem (SN) para diferentes condições da superfície pavimentada	42
Tabela 6: Valores de a e b para estimativa da constante S_p	45
Tabela 7: Equipamentos calibrados pelos modelos da PIARC	46
Tabela 8: Faixas de classificação do IFI propostas na 4ª tentativa	48
Tabela 9: Classes de microtextura pelo método do Pêndulo Britânico	54
Tabela 10: Classes de macrotextura pelo método da Mancha de Areia	58
Tabela 11: Recomendações de macrotextura para cada tipo de via	59
Tabela 12: Tipo e ano de execução dos revestimentos monitorados	65
Tabela 13: Valores de microtextura obtidos no levantamento do dia 17/09/2008	69
Tabela 14: Valores de microtextura obtidos no levantamento do dia 30/10/2008	70
Tabela 15: Valores de microtextura obtidos no levantamento do dia 18/12/2008	70
Tabela 16: Valores de microtextura obtidos no levantamento do dia 21/01/2009	71
Tabela 17: Valores de microtextura obtidos no levantamento do dia 25/03/2009	71
Tabela 18: Valores de microtextura obtidos no levantamento do dia 22/04/2009	72
Tabela 19: Valores de microtextura obtidos no levantamento do dia 21/05/2009	72
Tabela 20: Valores de macrotextura obtidos no levantamento do dia 17/09/2008	73
Tabela 21: Valores de macrotextura obtidos no levantamento do dia 30/10/2008	74
Tabela 22: Valores de macrotextura obtidos no levantamento do dia 18/12/2008	74
Tabela 23: Valores de macrotextura obtidos no levantamento do dia 21/01/2009	75
Tabela 24: Valores de macrotextura obtidos no levantamento do dia 25/03/2009	75
Tabela 25: Valores de macrotextura obtidos no levantamento do dia 22/04/2009	76
Tabela 26: Valores de macrotextura obtidos no levantamento do dia 21/05/2009	76
Tabela 27: Valores de drenabilidade obtidos no levantamento do dia 21/05/2009	77
Tabela 28: Valores de IFI calculados para o levantamento do dia 17/09/2008	78
Tabela 29: Valores de IFI calculados para o levantamento do dia 30/10/2008	78
Tabela 30: Valores de IFI calculados para o levantamento do dia 18/12/2008	79
Tabela 31: Valores de IFI calculados para o levantamento do dia 21/01/2009	79
Tabela 32: Valores de IFI calculados para o levantamento do dia 25/03/2009	80

Tabela 33: Valores de IFI calculados para o levantamento do dia 22/04/2009	80
Tabela 34: Valores de IFI calculados para o levantamento do dia 21/05/2009	81
Tabela 35: Análise das amostras de microtextura nos pontos monitorados	84
Tabela 36: Análise das amostras de macrotextura nos pontos monitorados	87
Tabela 37: análise das amostras de IFI nos pontos monitorados	90
Tabela 38: Resumo da análise estatística para a regressão macrotextura x vazão	95
Tabela 39: Coeficientes a e b para cálculo de S_p com Drenômetro	96
Tabela 40: Resumo estatístico do modelo de microtextura para pavimentos flexíveis	106
Tabela 41: Resumo estatístico do modelo de microtextura para pavimentos rígidos	107
Tabela 42: Resumo estatístico do modelo de macrotextura para pavimentos flexíveis ...	108
Tabela 43: Resumo estatístico do modelo de macrotextura para pavimentos rígidos	110

LISTA DE SIGLAS

AASHTO: American Association of State Highway and Transportation Officials

ANAC: Agência Nacional de Aviação Civil

ANTT: Agência Nacional de Transportes Terrestres

BPN: British Pendulum Number (equivalente a VRD)

CA: Concreto Asfáltico

CAL: Coeficiente de Atrito Longitudinal

CAT: Coeficiente de Atrito Transversal

CBUQ: Concreto Betuminoso Usinado a Quente

CPA: Camada Porosa de Atrito

DAER: Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem do Rio Grande do Sul

DNIT: Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes

HS: Hauteur au Sable (altura média da mancha de areia)

IFI: International Friction Index

INFRAERO: Empresa Brasileira de Infra-Estrutura Aeroportuária

ISETH: Institute for Highway, Railroads and Rock

MR: Microrrevestimento Asfáltico

MVKM: Milhares de Veículos por Quilômetro

PC: Placas de Concreto de Cimento Portland

PIARC: Permanent International Association of Road Congress

SGP: Sistema de Gerência de Pavimentos

SN: Skid Number (valor de resistência à derrapagem)

TRRL: Transport and Road Research Laboratory

VRD: Valor de Resistência à Derrapagem

1 INTRODUÇÃO

A matriz de transportes brasileira apresenta uma grave distorção, pois a participação do transporte de cargas e passageiro através do modo rodoviário é muito superior aos outros modos de transporte. Idealmente, a matriz de transportes deveria ser equilibrada, porém, a realidade brasileira se mostra pouco desenvolvida na logística de transporte. Estima-se que mais de 60% do transporte de cargas seja realizado pelo meio rodoviário.

A expansão da malha viária brasileira ocorreu a partir da década de 1940, sendo que nos anos do Governo de Juscelino Kubitschek (1956-1961) e no período de 1967 até 1975 ocorreram as maiores expansões. Devido à crise econômica do Estado e com a extinção do “Fundo Rodoviário Nacional”, na segunda metade dos anos 80, observou-se um crescimento mínimo da malha rodoviária, especialmente na rede Federal.

Em contrapartida à falta de investimentos em infra-estrutura, observa-se o elevado crescimento do número de veículos em circulação no Brasil. Outro aspecto importante diz respeito à tecnologia dos veículos que tem proporcionado maior potência e velocidade aos automóveis. A combinação dos fatores mencionados, aliado ao consumo de álcool pelo motorista, tem contribuído para o aumento do número de acidentes nas rodovias brasileiras.

Visto o cenário atual da malha viária brasileira, as características e qualidades dos pavimentos, em especial os materiais usados nos revestimentos asfálticos, ocupam um lugar importante na infra-estrutura rodoviária, principalmente em termos de segurança. Dessa forma, é de suma importância que o pavimento cumpra plenamente tanto aos aspectos estruturais quanto aos funcionais. Sendo que os usuários da via percebem e valorizam mais os aspectos funcionais, tais como conforto, segurança e economia na condução do veículo.

Do ponto de vista da segurança viária, ainda não foi desenvolvido um sistema abrangente que indique o nível de segurança para uma rodovia, pois são numerosos os fatores que influenciam na ocorrência de acidentes, tais como: limite de velocidade, estado dos pneus dos veículos, características geométricas da via, textura da superfície de rolamento, entre outros. Lembrando que ainda existe o fator humano, que é de grande complexidade para se avaliar.

Porém, mesmo que não tenha sido desenvolvido nenhum modelo que avalie a interação de todos os aspectos contribuintes para a ocorrência de acidentes, muitos estudos estão sendo direcionados para avaliar como um determinado parâmetro influencia na segurança viária. Nesse sentido, mesmo não conseguindo mensurar quantitativamente, sabe-se que uma das principais características que o pavimento deve apresentar diz respeito às condições da superfície quanto à aderência pneu-pavimento. O pavimento deve apresentar uma boa aderência, principalmente em zonas de frenagens, curvas horizontais e quando o pavimento está molhado.

Desde meados da década de 1930, pesquisadores europeus e norte-americanos têm manifestado interesses em estudar o tema aderência pneu-pavimento e as suas conseqüências quando a via não apresenta valores satisfatórios. Nessas pesquisas ficou comprovado que a baixa aderência pneu-pavimento constitui um fator de risco à segurança dos usuários e que a resistência à derrapagem dos pavimentos é um parâmetro variável em função das condições climáticas e do tempo. O Valor de Resistência à Derrapagem (VRD) sofre grande redução quando o pavimento encontra-se molhado e esse valor também sofre redução devido ao polimento da superfície causado pelo tráfego. Portanto, a aderência pneu-pavimento sofre forte influência da qualidade da área de contato entre o pneu e o pavimento, sendo que a presença de água é um fator importante a ser levado em consideração.

A aderência pneu-pavimento é um importante indicador do comportamento funcional do pavimento. A boa interação entre o pneu e o pavimento, conseguida através de uma boa textura e drenagem da superfície, garante a segurança em frenagens emergenciais e manobras desejadas.

Vale salientar que a macrotextura da superfície do revestimento asfáltico deve apresentar um valor mínimo que garanta a segurança e não deve passar de um valor máximo, pois valores muito altos de macrotextura podem resultar em pavimentos que produzem ruídos desconfortáveis aos usuários da via e que elevem os custos operacionais dos deslocamentos. Entretanto, quando a macrotextura do pavimento é insuficiente para proporcionar uma boa drenagem superficial, pode ocorrer o fenômeno conhecido como hidroplanagem, no qual o veículo perde o contato com a superfície de rolamento devido à existência de uma lâmina de água entre o pneu e o pavimento.

Pela necessidade de definir faixas de valores aceitáveis para a textura do pavimento, a comunidade internacional tem desenvolvido pesquisas para harmonizar a avaliação da aderência pneu-pavimento. Sendo que o marco para a avaliação da aderência em pavimentos ocorreu com o experimento internacional da *Permanent International Association of Road Congress* (PIARC) em 1992, o qual comparou e harmonizou os resultados de diversos equipamentos utilizados para avaliação da textura. Essa pesquisa desenvolveu o índice denominado *International Friction Index* (IFI), que combina os valores de atrito (microtextura) com a macrotextura do pavimento, possibilitando, assim, a avaliação da aderência pneu-pavimento.

No Brasil, as exigências para avaliação da aderência em rodovias ainda são flexíveis, limitando-se, quase que exclusivamente, a avaliar apenas para aceitação de serviços. Para as rodovias concessionadas a Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) cobra relatórios trimestrais de microtextura. Entretanto, no meio aeroviário as exigências são maiores, exemplo disso é a preocupação demonstrada pela INFRAERO ao fiscalizar sistematicamente as condições de textura dos pavimentos aeroportuários brasileiros. A preocupação no meio aeroviário com a questão da aderência pneu-pavimento provém da necessidade de obter informações para subsidiar intervenções adequadas visando garantir a segurança nos pousos e decolagens, portanto, a forma encontrada para atingir esse objetivo é através do monitoramento sistemático das condições de textura das pistas de pouso.

1.1 PROBLEMA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA

A aderência pneu-pavimento é uma característica das rodovias que é variável em função do tempo/tráfego e das condições climáticas. Existe um consenso entre pesquisadores sobre a ocorrência de uma variação na textura da superfície de rolamento devido à passagem dos veículos, pois ocorre o polimento da superfície do pavimento. Entretanto, ainda não é conhecido como evolui a variação dos valores de micro e macrotextura dos pavimentos.

Ao conhecer o comportamento dos parâmetros de aderência pneu-pavimento ao longo do tempo pode-se usar essa previsão de desempenho em Sistemas de Gerência de Pavimentos (SGP). Ao adotar o critério do valor de aderência na gerência da malha viária possivelmente poderá se perceber uma redução no número de acidentes, pois dentre os aspectos contribuintes

para a ocorrência de acidentes, desconsiderando os aspectos geométricos da via, a aderência pneu-pavimento é um dos aspectos mais importantes que se deve levar em consideração.

Dessa forma, o SGP deve prever que os valores de textura estejam sempre adequados para garantir a segurança viária, uma vez que quando a qualidade da superfície do pavimento em contato com o pneu é de qualidade insuficiente pode ocorrer o fenômeno conhecido como hidroplanagem. A hidroplanagem consiste na perda de contato entre o pneu do veículo e o pavimento devido à presença de água na superfície, que atua como um lubrificante e reduz sensivelmente a aderência da pista.

A identificação das seções da via que apresentam valores baixos de textura ou polimento acelerado da superfície é uma valiosa ferramenta para prevenção de acidentes. Portanto, conhecendo a tendência de desempenho da superfície de rolamento quanto à aderência pneu-pavimento pode-se estimar o momento oportuno de realizar atividades de manutenção de modo a garantir a segurança viária.

1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Visto que a aderência pneu-pavimento é uma das características mais importantes do pavimento quando se avalia a segurança viária, a pesquisa relatada nesta dissertação teve como objetivo geral verificar a variação das condições de atrito e textura de diversos revestimentos da rodovia BR-290/RS. Para verificar a variação da textura superficial, alguns pontos da rodovia foram monitorados com o intuito de compreender melhor os efeitos do tempo/tráfego e verificar quais revestimentos apresentam melhor desempenho em termos de aderência pneu-pavimento.

Para alcançar esse objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- a) Avaliar e classificar a aderência pneu-pavimento em pontos estudados da rodovia BR-290/RS em termos de microtextura, macrotextura e a combinação das duas pelo *International Friction Index* (IFI);
- b) Caracterizar cada tipo de revestimento estudado quanto a valores de atrito (microtextura) e macrotextura através dos ensaios de Pêndulo Britânico e Mancha de Areia, respectivamente;

- c) Desenvolver um modelo que correlacione o valor da altura média da mancha de areia com o de drenabilidade, viabilizando a estimativa do IFI com a utilização do Drenômetro;
- d) Verificar o comportamento das variáveis de textura em função do tempo (efeito do tráfego de veículos);
- e) Elaborar linhas de tendências para o desempenho dos revestimentos avaliados da rodovia BR-290/RS quanto à aderência pneu-pavimento.

1.3 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

No desenvolvimento da pesquisa relatada nesta dissertação enfrentaram-se as seguintes limitações:

- a) Os equipamentos disponíveis para o levantamento do atrito e textura dos pavimentos são portáteis, realizam apenas medições pontuais e possuem baixo rendimento;
- b) Por questões logísticas foi possível realizar apenas um levantamento por mês, dessa forma, os pontos de monitoração foram limitados;
- c) Devido ao curto período de monitoração (menor que um ano), não foram desenvolvidos modelos de desempenho para a aderência pneu-pavimento, e sim linhas de tendências;
- d) As linhas de tendências elaboradas são válidas para os pavimentos estudados, no caso a BR-290/RS, pois a aderência pneu-pavimento é influenciada pelo tráfego e pelas condições climáticas.

Apesar das limitações citadas, os resultados apresentados nesta dissertação podem ser incluídos em bases de dados nacionais e contribuir para melhorias na segurança e na gerência rodoviária.

1.4 ESTRUTURA DA PESQUISA

Esta dissertação está estruturada em seis capítulos. Neste primeiro capítulo foi apresentado o assunto abordado, destacando a sua importância e os objetivos a serem atingidos.

No Capítulo 2 apresenta-se uma revisão sobre o tema aderência pneu-pavimento. Foi dada ênfase à revisão de conceitos envolvidos na interação entre o pneu e a superfície de

rolamento, detalhamento dos métodos que podem ser usados para obtenção dos valores de micro e macrotextura, e apresentação de alguns resultados de pesquisas relevantes sobre o tema em questão.

O Capítulo 3 descreve os pavimentos nos quais realizou-se monitoração dos valores de textura e os equipamentos utilizados para o levantamento desses valores. Além disso, detalha-se o método empregado no desenvolvimento desta pesquisa.

No Capítulo 4, apresentam-se os dados levantados em campo que serviram como banco de dados para as posteriores análises.

No Capítulo 5, os dados são analisados; avaliam-se as condições da textura nos pontos monitorados e o desenvolvimento das linhas de tendências encontradas para as superfícies de rolamento estudadas da BR-290/RS.

Por fim, no Capítulo 6, busca-se destacar as principais conclusões da pesquisa e sugerir novos estudos que venham a complementar o conhecimento sobre o tema aderência pneu-pavimento.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O pavimento é uma estrutura constituída de múltiplas camadas que deve atender, simultaneamente, a aspectos estruturais e funcionais. Na prática, os usuários de um sistema viário percebem e atribuem maior valor às características funcionais de uma rodovia, principalmente, quanto à condição de rolamento e à segurança proporcionada pela via.

Em termos de segurança viária, entre as características mais importantes de um pavimento está a aderência que o revestimento fornece ao pneu do veículo durante o seu movimento. A camada de rolamento da via deve garantir a segurança do usuário mesmo em condições adversas de dirigibilidade.

Dessa forma, surge a necessidade do entendimento dos mecanismos de aderência pneu-pavimento. Portanto, nos itens a seguir, serão abordados conceitos para compreensão de como as condições precárias da textura superficial influenciam na aderência pneu-pavimento e de como estabelecer critérios para determinar o momento oportuno para a realização de atividades de manutenção ou reabilitação da via, visando garantir a segurança e, por consequência, a redução do número de acidentes.

2.1 SEGURANÇA VIÁRIA

2.1.1 Componentes causais de acidentes viários

Ao realizar uma análise criteriosa das causas dos acidentes viários é difícil atribuir a apenas um componente a causa de ocorrência do acidente. Em geral, os acidentes rodoviários ocorrem devido à combinação de diversos fatores, que, na grande maioria das vezes, podem se enquadrar em um dos seguintes componentes causais, ou contribuintes, para o acidente, são eles: componente humano, componente veicular e componente viário. A Figura 1 apresenta, de forma esquemática, o enquadramento dos componentes causais dos acidentes, bem como as interações dos mesmos.

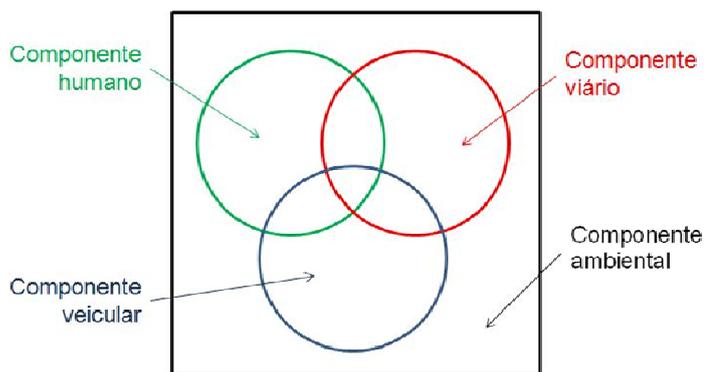


Figura 1: Interações entre os componentes causais dos acidentes (modificado de Nodari, 2003)

O tráfego rodoviário pode ser considerado como um sistema, no qual os componentes apresentados na Figura 1 interagem uns com os outros. Assim, quando ocorre um acidente pode-se considerar como sendo uma “falha” do sistema (Ogden, 1996), seja devido ao componente humano, veicular, viário, ou possíveis combinações entre eles.

Sabey (1980), ao analisar os fatores que contribuem para a ocorrência de acidentes rodoviários na Inglaterra, identificou 4688 fatores dentre os 2042 casos estudados, o que demonstra que, em muitos casos, os fatores agem de forma combinada. Lum e Reagan (1995), considerando dados dos Estados Unidos e Grã-Bretanha, obtiveram percentuais semelhantes aos encontrados por Sabey para os fatores contribuintes de acidentes rodoviários. Na Tabela 1, pode-se observar a contribuição de cada um dos fatores na ocorrência de acidentes.

Tabela 1: Fatores contribuintes para a ocorrência de acidentes

Componentes causais	Contribuição (%)	
	(Sabey, 1980)	(Lum e Reagan, 1995)
Apenas componente humano	65,00	57,00
Componente humano + viário	24,00	28,00
Componente humano + veicular	4,50	6,00
Apenas componente viário	2,50	3,00
Apenas componente veicular	2,50	2,00
Componente humano + veicular + viário	1,25	3,00
Componente veicular + viário	0,25	1,00

Segundo Aps (2006), frequentemente no meio rodoviário, atribui-se aproximadamente 2% dos acidentes ao componente viário. Entretanto, deve-se considerar também como responsabilidade do componente viário quando ocorre interação desse componente com os outros. Dessa forma, a parcela de contribuição da via nos acidentes, segundo os dados da pesquisa de Lum e Reagan (1995), corresponde a aproximadamente 35%.

Conhecendo a influência do componente viário na ocorrência de acidentes, seja contribuindo isoladamente ou em conjunto com outro componente, vem sendo amplamente adotadas estratégias reativas de melhorias da segurança rodoviária (Nodari, 2003). Esta forma de gerência da segurança viária tem mostrado resultados satisfatórios, pois conforme a ocorrência de acidentes indicativos de algum problema ou deficiência viária adota-se uma atividade corretiva. O aspecto negativo desse mecanismo de gerência consiste na necessidade da ocorrência de acidentes para realizar intervenções na via.

Outra forma de gerência da segurança viária são as estratégias pró-ativas. Nesse mecanismo de gerência, ocorre a identificação dos pontos que apresentam elevado potencial para ocorrência de acidentes e nesses locais realizam-se atividades corretivas ou de reabilitação da via. A vantagem desse mecanismo de gerência é o seu caráter preventivo (Nodari, 2003).

Os métodos de ensaios para avaliação da aderência pneu-pavimento se enquadram na estratégia pró-ativa de gerência da segurança viária, uma vez que simula as condições de rolamento do pneu do veículo em condições adversas. Portanto, identifica pontos críticos do pavimento e possibilita adotar atividades de manutenção visando reduzir o número de acidentes.

2.1.2 Contribuição dos elementos viários na ocorrência de acidentes

Geralmente, a segurança rodoviária é determinada em função do número de acidentes, feridos e mortos registrados na rodovia. A complexidade do processo de avaliação da segurança viária apenas pelo número absoluto de acidentes ocorridos deve-se ao fato de que alguns dos elementos envolvidos na ocorrência dos acidentes são de difícil abordagem estatística (Elvik e Vaa, 2004). Dessa forma, deve-se trabalhar, preferencialmente, com índices de acidentes, ou seja, o número registrado de acidentes deve ser avaliado levando em consideração, por exemplo, o tráfego de veículos e/ou a quilometragem da rodovia.

Mesmo sabendo que as características da via contribuem para a ocorrência de acidentes, ainda existem limitações quanto ao conhecimento da influência dos elementos viários na segurança. Segundo Nodari (2003), para algumas características da via já é possível estimar numericamente a sua influência na ocorrência de acidentes com satisfatória precisão, entretanto, existem características que a magnitude da influência ainda é desconhecida.

Dentre as diversas características da via que podem contribuir para a ocorrência de acidentes, destacam-se os seguintes itens (baseado em Nodari, 2003):

- a) Defeitos superficiais na camada de rolamento;
- b) Limite de velocidade;
- c) Interseções;
- d) Número de faixas de rolamento;
- e) Largura das faixas de rolamento e acostamento;
- f) Raios de curvas horizontais;
- g) Dimensões da superlevação e superlargura;
- h) Tortuosidade da via;
- i) Valor da Resistência à Derrapagem na superfície da via (microtextura);
- j) Condições de drenagem superficial da via (macrotextura do revestimento);
- k) Inclinação dos taludes;
- l) Iluminação da via; e
- m) Sinalização da via.

Como se pode observar, quase todos os elementos viários contribuintes para a ocorrência de acidentes são de natureza geométrica, pertencentes à etapa de projeto geométrico da rodovia. Entretanto, três características citadas são variáveis ao longo da vida útil da rodovia e estão relacionadas a aspectos funcionais do revestimento do pavimento, são os itens a, i e j. Sendo que os defeitos superficiais representam as irregularidades do pavimento e o Valor de Resistência à Derrapagem em conjunto com a macrotextura representam a aderência pneu-pavimento.

Para exemplificar como os elementos viários influenciam na segurança da via serão apresentados dois modelos para previsão de acidentes com base em características geométricas da rodovia.

O primeiro exemplo é um estudo realizado por Zegeer, Sttewart, Council e Reinfurt publicado no FHWA (1992 *apud* Nodari, 2003), que aborda o efeito do alinhamento nas condições de segurança. O modelo matemático desenvolvido teve como base de dados os registros de acidentes de Washington e os relacionou com elementos de curvatura. O modelo para estimativa do número de acidentes em função do grau de curvatura obedece a Equação 1.

$$A = [1,552 \cdot L \cdot V + 0,014 \cdot D \cdot V - 0,012 \cdot S \cdot V] \cdot 0,978^{W-30} \quad (1)$$

Onde:

A = número total de acidentes em curva (durante período de 5 anos);

L = comprimento da curva (em milhas);

V = volume de veículos nos dois sentidos (em 5 anos);

D = grau de curvatura;

S = presença de curva espiral (S=1, se curva espiral; S=0, caso contrário);

W = largura da rodovia na curva considerando o acostamento (em pés).

Como segundo exemplo, destaca-se o trabalho de Elvik e Vaa (2004) para avaliação da influência do raio de curvas horizontais no número de feridos em acidentes nas rodovias da Noruega. Pela Figura 2, percebe-se que o índice de acidentes decresce com o aumento do raio da curva horizontal.

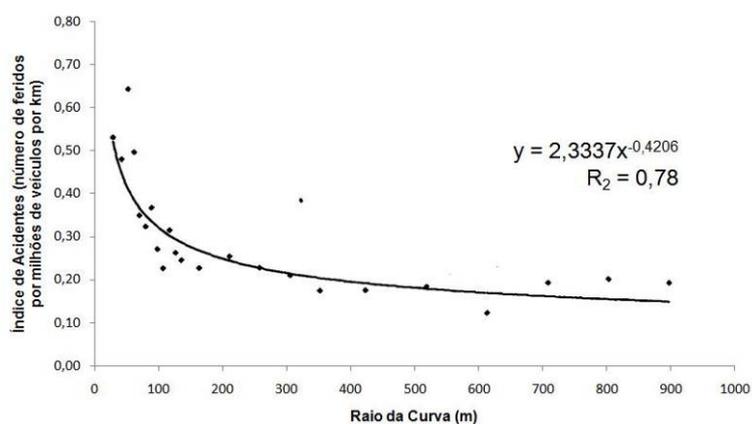


Figura 2: Influência do raio da curva no índice de acidentes em rodovias (Elvik e Vaa, 2004)

Por fim, ainda sobre a influência dos elementos viários na ocorrência de acidentes, destaca-se as observações de Gothié (1993) quanto a relação do coeficiente de atrito transversal (CAT) e o número de acidentes em pavimentos molhados, nas quais foi observado que a taxa de acidentes é inversamente proporcional ao coeficiente de atrito do pavimento. Conforme pode ser visto na Figura 3, a influência na ocorrência de acidentes é mais expressiva para valores de CAT inferiores a 0,55.

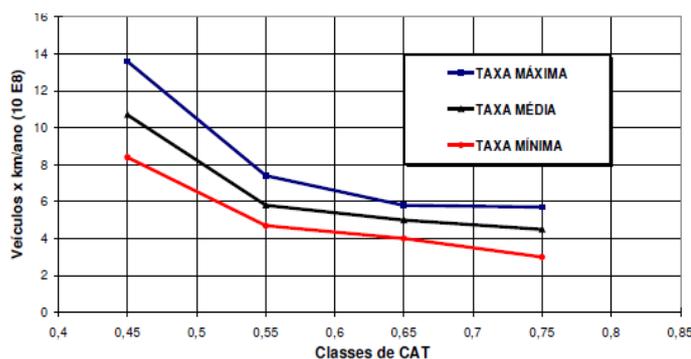


Figura 3: Relação entre o coeficiente de atrito transversal e a taxa de acidentes em pavimentos molhados (Gothié, 1993)

2.1.3 Classificação de projetos viários segundo critérios de segurança

A experiência norte-americana e alemã recomenda que os projetos viários sejam classificados segundo os seguintes critérios de segurança (Lamm *et al.*, 1988 *apud* Garcia, 2008):

- a) Critério de segurança I: verifica a consistência do projeto através da diferença entre a velocidade operacional e a de projeto;
- b) Critério de segurança II: verifica a consistência da velocidade operacional através da diferença entre velocidades operacionais de curvas sucessivas; e
- c) Critério de segurança III: verifica a consistência do coeficiente de atrito no dimensionamento da superelevação através da diferença entre o coeficiente adotado e o efetivo.

No Critério de segurança III, que é o de interesse para esta pesquisa, classifica-se o projeto geométrico segundo a diferença entre o coeficiente de atrito transversal adotado para o dimensionamento da superelevação e o coeficiente de atrito efetivo (Lamm *et al.*, 1995 *apud* Garcia, 2008). Segundo pesquisas desenvolvida por Lamm *et al.* (1988) nos Estados Unidos, os modelos para estimativa do coeficiente de atrito adotado e efetivo podem ser expressos através das Equações 2 e 3.

$$f_R = 0,092 + 8,10 \times 10^{-3} \times DC - 2,3 \times 10^{-4} \times DC^2 \quad (2)$$

$$f_{RD} = 0,014 + 2,25 \times 10^{-2} \times DC - 5,7 \times 10^{-4} \times DC^2 \quad (3)$$

Onde:

f_R = coeficiente de atrito adotado (adimensional);

f_{RD} = coeficiente de atrito efetivo (adimensional);

DC = taxa angular de curvatura ($^{\circ}/100$ pés) para o intervalo entre 0° e 20° .

Após determinar o coeficiente de atrito adotado (f_R) e o coeficiente de atrito efetivo (f_{RD}) através das equações 2 e 3, pode-se classificar a consistência das curvas horizontais através da diferença $f_R - f_{RD}$. Dessa forma, segundo o critério de segurança III, o projeto pode ser classificado em três categorias:

- **Caso 1 – projeto bom:** ocorre quando a diferença entre o coeficiente de atrito adotado e o efetivo é superior ou igual a +0,02 ($f_R - f_{RD} \geq +0,02$), nesse caso tem-se a condição ideal e não é necessário adaptações ou correções no traçado da rodovia;
- **Caso 2 – projeto regular:** ocorre quando a diferença entre o coeficiente de atrito adotado e o efetivo oscila entre $\pm 0,02$ ($-0,02 \leq f_R - f_{RD} < +0,02$), nesse caso as curvas precisam sofrer adaptações na superelevação; e
- **Caso 3 – projeto fraco:** ocorre quando a diferença entre o coeficiente de atrito adotado e o efetivo é inferior a -0,02 ($f_R - f_{RD} < -0,02$), nesse caso as curvas devem ser reprojatadas para garantir as mínimas condições de segurança.

2.1.4 Recomendações básicas para elaboração de projetos

Em termos de aderência pneu-pavimento, a fórmula básica para o projeto de curva horizontal que garante as mínimas condições de segurança na condução do veículo é expressa pela Equação 4. Essa expressão é obtida considerando a condição de equilíbrio das forças atuantes no veículo ao percorrer uma curva (DNER, 1999).

$$R = \frac{V^2}{127 \cdot (f_R + e)} \quad (4)$$

Onde:

R = raio da curva (m)

V = velocidade (km/h)

f_R = coeficiente de atrito transversal; e

e = taxa de superelevação (%/100).

Conforme o Manual de Projeto Geométrico de Rodovias Rurais (DNER, 1999), os raios mínimos de curvatura horizontal devem proporcionar condições aceitáveis de segurança e conforto. Assim, para garantir tal situação, recomenda-se adotar como valor máximo de coeficiente de atrito transversal os valores apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Valores máximos admissíveis de coeficiente de atrito transversal (DNER, 1999)

V (km/h)	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
f_R	0,20	0,18	0,16	0,15	0,15	0,14	0,14	0,13	0,12	0,11

2.1.4.1 Estabelecimento de valores admissíveis de atrito

2.1.4.1.1 Resistência à derrapagem

A resistência à derrapagem da superfície do pavimento em condições molhadas é um componente essencial para a segurança viária, dessa forma, o coeficiente de atrito para essa situação deve ser considerado na etapa de projeto geométrico da rodovia. O coeficiente de atrito entre o pneu e o pavimento representa a condição de aderência entre essas duas superfícies, sendo que o seu valor varia consideravelmente devido à influência de muitos elementos físicos, tais como: a pressão de inflação do pneu, composição e condições do pneu, tipo e condição da superfície do pavimento e a presença ou não de água (Lamm *et al.*, 1999).

