

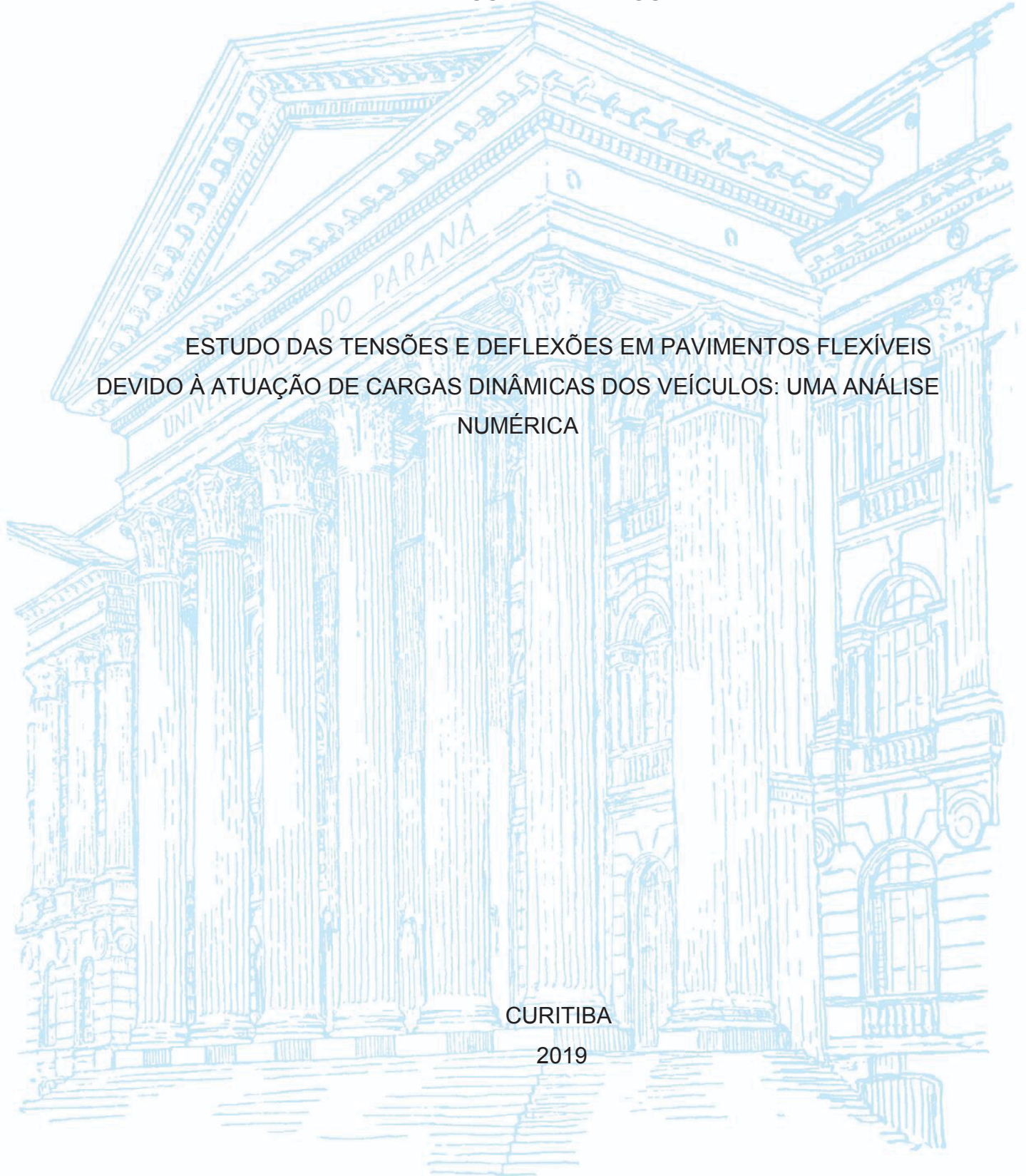
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

NEUSA ELIANA FIGUR

ESTUDO DAS TENSÕES E DEFLEXÕES EM PAVIMENTOS FLEXÍVEIS
DEVIDO À ATUAÇÃO DE CARGAS DINÂMICAS DOS VEÍCULOS: UMA ANÁLISE
NUMÉRICA

CURITIBA

2019



NEUSA ELIANA FIGUR

ESTUDO DAS TENSÕES E DEFLEXÕES EM PAVIMENTOS FLEXÍVEIS
DEVIDO À ATUAÇÃO DE CARGAS DINÂMICAS DOS VEÍCULOS: UMA ANÁLISE
NUMÉRICA

Dissertação apresentada ao Curso de Pós Graduação em Engenharia de Construção Civil, Setor de Ciências Exatas, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Construção Civil.

Orientadora: Profa. Dra. Daniane Franciesca Vicentini.

CURITIBA

2019

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

- F477e Figur, Neusa Eliana
Estudo das tensões e deflexões em pavimentos flexíveis devido à atuação de cargas dinâmicas dos veículos: uma análise numérica [recurso eletrônico] / Neusa Eliana Figur – Curitiba, 2019.
- Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Construção Civil.
Orientadora: Daniane Franciesca Vicentini
1. Pavimentação. 2. Análise dinâmica. 3. Elementos finitos. 4. Pavimento flexível. I. Universidade Federal do Paraná. II. Vicentini, Daniane Franciesca. III. Título.

CDD: 625.7072

Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR SETOR DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA DE
CONSTRUÇÃO CIVIL - 40001016049P2

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA DE CONSTRUÇÃO CIVIL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **NEUSA ELIANA FIGUR** intitulada: **Estudo das tensões e deflexões em pavimentos flexíveis devido à atuação de cargas dinâmicas dos veículos: uma análise numérica**, após terem inquirido a aluna e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 23 de Abril de 2019.

DANIANE FRANCIESCA VICENTINI

Presidente da Banca Examinadora (UFPR)

JOE ARNALDO VILLEN DEL CARPIO

Avaliador Interno (UFPR)

MARCOS ARNDT

Avaliador Interno (UFPR)

DEVIDI DA SILVA PEREIRA

Avaliador Externo (UFSM)

À DEUS, o autor da vida e do meu destino.

AGRADECIMENTOS

Á Deus pela vida.

Ao PPGECC, seu corpo docente, direção e administração que oportunizaram a realização deste mestrado.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica da UFPR e ao Laboratório de Vibrações e Ruído.

Á CAPES pela disponibilização da bolsa nos últimos cinco meses do curso na modalidade CAPES-DS.

Á minha orientadora Professora Doutora Daniane Franciesca Vicentini por todo o apoio, paciência e orientações.

Aos meus pais pelo incentivo e apoio.

Enfim, a todos que de alguma forma, direta ou indiretamente, fizeram parte desse processo. Muito obrigada.

“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes”.

(Marthin Luther King)

RESUMO

Esta pesquisa tem por objetivo simular os efeitos das cargas dinâmicas de determinado veículo sobre uma seção de pavimento flexível em inúmeras condições de deslocamento (velocidade constante e variável) e de serviço (variação da rugosidade, inflação do pneu e declividade da pista). Foram feitas duas análises em elementos finitos 3D (software *Ansys*): uma dinâmica explícita e outra estática, as quais foram comparadas entre si. A seção do pavimento analisado é composta por três camadas: revestimento betuminoso, base de brita e sub-base de saibro, a qual foi identificada como representativa em vias de transporte coletivo na Cidade de Curitiba. As condições de contorno, por sua vez, simulam uma estrutura submetida ao carregamento dos ônibus empregados nas linhas Tipo alimentador em Curitiba e que, na classificação do DNIT, pertencem a classe 2CB (100 kN no eixo traseiro – ESRD). Os parâmetros do tráfego avaliados nesta pesquisa foram: a pressão de inflação do pneu ($q = 0,72, 0,76, 0,83$ e $0,86$ MPa comumente empregados nos ônibus em Curitiba), a rugosidade da pista expressa em termos do coeficiente de atrito ($\mu = 0,60, 0,68$ e $0,87$), a variação da velocidade ($v = 20, 40$ e 60 km/h), a declividade da pista ($i=0, \pm 6, \pm 8$ e $\pm 11\%$), a aceleração (0-20, 0-40 e 0-60 km/h) e a frenagem do veículo (20-0, 40-0 e 60-0 km/h). Os principais resultados mostram que a inflação do pneu, de modo geral, não influenciou nos resultados avaliados. Já o aumento da velocidade de deslocamento do pneu resultou em uma redução na amplitude das deflexões na superfície da camada de revestimento se comparadas aos resultados obtidos do modelo estático. Em contrapartida, as tensões verticais (S_z), para as mesmas condições de velocidade e declividade, aumentaram. As tensões no topo do subleito, por sua vez, mostraram-se menores para o modelo estático em comparação ao modelo dinâmico, as quais foram ampliadas ainda mais com a inserção de trechos em auge e declive. Em termos da rugosidade da pista, está mostrou-se influente apenas sobre os valores de tensão horizontal (S_x e S_y) e cisalhante (S_{xy}) tanto na presença como na ausência de declividade no pavimento, na aceleração e frenagem do pneu.

Palavras-chave: Elementos finitos. Pavimento flexível. Aceleração e frenagem. Tensões horizontais e cisalhantes. Análise dinâmica.

ABSTRACT

The objective of this study was to simulate the effects of the dynamic loads of a given vehicle on a flexible pavement section in a number of conditions (constant and variable speed) and service (variation of roughness, tire inflation and slope). Two analyzes were performed on 3D finite elements (Ansys software): an explicit dynamic and a static, which were compared. The section of the pavement analyzed is composed of three layers: bituminous road, gravel base and gravel sub-base, which was identified as representative in transportation avenues in the City of Curitiba. On its turn, the contour conditions simulate a structure submitted to the loading of the buses used in the Feeder Type lines in Curitiba and which, in the DNIT classification, belong to class 2CB (100 kN in the rear axle - ESRD). The traffic parameters evaluated in this research were: tire inflation pressure ($q = 0.72, 0.76, 0.83$ and 0.86 MPa commonly used in buses in Curitiba), the runway roughness expressed in terms of the coefficient of friction ($\mu = 0.60, 0.68$ and 0.87), the variation over speed ($v = 20, 40$ and 60 km / h), the slope of the runway ($i = 0, \pm 6, \pm 8$ and $\pm 11\%$), acceleration (0-20, 0-40 and 0-60 km / h) and braking of the vehicle (20-0, 40-0 and 60-0 km / h). The main results show that tire inflation, in general, did not influence the results evaluated. The increase in tire displacement velocity resulted in a reduction in the amplitude of the deflections at the surface of the coating layer compared to the results obtained from the static model. In contrast, the vertical stresses (S_z), for the same speed and slope conditions, increased. On its turn, the stresses at the top of the subgrade were smaller for the static model in comparison to the dynamic model, which were further extended with the insertion of slope. In terms of runway roughness, it was only influential on the horizontal (S_x and S_y) and shear (S_{xy}) values both with and without of slope in the pavement, in the acceleration and braking of the tire.

Keywords: Finite elements. Flexible pavement. Acceleration and braking. Horizontal and shear stresses. Dynamic analysis.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – CORRUGAÇÕES DEVIDO A TENSÕES CISALHANTES HORIZONTAIS DOS VEÍCULOS	25
FIGURA 2 - CUSTOS MÉDIOS GERENCIAIS DO DNIT COM RESTAURAÇÃO DO MODAL RODOVIÁRIO ENTRE OS ANOS 2010 E 2014 EM NOVEMBRO DE CADA ANO.	27
FIGURA 3 - EVOLUÇÃO DA FROTA REGISTRADA POR TIPO DE VEÍCULO 2001 - 2016.....	28
FIGURA 4 - CORREDOR DE ÔNIBUS BRT (<i>BUS RAPID TRANSIT</i>) NA CIDADE DE CURITIBA (AVENIDA SETE DE SETEMBRO).....	29
FIGURA 5 - PAVIMENTO RÍGIDO a) EM PARADA DE ÔNIBUS EM CURITIBA – AV. SETE DE SETEMBRO b) PRÓXIMO À INTERSEÇÕES DE CORREDORES DE ÔNIBUS BRT - CRUZAMENTO DA AV. SETE DE SETEMBRO COM A AV. MARECHAL FLORIANO PEIXOTO	30
FIGURA 6 - EFEITO DA VELOCIDADE NA DEFLEXÃO DO PAVIMENTO PARA DIVERSAS DISTÂNCIAS LATERAIS DO CENTRO DE APLICAÇÃO DA CARGA.....	35
FIGURA 7 – CARREGAMENTO VERTICAL ($p=41$ kN) E HORIZONTAL ($q=0,28$ MPa) PARA UMA PRESSÃO DE INFLAÇÃO DE 0,56 MPa	40
FIGURA 8 – TENSÃO σ_x a) NA FACE INFERIOR DA CAMADA DE REVESTIMENTO E b) FACE SUPERIOR DO REVESTIMENTO	41
FIGURA 9 - ONDULAÇÕES OU CORRUGAÇÕES.	46
FIGURA 10 – ESCORREGAMENTOS OBSERVADOS EM CORREDORES DE ÔNIBUS BRT EM CURITIBA: a) AVENIDA SETE DE SETEMBRO; b) APROXIMAÇÃO DA RUA TIBAGI COM A AVENIDA SETE DE SETEMBRO.....	46
FIGURA 11 - AFUNDAMENTO COM SOLEVAMENTO LATERAL EM UM CRUZAMENTO DA RUA 24 DE MAIO COM O CORREDOR DE ÔNIBUS BRT DA AVENIDA SETE DE SETEMBRO EM CURITIBA. ...	47
FIGURA 12 - TRINCA POR FADIGA EM REGIÃO PRÓXIMA A UM SEMÁFORO NA RUA MARECHAL DEODORO NA CIDADE DE CURITIBA.....	48

FIGURA 13 - RESPOSTA DO PAVIMENTO FLEXÍVEL AO MOVIMENTO DE UMA CARGA UNIFORME P: A) DEFORMAÇÕES DE TRAÇÃO (ϵ_t) E COMPRESSÃO (ϵ_c) NA DIREÇÃO TRANSVERSAL AO MOVIMENTO; B e C) DEFORMAÇÕES DE TRAÇÃO (ϵ_t) E COMPRESSÃO (ϵ_c) PARA POSIÇÕES SUCESSIVAS DO CARREGAMENTO.....	50
FIGURA 14 - AREA EQUIVALENTE DE CONTATO ENTRE O SUPERFICIE DO PAVIMENTO E O PNEU SUPOSTA: a) ELÍPTICA; b) RETANGULAR.	51
FIGURA 15 - OPERAÇÃO DO PÊNDULO BRITÂNICO PARA A DETERMINAÇÃO DO VALOR DE RESISTÊNCIA À DERRAPAGEM	54
FIGURA 16 - ENSAIO DE MANCHA DE AREIA	55
FIGURA 17 - MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS a) EXEMPLOS DE FORMAS DE ELEMENTOS FINITOS b) DISCRETIZAÇÃO DA MALHA.	61
FIGURA 18 - ESTRATÉGIA DE SOLUÇÃO DINÂMICA EXPLÍCITA	65
FIGURA 19 – SUPERFÍCIES DE CONTATO.....	70
FIGURA 20 – CONTATO DE SUPERFÍCIE ÚNICA.....	71
FIGURA 21 – CONTATO DE NÓ A SUPERFÍCIE	71
FIGURA 22 – CONTATO SUPERFÍCIE-SUPERFÍCIE	72
FIGURA 23- DEFORMAÇÃO DE UM PNEU ESTÁTICO SOB CONDIÇÕES DE CARREGAMENTO.....	73
FIGURA 24 - ESQUEMA DE FORÇAS EM UM PNEU EM MOVIMENTO SOB CONDIÇÕES DE CARREGAMENTO.	74
FIGURA 25 - DINÂMICA ENVOLVIDA NA FRENAGEM EM UM TRECHO COM ACLIVE	78
FIGURA 26 - DINÂMICA ENVOLVIDA NA FRENAGEM EM UM TRECHO COM DECLIVE.....	79
FIGURA 27 - ETAPAS DE MODELAGEM DESENVOLVIDAS NA PESQUISA	81
FIGURA 28 - PERFIL DE SONDAGEM DEP. PINHEIRO JUNIOR	83
FIGURA 29 – CONDIÇÕES DE CONTORNO DO MODELO a) RESTRIÇÕES NAS FACES DO PAVIMENTO b) RESTRIÇÕES DO EIXO NO PNEU.	84
FIGURA 30 - TIPO DE VEÍCULO DO TRANSPORTE COLETIVO NA RUA EM ESTUDO	85
FIGURA 31 - CONDIÇÕES DE CONTORNO	86
FIGURA 32 - MODELO GEOMÉTRICO OBTIDO.....	87

FIGURA 33 – DEFINIÇÃO DA GEOMETRIA DA MALHA a) ÁREA DE CONTATO PNEU-PAVIMENTO E CONDIÇÕES DE SIMETRIA; b) MALHA EM MEF COM DETALHE AMPLIADO NA ÁREA DE APLICAÇÃO DA PRESSÃO DE CONTATO.....	89
FIGURA 34 - MODELO PNEU-PAVIMENTO (DETALHE DO REFINAMENTO).	90
FIGURA 35 - CONVERGÊNCIA DA MALHA.....	91
FIGURA 36 – MALHA DO PNEU.....	93
FIGURA 37 - GEOMETRIA DO MODELO REPRODUZIDO NA VALIDAÇÃO.	94
FIGURA 38 - MODELO EM MEF: a) ÁREA DE CONTATO PNEU-PAVIMENTO; b) DETALHE DA MALHA EM MEF.	96
FIGURA 39 - MODELO EM MEF: a) DEFLEXÃO (U_z máx) b) CONVERGÊNCIA DA MALHA	97
FIGURA 40 - PONTOS ANALISADOS NA SUPERFÍCIE DO PAVIMENTO.	103
FIGURA 41 – DEFLEXÕES (10^{-2} mm) MEDIDAS NO TEMPO, AO LONGO DO SENTIDO DO MOVIMENTO DO PNEU.	104
FIGURA 42 – DEFLEXÕES MÁXIMAS (mm) NA DIREÇÃO TRANSVERSAL AO SENTIDO DE DESLOCAMENTO DO PNEU, A 50 km/h.....	105
FIGURA 43 – DEFLEXÃO NA DIREÇÃO TRANSVERSAL (eixo y) DOS MODELOS DINÂMICO E ESTÁTICO.....	106
FIGURA 44 – TENSÕES VERTICAIS, HORIZONTAIS E CISALHANTES (TOPO E FUNDO DO REVESTIMENTO).	107
FIGURA 45 – COMPARAÇÃO DOS DADOS NESTA PESQUISA COM OS DE SAAD et al (2005).....	109
FIGURA 46 – ALINHAMENTO DOS PONTOS ANALISADOS NO SENTIDO DO EIXO -X.....	112
FIGURA 47 – DEFORMAÇÕES E TENSÕES NORMAIS DE COMPRESSÃO (VERTICAIS) a) U_z E b) S_z NO TOPO DA CAMADA DE REVESTIMENTO PARA VELOCIDADES CONSTANTES E DECLIVIDADE $I=0\%$ PARA DIFERENTES VELOCIDADE E CONDIÇÕES DE SUPERFÍCIE.....	113
FIGURA 48 – TENSÕES NORMAIS E DEFORMAÇÕES (VERTICAIS) a) U_z E b) S_z , AMBOS PARA $V=40$ km/h; $q = 0,76$ MPa; $\mu = 0,68$; $t = 0,178$ s.....	115

FIGURA 49 – TENSÕES NORMAIS DE COMPRESSÃO (VERTICAIS) S_z NO TOPO DO SUBLEITO PARA VELOCIDADES CONSTANTES E DECLIVIDADE $i=0\%$	116
FIGURA 50 – TENSÕES NORMAIS DE TRAÇÃO (HORIZONTAIS) S_x e S_y a) TOPO E b) FUNDO DA CAMADA DE REVESTIMENTO PARA VELOCIDADES CONSTANTES E DECLIVIDADE $i=0\%$	117
FIGURA 51 – TENSÃO NORMAL (HORIZONTAL) a) S_x E b) S_y PARA $V=40$ km/h; $q = 0,76$ MPa; $\mu = 0,68$; $t = 0,178$ s.	119
FIGURA 52 – TENSÃO NORMAL (HORIZONTAL) S_x PARA $V=40$ km/h; $q = 0,76$ MPa; $\mu = 0,68$	120
FIGURA 53 – TENSÕES CISALHANTES S_{xy} : a) NO TOPO E b) FUNDO DO REVESTIMENTO PARA VELOCIDADES CONSTANTES E DECLIVIDADE $i=0\%$	121
FIGURA 54 – TENSÕES CISALHANTES S_{xy} PARA $V=40$ km/h; $q = 0,76$ MPa; $\mu = 0,68$; $t = 0,178$ s.	122
FIGURA 55 – COMPONENTES DAS TENSÕES PRINCIPAIS NO TOPO DO REVESTIMENTO a) S_3 ; b) S_1 e c) $\tau_{m\acute{a}x}$	123
FIGURA 56 – COMPONENTE S_3 DAS TENSÕES PRINCIPAIS PARA $V=40$ km/h; $q = 0,76$ MPa; $\mu = 0,68$; $t = 0,178$ s.	124
FIGURA 57 – DEFLEXÕES U_z PARA VELOCIDADE CONSTANTE EM: a) ACLIVE b) DECLIVE.	126
FIGURA 58 – DEFORMAÇÕES (VERTICAIS) U_z PARA $V=40$ km/h; $q = 0,76$ MPa; $\mu = 0,68$; $t = 0,178$ s: a) $i=0\%$; b) $i=+11\%$ E c) $i= -11\%$	127
FIGURA 59 – AVALIAÇÃO DAS TENSÕES S_z A VELOCIDADE CONSTANTE EM: a) ACLIVE b) DECLIVE.	128
FIGURA 60 – TENSÕES NORMAIS DE COMPRESSÃO (VERTICAIS) S_z NO TOPO DO SUBLEITO PARA VELOCIDADES CONSTANTES: a) ACLIVE E b) DECLIVE.	129
FIGURA 61 – TENSÕES NORMAIS DE TRAÇÃO (HORIZONTAIS) S_x a) TOPO e b) FUNDO DO REVESTIMENTO PARA VELOCIDADES CONSTANTES E DECLIVIDADE VARIÁVEL.	130
FIGURA 62 – TENSÕES NORMAIS (HORIZONTAIS) S_x PARA $V=40$ km/h; $q = 0,76$ MPa; $\mu = 0,68$; ; $t = 0,178$ s E PARA A DECLIVIDADE: a) $i=0\%$; b) $i=+11\%$ E c) $i=-11\%$	132

FIGURA 63 – TENSÕES CISALHANTES S_{xy} : a) NO TOPO E b) FUNDO DO REVESTIMENTO PARA VELOCIDADES CONSTANTES E DECLIVIDADE VARIÁVEL.	133
FIGURA 64 – TENSÕES CISALHANTES S_{xy} PARA $V=40$ km/h; $q = 0,76$ MPa; $\mu = 0,68$; $T = 0,178$ s E PARA AS DECLIVIDADES: a) $i=0\%$; b) $i=+11\%$ E c) $i=-11\%$	135
FIGURA 65 – COMPONENTES DAS TENSÕES PRINCIPAIS NO TOPO DO REVESTIMENTO PARA TRECHO EM ACLIVE E DECLIVE a) S3; b) S1 e c) $\tau_{m\acute{a}x}$	136
FIGURA 66 – DEFLEXÕES U_z NO TOPO DA CAMADA DE REVESTIMENTO NA ACELERAÇÃO E FRENAGEM PARA DECLIVIDADE $i=0\%$	138
FIGURA 67 – DEFORMAÇÕES VERTICAIS U_z PARA $V=40$ km/h; $q = 0,76$ MPa; $\mu = 0,68$; E VELOCIDADE: a) $V=$ CONSTANTE ($t = 0,178$ s); b) $V=0-40$ km/h ($t=0,029$ s); c) $V=40-0$ km/h ($t=0,44$ s)	139
FIGURA 68 – TENSÕES NORMAIS DE COMPRESSÃO (VERTICAIS) S_z NO TOPO DO SUBLEITO NA ACELERAÇÃO E FRENAGEM PARA DECLIVIDADE $i=0\%$	140
FIGURA 69 – TENSÕES NORMAIS DE TRAÇÃO (HORIZONTAIS) S_x : a) TOPO E b) FUNDO DO REVESTIMENTO NA ACELERAÇÃO E FRENAGEM, PARA DECLIVIDADE $i=0\%$	141
FIGURA 70 – TENSÕES NORMAIS DE TRAÇÃO (HORIZONTAIS) S_x PARA $V=40$ km/h; $q = 0,76$ MPa; $\mu = 0,68$; E VELOCIDADE: a) $V=$ CONSTANTE ($t = 0,178$ s); b) $V=0-40$ km/h ($t=0,029$ s); c) $V=40-0$ km/h ($t=0,44$ s)	143
FIGURA 71 – TENSÕES CISALHANTES S_{xy} : a) NO TOPO E b) FUNDO DO REVESTIMENTO NA ACELERAÇÃO E FRENAGEM PARA $i=0\%$	144
FIGURA 72 – COMPONENTES DAS TENSÕES PRINCIPAIS NO TOPO DO REVESTIMENTO PARA TRECHO EM ACLIVE E DECLIVE a) S3; b) S1 e c) $\tau_{m\acute{a}x}$	146
FIGURA 73 – DEFLEXÕES U_z NO TOPO DA CAMADA DE REVESTIMENTO NA ACELERAÇÃO E FRENAGEM PARA TRECHOS a) ACLIVE E b) DECLIVE.	148

FIGURA 74 – TENSÕES NORMAIS DE COMPRESSÃO (VERTICAIS) S_z NO TOPO DO SUBLEITO DURANTE ACELERAÇÃO E FRENAGEM PARA TRECHOS: a) ACLIVE b) DECLIVE.	149
FIGURA 75 – TENSÕES NORMAIS DE TRAÇÃO (HORIZONTAIS) S_x : a) TOPO e b) FUNDO DO REVESTIMENTO NA ACELERAÇÃO E FRENAGEM PARA TRECHOS EM ACLIVE.	150
FIGURA 76 – TENSÕES NORMAIS DE TRAÇÃO (HORIZONTAIS) S_x : a) TOPO e b) FUNDO DO REVESTIMENTO NA ACELERAÇÃO E FRENAGEM PARA TRECHOS EM DECLIVE.	151
FIGURA 77 – TENSÕES CISALHANTES S_{xy} : a) NO TOPO E b) FUNDO DO REVESTIMENTO NA ACELERAÇÃO E FRENAGEM PARA TRECHOS EM ACLIVE.	152
FIGURA 78 – TENSÕES CISALHANTES S_{xy} : a) NO TOPO E b) FUNDO DO REVESTIMENTO NA ACELERAÇÃO E FRENAGEM PARA TRECHOS EM DECLIVE.....	153

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - ESTIMATIVA DE PRESSÃO DE CONTATO PNEU-PAVIMENTO PARA ALGUNS VEÍCULOS COMERCIAIS ADOTADOS NA CLASSIFICAÇÃO DO DNIT (CONSIDERANDO UMA PRESSÃO DE INFLAÇÃO DE 0,72 MPa E ESRS).	52
TABELA 2 - CLASSIFICAÇÃO DA TEXTURA DE UM PAVIMENTO	53
TABELA 3 - CLASSE DE MICROTTEXTURA	55
TABELA 4 - CLASSES DE MACROTTEXTURA	55
TABELA 5 - VALORES DE IFI.....	57
TABELA 6 - VALORES DOS PARÂMETROS “a” E “b” PARA O CÁLCULO DE “S _p ”	57
TABELA 7 - CONSTANTES PARA OBTENÇÃO DE F ₆₀	58
TABELA 8 - COEFICIENTES DE ATRITO DE PNEUMÁTICOS EM ESTRADAS....	59
TABELA 9 - PROPRIEDADES DA SEÇÃO DO PAVIMENTO.....	83
TABELA 10 - CLASSE DO VEÍCULO EM ESTUDO	85
TABELA 11 - PROPRIEDADES DAS MALHAS GERADAS NO MODELO ESTÁTICO.....	91
TABELA 12 - PROPRIEDADES DA SEÇÃO DO PAVIMENTO NO MODELO DE VALIDAÇÃO.	95
TABELA 13 - PROPRIEDADES DE MALHA DE ELEMENTOS FINITOS PARA ANÁLISE DE CONVERGÊNCIA.....	98
TABELA 14 - NÍVEIS DE ADERÊNCIA DO MODELO.....	99
TABELA 15 - VALOR DE IFI PARA AS SITUAÇÕES DE ADERÊNCIA PROPOSTAS E VALORES DE ATRITO DINÂMICO (FS) PARA AS VELOCIDADES EM ESTUDO.	100
TABELA 16 – RAMPAS MÁXIMAS PARA VIAS URBANAS (%).	101
TABELA 17 – DEFLEXÕES (10 – 2mm) MÁXIMAS NOS PONTOS ANALISADOS DA FIGURA 40.	105
TABELA 18 - DEFLEXÃO VERTICAL NA FACE SUPERIOR DO PAVIMENTO EM COMPARAÇÃO AOS ESTUDOS DE SAAD et al. (2005)	109
TABELA 19 – TABELA RESUMO DAS SIMULAÇÕES REALIZADAS NESTA PESQUISA.	111

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ANFAVEA	Associação Nacional de Fabricantes da Indústria Automobilística Brasileira
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BRT	<i>Bus Rapid Transit</i>
CA	Concreto Asfáltico
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CFL	Courant-Friedrichs-Lewy
CBR	<i>California Bearing Ratio</i>
CNT	Confederação Nacional de Trânsito
CONTRAN	Conselho Nacional de Trânsito
DNIT	Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes
ESRD	Eixo Simples de Rodagem Dupla
ESRS	Eixo Simples de Rodagem Simples
HMA	<i>Hot Mix Asphalt</i>
HMAC	<i>Concreto Asfáltico de Alto Módulo</i>
IFI	<i>International Friction Index</i> ou Índice Internacional de Atrito
IPPUC	Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Curitiba
IRI	Índice Internacional de Rugosidade
ITFT	<i>Indirect Tensile Fatigue Test</i>
ITSM	<i>Indirect Stiffness Steadness Modulus</i>