2.1.4.1.2 Coeficiente de atrito tangencial

Em muitos países, ainda não existem avaliações aprofundadas de resistência à derrapagem. Além disso, o processo para desenvolver especificações nacionais para os valores aceitáveis de coeficiente de atrito é muitas vezes comprometido pela malha viária existente não possuir um histórico suficiente de valores de resistência à derrapagem. Segundo Lamm *et al.* (1999), o valor máximo do coeficiente de atrito tangencial determinado pela Equação 5 pode ser considerado razoável em termos de segurança e economia.

$$f_{Tperm} = 0,59 - 4,85 \times 10^{-3} \cdot V_d + 1,51 \times 10^{-5} \cdot V_d^2 \quad (5)$$

Onde:

f_{Tperm} = máximo coeficiente de atrito tangencial permitido; e

V_d = velocidade de projeto (km/h).

Normalmente, os valores de resistência à derrapagem são verificados para as velocidades de 40, 60 e 80 km/h. Na Tabela 3, constam os valores do coeficiente de atrito estabelecidos, através da Equação 5, para essas velocidades.

Tabela 3: Valores do coeficiente de atrito tangencial (baseado em Lamm *et al.*, 1999)

Velocidade (km/h)	Coef. de atrito tangencial
40	0,42
60	0,35
80	0,30

Conforme pode ser visto na Tabela 3, o valor do coeficiente de atrito tangencial (CAT) diminui ao passo que a velocidade aumenta. O CAT caracteriza o comportamento entre o pneu e o pavimento em curvas ou derrapagens, ou seja, quando a atuação da força centrífuga tende a desviar a trajetória do veículo na direção tangente à curva horizontal. Portanto, o CAT está associado à força perpendicular ao plano de rotação da roda quando esta gira formando um ângulo em relação à sua direção de rotação.

2.1.4.1.3 Coeficiente de atrito longitudinal

Após estabelecer a relação entre o máximo valor permitido para o coeficiente de atrito tangencial e a velocidade de projeto, precisa-se determinar quanto desse coeficiente contribui para o máximo coeficiente de atrito longitudinal permitido. Em geral, essa contribuição (n) é entre 40 e 50% para rodovias (Lamm *et al.*, 1999). O fator de redução de 0,925 na Equação 6 corresponde a influências específicas dos pneus.

$$f_{Rperm} = n \cdot 0,925 \cdot f_{Tperm} \quad (6)$$

Onde:

- f_{Rperm} = máximo coeficiente de atrito longitudinal permitido;
- n = contribuição do atrito tangencial no atrito longitudinal; e
- f_{Tperm} = máximo coeficiente de atrito tangencial permitido.

O coeficiente de atrito longitudinal (CAL) caracteriza o comportamento entre o pneu e o pavimento em situações de frenagem. Portanto, o CAL está associado à força que se desenvolve quando a roda do veículo está travada e se arrasta sobre o pavimento.

2.1.4.2 Determinação da distância de visibilidade

Na elaboração do projeto geométrico de uma rodovia, deve-se verificar as distâncias de visibilidade quanto à parada e a de ultrapassagem. Essas distâncias são fundamentais para a segurança viária, pois é através delas que se dará o cálculo da curva de concordância vertical e a colocação dos elementos de sinalização. Sendo que a distância de visibilidade de parada é obtida através da Equação 7 (DNER, 1999).

$$D_p = 0,7 \cdot V + \frac{V^2}{255 \cdot (f + i)} \quad (7)$$

Onde:

D_p = distância de visibilidade (m);

V = velocidade diretriz (km/h);

f = coeficiente de atrito longitudinal (adimensional).

Em 2001, a segunda parcela da soma da distância de visibilidade foi alterada pela AASHTO (*apud* Aps, 2006) considerando a taxa de desaceleração, conforme apresentado na Equação 8.

$$D_p = 0,7 \cdot V + \frac{V^2}{2 \cdot a} \quad (8)$$

Onde:

a = taxa média de desaceleração (considerada de $3,4 \text{ m/s}^2$).

2.2 ADERÊNCIA PNEU-PAVIMENTO

Ao avaliar a segurança viária, um dos principais itens relacionados ao pavimento que deve ser levado em consideração é a condição da superfície quanto à aderência pneu-pavimento, pois esse fator possibilita ao motorista manter a trajetória do veículo mesmo em condições adversas. Portanto, a boa interação entre o pneu do veículo e a superfície de rolamento do pavimento deve ser assegurada e a forma mais eficaz para que isso ocorra é garantindo a boa qualidade da textura da superfície de contato. Para um melhor entendimento do fenômeno envolvido na interação pneu-pavimento necessita-se revisar alguns conceitos envolvidos.

2.2.1 Conceitos

2.2.1.1 Coeficiente de atrito

A força de atrito (F_a) consiste na força tangencial atuante entre as superfícies de dois corpos, de modo a resistir ao movimento devido a uma força externa aplicada a um desses corpos. A

relação entre essa força de atrito e a força normal (N) representa o coeficiente de atrito, conforme expresso pela Equação 9.

$$\mu = \frac{F_a}{N} \quad (9)$$

Onde:

μ = coeficiente de atrito (adimensional);

F_a = força de atrito; e

N = força normal.

Na interação entre o pneu e o pavimento, o atrito ocorre devido à soma de duas parcelas resultantes dos fenômenos de adesão e histerese. Segundo Pasquet e Berthier (1966) a definição desses fenômenos é a seguinte:

- **Coeficiente de atrito por adesão:** essa parcela de atrito é proveniente das forças intermoleculares das superfícies (Van der Waals), logo, depende da natureza dos materiais envolvidos;
- **Coeficiente de atrito por histerese:** essa parcela de atrito é resultante da deformação cíclica na superfície emborrachada do pneu, que ocorre devido à aspereza da superfície do pavimento.

Então, o coeficiente de atrito total envolvido na aderência entre pneu-pavimento é dado pela Equação 10.

$$\mu = \mu_a + \mu_h \quad (10)$$

Onde:

μ = coeficiente de atrito;

μ_a = coeficiente de atrito por adesão; e

μ_h = coeficiente de atrito por histerese.

No entanto, o conceito exposto anteriormente de coeficiente de atrito é limitado, pois não envolve variáveis que sabidamente interagem no atrito entre o pneu e o pavimento, tais como:

- a) velocidade do veículo;
- b) existência de elemento interfacial (água, óleo,...);
- c) temperatura dos corpos e do ar;
- d) geometria da via; e
- e) características dos pneus.

2.2.1.2 Interação pneu-pavimento

A boa interação entre o pneu e a superfície do pavimento depende basicamente da qualidade da área de contato entre esses dois elementos. Dessa forma, quando existem elementos que atuam como lubrificante entre o pneu e o pavimento, embora o mecanismo da perda progressiva da aderência pneu-pavimento seja complexo, pode-se, de modo simplificado, atribuir essa perda de aderência a redução da área de contato pneu-pavimento.

As variações na área de contato pneu-pavimento com o aumento da velocidade ocorrem devido à ascensão do fluido na parte anterior do pneu. Como pode ser visto na Figura 4, quando a roda do veículo passa sobre uma lâmina d'água acumulada na superfície do pavimento ocorre uma perturbação no fluido, causando a sua ascensão pelo pneu e gerando forças hidrodinâmicas que levantam parcial ou totalmente a parede do pneu do veículo.

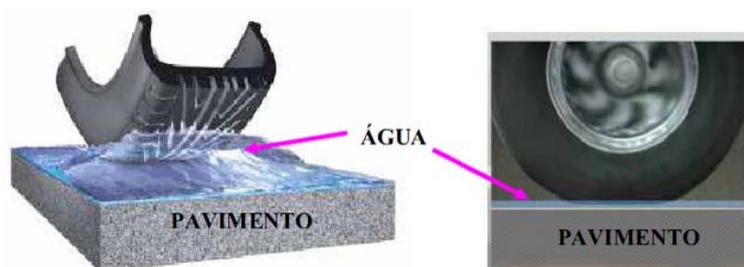


Figura 4: Interação pneu-fluido-pavimento (Silva, 2008)

Assim sendo, quanto mais elevada for a velocidade de tráfego do veículo, maior será a reação das forças hidrodinâmicas atuantes na parede dos pneus e, por consequência, menor será a área de contato entre o pneu e o pavimento. A interação pneu-fluido-pavimento descrita acima pode ser verificada na Figura 5.

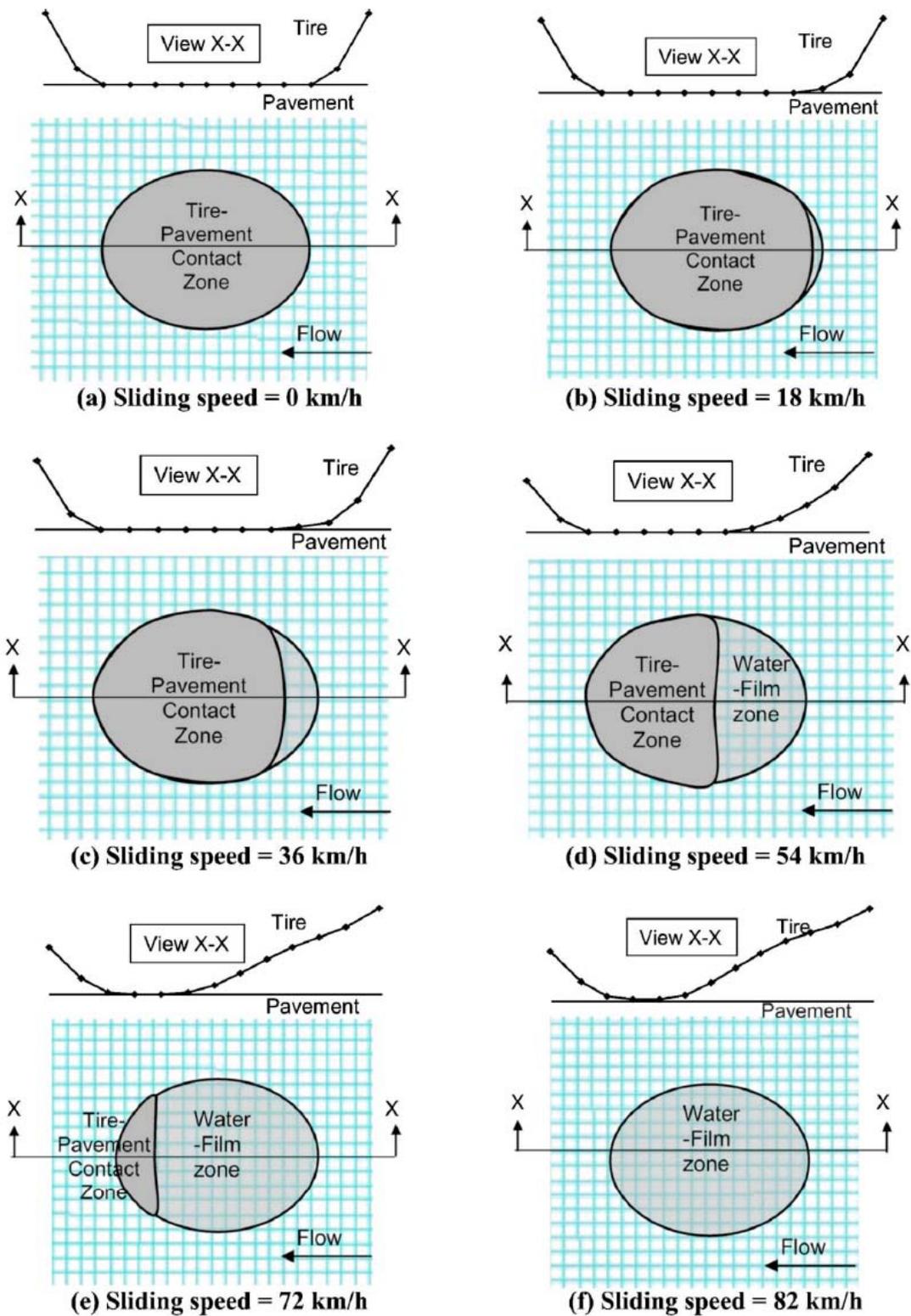


Figura 5: Variação da área de contato pneu-pavimento com o aumento da velocidade de tráfego (Fwa e Ong, 2008)

Conforme demonstrado por Fwa e Ong (2008), através de uma simulação numérica por elementos infinitos, a área de contato pneu-pavimento sofre uma redução com o aumento da velocidade. Nota-se que para baixas velocidades de tráfego ($V \leq 36$ km/h) a área de contato não sofre grandes variações, no entanto, vale lembrar que a redução da área de contato também é influenciada pela altura da lâmina d'água existente sobre o pavimento.

Dentre os mais diversos fenômenos físicos que ocorrem na interação entre o pneu e o pavimento, merecem atenção especial a hidroplanagem e a viscoplanagem. Ambos os fenômenos estão relacionados com a presença de água na superfície do pavimento.

2.2.1.2.1 Hidroplanagem

O fenômeno da hidroplanagem ocorre quando o pneu do veículo perde totalmente o contato com a superfície do pavimento devido à existência de uma lâmina d'água que se interpõe entre o pneu e a superfície do pavimento. Nesse fenômeno as forças exercidas pelo pneu são superadas pelas forças hidrodinâmicas atuantes, fazendo com que o pneu flutue sobre a água e o motorista perca totalmente o controle do veículo. Segundo Mounce *et al.* (1993), quatro fatores são os principais causadores da hidroplanagem, são eles:

- a) pneus: pressão de inflação, ranhuras e qualidade da área de contato;
- b) pavimento: condições da textura da superfície e da drenagem superficial;
- c) água: intensidade pluviométrica e altura da lâmina d'água; e
- d) motorista: velocidade de tráfego e habilidade.

A probabilidade de ocorrência da hidroplanagem é pequena. Observações tem mostrado que, para pneus com péssimas condições (muito lisos) e superfícies do pavimento com elevado grau de polimento, a hidroplanagem ocorre com lâminas d'água de espessuras superiores a 0,76 mm (Mounce *et al.*, 1993).

Visto que a hidroplanagem depende da espessura da lâmina d'água existente no pavimento, estudos desenvolveram métodos para determinação da velocidade crítica a partir da qual pode ocorrer a hidroplanagem. O modelo empírico mais completo é o proposto por Gallaway *et al.* (1979 *apud* Momm, 1998), que pode ser conferido na Equação 11.

$$V_{LC} = 0,902 \cdot SD^{0,04} \cdot P^{0,3} \cdot \left(\frac{TD}{0,794} + 1 \right)^{0,06} \cdot A \quad (11)$$

Onde:

V_{LC} = velocidade limiar crítica para ocorrência de hidroplanagem (km/h);

SD = percentagem de giro da roda (100% representa a roda livre);

P = pressão de inflação do pneu (kPa);

TD = profundidade da escultura do pneu (mm); e

A = fator de influência da lâmina d'água.

O valor de A é determinado como sendo o maior valor calculado entre A_1 e A_2 , conforme as Equações 12 e 13, respectivamente.

$$A_1 = \frac{11,008}{LA^{0,06}} + 3,507 \quad (12)$$

$$A_2 = \left(\frac{26,871}{LA^{0,06}} - 6,861 \right) \cdot HS^{0,14} \quad (13)$$

Onde:

LA = espessura da lâmina d'água (cm); e

HS = macrotextura do pavimento (mm).

Embora seja importante avaliar a influência da lâmina d'água em função da macrotextura, vale lembrar que quando existem afundamentos em trilhas de roda (ATR) o acúmulo d'água na superfície é devido às deformações permanentes do pavimento. Portanto, o modelo apresentado na Equação 11 não é válido para pavimentos com ATR.

Outro modelo que serve para determinar a velocidade crítica de hidroplanagem, foi obtido por estudos do *Texas Transportation Institute and the NASA Langley Research Center* (Horne *et al.*, 1986 *apud* Ong e Fwa, 2007), que estima a velocidade crítica através da área de contato entre o pneu e o pavimento. O modelo está apresentado na Equação 14.

$$V_h = 83,35 - 27,59 \cdot FAR + 0,168 \cdot p \quad (14)$$

Onde:

V_h = velocidade de hidroplanagem (km/h);

FAR = proporção da área de contato (definida como a razão entre a largura e o comprimento da área de contato); e

p = pressão de inflação do pneu (kPa).

2.2.1.2.2 Viscoplanagem

O fenômeno da viscoplanagem consiste na perda de aderência provocada por uma pequena lâmina d'água (altura < 0,10 mm) entre o pneu e o pavimento. A maioria dos acidentes por derrapagem com água sobre pavimento não ocorrem devido à hidroplanagem, mas sim quando o pavimento está apenas úmido, ou seja, por viscoplanagem (Do *et al.*, 1995).

Segundo Do *et al.* (1995), a viscoplanagem é causada pelos seguintes mecanismos:

- a) existência de um filme d'água que não consegue ser totalmente expulso da superfície devido ao curto período de contato entre o pneu e o pavimento; e
- b) aspiração de um filme d'água para o pico das asperezas, seguido por uma derrapagem do pneu sobre a superfície do pavimento.

2.2.2 Textura da superfície do pavimento

As características de aderência superficial de um pavimento são definidas através de duas escalas de textura: a micro e a macrotextura. Na Figura 6, ilustra-se a diferença entre essas duas escalas de textura.

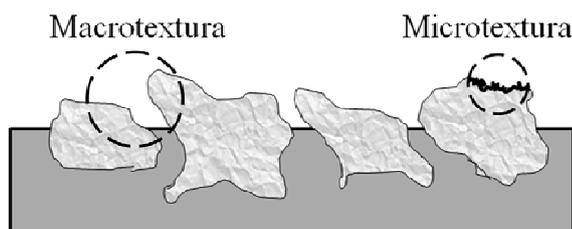


Figura 6: Diferença entre microtextura e macrotextura do pavimento

A classificação da textura foi especificada na ASTM E-867 (1997) e as faixas de domínio de cada textura podem ser vistas na Tabela 4.

Tabela 4: Classificação da textura na superfície do pavimento (ASTM E-867, 1997)

Escala	Intervalo de dimensões	
	Horizontal	Vertical
Microtextura	0 – 0,5 mm	0 – 0,2 mm
Macrotextura	0,5 – 50 mm	0,2 – 10 mm
Megatextura	5 – 50 cm	1 – 50 mm
Irregularidade	0,5 – 50 m	1 – 1200 mm

2.2.2.1 Microtextura

A microtextura da superfície do pavimento depende da aspereza dos agregados utilizados na mistura asfáltica do revestimento. A aspereza da superfície é em função, principalmente, da composição mineralógica e da estrutura dos agregados, tais como existência de arestas vivas ou não. Conforme Berthier (1998 *apud* Ferreira 2002), os granulares são responsáveis pelo bom desempenho da microtextura e devem, portanto, satisfazer os seguintes requisitos:

- a) apresentar e conservar as arestas vivas pelo maior tempo possível;
- b) resistir ao tráfego (dureza e resistência); e
- c) proporcionar boa resistência ao polimento acelerado.

O consenso geral considera que a microtextura é o fator predominante na resistência à derrapagem quando a velocidade de deslocamento do veículo é inferior a 50 km/h. No entanto, a ruptura do filme d'água se torna mais difícil para velocidades maiores, devido ao

menor tempo de contato entre o pneu e o pavimento, cabendo, então, à macrotextura garantir a drenagem superficial do pavimento.

Os equipamentos mais conhecidos para medir a microtextura (atrato) das camadas de revestimento são: Pêndulo Britânico, μ -meter, SCRIM, DF Tester, Grip-tester, entre outros. Maiores informações quanto ao funcionamento desses equipamentos podem ser conferidos em Aps (2006), Alves (2007) e Mattos *et al.* (2009). Nessa pesquisa será mais explorado o Pêndulo Britânico, pois foi o equipamento utilizado para medir a microtextura dos pavimentos estudados.

2.2.2.2 Macrotextura

A macrotextura da superfície do pavimento depende da dimensão dos agregados e do teor de betume utilizado na mistura asfáltica do revestimento. A macrotextura do pavimento é responsável pela aderência pneu-pavimento para velocidades médias ou altas, devendo facilitar o escoamento das águas superficiais e evitar a derrapagem do veículo. Segundo Fernandes (1998 *apud* Ferreira, 2002), o tipo de macrotextura apresentada inicialmente por um revestimento asfáltico depende dos seguintes fatores:

- a) Origem Mineralógica: de acordo com a rocha-mãe os granulares podem apresentar características diversas, como a resistência ao desgaste, esfericidade, angularidade, etc.
- b) Processo de Britagem: influencia no grau de esfericidade do granular, preferindo-se os processos que eliminem direções preferenciais de ruptura e que proporcionem forma cúbica ao granular;
- c) Projeto das misturas do revestimento: determina a granulometria do material a ser empregado, a partir do diâmetro máximo efetivo do granular. Geralmente misturas que apresentam alta macrotextura inicial são compostas por baixos teores de granulares nas dimensões da areia ou possuem uma granulometria descontínua;
- d) Método de preparação do revestimento: pode provocar uma heterogeneidade nas misturas devido ao teor de betume. O método da Penetração Invertida geralmente resulta em exsudação. Em misturas preparadas em usinas observa-se um melhor resultado na homogeneidade da macrotextura;
- e) Método de execução da camada de revestimento: necessidade do cumprimento das determinações de projeto, como temperatura de execução, energia de compactação e o número de passadas do rolo compressor.

A macrotextura sofre constantes modificações com o passar do tempo, devido, principalmente, à ação do tráfego. A perda da capacidade de escoamento através da macrotextura da superfície do pavimento constitui um fator de risco para a segurança viária.

Os ensaios mais tradicionais que podem ser usados para determinar a macrotextura do pavimento são: Mancha de Areia, Perfilômetro Laser e Drenabilidade. Um método alternativo, que vem sendo estudado nos últimos anos para determinar a macrotextura, consiste na análise de imagens da superfície, pelas quais através de tratamento digital (*pixels*) e utilizando séries matemáticas de Fourier pode-se classificar a macrotextura da superfície (Pidwerbesky *et al.*, 2006 e Santos 2008).

2.2.2.3 Tipos de superfícies

A superfície do pavimento em termos de microtextura pode ser classificada por rugosa ou polida, sendo rugosa quando apresenta arestas vivas e polida quando a superfície é lisa. Quanto a macrotextura, a superfície pode ser classificada por aberta ou fechada, sendo denominada aberta quando apresenta agregados graúdos e fechada quando possui elevada quantidade de finos.

Dessa forma, a superfície resultante avaliando conjuntamente as características de micro e macrotextura pode ser de quatro diferentes tipos: rugosa e aberta, rugosa e fechada, polida e aberta e, por fim, polida e fechada. Na Figura 7, pode-se observar todas as combinações possíveis e os tipos de superfícies resultantes.

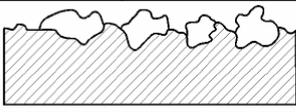
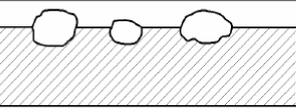
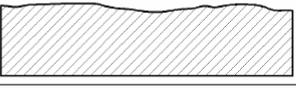
Micrometextura	Macrotextura	Superfície	Tipo de Textura
Rugosa	Aberta		Rugosa e Aberta
	Fechada		Rugosa e Fechada
Polido ou Lisa	Aberta		Polido e Aberto
	Fechada		Polido e Fechado

Figura 7: Tipos de superfícies possíveis em função da micro e macrotextura (Aps, 2006)

2.3 AVALIAÇÃO DA SEGURANÇA ATRAVÉS DO *INTERNATIONAL FRICTION INDEX* (IFI)

Quando se aborda a questão da segurança viária, um dos principais elementos que deve-se levar em consideração é a condição de aderência na pista, pois é um dos fatores contribuintes para a ocorrência de acidentes, tanto em aeroportos quanto em rodovias. A aderência pneu-pavimento foi estudada pela primeira vez na década de 20, com ensaios de derrapagem realizados para avaliação subjetiva das condições de segurança no Aeroporto de *Le Bourget* em Paris (Rodrigues Filho, 2006). Segundo Lugão (2008), as pesquisas iniciais desse tema concentraram-se, inicialmente, nos países escandinavos devido a grande preocupação com as pistas contaminadas por neve ou gelo. Os primeiros equipamentos desenvolvidos para avaliação da textura superficial de pavimentos foram o Tapley e o SAAB Friction Tester (SFT) nas décadas de 50 e 60, respectivamente.

Com os avanços das pesquisas e a importância atual da gestão viária, foram desenvolvidos equipamentos com bom nível de precisão para avaliar a textura dos pavimentos. Entretanto, devido a grande diversidade de equipamentos e métodos para obtenção dos valores de textura das camadas de rolamento existe a preocupação em harmonizar esses resultados, nesse contexto foi desenvolvido o *International Friction Index* (IFI) para avaliar a resistência à derrapagem em pavimentos molhados. O IFI é um índice que combina os valores de micro e macrotextura, de modo a fornecer um valor harmonizado de aderência pneu-pavimento.

2.3.1 Obtenção da resistência à derrapagem com equipamentos portáteis

Mesmo com os mais diversificados tipos de equipamentos para obter valores de textura em pavimentos, os equipamentos mais corriqueiros a serem usados são os portáteis. Dessa forma, Kokkalis e Panagouli (1998) apresentam na Equação 15 um modelo para verificar a resistência à derrapagem em pavimentos molhados com base nos valores de BPN e HS, que são representativos da micro e macrotextura obtida com o Pêndulo Britânico e Mancha de Areia, respectivamente.

$$SN_{40} = 0,884 \cdot BPN + 5,16 \cdot HS - 17,8 \quad (15)$$

Onde:

SN_{40} = resistência à derrapagem para velocidade de 40 km/h;

BPN = valor da microtextura obtido com o Pêndulo Britânico; e

HS = valor de macrotextura obtido com a Mancha de Areia.

De acordo com a literatura, os valores médios de resistência à derrapagem (SN) característicos para cada tipo de condição superficial do pavimento pode ser observado na Tabela 5.

Tabela 5: Valores médios de resistência à derrapagem (SN) para diferentes condições da superfície pavimentada (Kokkalis e Panagouli, 1998)

Condição do pavimento	<i>Skid Number</i> (SN)
Exsudado com falta de micro/macrotextura	20
Gasto em termos de macrotextura	60
Polido em termos de microtextura	25
Apresentando boa micro e macrotextura	70
Situação típica	40

Por fim, apresenta-se, na Figura 8, a contribuição nos acidentes devido aos valores de micro e macrotextura expressos em termos de BPN e HS. Hosking (1986) chama a atenção para o fato de que uma melhoria de 10% no nível de resistência à derrapagem do pavimento pode resultar numa redução de 13% na taxa de acidentes com pavimentos molhados. Por exemplo, considerando um revestimento de mistura asfáltica que apresente valor de microtextura igual a 60 BPN, se for executado um revestimento de concreto asfáltico (CBUQ) apresentará um valor médio de macrotextura de 0,5 mm, porém se for um microrrevestimento asfáltico apresentará um valor médio de macrotextura de 1,0 mm, logo, conforme a Figura 8, a taxa de acidentes em pavimentos molhado será reduzida de 3,65 para 3,4 acidentes por milhares de veículos por quilômetros (MVKM). Isso ressalta a importância adequada da mistura asfáltica a ser adotada em pontos rodoviários críticos.

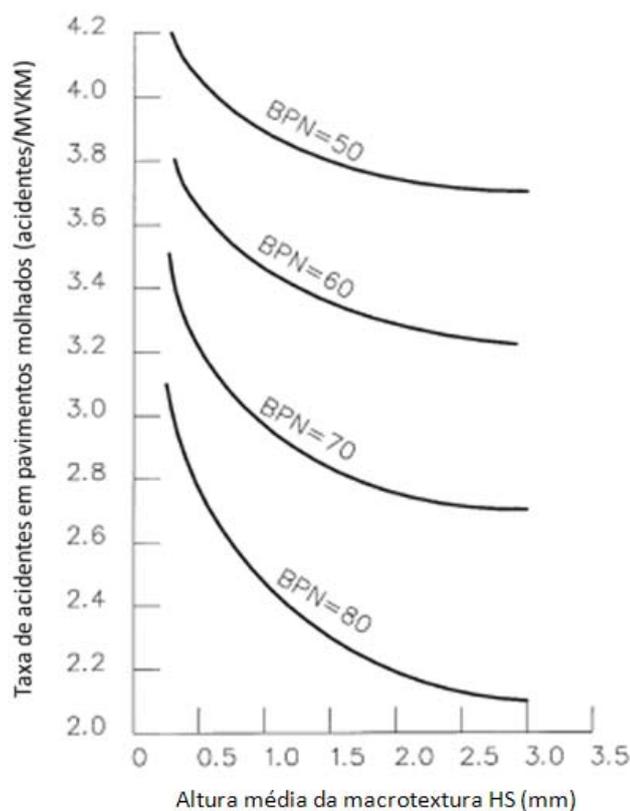


Figura 8: Taxa de acidentes em função dos valores de micro e macrotextura (adaptado de Kokkalis e Panagouli, 1998)

2.3.2 Considerações sobre o IFI

A caracterização da textura da superfície de um pavimento pode ser determinada por vários ensaios, então visando padronizar os resultados obtidos por ensaios realizados com diferentes equipamentos, a antiga PIARC (*Permanent International Association of Roads Congress*), atualmente *World Road Association* realizou, em 1992, uma experiência para comparação e harmonização destes métodos de ensaios (Fülöp *et al.*, 2000). A partir desse experimento, que correlacionou os equipamentos, foi criado o índice combinado IFI. Posteriormente, a publicação da norma denominada *Standard Practice for Calculating International Friction Index of a Pavement Surface* (ASTM E 1960-98, 1998) consolidou e regulamentou a forma de cálculo deste índice.

A escala do IFI é obtida pela combinação dos valores de micro e macrotextura, portanto, para seu cálculo é necessário obter, através de qualquer ensaio homologado, ou homologável, as medidas que caracterizam essas duas escalas de textura da superfície de rolamento. Como o IFI quantifica a macro e microtextura, pode-se utilizá-lo para estabelecer níveis de intervenções e determinar a estratégia mais adequada para garantir a segurança dos usuários quanto à aderência entre os pneus do veículo e a rodovia. Além disso, esses valores podem ser utilizados em estudos de acidentes e como ferramenta para avaliações em gerência de pavimentos, a fim de restaurar superfícies desgastadas ou polidas, sem ter que reconstruir todo revestimento.

2.4.2.1 Cálculo do IFI

O IFI é um índice que relaciona o atrito com a velocidade de deslizamento. O modelo para o cálculo do IFI estima a constante de referência da velocidade (S_p) e o atrito harmonizado para a velocidade de 60 km/h (F_{60}), considerando um veículo de passeio com pneus lisos e rodas travadas. Sendo que o par S_p e F_{60} expressam o valor do IFI de um determinado pavimento e permitem o cálculo do atrito a qualquer velocidade de deslizamento.

Segundo a ASTM E 1960 (1998), o primeiro passo para calcular o IFI consiste em determinar a constante da velocidade na curva de referência (S_p), que é obtida através da medida de macrotextura (em mm), conforme a Equação 16.

$$S_p = a + b \cdot TX \quad (16)$$

Onde:

S_p = constante de referência da velocidade;

a e b = constantes em função do método usado para determinar a macrotextura; e

TX = valor da macrotextura obtido com um dos equipamentos homologados.

Na Tabela 6, constam os valores das constantes a e b conforme o método adotado para o levantamento da macrotextura.