MEF	Método dos Elementos Finitos
PACCAR	<i>Technical Center in Mount Vernon</i>
PIAF	Posto Integrado Automatizado de Fiscalização
PIARC	<i>Permanent International Association of Road Congress</i>
PPV	<i>Posto de Pesagem de Veículos</i>
RIT	Rede Integrada de Transporte
SIM	<i>Atress in Motion</i>
TRL	<i>Transport Research Laboratory</i>
URBS	Urbanização de Curitiba
USA	Estados Unidos da América
USACE	<i>United States Army Corps of Engineers</i>
VRD	Valor de resistência à derrapagem
VRSPATA	<i>Vehicle Road Surface Pressure Transducer Array</i>
PBT	Peso bruto total
QCM	<i>Quarter Car Model</i>
WIN	<i>Weigh in Motion ou Pesagem em Movimento</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

A	área de contato pneu-pavimento
a	aceleração do veículo
A_f	área frontal do veículo
[B]	matriz que depende do tipo de elemento
b_x, b_y, b_z	componentes de força de corpo
β	frequência de carga aplicada
c, C_{crit}	constante de amortecimento, amortecimento crítica
[C]	matriz de amortecimento
C_D	coeficiente de arrasto
[D]	matriz de elasticidade
DC	coeficiente de decaimento
e	distância horizontal entre o eixo da roda e o centro de pressão da área de contato
E	módulo de elasticidade
ϵ_c	componente de deformação horizontal em compressão
ϵ_z	componente de deformação vertical
ϵ_t	componente de deformação horizontal em tração
\dot{e}	taxa de conservação de energia
\dot{e}_{ij}	taxa de deformação
ϵ	amortecimento
[d]	vetor global de deslocamento nodal
d_f	deslocamento de frenagem do veículo
Δt	intervalo de tempo na integração

F_{ACT}	razão entre os coeficientes estáticos para dinâmicos
F_{at}	resistência ao rolamento
$\{f\}$	vetor global de forças nodais
$F_i(t)$	força de inércia
$\{f^e\}$	vetor elementar de forças nodais
$F_D(t)$	força de amortecimento
$F_e(t)$	força elástica
$F(t)$	forças externas
F_R	força resultante
FS	valor de atrito para qualquer velocidade de deslocamento
F_{60}	atrito harmonizado de referência a 60km/h
FR_{60}	velocidade de deslizamento a 60km/h
F_{ext}	força externa
F_{int}	força interna
F_{res}	força resistente
F_w	força resistente aerodinâmica
F_p	força resistente ao aclave
F_M	força fornecida pelo motor
f	frequência natural
g	aceleração da gravidade
H	espessura das camadas do pavimento
i	inclinação longitudinal da rodovia
$[K]$	matriz de rigidez global
$[K^e]$	matriz de rigidez do elemento

k	constante elástica
l	menor dimensão característica do elemento finito
m	massa
MR	Módulo de Resiliência
[M]	matriz de massa
μ_R	coeficiente de atrito estático
μ_d	coeficiente de atrito dinâmico
N	força vertical resultante ou normal
p	pressão de enchimento do pneu
$p(t)$	carregamento harmônico
P	carga da roda
ρ, ρ_0	massa específica, massa específica inicial
ρ_a	densidade do ar
q	pressão média de contato pneu pavimento
r	raio do pneu carregado
t	tempo
T	período
T_x	medida de macrotextura
σ_x	tensão horizontal
σ_{ij}	tensor de tensões de cauchy
σ_z	tensão vertical
S	velocidade de referência do equipamento na determinação do VRD
S_p	constante de referência da velocidade
$S_z,$	tensão vertical no eixo y

S_x, S_y	tensão horizontal nos eixos x e y
S_x	tensão cisalhantes no plano xy
tf	tempo de simulação
$\{u^e\}$	vetor elementar de deslocamento nodal
$\{u(t)\}$	vetor deslocamento
$\{\dot{u}(t)\}$	vetor velocidade
$\{\ddot{u}(t)\}$	vetor aceleração
U_y	deflexão vertical na superfície
v_{ang}	Velocidade angular
v_c	velocidade do som associada à propriedade mecânica do meio
v_{desl}	Velocidade de deslocamento do pneu
V_{rel}	taxa de deslizamento
V_i	velocidade inicial modular
V_f	velocidade final de frenagem
V_w	velocidade do vento
V, V_0	volume em determinado espaço de tempo, volume inicial
ν	coeficiente de poisson
$\hat{\omega}$	frequência de excitação
ω	frequência de oscilação
ω_0	frequência de vibração amortecida
$\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z}$	aceleração nos eixos coordenados x, ye z

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	25
1.1 OBJETIVOS	26
1.2 JUSTIFICATIVA	26
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	31
2 REVISÃO DA LITERATURA	32
2.1 EFEITOS DINÂMICOS EM PAVIMENTOS FLEXÍVEIS	32
2.1.1 Efeito da pressão de inflação dos pneus	35
2.1.2 Efeitos da rugosidade da camada asfáltica	38
2.2 EFEITO DAS CARGAS HORIZONTAIS NA DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES EM PAVIMENTOS ASFÁLTICOS	39
2.2.1. Efeito da declividade do pavimento	43
2.3 DEFEITOS DE SUPERFÍCIE COMUNS EM REGIÕES SUJEITAS À ACELERAÇÃO E FRENAGEM DE VEÍCULOS	45
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	49
3.1 ANÁLISE DAS TENSÕES ATUANTES EM PAVIMENTOS DEVIDO À APLICAÇÃO DE CARGAS DINÂMICAS.....	49
3.1.1 Pressão de contato pneu-pavimento e os danos provocados nos revestimentos	50
3.2 MEDIDAS DE ADERÊNCIA ENTRE PNEU E O PAVIMENTO	53
3.2.1 Medidas de aderência: microtextura e macrotextura	53
3.2.2 Medida de aderência: coeficientes de atrito	56
3.3 MÉTODO NUMÉRICO DE SOLUÇÃO	60
3.3.1 Método dos elementos finitos	60
3.4 PROBLEMAS DINÂMICOS	62
3.4.1. Métodos de solução para sistemas dinâmicos: métodos explícitos e implícitos	64
3.4.2 Estratégia de solução dinâmica explícita	64
3.4.3 Solução explícita: métodos de integração no tempo com diferenças centrais..	67
3.4.4 Estabilidade e convergência do método de integração explícito	68
3.4.5 Problemas de contato.....	69
3.4.5.1. Contato com atrito	72
3.5 DINÂMICA DA ESTABILIDADE DE VEÍCULOS	73
3.5.1 Parâmetros de aceleração de veículo	75

3.5.2 Frenagem em trecho retilíneo plano	76
3.5.3 Frenagem em trecho retilíneo em aclave	77
3.5.4 Frenagem em trecho retilíneo em declive	79
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	81
4.1 ETAPA 1 - DEFINIÇÃO DO MODELO E TIPO DE ANÁLISE.....	81
4.1.1 Tipo de análise e ferramenta computacional empregada	82
4.1.2 Definição do modelo	82
4.1.3 Especificação dos parâmetros do modelo para o pneu	92
4.1.4 Especificação dos parâmetros do modelo para validação da pesquisa	93
4.2 ETAPA 2 - DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DA ESTRADA E DO PNEU	98
4.2.1 Definição das velocidades diretrizes	98
4.2.2 Aderência pneu-pavimento	99
4.2.3 Definição das pressões de inflação do pneu	100
4.2.4 Definição das declividades da pista	100
4.2.5 Definição dos parâmetros de aceleração e frenagem.....	101
4.2 LIMITAÇÕES DA PESQUISA	102
5. RESULTADOS DA PESQUISA.....	103
5.1 VALIDAÇÃO DA PESQUISA	103
5.2 RESULTADOS DO MODELO PROPOSTO	110
5.2.1 Resultados do modelo com inclinação longitudinal $i=0\%$ e velocidade constante	112
5.2.1.1. Tensões principais para $i=0\%$ e velocidades contantes.....	122
5.2.2 Resultados do modelo com aclave e declive para velocidade constante.....	125
5.2.2.1. Tensões principais para o aclave e declive e velocidades contantes	134
5.2.3 Resultados do modelo com a inserção de frenagem e aceleração do veículo para a declividade do pavimento $i=0\%$	137
5.2.3.1. Tensões principais para trechos com declividade $i = 0\%$, na aceleração e frenagem.....	145
5.2.4 Resultados do modelo com a inserção de frenagem e aceleração do veículo para trechos em aclave e declive.....	147
6. CONCLUSÃO	154
6.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	157
REFERÊNCIAS	159

ANEXO 1 – DISTÂNCIA DE FRENAGEM (d_f) E ACELARAÇÃO DO PNEU EM FUNÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO (μ), VELOCIDADE INICIAL (v_i) E DECLIVIDADE DA PISTA (i).	167
ANEXO 2 – DISTÂNCIA NECESSÁRIA (d_a) PARA ATINGIR A VELOCIDADE FINAL (v_f) PARA UMA POTÊNCIA DO MOTOR DO VEÍCULO DE 210 CV, DECLIVIDADE DA PISTA (i) E RUGOSIDADE MÉDIA ($\mu=0,68$)	168

1 INTRODUÇÃO

Muito se tem discutido sobre a durabilidade dos pavimentos flexíveis frente às diversas solicitações de tráfego especialmente em vias e corredores de ônibus urbanos onde, devido às peculiaridades e circunstâncias do trânsito, os motoristas são obrigados a modificar constantemente a velocidade dos veículos, ajustando-a conforme o fluxo. Tais circunstâncias podem provocar tensões horizontais significativas nos pavimentos, evidenciadas pelas manifestações patológicas que aparecem em regiões próximas a lombadas, semáforos, travessias, curvas ou interseções, rampas, paradas de ônibus ou pedágios. Estas tensões por sua vez, juntamente com o carregamento vertical, como verificado por Farias (1997) citado por Franco (2007), resultam em tensões de tração na camada de revestimento que podem atingir valores expressivos, próximos à superfície do pavimento.

Por vezes é possível identificar, em pavimentos flexíveis ou asfálticos, ondulações transversais ao eixo da via (FIGURA 1) da ordem de centímetros. Segundo o DNIT 005/2003 tratam-se de corrugações devidas à fluência da massa asfáltica. Este tipo de defeito estaria associado às tensões cisalhantes horizontais geradas pelos veículos em áreas submetidas à aceleração ou desaceleração de veículos (CNT, 2018).

FIGURA 1 – CORRUGAÇÕES DEVIDO A TENSÕES CISALHANTES HORIZONTAIS DOS VEÍCULOS



FONTE: CNT (2018).

No entanto, apesar de significativos, esses efeitos dinâmicos são negligenciados na maior parte dos procedimentos atuais de projeto e também na

avaliação de pavimentos flexíveis, onde geralmente apenas as cargas normais à superfície do pavimento são consideradas, provocando um impacto considerável no desempenho mecânico do pavimento (KHAVASSEFAT et al., 2014).

1.1 OBJETIVOS

Tendo em vista os defeitos apontados anteriormente, especialmente em corredores de ônibus, a presente pesquisa tem por objetivo principal, simular, em termos de tensões e deflexões, as solicitações dinâmicas de veículos, sobre os pavimentos flexíveis devido à atuação de cargas verticais e horizontais (aceleração e frenagem) em determinadas condições de serviço.

Como objetivos secundários pretendem-se:

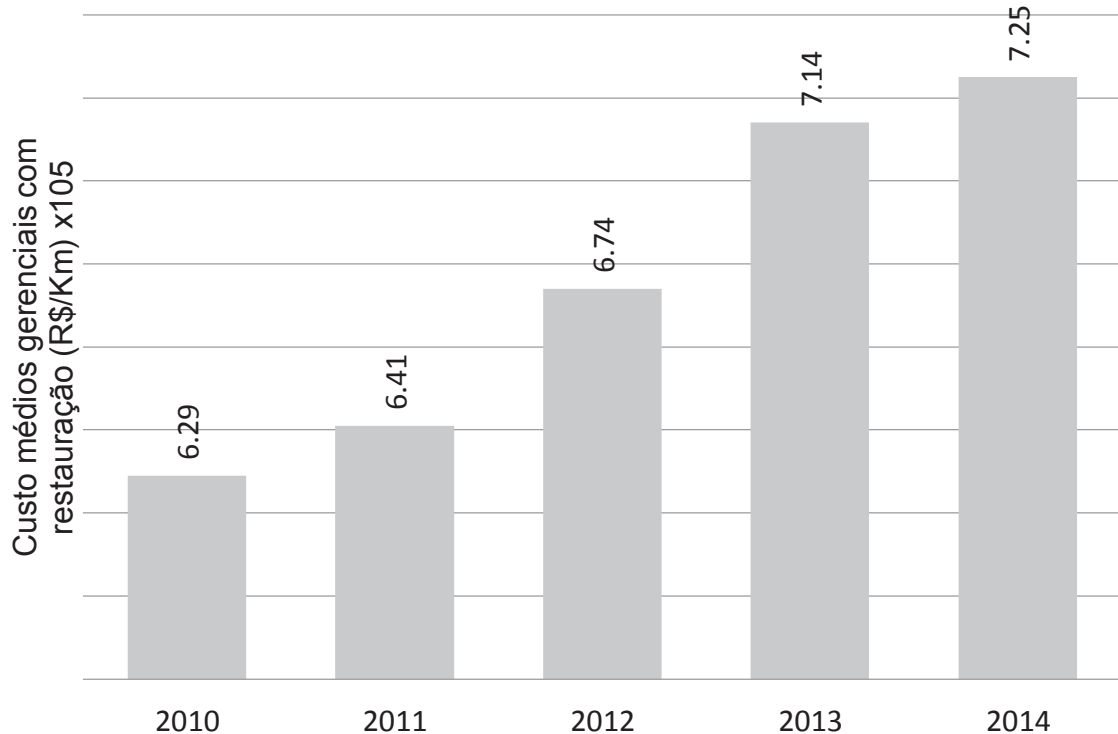
- elaborar um modelo numérico, dinâmico, em Elementos Finitos 3D, para o estudo de pavimentos flexíveis;
- determinar os efeitos da aceleração e frenagem dos veículos variando algumas características do pavimento tais como a rugosidade e declividade da pista;
- quantificar os efeitos dos fatores aceleração e frenagem dos veículos variando as características dos mesmos tais como a inflação dos pneus e a velocidade.

1.2 JUSTIFICATIVA

O pavimento asfáltico, se comparado com outras estruturas de engenharia, possui uma vida útil usualmente entre 10 a 20 anos. As cargas atuantes são variáveis e a previsão do comportamento do tráfego ao longo do tempo é aproximada. Estes fatores, juntamente com a ação do tempo ou do tráfego, afetam a integridade e diminuem a vida útil do pavimento (MEDINA e MOTTA, 2015). Tais dificuldades têm desafiado projetistas e pesquisadores a desenvolver novos métodos de dimensionamento ou materiais, reduzindo assim os custos com manutenção e reparo, os quais, desde 2010, vêm aumentando (MATTOS, 2015).

Para se ter uma ideia do problema, em novembro de 2010 foram gastos com restauração pelo DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes), em média, R\$ 629.000,00/Km e em novembro de 2014, R\$ 725.000,00/Km, sofrendo um aumento aproximado de 15%, conforme dados representados na FIGURA 2.

FIGURA 2 - CUSTOS MÉDIOS GERENCIAIS DO DNIT COM RESTAURAÇÃO DO MODAL RODOVIÁRIO ENTRE OS ANOS 2010 E 2014 EM NOVEMBRO DE CADA ANO.

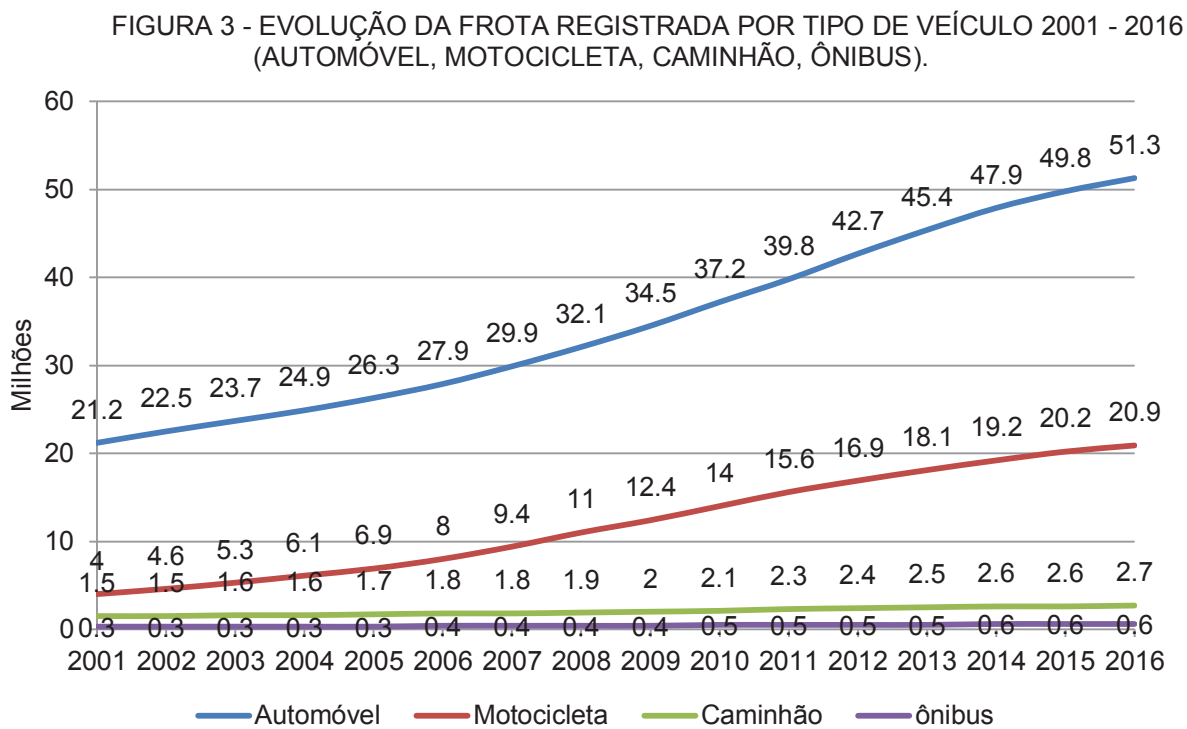


FONTE: Adaptado de Mattos (2015).

Projetos mais completos, que considerem todas as tensões atuantes e fatores intervenientes no pavimento, poderiam vir a otimizar a estrutura do pavimento e incrementar sua vida útil reduzindo esses custos com restauração. Além disso, se verificaria uma redução na extração de matéria-prima, a eliminação da necessidade de concepção de bota-fora (ou depósitos de resíduos provenientes da restauração de pavimentos) e a redução do consumo energético na produção e transporte dos materiais.

Estes benefícios econômicos e ambientais poderão refletir também nas vias municipais, objeto desse estudo, especificamente em corredores de ônibus ou canaletas. A implantação deste tipo de via tem sido adotada devido ao aumento da frota de veículos nos últimos anos. De acordo com a Confederação Nacional de Transportes (CNT, 2017), a frota de automóveis aumentou de 21,2 para 51,3 milhões, um aumento de 141,6%; a de ônibus passou de 0,3 para 0,6 milhões ou 119,5% e a de caminhões, de 1,5 para 2,7 ou 84,3%, de 2001 para 2016, como mostra a FIGURA 3 (CNT, 2017). Este fator, como lembram Medina e Motta (2015),

juntamente com o crescimento das metrópoles brasileiras, tem demandado maior uso de transporte de massa e, conseqüentemente, maior investimento em infraestrutura. Isso tem levado inúmeras cidades no país a implantar os chamados corredores de ônibus em grandes extensões.



FONTE: Adaptado de CNT (2017).

A cidade de Curitiba, por exemplo, tem sido considerada modelo no sistema de transporte público e inspirou diversas cidades no Brasil e no mundo (EL PAÍS, 2016). Sua Rede Integrada de Transporte (RIT), em termos de infraestrutura, conta atualmente com 83 quilômetros de canaletas (FIGURA 4), vias ou faixas exclusivas para ônibus, caracterizando os chamados corredores de transporte, em um total de 1.280 ônibus da frota operante e 303.769 quilômetros percorridos em média por dia útil (URBS, 2017a; URBS; 2017b).

Esta necessidade de faixas exclusivas para ônibus e a canalização do tráfego em “corredores” exige especial atenção em relação aos efeitos no pavimento das cargas adicionais oriundas da frenagem e aceleração dos veículos, especialmente em pontos de parada de ônibus onde é comum verificar deformações plásticas ou permanentes dos revestimentos asfálticos (MEDINA e MOTTA, 2015).

FIGURA 4 - CORREDOR DE ÔNIBUS BRT (*BUS RAPID TRANSIT*) NA CIDADE DE CURITIBA (AVENIDA SETE DE SETEMBRO)



FONTE: A autora (2017).

No entanto, visto que os métodos empíricos, ainda amplamente empregados no dimensionamento de pavimentos flexíveis, não levam em consideração esses efeitos, tem-se recorrido à execução de trechos em pavimento rígido (ou de concreto), especialmente nas paradas de ônibus e interseções (FIGURA 5). Porém, o pavimento rígido, cujos métodos de dimensionamento disponíveis também não consideram os efeitos dinâmicos, mas conhecido por sua maior durabilidade e menor necessidade de manutenção, possui custo maior de implantação (BENEDETTI et al., 2013).

FIGURA 5 - PAVIMENTO RÍGIDO a) EM PARADA DE ÔNIBUS EM CURITIBA – AV. SETE DE SETEMBRO b) PRÓXIMO À INTERSEÇÕES DE CORREDORES DE ÔNIBUS BRT - CRUZAMENTO DA AV. SETE DE SETEMBRO COM A AV. MARECHAL FLORIANO PEIXOTO



a)

b)

FONTE: A autora (2017).

Assim, devido a grande incidência de defeitos em pavimentos flexíveis e os altos custos com reparo, ressalta-se a importância da previsão das cargas dinâmicas e seus efeitos sobre o pavimento haja vista a ocorrência de notáveis alterações, desde a década de 70, do tráfego e das configurações de eixos e dimensões dos veículos. Nas rodovias, por exemplo, já prevendo os danos gerados nessas condições, o DNIT propõe um novo modelo de pesagem por meio da criação do PIAF (Posto Integrado Automatizado de Fiscalização). Este modelo define um novo conceito de pesagem de veículos de carga e de passageiros através do uso de sistemas WIM (*Weigh in Motion* ou Pesagem em Movimento), o qual difere do então modelo de pesagem adotado no PPV (Posto de Pesagem de Veículo), desde 2007 (BARBOSA, 2016).

Por outro lado, apesar de inúmeras pesquisas voltadas ao aumento da durabilidade dos pavimentos terem surgido e alguns avanços terem sido obtidos, ainda há alguns problemas centrais a serem resolvidos, especialmente para seções de vias sujeitas à aceleração e frenagem de veículos, bem como vias de tráfego lento, como ocorre em trecho em aclave, próximo a interseções e paradas de ônibus, e que influenciam na ocorrência dos afundamentos, escorregamentos e na ruptura das camadas de concreto asfáltico (CA) resultando em baixo desempenho do pavimento, deterioração ou potencial desperdício da capacidade dos materiais.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho foi dividido em seis capítulos descritos a seguir:

Capítulo 1 – Introdução: aqui se apresenta ao leitor o tema, expondo os objetivos e a justificativa que fundamentaram o presente trabalho.

Capítulo 2 – Revisão da literatura: citam-se trabalhos prévios que abordaram o comportamento mecânico dos pavimentos flexíveis frente às diversas solicitações dinâmicas do tráfego variando as características do pavimento ou do veículo.

Capítulo 3 – Fundamentação teórica: são apresentados conceitos teóricos e terminologias em termos de pavimentos flexíveis e da análise numérica em elementos finitos, bem como conceitos referentes à análise dinâmica empregada.

Capítulo 4 – Materiais e Métodos: descreve-se detalhadamente os materiais e métodos utilizados nesta pesquisa bem como a definição dos parâmetros (características do revestimento, pneu e meio externo), a seção do pavimento flexível a ser analisada e os parâmetros empregados para validação do modelo computacional.

Capítulo 5 – Resultados da pesquisa: apresentam-se os resultados obtidos na análise computacional para a validação da pesquisa e demais simulações realizadas.

Capítulo 6 – Conclusão: encerra-se o trabalho com a apresentação das conclusões mais importantes da dissertação e das sugestões de temas para futuras pesquisas

2 REVISÃO DA LITERATURA

A seguir são apresentados os principais trabalhos precursores na análise dinâmica de pavimentos, os quais abrangeram estudos que vão desde a influência da pressão de inflação do pneu até estudos mecanicistas (baseados na teoria da elasticidade) sobre os efeitos das cargas horizontais na distribuição de tensões.

2.1 EFEITOS DINÂMICOS EM PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

Um dos primeiros métodos consagrados para dimensionamento de pavimentos flexíveis, datado da década de 1930, foi o Método CBR (*California Bearing Ratio*), desenvolvido pelo Departamento de Estradas da Califórnia (*California Division of Highways*) e posteriormente aprimorado pelo Corpo de Engenheiros do Exército Americano (USACE – *United States Army Corps of Engineers*) com o propósito de oferecer uma metodologia rápida e prática para os projetos de pistas de aeródromos com fins militares durante a Segunda Guerra Mundial. O método propunha a determinação das espessuras das camadas sucessivas do pavimento, começando pela proteção do subleito, em função da qualidade dos materiais disponíveis em relação a uma brita padrão (AHLVIN, 1991). O método foi e ainda é muito utilizado devido a sua praticidade, no entanto desconsidera fenômenos hoje reconhecidamente importantes e que afetam o comportamento da estrutura em serviço, tais como a fadiga. Durante o movimento, um veículo freando e acelerando, por exemplo, transfere ao pavimento esforços significativos que também não são previstos pelo método CBR e outros que o seguiram como o Método do DNIT (SOUZA, 1966), da AASHTO (1993), o MEPDG (2008), Medina (FRANCO, 2007), dentre outros.

Somente por volta da década de 50, devido ao desenvolvimento da tecnologia informática e à popularização do Método dos Elementos Finitos (MEF), a partir dos anos 1970, é que se tornou possível a realização de estudos mais sofisticados sobre os efeitos dinâmicos em estruturas rodoviárias (SCHMIDT e MAZZILLI, 2017). Se bem empregado, o MEF permite a simulação de estruturas complexas e fornece resultados numéricos confiáveis de maneira simples e realista.

A partir desta época diversos estudos mostraram que as cargas estáticas são mais prejudiciais aos pavimentos do que as cargas móveis. Collop et al. (1995), em

uma abordagem viscoelástica linear, elaboraram um modelo teórico simples, baseado em dados de ensaios de rotina, para prever as deformações permanentes em pavimentos flexíveis. As previsões da profundidade dos afundamentos foram comparadas com dados experimentais em escala real de pistas desenvolvidas na França. Os efeitos da temperatura foram incluídos e, após um período inicial de compactação, os pesquisadores verificaram que a deformação permanente devido à passagem da roda, era proporcional à carga do eixo estático e inversamente proporcional à velocidade do veículo.

Posteriormente, Chatti et al. (1996) desenvolveram uma pista experimental com uma seção de CA no centro técnico PACCAR (*Technical Center in Mount Vernon*) em Washington, equipando-a com medidores de deformações na superfície e ao longo da estrutura do pavimento. Para testá-la usaram um caminhão instrumentado operado em diferentes velocidades e com diferentes pressões de pneu. Os resultados de campo indicaram que os efeitos da velocidade do veículo e da pressão dos pneus são significativos: o aumento da velocidade do veículo de 2,7 km/h para 64 km/h causou uma diminuição, ao longo do trecho analisado, de aproximadamente 30 a 40 por cento nas deformações na face inferior da camada de CA, a qual tinha 137 mm de espessura. O efeito da velocidade nas deformações transversais foi menor, causando apenas uma redução de 15 a 30%.

Um pouco mais tarde, Helwany et al. (1998), em uma abordagem semelhante, no entanto pretendendo ilustrar a utilidade do MEF na análise de sistemas de pavimentação de três camadas, simularam as respostas em pavimentos sujeitos a cargas de eixo com diferentes pressões de pneu, diferentes configurações de carga e viajando a distintas velocidades. Uma variedade de modelos constitutivos dos materiais (elástico linear, elástico não linear e viscoelástico) foram empregados para descrever o comportamento dos materiais de pavimentação. Os pesquisadores verificaram que a tensão vertical máxima na parte inferior da camada CA ocorre nas menores velocidades, ou seja, a tensão vertical máxima para a velocidade de 8 km/h foi aproximadamente 7% maior do que para uma velocidade de 105 km/h. Do mesmo modo, as deformações verticais, longitudinais, transversais e de cisalhamento foram substancialmente menores na maior velocidade.

Na década seguinte, Chen et al. (2004), observando o aumento severo dos afundamentos em rodovias de Taiwan, empregaram uma análise mecanicista-

empírica em um modelo que considerava a mudança das propriedades dos materiais na progressão dos afundamentos ao longo do tempo e do acumulo de tensões plásticas de compressão, em todas as camadas, com base na carga de tráfego. O modelo foi validado a partir de dados obtidos de testes em serviço, em diferentes momentos, em uma seção de pavimento construída em 1996 pelo Departamento Nacional de Estradas de Taiwan. Além disso, uma simulação dinâmica tridimensional em MEF foi estabelecida para prever as respostas do pavimento em termos de deformação permanente. A velocidade de tráfego mostrou um impacto significativo nas tensões verticais no topo da camada de revestimento, e sua influência foi consistente com aquelas medidas por outros pesquisadores.

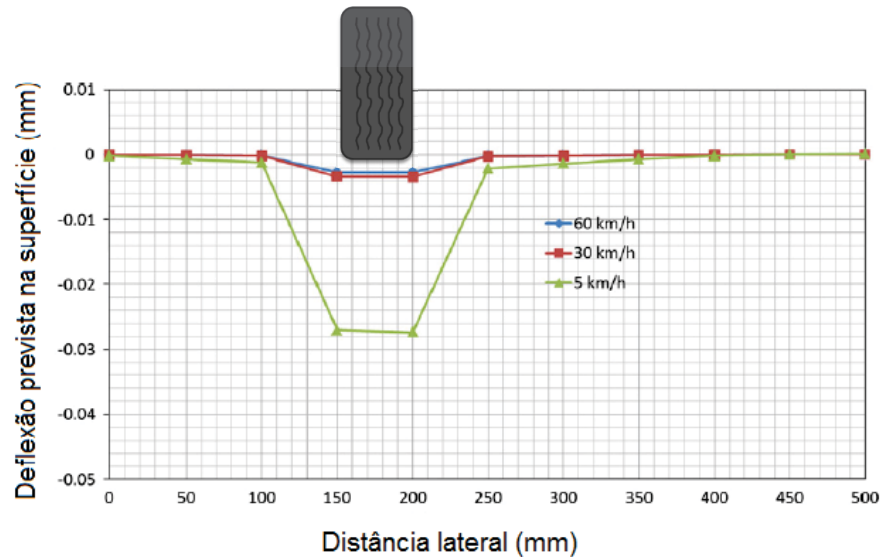
Três anos mais tarde, consolidado o emprego da análise tridimensional em MEF, Yoo e Al-qadi (2007) analisaram o efeito de cargas dinâmicas transientes em pavimentos flexíveis. Os resultados dos estudos mostraram que o histórico das respostas do pavimento, calculadas na análise dinâmica, se aproxima com as medições feitas em campo. E ainda, que as deformações transversais e longitudinais de tração na face inferior do CA e a tensão de compressão no topo do subleito são subestimadas quando os efeitos da inércia e as forças de amortecimento exercidas pela carga dinâmica local transitória são ignorados.

Mais recentemente, Zhi et al. (2012), a partir de modelos de dano à fadiga e critérios de falha estabelecidos com base nos testes de ensaios de fadiga por tração indireta (ITFT - *Indirect Tensile Fatigue Tests*) e módulo resiliência por tração indireta (ITSM - *Indirect Stiffness Steadness Modulus*) para materiais de CA com diferentes tipos de modificadores poliméricos, realizaram uma análise em MEF para estudar o desempenho resistivo à fissuras dos materiais da camada de revestimento em uma estrutura de pavimento flexível. Ao se comparar os efeitos do tráfego em movimento a uma velocidade lenta (5 km/h), intermediária (30 km / h) e uma velocidade relativamente alta (60 km/h) (FIGURA 6), os pesquisadores observaram que a deflexão sobre o pavimento reduz consideravelmente quando a velocidade aumenta de 5 km/h para 30 km/h. No entanto, a diferença entre as deflexões do pavimento para velocidades de 30 km/h e 60km/h é relativamente pequena.

Enfim, pode-se verificar que, independente do tipo de análise, seja ela experimental ou empregando modelos numéricos como o MEF, os diversos pesquisadores concordam que o aumento da velocidade de deslocamento da carga

de tráfego, promove uma redução na intensidade dos danos transmitidos ao pavimento.

FIGURA 6 - EFEITO DA VELOCIDADE NA DEFLEXÃO DO PAVIMENTO PARA DIVERSAS DISTÂNCIAS LATERAIS DO CENTRO DE APLICAÇÃO DA CARGA



FONTE: Adaptado de Zhi et al. (2012).

2.1.1 Efeito da pressão de inflação dos pneus

Praticamente no mesmo período em que começaram os estudos dos efeitos dinâmicos sobre o pavimento, percebeu-se que, além da variação da velocidade, a pressão de inflação dos pneus também tem influência sobre os danos gerados no pavimento. Citam-se os estudos de Eisenmann e Hilmer (1987), Tielking et al. (1987), Kim et al. (1989), Sebaaly e Tabatabaee (1989), Fernandes Jr et al. (1995), Chatti et al. (1996), Beer (1996) Beer et al. (1997), Helwany et al. (1998), Myers et al. (1999), Mulungye et al. (2007), Su et al. (2008), Dinegdae e Birgisson (2016), entre outros, como exemplo de trabalhos nessa linha.

No final da década de 1980, Tielking et al. (1987), valendo-se já do MEF, desenvolveram um modelo de pneu no programa computacional *ILLIPAVE*, objetivando o cálculo da pressão de contato pneu-pavimento. Os resultados do estudo indicaram que, para o modelo de pneu 10.00-20 (pneu de caminhão de estrutura diagonal), a pressão mais alta na região de contato pneu-pavimento é aproximadamente duas vezes a pressão de inflação (517 kPa e 862 kPa, pressões inflacionárias consideradas). Descobriu-se ainda, que a pressão de contato não

uniforme do pavimento, como produzida por um pneu real, causa tensões no pavimento significativamente maiores do que as calculadas com as suposições convencionais até então empregadas de pressão de contato uniforme. Os estudos de Tielking et al. (1987), limitaram-se a pavimentos esbeltos, uma vez que os efeitos da pressão dos pneus são mais pronunciados em seções mais delgadas.

Dois anos mais tarde, Kim et al. (1989), apresentaram os resultados de uma investigação sobre a influência do aumento da pressão dos pneus sobre o desempenho de fadiga e o afundamento em pavimentos asfaltados. Os resultados das suas análises, obtidas via teoria da elasticidade aplicada a um sistema multicamadas (ELSYM5), foram obtidos de dois modelos de rodovias típicas de Oregon, Estados Unidos. Os resultados mostraram que, à medida que a pressão aumenta, a tensão máxima de tração no fundo da camada de asfalto aumenta e que um aumento de 25% na pressão corresponde a um aumento de 40 a 60% da carga equivalente para um ESRD (eixo simples de rodagem dupla), ou seja, uma carga de aproximadamente 80 kN, com o aumento da pressão de inflação, corresponderia a atuação de uma carga equivalente a 150 kN.

No mesmo ano, Sebaaly e Tabatabaee (1989), empregando pneus radiais simples de base larga, testaram em laboratório três níveis de pressões de inflação e cargas por eixo. Foram medidas as áreas de contato bruta e líquida, deflexão do pneu e pressão de contato. Esta última foi usada em uma solução mecanicista, em uma versão modificada do programa de computador *BISAR* para prever vários parâmetros de resposta do pavimento bem como tensões de tração na face inferior da camada de CA, tensões de compressão na interface da camada asfáltica e a deflexão da superfície. Foram avaliados ainda, os efeitos das pressões de inflação e das cargas nos eixos para diversas combinações de pneus e espessuras de asfalto. Os resultados mostraram que o efeito da inflação a pressão foi pronunciado apenas quando a camada de asfalto era de aproximadamente 50 mm. Para pavimentos com camadas de asfalto de 100, 150 e 200 mm, o efeito da pressão inflacionária tornou-se menos pronunciado.

Um pouco mais tarde, porém, Fernandes Jr et al. (1995), visando investigar os efeitos de fatores como a carga por eixo, a pressão de enchimento dos pneus, o tipo de rodagem, o tipo de pneu e a distribuição da pressão de contato pneu-pavimento, investigam oito estruturas de pavimento e cinco respostas estruturais: deflexão superficial, deformação horizontal de tração e deformação vertical de

compressão na fibra inferior do revestimento asfáltico, deformação vertical de compressão no topo do subleito e tensão horizontal de tração na fibra inferior da camada tratada com cimento. Para tal, empregaram os programas computacionais *ELSYM5*, para análise elástico-linear, e *ILLI-PAVE*, para análise elástica não-linear. Em termos da influência da pressão de inflação sobre a estrutura do pavimento, os autores verificaram que ao aumentar a pressão de inflação de 563 kPa (80 psi) para 844 kPa (120 psi), a vida útil de um pavimento é reduzida à metade. Outros estudos desenvolvidos pelos autores apontam que o mesmo acréscimo de pressão de enchimento ocasiona uma elevação da ordem de 6,0% nos custos de manutenção de pavimentos.

Um ano após a divulgação do trabalho de Fernandes Jr et al. (1995), Chatti et al. (1996), citado anteriormente, observaram que uma redução da pressão dos pneus de 620 kPa (90 psi) para 214 kPa (30 psi) causou uma diminuição de aproximadamente 20 a 45% nas deformações horizontais na parte inferior da camada de concreto asfáltico. O efeito da pressão nas tensões superficiais foi significativamente menor, causando apenas uma redução de 5 a 20%. Os autores observam ainda que há uma relação entre os efeitos da pressão de inflação e a velocidade de deslocamento da carga, ou seja, o efeito de pressão foi reduzido a velocidades mais altas.

Beer et al., (1997), dando continuidade a estudos anteriores (BEER, 1996), visando prever as tensões de contato entre o pneu e o pavimento, desenvolveram equações que fornecem a amplitude dessas tensões com base na pressão de enchimento dos pneus e a carga para sete tipos de pneu diferentes. Essas equações por sua vez, foram obtidas a partir da quantificação de tensões tridimensionais de contato pneu-pavimento com o auxílio de um transdutor de pressão (VRSPTA - *Vehicle-Road Surface Pressure Transducer Array*), desenvolvido para medir tensões de contato sob cargas móveis, ou seja, tensões em movimento (SIM – *Stress In Motion*). Os pesquisadores verificaram que a pressão de contato vertical no centro do pneu é governada pela pressão de inflação dos pneus, enquanto a carga do pneu controla as pressões nas bordas do pneu. Estas descobertas, além de maior esclarecimento da relação carga e tensão de contato, passaram a ter implicações importantes em projetos de pavimentos asfálticos com camadas de revestimento mais finas.

Posteriormente Myers et al. (1999), observou que, não só a pressão de inflação tem influência sobre a degradação do pavimento, como também o tipo e estrutura do pneu. Os pesquisadores realizaram medições de tensões de contato para pneus de caminhões do tipo diagonal, radial e de base larga, para várias cargas e pressões de inflação. Verificou-se que as tensões de contato variam significativamente para os diferentes tipos de pneus investigados e que, na verdade, a estrutura do pneu parece ter uma maior influência sobre as tensões de contato do que a variação da carga ou de inflação para um determinado tipo de pneu.

Su et al. (2008), em um modelo em 3D em FEM utilizando o programa ANSYS, para um ESRD, verificaram que tanto a pressão dos pneus como a carga vertical têm um efeito significativo também sobre a tensão de cisalhamento, sendo que a carga vertical possui uma influência mais pronunciada dentre ambas. Mais recentemente, Dinegdae e Birgisson (2016) verificaram que quanto maior a pressão de inflação de pneus, mais grave é o dano resultante, interferindo de modo significativo no desempenho previsto de trincas por fadiga em pavimentos asfálticos, confirmando os resultados dos estudos anteriores.

Portanto, o que se pode concluir é que a pressão de inflação, associada aos demais fatores, como o tipo e a intensidade da carga, o tipo de rodagem, o tipo de pneu e a distribuição da pressão de contato pneu-pavimento, compreende um dos inúmeros mecanismos responsáveis pela degradação dos pavimentos, nomeadamente fissuração e o afundamento.

2.1.2 Efeitos da rugosidade da camada asfáltica

Concomitantemente aos estudos anteriormente citados, diversas pesquisas abordaram outros fatores que, associados ou não aos anteriormente analisados, também têm influência sobre o comportamento e intensidade das tensões no pavimento como é o caso da condição da pista expressa em termos da rugosidade.

Saleh et al. (2000), Liu (2001), Silva (2004), Shi e Cai (2009), Agostinacchio et al. (2014) e Khavassefat et al. (2014), objetivando a análise de pavimentos com diferentes rugosidades, verificaram que uma superfície áspera pode provocar tensões elevadas na camada de revestimento, o que por sua vez pode impactar de maneira significativa na vida útil da estrutura, especialmente quando o nível de manutenção é baixo.

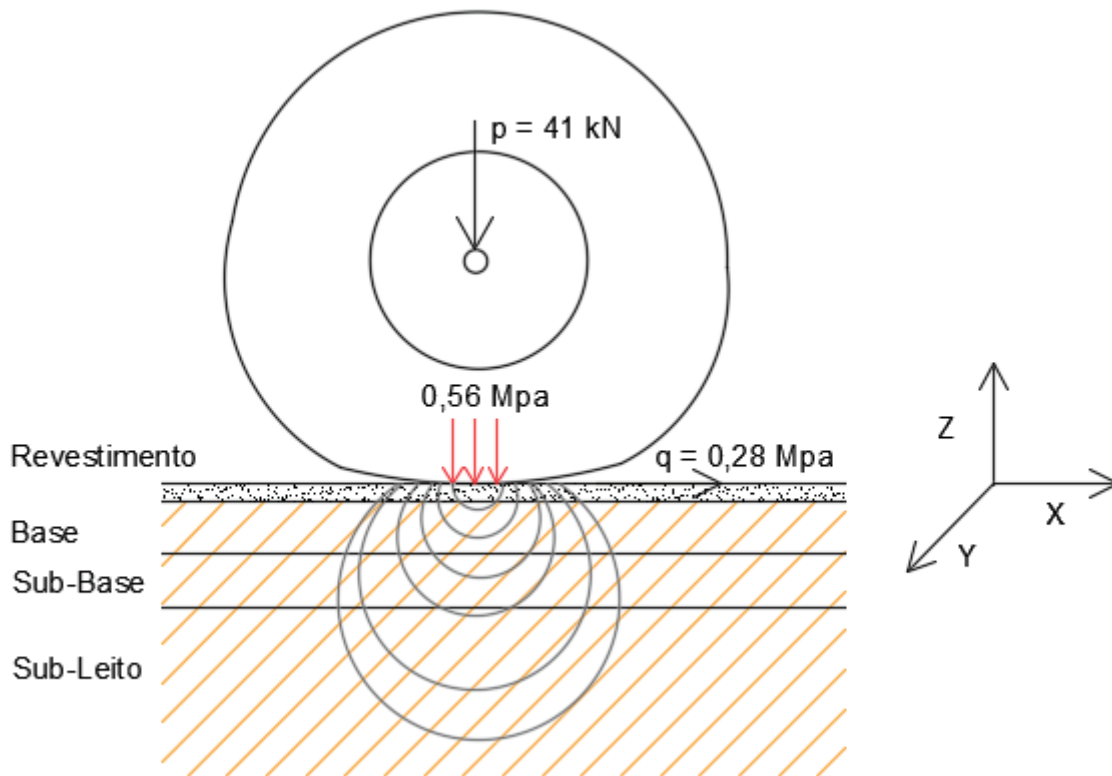
Nessa linha de pesquisa, destaca-se o trabalho de Saleh et al. (2000) que desenvolveram um modelo mecanicista para uso em projeto e avaliação de pavimentos flexíveis. O modelo emprega a análise dinâmica para estimar o perfil das forças dinâmicas e a análise estrutural por elementos finitos para estimar a alteração da rugosidade da superfície do pavimento para cada repetição de carga, fazendo uso do fato de que a aspereza do pavimento altera a magnitude das forças dinâmicas aplicadas no pavimento e que as forças dinâmicas alteram a rugosidade da superfície. Concluíram assim que quando o pavimento é inicialmente liso, a taxa de aumento da rugosidade com as repetições de carga é menor devido ao menor efeito dinâmico das cargas do veículo. Porém, quando o pavimento é inicialmente rugoso, essa taxa de aumento da rugosidade é maior devido à maior interação entre o veículo e o pavimento e, conseqüentemente, maiores cargas dinâmicas do veículo.

Os resultados dos diversos pesquisadores apontados neste item mostraram que os efeitos dinâmicos na interação veículo-estrada podem ter uma profunda influência sobre as tensões induzidas em pavimentos flexíveis, portanto, esses efeitos precisam ser levados em consideração para uma avaliação mais precisa das tensões nos pavimentos asfálticos.

2.2 EFEITO DAS CARGAS HORIZONTAIS NA DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES EM PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

Farias (1997), citado por Franco (2007) e Medina e Motta (2015), percebendo que as cargas horizontais provenientes do movimento do tráfego também exercem influência sobre o comportamento estrutural dos pavimentos, realizou uma análise tridimensional de um pavimento asfáltico do Distrito Federal. Em seu estudo é considerado, inicialmente, apenas o carregamento vertical (p) e, posteriormente, adicionalmente o carregamento horizontal (q), atuantes conforme o sistema representado na FIGURA 7, onde x é o eixo horizontal na direção da força q , z na direção vertical da força p e y na direção transversal, como ilustra a FIGURA 7.

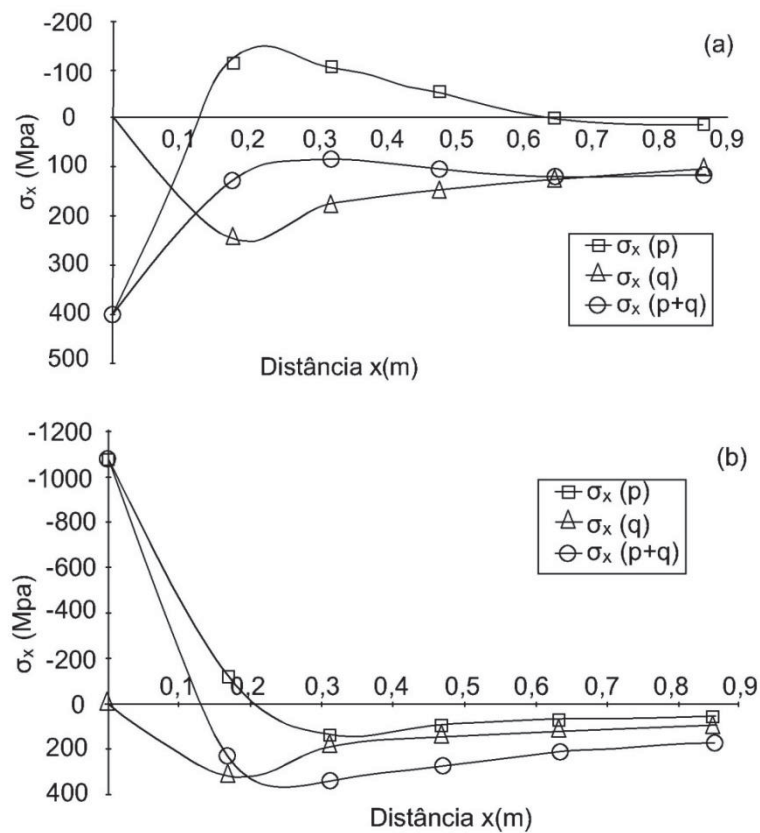
FIGURA 7 – CARREGAMENTO VERTICAL ($p=41$ kN) E HORIZONTAL ($q=0,28$ MPa) PARA UMA PRESSÃO DE INFLAÇÃO DE 0,56 MPa



FONTE: A autora (2019).

O pesquisador verificou que a tensão horizontal proveniente da movimentação do tráfego retorna ao pavimento esforços de tração (valor positivo) na parte inferior do revestimento e que a atuação conjunta da força vertical e horizontal causa tensão de tração em toda a face inferior, como é possível observar na FIGURA 8). Já a FIGURA 8b) mostra o mesmo tipo de análise, no entanto para pontos próximos à face superior. Percebeu-se que as tensões resultantes da aplicação da carga vertical são de compressão (negativa) sob o pneu, decrescendo gradualmente até igualar-se a zero e tornar-se tração (positiva). Em ambas as análises se verificam que a consideração da força horizontal q aumenta as tensões de tração nas faces superior e inferior do revestimento sendo, portanto, relevante.

FIGURA 8 – TENSÃO σ_x a) NA FACE INFERIOR DA CAMADA DE REVESTIMENTO E b) FACE SUPERIOR DO REVESTIMENTO



FONTE: Adaptado de Farias (1997 apud MEDINA e MOTTA, 2015).

Um pouco mais de uma década depois da publicação do trabalho de Farias (1997 apud MEDINA e MOTTA, 2015), Hammoum et al. (2009), descreveram as respostas do pavimento, incluindo tensões, deformações e deslocamentos, em várias profundidades da estrutura do pavimento abordando várias condições de carga em movimento (rolagem livre, desaceleração ou aceleração). Seus cálculos numéricos, realizados com a ajuda do *Software ViscoRoute versão 1.0*, consideraram, além do comportamento viscoelástico de materiais betuminosos, os efeitos da variação da temperatura e a variação da velocidade da carga. A 20°C, a tensão desviatória viscoelástica, próxima à superfície, aumentou em 55% sob as condições de carga de aceleração e frenagem. Esse aumento subiu para 68% a 40°C.

Um ano mais tarde, Zhang e Wang (2010), objetivando analisar a influência da carga de frenagem sobre a resposta dinâmica de estruturas de pavimentos flexíveis, empregaram o Método da Transformada Integral (*Integral transform*

method) para investigar o comportamento do deslocamento horizontal máximo, deflexão vertical e distribuição das deformações principais de um material elástico, no semi espaço, submetido à coexistência de cargas móveis verticais e horizontais de amplitude constante.

Em 2012, Hajj et al. (2012), considerando também cargas móveis, mas adotando propriedades viscoelásticas da camada asfáltica, estudaram o efeito da distribuição de tensão de contato pneu-pavimento e frenagem em três seções de pavimento e propriedades de misturas asfálticas quentes (HMA - *hot-mix asphalt*) medidas em laboratório. Os pesquisadores seguiram a abordagem do Guia de Projetos Mecanístico-Empírico de Pavimentos (*Mechanistic–Empirical Pavement Design Guide*) para prever, computacionalmente, a profundidade do sulco e a fissuração por fadiga ascendente na camada asfáltica. Observou-se que a profundidade do sulco da camada HMA foi três a quatro vezes maior para os pavimentos sujeitos a condições de frenagem, independentemente do tipo (uniforme e não uniforme) e forma (circular, quadrada e elíptica) da distribuição das tensões de contato pneu-pavimento. Já o número de ciclos para falha a fadiga, sujeitos à mesma condição, aumentou em até 27%, em comparação com a condição de não frenagem.

Três anos após o trabalho de Hajj et al. (2012), Lushinga e Xin (2015), em uma simulação no software *BISAR 3.0* verificaram que ao se aplicar apenas carga normal, o deslocamento horizontal é nulo; o que significa que as tensões normais não induzem o deslizamento da camada de pavimento. No entanto, quando a carga normal e horizontal (cisalhamento) são aplicadas conjuntamente, valores significativos de deslocamento horizontal relativo são observados, indicando que, onde a frenagem ou a carga de cisalhamento horizontal for aplicada, o deslizamento da camada asfáltica provavelmente ocorrerá.

Diante do exposto, verifica-se a importância de se considerar os efeitos da carga horizontal em regiões do pavimento onde ocorre a frenagem (ou a desaceleração dos veículos), como por exemplo, em pontos de paradas de ônibus, postos policiais, pedágios, portos ou terminais de containers, aeroportos (LEE e NIKRAZ, 2015), onde é comum observar-se defeitos como escorregamentos e corrugações. Nonde (2014) explica que essa tensão de cisalhamento horizontal, induzida no pavimento pela frenagem e aceleração dos veículos, esmaga e densifica os agregados da mistura asfáltica, reduzindo os vazios de ar. Esta perda de vazios,

por sua vez, promove a perda de estabilidade da mistura e enrugamento do revestimento asfáltico devido ao acúmulo de pressão nos poros resultando em perda de resistência e escorregamento.

E quando a condição de ligação entre a camada de revestimento e a camada de base é fraca, a carga horizontal aplicada pelo veículo em movimento pode causar fissuração por deslizamento ou deformações horizontais permanentes na camada de revestimento. Ou seja, quando a ligação entre o revestimento e a base é fraca, ocorre uma diminuição da capacidade de transferência de tensões entre essas camadas resultando em uma concentração elevada de tensão no revestimento. E quando este é incapaz de suportar a intensificação das tensões horizontais induzidas pela frenagem do veículo, ocorre a fissuração por deslizamento, a qual se inicia na superfície em direção ao fundo da camada de revestimento (NONDE, 2014).

2.2.1. Efeito da declividade do pavimento

Ainda em termos dos efeitos das tensões cisalhantes sobre a estrutura dos pavimentos, estudos mais recentes, especialmente na última década, apontam ainda o parâmetro de declive longitudinal, associado a trechos onde se desenvolvem baixas velocidades, acelerações frequentes e a frenagem dos veículos, como um agravante sobre os afundamentos e deslizamentos de pavimentos asfálticos. Nos últimos anos, inúmeros pesquisadores analisaram as propriedades mecânicas do asfalto em situações com declive longitudinal, como é mostrado a seguir.

No final da década passada, LIN et al. (2009), elaboraram um modelo tridimensional em elementos finitos (*software* ANSYS) para analisar a distribuição das tensões de cisalhamento em uma seção de pavimento submetido às cargas verticais e horizontais resultantes do processo de frenagem no pavimento asfáltico; situação muito frequente em rodovias com grandes declividades. Segundo os pesquisadores, esta é a principal causa de problemas precoces em pavimentos, tais como o afundamento e o deslizamento, devido à insuficiente resistência ao cisalhamento da estrutura do pavimento.

Mais tarde, CHEN et al. (2011) desenvolveram um estudo em elementos finitos 3D viscoelastoplástico (*software* ABAQUS) para analisar, além das tensões de cisalhamento, a profundidade dos afundamentos para diferentes gradientes e ciclos

de aplicações de cargas. LI e LI (2012), na mesma linha de pesquisa, estabeleceram uma nova abordagem de controle de materiais asfálticos para lidar com o problema do afundamento em pavimentos com acentuados declives.

Posteriormente, LI e XIN (2014) montaram um modelo de pavimento em MEF (*software* ANSYS) com grande declividade longitudinal, a partir do qual estudaram as tensões de tração na flexão e cisalhamento como resposta mecânica do pavimento. Analisaram ainda a variação da deformação de cada camada do pavimento para diversos níveis de carga, declividade e tempo de aplicação da carga. No geral, todos os pesquisadores citados verificaram que as forças horizontais têm um impacto enorme sobre a estrutura do pavimento e que, com o aumento da declividade longitudinal ao longo da estrutura do pavimento, a tensão máxima de cisalhamento aumenta muito devido ao aumento da carga horizontal.

Retomando especificamente a pesquisa de CHEN et al. (2011), seus resultados apontaram para um aumento na amplitude das tensões máximas de cisalhamento em mais que o dobro, quando a declividade longitudinal aumentou de 0% para 7%, o que levaria à destruição do pavimento como o escorregamento e a ruptura por fadiga, por exemplo. Esta é geralmente mais grave do que o previsto quando da inserção das baixas velocidades, acelerações frequentes e a frenagem dos veículos em trechos longos de vias com grande inclinação longitudinal.

A degradação do pavimento, porém, em condições de declive acentuado, se intensifica ainda mais em situações de temperaturas elevadas, como identificado por LIN et al. (2009) os quais verificaram que, no verão, a tensão de cisalhamento aumentou sob alta temperatura, mas a resistência ao cisalhamento da mistura diminuiu acentuadamente. Os pesquisadores verificaram também que, ao se considerar a carga horizontal, a tensão de cisalhamento passou a atuar na superfície do revestimento, o que não foi observado quando da aplicação de carga apenas vertical, onde as tensões máximas de cisalhamento encontravam-se em profundidades médias da camada de revestimento.

LI e LI (2012) perceberam ainda que, quando o comprimento e o gradiente do trecho inclinado aumentam, os veículos passam essa seção com uma velocidade menor na direção ascendente. Isso resulta no aumento do tempo de carregamento. Como resultado, o afundamento é muito mais severo do que nas seções horizontais. Além disso, LI e XIN (2014) lembraram que, em grandes declividades longitudinais, o pavimento recebe a carga vertical e horizontal ao mesmo tempo, tornando o efeito

da sobrecarga nas seções do pavimento de asfalto ainda mais grave do que na situação geral.

Mais recentemente, ZHENG et al. (2017), objetivando avaliar a deformação permanente de pavimentos, simularam a deformação permanente de um pavimento de Concreto Asfáltico de Alto Módulo (HMAC) em uma estrada inclinada e horizontalmente curva usando o método dos elementos finitos viscoelásticos. Os pesquisadores perceberam que a declividade longitudinal associada ainda à curvatura da pista, intensificou ainda mais os afundamentos, revelando afundamentos na rampa curva maiores que em estradas em linha reta.

2.3 DEFEITOS DE SUPERFÍCIE COMUNS EM REGIÕES SUJEITAS À ACELERAÇÃO E FRENAGEM DE VEÍCULOS

Os defeitos de superfície são “danos ou deteriorações na superfície dos pavimentos asfálticos” (BERNUCCI et al, 2010, p. 413) os quais podem ser identificados a olho nu e qualificados conforme uma terminologia normatizada. Podem desenvolver-se precocemente, a médio ou longo prazo, devido a erros ou inadequações de projeto, seleção, dosagem ou produção de materiais, falhas nas etapas construtivas, medidas de conservação e manutenção ineficientes, ou ainda, devido à utilização pelo tráfego e efeitos do clima.

Dentre os diversos defeitos comuns em pavimentos asfálticos podem ser citadas as ondulações ou corrugações, escorregamento, afundamentos e trincas por fadiga, cujas classificações são dadas pela norma DNIT 005/2003 - TER (DNIT, 2003).

As ondulações ou corrugações (FIGURA 9 e FIGURA 1) possuem caráter plástico e permanente. Geralmente, são causadas pelo movimento de frenagem ou aceleração dos veículos e acontecem devido à dosagem inadequada da mistura asfáltica, ligação fraca entre a camada de base e a de revestimento, e estrutura insuficiente. Normalmente são identificadas em curvas, interseções, aclive ou declive (DNIT, 2003; MACHADO, 2013).