Tabela 6: Valores de a e b para estimativa da constante S_p (ASTM E 1960-98, 1998)

Método de Ensaio / Norma	a	b
Perfilômetro Laser / ASTM E 1845	14,2	89,7
Mancha de Areia / ASTM E 965	-11,6	113,6

O passo seguinte consiste em usar a medida de atrito (FRS) a uma determinada velocidade de referência do equipamento (S) para determinar o valor de atrito ajustado para a velocidade de 60 km/h, conforme a Equação 17.

$$FR_{60} = FRS \cdot e^{[(S-60)/S_p]} \quad (17)$$

Onde:

FR_{60} = valor de atrito ajustado para a velocidade de 60 km/h;

FRS = valor de microtextura obtido com um dos equipamentos homologados;

S = velocidade de referência para o tipo de equipamento; e

S_p = constante de referência da velocidade.

Por fim, calcula-se, através da Equação 18, o atrito harmonizado em função da medida de macrotextura (TX) e da medida de atrito ajustada para a velocidade de 60 km/h (FR_{60}).

$$F_{60} = A + B \cdot FR_{60} + C \cdot TX \quad (18)$$

Onde:

F_{60} = valor do atrito harmonizado para a velocidade de 60 km/h;

A, B e C = constantes de calibração de acordo com o equipamento utilizado;

FR_{60} = valor do atrito ajustado para a velocidade de 60 km/h; e

TX = valor da macrotextura.

Os coeficientes de calibração A, B e C para o equipamento utilizado na medição da microtextura podem ser verificado na Tabela 7. Bem como o valor da velocidade de cada equipamento (S), que será necessária para utilizar a Equação 17.

Tabela 7: Equipamentos calibrados pelos modelos da PIARC (ASTM E 1960-98, 1998)

Características	Equipamento	S	A	B	C
Roda Bloqueada	ASTM E-274 (USA)	65	0,045	0,925	0
	LCPC Skid Trailer (F)	60	0,002	1,008	0
	Stuttgarter Reibungsmesser (CH)	60	0,022	0,050	0,082
	Skiddometer (CH)	60	0,026	0,504	0,099
	Stuttgarter Reibungsmesser (A)	60	-0,072	0,767	0,086
	ASTM E-274 (USA)	65	-0,023	0,607	0,098
	Friction Tester (PL)	60	-0,025	0,807	0,068
Roda Parcialmente Bloqueada	OSCAR at 86% (N)	52	-0,03	0,864	0
	OSCAR at 20% (N)	12	0,119	0,643	0
	Komatsu Skid Trailer (J)	10	0,042	0,849	0
	DWW Trailer (NL)	43	0,019	0,868	0
	Griptester (UK)	9,4	0,082	0,910	0
	Stuttgarter Reibungsmesser (CH)	12	0,141	0,323	0,074
	Skiddometer	12	0,030	0,918	-0,014
	BV-11 (S)	12	0,040	0,856	-0,016
	Stuttgarter Reibungsmesser (A)	12	0,020	0,867	-0,006
Roda Obliqua	Stradograph (DK)	12,5	0,054	0,770	0
	Odoliograph Wallon (B)	12,9	0,113	0,729	0
	Odoliograph CRR (B)	20,5	0,113	0,746	0
	SCRIM CEDEX (E)	20,5	0,019	0,813	0
	SCRIM MOPT (E)	20,5	0,032	0,873	0
	SCRIM SRM (D)	20,5	0,017	0,850	0
	SCRIM GEOCISA (E)	20,5	0,021	0,928	0
	SCRIM (F)	20,5	-0,006	0,862	0
	SUMMS (I)	20,5	0,002	0,987	0
	SCRIMTEX (UK)	17,1	0,033	0,872	0
Estáticos	DF Tester at 60 km/h (J)	60	-0,034	0,771	0
	DF Tester at 20 km/h (J)	20	0,081	0,732	0
	Pendulum Tester BPT (USA)	10	0,056	0,008	0
	Pendulum Tester SRT (CH)	10	0,044	0,010	0

F_{60} é a previsão do valor de atrito calibrado, enquanto que S_p é a previsão do valor da velocidade calibrada. Por definição, o par de valores F_{60} e S_p representa o IFI de uma determinada superfície de pavimento. Dessa forma, o modo tradicional de apresentar o valor do índice combinado é: IFI (F_{60} ; S_p). Alternativamente, pode-se definir o IFI a qualquer velocidade de deslocamento (S) aplicando-se a Equação 19.

$$FS = F_{60} \cdot e^{[(60-S)/S_p]} \quad (19)$$

Onde:

FS = valor do atrito harmonizado para uma determinada velocidade;

F_{60} = valor do atrito harmonizado para a velocidade de 60 km/h;

S = velocidade de deslocamento; e

S_p = constante de referência da velocidade.

O conhecimento do valor de IFI permite traçar a curva de referência estimada para o valor do atrito em função da velocidade de deslocamento, conforme mostrado na Figura 9. A vantagem de adotar este índice no Sistema de Gerência de Pavimentos da malha rodoviária é que, quando o IFI para a velocidade da via não corresponder às expectativas dos gestores, pode-se verificar o seu valor para velocidades inferiores e utilizar, por exemplo, placas de sinalização ao longo da via recomendando que quando estiver chovendo o motorista deve reduzir a velocidade para um valor que garanta a segurança do usuário.

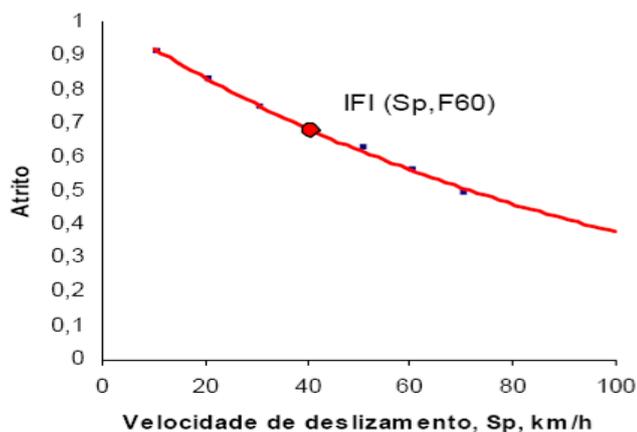


Figura 9: Curva de referência do modelo IFI (Aps, 2006)

2.4.2.2 Classificação do valor de IFI

As normas ou recomendações de valores mínimos admissíveis para o atrito da via, obtidos pelos mais diversos ensaios existentes, são para garantir a segurança dos usuários. Assim sendo, vários estudos para valores de textura superficial vêm sendo desenvolvidos para estabelecer políticas para gerência de pavimentos.

Em geral, os países que adotam políticas de gerência voltadas para a aderência em pavimentos rodoviários restringem a sua aplicação a dois casos: para recebimento de obras novas ou para recomendações de reabilitação de vias. Na prática, percebe-se que as políticas de segurança viária voltadas para a aderência no meio aeroportuário são mais exigentes e as verificações são rotineiras, portanto, tem um caráter mais preventivo que no meio rodoviário.

No Brasil, o Manual de Restauração de Pavimentos Asfáltico (DNIT, 2006) sugere a faixa de $0,6 \text{ mm} \leq \text{HS} \leq 1,2 \text{ mm}$ para a altura média da Mancha de Areia e recomenda $\text{VRD} \geq 55$ para a resistência à derrapagem. O manual também recomenda as faixas de valores para classificação do IFI propostas por Aps em sua segunda tentativa, no entanto, a classificação já se encontra na quarta tentativa. Na Tabela 8, apresenta-se a quarta tentativa para classificação do IFI proposta por Aps (2006) ao avaliar diversos valores de textura encontrados em rodovias brasileiras.

Tabela 8. Faixas de classificação do IFI propostas na 4ª tentativa (Aps, 2006)

Condição	Limites do IFI
Péssimo	< 0,05
Muito Ruim	0,06 a 0,08
Ruim	0,09 a 0,11
Regular	0,12 a 0,14
Bom	0,15 a 0,21
Muito Bom	0,22 a 0,35
Ótimo	> 0,35

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para verificar a tendência do comportamento da aderência pneu-pavimento ao longo do tempo, realizaram-se ensaios de campo para levantamento da textura do pavimento em alguns pontos da BR-290/RS no trecho Osório-Porto Alegre, conhecido como *Free Way*. Dessa forma, as etapas envolvidas na pesquisa podem ser verificadas na Figura 10.

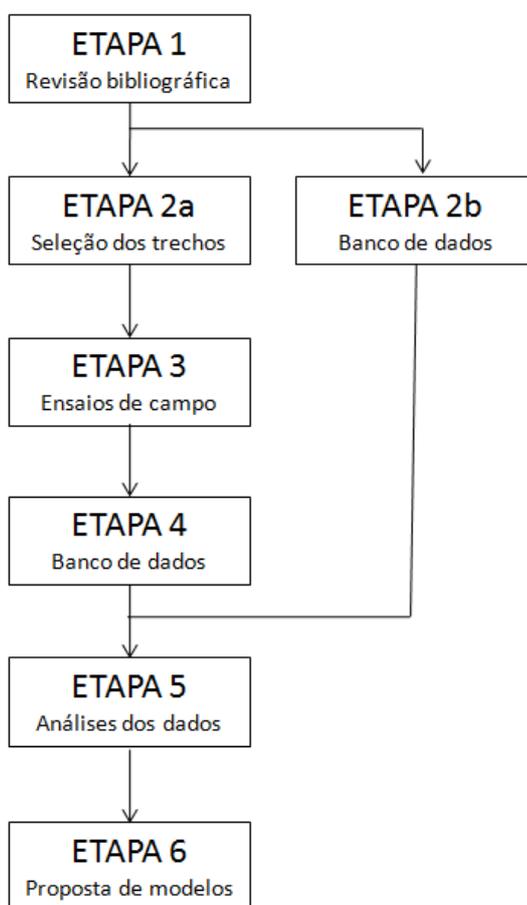


Figura 10: Etapas envolvidas na pesquisa

Na Etapa 1, buscou-se o conhecimento necessário para iniciar a pesquisa, ou seja, saber como a aderência pneu-pavimento influencia na ocorrência de acidentes e como são os métodos de execução dos ensaios para avaliação da textura superficial dos pavimentos.

A Etapa 2a consistiu na determinação dos pontos da BR-290/RS que foram monitorados com os ensaios de medição da textura do pavimento, o critério adotado para selecionar os pontos visou abranger diferentes tipos e idades de camadas de rolamento. Enquanto que na Etapa 2b tratou-se de organizar um banco de dados nacional com resultados dos ensaios de Mancha de Areia e Drenabilidade (*Outflow Meter*), de modo a correlacioná-los.

Na Etapa 3, realizaram-se os ensaios de campo para levantamento da micro e macrotextura nos pontos de monitoração. Maiores detalhes quanto aos métodos de ensaios realizados e os locais monitorados serão apresentados nos subitens a seguir.

A Etapa 4 consistiu na organização dos dados levantados em campo, de modo a poder desenvolver linhas de tendências para a previsão da micro e macrotextura em pavimentos flexíveis e rígidos da BR-290/RS.

Na Etapa 5, avaliou-se e classificou a aderência pneu-pavimento quanto à microtextura, macrotextura e IFI.

Por fim, na Etapa 6, desenvolveram-se modelos que relacionem os resultados de Mancha de Areia e Drenabilidade; e modelos que possibilitem a previsão da textura com base no banco de dados gerado pela monitoração.

3.1 MÉTODOS DE ENSAIOS PARA OBTER A TEXTURA

Os ensaios de campo adotados para obter os valores de micro e macrotextura dos pavimentos analisados foram:

- Pêndulo Britânico: ensaio para determinar o atrito (microtextura) da superfície do pavimento;
- Mancha de Areia: ensaio para determinar a macrotextura da superfície do pavimento; e
- Drenabilidade: ensaio para determinar a capacidade de drenagem na superfície do pavimento (fortemente correlacionável com a macrotextura).

3.1.1 Ensaio com Pêndulo Britânico

Desenvolvido na década de 50 pelo *Transport and Road Research Laboratory* (TRRL), o Pêndulo Britânico é o ensaio mais difundido para determinação da microtextura. As suas vantagens são a rapidez e a facilidade de realização do ensaio, pois se trata de um equipamento portátil. No entanto, possui a grande desvantagem de ser um equipamento que realiza apenas medições pontuais, portanto, não é muito recomendável para ser usado em nível de rede.

As medidas de microtextura apresentam variações importantes nos resultados com diferentes equipamentos e, inclusive, entre as medições de cada um dos equipamentos. Isso ocorre devido a sua pequena geometria e porque os equipamentos estão orientados a determinar a microtextura indiretamente através da obtenção de um coeficiente de atrito. Apesar das limitações de rendimento e variabilidade que pode apresentar nos resultados de cada ensaio, o Pêndulo Britânico é muito sensível à microtextura, o que faz dele um equipamento apropriado para ser utilizado nas superfícies aonde os equipamentos de medição contínua requerem dimensões, direções, sentido e velocidades mínimas de operação (Mery, 2003).

3.1.1.1 Princípio de funcionamento

O Pêndulo Britânico possibilita a medição pontual do coeficiente de atrito longitudinal cinemático através da avaliação da energia absorvida pelo atrito. O princípio de funcionamento deste equipamento consiste na perda de energia de um pêndulo com base emborrachada (sapata na extremidade da haste) ao deslizar sobre o pavimento. Podendo ser utilizado tanto em campo quanto em laboratório, sendo parte integrante dos ensaios de polimento acelerado realizados em laboratório.

As características deste ensaio simulam a passagem do pneu de um veículo com baixa velocidade sobre o pavimento molhado. O equipamento é constituído por um tri-pé horizontal de apoio e nivelamento, coluna de suporte do pêndulo e pelo quadrante da escala de medida. Na Figura 11, apresentam-se esquematicamente os elementos que constituem o Pêndulo Britânico.

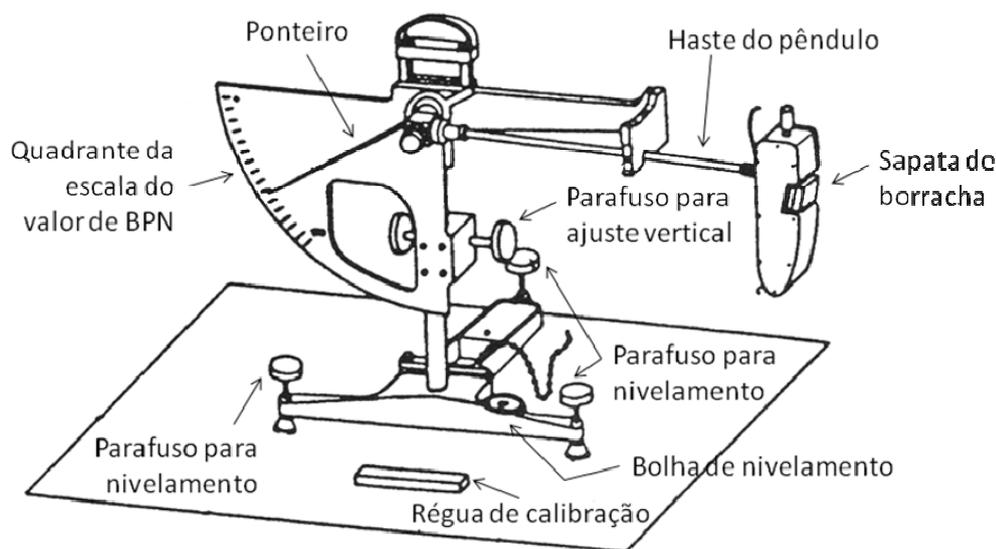


Figura 11: Elementos constituintes do Pêndulo Britânico
(Adaptado de Lamm *et al.*, 1999)

Quando a haste do pêndulo é lançada, a sapata entra em atrito com a superfície do pavimento e o equipamento registra um valor na escala de medida representativo da resistência à derrapagem. O valor medido está relacionado com a perda de energia por atrito e é expresso em BPN (British Pendulum Number) ou, em português, VRD (Valor de Resistência à Derrapagem).

Momm (1998) chama a atenção para o fato de que, embora o ensaio da medida de atrito com Pêndulo Britânico esteja sendo utilizado para estimar a microtextura dos pavimentos, a macrotextura da superfície também influencia nos resultados das medidas de atrito com esse equipamento. Portanto, o Pêndulo Britânico não caracteriza de maneira absoluta a microtextura da superfície do pavimento.

3.1.1.2 Procedimentos de ensaio

O método de ensaio para medição da microtextura com o Pêndulo Britânico está especificado pela ASTM E 303-93 (1998). Em suma, o procedimento de ensaio com o Pêndulo Britânico pode ser descrito da seguinte maneira:

- escolher o local onde será instalado o equipamento, de modo que seja representativo do trecho a ser analisado;

- nivelar e calibrar o equipamento com o auxílio da bolha de nível e do botão giratório que regula a altura do pêndulo;
- lançar o pêndulo sem que a sapata encoste no pavimento para zerar o equipamento, ajustando, se for o caso, o botão que regula a ponteira;
- ajustar a área de contato do equipamento com o pavimento através da régua que delimita a área atingida pela sapata emborrachada;
- molhar a superfície do pavimento para simular a pior situação de tráfego;
- lançar cinco vezes o pêndulo em cada ponto, considerando apenas as últimas quatro medidas para determinar o valor médio de BPN para a superfície do pavimento no local ensaiado.

Cabe salientar que, embora a norma americana determine que a variação máxima entre as medidas de BPN seja de 3 unidades, adotou-se como válidos valores de BPN com variação de até 5 unidades entre as leituras em cada ponto ensaiado, pois em alguns pontos da rodovia BR-290/RS o elevado tráfego de veículos pesados e a ação do vento é muito forte, inviabilizando, assim, medidas dentro da variação exigida pela ASTM E 303-93 (1998).

A sequência de imagens contidas na Figura 12 ilustra algumas das etapas de ensaio envolvidas para medir a microtextura com o equipamento do tipo Pêndulo Britânico.



a) zeragem da escala de textura



b) ajuste da área de contato



c) molhagem do pavimento



d) posição para lançamento



e) lançamento do pêndulo



f) leitura do valor de BPN

Figura 12: Etapas envolvidas no ensaio com Pêndulo Britânico

3.1.1.3 Classificação do valor de BPN

Conforme especificação do Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos (DNIT, 2006), a microtextura de uma superfície pode ser classificada em função do parâmetro BPN (ou VRD), conforme consta na Tabela 9. As faixas de classificação apresentadas na tabela abaixo foram publicadas em 1998 no documento intitulado “Informativo técnico sobre avaliação da resistência à derrapagem através de aparelhagem portátil” (Boletim Técnico nº18 da ABPv).

Tabela 9: Classes de microtextura pelo método do Pêndulo Britânico (DNIT, 2006)

Classificação	Limites de BPN
Perigosa	< 25
Muito Lisa	25 – 31
Lisa	32 – 39
Insuficientemente Rugosa	40 – 46
Medianamente Rugosa	47 – 54
Rugosa	55 – 75
Muito Rugosa	> 75

O manual do DNIT ainda recomenda valores de VRD ≥ 55 , ou seja, superfícies de pavimentos com textura rugosa a muito rugosa.

3.1.2 Ensaio de Mancha de Areia

O ensaio de Mancha de Areia foi desenvolvido e regulamentado pelos franceses na norma *Rugosité Géométrique des Revêtements Routiers – Mésures de La Profondeur au Sable* em 1971. Esse método permite a determinação da macrotextura do pavimento através da altura da mancha de areia, ou, em francês, *Hauter au Sable* (HS). Da mesma forma que o Pêndulo Britânico, a mancha de Areia fornece apenas medições pontuais da textura da superfície. Entretanto, os resultados do ensaio de Mancha de Areia são extremamente correlacionáveis com outros métodos de ensaios para medir a macrotextura (Flintsch *et al.*, 2003). Apesar de

ser um ensaio simples e rudimentar, a experiência tem mostrado que a técnica apresenta alta repetibilidade dos resultados mesmo com operadores diferentes.

O conhecimento da profundidade média da altura de areia (HS), ou macrotextura do pavimento, serve como uma importante ferramenta na caracterização da textura superficial e, quando analisada em conjunto com outros ensaios físicos, pode ser usada para melhoramento das técnicas de acabamento ou dos materiais utilizados na pavimentação.

3.1.2.1 Princípio de funcionamento

O ensaio de Mancha de Areia é uma técnica volumétrica para obter a macrotextura de superfícies a partir de um volume conhecido de material espalhado sobre o pavimento. O princípio de funcionamento dessa técnica consiste em preencher os vazios da superfície de rolamento com um volume de 25.000 mm³ de material granular. A norma americana (ASTM E – 965-96, 1998) especifica que a granulometria do material deve ser passante na peneira #60 (0,250 mm) e retido na peneira #80 (0,177 mm). Já a norma francesa, e a norma brasileira da ANAC (IAC-4302 *apud* Lugão, 2008), recomendam que a granulometria do material seja passante na peneira #50 (0,300 mm) e fique retido na peneira #100 (0,150 mm).

O conceito desse ensaio baseia-se no fato de que, sabendo previamente o volume de material (areia limpa e seca ou microesferas de vidro) despejado sobre o pavimento, ao obter a área (aproximadamente circular) formada pelo material espalhado na superfície pode-se determinar a altura média da mancha de areia (HS) pela Equação 20.

$$HS = \frac{4 \cdot V}{\pi \cdot D^2} \quad (20)$$

Onde:

HS = altura média da mancha (mm);

V = volume de areia (mm³); e

D = diâmetro médio da mancha (mm).

Na Figura 13, representa-se esquematicamente o princípio de determinação da macrotextura, expressa pelo valor HS, através do ensaio de Mancha de Areia. Na qual se pode ver que o material é despejado sobre a superfície, em seguida espalha-se esse material com o auxílio do disco, mede-se o diâmetro da mancha (D) e, por fim, determina-se a altura da mancha (HS).

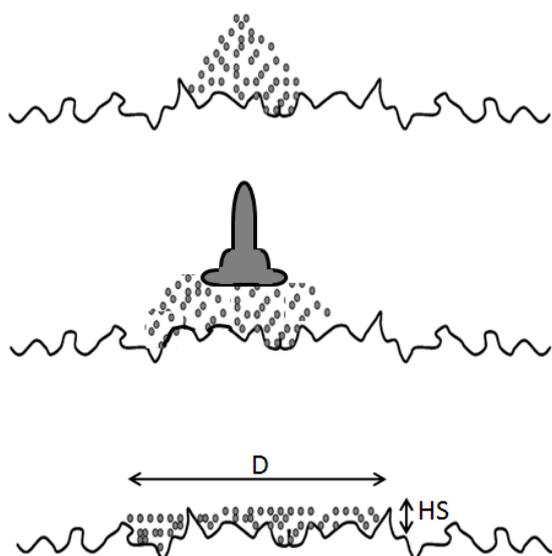


Figura 13: Esquema representativo do ensaio de Mancha de Areia (modificado de Rodrigues Filho, 2006)

Segundo Momm (1998), apesar da facilidade e rapidez de execução deste método, deve-se tomar cuidado com as limitações quando aplicável em revestimentos muito fechados. Aps (2006) ainda chama a atenção para a limitação da aplicação desse ensaio em revestimentos muito abertos, como, por exemplo, em camadas porosas de atrito (CPA).

3.1.2.2 Procedimentos de ensaio

Os aparatos utilizados no ensaio de Mancha de Areia são um recipiente contendo 25.000 mm³ de material com granulometria dentro das especificações, uma escova para limpeza da superfície, um disco espalhador de base emborrachada com 64 mm de diâmetro e uma régua para medir o diâmetro da mancha circular formada pelo espalhamento do material. Em resumo, o procedimento de ensaio de Mancha de Areia pode ser descrito do seguinte modo:

- utilizar uma balança de alta precisão para encher os potes com o material granular, de modo a conter o volume de 25.000 mm^3 .
- escolher o local onde será despejado o material, de forma que seja representativo do trecho a ser analisado;
- limpar o local escolhido para realização do ensaio com a escova;
- despejar o material granular sobre o pavimento e espalhá-lo em movimentos circulares com o auxílio do disco;
- quando percebe-se que a mancha não cresce mais radialmente deve-se interromper os movimentos com o disco;
- realiza-se, então, quatro medidas do diâmetro defasadas em 45° uma da outra;
- o diâmetro médio da mancha será representado pela média aritmética dos quatro diâmetros medidos e, por fim, pode-se calcular a altura da mancha formada no pavimento.

A sequência de imagens contida na Figura 14 ilustra algumas das etapas de ensaio envolvidas para determinar a macrotextura com o ensaio da Mancha de Areia.

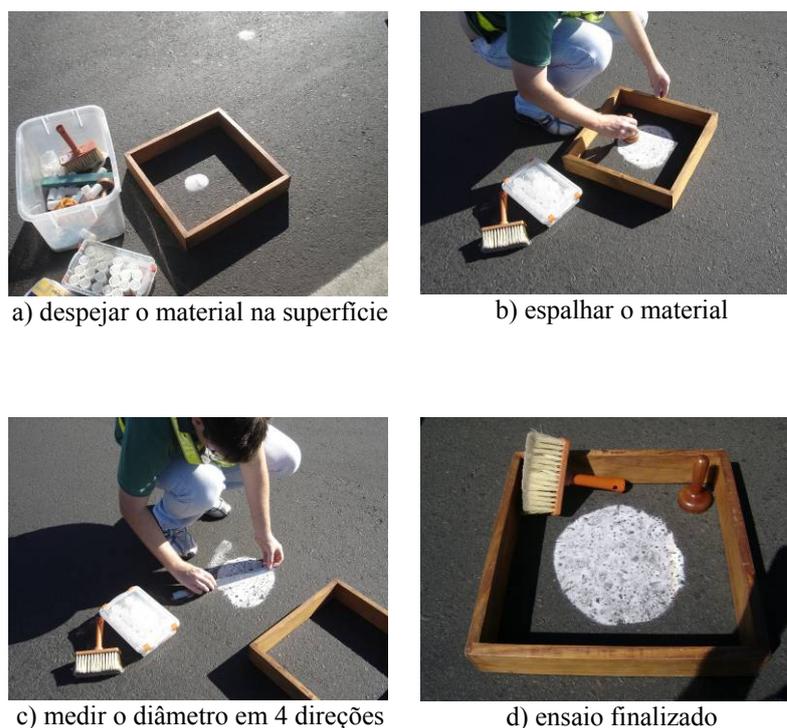
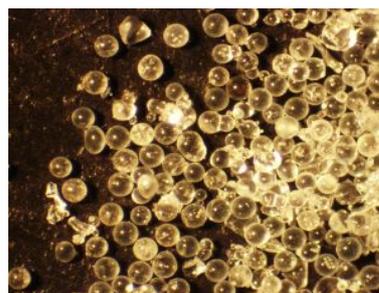


Figura 14: Etapas envolvidas no ensaio da Mancha de Areia

Nesta pesquisa foram utilizadas microesferas de vidro do tipo #60-80 fabricadas pela Potters Industrial Ltda. Na Figura 15, a) pode-se ver as microesferas preenchendo os vazios da superfície do pavimento e b) a forma das microesferas aumentadas em 25 vezes.



a) preenchimento da macrot textura



b) aumentada 25x (Santos, 2008)

Figura 15: Microesferas de vidro utilizadas no ensaio da Mancha de Areia

Para determinar o peso de microesferas de vidro equivalente ao volume especificado no ensaio de Mancha de Areia, encheu-se uma caixa de volume conhecido com o material e obteve-se o peso específico do mesmo. Conhecendo o peso aparente das microesferas ($\gamma_{\text{microesferas}} = 1,41 \text{ g/cm}^3$), então, para atingir o volume de 25 cm^3 , necessita-se que os recipientes contenham 35,25g de microesferas. Visando reduzir a interferência do volume de material nos resultados, realizou-se um rígido controle de pesagem, aceitando somente potes que contenham $35,25 \pm 0,05 \text{ g}$ de material.

3.1.2.3 Classificação do valor de HS

A classificação da macrot textura de uma superfície em função do parâmetro HS também está especificada no Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos (DNIT, 2006), como pode ser observado na Tabela 10. As faixas de classificação apresentadas na tabela a seguir foram propostas na norma francesa de 1971 e elaboradas por Pasquet (1968).

Tabela 10: Classes de macrot textura pelo método da Mancha de Areia (DNIT, 2006)

Classificação	Limites de HS
Muito Fina	< 0,20
Fina	0,21 – 0,40
Média	0,41 – 0,80
Grossa	0,81 – 1,20
Muito Grossa	> 1,20

O manual do DNIT ainda recomenda a faixa de valores para altura média da mancha de areia de $0,6 \text{ mm} < HS < 1,2 \text{ mm}$, ou seja, superfícies de pavimentos com textura média a grossa. A limitação quanto ao valor máximo de HS deve-se aos ruídos gerados em pavimentos com textura muito grossa, causando desconforto ao condutor do veículo.

Nos estudos desenvolvidos por Pasquet (1968) em trechos rodoviários com diferentes tipos de texturas medidas através do ensaio de Mancha de Areia foi possível, além de dividir a macrotextura em cinco classes, correlacionar os valores de HS com a velocidade de tráfego. Recomendando, assim, a macrotextura adequada para cada tipo de via, conforme pode ser visto na Tabela 11.

Tabela 11: Recomendações de macrotextura para cada tipo de via
(adaptado de Pasquet, 1968)

Macrotextura	Recomendação
Muito Fina	Não deve ser utilizada
Fina	Aplicável em zonas urbanas $V < 80 \text{ km/h}$
Média	Indicada para vias com $80 \text{ km/h} < V < 120 \text{ km/h}$
Grossa	Indicadas para vias rápidas $V > 120 \text{ km/h}$
Muito Grossa	Aplicável em casos especiais

Specht *et al.*(2007) avaliou a macrotextura em vários tipos de pavimentos existentes no Estado brasileiro do Rio Grande do Sul, caracterizando assim a faixa de valores HS que são comuns de encontrar em cada revestimento. Os revestimentos analisados são: Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ), Pré-Misturado a Quente (PMQ), Camada Porosa de Atrito (CPA), Tratamento Superficial Duplo (TSD), CBUQ com ligante Asfalto Borracha (AB), Microrrevestimento (MR), Lama Asfáltica (LA) e Concreto de Cimento Portland (CCP).

Os resultados desse estudo podem ser vistos na Figura 16, pela qual constata-se que os revestimentos que apresentaram maiores valores de macrotextura, expressa em função de HS, são o TSD, CPA e MR, respectivamente. Outro aspecto importante que fica evidente nesta pesquisa é que, embora seja recomendado $HS > 0,6 \text{ mm}$, os revestimentos de CBUQ

apresentam, geralmente, valores de HS na ordem de 0,4 mm. O baixo valor de HS em pavimentos com CBUQ tem sido percebido com frequência na prática nacional.

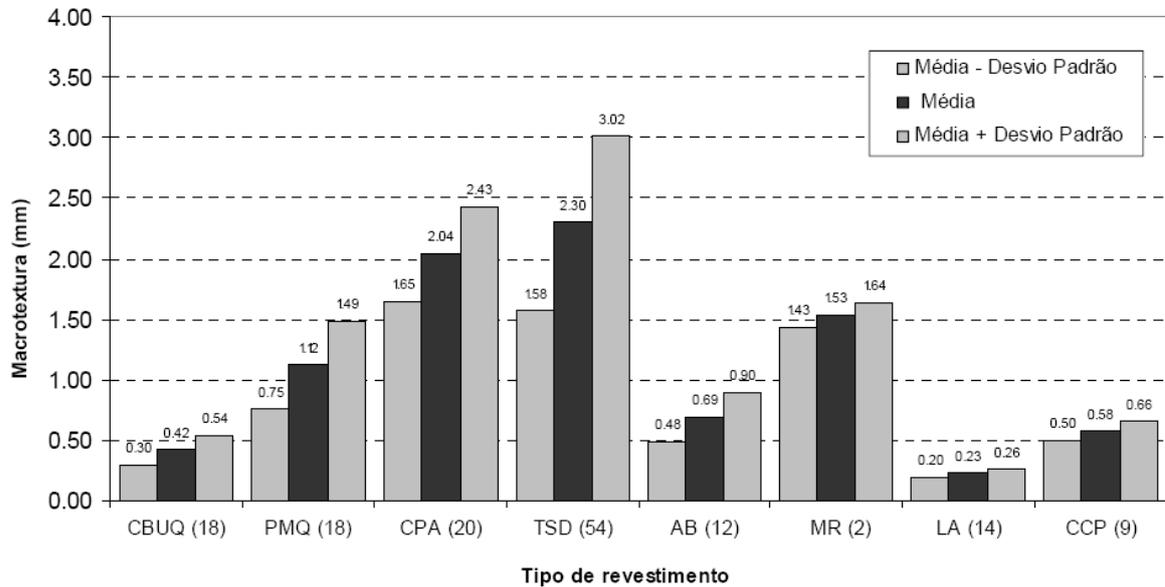


Figura 16: Valores de macrotextura encontrados para diferentes revestimentos (Specht *et al.*, 2007)

Outra pesquisa relevante envolvendo a avaliação da macrotextura é a desenvolvida por Momm (1998), na qual fica estabelecida a relação entre a altura da mancha de areia HS e o tamanho máximo dos granulares envolvidos na mistura asfáltica. A Equação 21 representa o modelo desenvolvido para estimativa de HS.

$$HS = 0,2867 \cdot D_{\text{máx}}^{0,6636} \cdot \text{Exp}^{0,5189} \quad (21)$$

Onde:

HS = altura média da mancha (mm);

$D_{\text{máx}}$ = tamanho máximo dos granulares (mm); e

Exp = expoente da equação da curva granulométrica.

3.1.3 Ensaio de Drenabilidade

O ensaio de Drenabilidade pode ser realizado historicamente por dois tipos de drenômetros com diferentes dimensões: o do Instituto de Engenharia para Rodovias, Ferrovias e Rochas de Zurique (ISETH) e o da Administração Federal de Rodovias (FHWA). Ambos os equipamentos visam avaliar a capacidade de escoamento das águas superficiais sobre o pavimento. Nesta pesquisa, em particular, estudou-se o Drenômetro desenvolvido pelo ISETH.

A medida obtida nesse ensaio é fortemente relacionada com o valor de macrotextura obtido com o ensaio da Mancha de Areia, havendo apenas algumas restrições em superfícies muito abertas ou muito fechadas (Ferreira, 2002 e Aps, 2006). O resultado desse ensaio pode ser expresso em termos de tempo ou de vazão média de escoamento.

3.1.3.1 Princípio de funcionamento

O ensaio de drenabilidade é uma forma indireta de avaliar a macrotextura do pavimento, pois é com base nas características dela que se dará a capacidade de escoamento superficial da água. O princípio de funcionamento deste ensaio é simular as condições de drenagem superficial que está entre a área de contato pneu-pavimento, medindo o tempo de escoamento de um volume de 0,75 litros de água armazenada no equipamento.

O equipamento consiste de um cilindro plástico com um peso de chumbo em sua base para fixá-lo melhor à superfície e no seu fundo há um revestimento de borracha com um furo pelo qual ocorre o escoamento da água armazenada. Para facilitar o ensaio existem duas linhas de demarcações no cilindro para delimitar o volume de água de interesse para registro do tempo de escoamento. O equipamento conta ainda com uma rolha acoplada no furo do fundo do cilindro que deve ser removida quando se inicia o ensaio. Na Figura 17, podem ser verificadas as medidas padronizadas do Drenômetro, conforme o modelo do ISETH.

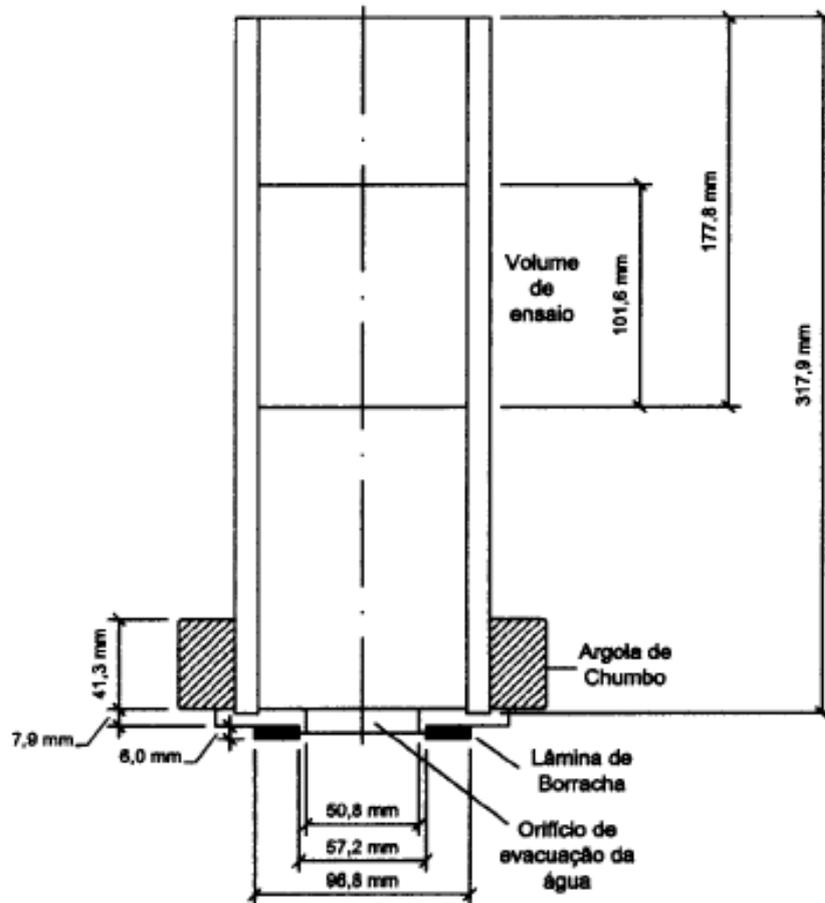


Figura 17: Dimensões do Drenômetro ISETH (Ferreira, 2002)

3.1.3.2 Procedimentos de ensaio

O ensaio de Drenabilidade está especificado pela norma ASTM E-2380 (2005). Inicialmente, deve-se posicionar o equipamento sobre a superfície a ser avaliada de modo que o equipamento não fique em contato com um agregado saliente no revestimento, devendo-se molhar o pavimento e a base emborrachada do cilindro. As etapas do procedimento de ensaio são as seguintes:

- escolher o local onde será posicionado o equipamento, de forma que seja representativo do trecho a ser analisado;
- molhar a superfície de contato entre o equipamento e o pavimento;
- encher o cilindro de água;

- remover a rolha de vedação do furo no fundo do cilindro;
- acionar o cronômetro quando o nível de água passar pela primeira linha delimitadora;
- aguardar que o nível de água passe pela segunda linha delimitadora e parar o cronômetro;
- repete-se três vezes o ensaio e o tempo médio representa a capacidade de escoamento para a superfície ensaiada.

As medidas de drenabilidade foram realizadas apenas em um dos levantamentos de dados e somente nos pavimentos flexíveis que estavam sendo monitorados. O ensaio foi executado exatamente onde realizou-se o ensaio da Mancha de Areia, para tanto foi necessário remover as microesferas do pavimento.

Nessa pesquisa optou-se por trabalhar com a unidade de vazão, e não de tempo, então dividiu-se o volume de água armazenada no Drenômetro (0,75 litros) pelo tempo médio de escoamento, obtendo-se, assim, uma unidade de vazão (l/s).

A sequência de imagens contida na Figura 18 ilustra as etapas de ensaio envolvidas para determinar a capacidade de escoamento com o ensaio de Drenabilidade.

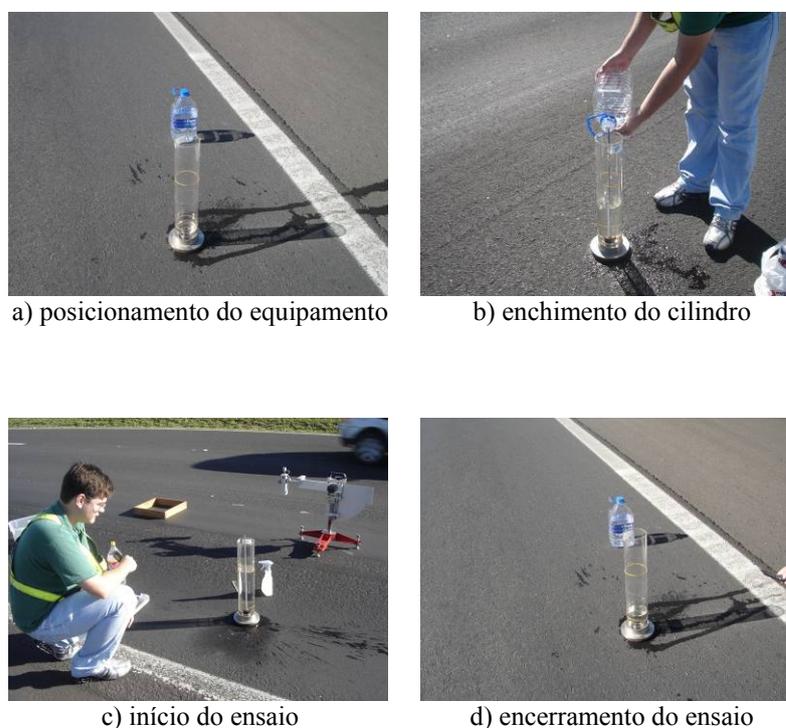


Figura 18: Etapas envolvidas no ensaio de Drenabilidade

3.1.3.3 Relação entre os ensaios de Drenabilidade e Mancha de Areia

A forte relação entre os ensaios de Drenabilidade e de Mancha de Areia não é uma novidade, isso já foi estudado por Doty em 1974. No âmbito nacional, destacam-se dois resultados relacionando os resultados obtidos nesses ensaios: Ferreira (2002) e Matos (2004), os modelos determinados podem ser vistos nas Equações 22 e 23, respectivamente.

$$\text{Dren} = e^{(-1,169+0,97 \cdot \text{HS})} \quad (22)$$

Onde:

Dren = tempo de escoamento do Drenômetro (min.); e
HS = altura da mancha (mm).

$$\text{Dren} = 2,9848 \cdot \text{HS}^{-1,7473} \quad (23)$$

Onde:

Dren = tempo de escoamento do Drenômetro (seg.); e
HS = altura da mancha (mm).

Outra pesquisa que pode ser destacada é a desenvolvida por Ribeiro *et al.* (2008). Na qual se relacionou os resultados usando um Drenômetro com temporizador eletrônico acoplado ao equipamento. O modelo de correlação proposto está representado na Equação 24.

$$\text{HS} = 1,6868 \cdot \text{Dren}^{-0,3329} \quad (24)$$

Onde:

HS = altura da mancha (mm); e
Dren = tempo de escoamento do Drenômetro (seg.).

3.2 LOCAIS DE MONITORAÇÃO

Os pavimentos avaliados nesta pesquisa ficam situados na rodovia BR-290/RS entre o trecho Osório-Porto Alegre, conhecido como *Free Way*. A pista Sul da rodovia representa o lado da rodovia no sentido Porto Alegre-Osório, enquanto que a pista Norte é o trajeto inverso, ou seja, sentido Osório-Porto Alegre. O trecho em questão está sob responsabilidade da Concessionária da Rodovia Osório-Porto Alegre S/A – CONCEPA – desde 1997 (Vitorello, 2008).

Os locais para monitoração dos valores de micro e macrotextura foram escolhidos de modo a contemplar distintos tipos de camadas de rolamento. Dessa forma, procurou-se contemplar três tipos de revestimentos: o Microrrevestimento Asfáltico (MR), Concreto Asfáltico (CA) e Placas de Concreto de Cimento Portland (PC). Na escolha dos locais, tentou-se optar por trechos que não sofreriam nenhum tipo de intervenção no pavimento. Entretanto, no andamento da pesquisa um dos pontos de monitoração foi remanejado devido a intervenções no pavimento, trata-se do km 41+400, no qual foi aplicado Microrrevestimento.

Na Tabela 12, apresenta-se informações básicas dos pontos escolhidos para serem monitorados. Nela podem ser observados os tipos de revestimentos em cada ponto e o ano de execução de cada camada de rolamento.

Tabela 12: Tipo e ano de execução dos revestimentos monitorados

Estaca (km)	Pista	Tipo de revestimento	Ano de execução
68+800	Sul	Microrrevestimento	2005
65+500	Sul	Concreto asfáltico	2007
49+500	Sul	Concreto asfáltico	2008
41+400	Sul	Microrrevestimento	2008
36+300	Sul	Concreto asfáltico	2005
27+660	Sul	Microrrevestimento	2006
24+880	Norte	Placa de concreto	2002
33+080	Norte	Placa de concreto	2000
50+500	Norte	Placa de concreto	2001

Todos os pontos monitorados ficam situados em trechos retos e planos com 3 faixas de rolamento, sendo que os ensaios foram executados sempre na faixa mais externa de cada pista. O km 65+500 e km 24+880 são pontos localizados próximos a saídas de curvas horizontais.

3.3 PROCEDIMENTOS DE ANÁLISE

De posse dos dados levantados em campo, partiu-se para as análises dos mesmos. Inicialmente, realizou-se a avaliação da aderência pneu-pavimento. Nessa avaliação classificou-se a micro e macrotextura nos pontos monitorados através de especificações do DNIT (2006). Além disso, avaliou-se a aderência nesses pontos adotando o *International Friction Index* (IFI), que avalia a combinação da micro e macrotextura, e classificou-se a condição de cada ponto conforme a 4ª tentativa proposta por APS (2006) para classificação da aderência pneu-pavimento em pavimentos flexíveis pelo IFI.

A outra análise realizada foi para desenvolver um modelo de regressão linear simples relacionando os resultados do ensaio da Mancha de Areia com o de Drenabilidade. Para atingir tal objetivo, recorreu-se a bibliografia nacional e resultados do próprio autor para elaborar um banco de dados suficiente para gerar um modelo confiável de ser aplicado em rodovias brasileiras. Procurou-se desenvolver um modelo estatisticamente válido com o formato apresentado na Equação 25.

$$HS = a + b \cdot Q \quad (25)$$

Onde:

HS = macrotextura obtida com o ensaio de Mancha de Areia (em mm);

a e b = coeficientes de ajuste linear do modelo; e

Q = vazão obtida com o ensaio de Drenabilidade (em l/s).

A validade do modelo proposto para relacionar os ensaios de Mancha de Areia e Drenabilidade foi analisada quanto ao coeficiente de determinação (R^2), a distribuição dos resíduos e através da curva de distribuição de Snedecor (teste F).

Apenas para entender e conhecer melhor o comportamento da textura ao longo do tempo foi *plotado* os dados de micro e macrotextura, em termos de BPN e HS, em função do período de monitoração para cada ponto estudado.

Com base nos dados oriundos da monitoração da variação da textura superficial em pavimentos da BR-290/RS desenvolveram-se modelos para a estimativa dos valores de micro e macrotextura em pavimentos flexíveis e rígidos da rodovia BR-290/RS. Os modelos de regressão linear múltipla desenvolvidos apresentam o formato apresentado na Equação 26.

$$TX_{\text{Final}} = a + b \cdot TX_{\text{Inicial}} + c \cdot \Delta T \quad (26)$$

Onde:

TX_{Final} = valor previsto para a textura após determinado intervalo de tempo;

a, b e c = coeficientes de ajuste linear do modelo;

TX_{Inicial} = valor de textura medido; e

ΔT = intervalo de tempo.

Da mesma forma que o modelo anterior, a validação estatística dos modelos de estimativa da micro e macrotextura foi verificada quanto ao coeficiente de determinação (R^2), a distribuição dos resíduos e através da curva de distribuição de Snedecor (teste F).

Para auxiliar nas análises estatísticas desta pesquisa utilizou-se ferramentas adequadas do Microsoft Office Excel. Este *software* também foi usado para organização dos dados através de planilhas eletrônicas.

4 LEVANTAMENTO DE DADOS

Conforme mencionado nos capítulos anteriores, a pesquisa relatada nesta dissertação consistiu basicamente em monitorar a variação da textura de distintas camadas de rolamento com diferentes idades da BR-290/RS no trecho entre Osório e Porto Alegre. Dessa forma, realizaram-se levantamentos de dados com frequência para analisar o comportamento da micro e macrotextura em curtos períodos (aproximadamente um ano de monitoração).

Durante a pesquisa foi realizado um total de sete levantamentos em campo para as medidas de micro e macrotextura, e no último levantamento realizou-se também medições da drenabilidade nas superfícies flexíveis estudadas. Cabe explicar que o ensaio com Drenômetro foi realizado apenas uma vez durante a pesquisa porque não estava entre os objetivos da mesma verificar a variação da capacidade de drenagem superficial da rodovia, mas sim correlacionar os valores dos ensaios de Mancha de Areia com o de Drenabilidade.

Na seqüência apresenta-se a síntese dos resultados obtidos adotando os ensaios com Pêndulo Britânico, Mancha de Areia e Drenômetro. De posse dos valores de textura, os dados levantados em campo foram tabulados e a partir deles calculou-se o IFI para os pontos monitorados na rodovia, conforme explicado no Capítulo 3.

4.1 LEVANTAMENTO DOS VALORES DE MICROTTEXTURA

Os valores de microtextura (atrito) foram obtidos usando o ensaio com Pêndulo Britânico, no qual em cada ponto de monitoração lançou-se cinco vezes a sapata de borracha do equipamento contra a superfície do pavimento, sendo que a primeira medida é descartada. Com as demais medidas, calculou-se o valor médio do BPN para cada ponto estudado.

Cabe ressaltar que nos dois primeiros levantamentos as medidas foram tomadas apenas na trilha de roda direita (TRD), posteriormente ao início da pesquisa é que se decidiu acompanhar a variação da textura na trilha de roda esquerda (TRE).

Chama-se a atenção que no dia 30 de outubro de 2008 não foi possível realizar o ensaio de Pêndulo Britânico em todos os pontos monitorados da rodovia, pois o equipamento apresentou problema durante o levantamento. Também vale a pena destacar que no levantamento do dia 21 de maio de 2009, devido à ocorrência de um acidente que necessitou da equipe disponibilizada pela CONCEPA para acompanhar o levantamento, o tempo disponível para execução dos ensaios foi reduzido e, dessa forma, optou-se por realizar as medidas apenas na TRD, com exceção do km 33+080 da pista Sul que estava interditado por causa dos serviços de pintura de faixa. Na tabelas a seguir, apresentam-se os valores médios de BPN obtidos em cada levantamento de campo para os pontos monitorados.

Tabela 13: Valores de microtextura obtidos no levantamento do dia 17/09/2008

Estaca (km)	Pista	Tipo de revestimento	Microtextura (BPN _{médio})	
			TRD	TRE
68+800	Sul	Microrrevestimento	60	-
65+500	Sul	Concreto Asfáltico	58	-
49+500	Sul	Concreto Asfáltico	65	-
41+400	Sul	Microrrevestimento	-	-
36+300	Sul	Concreto Asfáltico	53	-
27+660	Sul	Microrrevestimento	61	-
24+880	Norte	Placa de Concreto	66	-
33+080	Norte	Placa de Concreto	53	-
50+600	Norte	Placa de Concreto	71	-

Tabela 14: Valores de microtextura obtidos no levantamento do dia 30/10/2008

Estaca (km)	Pista	Tipo de revestimento	Microtextura ($BPN_{\text{m\u00e9dio}}$)	
			TRD	TER
68+800	Sul	Microrrevestimento	58	-
65+500	Sul	Concreto Asf\u00e1ltico	60	-
49+500	Sul	Concreto Asf\u00e1ltico	65	-
41+400	Sul	Microrrevestimento	-	-
36+300	Sul	Concreto Asf\u00e1ltico	-	-
27+660	Sul	Microrrevestimento	-	-
24+880	Norte	Placa de Concreto	-	-
33+080	Norte	Placa de Concreto	-	-
50+600	Norte	Placa de Concreto	-	-

Tabela 15: Valores de microtextura obtidos no levantamento do dia 18/12/2008

Estaca (km)	Pista	Tipo de revestimento	Microtextura ($BPN_{\text{m\u00e9dio}}$)	
			TRD	TRE
68+800	Sul	Microrrevestimento	52	50
65+500	Sul	Concreto Asf\u00e1ltico	54	56
49+500	Sul	Concreto Asf\u00e1ltico	60	55
41+400	Sul	Microrrevestimento	70	71
36+300	Sul	Concreto Asf\u00e1ltico	52	57
27+660	Sul	Microrrevestimento	59	66
24+880	Norte	Placa de Concreto	65	74
33+080	Norte	Placa de Concreto	56	62
50+600	Norte	Placa de Concreto	71	66

Tabela 16: Valores de microtextura obtidos no levantamento do dia 21/01/2009

Estaca (km)	Pista	Tipo de revestimento	Microtextura ($BPN_{\text{m\u00e9dio}}$)	
			TRD	TRE
68+800	Sul	Microrrevestimento	50	49
65+500	Sul	Concreto Asf\u00e1ltico	55	52
49+500	Sul	Concreto Asf\u00e1ltico	62	56
41+400	Sul	Microrrevestimento	71	71
36+300	Sul	Concreto Asf\u00e1ltico	51	58
27+660	Sul	Microrrevestimento	62	63
24+880	Norte	Placa de Concreto	63	72
33+080	Norte	Placa de Concreto	55	62
50+600	Norte	Placa de Concreto	70	67

Tabela 17: Valores de microtextura obtidos no levantamento do dia 25/03/2009

Estaca (km)	Pista	Tipo de revestimento	Microtextura ($BPN_{\text{m\u00e9dio}}$)	
			TRD	TRE
68+800	Sul	Microrrevestimento	51	50
65+500	Sul	Concreto Asf\u00e1ltico	55	51
49+500	Sul	Concreto Asf\u00e1ltico	61	50
41+400	Sul	Microrrevestimento	70	71
36+300	Sul	Concreto Asf\u00e1ltico	50	53
27+660	Sul	Microrrevestimento	58	61
24+880	Norte	Placa de Concreto	61	70
33+080	Norte	Placa de Concreto	55	63
50+600	Norte	Placa de Concreto	67	63

Tabela 18: Valores de microtextura obtidos no levantamento do dia 22/04/2009

Estaca (km)	Pista	Tipo de revestimento	Microtextura ($BPN_{\text{m\u00e9dio}}$)	
			TRD	TRE
68+800	Sul	Microrrevestimento	50	52
65+500	Sul	Concreto Asf\u00e1ltico	54	51
49+500	Sul	Concreto Asf\u00e1ltico	59	51
41+400	Sul	Microrrevestimento	70	71
36+300	Sul	Concreto Asf\u00e1ltico	50	53
27+660	Sul	Microrrevestimento	59	60
24+880	Norte	Placa de Concreto	62	70
33+080	Norte	Placa de Concreto	52	62
50+600	Norte	Placa de Concreto	63	62

Tabela 19: Valores de microtextura obtidos no levantamento do dia 21/05/2009

Estaca (km)	Pista	Tipo de revestimento	Microtextura ($BPN_{\text{m\u00e9dio}}$)	
			TRD	TRE
68+800	Sul	Microrrevestimento	51	-
65+500	Sul	Concreto Asf\u00e1ltico	53	-
49+500	Sul	Concreto Asf\u00e1ltico	55	-
41+400	Sul	Microrrevestimento	60	-
36+300	Sul	Concreto Asf\u00e1ltico	50	-
27+660	Sul	Microrrevestimento	59	-
24+880	Norte	Placa de Concreto	61	-
33+080	Norte	Placa de Concreto	-	-
50+600	Norte	Placa de Concreto	61	-

4.2 LEVANTAMENTO DOS VALORES DE MACROTEXTURA

Os valores de macrotextura foram obtidos usando o ensaio de Mancha de Areia, no qual em cada ponto de monitoração mediu-se o diâmetro da mancha sobre a superfície em quatro direções defasadas por 45° uma da outra. Com essas medidas, determinou-se o valor médio do diâmetro para cada ponto estudado e calculou-se a macrotextura expressa como sendo a altura da mancha HS (em mm), conforme a Equação 20.

Os levantamentos de macrotextura tiveram as mesmas restrições que o relatado para o ensaio com Pêndulo britânico nos dois primeiros levantamentos, portanto, as medidas foram tomadas apenas na trilha de roda direita (TRD). Também da mesma forma que o ocorrido no levantamento de microtextura, no dia 21 de maio de 2009 não foram realizadas medições no km 33+080 da pista Sul, por estar interditado devido aos serviços de pintura de faixa. Nas tabelas a seguir, apresentam-se os valores de HS obtidos em cada levantamento de campo para os pontos monitorados.

Tabela 20: Valores de macrotextura obtidos no levantamento do dia 17/09/2008

Estaca (km)	Pista	Tipo de revestimento	Diâmetro médio (cm)		Macrotextura (mm)	
			TRD	TRE	TRD	TRE
68+800	Sul	Microrrevestimento	36,5	-	0,24	-
65+500	Sul	Concreto Asfáltico	23,9	-	0,56	-
49+500	Sul	Concreto Asfáltico	31,6	-	0,32	-
41+400	Sul	Microrrevestimento	-	-	-	-
36+300	Sul	Concreto Asfáltico	20,7	-	0,75	-
27+660	Sul	Microrrevestimento	18,1	-	0,98	-
24+880	Norte	Placa de Concreto	25,5	-	0,49	-
33+080	Norte	Placa de Concreto	28,8	-	0,38	-
50+600	Norte	Placa de Concreto	26,8	-	0,44	-

Tabela 21: Valores de macrotextura obtidos no levantamento do dia 30/10/2008

Estaca (km)	Pista	Tipo de revestimento	Diâmetro médio (cm)		Macrotextura (mm)	
			TRD	TRE	TRD	TRE
68+800	Sul	Microrrevestimento	36,7	-	0,24	-
65+500	Sul	Concreto Asfáltico	24,0	-	0,55	-
49+500	Sul	Concreto Asfáltico	29,4	-	0,37	-
41+400	Sul	Microrrevestimento	-	-	-	-
36+300	Sul	Concreto Asfáltico	21,0	-	0,72	-
27+660	Sul	Microrrevestimento	18,3	-	0,96	-
24+880	Norte	Placa de Concreto	26,0	-	0,47	-
33+080	Norte	Placa de Concreto	29,3	-	0,37	-
50+600	Norte	Placa de Concreto	26,8	-	0,44	-

Tabela 22: Valores de macrotextura obtidos no levantamento do dia 18/12/2008

Estaca (km)	Pista	Tipo de revestimento	Diâmetro médio (cm)		Macrotextura (mm)	
			TRD	TRE	TRD	TRE
68+800	Sul	Microrrevestimento	36,0	32,9	0,25	0,29
65+500	Sul	Concreto Asfáltico	24,1	24,1	0,55	0,55
49+500	Sul	Concreto Asfáltico	31,0	21,5	0,33	0,69
41+400	Sul	Microrrevestimento	15,0	16,5	1,41	1,17
36+300	Sul	Concreto Asfáltico	21,6	18,9	0,69	0,89
27+660	Sul	Microrrevestimento	18,8	20,4	0,91	0,77
24+880	Norte	Placa de Concreto	25,7	24,8	0,48	0,52
33+080	Norte	Placa de Concreto	28,8	27,9	0,38	0,41
50+600	Norte	Placa de Concreto	27,3	25,5	0,43	0,49

Tabela 23: Valores de macrotextura obtidos no levantamento do dia 21/01/2009

Estaca (km)	Pista	Tipo de revestimento	Diâmetro médio (cm)		Macrotextura (mm)	
			TRD	TRE	TRD	TRE
68+800	Sul	Microrrevestimento	34,3	33,2	0,27	0,29
65+500	Sul	Concreto Asfáltico	25,1	24,8	0,51	0,52
49+500	Sul	Concreto Asfáltico	28,1	28,4	0,40	0,40
41+400	Sul	Microrrevestimento	16,2	18,1	1,21	0,97
36+300	Sul	Concreto Asfáltico	21,4	19,1	0,70	0,87
27+660	Sul	Microrrevestimento	19,6	20,5	0,83	0,76
24+880	Norte	Placa de Concreto	25,7	24,6	0,48	0,52
33+080	Norte	Placa de Concreto	29,5	29,3	0,37	0,37
50+600	Norte	Placa de Concreto	27,0	25,7	0,44	0,48

Tabela 24: Valores de macrotextura obtidos no levantamento do dia 25/03/2009

Estaca (km)	Pista	Tipo de revestimento	Diâmetro médio (cm)		Macrotextura (mm)	
			TRD	TRE	TRD	TRE
68+800	Sul	Microrrevestimento	31,7	33,7	0,32	0,28
65+500	Sul	Concreto Asfáltico	25,3	24,4	0,50	0,54
49+500	Sul	Concreto Asfáltico	33,2	31,8	0,29	0,32
41+400	Sul	Microrrevestimento	16,6	18,8	1,15	0,90
36+300	Sul	Concreto Asfáltico	22,3	19,8	0,64	0,81
27+660	Sul	Microrrevestimento	21,0	24,5	0,72	0,53
24+880	Norte	Placa de Concreto	26,2	25,2	0,46	0,50
33+080	Norte	Placa de Concreto	29,8	30,3	0,36	0,35
50+600	Norte	Placa de Concreto	27,2	25,6	0,43	0,49

Tabela 25: Valores de macrotextura obtidos no levantamento do dia 22/04/2009

Estaca (km)	Pista	Tipo de revestimento	Diâmetro médio (cm)		Macrotextura (mm)	
			TRD	TRE	TRD	TRE
68+800	Sul	Microrrevestimento	31,6	34,0	0,32	0,28
65+500	Sul	Concreto Asfáltico	25,1	24,3	0,50	0,54
49+500	Sul	Concreto Asfáltico	31,5	32,0	0,32	0,31
41+400	Sul	Microrrevestimento	16,9	19,7	1,11	0,82
36+300	Sul	Concreto Asfáltico	22,1	20,0	0,65	0,79
27+660	Sul	Microrrevestimento	21,7	24,4	0,68	0,53
24+880	Norte	Placa de Concreto	27,1	25,9	0,43	0,48
33+080	Norte	Placa de Concreto	29,8	30,7	0,36	0,34
50+600	Norte	Placa de Concreto	27,3	25,2	0,43	0,50

Tabela 26: Valores de macrotextura obtidos no levantamento do dia 21/05/2009

Estaca (km)	Pista	Tipo de revestimento	Diâmetro médio (cm)		Macrotextura (mm)	
			TRD	TRE	TRD	TRE
68+800	Sul	Microrrevestimento	30,7	33,9	0,34	0,28
65+500	Sul	Concreto Asfáltico	25,9	24,3	0,48	0,54
49+500	Sul	Concreto Asfáltico	29,2	32,5	0,37	0,30
41+400	Sul	Microrrevestimento	17,0	19,6	1,11	0,83
36+300	Sul	Concreto Asfáltico	22,0	20,5	0,66	0,76
27+660	Sul	Microrrevestimento	21,8	25,4	0,67	0,50
24+880	Norte	Placa de Concreto	27,7	27,0	0,41	0,44
33+080	Norte	Placa de Concreto	-	-	-	-
50+600	Norte	Placa de Concreto	27,3	25,2	0,43	0,50

4.3 LEVANTAMENTO DOS VALORES DE DRENABILIDADE

Os valores de drenabilidade foram obtidos usando um Drenômetro com as mesmas dimensões do *Institute for Highway, Railroads and Rock Engineering* (ISETH), no qual em cada ponto de monitoração realizaram-se três medições do tempo de escoamento da água contida no tudo do Drenômetro. O valor de drenabilidade adotado foi determinado como sendo o tempo médio dessas três medidas.