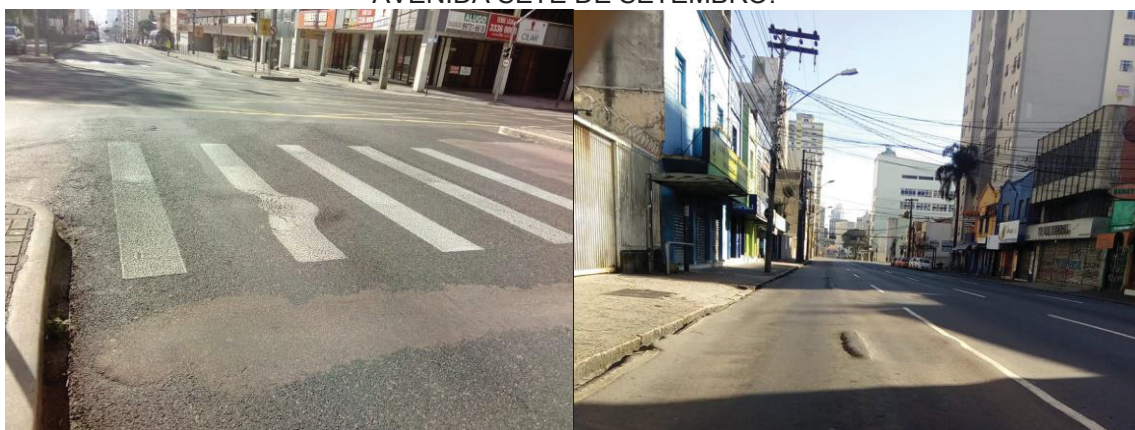
FIGURA 9 - ONDULAÇÕES OU CORRUGAÇÕES.



FONTE: DNIT (2003).

O escorregamento por sua vez é caracterizado pelo movimento ou deslocamento horizontal do revestimento em relação à camada subjacente do pavimento determinado por esforços tangenciais transmitidos pelos eixos dos veículos no ato da frenagem e aceleração, produzindo uma ondulação ou fenda curta em forma de meia lua (FIGURA 10) (DNIT, 2003; MACHADO, 2013).

FIGURA 10 – ESCORREGAMENTOS OBSERVADOS EM CORREDORES DE ÔNIBUS BRT EM CURITIBA: a) AVENIDA SETE DE SETEMBRO; b) APROXIMAÇÃO DA RUA TIBAGI COM A AVENIDA SETE DE SETEMBRO.



a)

b)

FONTE: A autora (2019).

Pode ocorrer, ainda segundo Machado (2013), devido a uma ligação inadequada entre revestimento e camada de base, inércia reduzida do revestimento

em função de uma pequena espessura, compactação do revestimento deficiente e fluência plástica devido às elevadas temperaturas de utilização. Esses defeitos, conforme cita o autor, aparecem em regiões de aceleração e desaceleração, como em aclives e declives, curvas de raio pequeno, interseções e paradas de ônibus ou obstáculos, como passagem de trilhos de trem.

Outro problema recorrente é o afundamento, caracterizado por depressões na superfície do pavimento, podendo apresentar-se sob a forma de afundamento plástico (com a presença do solevamento do material adjacente) ou de consolidação (FIGURA 11).

O afundamento plástico ocorre devido à fluência plástica de uma ou mais camadas do pavimento, com a presença de solevamento. Se sua extensão for menor que 6m é denominado afundamento plástico local, do contrário é chamado de afundamento plástico de trilha de roda. Por outro lado, o afundamento de consolidação ocorre devido à consolidação diferencial de uma ou mais camadas de pavimento (sem a presença do solevamento) e da mesma forma, se for menor do que 6m de comprimento é denominado afundamento de consolidação local, senão afundamento de consolidação de trilha de roda (DNIT, 2003; MACHADO, 2013).

FIGURA 11 - AFUNDAMENTO COM SOLEVAMENTO LATERAL EM UM CRUZAMENTO DA RUA 24 DE MAIO COM O CORREDOR DE ÔNIBUS BRT DA AVENIDA SETE DE SETEMBRO EM CURITIBA.



FONTE: A autora (2018).

E por fim, em relação às fissuras por fadiga, segundo Mello (2008), podem existir basicamente dois tipos: trincas que iniciam na base do revestimento e as que iniciam no topo. As primeiras são conhecidas como trincas “couro de jacaré”. Em sua

forma apresentam-se como pequenos blocos de forma irregular e com espaçamentos inferiores a 0,3m, como ilustrado na FIGURA 12. Ocorrem geralmente quando o pavimento, submetido às repetidas solicitações do tráfego e à sucessiva flexão do revestimento em condições acima de um determinado limite, chega ao seu limite de capacidade. Pode ocorrer devido às cargas acima da capacidade estrutural de projeto, dimensionamento das camadas com espessuras inferiores às necessárias para o tráfego existente, falha na execução e ação da água (DNIT, 2003; MELLO, 2008; MACHADO, 2013).

FIGURA 12 - TRINCA POR FADIGA EM REGIÃO PRÓXIMA A UM SEMÁFORO NA RUA MARECHAL DEODORO NA CIDADE DE CURITIBA



FONTE: A autora (2018)

Já as fissuras que nascem no topo do pavimento, conhecidas como “*top-downcracking*”, se propagam para baixo através da camada do revestimento apresentando trincas longitudinais na superfície do pavimento. Em pavimentos com revestimentos asfálticos espessos, submetidos a cargas oriundas de pneus com pressões elevadas, observam-se concentrações de tensão no bordo do contato pneu-pavimento, permitindo a manifestação de trincas longitudinais que se propagam para baixo. Tal processo pode ser intensificado devido ao enrijecimento do ligante asfáltico pela oxidação (MELLO, 2008).

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

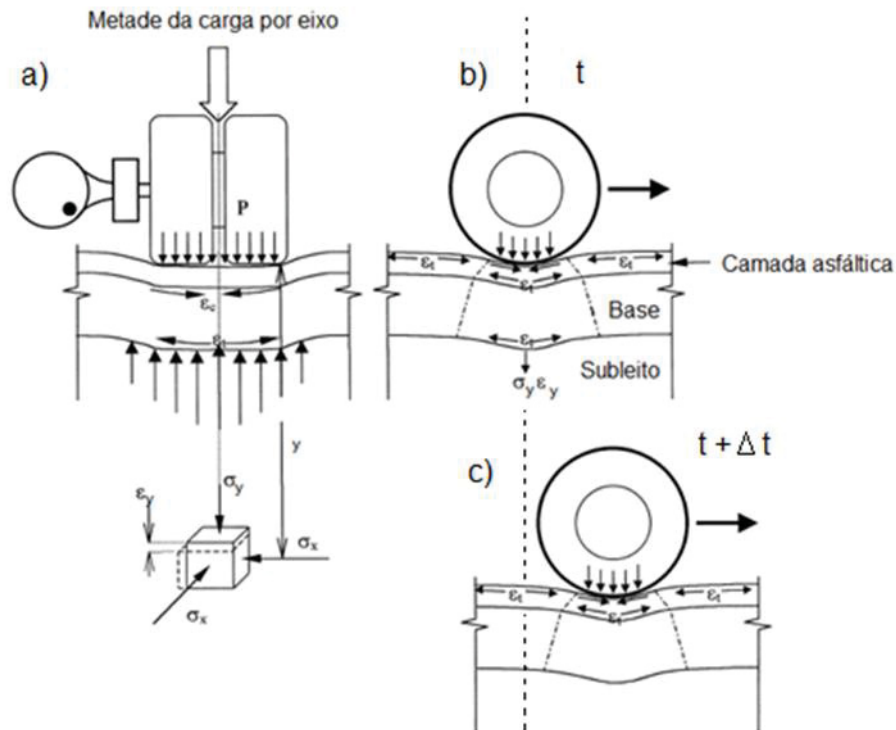
Com vistas a durabilidade e dimensionamento adequados é importante compreender o comportamento mecânico dos pavimentos frente às solicitações do tráfego. Assim, o presente capítulo traz alguns aspectos funcionais e estruturais dos pavimentos flexíveis, bem como descrição do MEF na solução de problemas dinâmicos.

3.1 ANÁLISE DAS TENSÕES ATUANTES EM PAVIMENTOS DEVIDO À APLICAÇÃO DE CARGAS DINÂMICAS

Em um exame mais detalhado das cargas atuantes nos pavimentos asfálticos, Medina e Motta (2015) lembram que, no geral, a análise de tensões e deformações considera que as forças verticais (correspondentes ao peso do veículo) são transmitidas ao pavimento pelas rodas dos eixos. E que, em condições de serviço, a camada de revestimento é solicitada por esforços de tração e compressão devido à flexão, ou seja, o estado de tensões no topo e na base da camada asfáltica varia de compressão para tração à medida que retorna ao seu perfil original após a passagem do pneu, como mostrado na FIGURA 13 (BERNUCCI et al., 2010; MAHONY et al., 2000; PERRET, 2003).

As posições sucessivas do pneu nos pontos b) e c representam o carregamento cíclico, onde t é o instante inicial e $t+\Delta t$ é um tempo posterior para um determinado incremento de tempo Δt . Esse carregamento por sua vez, resulta em deformações de compressão (ϵ_c) e tração (ϵ_t) no pavimento e tensões de compressão (σ_y) e deformações (ϵ_y) no subleito. As demais camadas do pavimento, segundo Bernucci et al. (2010), são submetidas basicamente a esforços de compressão exceto em alguns casos onde a camada sob o revestimento é composta por material estabilizado quimicamente de maneira a torná-lo resistente a esforços de tração.

FIGURA 13 - RESPOSTA DO PAVIMENTO FLEXÍVEL AO MOVIMENTO DE UMA CARGA UNIFORME P: A) DEFORMAÇÕES DE TRAÇÃO (ϵ_t) E COMPRESSÃO (ϵ_c) NA DIREÇÃO TRANSVERSAL AO MOVIMENTO; B e C) DEFORMAÇÕES DE TRAÇÃO (ϵ_t) E COMPRESSÃO (ϵ_c) PARA POSIÇÕES SUCESSIVAS DO CARREGAMENTO.



FONTE: Adaptado de Mahony et al. (2000).

3.1.1 Pressão de contato pneu-pavimento e os danos provocados nos revestimentos

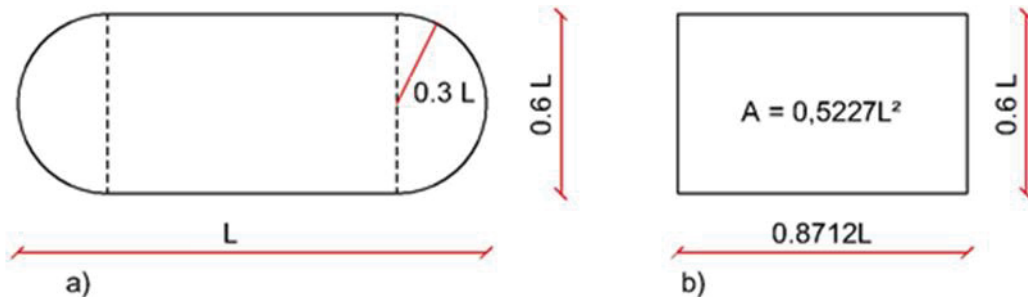
Segundo Huang (1993) a tensão de contato entre o pneu e o pavimento pode ser assumida como uniformemente distribuída. Na análise de tensões e deformações costuma-se assumir essa tensão de contato como igual à pressão de inflação do pneu. Assim a área de contato pneu-pavimento pode ser simplificada como:

$$A = \frac{P}{p} \quad (1)$$

onde A é a área de contato pneu-pavimento, P é a carga da roda e p a pressão de inflação do pneu. Tal consideração é baseada na teoria das membranas, segundo a qual, uma estrutura sem rigidez à flexão (neste caso, o pneu) ao ser inflada e colocada em contato com uma superfície plana (neste caso, o pavimento), produz uma pressão de contato igual à de inflação (HUANG, 1993; FERNANDES Jr et al, 1995).

Já em relação à forma dessa área de contato, em análises numéricas geralmente emprega-se a forma aproximada proposta por Huang (1993) que é apresentada na FIGURA 14, a qual é composta por um retângulo e dois semicírculos (FIGURA 14 a) ou uma área equivalente de formato retangular (FIGURA 14 b).

FIGURA 14 - AREA EQUIVALENTE DE CONTATO ENTRE O SUPERFICIE DO PAVIMENTO E O PNEU SUPOSTA: a) ELÍPTICA; b) RETANGULAR.



FONTE: Adaptado de Huang (1993).

Todavia, estudos anteriores mostraram que a pressão de contato não é uniforme e depende apenas do tipo de pneu. Destaca-se aqui o trabalho de Van Vuuren (1974 apud Medina, 2015), o qual realizou ensaios em seis tipos de pneus obtendo uma relação entre a pressão de contato (q em kPa) e a pressão de inflação (p em kPa) igual a:

$$q = 0,66.p + 145 \quad (2)$$

Mais tarde Beer et al. (1997) mostraram que a pressão de contato é sensivelmente maior que a pressão de inflação do pneu. Seus estudos apontaram que quanto maior a carga maior a pressão vertical de contato nas bordas do pneu e ainda, a pressão de contato no centro do pneu é influenciada diretamente pela pressão de inflação, podendo ser determinada pelas Equações 3 e 4 (pressão de contato nas extremidades e no centro do pneu, respectivamente):

$$q = -0,53P^2 + 57,46P - 534,05 \quad (3)$$

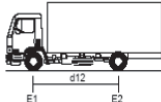
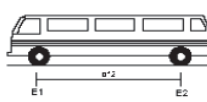
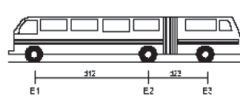
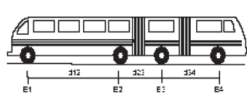
$$q = 0,86p + 175 \quad (4)$$

onde q é a pressão média de contato (em kPa), P a carga do pneu por roda simples (em kN) variando de 20 kN a 50 kN e p a pressão de inflação no intervalo de 420 kPa a 720 kPa. Para projetos mecanicistas, o cálculo das tensões e deformações atuantes nos pavimentos, os autores sugerem o emprego dos valores médios.

Na TABELA 1 são apresentados os valores de pressões de contato pneu-pavimento (q , em MPa) determinados a partir das expressões (1) a (4), considerando a pressão de pneu de 0,72 MPa para alguns veículos adotados pela classificação do DNIT (2012), o qual determina ainda o Peso Bruto Total (PBT) máximo legal para cada tipo de veículo e sua distribuição por eixo. Os valores contidos para o modelo proposto por Beer et al. (1997) são os médios entre as tensões encontradas para o centro e a borda do pneu.

Como é possível perceber analisando-se os resultados da TABELA 1, há pouca variação entre os valores de pressão de contato obtidos a partir dos modelos citados, dentre os quais o de Van Vuuren (1974) apresentou os menores valores de tensão com uma redução próxima a 15% em relação aos valores apresentados pelo modelo de Huang (1993) que apresentou os maiores valores de pressão de contato. Por essa razão se adota aqui e em inúmeros trabalhos, a simplificação de Huang (1993).

TABELA 1 - ESTIMATIVA DE PRESSÃO DE CONTATO PNEU-PAVIMENTO PARA ALGUNS VEÍCULOS COMERCIAIS ADOTADOS NA CLASSIFICAÇÃO DO DNIT (CONSIDERANDO UMA PRESSÃO DE INFLAÇÃO DE 0,72 MPa E ESRS).

SILHUETA	CAMINHÃO 2C	ÔNIBUS 2CB	ÔNIBUS URBANO ARTICULADO 2B1	ÔNIBUS URBANO BI-ARTICULADO 2BB
				
PBT (ton)	16	16	26	36
Caracterização	E1=ESRS: 6,0 t. E2=ESRS 6,0 t.	E1=ESRS 6,0 t. E2=ESRD 10 t.	E1=ESRS 6,0 t. E2=ESRD 10 t. E3=ESRD 10 t.	E1=ESRS 6,0 t. E2=ESRD 10 t. E3=ESRD 10 t. E4=ESRD 10 t.
P (kN)	30	30	30	30
Huang (1993)	0,740	0,740	0,740	0,740
Van Vuuren (1974)	0,620	0,620	0,620	0,620
Beer et al. (1997)	0,750	0,750	0,750	0,750

FONTE: A autora (2019).

3.2 MEDIDAS DE ADERÊNCIA ENTRE PNEU E O PAVIMENTO

Outra variável importante a ser considerada em relação ao aspecto do revestimento além das irregularidades e defeitos da superfície do pavimento é o atrito pneu-pavimento relacionado à capacidade de resistência à derrapagem (BERNUCCI et al, 2010).

Assim, dentre os inúmeros fatores que contribuem para o desempenho dos pneus em pistas molhadas, Bernucci et al. (2010) e Rodrigues Filho (2006), citam a textura da superfície do pavimento, os agregados, a profundidade da lâmina d'água, geometria da via, a velocidade do veículo, carga de roda, as características dos pneus (ranhuras, pressão de inflação, dimensões e tipo) e ação do eixo (roda livre, roda freada, roda em tração ou ainda roda em curva). Tais fatores, aliados à habilidade do motorista, contribuem para evitar acidentes e estão diretamente relacionados ao aspecto funcional do pavimento. A seguir, alguns dos itens mencionados serão discutidos com maior detalhe.

3.2.1 Medidas de aderência: microtextura e macrotextura

As principais características das misturas asfálticas que influenciam na aderência ou na textura de pavimentos são a distribuição granulométrica dos agregados e fíler, bem como sua natureza, forma e microtextura superficial. O ligante asfáltico por sua vez, tem importância relacionada indiretamente à resistência e à desagregação dos revestimentos devido ao tráfego e ação das intempéries (BERNUCCI et al., 2010).

Dentre os aspectos que mensuram a aderência da superfície de um pavimento, tem-se a microtextura e a macrotextura. Sua classificação é expressa pelo comprimento de onda ou distância entre dois picos ou depressões sucessivas da superfície de rolamento, como esboçado na TABELA 2 do DNIT (2006).

TABELA 2 - CLASSIFICAÇÃO DA TEXTURA DE UM PAVIMENTO

Classificação da textura	Faixa de comprimento de onda
Microtextura	$\lambda < 0,5\text{mm}$
Macrotextura	$0,5\text{mm} \leq \lambda < 50\text{mm}$
Megatextura	$50\text{mm} \leq \lambda < 500\text{mm}$
Irregularidade	$0,5\text{m} \leq \lambda < 50\text{m}$

FONTE: Adaptado de DNIT (2006).

A microtextura está relacionada à aspereza dos agregados e pode ser classificada por rugosa ou polida. Já a macrotextura depende da rugosidade formada pela mistura dos agregados com o ligante asfáltico e pode ser classificada por aberta ou fechada. Já a megaestrutura e a irregularidade, conforme classificação da TABELA 2, influenciam diretamente na dinâmica do veículo e o contato deste com o pavimento, afetando a estabilidade e a aderência do veículo em pistas molhadas, apesar de a avaliação da aderência ser focada na microtextura e macroestrutura, como lembra Bernucci et al. (2010).

A microtextura é quantificada pelo Valor de Resistência à Derrapagem (VRD), e pode ser extraída a partir do ensaio do pêndulo britânico, normatizado pela ASTM E 303/1998 (FIGURA 15). O pêndulo possui um braço pendular o qual possui em sua extremidade uma sapata envolvida em borracha que, durante o ensaio, é atritada contra a superfície do pavimento. A TABELA 3 mostra as classes de microtextura em função do VRD (adimensional) apresentadas pelo DNIT (2006).

FIGURA 15 - OPERAÇÃO DO PÊNDULO BRITÂNICO PARA A DETERMINAÇÃO DO VALOR DE RESISTÊNCIA À DERRAPAGEM



FONTE: Bernucci et al. (2010).

Ainda em termos da microtextura, Bernucci et al. (2010) lembram que este é fator importante para rompimento da película de água, em pistas molhadas, e a efetivação do contato pneu-pavimento em caso de velocidades de até cerca de 40 km/h. Por outro lado, a macrotextura é importante para velocidades acima de 50 km/h.

TABELA 3 - CLASSE DE MICROTTEXTURA

Classe	Valor de resistência à derrapagem (VRD)
Perigosa	< 25
Muito lisa	$25 \leq \text{VRD} \leq 31$
Lisa	$32 \leq \text{VRD} \leq 39$
Insuficientemente rugosa	$40 \leq \text{VRD} \leq 46$
Medianamente rugosa	$47 \leq \text{VRD} \leq 54$
Rugosa	$55 \leq \text{VRD} \leq 75$
Muito rugosa	$\text{VRD} > 75$

FONTE: Adaptado de DNIT (2006).

Esta, por sua vez, pode ser quantificada pelo ensaio simples de altura média da mancha de areia especificada pela ASTM E 965/2001 (FIGURA 16). O ensaio consiste em preencher os vazios da superfície do pavimento com um volume conhecido de areia de modo a formar um círculo cuja altura média é caracterizada pelo diâmetro final e pelo volume de areia consumido. O resultado é expresso em Altura da Areia (HS).

FIGURA 16 - ENSAIO DE MANCHA DE AREIA



FONTE: Bernucci et al. (2010).

Na TABELA 4 são apresentados os valores de HS na classificação da macrotextura de acordo com o DNIT (2006).

TABELA 4 - CLASSES DE MACROTTEXTURA

Classe	Altura média de mancha de areia (mm)
Muito fina ou muito fechada	$\text{HS} \leq 0,20$
Fina ou fechada	$0,20 < \text{HS} \leq 0,40$
Média	$0,40 < \text{HS} \leq 0,80$
Grosseira ou aberta	$0,80 < \text{HS} \leq 1,20$
Muito grosseira ou muito aberta	$\text{HS} > 1,20$

FONTE: Adaptado de DNIT (2006).

Assim, em termos de segurança, conforto e economia, a ABPv (1999 apud DNIT, 2006), recomenda, para microtextura, um valor mínimo de VRD de 47 de modo a garantir ao menos uma microtextura medianamente rugosa. Já para a macrotextura recomenda valores de HS entre 0,6mm e 1,2mm. Pavimento com valores inferiores a 0,6mm para HS têm tendência a apresentar textura fechada e conseqüentemente maior risco de hidroplanagem. Para valores acima de 1,2mm, a textura é muito aberta, resultando em maior desgaste dos pneus, maior consumo de combustível e maior ruído no movimento.

No entanto, a diferença expressa entre microtextura e macrotextura está na interpretação de seus índices. O VRD, que avalia a microtextura, é uma medida escalar o qual determina o grau de escorregamento (ou derrapagem), aderência ou atrito cinemático da superfície de um pavimento. Já a altura da mancha de areia, que avalia a macrotextura, caracteriza a superfície do pavimento quanto à sua capacidade de drenar a água confinada entre o pneu e o pavimento conforme o DNIT (2006).

3.2.2 Medida de aderência: coeficientes de atrito

A classificação e os procedimentos apresentados na seção anterior, apesar de simples de serem obtidos em campo, são utilizados para fins de avaliação experimental de pavimento. No item que se segue, esses parâmetros serão relacionados com o coeficiente de atrito: parâmetro de controle utilizado nas análises numéricas subsequentes.

A aderência de uma superfície é expressa em função do coeficiente de atrito, uma grandeza física e que depende de inúmeras variáveis como o tipo de material, o acabamento da superfície, películas superficiais, a temperatura e a contaminação (RESNICK et al., 2003).

Os parâmetros de macro e microtextura, listados no item anterior, deram origem ao parâmetro chamado de IFI (*International Friction Index* ou Índice Internacional de Atrito/Derrapagem), o qual foi objeto de uma pesquisa internacional dirigida pelo PIARC (*Permanent International Association of Road Congress*) chamada de *International Experiment to Compare and Harmonize Skid Resistance and Texture Measurements* ou Experiência internacional para comparar e harmonizar a medição da textura e da resistência ao deslizamento (DNIT, 2006).

O procedimento de cálculo do IFI é normatizado pela norma ASTM E-1960/1998. No Brasil, porém, a classificação desse parâmetro foi apresentada no 17º Encontro de Asfalto em Dezembro/2004 com o título “Determinação do IFI – *International Friction Index*”, cujos valores estão indicados na TABELA 5 adaptada do DNIT (2006).

TABELA 5 - VALORES DE IFI.

VALORES DO IFI	MÍNIMO	MÁXIMO
Péssimo	<0,06	
Ruim	0,06	0,12
Regular	0,13	0,16
Bom	0,20	0,30
Ótimo	>0,30	

FONTE: Adaptado de DNIT (2006).

O IFI relaciona o atrito com a velocidade de deslizamento. Seu modelo de cálculo estima a constante de referência da velocidade (S_p) e o atrito harmonizado para a velocidade de 60km/h (F_{60}), considerando um veículo de passeio com pneus lisos e rodas travadas. O par S_p e F_{60} expressa o valor de IFI de um determinado pavimento e permite calcular o atrito em qualquer velocidade de deslizamento.

O primeiro passo para calcular o IFI consiste no cálculo da constante de referência da velocidade (S_p) a qual é determinada mediante regressão linear como expresso por:

$$S_p = a + b.T_x \quad (5)$$

onde, T_x é uma medida de macrotextura que pode ser obtida por meio do ensaio da mancha de areia para o qual $T_x = HS$ (em mm), descrito na seção anterior. Os valores de “a” e “b” são expressos na TABELA 6 e dependem do ensaio empregado para medida do parâmetro de macrotextura. A tabela traz esses valores para o ensaio de Mancha de areia.

TABELA 6 - VALORES DOS PARÂMETROS “a” E “b” PARA O CÁLCULO DE “ S_p ”

Norma	Ensaio	a	b
ASTM E 965/2001	Mancha de areia	-11,6	113,6

FONTE: ASTM (2001).

O passo seguinte, determinado o valor de VRD, é obter o valor de atrito ajustado para a velocidade de 60km/h (FR_{60}) por meio de:

$$FR_{60} = VRD \cdot e^{\left[\frac{S-60}{S_p}\right]} \quad (6)$$

onde VRD é uma medida de microtextura que pode ser determinada pelo Ensaio com o Pêndulo Britânico, descrito no Item anterior. Em outras palavras, a Equação (6) permite converter a medida de atrito a uma determinada velocidade de referência do equipamento (S), a uma medida de atrito ajustada para a velocidade de 60km/h (FR_{60}).

Por fim é calculado o atrito harmonizado de referência (F_{60}) a partir da Equação:

$$F_{60} = A + B \cdot FR_{60} + C \cdot T_x \quad (7)$$

onde A, B e C são constantes de calibração própria do aparelho e (S) a velocidade de deslizamento do equipamento e determinadas por meio da TABELA 7. Da mesma forma que observado para os parâmetros de macrotextura, os de microtextura também dependem do tipo de ensaio empregado, sendo descrito apenas os valores das constantes (A, B e C) para o ensaio com o Pendulo Britânico.

TABELA 7 - CONSTANTES PARA OBTENÇÃO DE F_{60} .

Norma	Ensaio	S	A	B	C
ASTM E 303/1998	Pendulum Tester BPT (USA)	10	0,056	0,008	0

FONTE: ASTM (2001).

Por definição, os pares de valores (F_{60} , S_p) definem o IFI de um pavimento. Alternativamente, porém, pode-se definir o IFI a qualquer velocidade de deslocamento (S) aplicando-se a equação:

$$FS = F_{60} \cdot e^{\left[\frac{60-S}{S_p}\right]} \quad (8)$$

Tomando como referência um pavimento cuja superfície foi avaliada com um VRD igual a 25 e um T_x igual a 0,4mm, a constante de referência da velocidade (S_p) seria igual a 33,84 (Equação 5 e Tabela 6) e valor de atrito ajustado para a velocidade de 60km/h (FR_{60}) igual a 5,70 (Equação 6) para $S=10$, resultando em um

atrito harmonizado de referência (F_{60}) de 0,10 (Equação 7 e Tabela 7). O IFI seria assim definido pelo par (0,10; 33,84).

De acordo com Aragão (2016), existem dois tipos de atrito: o atrito estático, definido como a força de atrito máxima que mantem o corpo em repouso e, o atrito dinâmico, sendo a força que atua sobre um corpo em movimento. Sendo este último menor que aquele. Retomando o pavimento dado como referência no parágrafo anterior e levando-se em consideração, por exemplo, o deslocamento de um veículo a 40km/h, o atrito dinâmico nesse caso seria igual a 0,18 e estático (0km/h) igual a 0,60 (Equação 8).

A TABELA 8, por sua vez, traz alguns valores de referência para os valores de aderência pneu-pavimento conforme a presença de diversos filmes superficiais, considerando a variação da conservação do pneumático.

TABELA 8 - COEFICIENTES DE ATRITO DE PNEUMÁTICOS EM ESTRADAS

Condições do Pneumático	Condições da superfície	Velocidades do pneu		
		50 Km/h	90 km/h	130 km/h
Novo	Seca	0,85	0,80	0,75
	Molhada	0,65	0,60	0,55
	Chuva forte	0,55	0,30	0,20
	Encharcamento	0,50	0,05	0,00
Desgastado	Seca	1,00	0,95	0,90
	Molhada	0,50	0,20	0,20
	Chuva forte	0,40	0,10	0,10
	Encharcamento	0,25	0,05	0,00

FONTE: Adaptado de Bosh (2012, apud ALMEIDA, 2014).

Em pistas molhadas, como é possível observar na TABELA 8, o coeficiente de atrito é de 40% a 100% menor, se comparado com aquele encontrado em pista seca, o que implica na redução da aderência entre o pneu e o pavimento permitindo o veículo deslizar com maior facilidade (ARAGÃO, 2016).

Além disso, verifica-se que na medida em que a velocidade do veículo aumenta, o tempo de contato do pneu com o pavimento também reduz, reduzindo conseqüentemente o tempo disponível para permitir a expulsão da água. Tal fato, segundo Rodrigues Filho (2006), explica porque o coeficiente de atrito, em pista molhada diminui com o aumento da velocidade e é proporcional à área de contato pneu-pavimento.

3.3 MÉTODO NUMÉRICO DE SOLUÇÃO

Devido à complexidade do comportamento dos diversos sistemas, sejam eles físicos ou materiais, e à dificuldade de execução de experimentos físicos para compreensão desse comportamento, inúmeros modelos, numéricos e analíticos, têm sido desenvolvidos.

Entre os métodos de simulação numérica que buscam uma solução aproximada desse comportamento, seja por meio da concepção de subdomínios, de pontos do domínio ou do contorno, têm-se o Método das Diferenças Finitas, o Método dos Elementos Finitos, o Método dos Elementos de Contorno e diversos Métodos sem Malha. Dentre eles, o Método dos Elementos Finitos (MEF), o qual será empregado nesta pesquisa, é o mais difundido devido à sua facilidade de generalização, programação e uso (SORIANO, 2009).

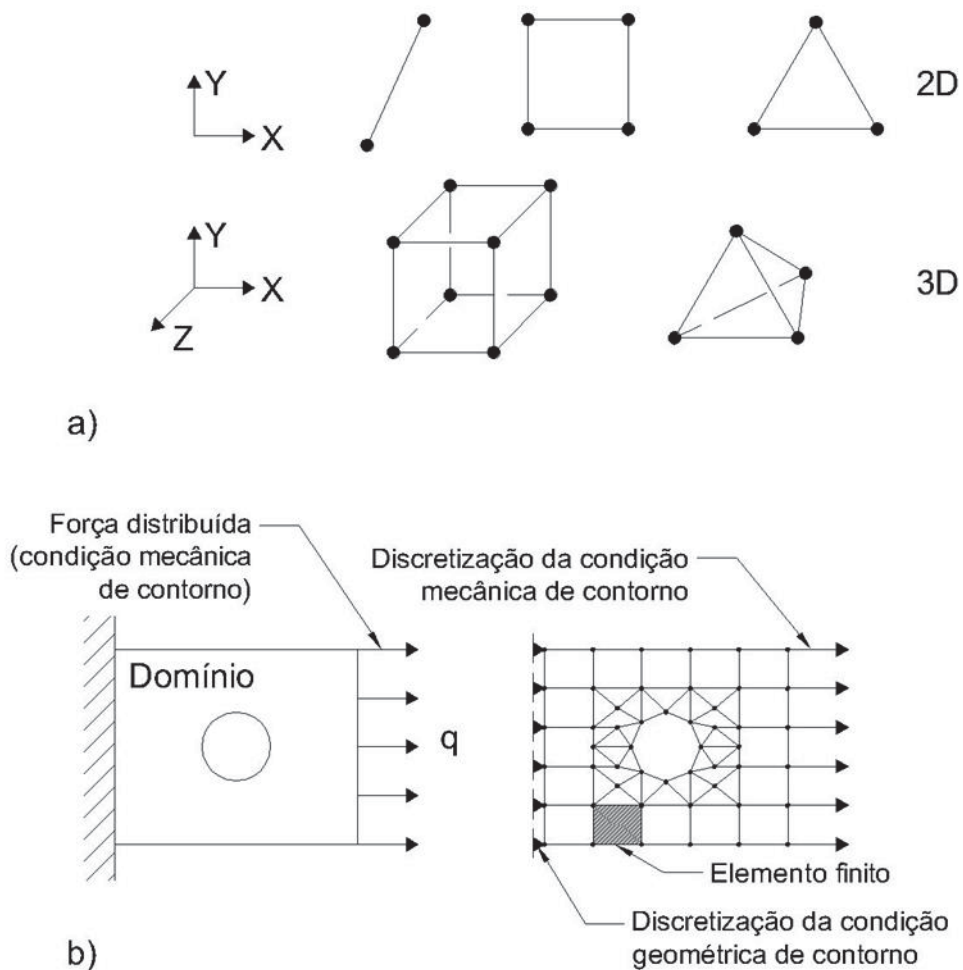
3.3.1 Método dos elementos finitos

O MEF, no domínio da Engenharia de Estruturas, tem por finalidade determinar o estado de tensões e deformações de um sólido sujeito a ações externas. Independente do método (deslocamentos virtuais, modelos de equilíbrio, ou métodos híbridos e mistos) seu objetivo é modelar um problema real, que envolve meios contínuos, através da análise de partes discretas ou elementos fictícios de dimensões finitas (elementos finitos), ligados entre si por pontos nodais. Este processo é chamado de discretização do modelo matemático contínuo (AZEVEDO, 2003).

Na resolução de problemas com o MEF, leis simples (usualmente polinômios) são arbitradas para as variáveis dependentes primárias nos subdomínios (elementos finitos) em substituição às leis exatas de solução do modelo matemático, que por sua vez são desconhecidas, de modo a obter continuidade nas interfaces dos elementos. Com isso, o comportamento da malha obtida na discretização do modelo é resultado do comportamento dos elementos. A convergência, obtida do modelo matemático aproximado para a solução do modelo matemático real, por sua vez, é obtida na medida em que se reduz o tamanho dos elementos ou se aumente a ordem das leis arbitradas (SORIANO, 2009).

Os elementos finitos, por outro lado, podem ser uni, bi ou tridimensionais (FIGURA 17 a), com uma quantidade distinta de pontos nodais com diferentes números e tipos de graus de liberdade (como por exemplo: deslocamentos, velocidades e acelerações), de acordo com o problema em estudo. As formas dos elementos (retangulares ou triangulares, por exemplo) são escolhidas de acordo com o domínio a ser discretizado (FIGURA 17 b) (SORIANO, 2009).

FIGURA 17 - MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS a) EXEMPLOS DE FORMAS DE ELEMENTOS FINITOS b) DISCRETIZAÇÃO DA MALHA.



FONTE: Adaptado de Soriano (2009).

A discretização do modelo é completada com a especificação das condições de contorno (essenciais ou não), com as propriedades dos materiais e com os dados referentes ao tipo de elemento finito utilizado (como espessura e ações externas, por exemplo). A partir dessa definição, o método apresenta condições de calcular o

sistema de equações algébricas (equilíbrio estático) que descrevem o comportamento de cada um dos elementos, para o problema elástico-linear básico:

$$[K]^e \cdot \{u\}^e = \{f\}^e \quad (9)$$

onde, K^e é a matriz de rigidez do elemento, f^e é o vetor de forças nodais equivalentes às ações aplicadas ao elemento e u^e o conjunto dos parâmetros nodais do elemento. Posteriormente, impõe-se a igualdade dos parâmetros nodais nas interfaces de cada elemento, por meio da interpolação das variáveis primárias, de maneira a obter o sistema global de equações algébricas que descreve o comportamento da malha:

$$[K] \cdot \{d\} = \{f\} \quad (10)$$

onde K é a matriz de rigidez global, d é o vetor de deslocamentos nodais globais e f é o vetor global de forças nodais (SORIANO, 2009).

3.4 PROBLEMAS DINÂMICOS

De maneira geral, em análise dinâmica, busca-se a resolução de um sistema global de equações de equilíbrio dinâmico constituído por:

$$F_i(t) + F_D(t) + F_e(t) = F(t) \quad (11)$$

onde $F_i(t)$ são as forças de inércia, $F_D(t)$ forças de amortecimento e $F_e(t)$ as forças elásticas, em função do tempo. No lado direito da Equação (11), as forças $F(t)$ representam as ações externas. Estas forças por sua vez, estão diretamente relacionadas com os vetores de deslocamento (u), velocidades (\dot{u}) e aceleração (\ddot{u}) conforme as equações:

$$F_i(t) = [M] \cdot \{\ddot{u}(t)\} \quad (12)$$

$$F_D(t) = [C] \cdot \{\dot{u}(t)\} \quad (13)$$

$$F_e(t) = [K].\{u(t)\} \quad (14)$$

onde **M** é a matriz de massa, **C** a matriz de amortecimento e **K** a matriz de rigidez (também apresentada na Equação 10). O vetor velocidade, por sua vez, é representado pela derivada no tempo dos deslocamentos, enquanto que o vetor aceleração é representado pela derivada da velocidade no tempo (KOTSOVOS, 2015).

Frequentemente, essas matrizes são constantes e possuem dimensão proporcional ao número de graus de liberdade do sistema. A matriz de massa (**M**), porém, é calculada a partir das massas específicas dos materiais dos elementos e pode ser obtida pela acumulação das matrizes de massa dos elementos da malha (obtidas com as mesmas funções de interpolação do campo de deslocamentos empregadas na determinação das matrizes de rigidez) ou a partir de matrizes discretas de massa (onde as massas são consideradas concentradas em pontos nodais dos elementos) (SORIANO, 2009).

Já a matriz de amortecimento (**C**) é responsável pela dispersão de energia, o que a torna importante em casos de excitações de média e longa duração (como equipamentos rotativos, ondas ou terremotos, por exemplo) e de pouca relevância no caso de forças impulsivas (casos de impacto). Devido à dificuldade na determinação das características de amortecimento dos materiais constituintes do modelo esta matriz costuma ser construída a partir de razões de amortecimento que são obtidos experimentalmente (SORIANO, 2009).

E por fim, a matriz de rigidez (**K**) é a mesma matriz de rigidez global do caso estático, Equação (10), e depende das propriedades do elemento (como módulo de Elasticidade, coeficiente de Poisson, propriedades geométricas da seção transversal e tamanho do elemento) (SORIANO, 2009).

Finalmente, substituindo-se as Equações (12), (13) e (14) em (11), obtém-se:

$$[M].\{\ddot{u}(t)\} + [C].\{\dot{u}(t)\} + [K].\{u(t)\} = \{F(t)\} \quad (15)$$

que é a expressão geral para a classe de problemas abordados neste trabalho.

3.4.1. Métodos de solução para sistemas dinâmicos: métodos explícitos e implícitos

Métodos explícitos ou implícitos são aproximações usadas em análises numéricas para obtenção de soluções que dependem do tempo. No entanto, conforme descrição dada por Bathe (1996), os métodos explícitos calculam o estado do sistema em um tempo posterior considerando as informações apenas do estado atual do sistema, diferentemente dos métodos implícitos, os quais encontram a solução do problema resolvendo uma equação que envolve ambos os estados, atual e posterior, do sistema, em um processo iterativo de solução.

O emprego desses métodos, porém, é limitado ao intervalo de aplicação da carga. Para soluções que são estáticas, com intervalos de carregamento praticamente infinitos, soluções precisas são obtidas com métodos implícitos. Já para problemas que envolvem fenômenos mecânicos com grandes tensões e deformações, com pequenos intervalos de aplicação da carga e efeitos inerciais significativos, o método mais adequado a ser empregado é explícito dinâmico (ANSYS, 2015).

Em vista do objetivo desta pesquisa, os próximos itens limitam-se ao detalhamento do método explícito de solução, o qual será empregado na resolução do problema de interação pneu-pavimento, onde o tempo de aplicação da carga sobre determinado ponto no pavimento limita-se à passagem do veículo sobre o mesmo.

3.4.2 Estratégia de solução dinâmica explícita

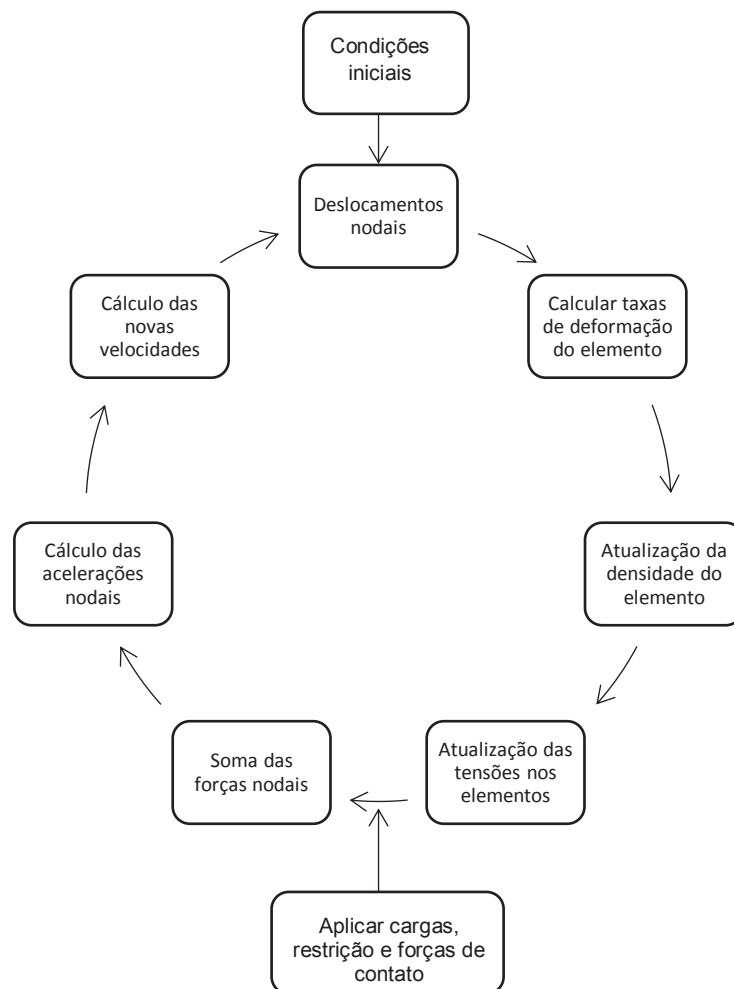
Uma solução dinâmica explícita compreende um domínio discreto (malha), com a definição das propriedades dos materiais, cargas e condições de contorno atribuídas. Este estado inicial, quando integrado no tempo, produzirá movimentos nodais que por sua vez produzirão deformações nos elementos da malha. Estas deformações por sua vez, resultam em uma mudança no volume do material em cada elemento (ANSYS, 2015).

Aplicando-se as leis constitutivas, a partir da taxa de deformação dos materiais, determinam-se as tensões resultantes as quais, por sua vez, são transformadas novamente em forças nodais usando várias formulações de elementos. Essas forças nodais são divididas pela massa nodal, resultando em

acelerações nodais que posteriormente são integradas explicitamente e produzem novas velocidades nodais. As forças nodais externas são determinadas a partir de condições de contorno, cargas e relações de contato (ANSYS, 2015).

Posteriormente, as velocidades nodais são integradas e produzem novas posições nodais. Esse processo de solução se repete para cada incremento de tempo até que o tempo definido pelo usuário seja atingido como mostra a FIGURA 18 (ANSYS, 2015). O tempo definido pelo usuário por sua vez, depende das características da análise proposta. Nesta pesquisa, por exemplo, depende do tempo necessário para o veículo percorrer determinada distância, definido a partir da distância a ser percorrida e da velocidade de deslocamento.

FIGURA 18 - ESTRATÉGIA DE SOLUÇÃO DINÂMICA EXPLÍCITA



FONTE: Adaptado ANSYS (2015).

Para o problema dinâmico, as equações diferenciais parciais a serem resolvidas abrangem a conservação de massa, momento e energia em formulações de Lagrange, que, juntamente, com o modelo de material e as condições iniciais e de contorno, definem a solução completa do problema. Para as formulações Lagrangianas a malha se move e distorce com o material que ela modela e a conservação da massa é automaticamente satisfeita (WILKINS et al., 1974). A densidade, constantemente, é determinada a partir do volume atual e sua massa inicial:

$$\frac{\rho_0 V_0}{V} = \rho \quad (16)$$

onde ρ_0 é a densidade de referência, V_0 o volume inicial, ρ e V , a densidade atual e o volume atual calculado para o tempo inicial, respectivamente, em determinado intervalo de tempo (WILKINS et al., 1974).

As equações diferenciais parciais que expressam a conservação de movimento relacionam a aceleração ao tensor de tensão de Cauchy (σ_{ij}):

$$\rho \ddot{x} = b_x + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \quad (17)$$

$$\rho \ddot{y} = b_y + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \quad (18)$$

$$\rho \ddot{z} = b_z + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} \quad (19)$$

onde ρ é a densidade atual, \ddot{x} , \ddot{y} e \ddot{z} são componentes do vetor aceleração nos respectivos eixos coordenados (x , y e z), b_x , b_y e b_z são as componentes das forças de corpo (tais como a gravidade), ∂ é o operador diferencial, σ_{xx} , σ_{yy} e σ_{zz} são as componentes de tensão normal e τ_{xy} , τ_{yz} , τ_{yx} , τ_{zy} , τ_{zx} e τ_{zy} as componentes de tensão cisalhante (WILKINS et al., 1974).

A conservação de energia é expressa por:

$$\dot{e} = \frac{1}{\rho} (\sigma_{xx} \dot{\epsilon}_{xx} + \sigma_{yy} \dot{\epsilon}_{yy} + \sigma_{zz} \dot{\epsilon}_{zz} + 2\tau_{xy} \dot{\epsilon}_{xy} + 2\tau_{yz} \dot{\epsilon}_{yz} + 2\tau_{zx} \dot{\epsilon}_{zx}) \quad (20)$$

onde $\dot{\epsilon}$ é a taxa de conservação de energia, ρ é a massa específica, $\dot{\epsilon}_{ij}$ é a taxa de deformação e σ_{ij} são as componentes do tensor de tensão onde i e j são índices de discretização dos eixos x , y e z . As equações anteriores são resolvidas para cada elemento do modelo. Pequenos incrementos de tempo são usados para garantir a estabilidade e precisão da solução, sem, no entanto, determinar equilíbrio. Simplesmente obtém-se os resultados do ponto de tempo anterior para prever os resultados no próximo ponto de tempo, sem a necessidade de iterações (WILKINS et al., 1974).

3.4.3 Solução explícita: métodos de integração no tempo com diferenças centrais

A equação semi-discreta do movimento para o tempo n (t^n) pode ser escrita por:

$$M \cdot \ddot{u}^n = F_{ext}^n - F_{int}^n + F_{res}^n \quad (21)$$

onde M é a matriz da massa, F_{ext}^n são as forças externas, F_{res}^n é o vetor de forças residual e F_{int}^n as forças internas (BATHE, 1996). Para avançar para o próximo instante de tempo $n+1$ (t^{n+1}), emprega-se a integração do tempo por diferenças centrais definida por:

$$\ddot{u}^n = M^{-1}(F_{ext}^n - F_{int}^n + F_{res}^n) \quad (22)$$

$$\dot{u}_{n+1/2} = \dot{u}_{n-1/2} + \Delta t_n \cdot \ddot{u}_n \quad (23)$$

$$u_{n+1} = u_n + \Delta t_{n+1/2} \cdot \dot{u}_{n+1/2} \quad (24)$$

onde:

$$\Delta t_{n+1/2} = \frac{(\Delta t_n + \Delta t_{n+1})}{2} \quad (25)$$

em que u , \dot{u} e \ddot{u} são os vetores de deslocamento, velocidade e aceleração, respectivamente (BATHE, 1996). Neste caso, como o método de solução explícito emprega informações apenas do estado atual ($t = n$) para prever o campo de deslocamentos no estado posterior ($t = n+1$), emprega-se a metade do incremento de tempo ($n + 1/2$ e $n - 1/2$) para o estado posterior e estado anterior a $t = n$, respectivamente.

A geometria é atualizada adicionando os incrementos de deslocamento à geometria inicial:

$$x_{n+1} = x_0 + u_{n+1} \quad (26)$$

onde x_{n+1} é a posição do ponto nodal no instante posterior, x_0 é a posição inicial e u_{n+1} é o deslocamento dado pelo incremento de tempo n (BATHE, 1996).

Deste modo, a integração temporal é explícita na medida em que, conhecida a aceleração \ddot{u}_n no instante atual, as velocidades e deslocamentos em um tempo posterior ($n+1$) são calculados a partir de valores conhecidos apenas no tempo anterior (n). Por fim, tendo a informação de u_{n+1} é possível obter o campo de deformações e tensões através das relações:

$$\varepsilon_{n+1} = B \cdot u_{n+1} \quad (27)$$

$$\sigma_{n+1} = D \cdot \varepsilon_{n+1} \quad (28)$$

onde B é a matriz que guarda a informação (coordenadas dos pontos nodais) acerca do elemento finito empregado e D é a matriz de elasticidade. O ciclo é repetido até atingir $t_{n+1} = t_f$ ou seja, tempo final de análise (BATHE, 1996).

3.4.4 Estabilidade e convergência do método de integração explícito

Um processo de integração é estável se pequenas perturbações nos dados iniciais, ou em um dado tempo (t_n), resultam em pequenas alterações na solução numérica em t_{n+1} (tempo posterior). Ou seja, não ocorrem incrementos artificiais na resposta, mas apenas incrementos devido à solução das equações para um dado incremento Δt (BATHE, 1996).

A integração no tempo com diferenças centrais é condicionalmente estável. A estabilidade e precisão da solução obtida, porém, é garantida limitando-se o tamanho do intervalo de tempo pela condição CFL (Courant-Friedrichs-Lewy (COURANT et al.,1967)) conforme o incremento de tempo é limitado à menor dimensão do elemento característico na malha (BATHE, 1996). Assim, o critério de tempo para a estabilidade da solução é:

$$\Delta t = \frac{l}{v_c} \quad (29)$$

onde Δt é o incremento de tempo (*timestep*), l é a menor dimensão característica do elemento e v_c a velocidade do som (associado à propriedade mecânica do meio). Segundo Meyers (1994), a velocidade do som no material, por sua vez pode ser determinado em função do Módulo de Elasticidade do Material (E) e sua densidade (ρ), assim

$$v_c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (30)$$

Já em termos de convergência, no método de integração explícita, de acordo com Bathe (1996), não há problema de convergência uma vez que as respostas cinemáticas são determinadas diretamente.

3.4.5 Problemas de contato

A descrição adequada da interação entre geometrias ou corpos (flexíveis ou rígidos), exige a definição adequada do contato entre eles para que o modelo numérico resulte na descrição realista do fenômeno físico em estudo. Ou seja, o contato fornece uma maneira de tratar a interação entre diferentes partes ou partes desunidas tornando a modelagem precisa das interfaces de contato crucial para a capacidade de previsão das simulações em elementos finitos (ANSYS, 2005).

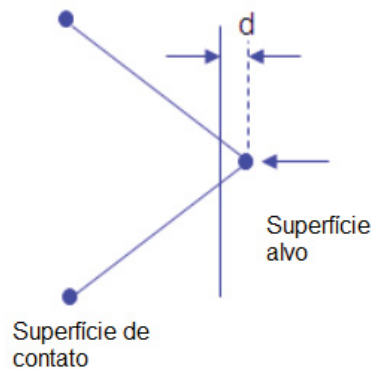
O contato em análises dinâmicas é definido usando superfícies de contato e de alvo. O contato por sua vez, ocorre quando um segmento de determinada superfície externa de um corpo penetra em outro segmento do mesmo corpo ou de

outro distinto (SUMAN, [20--]). A formulação das forças de contato atuantes (F) na interação entre duas partes é dada por:

$$F = k \cdot d \rightarrow k(K, A, V, f_{si}) \quad (31)$$

onde k é a constante de proporcionalidade e depende de K que é o módulo de rigidez do elemento, de A é a área do elemento, V que é o volume do elemento e de f_{si} que é o fator escalar de penalidade; d é a distância de penetração dos nós em contato (FIGURA 19).

FIGURA 19 – SUPERFÍCIES DE CONTATO



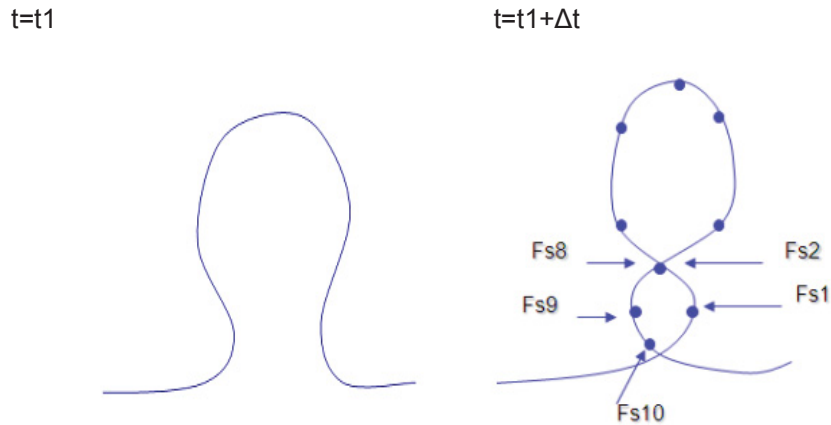
FONTE: Adaptado (SUMAN, [20--]).

O Ansys fornece algoritmos de solução para diversas condições de contato, entre eles: contato entre corpos flexíveis, corpo flexível com o corpo rígido, corpo rígido com o corpo rígido, contato borda a borda, contato corrosivo, superfícies amarradas, paredes rígidas, dentre outros. Já os tipos de contato podem ser: superfície única, nós-superfície e superfície-superfície. Para esses tipos de contato, as opções podem ser: normal, automática, rígida, amarrada, amarrado com falha, corroida ou de fronteira (ANSYS, 2005).

O algoritmo de contato de superfície única (FIGURA 20) estabelece o contato quando uma superfície externa de um corpo entra em contato como ela mesma ou com a superfície externa de outro corpo. É o tipo mais geral de contato onde o programa procura automaticamente todas as superfícies externas dentro de um modelo para determinar se a penetração ocorreu. Neste caso, como todas as

superfícies externas estão incluídas, nenhuma definição de superfície de contato ou superfície de destino (alvo) é necessária (ANSYS, 2005).

FIGURA 20 – CONTATO DE SUPERFÍCIE ÚNICA



FONTE: Adaptado (SUMAN, [20--]).

Já o algoritmo de contato de nó a superfície (FIGURA 21) estabelece contato quando um nó de contato penetra em uma superfície de destino (alvo). É o algoritmo mais rápido porque é assimétrico. Neste caso, apenas os nós de contato que impactam a superfície de destino são considerados. Este tipo de contato é muito robusto para problemas em que a área de contato é relativamente pequena e a área de contato é conhecida com antecedência.

FIGURA 21 – CONTATO DE NÓ A SUPERFÍCIE

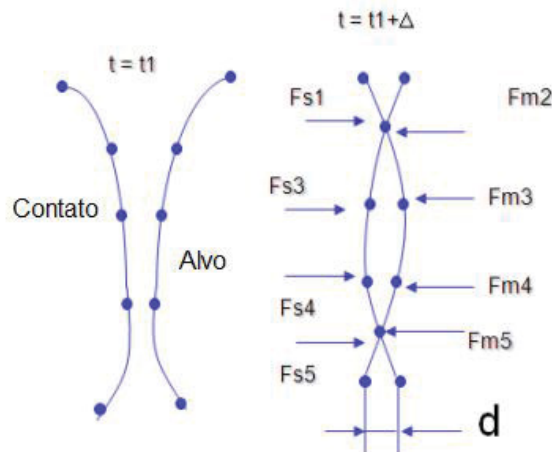


FONTE: Adaptado (SUMAN, [20--]).

E por fim, o algoritmo de contato de superfície-superfície (FIGURA 22) estabelece contato quando a superfície de um corpo penetra na superfície de outro.

Neste caso, o contato é totalmente simétrico, de maneira que a escolha das superfícies de contato e de destino (alvo) é arbitrária. Para este tipo de contato, os componentes nodais são necessários para as superfícies de contato e de destino e os nós podem pertencer a múltiplas superfícies de contato.

FIGURA 22 – CONTATO SUPERFÍCIE-SUPERFÍCIE



FONTE: Adaptado (SUMAN, [20--]).

O algoritmo do contato tipo superfície-superfície é um algoritmo geral e é geralmente usado para corpos que têm grandes áreas de contato e as superfícies de contato são conhecidas.

3.4.5.1. Contato com atrito

Segundo a teoria básica de atrito de Coulomb, duas superfícies de contato podem desenvolver tensões de cisalhamento na interface de contato antes de começarem a deslizar uma em relação à outra. Esse estado é conhecido como aderente. O modelo de atrito de Coulomb define uma tensão de cisalhamento equivalente τ que depende de uma parcela de deslizamento (que por sua vez depende da pressão de contato p) e uma de coesão:

$$\tau = \mu_R \cdot p + cohe \quad (32)$$

onde μ_R é o coeficiente de atrito e *cohe* determina a resistência ao deslizamento ou coesão. Uma vez excedida a tensão de cisalhamento, as duas superfícies deslizarão uma em relação à outra. Esse estado é conhecido como deslizante.

O coeficiente de atrito pode ter dependência de temperatura, tempo, pressão normal, distância de deslizamento ou velocidade relativa de deslizamento. Neste último caso, o coeficiente de atrito estático é maior que o coeficiente dinâmico de atrito.

O coeficiente de atrito usado para contato (μ_c), em análises transientes no Ansys, é determinado a partir do coeficiente de atrito estático (μ_R), do coeficiente de atrito dinâmico (μ_D) e do coeficiente de decaimento exponencial (DC).

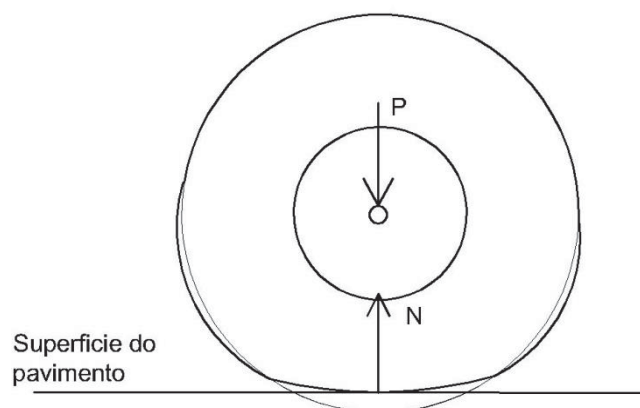
$$\mu_c = \mu_D + (\mu_R - \mu_D) \exp(-DC \cdot V_{rel}) \quad (33)$$

onde V_{rel} é a velocidade relativa entre as superfícies em contato.

3.5 DINÂMICA DA ESTABILIDADE DE VEÍCULOS

Quando em repouso, o pneu encontra-se submetido a uma força vertical P proveniente da carga do veículo e apresenta uma configuração de deformação como é mostrado na FIGURA 23. A distribuição de tensões que se formam na região de contato desenvolve-se de tal forma que a resultante é uma força vertical que passa pelo centro da roda (RODRIGUES FILHO, 2006).