O ensaio de Drenabilidade foi realizado apenas no último levantamento e somente nos pavimentos flexíveis, pois pretende-se usar esses dados juntamente com dados registrados na bibliografia nacional. Com o banco de dados formado pelos valores obtidos nesta pesquisa e os contidos em Ferreira (2002), Oliveira *et al.* (2004), Aps (2006), e Ribeiro *et al.* (2008) foi desenvolvido um modelo linear que relaciona os resultados dos ensaios de Mancha de Areia com os de Drenabilidade, possibilitando assim a obtenção do IFI utilizando o Drenômetro.

Tabela 27: Valores de drenabilidade obtidos no levantamento do dia 21/05/2009

Estaca (km)	Pista	Tipo de revestimento	Drenabilidade (s)	
			TRD	TRE
68+800	Sul	Microrrevestimento	22,79	-
65+500	Sul	Concreto Asfáltico	18,17	-
49+500	Sul	Concreto Asfáltico	14,47	-
41+400	Sul	Microrrevestimento	4,24	-
36+300	Sul	Concreto Asfáltico	12,35	-
27+660	Sul	Microrrevestimento	9,82	-

4.4 CÁLCULO DOS VALORES DE IFI

De posse dos dados de micro e macrotextura, determinou-se então o IFI para os pontos monitorados em cada levantamento, conforme explicado no item 2.3 do Capítulo 2 desta pesquisa. Para tanto, adotou-se as Equações 16, 17 e 18 para obtenção dos parâmetros S_p e F_{60} , que expressam o valor do IFI.

Tabela 28: Valores de IFI calculados para o levantamento do dia 17/09/2008

Estaca (km)	Pista	Tipo de revestimento	S _p		F ₆₀	
			TRD	TRE	TRD	TRE
68+800	Sul	Microrrevestimento	15,66	-	0,08	-
65+500	Sul	Concreto Asfáltico	52,02	-	0,23	-
49+500	Sul	Concreto Asfáltico	24,75	-	0,12	-
41+400	Sul	Microrrevestimento	-	-	-	-
36+300	Sul	Concreto Asfáltico	73,60	-	0,27	-
27+660	Sul	Microrrevestimento	99,73	-	0,35	-
24+880	Norte	Placa de Concreto	44,06	-	0,23	-
33+080	Norte	Placa de Concreto	31,57	-	0,14	-
50+600	Norte	Placa de Concreto	38,38	-	0,21	-

Tabela 29: Valores de IFI calculados para o levantamento do dia 30/10/2008

Estaca (km)	Pista	Tipo de revestimento	S _p		F ₆₀	
			TRD	TRE	TRD	TRE
68+800	Sul	Microrrevestimento	15,66	-	0,08	-
65+500	Sul	Concreto Asfáltico	50,88	-	0,23	-
49+500	Sul	Concreto Asfáltico	30,43	-	0,16	-
41+400	Sul	Microrrevestimento	-	-	-	-
36+300	Sul	Concreto Asfáltico	70,19	-	-	-
27+660	Sul	Microrrevestimento	97,46	-	-	-
24+880	Norte	Placa de Concreto	41,79	-	-	-
33+080	Norte	Placa de Concreto	30,43	-	-	-
50+600	Norte	Placa de Concreto	38,38	-	-	-

Tabela 30: Valores de IFI calculados para o levantamento do dia 18/12/2008

Estaca (km)	Pista	Tipo de revestimento	S _p		F ₆₀	
			TRD	TRE	TRD	TRE
68+800	Sul	Microrrevestimento	16,80	21,34	0,08	0,09
65+500	Sul	Concreto Asfáltico	50,88	50,88	0,22	0,22
49+500	Sul	Concreto Asfáltico	25,89	66,78	0,12	0,27
41+400	Sul	Microrrevestimento	148,58	121,31	0,46	0,43
36+300	Sul	Concreto Asfáltico	66,78	89,50	0,25	0,32
27+660	Sul	Microrrevestimento	91,78	75,87	0,33	0,33
24+880	Norte	Placa de Concreto	42,93	47,47	0,22	0,26
33+080	Norte	Placa de Concreto	31,57	34,98	0,15	0,17
50+600	Norte	Placa de Concreto	37,25	44,06	0,20	0,23

Tabela 31: Valores de IFI calculados para o levantamento do dia 21/01/2009

Estaca (km)	Pista	Tipo de revestimento	S _p		F ₆₀	
			TRD	TRE	TRD	TRE
68+800	Sul	Microrrevestimento	19,72	21,34	0,09	0,09
65+500	Sul	Concreto Asfáltico	46,34	47,47	0,21	0,20
49+500	Sul	Concreto Asfáltico	33,84	33,84	0,17	0,16
41+400	Sul	Microrrevestimento	125,86	98,59	0,44	0,40
36+300	Sul	Concreto Asfáltico	67,92	87,23	0,25	0,32
27+660	Sul	Microrrevestimento	82,69	74,74	0,33	0,32
24+880	Norte	Placa de Concreto	42,93	47,47	0,21	0,26
33+080	Norte	Placa de Concreto	30,43	30,43	0,14	0,15
50+600	Norte	Placa de Concreto	38,38	42,93	0,21	0,22

Tabela 32: Valores de IFI calculados para o levantamento do dia 25/03/2009

Estaca (km)	Pista	Tipo de revestimento	S_p		F_{60}	
			TRD	TRE	TRD	TRE
68+800	Sul	Microrrevestimento	24,75	20,21	0,11	0,09
65+500	Sul	Concreto Asfáltico	45,20	49,74	0,20	0,20
49+500	Sul	Concreto Asfáltico	21,34	24,75	0,10	0,11
41+400	Sul	Microrrevestimento	119,04	90,64	0,43	0,38
36+300	Sul	Concreto Asfáltico	61,10	80,42	0,23	0,28
27+660	Sul	Microrrevestimento	70,19	48,61	0,28	0,23
24+880	Norte	Placa de Concreto	40,66	45,20	0,20	0,24
33+080	Norte	Placa de Concreto	29,30	28,16	0,14	0,14
50+600	Norte	Placa de Concreto	37,25	44,06	0,19	0,22

Tabela 33: Valores de IFI calculados para o levantamento do dia 22/04/2009

Estaca (km)	Pista	Tipo de revestimento	S_p		F_{60}	
			TRD	TRE	TRD	TRE
68+800	Sul	Microrrevestimento	24,75	20,21	0,11	0,09
65+500	Sul	Concreto Asfáltico	45,20	49,74	0,20	0,21
49+500	Sul	Concreto Asfáltico	24,75	23,62	0,12	0,10
41+400	Sul	Microrrevestimento	114,50	81,55	0,42	0,36
36+300	Sul	Concreto Asfáltico	62,24	78,14	0,23	0,28
27+660	Sul	Microrrevestimento	65,65	48,61	0,28	0,23
24+880	Norte	Placa de Concreto	37,25	42,93	0,19	0,23
33+080	Norte	Placa de Concreto	29,30	27,02	0,13	0,13
50+600	Norte	Placa de Concreto	37,25	45,20	0,19	0,22

Tabela 34: Valores de IFI calculados para o levantamento do dia 21/05/2009

Estaca (km)	Pista	Tipo de revestimento	S_p		F_{60}	
			TRD	TRE	TRD	TRE
68+800	Sul	Microrrevestimento	27,02	20,21	0,12	-
65+500	Sul	Concreto Asfáltico	42,93	49,74	0,19	-
49+500	Sul	Concreto Asfáltico	30,43	22,48	0,14	-
41+400	Sul	Microrrevestimento	114,50	82,69	0,37	-
36+300	Sul	Concreto Asfáltico	63,38	74,74	0,24	-
27+660	Sul	Microrrevestimento	64,51	45,20	0,27	-
24+880	Norte	Placa de Concreto	34,98	38,38	0,17	-
33+080	Norte	Placa de Concreto	-	-	-	-
50+600	Norte	Placa de Concreto	37,25	45,20	0,18	-

5 ANÁLISE DOS DADOS

A partir dos dados apresentados no Capítulo anterior, alcançaram-se os objetivos propostos nesta pesquisa, ou seja, avaliar a situação da rodovia BR-290/RS quanto à aderência pneu-pavimento; determinar um modelo linear relacionando os resultados dos ensaios de Mancha de Areia e de Drenabilidade; e, por fim, verificar as tendências de desempenho da BR-290/RS em termos de aderência pneu-pavimento.

5.1 AVALIAÇÃO DA ADERÊNCIA PNEU-PAVIMENTO

Para a análise dos pontos monitorados da rodovia BR-290/RS quanto à aderência pneu-pavimento foram usados os dados do levantamento realizado no dia 18 de dezembro de 2008 e no dia 22 de abril de 2009. A escolha por essas datas é justificável pelo fato de serem o primeiro e o último levantamento contendo os valores de textura de todos os pontos monitorados nas duas trilhas de roda, podendo, assim, comparar a situação da superfície dos pavimentos no início e no fim da pesquisa. A avaliação da aderência pneu-pavimento será através de três análises, a saber: avaliação da microtextura; avaliação da macrotextura e avaliação do IFI.

5.1.1 Avaliação quanto à microtextura

A avaliação da microtextura será em função dos valores de atrito medidos com o equipamento Pêndulo Britânico e expressos em termos de BPN. Os dados usados nesta avaliação estão na Tabela 15 e 18 do item 4.1. Nas Figuras 19 e 20, apresentam-se graficamente o comparativo entre as medidas de microtextura em cada ponto monitorado no início e no fim da pesquisa nas trilhas de roda direita (TRD) e esquerda (TRE), respectivamente.

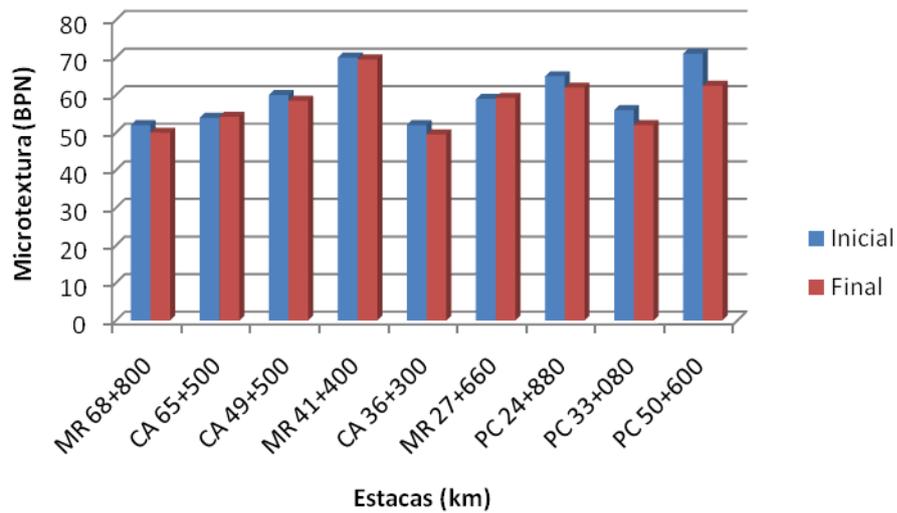


Figura 19: Comparação dos valores iniciais e finais de microtextura na TRD

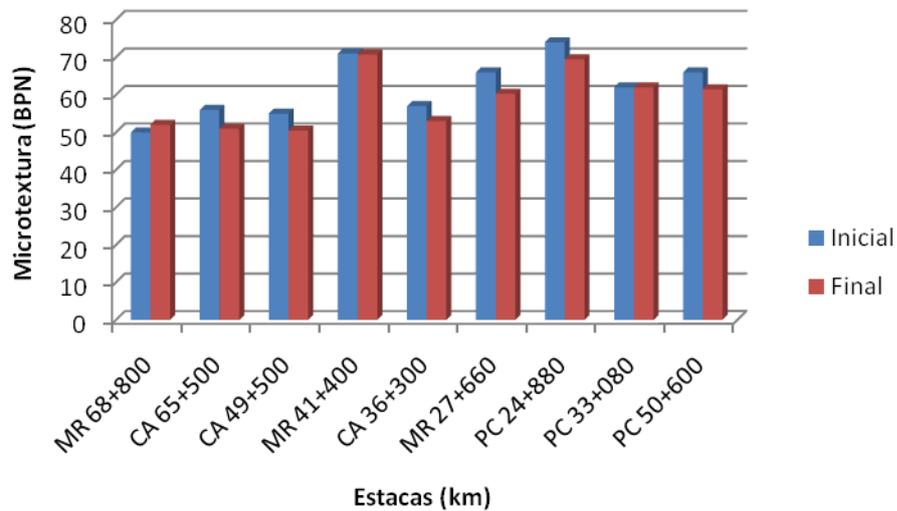


Figura 20: Comparação dos valores iniciais e finais de microtextura na TRE

Visando caracterizar as superfícies de distintos materiais, utilizaram-se os valores de microtextura contidos na Tabela 18. Para essa amostra de dados, determinaram-se a Média (\bar{x}) dos valores de BPN e o Desvio Padrão (σ) para cada tipo de superfície de rolamento, o mesmo foi feito para a amostra como um todo. Para verificar a homogeneidade da amostra, calculou-se o Coeficiente de Variação (C.V.), definido pela Equação 27.

$$C.V. = \frac{\sigma}{\bar{X}} \quad (27)$$

Na Tabela 35, constam as análises dos resultados para caracterização da microtextura dos pavimentos monitorados e a verificação quanto à homogeneidade das amostras.

Tabela 35: Análise das amostras de microtextura nos pontos monitorados

Tipo de revestimento	\bar{X} (BPN)	σ (BPN)	C.V. (%)	BPN _C
Microrrevestimento (MR)	60	9	14,3	51
Concreto Asfáltico (CA)	53	3	6,2	50
Placa de Concreto (PC)	62	6	9,1	56
Todos os Revestimentos	58	7	12,1	51

Como é possível perceber pelas informações contidas na Tabela 35, a variabilidade dos resultados de atrito é pequena, uma vez que C.V é inferior a 20%. Adotou-se como valor de atrito característico (BPN_C) para cada tipo de revestimento a diferença entre o valor da Média (\bar{x}) e o Desvio Padrão (σ), por ser a favor da segurança.

Surpreendeu o fato do pavimento revestido com Placas de Concreto de Cimento Portland (PC) apresentar, em média, melhores condições de atrito. Tal observação pode ser explicada pela técnica de texturização aplicada no sentido transversal da via, que melhora as condições de atrito na superfície do pavimento. Por outro lado, os revestimentos com Concreto Asfáltico (CA) apresentaram valores insuficientes de atrito, o que pode ser explicado pela suscetibilidade à exsudação que este tipo de revestimento está submetido nas condições climáticas da Região Sul do Brasil, especialmente quando se emprega ligante asfáltico convencional.

Para finalizar a análise da microtextura, adotou-se a classificação especificada no Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos (DNIT, 2006), conforme apresentado na Tabela 9 do Capítulo 3. Nos gráficos a seguir constam os resultados da classificação dos pontos monitorados quanto à microtextura do pavimento em dois instantes distintos da pesquisa, um

representando as condições da superfície numa situação mais inicial da pesquisa e outro apresentando a situação final da superfície.

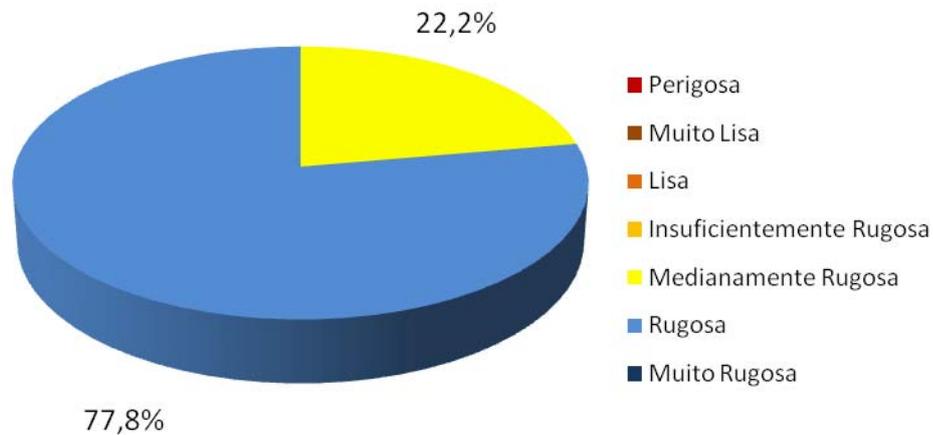


Figura 21: Classificação da microtextura nos pontos monitorados em 18/12/2008

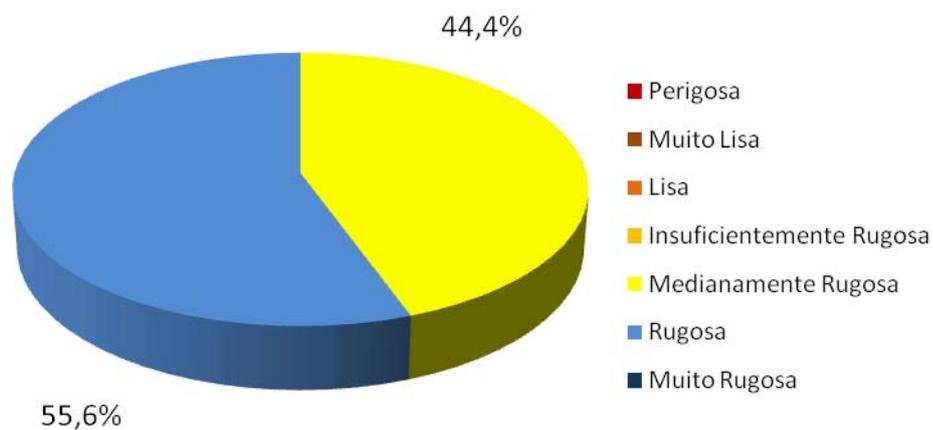


Figura 22: Classificação da microtextura nos pontos monitorados em 22/04/2009

Analisando as Figura 21 e 22, percebe-se que todos os pontos monitorados foram classificados como tendo a superfície do tipo medianamente rugosa ou rugosa. O percentual relativamente alto de pontos classificados como medianamente rugoso deve-se a idade dos pavimentos estudados, em geral, superior a dois anos.

5.1.2 Avaliação quanto à macrotextura

A avaliação da macrotextura será em função dos valores da altura média da mancha (HS) obtidos com o ensaio de Mancha de Areia e expressos em milímetros (mm). Os dados usados nesta avaliação estão na Tabela 22 e 25 do item 4.2. Nas Figuras a seguir apresentam-se graficamente as medidas de macrotextura em cada ponto monitorado em instantes distintos da pesquisa.

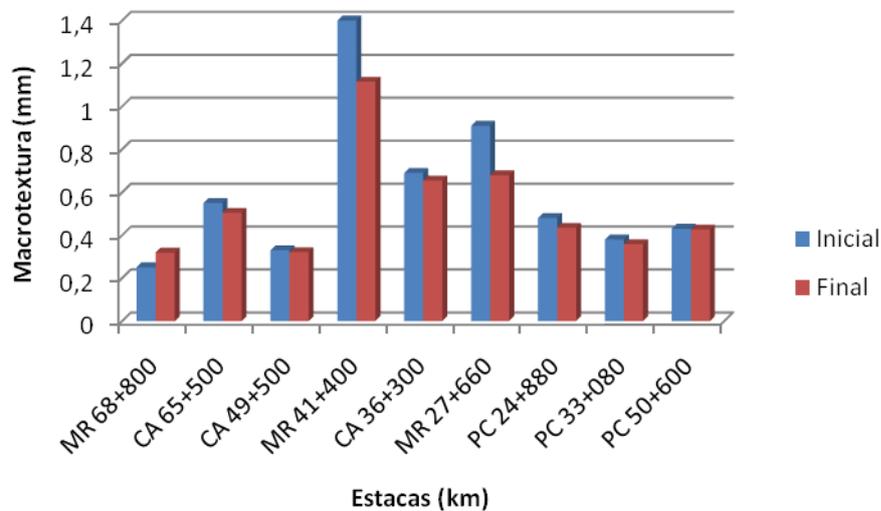


Figura 23: Comparação dos valores iniciais e finais de macrotextura na TRD

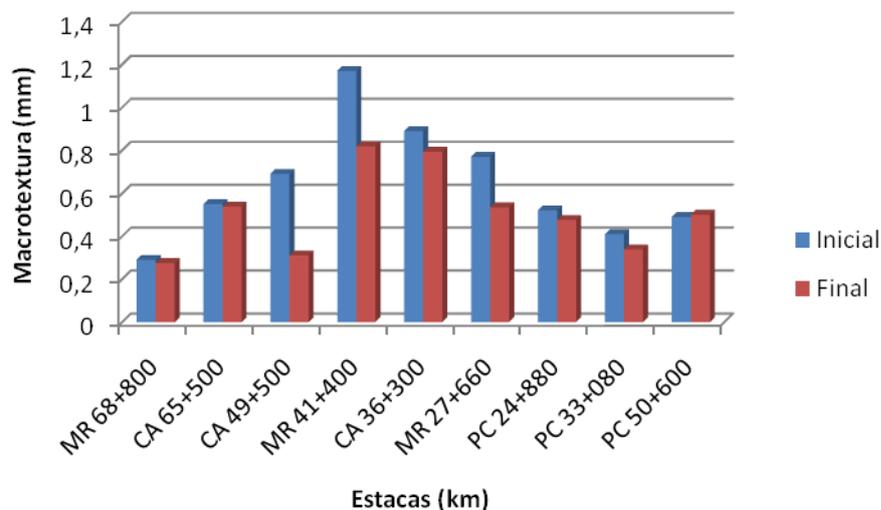


Figura 24: Comparação dos valores iniciais e finais de macrotextura na TRE

Para os dados contidos na Tabela 25, determinaram-se a Média (\bar{x}) dos valores de HS e o Desvio Padrão (σ) para cada tipo de superfície de rolamento, o mesmo foi feito para a amostra como um todo. Para verificar a homogeneidade da amostra, calculou-se o Coeficiente de Variação (C.V.), definido pela Equação 27. Na Tabela 36, constam as análises dos resultados para caracterização da macrotextura dos pavimentos monitorados e a verificação quanto à homogeneidade das amostras.

Tabela 36: Análise das amostras de macrotextura nos pontos monitorados

Tipo de revestimento	\bar{x} (mm)	σ (mm)	C.V. (%)	HS _C (mm)
Microrrevestimento (MR)	0,62	0,32	50,9	0,30
Concreto Asfáltico (CA)	0,52	0,19	36,2	0,33
Placa de Concreto (PC)	0,42	0,06	15,0	0,36
Todos os Revestimentos	0,52	0,22	42,1	0,30

Pelas informações contidas na Tabela 36, percebe-se que a variabilidade dos resultados de macrotextura é alta nos revestimentos do tipo Concreto Asfáltico (CA) e Microrrevestimento (MR), pois apresentaram C.V. superior a 20%, portanto, existe uma heterogeneidade desses materiais quanto à macrotextura da superfície do pavimento. Conforme o esperado, o Microrrevestimento (MR) apresentou, em média, os melhores resultados de macrotextura. Em contrapartida, os revestimentos com Placas de Concreto (PC) apresentaram, em média, os valores mais baixos de macrotextura, o que leva a concluir que a técnica de texturização influencia mais significativamente a microtextura da superfície.

Ainda quanto à macrotextura, classificaram-se os resultados segundo as especificações do Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos (DNIT, 2006), conforme apresentado na Tabela 10 do Capítulo 3. Nos gráficos a seguir constam os resultados da classificação dos pontos monitorados quanto à macrotextura do pavimento nos levantamentos realizados no dia 18 de dezembro de 2008 e no dia 22 de abril de 2009, respectivamente.

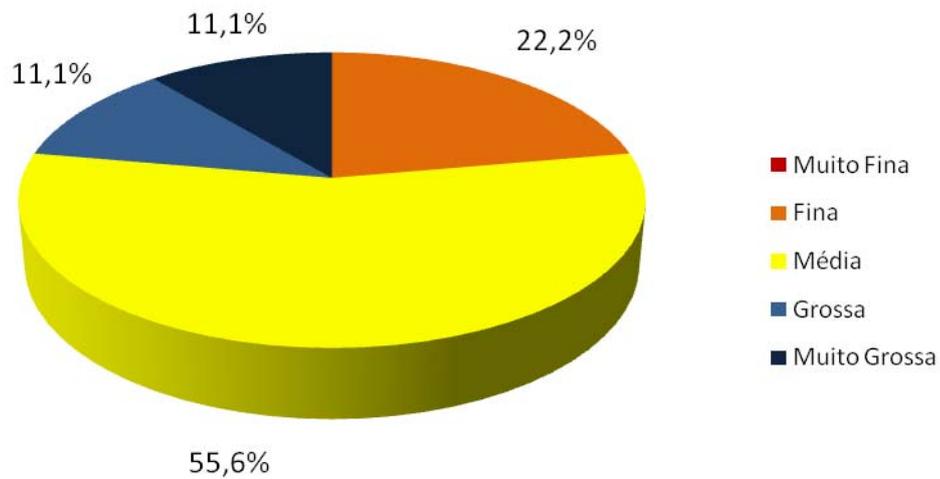


Figura 25: Classificação da macrotextura nos pontos monitorados em 18/12/2008

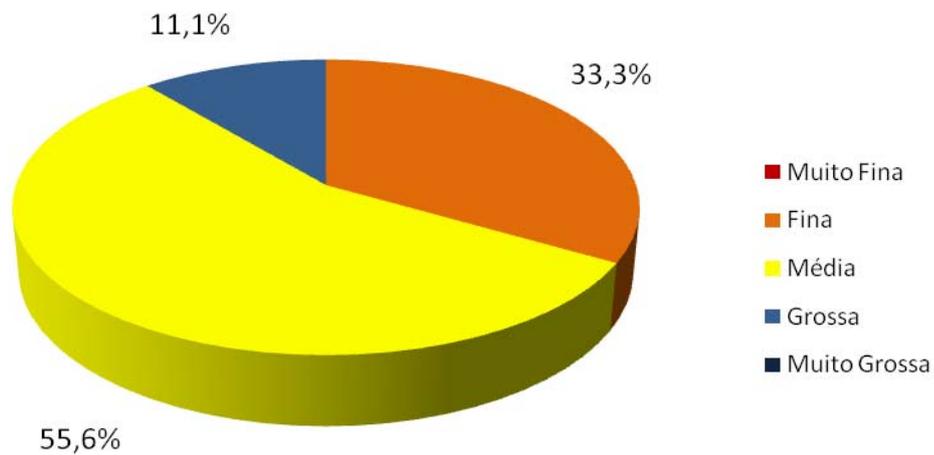


Figura 26: Classificação da macrotextura nos pontos monitorados em 22/04/2009

Analisando a Figura 26, percebe-se que a maior parte dos pontos monitorados foi classificada como apresentando a superfície com macrotextura média. Da mesma forma que para a microtextura, o elevado percentual de pontos classificados como médio deve-se aos pavimentos já terem sofrido grande número de solicitações de tráfego. Comparando as duas situações escolhidas, verificou-se que os locais com textura muito grossa enquadraram-se na faixa grossa durante a pesquisa.

5.1.3 Avaliação quanto ao IFI

A avaliação da aderência pneu-pavimento através do IFI foi estudada no âmbito nacional por Aps (2006), trabalho do qual originou a classificação das superfícies em função da variável F_{60} desse índice, variável que expressa a combinação do valor de microtextura com o de macrotextura.

Os dados usados para a avaliação do IFI foram os calculados com base no levantamento mais atualizado contendo os valores de textura nas duas trilhas de roda, ou seja, o levantamento do dia 22 de abril de 2009, que estão na Tabela 33 do item 4.4. Na Figura 27, apresentam-se graficamente as medidas de IFI (F_{60}) em cada ponto monitorado.

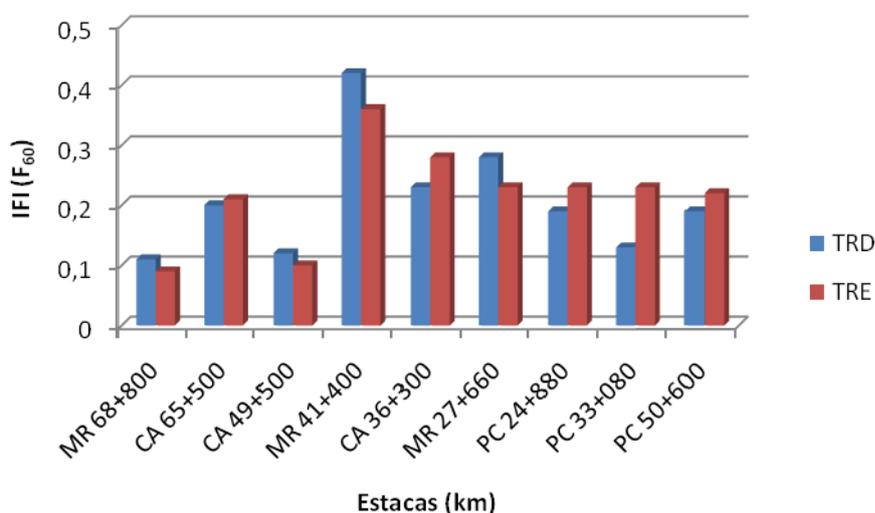


Figura 27: Valores de IFI nas trilhas de roda em cada ponto monitorado

Para essa amostra de dados, determinaram-se a Média (\bar{x}) dos valores de IFI (F_{60}) e o Desvio Padrão (σ) para cada tipo de superfície de rolamento, o mesmo foi feito para a amostra como um todo. Para verificar a homogeneidade da amostra, calculou-se o Coeficiente de Variação (C.V.). Na Tabela 37 constam as análises dos resultados para caracterização dos valores de IFI calculados para os pavimentos monitorados e a verificação quanto à homogeneidade das amostras.

Tabela 37: Análise das amostras de IFI nos pontos monitorados

Tipo de revestimento	\bar{x} (F_{60})	σ (F_{60})	C.V. (%)	F_{60c}
Microrrevestimento (MR)	0,25	0,13	53,3	0,12
Concreto Asfáltico (CA)	0,19	0,07	35,9	0,12
Placa de Concreto (PC)	0,20	0,04	19,2	0,16
Todos os Revestimentos	0,21	0,09	41,2	0,12

Pelas informações contidas na Tabela 37, percebe-se que a variabilidade dos resultados de IFI é alta nos revestimentos estudados nesta pesquisa, portanto, existe uma heterogeneidade desses materiais quanto ao IFI (F_{60}) da superfície do pavimento. O Microrrevestimento (MR) apresentou, na média, os melhores resultados de aderência em termos de IFI, enquanto que o Concreto Asfáltico (CA) apresentou o mais baixo.

Adotando-se a classificação proposta na 4ª Tentativa para classificação da aderência pneu-pavimento pelo índice combinado IFI (Aps, 2006), conforme apresentado na Tabela 8 do Capítulo 2, avaliou-se a condição da superfície nos pontos monitorados quanto a este índice. Vale destacar que a classificação adotada foi desenvolvida para revestimentos asfálticos, portanto, partiu-se do pressuposto que também é válida para pavimentos rígidos. No gráfico da Figura 28 constam os resultados da classificação dos pontos monitorados quanto à variável F_{60} do IFI.

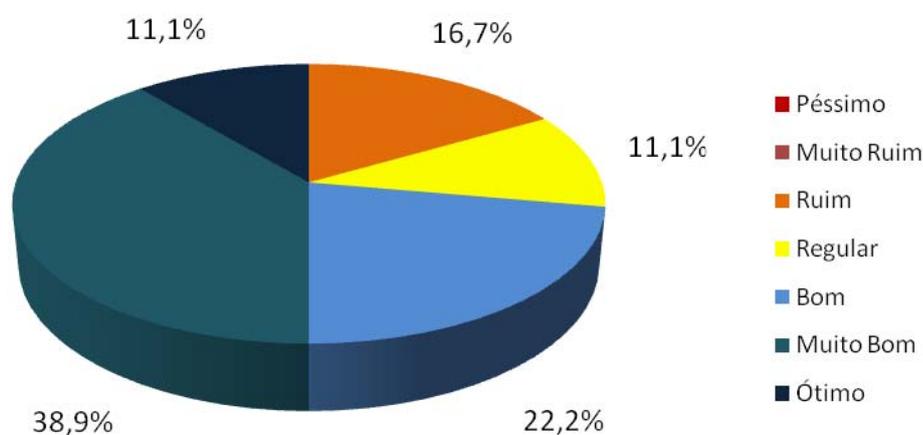


Figura 28: Classificação do IFI nos pontos monitorados

Analisando a Figura 28, percebe-se que a maior parte dos pontos monitorados apresentou IFI com classificação de bom a ótimo. Portanto, os pontos monitorados apresentam, em geral, boas condições de aderência quando se analisa a combinação das características de micro e macrotextura das superfícies.

Para finalizar a avaliação da aderência pneu-pavimento pelo índice combinado IFI, é de extrema importância avaliar as estratégias de intervenção para cada ponto estudado. Para tanto foram plotados os pares de valores do IFI (F_{60} ; S_p) para facilitar a escolha do nível de intervenção, conforme pode ser visto na Figura 29.

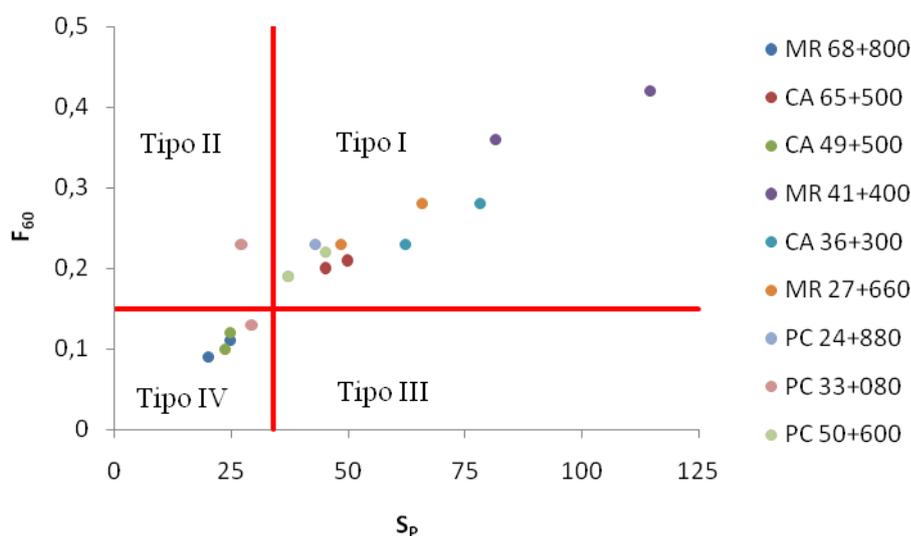


Figura 29: Tipo de intervenção recomendada com base no valor de IFI (adaptado de Aps, 2006)

Pela Figura 29, pode-se facilmente determinar o tipo de intervenção necessária com base nos valores de IFI para cada ponto. Sendo que os tipos de intervenção são os seguintes:

- **Tipo I:** não necessita de nenhuma intervenção na textura do pavimento;
- **Tipo II:** necessita de intervenções para melhorar a macrotextura do pavimento;
- **Tipo III:** necessita de intervenções para melhorar a microtextura do pavimento; e
- **Tipo IV:** necessita de intervenções para melhorar a micro e macrotextura do pavimento.

Dessa forma, constata-se graficamente que os pontos mais críticos estudados situam-se no km 49+500 e km 68+800, pois necessitam de intervenções tanto na microtextura quanto na macrotextura. Sendo que, considerando recomendações do DNIT (2006), o concreto asfáltico aplicado no km 49+500 já partiu com condições deficientes de macrotextura.

Dentre as melhorias que podem ser realizadas para reabilitar a textura da superfície de rolamento do pavimento destacam-se a aplicação de camada porosa de atrito (CPA), o microrrevestimento asfáltico (MR), o *grooving*, a fresagem fina e o jateamento de areia ou microesferas de aço (Ferreira, 2002; Amarante Júnior *et al.*, 2005).

5.2 ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DO ENSAIO DA MANCHA DE AREIA COM O ENSAIO DE DRENABILIDADE

Para a análise da relação entre os resultados obtidos com o ensaio de Mancha de Areia e com o de Drenabilidade, recorreu-se, além de dados levantados pelo próprio autor, a fontes bibliográficas nacionais para montar um amplo banco de dados. A partir desses dados, desenvolveu-se um modelo linear da macrotextura HS (mm) em função da drenabilidade expressa em vazão (l/s).

5.2.1 Modelo de previsão da macrotextura determinada com a Mancha de Areia em função da vazão obtida com o Drenômetro

Na análise de relação entre a macrotextura determinada com o ensaio de Mancha de Areia e a vazão obtida com o Drenômetro adotou-se como variável de drenabilidade a vazão (l/s) em detrimento do tempo. A justificativa para essa escolha é que a relação entre a macrotextura HS (mm) é diretamente proporcional à vazão (volume/tempo), o que não ocorre com a variável tempo. Portanto, como pretende-se usar a equação obtida pelo processo de regressão linear para calcular o IFI a partir dos resultados do ensaio de Drenabilidade, a variável vazão se mostra mais adequada para a previsão da macrotextura.

Inicialmente, analisou-se os dados incluindo os resultados de Ribeiro *et al.* (2008), que foram obtidos com o equipamento Drenômetro acoplado com um cronômetro. A incorporação do temporizador eletrônico possibilita a medição automática do tempo transcorrido para que o nível d'água passe entre dois elétrodos. Na Figura 30, pode-se observar a dispersão dos dados e o coeficiente de correlação entre as variáveis analisadas.

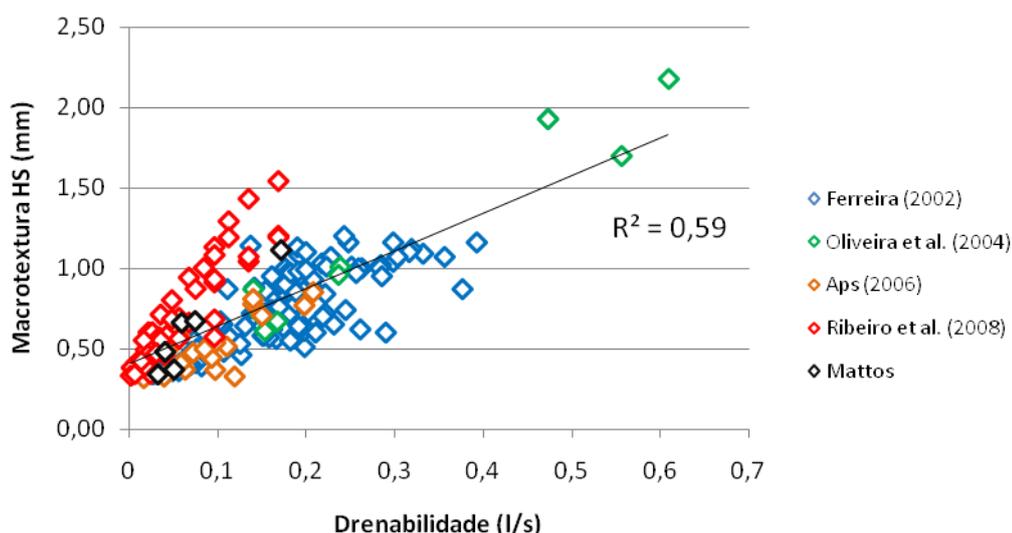


Figura 30: Correlação entre HS e Q considerando os dados obtidos com um cronômetro incorporado ao Drenômetro

Analisando a Figura 30, conclui-se que a correlação obtida entre os dados é relativamente boa. Entretanto, como era de se esperar, os valores de Ribeiro *et al.* (2008) apresentam, em geral, vazão levemente inferior aos dados obtidos quando o tempo é medido manualmente. Isso ocorre devido à interferência do operador ao acionar o cronômetro, resultando em tempos superiores aos obtidos quando o equipamento possui temporizador eletrônico.

Dessa forma, resolveu-se analisar os dados desconsiderando os valores obtidos com cronômetro incorporado ao Drenômetro, pois, assim, os dados ficam em mesmas condições quanto ao processo de medição do tempo. Na Figura 31, apresenta-se a correlação obtida considerando apenas os ensaios com medição manual do tempo, bem como a equação determinada através da análise de regressão linear.

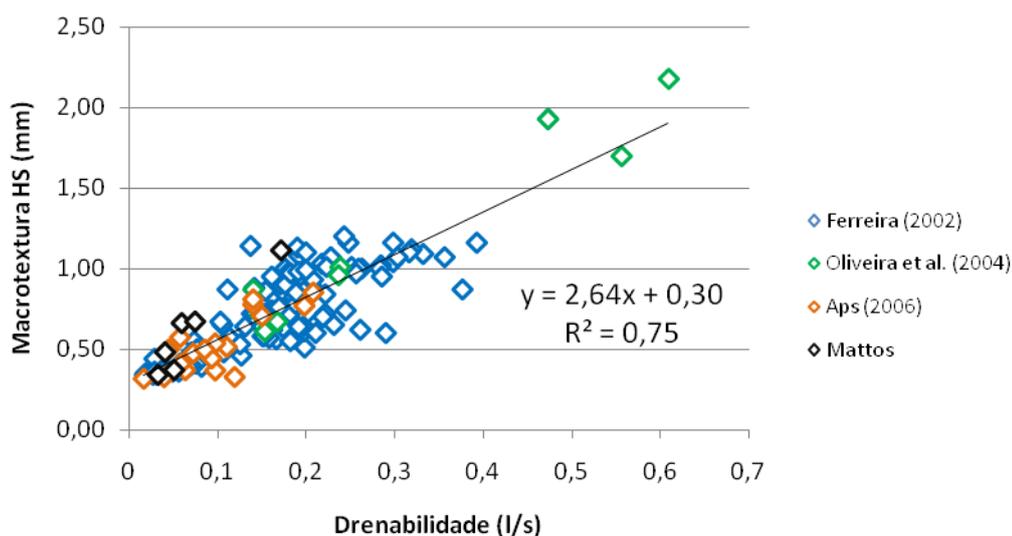


Figura 31: Correlação entre HS e Q considerando apenas os dados obtidos ao acionar manualmente o cronômetro no ensaio de Drenabilidade

Analisando a Figura 31, percebe-se que o modelo estatístico gerado apresenta um coeficiente de determinação R^2 de 0,75; representando uma forte relação entre os resultados do ensaio de Mancha de Areia e Drenabilidade. O modelo matemático que descreve a macrotextura HS (mm) em função da vazão Q (l/s) é expresso pela Equação 28.

$$HS = 0,30 + 2,64 \cdot Q \quad (28)$$

Onde:

HS = macrotextura obtida com o ensaio de Mancha de Areia (em mm);

Q = vazão obtida com o ensaio de Drenabilidade (em l/s).

Para verificar a validade estatística do modelo determinado, realizaram-se ainda análise dos resíduos quanto à normalidade e linearidade dos resíduos. Para tanto será utilizado o gráfico de dispersão de resíduos, que está apresentado no Apêndice A – ANÁLISES ESTATÍSTICAS, e através do teste F pela distribuição de Snedecor.

Como se pode observar no gráfico de resíduos, os mesmos se distribuem aleatoriamente acima e abaixo do eixo horizontal, pressupondo-se, portanto, que não ocorra autocorrelação

entre os dados. Pelo gráfico da plotagem de probabilidade normal no Apêndice A, pode-se considerar que a amostra é normalmente distribuída, já que se aproxima razoavelmente de uma reta crescente.

A linearidade do modelo foi avaliada através da distribuição de Snedecor, ou seja, pelo valor do teste F. O valor para o F calculado foi de 432,96, enquanto que o F tabelado é de 3,91 para nível de significância de 5%. Assim sendo o valor de F calculado é maior que o valor de F tabelado, por conseguinte, o modelo apresenta linearidade.

Na Tabela 38, apresenta-se o resumo da análise estatística para a regressão linear do modelo proposto. Os resultados completos da análise estatística podem ser conferidos no Apêndice A.

Tabela 38: Resumo da análise estatística para a regressão macrotextura x vazão

Parâmetro Estatístico	Valor
R^2	0,75
MQ	10,18
F calculado	423,96
F tabelado	3,91

5.2.2 Proposta para o cálculo do IFI através de valores obtidos com o ensaio de Drenabilidade

Sabendo que o cálculo do IFI necessita do par de valores de micro e macrotextura das superfícies de rolamento do pavimento – sendo a medida de macrotextura representa por TX e a microtextura (ou atrito) por FRS – considerando a boa relação entre os valores de macrotextura e drenabilidade, pretende-se propor que o IFI seja calculado, alternativamente, empregando o ensaio com Drenômetro.

Conforme visto na Tabela 6 do Capítulo 2, o procedimento de cálculo do IFI estabelecido na norma ASTM E-1960 (2001) prevê a determinação do parâmetro S_p apenas com os resultados dos ensaios de Perfilômetro Laser e Mancha de Areia. No entanto, com a análise realizada no

subitem 5.2.1 desta pesquisa, substituindo-se a Equação 28, que expressa o modelo desenvolvido com base na literatura nacional, na Equação 16 para determinação do parâmetro S_p e adotando os valores dos coeficientes a e b para o ensaio de Mancha de Areia é possível obter coeficientes que viabilizem o emprego do ensaio de Drenabilidade para estimativa do parâmetro S_p .

Portanto, aplicando-se o raciocínio acima, obteve-se os valores dos coeficientes a e b de modo a permitir o cálculo de S_p com os resultados da vazão (l/s) obtida no ensaio de Drenabilidade. Tais coeficientes podem ser observados na Tabela 39.

Tabela 39: Coeficientes a e b para cálculo de S_p com Drenômetro

Ensaio de Drenabilidade	Coeficiente	
	A	b
Q (l/s)	22,5	299,9

5.3 MONITORAÇÃO DA ADERÊNCIA PNEU-PAVIMENTO

Antes de determinar as linhas de tendência para o desempenho dos pavimentos estudados na BR-290/RS quanto à aderência pneu-pavimento, faz-se necessário verificar como foi o comportamento de cada ponto durante o período de monitoração. Dessa forma, é possível determinar se os diferentes tipos de pavimentos apresentaram desempenhos semelhantes ou não.

5.3.1 Acompanhamento da variação da textura em função do tempo

O acompanhamento da variação da textura das superfícies monitoradas nesta pesquisa foi feito através do tempo porque, infelizmente, não foi possível obter valores satisfatórios sobre o tráfego de veículos. Assim sendo, as análises de desempenho dos nove pontos avaliados serão em função do período de monitoração.

5.3.1.1 Variação da microtextura

A fim de verificar o comportamento da microtextura com o passar do tempo plotou-se os valores de BPN para cada levantamento realizado em função do tempo transcorrido a partir do primeiro levantamento de dados. Para que a equação ajustada através da regressão linear não apresentasse coeficientes muito baixos adotou-se a variável tempo em meses.

Na sequência, apresenta-se o comportamento de microtextura em cada um dos pontos monitorados, tanto na TRD quanto na TRE. Vale salientar que não serão realizadas análises estatísticas para os pontos individualmente, pois pretende-se desenvolver linhas de tendências válidas para todos os pontos analisados. Entretanto, serão feitos comentários pertinentes para os pontos que apresentarem um comportamento que chame atenção.

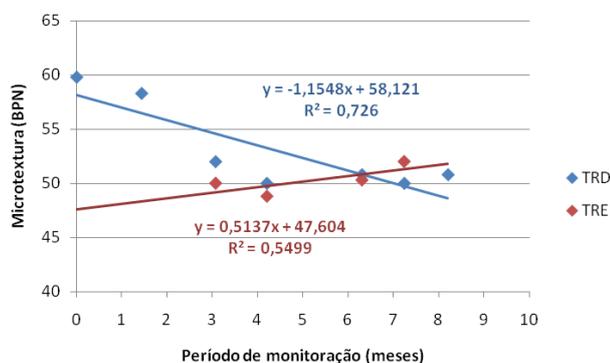


Figura 32: Comportamento da microtextura no MR do km 68+800

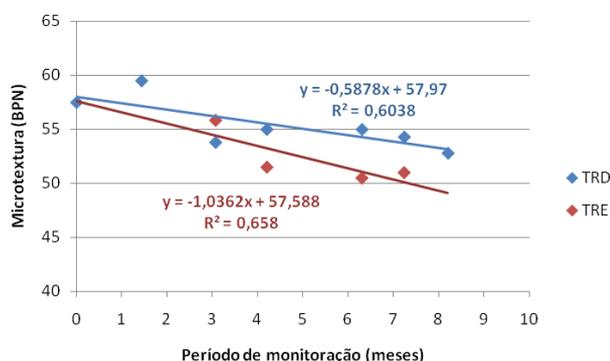


Figura 33: Comportamento da microtextura no CA do km 65+500

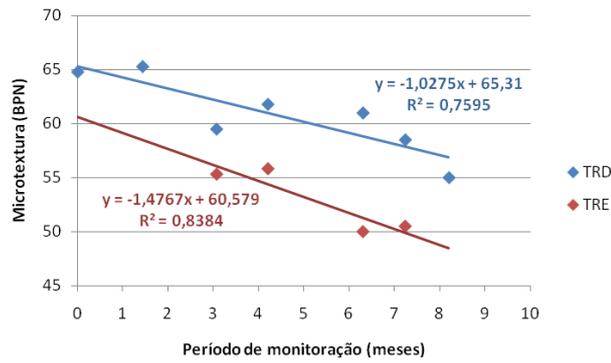


Figura 34: Comportamento da microtextura no CA do km 49+500

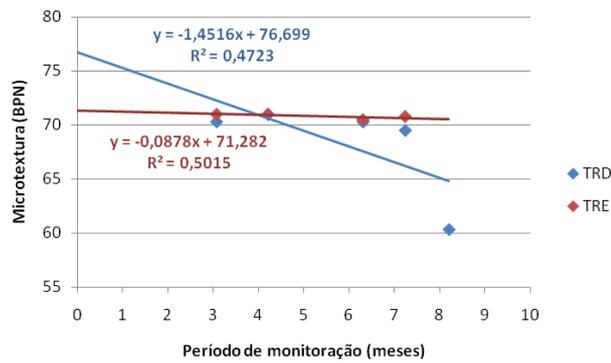


Figura 35: Comportamento da microtextura no MR do km 41+400

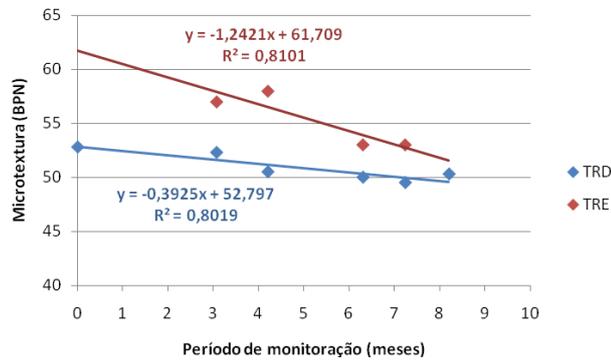


Figura 36: Comportamento da microtextura no CA do km 36+300

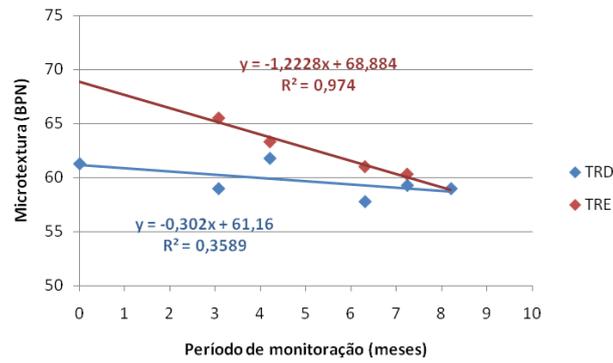


Figura 37: Comportamento da microtextura no MR do km 27+660

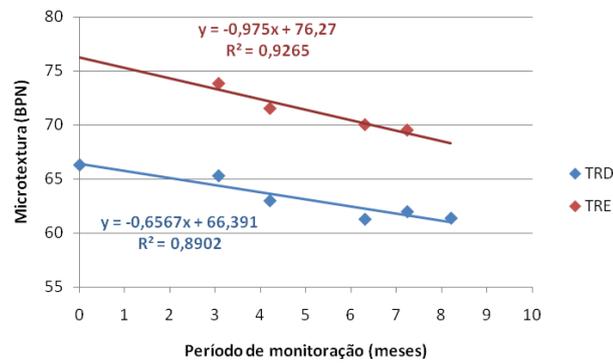


Figura 38: Comportamento da microtextura na PC do km 24+880

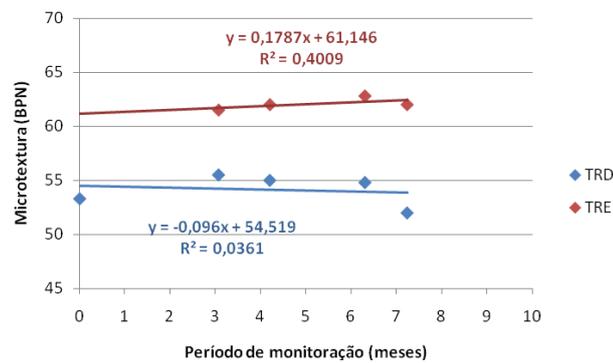


Figura 39: Comportamento da microtextura na PC do km 33+080

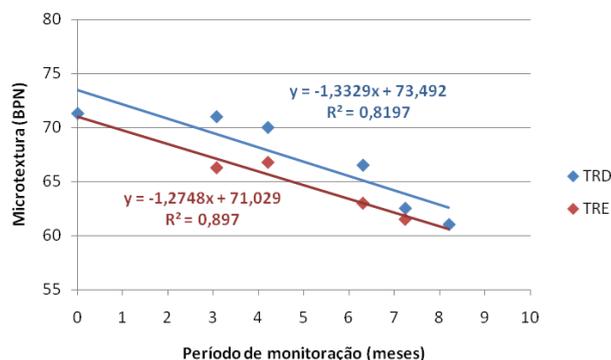


Figura 40: Comportamento da microtextura na PC do km 50+600

Conforme pode ser visto nas Figuras de 32 a 40, em geral, o comportamento da microtextura foi de redução, exceto nos km 68+800 e 33+080, ambos na trilha esquerda (TER). Devido ao aumento do valor de BPN ter sido de pequena proporção nesses pontos, atribui-se que essa variação seja decorrente da imprecisão do equipamento Pêndulo Britânico. Dessa forma, nenhum dos dados será excluído para a elaboração da linha de tendência de desempenho quanto à microtextura.

5.3.1.2 Variação da macrotextura

Para verificação do comportamento da macrotextura com o passar do tempo foram plotados os valores de HS para cada levantamento realizado em função do tempo transcorrido a partir do primeiro levantamento de dados. Adotou-se o tempo em meses para fins de ajuste da curva de regressão. Nas figuras a seguir pode ser visto o comportamento de macrotextura em cada um dos pontos monitorados, tanto na TRD quanto na TRE.

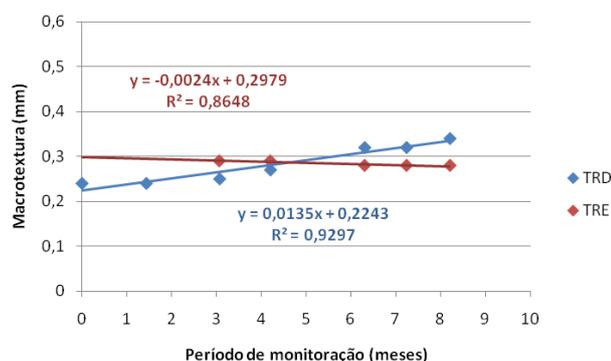


Figura 41: Comportamento da macrotextura no MR do km 68+800

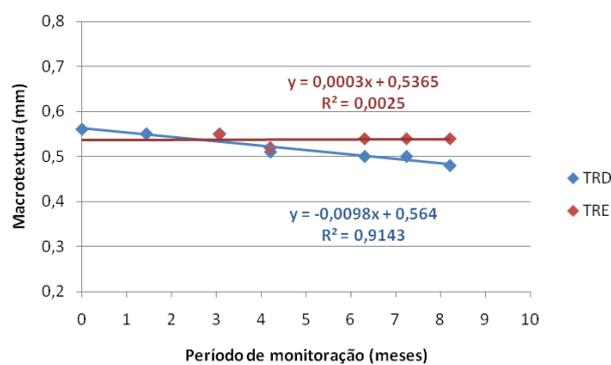


Figura 42: Comportamento da macrotextura no CA do km 65+500

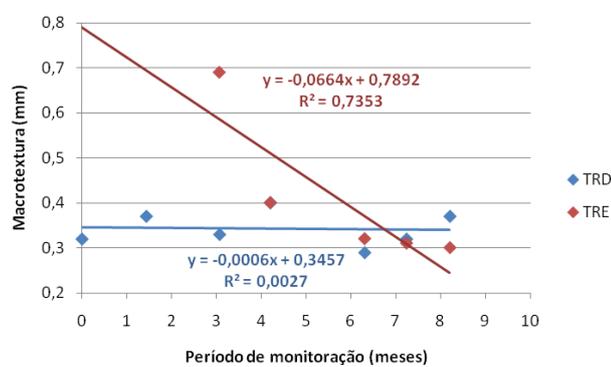


Figura 43: Comportamento da macrotextura no CA do km 49+500

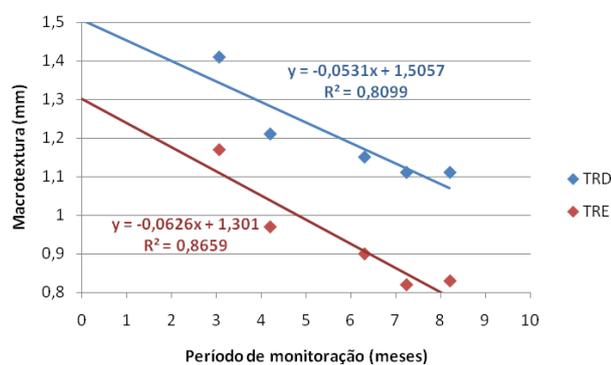


Figura 44: Comportamento da macrotextura no MR do km 41+400

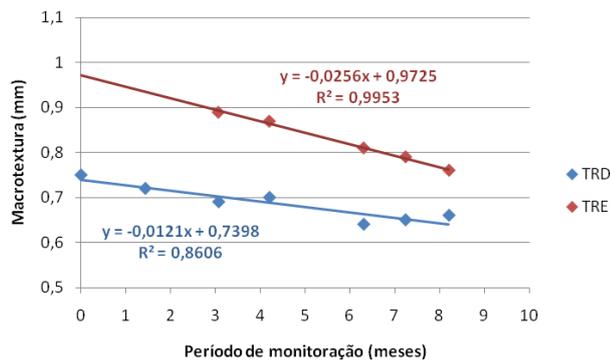


Figura 45: Comportamento da macrotextura no CA do km 36+300

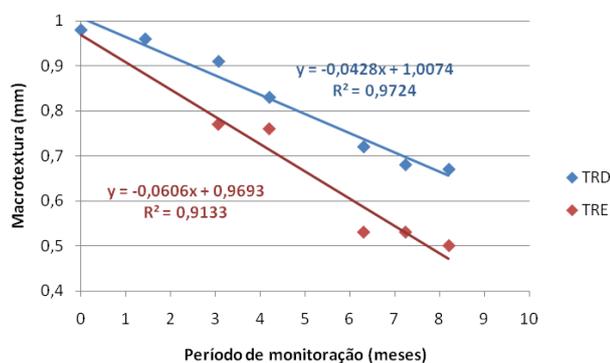


Figura 46: Comportamento da macrotextura no MR do km 27+660

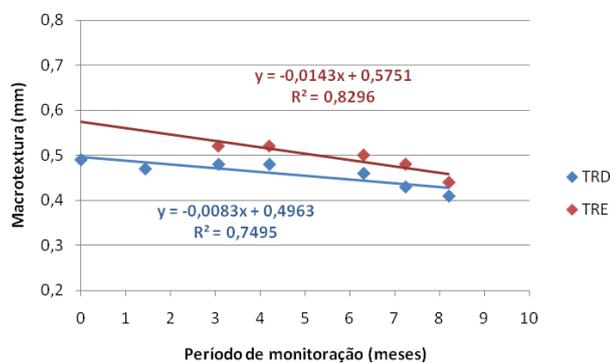


Figura 47: Comportamento da macrotextura na PC do km 24+880

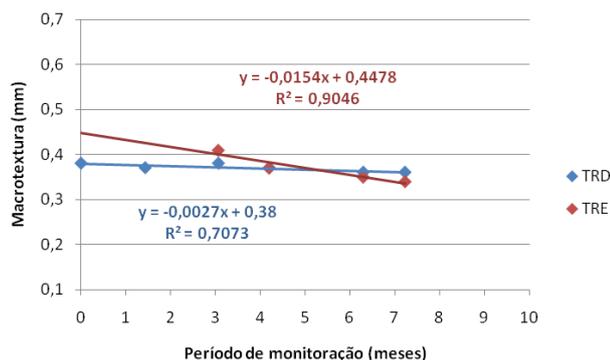


Figura 48: Comportamento da macrotextura na PC do km 33+080

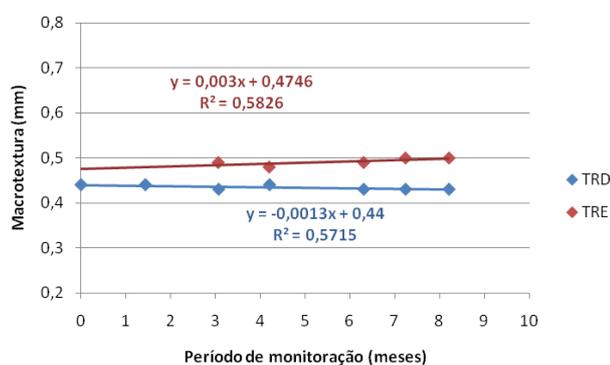


Figura 49: Comportamento da macrotextura na PC do km 50+600

Conforme pode ser visto nas Figuras de 41 a 49, em geral, o comportamento da macrotextura foi de redução com o passar do tempo. Nos locais onde as linhas de tendências apresentaram um comportamento crescente da macrotextura percebe-se que o crescimento é muito pequeno, caracterizando assim que, possivelmente, não ocorreu variação e esse leve crescimento é decorrente de erros experimentais, exceto no microrrevestimento (MR) do km 68+800. Analisando o local desse ponto percebe-se que existem grandes afundamentos na trilha de roda, então atribuiu-se o pseudo-aumento às deformações permanentes do pavimento. Portanto, como atribuiu-se a variação na TRD do km 68+800 devido ao fenômeno de deformações plásticas, esses valores não foram utilizados para elaborar a linha de tendência de macrotextura para a BR-290/RS.