FIGURA 23- DEFORMAÇÃO DE UM PNEU ESTÁTICO SOB CONDIÇÕES DE CARREGAMENTO



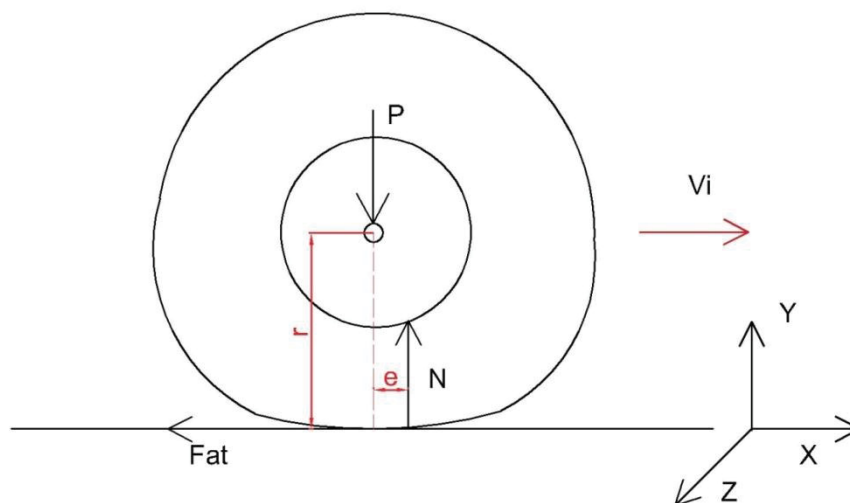
FONTE: A autora (2019).

Durante o movimento do pneu, porém, a uma velocidade inicial v_i a distribuição das tensões de contato altera-se devido às propriedades visco-elásticas da borracha. A força vertical resultante (N) move-se para frente em relação ao centro do pneu. Este deslocamento da força Normal (N) resulta no que se denomina de resistência ao rolamento. Ou seja, em relação ao eixo da roda, o torque da força normal (torque resistente à rotação da roda), deve equilibrar o torque da força de atrito (torque motor para a rotação da roda) quando a roda se desloca com velocidade constante (FIGURA 24) (RODRIGUES FILHO, 2006). Ou seja:

$$F_{at} \cdot r = N \cdot e \quad (34)$$

onde F_{at} é a resistência ao rolamento, e é a excentricidade entre o eixo da roda e o centro de pressão da área de contato, r é o raio do pneu carregado e N é a força vertical resultante.

FIGURA 24 - ESQUEMA DE FORÇAS EM UM PNEU EM MOVIMENTO SOB CONDIÇÕES DE CARREGAMENTO.



FONTE: A autora (2019).

Na prática a resistência ao rolamento é influenciada pelo atrito interno do eixo da roda e pela deflexão do pavimento. Já o coeficiente de atrito é uma característica de cada superfície, responsável pelo atrito e definida como a “força estabelecadora da aderência dos pneus no pavimento” (ARAGÃO, 2016, p.26). Essa resistência ao rolamento por sua vez, como lembra Rodrigues Filho (2006), é

influenciada por diversos fatores, dentre eles a estrutura do pneu e as condições de operação como a pressão de enchimento do pneu, velocidade, temperatura e condições da superfície do pavimento.

Enfim, a simulação das velocidades e frenagem de veículos nas diversas geometrias possíveis: retilíneo plano, alicve e declive; exigem conhecimento da dinâmica envolvida. Em vista disso, nos itens que se seguem são analisadas as componentes físicas e particularidades que determinam tais fenômenos.

3.5.1 Parâmetros de aceleração de veículo

Ehsani et al. (1997), baseado na dinâmica veicular, afirma que ao partir do repouso e acelerar, o veículo é submetido à certas forças que resistem ao movimento, sejam elas: resistência ao rolamento ou força de atrito (F_{at}), resistência aerodinâmica (F_w) e resistência ao alicve (F_p), dadas pelas Equações (35), (36) e (37):

$$F_{at} = \mu_R \cdot P \cdot \cos\theta \quad (35)$$

$$F_w = \frac{1}{2} \rho_a A_f C_D (V_f - V_w)^2 \quad (36)$$

$$F_g = P \cdot \sin\theta \quad (37)$$

onde ρ_a é a densidade do ar, A_f é área frontal do veículo, C_D é o coeficiente de arrasto aerodinâmico, V_f é a velocidade final desejada e V_w é a velocidade do vento. Por outro lado, a força fornecida pelo motor (F_M) do veículo depende da potência fornecida pelo mesmo e é dada por:

$$F_M = \frac{P}{V_f} \quad (38)$$

onde P é a potência do motor (em Watts) e V_f é a velocidade final desejada (em m/s). O tempo (t) necessário para atingir a velocidade desejada pode então ser determinada a partir da aplicação da Segunda Lei de Newton onde:

$$F_R = m \cdot \ddot{u} \gg t = m \cdot \frac{\dot{u}}{F_R} \quad (39)$$

onde m é a massa, F_R é a força resultante e \dot{u} é a velocidade do veículo. A partir do repouso ($v_i = 0$):

$$v_f = v_i + \ddot{u} \cdot t \gg v_f = \dot{u} \cdot t \quad (40)$$

ou:

$$\ddot{u} = \frac{(v_f - v_i)}{t} \quad (41)$$

O equacionamento desenvolvido neste Item determinou as condições de deslocamento do pneu sobre o modelo proposto quando do estudo da aceleração do veículo sobre trechos com ausência de declividade, em aclave e declive. Por simplificação, as forças de arrasto aerodinâmico foram negligenciadas nesta pesquisa.

3.5.2 Frenagem em trecho retilíneo plano

A dinâmica envolvida, considerando um veículo trafegando sobre um trecho retilíneo quando seus freios são acionados, assume que o veículo se move com uma velocidade modular inicial (V_i) (FIGURA 24).

A força de atrito dinâmica entre os pneus e o pavimento pode ser determinada por:

$$F_{at} = \mu_R \cdot P \quad (42)$$

onde F_{at} é a força de atrito (em Newton), μ_R é o coeficiente de atrito (adimensional), P a carga da roda (em Newton). Conforme a Segunda Lei de Newton, porém, a força resultante (F_R) que age sobre um corpo é o produto de sua massa pela aceleração. O equacionamento de equilíbrio do pneu é então definido por:

$$F_{at} = -F_R \gg -\mu_R \cdot P = m \cdot \ddot{u} \quad (43)$$

onde m é a massa do veículo (em kg) e \ddot{u} é sua aceleração (em m/s^2). Como o atrito é a única força resultante atuando sobre o veículo durante a frenagem e força peso (P) é igual ao produto da massa pela aceleração da gravidade ($m.g$), a Equação 40 pode ser reescrita como:

$$\ddot{u} = -\mu_R g \quad (44)$$

onde g é a aceleração da gravidade (em m/s^2). A velocidade final de frenagem (V_f) do veículo pode ser determinada aplicando-se a equação de Torricelli:

$$V_f^2 = V_i^2 + 2. \ddot{u}. d_f \quad (45)$$

onde V_i é a velocidade inicial no início da frenagem e d_f é a distância percorrida pelo veículo durante a frenagem. Substituindo a (Equação 44) em (45) e considerando a velocidade final nula, determina-se o deslocamento de frenagem do veículo:

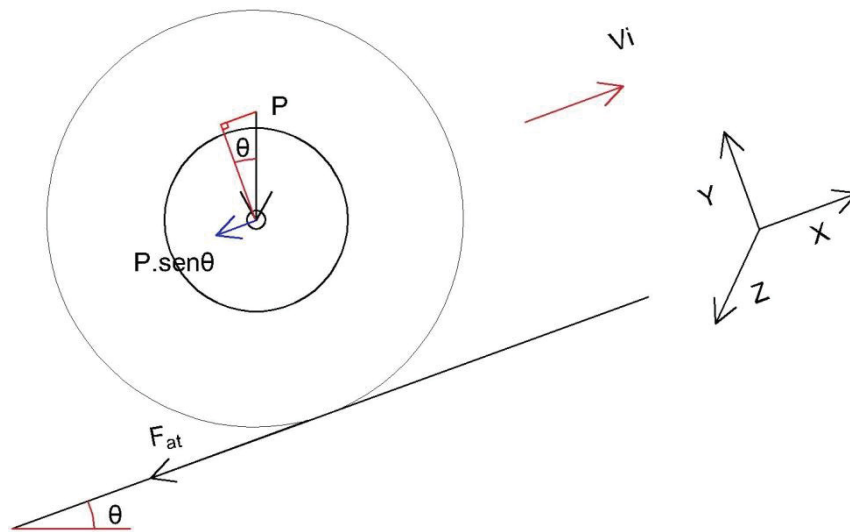
$$d_f = \frac{V_i^2}{2. \mu_R. g} \quad (46)$$

O equacionamento desenvolvido neste Item determinará as condições de deslocamento do pneu sobre o modelo proposto quando do estudo da frenagem do veículo sobre trecho sem declividade.

3.5.3 Frenagem em trecho retilíneo em aclave

Na situação em que o veículo trafega sobre um trecho inclinado, ao acionar os freios, sobre o veículo atuam duas forças: uma componente tangencial da força peso (P) e o atrito (F_{at}) (FIGURA 25).

FIGURA 25 - DINÂMICA ENVOLVIDA NA FRENAGEM EM UM TRECHO COM ACLIVE



FONTE: A autora (2019).

Decompondo a força peso sobre o eixo x e determinando o equilíbrio de forças tem-se que:

$$F_R = -P \cdot \text{sen}(\theta) - F_{at} \rightarrow m \cdot \ddot{u} = -P \cdot \text{sen}(\theta) - \mu_R \cdot P \cdot \text{cos}(\theta) \quad (47)$$

onde θ é o ângulo de inclinação da via. A aceleração resultante é dada por:

$$\ddot{u} = -g(\text{sen}\theta + \mu_R \text{cos}\theta) \quad (48)$$

Substituindo a Equação 48 na equação de Torricelli, obtém-se a velocidade no final da frenagem (V_f):

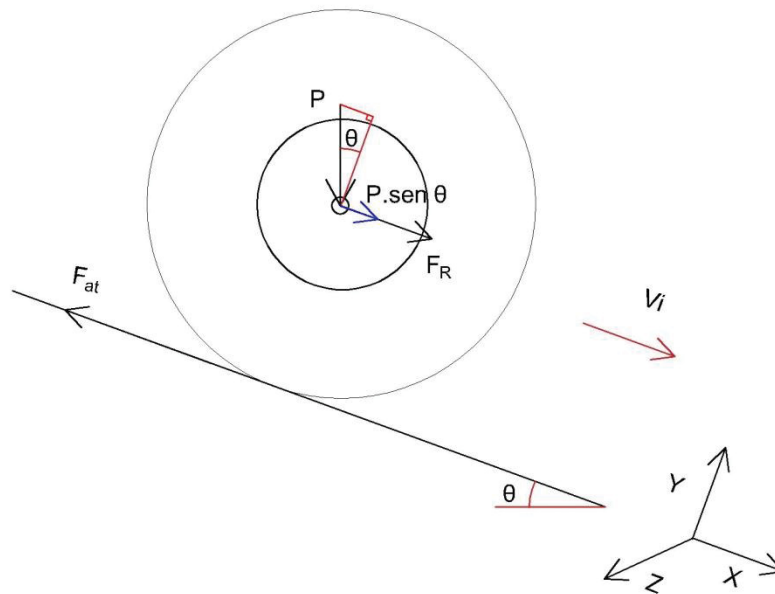
$$V_f^2 = V_i^2 - 2 \cdot g(\text{sen}\theta + \mu_R \text{cos}\theta) \cdot d_f \quad (49)$$

O equacionamento desenvolvido neste Item determinará as condições de deslocamento do pneu sobre o modelo proposto quando do estudo da frenagem do veículo sobre trecho em aclive.

3.5.4 Frenagem em trecho retilíneo em declive

A diferença entre o trecho em aclave e declive está ao aplicar a Segunda Lei de Newton, onde as forças de atrito (F_{at}) e peso tangencial têm sentidos opostos (FIGURA 26).

FIGURA 26 - DINÂMICA ENVOLVIDA NA FRENAGEM EM UM TRECHO COM DECLIVE



FONTE: A autora (2019).

Assim, a frenagem é fornecida pela força de atrito (F_{at}). Tem-se então:

$$F_R = P \cdot \text{sen}(\theta) - F_{at} \quad (50)$$

Da Equação 50 é possível obter a aceleração resultante:

$$\ddot{u} = g(\text{sen}\theta - \mu_R \text{cos}\theta) \quad (51)$$

E finalmente, do mesmo modo que para o Item anterior, verifica-se:

$$V_f^2 = V_i^2 + 2 \cdot g(\text{sen}\theta - \mu_R \text{cos}\theta) \cdot d_f \quad (52)$$

O equacionamento desenvolvido neste Item determinará as condições de deslocamento do pneu sobre o modelo proposto quando do estudo da frenagem do veículo sobre trecho em declive.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A presente pesquisa trata da elaboração de um modelo paramétrico para o estudo de pavimentos flexíveis, em elementos finitos, onde são avaliados diversos fatores relativos às características da via, do veículo em movimento e das interações entre estes, a qual obedece às etapas (FIGURA 27) descritas a seguir:

FIGURA 27 - ETAPAS DE MODELAGEM DESENVOLVIDAS NA PESQUISA

ETAPA 1: DEFINIÇÃO DO MODELO E TIPO DE ANÁLISE

- Tipo de análise e ferramenta computacional - Item 4.1.1
- Definição do modelo - Itens 4.1.2
- Especificações dos parâmetros do modelo para validação da pesquisa - Item 4.1.3



ETAPA 2: DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DA ESTRADA E DO PNEU

- Definição das velocidades diretrizes - Item 4.2.1
- Aderência pneu-pavimento - Item 4.2.2
- Definição das pressões de inflação do pneu - Item 4.2.3
- Definição das declividades da pista - Item 4.2.4
- Definição dos parâmetros de aceleração e frenagem - Item 4.2.5

FONTE: A autora (2019).

4.1 ETAPA 1 - DEFINIÇÃO DO MODELO E TIPO DE ANÁLISE

Nesta etapa foi definido o tipo de análise em termos do programa computacional empregado. Foram determinadas também as propriedades do modelo como: espessuras e propriedades dos materiais das camadas do pavimento, o tipo de veículo e carga de roda, modelo do pneu, condições de contorno, dimensões e malha do modelo. Nesta etapa foi ainda reproduzido um estudo semelhante, realizado por outros pesquisadores, objetivando validar a atual pesquisa.

4.1.1 Tipo de análise e ferramenta computacional empregada

O comportamento estrutural do pavimento foi analisado em termos de tensão (normal, horizontal e cisalhante) e deflexão nas faces superior e inferior do revestimento e também tensões normais no topo da camada do subleito.

A unidade de análise da presente pesquisa consiste em um modelo de seção de pavimento flexível, em elementos finitos 3D, no *software ANSYS*. A análise é do tipo transiente e a solução explícita dinâmica. As etapas de modelagem de uma estrutura no *ANSYS* compreendem a decomposição dos procedimentos em três passos: “*Preprocessor*”, “*Solution*” e “*Postprocessor*”. No “*Preprocessor*” ou pré-processamento foi realizada a modelagem da geometria da estrutura, a definição do tipo de elemento estrutural (sólido), das constantes características do elemento, do tipo de material e lei de comportamento. Já no segundo passo, “*Solution*”, foram definidos os tipos de forças atuantes na estrutura, suas condições de contorno e os parâmetros para a análise (dinâmica). Nesta fase a estrutura foi então calculada. Modelada e calculada a estrutura, no “*Postprocessor*” ou pós-processamento, foi feita a apresentação dos resultados da análise do passo anterior em termos, por exemplo, de deslocamentos, tensões e deformações, etc.

4.1.2 Definição do modelo

A seguir são apresentados os parâmetros relativos ao modelo bem como número, espessuras e materiais das camadas do pavimento, condições de contorno, definição da malha e do modelo reproduzido na validação desta pesquisa.

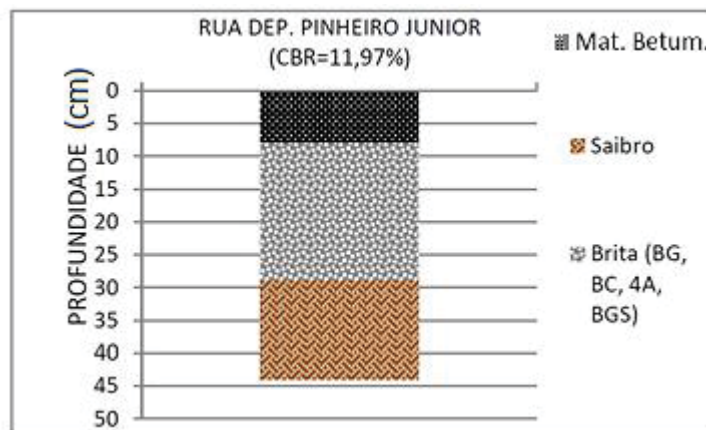
a) Estrutura do pavimento e materiais das camadas

A definição da estrutura do pavimento foi baseada nos resultados obtidos de uma pesquisa realizada através do convênio entre o IPPUC (Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Curitiba) e a UFPR (Universidade Federal do Paraná), que leva o título de “Pesquisa de Alternativas de Pavimentação e Recuperação de Pavimentos em Vias de Transporte Coletivo na Cidade de Curitiba”. O estudo abrangeu o levantamento de características de pavimentos asfálticos, em condições

ruins de trafegabilidade, igualmente distribuídos entre as diversas regiões da cidade de Curitiba (TEIXEIRA, 2015).

A pesquisa apontou, a partir de boletins de sondagem realizados em campo, que cerca de 80% dos pavimentos analisados são compostos por três camadas (revestimento betuminoso, base de brita e sub-base de saibro). Dentre estes foi escolhida a seção do pavimento da Rua Deputado Pinheiro Junior, para ser reproduzida nesta pesquisa (FIGURA 28). Os valores de Módulo de Resiliência (MR), Coeficiente de Poisson (ν), massa específica (ρ) dos materiais e espessura das camadas (H) utilizados na simulação numérica são apresentados na TABELA 9.

FIGURA 28 - PERFIL DE SONDAÇÃO DEP. PINHEIRO JUNIOR



FONTE: Teixeira (2015).

TABELA 9 - PROPRIEDADES DA SEÇÃO DO PAVIMENTO

Material	MR (MPa) ¹	ν ²	ρ (g/cm ³)	H (mm)
Material Betuminoso degradado (CBUQ, PMF, PMQ)	2.000	0,30	2,34 ³	80
Base Granular (Brita Graduada)	300 (225)	0,35	2,00	210
Solo sem estabilização (Saibro: Solo laterítico - LA ¹ e LG ¹)	160 (150)	0,35	2,00 ⁴	150
Subleito	80 (88,16)	0,40	2,00	-

¹ Valores estimados dos Módulos de Resiliência de acordo com as recomendações contidas no IP008/2004 – PMSP.

² Valores básicos para o coeficiente de Poisson de acordo com IP008/2004 – PMSP

³ Gmb (Massa específica aparente da mistura): valor inferior obtido por TEIXEIRA (2015) para o CAP 50/70

⁴Especificação de serviço – Sub-Base: PMC-ES 021/99.

OBS: Os valores entre parênteses correspondem aos valores adotados por TEIXEIRA (2015).

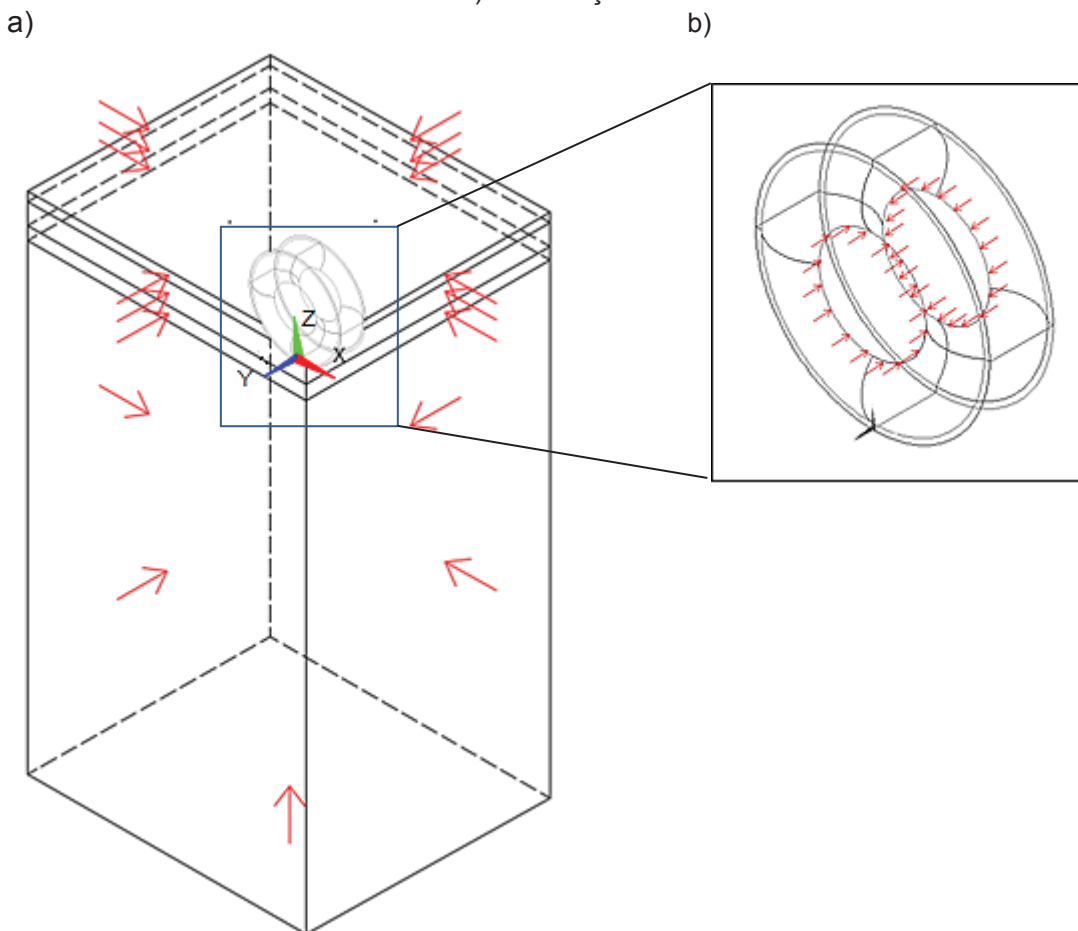
FONTE: A autora (2019).

Os baixos valores empregados para o Módulo de Resiliência são devido às características do pavimento em estudo o qual possui uma condição estrutural degradada. Já em termos do comportamento dos materiais, neste estudo, por simplificação, este foi considerado do tipo elástico linear.

b) Condições de contorno das geometrias do pavimento

Os elementos que compõem a geometria do pavimento possuem restrições de deslocamento vertical na face inferior da camada de subleito e horizontal nas faces verticais, conforme FIGURA 29 a), Saad et al. (2005), Zaghoul e White (1993) e Kuo et al.(1995). Para o pneu foram consideradas restrições de deslocamento no eixo Y, no centro do pneumático, no entorno do que seria o aro da roda (FIGURA 29 b)).

FIGURA 29 – CONDIÇÕES DE CONTORNO DO MODELO a) RESTRIÇÕES NAS FACES DO PAVIMENTO b) RESTRIÇÕES DO EIXO NO PNEU.



Por outro lado, a definição da carga de roda e do tipo de pneu foi baseada no tipo de ônibus que normalmente transita na região de estudo. Tem-se que a Rua Deputado Pinheiro Junior é alimentada por linhas de ônibus do Tipo Alimentador, operadas por veículos tipo comum (FIGURA 30) que ligam os terminais de integração aos bairros de cada região. De acordo com classificação dada pelo DNIT, trata-se do veículo de classe 2CB (DNIT, 2012), cujas especificações são dadas na TABELA 10.

FIGURA 30 - TIPO DE VEÍCULO DO TRANSPORTE COLETIVO NA RUA EM ESTUDO



FONTE: Candioto (2017).

TABELA 10 - CLASSE DO VEÍCULO EM ESTUDO

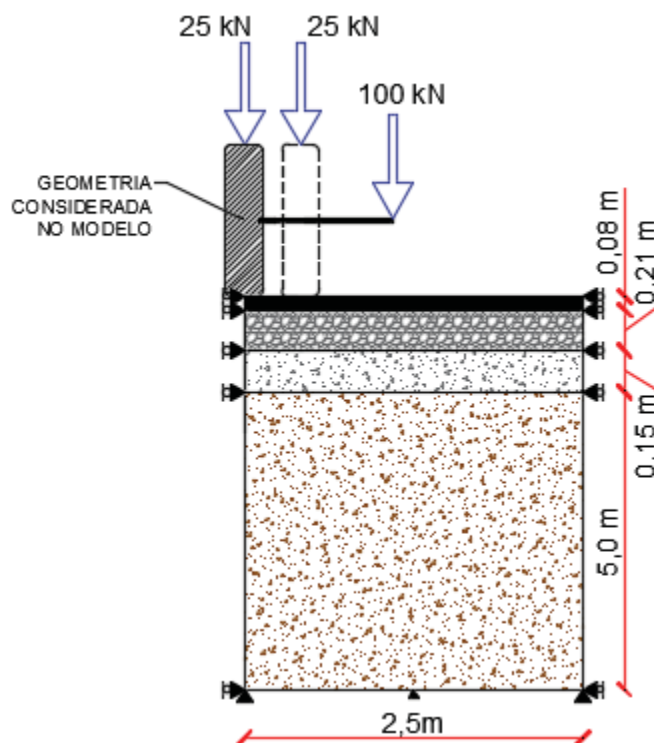
SILHUETA	PBT ou PBTC máx (t)	CARACTERIZAÇÃO	CLASSE
	16 / (16,8)	<p>ÔNIBUS</p> <p>E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton.</p> <p>E2 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. $d_{12} > 3,50$ m</p>	2CB

FONTE: DNIT (2012)

Logo, as condições de contorno aplicadas no modelo simulam a situação de um eixo de ônibus comum 2CB do DNIT, ou seja, ESRD (E2 na TABELA 10

corresponde ao eixo traseiro) com carga de 10 tf (100 kN). Por simplificação empregou-se um modelo simétrico em relação ao eixo do pneu, e a carga utilizada na simulação ($P=25$ kN) corresponde a apenas um pneu do eixo traseiro, como mostra a FIGURA 31, onde o eixo vertical de aplicação da carga coincide com a borda da seção. Essa posição do pneu, na quina do modelo, foi possível devido a adoção das restrições da geometria que compõe o pavimento, permitindo assim um modelo com uma região de fronteira (região em torno do raio da área carregada) menor; do contrário, ao se colocar o pneu no centro do pavimento, essa região de fronteira deveria abranger todas as faces dessa área carregada o que o tornaria o modelo excessivamente grande e não gerenciável no tempo.

FIGURA 31 - CONDIÇÕES DE CONTORNO



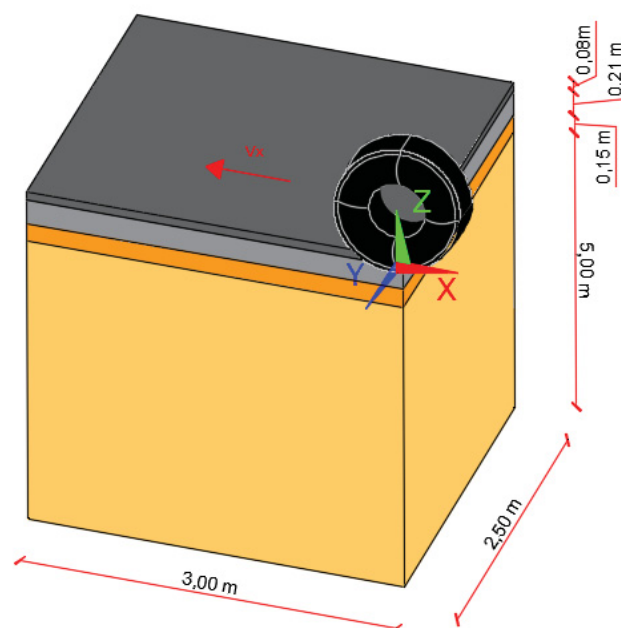
FONTE: A autora (2019).

c) Definição da malha em MEF

Em termos do domínio do modelo, considerando que este deve ser grande o suficiente para evitar influências das bordas, foi feito um esforço para obter

dimensões que possibilitassem manter o tamanho do problema gerenciável para o tempo de computação, escopo de análise de interesse, e ainda os requisitos de armazenamento do computador. Levando-se em consideração as recomendações contidas em MEDINA e MOTTA (2015), os quais determinam que uma fronteira lateral adequada é cerca de 20 vezes ou mais o raio da área carregada, e a do fundo cerca de 50 vezes esse raio, obteve-se um domínio para o modelo com 5,0 m de profundidade, 2,5 m de largura e 3 m de comprimento (FIGURA 32).

FIGURA 32 - MODELO GEOMÉTRICO OBTIDO.



FONTE: A autora (2019).

Definido o domínio, a seguinte etapa consistiu na geração da malha. A estrutura do pavimento foi modelada com o elemento *SOLID 164*, elemento finito hexaédrico de oito nós, com os seguintes graus de liberdade: deslocamentos, velocidades e acelerações nodais nas direções x, y e z. Ambos os elementos são usados em análises explícitas dinâmicas somente (ANSYS, 2015).

O refinamento da malha por sua vez, foi definido primeiramente considerando um carregamento estático e distribuído sobre uma área que representa a região de contato entre o pneu e o pavimento. Admitindo que a pressão de contato pneu-pavimento seja igual à pressão de inflação do pneu (conforme Item 3.2.1), para uma inflação de 760 kPa (pressão comumente empregada nos pneus modelo 275/80 R22.5 pelas empresas de ônibus em Curitiba), a área de contato deverá ser igual a

32.894,74 mm² (25 kN / 760 kPa). Assumindo ainda, que esta área seja um retângulo, conforme apresentado na FIGURA 14 b) o comprimento L é calculado conforme Huang (1993):

$$L = \sqrt{\frac{A}{0,5227}} \quad (53)$$

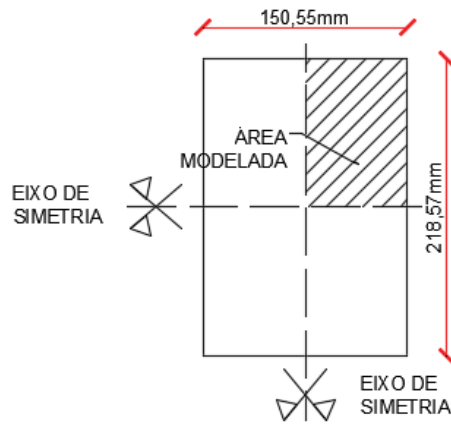
onde A é a área de contato, em mm². Aproximando a área de contato a um retângulo equivalente, a nova geometria possui comprimento C=218,57 mm (0,8712L) e uma largura B=150,53 mm (0,6L) (FIGURA 33 a).