5.4 TENDÊNCIAS DE DESEMPENHO PARA A ADERÊNCIA PNEU-PAVIMENTO

A partir dos dados levantados de textura dos pavimentos utilizando equipamentos portáteis de medição e com o acompanhamento da evolução desses valores por aproximadamente um ano, determinou-se linhas de tendências que explicam o comportamento geral das superfícies estudadas quanto à micro e macrotextura.

5.4.1 Tendência de desempenho para a microtextura

Analisando o banco de dados formado pelos valores de microtextura (expressa em BPN) foi possível desenvolver linhas de tendências para prever os valores de BPN para curtos intervalos de tempo (inferior a um ano). Como a pesquisa monitorou valores em pavimentos flexíveis (MR e CA) e rígidos (PC), achou-se conveniente analisar esses dados em separado. O motivo do distinto comportamento, tanto em termos mecânicos como funcionais, desses dois tipos de pavimentos já seria suficiente para tal abordagem em separado, porém, o fato que reforça essa idéia é que os pavimentos rígidos estudados apresentam idades mais elevadas que os flexíveis, em muitos casos, mais que o dobro da idade.

Inicialmente, idealizou-se um modelo que estimasse a variação do valor de BPN em função da variação do tempo (meses), conforme a Equação 29. Desse modo, apenas com uma manipulação matemática o modelo apresentaria o valor de BPN_{Final} sem alteração quando a variação do tempo fosse nula.

$$BPN_{Final} - BPN_{Inicial} = a \cdot \Delta T \quad (29)$$

Onde:

BPN_{Final} = previsão do atrito após determinado tempo;

$BPN_{Inicial}$ = valor do atrito medido;

a = coeficiente de ajuste; e

ΔT = intervalo de tempo (em meses) entre duas medições do valor de atrito.

Entretanto, o modelo considerado ideal mostrou-se fraco para explicar a variação de microtextura (BPN) através da regressão linear dos dados. Então, partiu-se para um modelo que desse maior liberdade nos coeficientes de ajuste linear. Assim sendo, optou-se por um modelo de regressão linear múltipla adotando como variáveis independentes o valor inicial de BPN e a variação de tempo.

5.4.1.1 Modelo para estimativa da microtextura em pavimentos flexíveis

O modelo desenvolvido para a estimativa da microtextura dos pavimentos flexíveis da rodovia BR-290/RS está expresso na Equação 30. A regressão linear desse modelo apresentou R^2 de 0,82, o que demonstra que a variável dependente é bem explicada pelas variáveis independentes adotadas. O modelo proposto além de apresentar um coeficiente de determinação satisfatório, não apresenta resíduos com padrão de variação em função da variável independente (conforme pode ser visto no Apêndice A).

$$\text{BPN}_{\text{Final}} = 2,67 + 0,95 \cdot \text{BPN}_{\text{Inicial}} - 0,70 \cdot \Delta T \quad (30)$$

Onde:

$\text{BPN}_{\text{Final}}$ = previsão do atrito após determinado tempo;

$\text{BPN}_{\text{Inicial}}$ = valor do atrito medido; e

ΔT = intervalo de tempo (em meses).

Para verificar a validade estatística do modelo de estimativa da microtextura para pavimentos flexíveis, adotou-se a distribuição de Snedecor (teste F). A qual estipula que, para validade da linearidade do modelo, o valor de F calculado seja maior que o F tabelado. O nível de significância adotado foi de 5%. Na Tabela 40, apresenta-se o resumo da análise estatística do modelo apresentado.

Tabela 40: Resumo estatístico do modelo de microtextura para pavimentos flexíveis

Parâmetro Estatístico	Valor
R^2	0,82
Erro padrão	2,86
F calculado	109,39
F tabelado	3,18

Outro aspecto que corrobora a validade do modelo é que, segundo a Equação 30, um acréscimo do valor inicial de BPN gera um acréscimo no valor previsto e um acréscimo de tempo gera uma redução no valor previsto, assim sendo é um modelo coerente. Desta forma, após realizar as análises estatísticas, pode-se considerar o modelo proposto para estimativa da microtextura em função do valor inicial de BPN e do tempo como sendo um modelo válido.

5.4.1.2 Modelo para estimativa da microtextura em pavimentos rígidos

O modelo desenvolvido para a estimativa da microtextura dos pavimentos rígidos da rodovia BR-290/RS está expresso na Equação 31. A regressão linear desse modelo apresentou R^2 de 0,92, o que demonstra que a variável dependente é bem explicada pelas variáveis independentes adotadas. O modelo proposto além de apresentar um coeficiente de determinação satisfatório, não apresenta resíduos com padrão de variação em função da variável independente, ou seja, os resíduos estão distribuídos aleatoriamente acima e abaixo do eixo das variáveis independentes (conforme pode ser visto no Apêndice A).

$$BPN_{Final} = 23,08 + 0,68 \cdot BPN_{Inicial} - 0,95 \cdot \Delta T \quad (31)$$

Onde:

BPN_{Final} = previsão do atrito após determinado tempo;

$BPN_{Inicial}$ = valor do atrito medido; e

ΔT = intervalo de tempo (em meses).

Para verificar a validade estatística do modelo de estimativa da microtextura para pavimentos rígidos, recorreu-se novamente a distribuição de Snedecor (teste F). Na Tabela 41, apresenta-se o resumo da análise estatística para o modelo apresentado.

Tabela 41: Resumo estatístico do modelo de microtextura para pavimentos rígidos

Parâmetro Estatístico	Valor
R^2	0,92
Erro padrão	1,55
F calculado	121,08
F tabelado	3,49

Da mesma forma que o modelo anterior, verificou-se que o modelo apresentado na Equação 31 é coerente e válido estatisticamente.

5.4.2 Tendência de desempenho para a macrotextura

Analisando o banco de dados formado pelos valores de macrotextura obtidos com a altura da mancha HS (em mm) foi possível desenvolver linhas de tendências para prever os valores de HS para curtos intervalos de tempo (inferior a um ano). Do mesmo modo que para os modelos de microtextura, optou-se por analisar os valores de altura média da mancha de areia (HS), que representam a macrotextura da superfície, obtidos para os pavimentos flexíveis (MR e CA) e rígidos (PC) em separado.

Buscou-se um modelo para estimativa da macrotextura semelhante ao da microtextura. Então, o modelo proposto para a regressão linear múltipla adotado teve como variáveis independentes o valor inicial de HS (mm) e a variação do tempo (meses).

5.4.2.1 Modelo para estimativa da macrotextura em pavimentos flexíveis

O modelo desenvolvido para a estimativa da macrotextura dos pavimentos flexíveis da rodovia BR-290/RS está expresso na Equação 32. A regressão linear desse modelo apresentou R^2 de 0,87, o que demonstra que a variável dependente é bem explicada pelas variáveis independentes adotadas. O modelo proposto além de apresentar um coeficiente de determinação satisfatório, não apresenta resíduos com padrão de variação em função das variáveis independentes (conforme pode ser visto no Apêndice A).

$$HS_{\text{Final}} = 0,14 + 0,70 \cdot HS_{\text{Inicial}} - 0,008 \cdot \Delta T \quad (32)$$

Onde:

HS_{Final} = previsão da macrotextura (em mm) após determinado tempo;

HS_{Inicial} = valor da macrotextura medida; e

ΔT = intervalo de tempo (em meses).

Para verificar a validade estatística do modelo de estimativa da macrotextura para pavimentos rígidos, adotou-se novamente a distribuição de Snedecor (teste F) com o nível de significância adotado sendo de 5%. A qual estipula que, para validade da linearidade do modelo, o valor de F calculado seja maior que o F tabelado. Na Tabela 42, apresenta-se o resumo da análise estatística do modelo apresentado.

Tabela 42: Resumo estatístico do modelo de macrotextura para pavimentos flexíveis

Parâmetro Estatístico	Valor
R^2	0,86
Erro padrão	0,10
F calculado	177,93
F tabelado	3,17

Como pode ser visto na Equação 32, o modelo apresentado é coerente, pois um acréscimo do valor inicial de HS gera um acréscimo no valor previsto e um acréscimo de tempo gera uma redução no valor previsto de HS. Portanto, após realizar as análises estatísticas, pode-se considerar o modelo proposto para estimativa da macrotextura em função do valor inicial de HS e do tempo como sendo um modelo válido.

5.4.2.2 Modelo para estimativa da macrotextura em pavimentos rígidos

O modelo desenvolvido para a estimativa da macrotextura dos pavimentos rígidos da rodovia BR-290/RS está expresso na Equação 33. A regressão linear desse modelo apresentou R^2 de 0,78, o que demonstra que a variável dependente é bem explicada pelas variáveis independentes adotadas. O modelo proposto além de apresentar um coeficiente de determinação satisfatório, não apresenta resíduos com padrão de variação em função das variáveis independentes (conforme pode ser visto no Apêndice A).

$$HS_{\text{Final}} = 0,02 + 0,95 \cdot HS_{\text{Inicial}} - 0,003 \cdot \Delta T \quad (33)$$

Onde:

HS_{Final} = previsão da macrotextura (em mm) após determinado tempo;

HS_{Inicial} = valor da macrotextura medida; e

ΔT = intervalo de tempo (em meses).

Para verificar a validade estatística do modelo de estimativa da macrotextura para pavimentos rígidos, recorreu-se de novo à distribuição de Snedecor (teste F). Na Tabela 43, apresenta-se o resumo da análise estatística para o modelo apresentado.

Tabela 43: Resumo estatístico do modelo de macrotextura para pavimentos rígidos

Parâmetro Estatístico	Valor
R^2	0,78
Erro padrão	0,03
F calculado	45,18
F tabelado	3,39

Da mesma forma que o modelo anterior de macrotextura, verificou-se que o modelo apresentado na Equação 33 é coerente e válido estatisticamente.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pesquisa relatada nesta dissertação teve como objetivo principal verificar algumas peculiaridades da segurança viária envolvendo a questão da aderência pneu-pavimento. A partir das análises realizadas chegou-se a algumas conclusões, que serão apresentadas neste capítulo; incorporando-se, também, aspectos a serem considerados em pesquisas futuras.

6.1 CONCLUSÕES

Após atingir os objetivos propostos inicialmente por esta pesquisa pode-se concluir que:

- A avaliação periódica da aderência pneu-pavimento deve ser adotada pelos gestores das vias no Sistema de Gerência de Pavimentos (SGP) como uma medida de prevenção e redução de acidentes, pois a identificação antecipada de pontos que apresentam desgaste ou polimento acelerado da textura superficial do pavimento permite adotar atividades de manutenção preventiva;
- Ao realizar a caracterização dos valores médios de textura para cada um dos revestimentos estudados nesta pesquisa, concluiu-se que a técnica de texturização resulta em melhorias mais perceptíveis na microtextura. Dessa forma, os pavimentos com Placas de Concreto de Cimento Portland apresentaram, em média, os melhores valores de microtextura, enquanto que os Microrrevestimentos Asfálticos apresentaram, em média, melhores valores de macrotextura.
- A aderência pneu-pavimento nos pontos monitorados da Rodovia BR-290/RS mostrou-se satisfatória. As superfícies estudadas nesta pesquisa foram classificadas como apresentando microtextura do tipo medianamente rugosa ou rugosa e macrotextura do tipo média na maior parte dos pontos;
- Usando o IFI e a classificação proposta por Aps (2006), percebeu-se que a maioria dos pontos monitorados foi classificada como apresentando boa a ótima condição de textura superficial. Ainda pelo IFI identificou-se que os pontos mais críticos quanto à

aderência pneu-pavimento são os km 68+800 e km 49+500, para os quais se recomenda uma intervenção para melhorar a micro e macrotextura superficial do pavimento.

- Embora se recomende adotar o índice combinado IFI para a gerência da malha viária, deve-se ainda avaliar a superfície do pavimento em termos de micro e macrotextura. Às vezes, a falha em uma das texturas é encoberta pelo elevado valor da outra.
- Ao elaborar um modelo de correlação para os resultados dos ensaios de Mancha de Areia e de Drenabilidade, tentou-se utilizar valores obtidos com um cronômetro acoplado ao Drenômetro. Entretanto, foi possível observar graficamente que a interferência do operador ao acionar o cronômetro influencia nos resultados. Dessa forma, utilizaram-se apenas os resultados dos ensaios de Drenabilidade obtidos com acionamento manual do cronômetro.
- O Modelo proposto para relacionar os resultados do Ensaio de Mancha de Areia com a Drenabilidade possibilita a estimativa do IFI com boa precisão e pode ser adotado em rodovias brasileiras.
- Analisando o comportamento da textura ao longo do tempo observou-se que, embora o relativamente pequeno período de monitoração, ocorreram variações significativas tanto nos valores da microtextura quanto da macrotextura. Apesar da oscilação dos resultados obtidos com os equipamentos de Pêndulo Britânico e Mancha de Areia a tendência é, nitidamente, de redução desses valores com o passar do tempo (e com o tráfego decorrente).
- Os modelos propostos nesta pesquisa para estimativa da textura em pequenos intervalos de tempo (meses) na rodovia BR-290/RS são considerados confiáveis e podem ser utilizados na gerência da via.

6.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Dentro do escopo desta pesquisa, ainda existem diversos temas que podem ser abordados em novas pesquisas. Dessa forma, como complementos desta linha de pesquisa são sugeridos os seguintes aspectos:

- Realizar monitoração durante um intervalo maior de tempo e em diversas rodovias, de modo a desenvolver um modelo mais abrangente de previsão de desempenho para a textura superficial do pavimento;
- Aplicar o modelo proposto de correlação entre os ensaios de Mancha de Areia e Drenabilidade em rodovias do Norte e Nordeste do Brasil, pois o mesmo foi desenvolvido com dados apenas de rodovias dos Estados de São Paulo, Santa Catarina e Rio Grande do Sul;
- Verificar se em rodovias com volume de tráfego mais baixo que o trecho Osório-Porto Alegre também é possível observar variações significativas da micro e macrotextura em curtos períodos de tempo;
- Verificar se existe variação da textura devido a aspectos climáticos e, se for o caso, elaborar linhas de tendências que englobem esse aspecto;
- Ajustar os modelos propostos para estimativa da textura superficial para rodovias semelhantes a BR-290/RS.

REFERÊNCIAS

ALVES, T. S. F. **Metodologias de auscultação de pavimentos rodoviários**: aplicação prática do radar de prospecção e do deflectómetro de impacto. 2007. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Pt, 2007.

AMARANTE JÚNIOR, F. G. do; SOUZA, F. S. V. de; SANT'ANNA, F. M. G.; OLIVEIRA, P. C. A. de. Fresagem fina como medida de melhoramento da segurança da Rodovia Presidente Dutra no trecho da Serra das Araras. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 36., 2005, Curitiba. **Anais...** Curitiba: ABPv, 2005. CD-ROM.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E 1960-98**: standard practice for calculating International Friction Index of a pavement surface. West Conshohocken, US: ASTM, 1998. 5 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E 2380-05**: standard test method for measuring pavement texture drainage using an Outflow Meter. West Conshohocken, US: ASTM, 2005. 4 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E 303-93 (reapproved 1998)**: standard test method for measuring surface frictional properties using the British pendulum tester. West Conshohocken, US: ASTM, 1998. 5 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E 867-97**: terminology relating to vehicle-pavement system. West Conshohocken, US: ASTM, 1997. 8 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E 965-96 (reapproved 2001)**: standard test method for measuring pavement macrotexture depth using a volumetric technique. West Conshohocken, US: ASTM, 2001. 3 p.

APS, M. **Classificação da aderência pneu-pavimento pelo índice combinado IFI – *International Friction Index* para revestimentos asfálticos**. 2006. 179 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

BARELLA, R. M.; MASSARA FILHO, S. O.; BALBO, J. T. A determinação do resultado do ensaio de Mancha de Areia a partir de um medidor laser de alta frequência. In: CONGRESSO DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES, 1., 2007, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ANDIT, 2007. Ref. 01-64R. CD-ROM.

CAMPOS, R. L.; DANIEL, C. W.; GALEA, C. A. Estudio de fricción en pavimentos (avance). In: CONGRESSO INTERNACIONAL PROVIAL, 6., 2002, Termas de Chillán. **Anais eletrônicos...** Termas de Chillán, Chile: 2002. Disponível em: <<http://www2.udec.cl/~provial/trabajos.htm>>. Acesso em: 17 jan. 2009.

CARMONA, J. C. C. Índice de seguridad vial. **Revista EAFIT**, Medellin, n. 127, p. 73-81, jul./ago./sept. 2002.

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Normas de projetos rodoviários**. DAER /RS. Porto Alegre: V. 1, 1991. 173 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de restauração de pavimentos asfálticos**. DNIT. Rio de Janeiro: IPR, 2006. 310 p.

DOTY, R. N. **A study of the Sand Patch and Outflow Meter methods of pavement surface texture measurement**. Symposium on Surface Texture and Standard Surfaces. Washington: Highway Research Report, 35 p. 1974.

ELVIK, R.; VAA, T. **The handbook of road safety measures**. Oxford, UK: Elsevier, 2004. 1078 p.

FALCÃO, P. R. F.; FARIAS, M. M. de; AGUIAR, C. da S.; BATISTA, L. C. M. Estudo da macro e micro textura em pista de alta velocidade: estudo do pavimento do autódromo de Brasília. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 37., 2006, Goiânia. **Anais...** Goiânia: ABPy, 2006. 1 CD-ROM.

FERREIRA, P. N. **Avaliação da macrotextura de trechos pavimentados de rodovias estaduais situadas na região insular do município de Florianópolis**. 2002. 161 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

FLINTSCH, G. W.; LEÓN, E de; MCGHEE, K. K.; AL-QADI, I. L. Pavement surface macrotexture measurement and applications. **Transportation Research Record**, Washington, n. 1860, p. 168-177. 2003.

FÜLÖP, I. A.; BOGÁRDI, I.; GULYÁS, A.; CSICSELY-TARPAY, M. Use of friction and texture in pavement performance modeling. **Journal of Transportation Engineering**, ASCE, v. 126, n. 3, p. 243-248, may/june 2000.

FWA, T. F.; ONG, G. P. Wet-pavement hydroplaning risk and skid resistance: analysis. **Journal of Transportation Engineering**, ASCE, v. 134, n. 5, p. 182-190, may 2008.

GARCÍA, D. S. P. **Método para análise da consistência geométrica de rodovias brasileiras de pista simples**. 2008. 352 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção). Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

GOTHIÉ, M. Influence de l'adhérence sur la sécurité routière. **Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées**, n. 185, p. 27-32, 1993.

HOSKING, J. R. Relationship between skidding resistance and accident frequency: estimates based on seasonal variations. **Transport and Road Research Laboratory**, TRRL, Research Report, n. 76, 17 p. 1986.

KOKKALIS, A. G.; PANAGOULI, O. K. Fractal evaluation of pavement skid resistance variations. I: surface wetting. **Chaos, Solitons & Fractals**, v. 9, n. 11, p. 1875-1890, nov. 1998.

- LAMM, R.; PSARIANOS, B.; MAILAENDER, T. **Highway design and traffic safety engineering handbook**. New York: McGraw-Hill, 1999.
- LEE, S.H. **Introdução ao projeto geométrico de rodovias**. Florianópolis: Ed. da UFSC, 2002. 418 p.
- LOPES, L. G. R.; FORTES, R. M. Estudo da aderência pneu-pavimento para diferentes tipos de texturas de pavimentos em pistas de kartódromos. In: CONGRESSO DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2., 2008, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ANDIT, 2008. Ref. 02-043. CD-ROM.
- LUGÃO, W. G. **Análise da aderência entre pneu e pavimento com camada porosa de atrito no Aeroporto Internacional Tancredo Neves - MG**. 2008. 136 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2008.
- LUM, H.; REAGAN, J. A. Interactive highway safety design model: accident predictive module. **Public Roads**, Winter, 1995.
- MATOS, F. C. de. **Gerência da manutenção da superfície de rolamento de vias urbanas utilizando SIG**. 2004. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.
- MATTOS, J. R. G.; ROZEK, T. de M.; HIRSCH, F.; NÚÑEZ, W. P. Análise da aderência pneu-pavimento para diferentes tipos de camadas de rolamento da BR-290/RS. In: SEMINÁRIO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA DO RIO GRANDE DO SUL, V, 2009, Pelotas. **Anais...** Pelotas: GEORS, 2009. CD-ROM.
- MERY, J. P. Péndulo británico y resistencia al deslizamiento en pavimentos: lo tradicional no pasa de moda. **Revista BIT**, Santiago do Chile, n. 33, p. 28-31, nov. 2003.
- MOMM, L. **Estudo dos efeitos da granulometria sobre a macrotextura superficial do concreto asfáltico e seu comportamento mecânico**. 1998. 259 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.
- MOURA, E. de.; BERNUCCI, L. L. B.; FERREIRA, P. N. Estudo do efeito da variação da granulometria de areia na determinação da macrotextura de pavimentos. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 35., 2004, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABPv, 2004. 1 CD-ROM.
- NODARI, C. T. **Método de avaliação da segurança potencial de segmentos rodoviários rurais de pista simples**. 2003. 210 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção). Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.
- OGDEN, K. W. **Safer roads: a guide to road safety engineering**. Cambridge, England: Ashgate, 1996, 516 p.

OLIVEIRA, J. A.; DAVID, D.; CERATTI, J. A. P. Estudo comparative entre os revestimentos delgados TSD e Cape Seal. In: ENCONTRO DE ASFALTO, 17., 2004, Rio de Janeiro. **Trabalhos Técnicos**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Petróleo (IBP), 2004, p. 174-181.

ONG, G. P.; FWA, T. F. Wet-pavement hydroplaning risk and skid resistance: modeling. **Journal of Transportation Engineering**, ASCE, v. 133, n. 10, p. 590-598, oct. 2007.

PASQUET, A. Campagne nationale de glissance 1967 en France. In: Colloque international sur la glissance et la sécuritté de la circulation sur routes mouillées. **Anais...** Berlin, p. 717-732. 1968,

PASQUET, A.; BERTHIER, J. Recherches relatives à la glissance routiére: conséquences sur la conception des revêtements routiers. **Special F – Ministère de l'Équipement**, Paris, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 1966.

PIDWERBESKY, B.; WATERS, J.; GRANSBERG, D.; STEMPROK, R. Road surface texture measurement using digital image processing and information theory. **Land Transport New Zealand Research Report**, 290, 65 p. 2006.

PINTO, J. R.; RIBEIRO, J.; AZEVEDO, M. C. M. Caracterização superficial de pavimentos rodoviários avaliação da aderência. In: JORNADAS LUSO-BRASILEIRAS DE PAVIMENTOS: POLÍTICAS E TECNOLOGIAS, 5., 2006, Recife. **Anais eletrônicos...** Recife, PE: 2002. Ref. V-022. Disponível em: <http://www.andit.org.br/vjornada/jornadas_relacao_artigos1.htm>. Acesso em: 18 jan. 2009.

PRESE, R.; SILVA, G. T. da; MERIGHI, J. V. Influência da natureza da superfície de contato na geração de aderência nos pavimentos aeroportuários. In: JORNADAS LUSO-BRASILEIRAS DE PAVIMENTOS: POLÍTICAS E TECNOLOGIAS, 5., 2006, Recife. **Anais eletrônicos...** Recife, PE: 2002. Ref. V-039. Disponível em: <http://www.andit.org.br/vjornada/jornadas_relacao_artigos1.htm>. Acesso em: 25 abr. 2008.

PROWELL, B. D.; HANSON, D. I. Evaluation of circular texture meter for measuring surface texture of pavements. **Transportation Research Record**, Washington, n. 1929, p. 88-96. 2005.

RIBEIRO, L. M. B.; PINTO, P. M. V.; MERIGHI, C. F.; PREUSSLER, E. S.; CAMPO, O. de S. Medição de macrotextura com equipamento do tipo “*Outflow Meter*”. In: CONGRESSO DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2., 2008, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ANDIT, 2008. Ref. 02-003. CD-ROM.

ROCO, V.; FUENTES, C.; VALVERDE, S. Evaluacion de la resisténcia al deslizamiento en pavimentos chilenos. In: CONGRESSO INTERNACIONAL PROVIAL, 6., 2002, Termas de Chillán. **Anais eletrônicos...** Termas de Chillán, Chile: 2002. Disponível em: <<http://www2.udec.cl/~provial/trabajos.htm>>. Acesso em: 17 jan. 2009.

RODRIGUES FILHO, O. S. **Características de aderência de revestimentos asfálticos aeroportuários**: estudo de caso do Aeroporto Internacional de São Paulo / Congonhas. 2006. 263 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

SABEY, B. E. Road safety and value for money. **Transport and Road Research Laboratory**, UK, Supplementary Report 581. 1980.

SANTOS, E. de L. dos. **Análise histórica de medição de atrito das pistas do Aeroporto Santos Dumont - RJ**. 2004. 123 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2004.

SANTOS, R. T. dos. **Análise da macrotextura de pavimentos através de processamento de imagens usando transformada de Fourier**. 2008. 99 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática). Departamento de Física, Estatística e Matemática da UNIJUÍ - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, RS, 2008.

SILVA, J. P. S. Aderência pneu-pavimento aeroportuário: conceitos e generalidades. In: CONGRESSO DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES, 1., 2007, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ANDIT, 2007. Ref. 01-53A. CD-ROM.

SILVA, J. P. S. **Aderência pneu-pavimento em revestimentos asfálticos aeroportuários**. 2008. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

SOLMINIHAC, H. de; BUSTOS, M.; ECHAVEGUREN, T.; CAROCA, A. Fricción superficial en pavimentos: correlación entre diversos equipos de medición. **Revista BIT**, Santiago do Chile, n. 35, p. 30-34, mar. 2004.

SPECHT, L. P.; ROZEK, T.; HIRSCH, F.; SANTOS, R. T. dos. Avaliação da macrotextura de pavimentos através do ensaio de mancha de areia. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, Rio Grande, n. 10, p. 30-38, jul. 2007.

VITORELLO, T. **Proposta de tendências de desempenho de estrutura de pavimento flexível da rodovia BR-290/RS**. 2008. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

APÊNDICE A – ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Análise da correlação entre os ensaios da Mancha de Areia e Drenabilidade

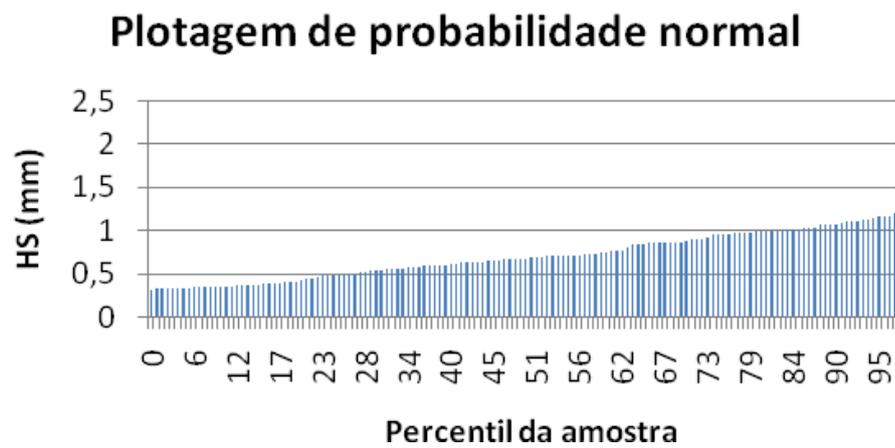
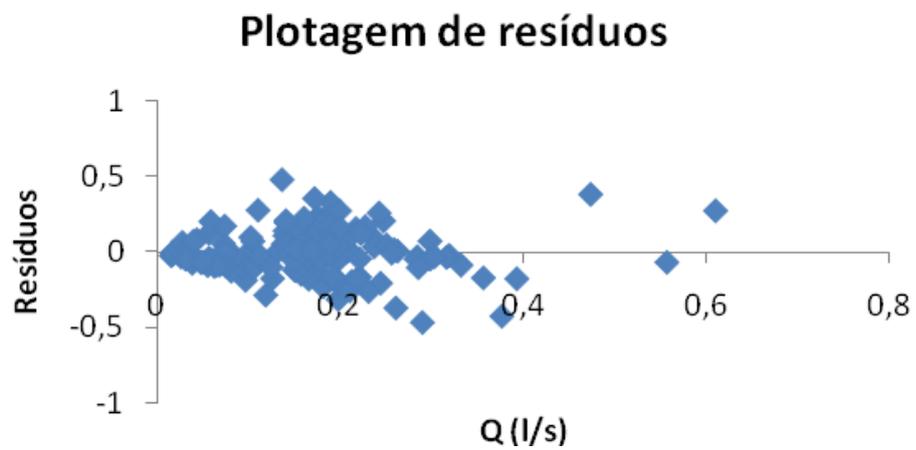
RESUMO DOS RESULTADOS

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,868527
R-Quadrado	0,754339
R-quadrado ajustado	0,752597
Erro padrão	0,153345
Observações	143

ANOVA

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	1	10,18096	10,18096	432,9615	8,04E-45
Resíduo	141	3,315573	0,023515		
Total	142	13,49654			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>
Interseção	0,299633	0,024356	12,30238	4,37E-24
Q (l/s)	2,635899	0,126679	20,80773	8,04E-45



Análise da tendência de desempenho da microtextura em pavimentos flexíveis

RESUMO DOS RESULTADOS

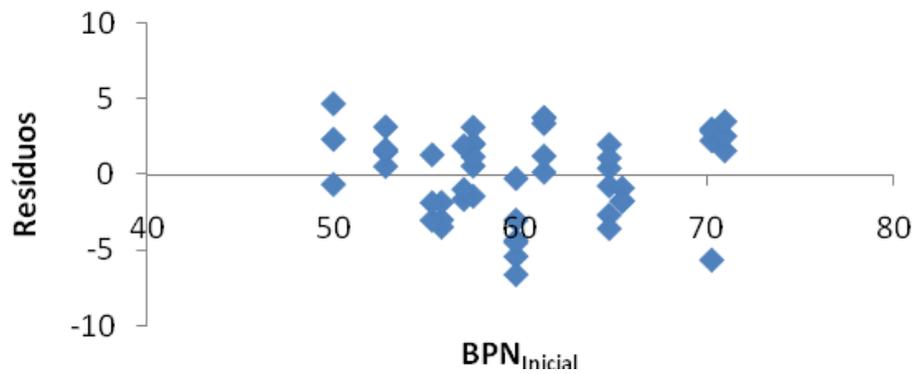
<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,907282
R-Quadrado	0,82316
R-quadrado ajustado	0,815635
Erro padrão	2,856776
Observações	50