A FIGURA 33 b) mostra a malha com o refinamento e um detalhe da região carregada (1/4 da área retangular equivalente) delimitada por simetria. O elemento finito empregado na etapa de refinamento, considerando o modelo estático, foi o SOLID45 e definido por oito nós com três graus de liberdade em cada nó: deslocamentos nas direções nodais x, y e z (ANSYS, 2015).

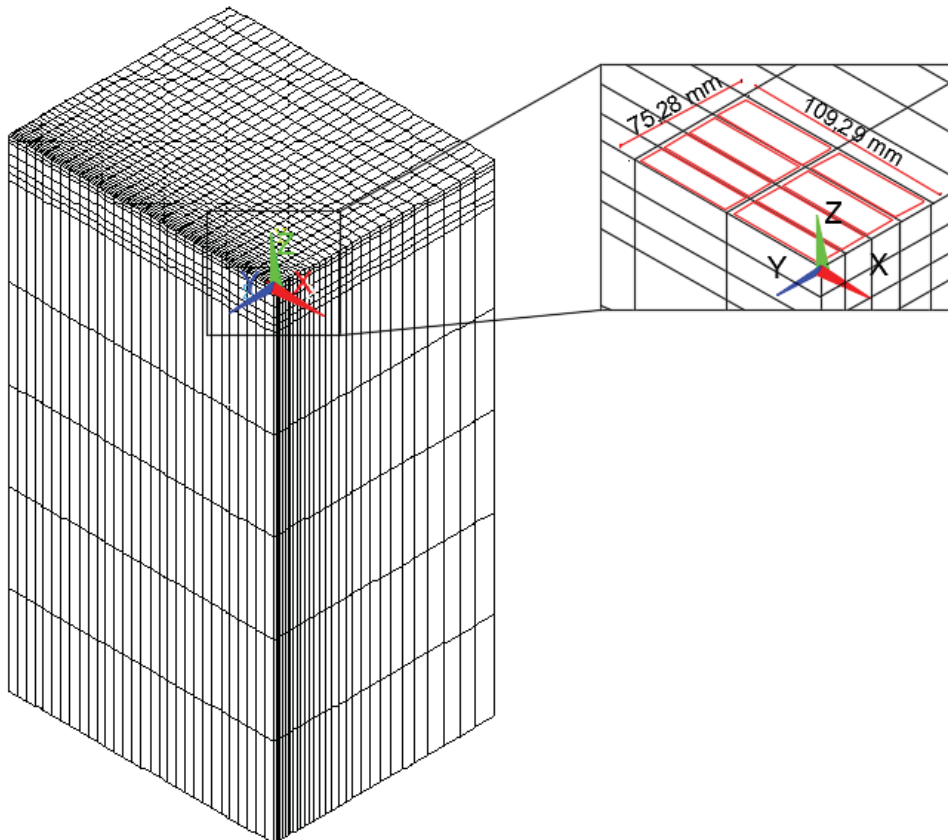
Ainda em termos do refinamento do modelo, visto que o movimento do pneu na superfície do pavimento ocorre no sentido negativo do eixo x, uma malha mais refinada é necessária perto da área carregada para capturar as deflexões na passada do pneu e o gradiente de tensão nestas áreas. A subdivisão, na direção perpendicular ao percurso do pneu (eixo -y), é realizada de modo que o tamanho dos elementos seja menor onde os gradientes de tensão (e deflexão) esperados são altos, a fim de permitir obter uma resposta confiável ao longo de todo o trajeto. No sentido do percurso do pneu (eixo -x), porém, a malha é uniforme (FIGURA 34).

FIGURA 33 – DEFINIÇÃO DA GEOMETRIA DA MALHA a) ÁREA DE CONTATO PNEU-PAVIMENTO E CONDIÇÕES DE SIMETRIA; b) MALHA EM MEF COM DETALHE AMPLIADO NA ÁREA DE APLICAÇÃO DA PRESSÃO DE CONTATO.

a)

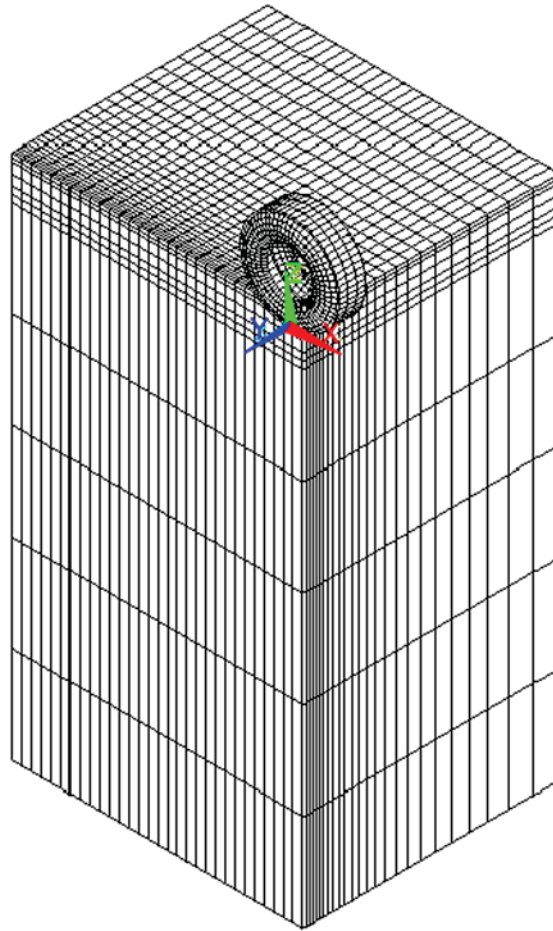


b)



FONTE: A autora (2019).

FIGURA 34 - MODELO PNEU-PAVIMENTO (DETALHE DO REFINAMENTO).



FONTE: A autora (2019).

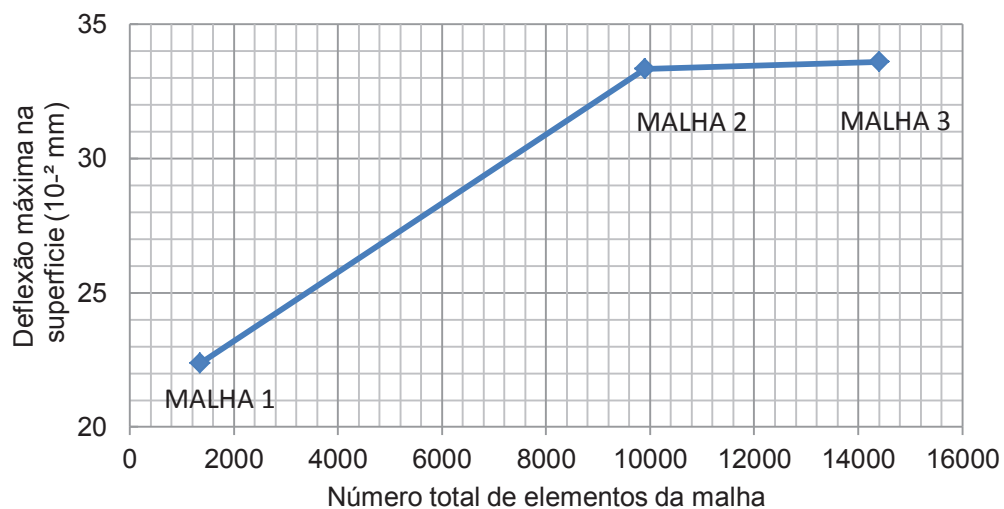
A malha com melhor resultado foi escolhida a partir da geração de três malhas de diferentes refinamentos e um número total de elementos variando de 2.800 a 34.000 elementos finitos. O desempenho da malha foi analisado com base na deflexão vertical máxima da superfície ($U_{z_{máx}}$), que está no centro da área carregada. Os resultados da convergência das análises são mostrados na TABELA 11 e plotadas na FIGURA 35. Como pode ser observado, a partir da segunda malha testada já é possível obter melhor convergência em termos de deflexão vertical da superfície, assim, buscando o equilíbrio entre uma malha cujo refinamento pudesse produzir respostas confiáveis e ao mesmo tempo não tornasse sua resolução desnecessariamente lenta para um determinado tempo de processamento, a malha 2 foi a empregada nesta pesquisa.

TABELA 11 - PROPRIEDADES DAS MALHAS GERADAS NO MODELO ESTÁTICO.

Camada	Número total de elementos finitos no modelo		
	Malha 1	Malha 2	Malha 3
Revestimento	225	1800	2700
Base	225	1800	2700
Sub-base	225	1800	2700
Subleito	675	4500	6300
Total	1350	9900	14400
Uz (mm)	0,2236	0,3333	0,3360
Tempo de processamento (s)	15,938	45,469	93,156

FONTE: A autora (2019).

FIGURA 35 - CONVERGÊNCIA DA MALHA.



FONTE: A autora (2019).

Prosseguindo na definição dos parâmetros do modelo, após a definição da malha, é necessário definir as regiões ou superfícies que entrarão em contato: pneu e pavimento. O contato adotado nesta pesquisa foi o Contato Automático Superfície-Superfície (ASTS). Neste tipo de contato, o programa determina automaticamente quais superfícies dentro do modelo podem entrar em contato, não sendo necessária a definição de contato ou de superfície de destino. Contato de superfície a superfície é o tipo mais geral de contato, e é geralmente empregado para corpos que têm formas arbitrárias com áreas de contato relativamente grandes. Esse tipo de contato é eficiente para corpos que experimentam grandes quantidades de deslizamento relativo entre si, como por exemplo, um bloco deslizando sobre um plano ou uma esfera rolando dentro de uma ranhura (ANSYS, 2015). Já as superfícies de contato

entre as camadas do pavimento (revestimento, base, subbase e subleito) foram consideradas “coladas”, se comportando como um conjunto rígido com diversas camadas de propriedades diversas.

Em termos de coeficiente de atrito, este é definido para a interface do contato. Como visto no Item 3.4.5.1, o coeficiente de atrito depende da velocidade relativa entre as superfícies em contato, assim, considerando as características dinâmicas do modelo, são inseridos no programa valores de coeficiente de atrito tanto estático como dinâmico.

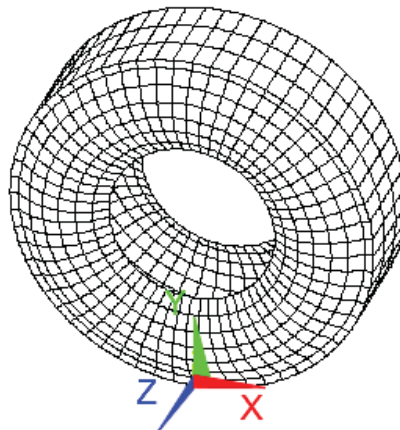
E por fim, visto que o modelo explícito dinâmico é condicionalmente estável, o valor do tamanho do incremento de tempo (Δt) para a integração numérica foi definido. Aplicando a Equação 29 (Item 3.4.4), tem-se que a menor dimensão característica dos elementos da malha é de 26 mm e que a velocidade do som (associado à propriedade mecânica do meio) pode ser determinada ($\sqrt{2000 \text{ MPa} / 2.34 \text{ g/cm}^3} = 924,50 \text{ m/s}$), o valor adotado para o parâmetro Δt foi de 0.00002812s. A escolha das propriedades do material da camada de revestimento justifica-se pelo fato de esta retornar o menor Δt entre as demais camadas do pavimento.

4.1.3 Especificação dos parâmetros do modelo para o pneu

O modelo de pneu foi definido após consulta a empresas que operam linhas de ônibus do Tipo Alimentador. Verificou-se o emprego de dois modelos: 275/80 R22.5 e 295/80 R22.5, sendo o primeiro o mais empregado e estabelecido para uso pelo Manual de Especificações da Frota (URBS, 2018). Neste caso, 275 é a largura do pneu, indicada em milímetros. O 80 quer dizer que a altura do pneu é igual a 80% da sua largura. O R indica que o pneu é do tipo Radial e 22,5 o raio nominal do aro, em polegadas (ou 571,5 mm).

Já a malha foi obtida com o elemento finito retangular do tipo *SHELL163*, um elemento plano de 4 nós com capacidade de dobra (na modelagem de corpos como superfícies curvas, por exemplo) e de membrana, com 12 graus de liberdade em cada nó: translação, velocidades e acelerações nas direções nodais x, y e z e rotação em torno dos eixos nodais x, y e z (FIGURA 36) .

FIGURA 36 – MALHA DO PNEU.



FONTE: A autora (2019).

O material empregado para o pneu é do tipo hiperelástico. As informações inseridas referem-se às constantes de deformação desviatória do material (c_{10} e c_{01} iguais a 0,551584 e 0,137896 MPa, respectivamente), coeficiente de Poisson ($\nu = 0,5$) e módulo de elasticidade ($E = 6.894,8$ MPa). A densidade do pneu (em kg/mm^3) foi determinada a partir da razão entre a carga de roda (em kg) e o volume da região modelada do pneu (espessura de 1mm para o elemento *SHELL163*).

Sobre o pneu foram inseridas ainda informações referente a aceleração da gravidade ($9,80665 \text{ m}/\text{s}^2$), pressão de inflação (em MPa) e velocidade angular (em rad), sendo esta obtida a partir da expressão:

$$v_{ang} = \frac{v_{desl}}{r} \quad (54)$$

onde v_{ang} é a velocidade angular (em rad), v_{desl} é a velocidade linear de deslocamento do pneu (em mm/s) e r o raio do pneu (em mm). A pressão de inflação, por sua vez, considera uma tensão distribuída uniformemente sobre toda a área interna do pneumático, tanto da região que entra em contato com o pavimento como as bordas laterais do modelo representado na FIGURA 36.

4.1.4 Especificação dos parâmetros do modelo para validação da pesquisa

Definidos os parâmetros do modelo a serem empregados na pesquisa, é necessário verificar se o seu comportamento expressa o comportamento real da estrutura, calibrando-o. Para tal, buscou-se na literatura pesquisas análogas que

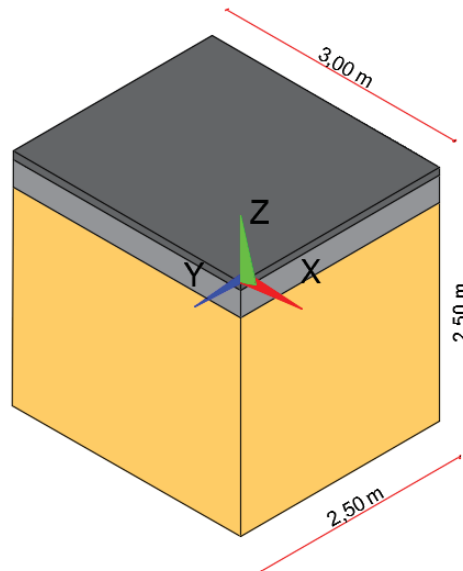
pudessem ser reproduzidas de maneira a validar o modelo previamente desenvolvido.

A validação em questão consiste na reprodução parcial do estudo de Saad et al. (2005), onde os pesquisadores examinaram a resposta dinâmica de pavimentos flexíveis, nomeadamente tensões de fadiga, ruptura e deflexão vertical da superfície. Os pesquisadores conduziram seu estudo com o auxílio do programa ADINA, em um modelo tridimensional, dinâmico implícito, de elementos finitos. A configuração do modelo, incluindo geometria, condições de contorno e caracterização de carga foram reproduzidas conforme descrição que segue.

a) Definição do domínio e estrutura do modelo de Saad et al. (2005)

O domínio do modelo reproduzido consiste em uma camada de subleito com 2,5 m de profundidade, 2,5 m de largura e 3 m de comprimento conforme FIGURA 37 e obtidas apartir de Saad et al (2005).

FIGURA 37 - GEOMETRIA DO MODELO REPRODUZIDO NA VALIDAÇÃO.



FONTE: A autora (2019).

Os três materiais da seção do pavimento foram assumidos linearmente elásticos conforme definição dada por Saad et al. (2005), cujas propriedades mecânicas e espessuras das camadas estão listadas na TABELA 12.

TABELA 12 - PROPRIEDADES DA SEÇÃO DO PAVIMENTO NO MODELO DE VALIDAÇÃO.

Material	E (MPa)	v	ρ (g/cm ³)	H (mm)
Revestimento em CA	4.134,693	0,30	2,49	101,6
Base granular	206,734	0,30	2,21	304,8
Subleito (areia siltosa)	50,581	0,30	1,38	2500

FONTE: Saad et al. (2005).

b) Condições de contorno

Condições convencionais de contorno cinemático foram adotadas, ou seja, restrições horizontais nas quatro faces verticais da malha (simulando o confinamento) e vertical na parte inferior da malha (face inferior da camada de subleito), conforme especificado pelos pesquisadores.

Saad et al. (2005) adotaram uma carga de roda de 40 kN, equivalente a uma carga de 80 kN de um eixo simples. Em seu modelo dinâmico implícito, os pesquisadores empregaram o conceito contido em Terrel et al.(1974 apud SAAD et al., 2005), segundo o qual, cada passagem de roda sobre a superfície de rolagem pode ser considerado como um pulso de carga. Ou seja, quando a carga está diretamente acima de determinado ponto, as tensões neste momento são máximas, e quando a carga da roda está a uma distância considerável a partir desse ponto no pavimento, as tensões nesse ponto são nulas. Em seu estudo então, foi considerado um carregamento dinâmico aplicado em pulsos de carga de 40 kN e duração de 0,1s, o que corresponderia a uma velocidade de 50 km/h.

Na validação do modelo explícito no Ansys por outro lado, foram inseridas informações relativas à velocidade (linear e angular do pneu), para um tempo de simulação $t_f=0,205$ s (tempo que o pneu leva para percorrer os limites especificados do modelo na direção negativa do eixo X para a velocidade em estudo), determinado a partir de:

$$t_f = L \cdot \frac{3,6}{V} \quad (55)$$

onde t_f corresponde ao tempo de simulação (em s), L o comprimento do modelo na direção do eixo X (no caso L=3 m) e V a velocidade linear do pneu (no caso V = 50 km/h).

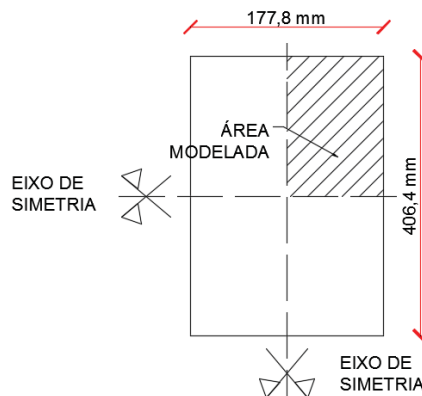
O tipo de contato entre o pneu e a superfície do pavimento, considerado nesta validação foi do tipo contato automático superfície-superfície (ASTS).

c) Definição da malha em MEF

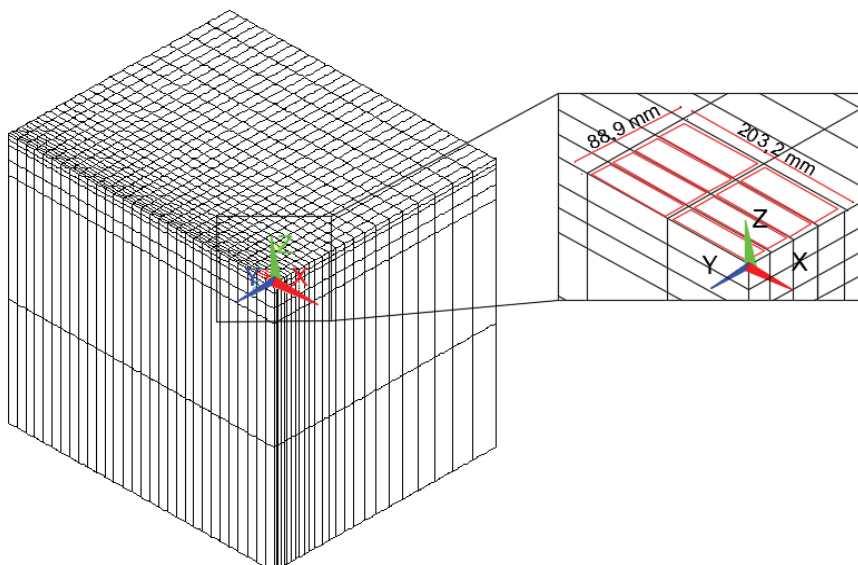
O refinamento da malha foi obtido aplicando-se sobre o pavimento um carregamento estático, uniformemente distribuído, sobre uma área que simula a área de contato pneu-pavimento. Os autores aproximaram a área de contato a um retângulo equivalente, e consideraram uma área com um comprimento $C=406,4$ mm e uma largura $B=177,8$ mm, sendo a mesma empregada nesta validação (FIGURA 38a). Para isto a pressão de contato pneu-pavimento foi assumida como igual à pressão de inflação do pneu (550 kPa).

FIGURA 38 - MODELO EM MEF: a) ÁREA DE CONTATO PNEU-PAVIMENTO; b) DETALHE DA MALHA EM MEF.

a)



b)



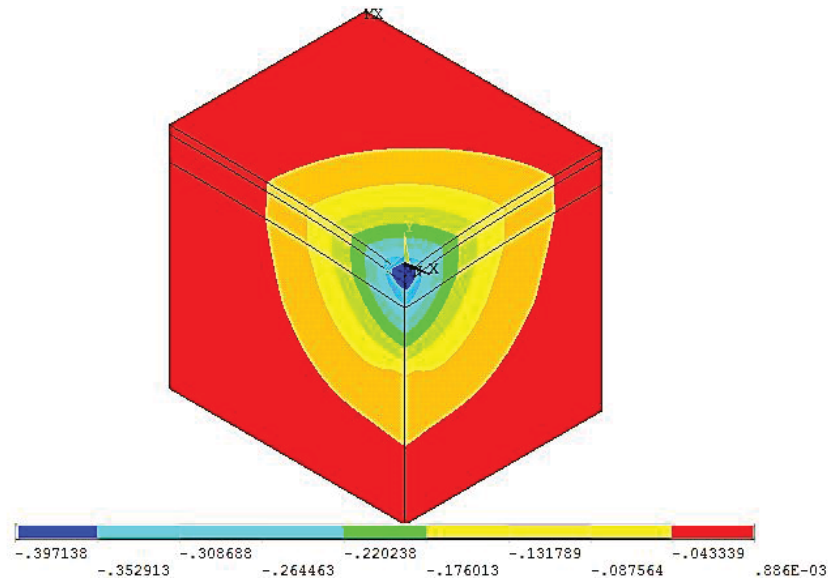
FONTE: A autora (2019).

Na FIGURA 38 b), a malha final é apresentada. Esta foi definida a partir da geração de três malhas de diferentes densidades de elementos e um número total de elementos variando de 1.200 a 11.250 elementos (TABELA 13). O elemento finito empregado, nesta etapa, é do tipo SOLID45, conforme descrição anterior.

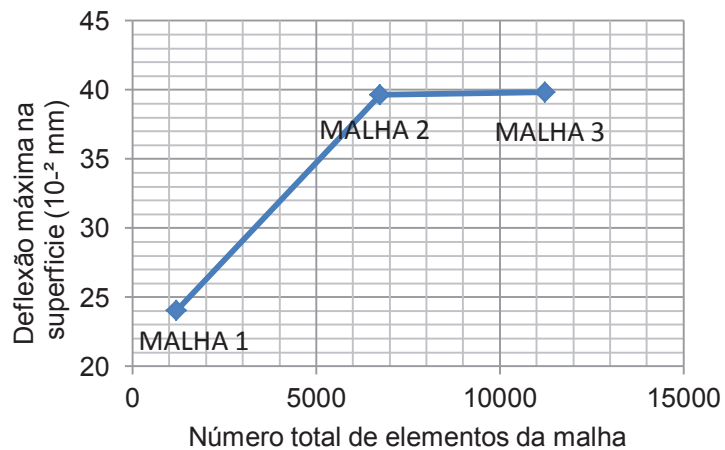
O desempenho da malha foi avaliado com base na deflexão vertical máxima da superfície ($U_{z_{máx}}$), no centro da área carregada (FIGURA 39a). Os resultados do teste de convergência das análises são apresentados na TABELA 13 e plotadas na FIGURA 39b). Como pode ser visto, a partir das malha 2 já se obtém melhor convergência em termos de deflexão vertical da superfície, sendo então adotada.

FIGURA 39 - MODELO EM MEF: a) DEFLEXÃO ($U_{z_{máx}}$) b) CONVERGÊNCIA DA MALHA

a)



b)



FONTE: A autora (2019).

O valor da deflexão vertical máxima obtida na análise estática para a malha 2, bem como as tensões vertical, horizontal e cisalhante, atuantes na superfície do revestimento foram então comparadas com os valores correspondentes obtidos a partir da análise dinâmica aqui complementada. E por fim, a deflexão máxima do modelo dinâmico desenvolvido nesta pesquisa foi comparada com a obtido por Saad et al. (2005).

TABELA 13 - PROPRIEDADES DE MALHA DE ELEMENTOS FINITOS PARA ANÁLISE DE CONVERGÊNCIA

Camada	Número total de elementos finitos no modelo		
	Malha 1	Malha 2	Malha 3
Asfalto	400	2250	3750
Base	400	2250	3750
Subleito	400	2250	3750
Total	1200	6750	11250
Uz máx (mm)	0,24063	0,3964	0,39815
Tempo de processamento (s)	13,109	29,484	58,828

FONTE: A autora (2019).

4.2 ETAPA 2 - DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DA ESTRADA E DO PNEU

Nesta etapa foram definidos os parâmetros da via em termos da aderência pneu-pavimento e declividades longitudinais. Já para o pneu foram definidas as velocidades e pressões de inflação.

4.2.1 Definição das velocidades diretrizes

Visando a análise do comportamento do pavimento quando da aplicação de cargas dinâmicas, foram definidas três velocidades: 20, 40 e 60 km/h, as quais terão seus efeitos quantificados para os parâmetros definidos anteriormente. Os resultados dessas análises foram confrontados com o modelo estático ($v=0$ km/h).

Tais velocidades foram definidas baseadas nas diretrizes contidas no Código de Trânsito Brasileiro (CTB), contendo o limite para vias urbanas: 80 km/h nas vias de trânsito rápido, 60 km/h nas vias arteriais, 40 km/h nas vias coletoras e 30 km/h nas vias locais (BRASIL, 2017). A Rua Deputado Pinheiro Junior, objeto de estudo

nesta pesquisa (Item 4.1.2), é classificada como via coletora, logo seu limite de velocidade é 40 km/h, no entanto, foram selecionadas mais duas velocidades, uma mais rápida e outra mais lenta, 60 km/h e 20 km/h, respectivamente, de modo a avaliar a influência da velocidade sobre a estrutura do pavimento.

4.2.2 Aderência pneu-pavimento

A aderência entre o pneu e o pavimento foi estabelecida em função do coeficiente de atrito (IFI). Este, por sua vez, é definido em função da micro e macrotextura dadas em termos do valor de resistência à derrapagem (VRD) e altura média de mancha de areia (HS), respectivamente, conforme especificações do DNIT (2006) e descrição apresentada no Item 3.3.1 (TABELA 14).

A partir dos dados apresentados nas TABELAS 3 e 4, foram atribuídos valores de VRD e HS de modo a obter condições de rugosidade que simulassem três condições de pista em termos de micro e macrotextura: muito lisa ou fina, muito rugosa ou aberta e uma condição intermediária entre estas duas. Os valores de VRD e HS obtidos estão apresentados na TABELA 14.

TABELA 14 - NÍVEIS DE ADERÊNCIA DO MODELO

Situação	Microtextura (VRD)		Macrotextura (HS)	
	1	Muito lisa	25	Fina ou fechada
2	Medianamente rugosa	47	Média	0,5
3	Muito rugosa	95	Muito grosseira ou muito aberta	1,9

FONTE: Adaptado de DNIT (2006).

Em seguida, definidos os valores de VRD e HS foi possível determinar os pares de valores (F_{60} , S_p) que definem o IFI do pavimento o qual foi determinado conforme descrição dada Item 3.2.2 e Equações (5) a (8).

A TABELA 15 apresenta ainda os valores do atrito dinâmico (FS) para as velocidades de 20, 40 e 60 km/h, consideradas neste estudo, além do atrito estático (0 km/h), determinados a partir da Equação (8). Os atritos dinâmico e estático são parâmetros inseridos no modelo no momento da definição do contato entre o pneu e o pavimento, logo são essenciais na definição do modelo, além de constarem como variáveis do estudo. Neste estudo foi considerada apenas a rugosidade do

pavimento, sem nenhum tipo de irregularidade como lombadas, painelas e afundamento, por exemplo.

TABELA 15 - VALOR DE IFI PARA AS SITUAÇÕES DE ADERÊNCIA PROPOSTAS E VALORES DE ATRITO DINÂMICO (FS) PARA AS VELOCIDADES EM ESTUDO.

Situação	IFI		Valores de FS (adimensional)			
	F ₆₀	S _p	0 km/h	20 km/h	40 km/h	60 km/h
1	0,10	33,84	0,60	0,33	0,18	0,10
2	0,18	45,20	0,68	0,44	0,28	0,18
3	0,65	204,24	0,87	0,79	0,72	0,65

FONTE: A autora (2019).