ANOVA

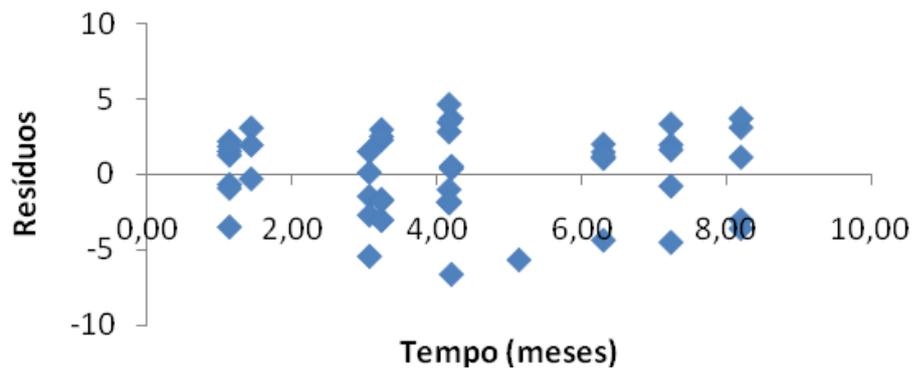
	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	2	1785,473	892,7366	109,3883	2,08E-18
Resíduo	47	383,575	8,16117		
Total	49	2169,048			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>
Interseção	2,671918	4,245098	0,629413	0,532127
BPN _{Inicial}	0,951429	0,06814	13,96287	2,42E-18
Tempo (meses)	-0,70173	0,18101	-3,87677	0,000328

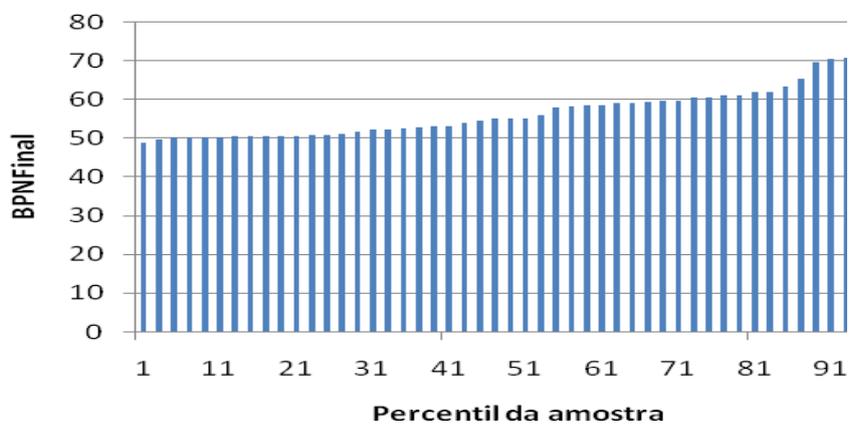
Plotagem de resíduos



Plotagem de resíduos



Plotagem de probabilidade normal



Análise da tendência de desempenho da microtextura em pavimentos rígidos

RESUMO DOS RESULTADOS

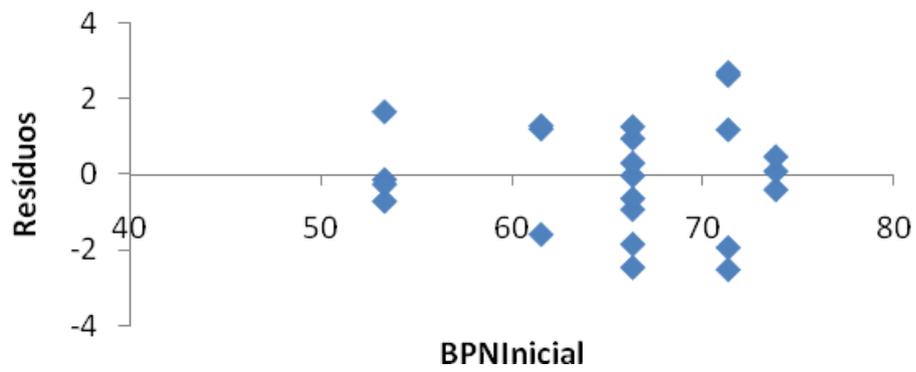
<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,9611
R-Quadrado	0,923713
R-quadrado ajustado	0,916084
Erro padrão	1,552478
Observações	23

ANOVA

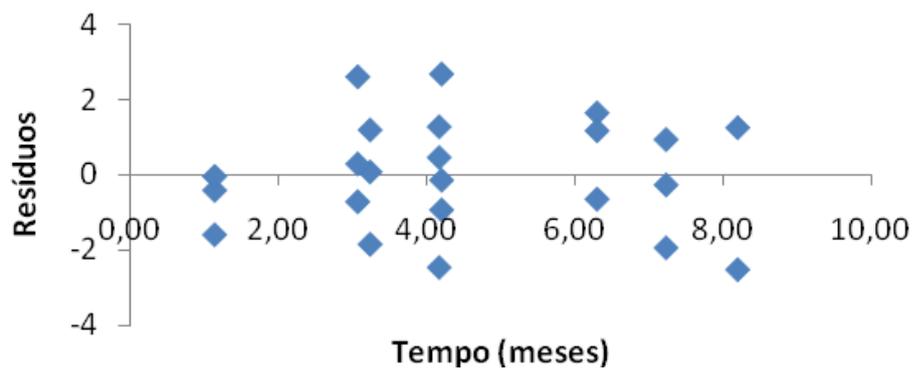
	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	2	583,671	291,8355	121,0841	6,68E-12
Resíduo	20	48,20376	2,410188		
Total	22	631,8748			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>
Interseção	23,07775	3,305097	6,982471	8,92E-07
BPN _{Inicial}	0,676323	0,048593	13,91821	9,49E-12
Tempo (meses)	-0,94762	0,151656	-6,24846	4,21E-06

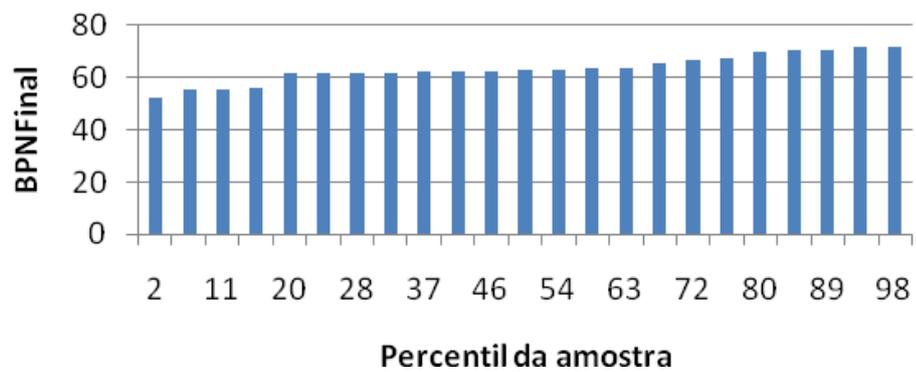
Plotagem de resíduos



Plotagem de resíduos



Plotagem de probabilidade normal



Análise da tendência de desempenho da macrotextura em pavimentos flexíveis

RESUMO DOS RESULTADOS

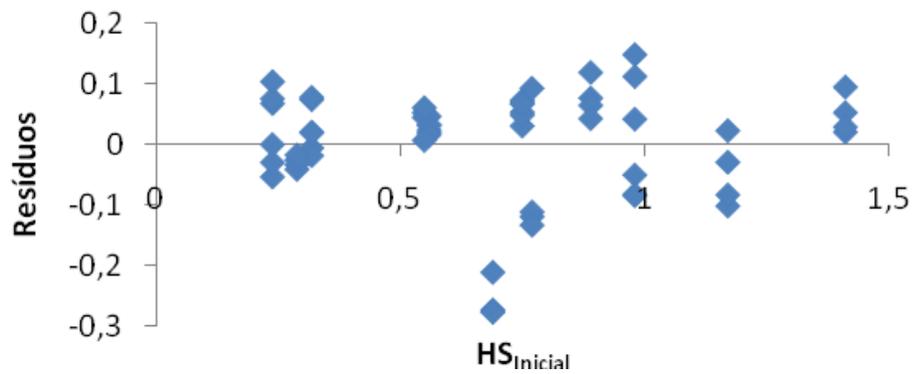
<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,930663
R-Quadrado	0,866133
R-quadrado ajustado	0,861265
Erro padrão	0,096417
Observações	58

ANOVA

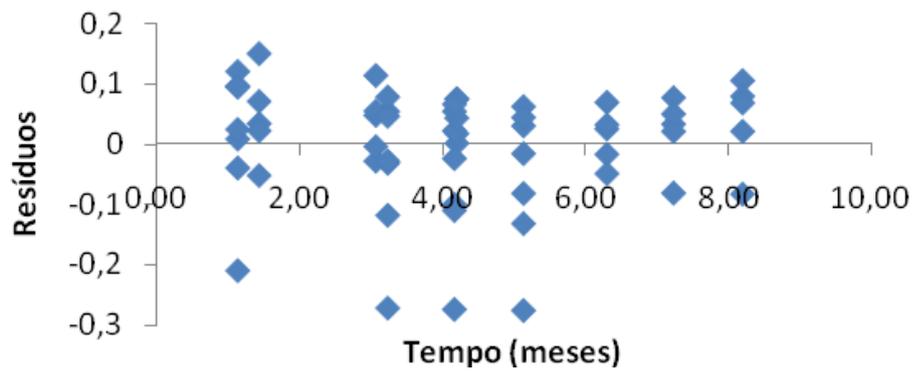
	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	2	3,308098	1,654049	177,9278	9,63E-25
Resíduo	55	0,51129	0,009296		
Total	57	3,819388			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>
Interseção	0,137201	0,041076	3,340167	0,001509
HS _{Inicial}	0,700079	0,038036	18,40559	3,57E-25
Tempo (meses)	-0,00846	0,00592	-1,42917	0,158611

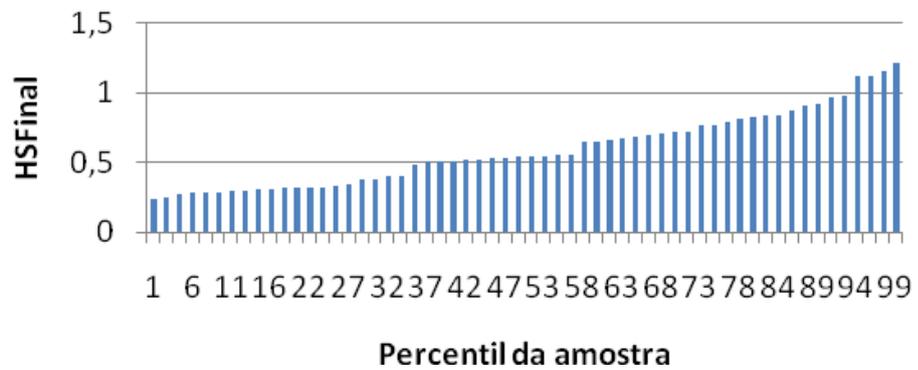
Plotagem de resíduos



Plotagem de resíduos



Plotagem de probabilidade normal



Análise da tendência de desempenho da macrotextura em pavimentos rígidos

RESUMO DOS RESULTADOS

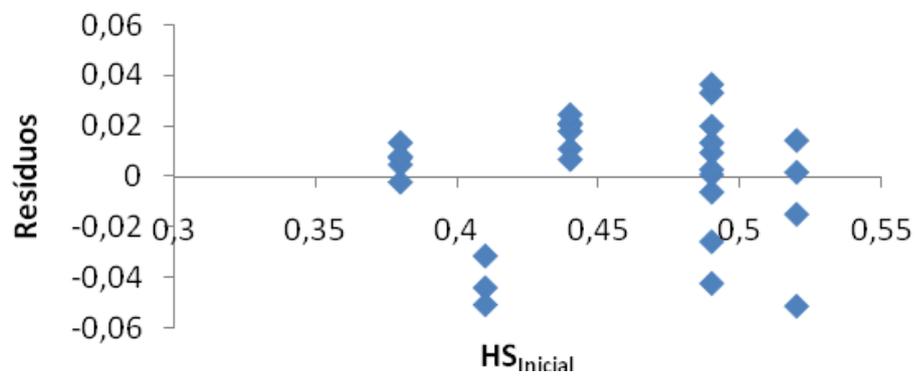
<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,885033
R-Quadrado	0,783283
R-quadrado ajustado	0,765946
Erro padrão	0,025809
Observações	28

ANOVA

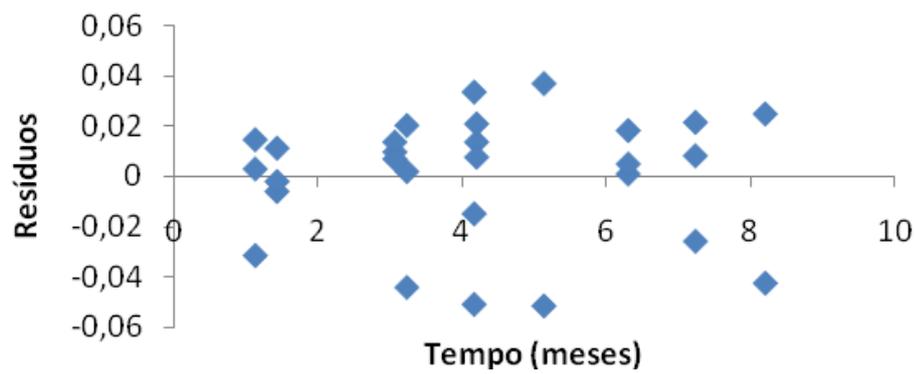
	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	2	0,06019	0,030095	45,17889	5E-09
Resíduo	25	0,016653	0,000666		
Total	27	0,076843			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>
Interseção	0,017984	0,047844	0,375883	0,710175
HS _{Inicial}	0,945193	0,101554	9,307329	1,34E-09
Tempo (meses)	-0,00349	0,002245	-1,55269	0,133067

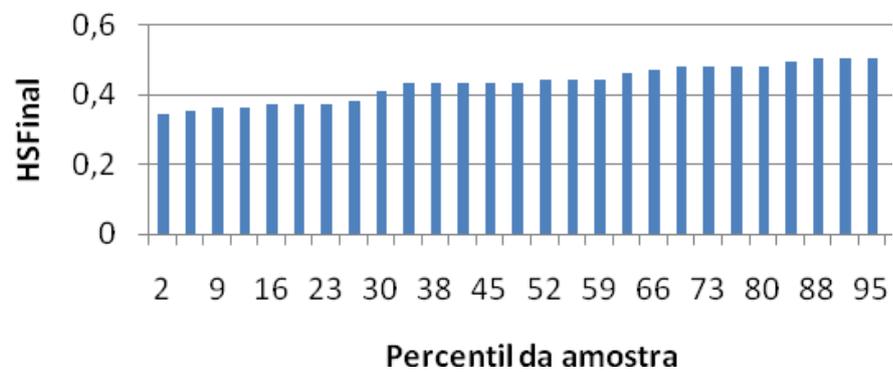
Plotagem de resíduos



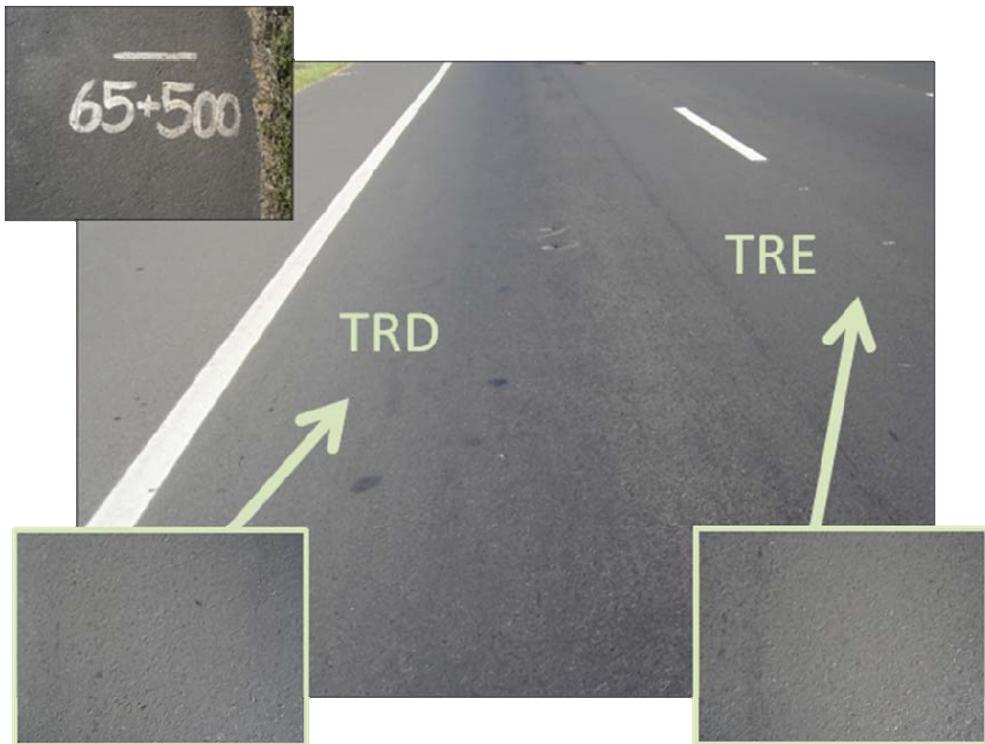
Plotagem de resíduos

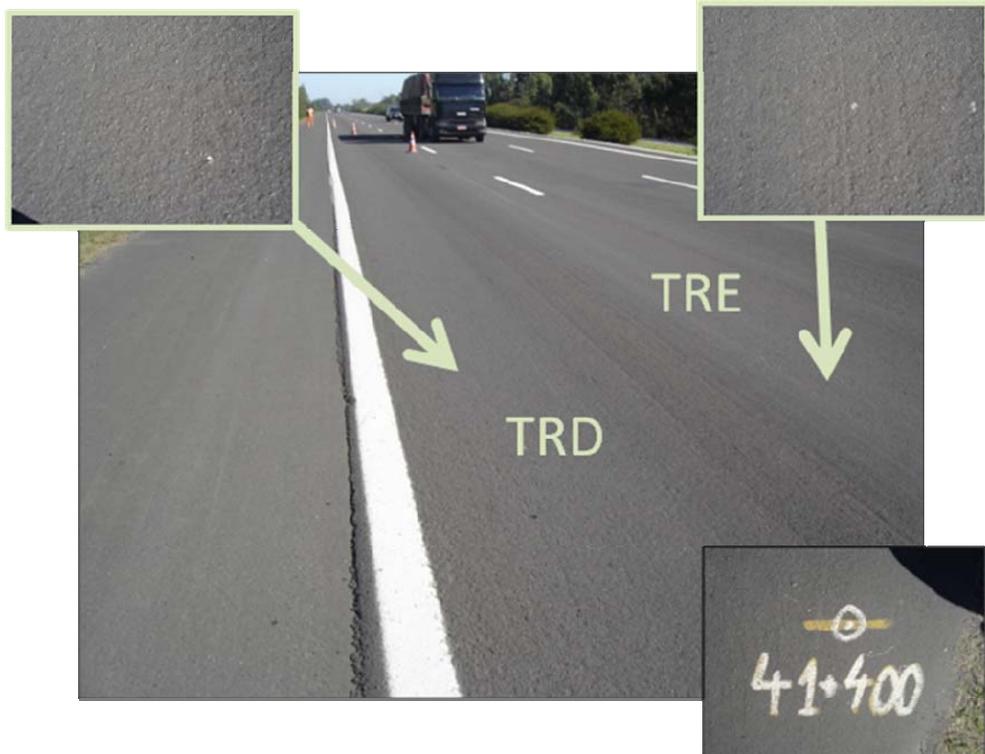


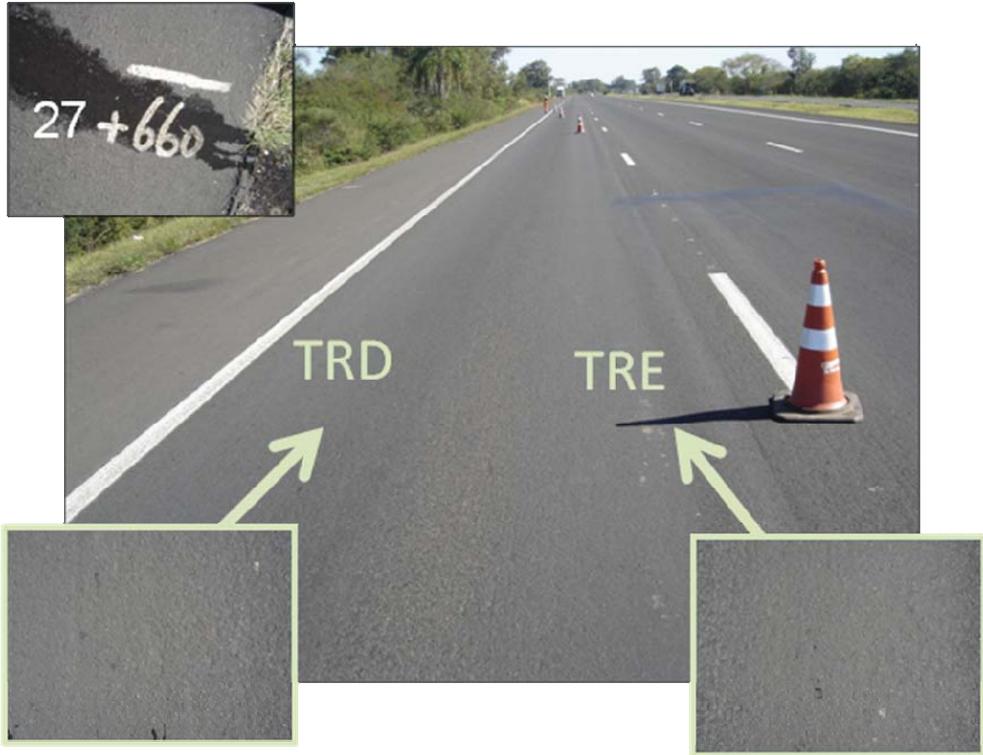
Plotagem de probabilidade normal



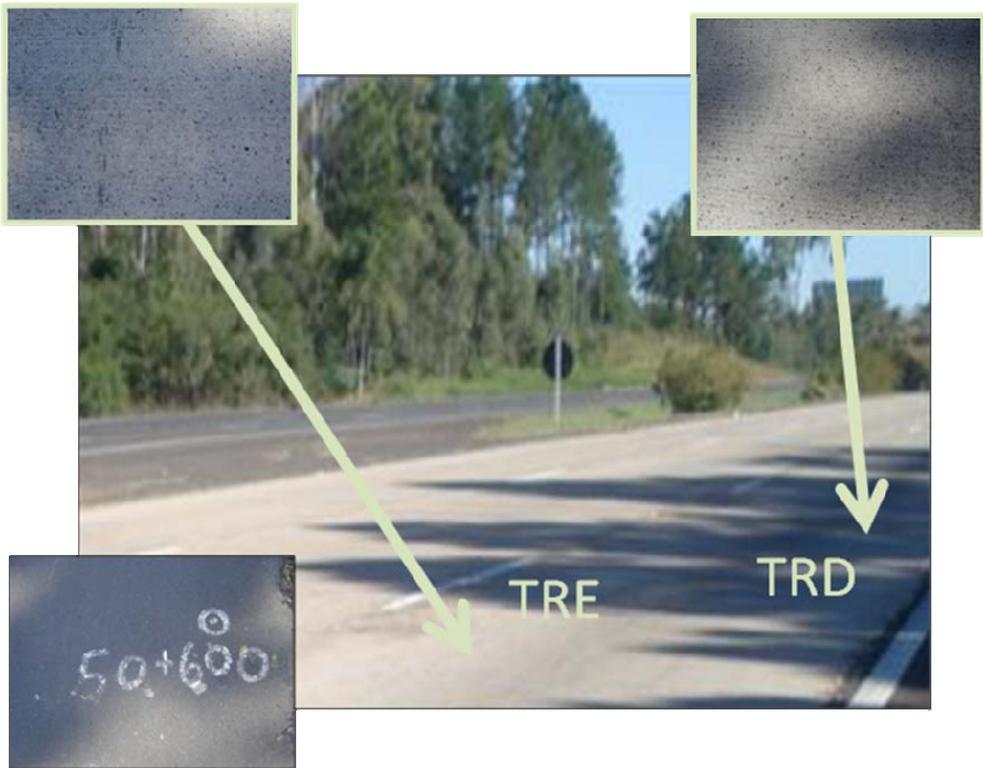
**APÊNDICE B – REGISTRO FOTOGRÁFICO DA TEXTURA DOS
PONTOS MONITORADOS**











ANEXO A – TABELA DE DISTRIBUIÇÃO F DE SNEDECOR

Tabela de limites unilaterais da distribuição F de Snedecor ao nível de 5% de probabilidade

GL V2	V1																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	20	40	60	120	240
1	161.4	199.5	215.7	224.6	230.2	234.0	236.8	238.9	240.5	241.9	243.0	243.9	244.7	245.4	245.9	248.0	251.1	252.2	253.3	253.8
2	18.613	19.000	19.164	19.247	19.296	19.329	19.353	19.371	19.385	19.396	19.405	19.412	19.419	19.424	19.429	19.446	19.471	19.479	19.487	19.492
3	10.128	9.552	9.277	9.117	9.013	8.941	8.887	8.845	8.812	8.785	8.763	8.745	8.729	8.715	8.703	8.660	8.594	8.572	8.549	8.538
4	7.709	6.944	6.591	6.388	6.256	6.163	6.094	6.041	5.999	5.964	5.936	5.912	5.891	5.873	5.858	5.803	5.717	5.688	5.658	5.643
5	6.608	5.786	5.409	5.192	5.050	4.950	4.876	4.818	4.772	4.735	4.704	4.678	4.655	4.636	4.619	4.558	4.464	4.431	4.398	4.382
6	5.987	5.143	4.757	4.534	4.387	4.284	4.207	4.147	4.099	4.060	4.027	4.000	3.976	3.956	3.938	3.874	3.774	3.740	3.705	3.687
7	5.591	4.737	4.347	4.120	3.972	3.866	3.787	3.726	3.677	3.637	3.603	3.575	3.550	3.529	3.511	3.445	3.340	3.304	3.267	3.249
8	5.318	4.459	4.066	3.838	3.688	3.581	3.500	3.438	3.388	3.347	3.313	3.284	3.259	3.237	3.218	3.150	3.043	3.005	2.967	2.947
9	5.117	4.256	3.863	3.633	3.482	3.374	3.293	3.230	3.179	3.137	3.102	3.073	3.048	3.025	3.006	2.936	2.826	2.787	2.748	2.727
10	4.965	4.103	3.708	3.478	3.326	3.217	3.135	3.072	3.020	2.978	2.943	2.913	2.887	2.865	2.845	2.774	2.661	2.621	2.580	2.559
11	4.844	3.982	3.587	3.357	3.204	3.095	3.012	2.948	2.896	2.854	2.818	2.788	2.761	2.739	2.719	2.646	2.531	2.490	2.448	2.426
12	4.747	3.885	3.490	3.259	3.106	2.996	2.913	2.849	2.796	2.753	2.717	2.687	2.660	2.637	2.617	2.544	2.426	2.384	2.341	2.319
13	4.667	3.806	3.411	3.179	3.025	2.915	2.832	2.767	2.714	2.671	2.635	2.604	2.577	2.554	2.533	2.459	2.339	2.297	2.252	2.230
14	4.600	3.739	3.344	3.112	2.958	2.848	2.764	2.699	2.646	2.602	2.565	2.534	2.507	2.484	2.463	2.388	2.266	2.223	2.178	2.155
15	4.543	3.682	3.287	3.056	2.901	2.790	2.707	2.641	2.588	2.544	2.507	2.475	2.448	2.424	2.403	2.328	2.204	2.160	2.114	2.090
16	4.494	3.634	3.239	3.007	2.852	2.741	2.657	2.591	2.538	2.494	2.456	2.425	2.397	2.373	2.352	2.276	2.151	2.106	2.059	2.035
17	4.451	3.592	3.197	2.965	2.810	2.699	2.614	2.548	2.494	2.450	2.413	2.381	2.353	2.329	2.308	2.230	2.104	2.058	2.011	1.986
18	4.414	3.555	3.160	2.928	2.773	2.661	2.577	2.510	2.456	2.412	2.374	2.342	2.314	2.290	2.269	2.191	2.063	2.017	1.968	1.943
19	4.381	3.522	3.127	2.895	2.740	2.628	2.544	2.477	2.423	2.378	2.340	2.308	2.280	2.256	2.234	2.155	2.026	1.980	1.930	1.905
20	4.351	3.493	3.098	2.866	2.711	2.599	2.514	2.447	2.393	2.348	2.310	2.278	2.250	2.225	2.203	2.124	1.994	1.946	1.896	1.870
21	4.325	3.467	3.072	2.840	2.685	2.573	2.488	2.420	2.366	2.321	2.283	2.250	2.222	2.197	2.176	2.096	1.965	1.916	1.866	1.839
22	4.301	3.443	3.049	2.817	2.661	2.549	2.464	2.397	2.342	2.297	2.259	2.226	2.198	2.173	2.151	2.071	1.938	1.889	1.838	1.811
23	4.279	3.422	3.028	2.796	2.640	2.528	2.442	2.375	2.320	2.275	2.236	2.204	2.175	2.150	2.128	2.048	1.914	1.865	1.813	1.785
24	4.260	3.403	3.009	2.776	2.621	2.508	2.423	2.355	2.300	2.255	2.216	2.183	2.155	2.130	2.108	2.027	1.892	1.842	1.790	1.762
25	4.242	3.385	2.991	2.759	2.603	2.490	2.405	2.337	2.282	2.236	2.198	2.165	2.136	2.111	2.089	2.007	1.872	1.822	1.768	1.740
26	4.225	3.369	2.975	2.743	2.587	2.474	2.388	2.321	2.265	2.220	2.181	2.148	2.119	2.094	2.072	1.990	1.853	1.803	1.749	1.720
27	4.210	3.354	2.960	2.728	2.572	2.459	2.373	2.305	2.250	2.204	2.166	2.132	2.103	2.078	2.056	1.974	1.836	1.785	1.731	1.702
28	4.196	3.340	2.947	2.714	2.558	2.445	2.359	2.291	2.236	2.190	2.151	2.118	2.089	2.064	2.041	1.959	1.820	1.769	1.714	1.685
29	4.183	3.328	2.934	2.701	2.545	2.432	2.346	2.278	2.223	2.177	2.138	2.104	2.075	2.050	2.027	1.945	1.806	1.754	1.698	1.669
30	4.171	3.316	2.922	2.690	2.534	2.421	2.334	2.266	2.211	2.165	2.126	2.092	2.063	2.037	2.015	1.932	1.792	1.740	1.683	1.654
40	4.085	3.232	2.839	2.606	2.449	2.336	2.249	2.180	2.124	2.077	2.038	2.003	1.974	1.948	1.924	1.839	1.693	1.637	1.577	1.544
50	4.034	3.183	2.790	2.557	2.400	2.286	2.199	2.130	2.073	2.026	1.986	1.952	1.921	1.895	1.871	1.784	1.634	1.576	1.511	1.476
60	4.001	3.150	2.758	2.525	2.368	2.254	2.167	2.097	2.040	1.993	1.952	1.917	1.887	1.860	1.836	1.748	1.594	1.534	1.467	1.430
80	3.960	3.111	2.719	2.486	2.329	2.214	2.126	2.056	1.999	1.951	1.910	1.875	1.845	1.817	1.793	1.703	1.545	1.482	1.411	1.370
100	3.936	3.087	2.696	2.463	2.305	2.191	2.103	2.032	1.975	1.927	1.886	1.850	1.819	1.792	1.768	1.676	1.515	1.450	1.376	1.333
120	3.920	3.072	2.680	2.447	2.290	2.175	2.087	2.016	1.959	1.910	1.869	1.834	1.803	1.775	1.750	1.659	1.495	1.429	1.352	1.307
240	3.881	3.033	2.642	2.409	2.252	2.136	2.048	1.977	1.919	1.870	1.829	1.793	1.761	1.733	1.708	1.614	1.445	1.375	1.290	1.237