4.2.3 Definição das pressões de inflação do pneu

As pressões de inflação foram definidas a partir de consulta às empresas de ônibus que operam as linhas “Tipo Alimentador” em Curitiba. Tendo-se em vista a adoção do pneu 275/80 R22.5, as pressões de inflação fornecidas foram de 105 lb (0,720 MPa) e 110 lb (0,760 MPa), para os pneus tanto dianteiros como traseiros. A pressão máxima, no entanto, fornecida pelo fabricante é de 125 lb (0,860 MPa). Esta, juntamente com as pressões fornecidas pela empresa e uma intermediária de 120 lb (0,83 MPa) foram as pressões escolhidas para análise proposta na pesquisa.

4.2.4 Definição das declividades da pista

Nesta etapa foi considerado ainda, em termos da variação das características do pavimento, o comportamento das tensões e deformações na presença de declividade longitudinal da pista. Assim, no que refere o alinhamento vertical das vias, foram adotados os valores de 0%, 3%, 6%, 8% e 11% de declividade para as rampas máximas. Estes valores por sua vez foram atribuídos baseados nos limites máximos de rampas para vias urbanas contidos no Manual de Projetos Geométricos de Travessias Urbanas do DNIT (2010), apenas para fim de estudo, não sendo conferidas suas existências na Rua Deputado Pinheiro Junior. O Manual não apresenta limites para vias coletoras (classificação dada a Rua

Deputado Pinheiro Junior, objeto deste estudo), sendo adotados então os limites para vias arteriais apresentados na TABELA 16.

TABELA 16 – RAMPAS MÁXIMAS PARA VIAS URBANAS (%).

Categoria da via	Relevo	Velocidade diretriz (km/h)		
		50	60	70
Vias arteriais	Plano	8	7	6
	Ondulado	9	8	7
	Montanhoso	11	10	9

FONTE: Adaptado de DNIT (2010).

Os valores de declividade foram assim definidos procurando abranger características de vias com relevo de plano a ondulado (6% e 8%) a montanhoso (11%), simulando assim as mais diversas situações a que o motorista está sujeito no tráfego urbano.

No entanto, ainda de acordo com o Manual de Projetos Geométricos de Travessias Urbanas do DNIT (2010), os greides das vias devem estar relacionados com a velocidade de projeto, ou seja, a rampa de uma via que tem velocidade diretriz elevada deve ser mais suave que a rampa da via com velocidade diretriz baixa. Assim, para fins de estudos, todas as declividades (3%, 6%, 8% e 11%) foram testadas para todas as velocidades (20, 40 e 60 km/h) apesar de o manual estabelecer o limite da rampa máxima para as vias arteriais de 10% para a velocidade de projeto de 60 km/h (TABELA 16).

Por simplificação, foi desconsiderada nesta pesquisa a redistribuição das cargas atuantes sobre os eixos dianteiro e traseiro do veículo que ocorre devido à declividade da pista como lembra Senço (2001), o qual afirma que, em trechos em aclive as rodas dos eixos traseiros são sobrecarregadas, enquanto que no declive essa redistribuição ocorre para os eixos dianteiros.

4.2.5 Definição dos parâmetros de aceleração e frenagem

Uma última análise foi realizada inserindo variações de velocidade: o pneu partindo do repouso (acelerando) e freando (desacelerando). Para tal foram consideradas situações comuns de frenagem onde o motorista hipoteticamente possui uma visão do obstáculo a uma distância segura para acionar os freios, como ocorre, por exemplo, nas proximidades de interseções e lombadas devidamente

sinalizadas. Por outro lado, a distância e o tempo necessários para atingir as velocidades diretrizes (20, 40 e 60 km/h), partindo do repouso, depende da potência do motor do veículo. O Manual de Especificações da Frota, elaborado pela URBS (Urbanização de Curitiba) estabelece uma potência mínima de 210 CV (154 kW) para o veículo do Tipo Comum, o qual foi empregada nesta pesquisa (URBS, 2018).

Os parâmetros inseridos no modelo estão contidos nos ANEXOS 1 e 2 os quais foram obtidos considerando-se os conceitos da dinâmica da estabilidade de veículos apresentada no Item 3.6. Considerando ainda a limitação do tamanho do modelo, a aceleração e frenagem foram analisadas para os 3 metros iniciais e finais, respectivamente, para os casos em que as distâncias necessárias para atingir a velocidade final (0, 20, 40 ou 60 km/h), extrapolam os limites do modelo.

4.2 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

Visando a obtenção de um modelo gerenciável no tempo, algumas simplificações foram adotadas. A seguir estão relacionadas as limitações adotadas nesta pesquisa:

- Modelagem de apenas um dos pneus do ESRD: A simplificação adotada na modelagem do eixo traseiro do veículo, modelando-se apenas um dos pneus do eixo duplo, foi adotada devido à limitação do poder computacional disponível.
- Propriedades das camadas: A camada de concreto asfáltico possui comportamento termoviscoplastico quando do aumento ou variação da temperatura e carregamento. Nesta pesquisa, porém, por simplificação, adotou-se um comportamento do tipo elástico linear.
- Ligação plena entre as camadas da estrutura do pavimento: as superfícies de contato entre as camadas do pavimento (revestimento, base, subbase e subleito) foram consideradas “coladas”, ou seja, como um conjunto rígido com diversas camadas de propriedades diversas. O novo método brasileiro de dimensionamento, porém, especifica que a ligação plena ocorra apenas entre camadas asfálticas.

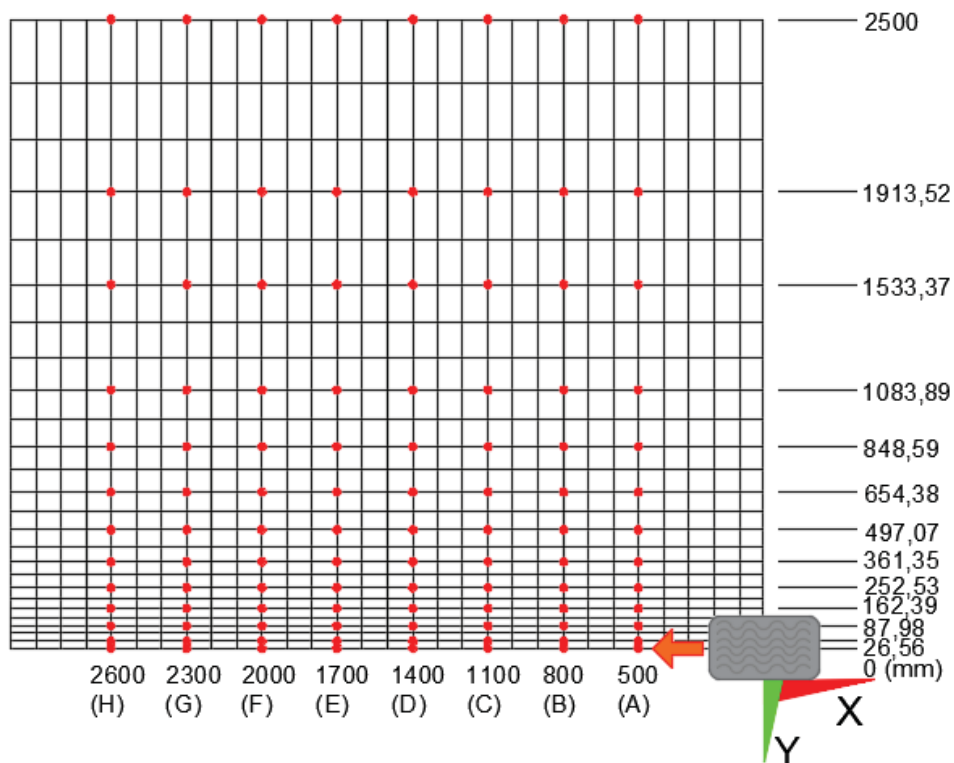
5. RESULTADOS DA PESQUISA

Neste item são apresentados os resultados obtidos nas diversas simulações realizadas considerando-se os parâmetros descritos no Item 4. Inicialmente, no Item 5.1 são descritos os resultados coletados do modelo empregado para validação da pesquisa proposto no Item 4.1.4 e posteriormente, no Item 5.2, os resultados mais relevantes para o modelo proposto em 4.1.2.

5.1 VALIDAÇÃO DA PESQUISA

Após a definição, no Item 4.1.3, das especificações do modelo visando a validação desta pesquisa, foram medidos valores de tensão (S_y , S_x , S_z , S_{xy}) e deflexão (U_z) nos pontos marcados na FIGURA 40. Os resultados dinâmicos foram inicialmente comparados à resposta do modelo estático e posteriormente a solução obtida para a deflexão é contrastada com a obtida por Saad et al. (2005).

FIGURA 40 - PONTOS ANALISADOS NA SUPERFÍCIE DO PAVIMENTO.

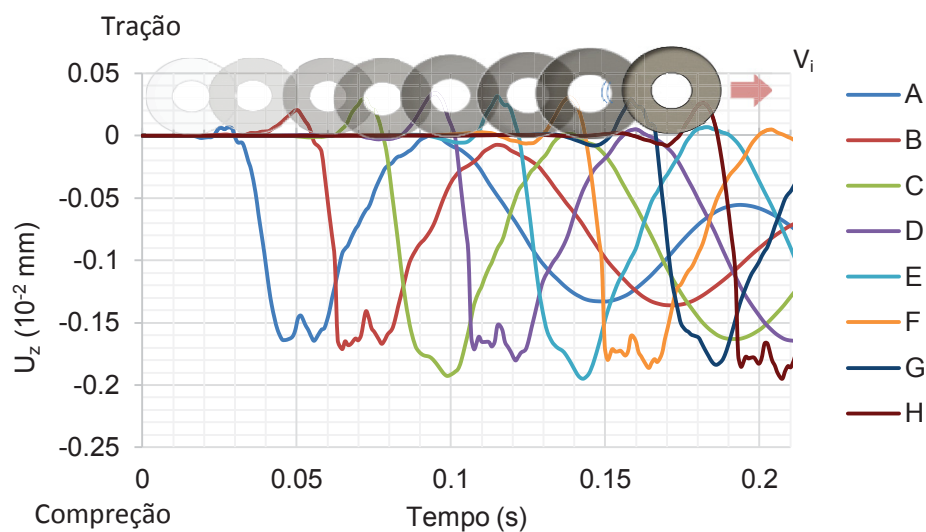


FONTE: A autora (2019).

Os pontos A ao H localizam-se na superfície do pavimento, no sentido do movimento do pneu (sentido negativo do eixo x). Já na direção transversal, os pontos analisados, encontram-se sobre alinhamentos paralelos ao eixo y, definidos pelas cotas ao longo deste eixo, também sobre a superfície do pavimento.

Os primeiros resultados gerados (FIGURA 41) apresentam o comportamento das deflexões para os pontos localizados sobre o eixo x: (A,0), (B,0), (C,0), (D,0), (E,0), (F,0), (G,0) e (H,0), ao longo do tempo, a uma velocidade de 50 km/h. Nota-se a partir da análise da figura que, quando a carga está sobre determinado ponto, as deflexões neste ponto são máximas, ocorrendo sua dissipação em momentos posteriores à passagem do pneu. Este mesmo comportamento é observado para os diversos pontos analisados, apresentando picos de deflexão muito próximos ao longo do tempo. O sinal negativo nas componentes, tanto de tensão como de deflexões, ao longo de toda pesquisa, indica compressão e o positivo, tração.

FIGURA 41 – DEFLEXÕES (10^{-2} mm) MEDIDAS NO TEMPO, AO LONGO DO SENTIDO DO MOVIMENTO DO PNEU.



FONTE: A autora (2019).

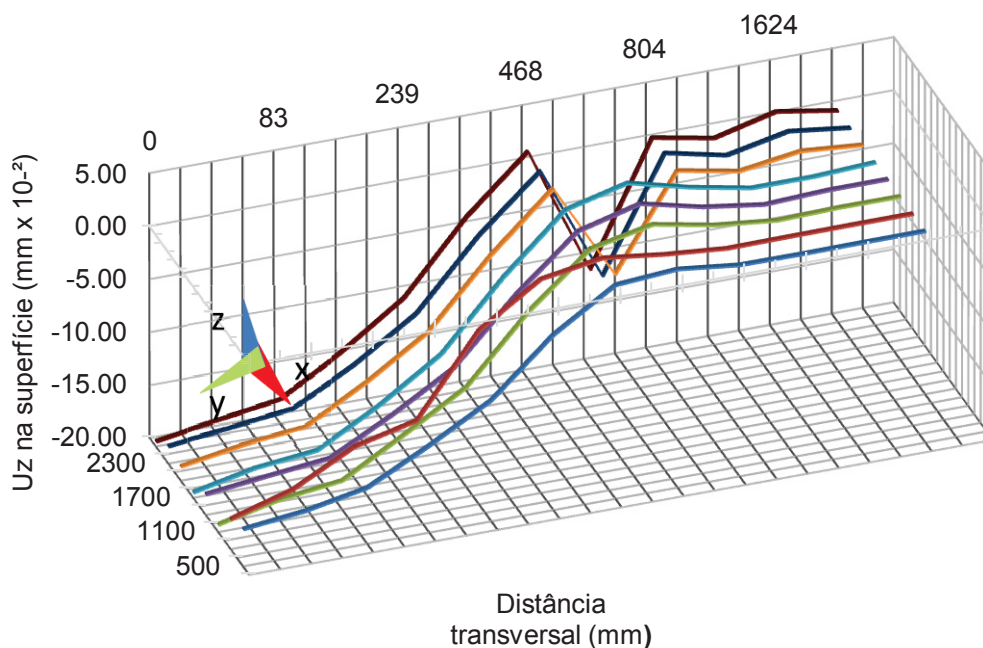
A magnitude dessas deflexões máximas, por sua vez, bem como o instante em que ocorrem é apresentada na TABELA 17, cujas coordenadas foram lidas na FIGURA 40.

TABELA 17 – DEFLEXÕES ($10^{-2}mm$) MÁXIMAS NOS PONTOS ANALISADOS DA FIGURA 40.

Ponto	Coordenada (x,y,z) mm	t (s)	Uz ($10^{-2}mm$)
A	(500;0,0)	0,056	-16,45
B	(800;0,0)	0,065	-17,12
C	(1100;0,0)	0,099	-19,27
D	(1400;0,0)	0,121	-18,01
E	(1700;0,0)	0,143	-19,47
F	(2000;0,0)	0,164	-18,63
G	(2300;0,0)	0,186	-18,34
H	(2600;0,0)	0,207	-19,50

Plotando essas deflexões máximas, agora em perspectiva, considerando o comportamento do pavimento no sentido transversal ao deslocamento do pneu (eixo z), obtem-se a FIGURA 42, a partir da qual é possível notar que as deflexões a uma distância de cerca de 0,50 m (468 mm) deixam de ser de compressão (negativas) e passam a ser de tração (positivas), tornando-se praticamente nulas a partir de cerca 0,90m do centro de aplicação da carga ($y=0$), para o pavimento estudado.

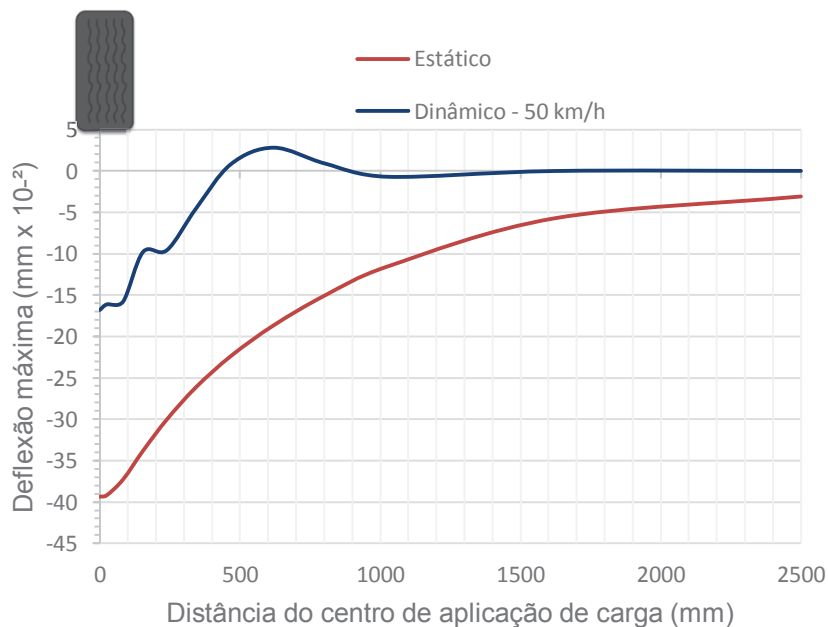
FIGURA 42 – DEFLEXÕES MÁXIMAS (mm) NA DIREÇÃO TRANSVERSAL AO SENTIDO DE DESLOCAMENTO DO PNEU, A 50 km/h.



FONTE: A autora (2019).

Ainda em termos das deflexões, fazendo a comparação do modelo dinâmico com o modelo estático, ambos obtidos no Ansys (FIGURA 43), na direção transversal (eixo y), observa-se uma redução da deflexão máxima daquele em relação a esta (enquanto que no modelo estático o valor máximo é de 46×10^{-2} mm, no dinâmico é de 17×10^{-2} mm, representando uma redução de cerca de 60%). O ponto analisado na FIGURA 43 corresponde ao Ponto A da FIGURA 40.

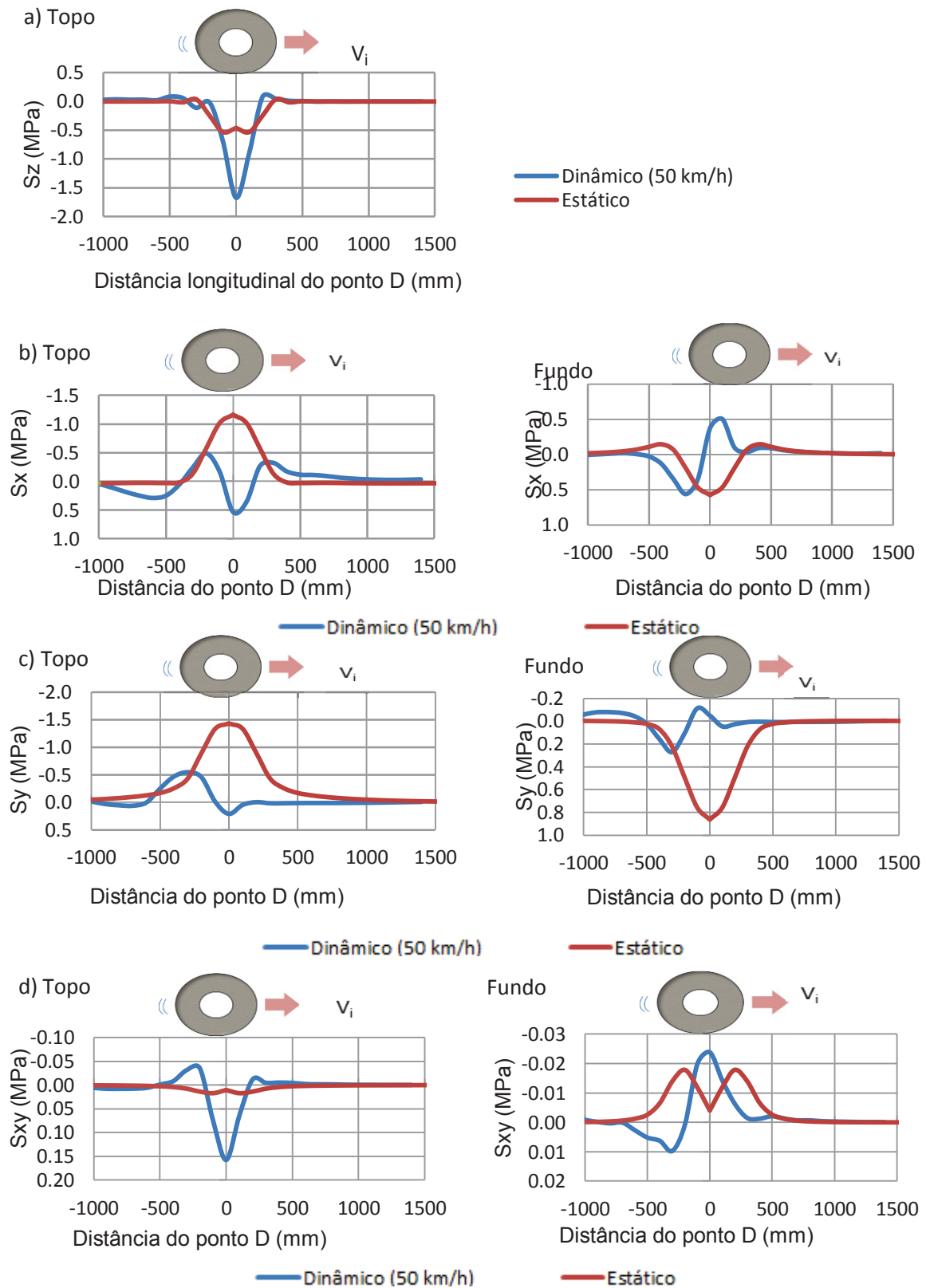
FIGURA 43 – DEFLEXÃO NA DIREÇÃO TRANSVERSAL (eixo y) DOS MODELOS DINÂMICO E ESTÁTICO.



FONTE: A autora (2019).

Prosseguindo-se a análise dos resultados, a FIGURA 44 mostra o comportamento das tensões máximas verticais (S_y) na face superior do revestimento, as horizontais (S_x e S_y , correspondentes às direções x e y, respectivamente) e cisalhante (S_{xy} correspondente ao plano xy) para o topo e fundo do revestimento, tanto para o caso estático como para o dinâmico. O ponto analisado nesta etapa é o ponto D (FIGURA 40) sendo as componentes de tensão, citadas anteriormente, avaliadas a determinadas distâncias longitudinais em relação a este ponto.

FIGURA 44 – TENSÕES VERTICAIS, HORIZONTAIS E CISLHANTES (TOPO E FUNDO DO REVESTIMENTO).



FONTE: A autora (2019).

Os primeiros resultados (FIGURA 44a) apontaram um aumento das tensões verticais (eixo z, de compressão) quando da inserção da velocidade apresentando, para os modelos estático e dinâmico, tensões iguais a -0,53 MPa e -1,77 MPa, respectivamente, o que representa cerca de 230% de aumento. Este aumento, porém, não foi observado para as tensões horizontais (FIGURA 44 b e c). No entanto, para estas tensões, o comportamento das curvas no modelo estático difere do dinâmico, sendo que este apresenta uma sucessão de esforços (de tração para compressão ou vice-versa) mais acentuada no entorno do centro de aplicação da carga, o qual é representado na FIGURA 41 pela posição do pneu em determinado instante de tempo da análise dinâmica.

Analisando ainda a FIGURA 44 b) e c), as tensões horizontais em X e Y, na face superior do revestimento, em momentos imediatamente posteriores à aplicação da carga, apresentam tensão negativa (compressão), como era esperado de acordo com o modelo estático. No entanto, em momentos imediatamente anteriores ao contato do pneu com a superfície do pavimento, essas tensões são de tração (positivas). Já na face inferior do revestimento, para as mesmas tensões, o comportamento se repete, porém de modo invertido, inicialmente tração, seguido de compressão.

Analisando agora o cisalhamento (FIGURA 44 d), este apresentou valores mais críticos no modelo dinâmico, se comparado com o modelo estático: de 0,038 MPa para 0,15MPa na face superior e de 0,026 MPa para 0,023MPa na face inferior, do dinâmico para o estático, respectivamente (valores em módulo). Tal resultado pode estar associado com os mecanismos de falha em pavimentos.

Finalmente, a comparação dos resultados de deflexão obtidos por Saad et al. (2005) com os resultados do modelo reproduzido são apresentados na TABELA 18 e plotados na FIGURA 45. A direção Y (em mm) corresponde à localização, sobre este mesmo eixo, dos pontos analisados no sentido transversal ao movimento do pneu (FIGURA 40). O ponto analisado correspondente ao ponto A da FIGURA 40.

Observa-se uma aproximação muito forte entre o resultado obtido e o esperado com uma diferença de apenas 2% a 4% na região próxima ao eixo de aplicação da carga no Ponto A, de coordenadas (500,0,0). No entanto, ao se distanciar do eixo de aplicação, essa diferença começa a ser mais significativa,

porém, devido à baixa amplitude dos resultados, pouco significativa em termos numéricos.

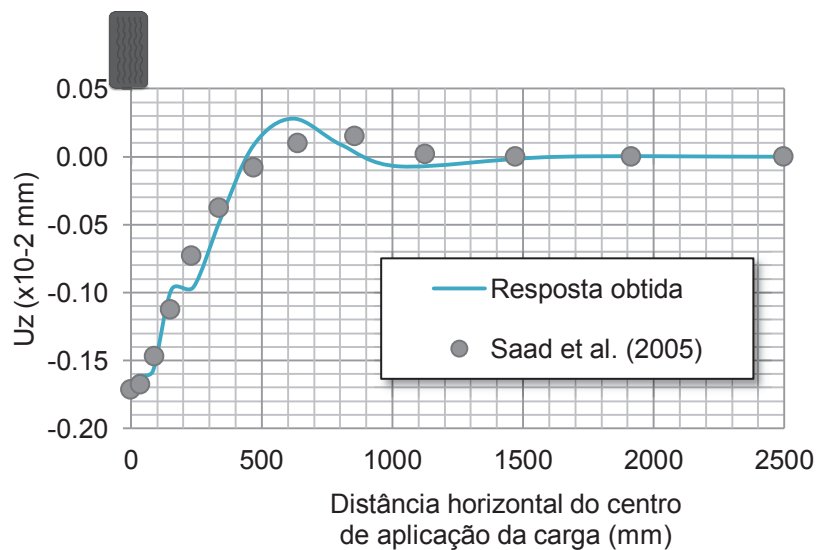
TABELA 18 - DEFLEXÃO VERTICAL NA FACE SUPERIOR DO PAVIMENTO EM COMPARAÇÃO AOS ESTUDOS DE SAAD et al. (2005)

y (mm)	Saad et al. (2005) (10^{-2} mm)	Resposta obtida (10^{-2} mm)	Diferença percentual (%)
0,0	-0,171591	-0,16800	-2,1%
39,5	-0,168115	-0,16130	-4,2%
84,7	-0,147272	-0,15770	6,6%
165,0	-0,112965	-0,09799	-15,3%
228,4	-0,073378	-0,09577	23,4%
341,2	-0,037951	-0,04560	16,8%
479,4	-0,008269	0,00826	151,7%
648,7	0,009850	0,02804	64,8%
856,1	0,014728	0,00877	-67,9%
1110,3	0,001516	-0,00715	-83,2%
1421,7	0,000000	-0,00015	0,0%
1948,7	0,000000	-0,00004	0,0%
2449,0	0,000000	0,00009	0,0%

FONTE: A autora (2019).

Sendo assim, dada a pouca diferença (o que talvez se justifique pela qualidade da malha obtida neste trabalho), os resultados até o momento podem ser considerados satisfatórios para a finalidade desta pesquisa e o modelo pode ser considerado consistente e válido para estudos posteriores.

FIGURA 45 – COMPARAÇÃO DOS DADOS NESTA PESQUISA COM OS DE SAAD et al (2005).



FONTE: A autora (2019).

5.2 RESULTADOS DO MODELO PROPOSTO

Neste Item são apresentados os resultados das simulações obtidas a partir das diversas combinações dos parâmetros definidos no Item 4.2 para o modelo proposto em 4.1.2. Para melhor compreensão das análises realizadas, a TABELA 19 traz um resumo das combinações entre os parâmetros adotados.

A combinação dos parâmetros apresentados: aderência pneu-pavimento representada pelo coeficiente de atrito estático ($\mu=0,60$; $0,68$ e $0,87$), velocidades diretrizes (20, 40 e 60 km/h), inflação do pneu ($q=0,72$; $0,76$; $0,83$ e $0,86$ MPa), declividades da pista ($i = 3, 6, 8$ e 11%), aceleração (0-20 km/h, 0-40 km/h e 0-60 km/h) e frenagem do pneu (20-0 km/h, 40-0 km/h e 60-0 km/h), resultaram em um total de 174 simulações paramétricas cujos resultados são analisados nas seções que se seguem. Os campos marcados com “x” correspondem às simulações feitas e os respectivos parâmetros considerados.

No entanto, conforme descrito na TABELA 19, para as situações que simulam velocidade constante e declividade nula, foram analisadas a influência de todas as pressões de inflação ($q = 0,72$; $0,76$; $0,83$ e $0,86$ MPa) e de rugosidade ($\mu = 0,60$; $0,68$ e $0,87$). Já para trechos em auge e declive, a pressão de inflação foi fixada em $0,76$ MPa para todas as rugosidades propostas. Por outro lado, na aceleração e frenagem do pneu, a pressão de inflação também foi fixada em $0,76$ MPa, mas a rugosidade da pista, em termos do coeficiente de atrito, foi fixado em $\mu=0,68$ (situação de rugosidade média).

Em relação às componentes de tensão e deslocamentos lidos ao final de cada simulação, para as situações com velocidade constante foram analisadas: tensão normal vertical (S_z) no topo da camada de revestimento e do subleito, deflexão (U_z) no topo do revestimento, tensões normais horizontais (S_x e S_y) e cisalhante (S_{xy}) no topo e fundo do revestimento. Para a aceleração e a frenagem foram lidas: a tensão vertical (S_z) no topo do subleito, a deflexão (U_z) no topo do revestimento, a tensão horizontal (S_x) e cisalhante (S_{xy}) no topo e fundo do revestimento. Já em termos das tensões principais, foram analisadas as componentes S_1 , S_3 e τ_{\max} para os trechos com declividade $i = 0\%$ para todas as situações de deslocamento (velocidade constante, aceleração e frenagem) e para os trechos com declividade variável apenas para a situação como velocidade constante.

TABELA 19 – TABELA RESUMO DAS SIMULAÇÕES REALIZADAS NESTA PESQUISA.

Velocidade (km/h)	p _i (MPa)	Declividade														
		i=0%			i= +/-3%			i= +/-6%			i= +/-8%			i= +/-11%		
		Atrito estático (μ)			Atrito estático(μ)			Atrito estático(μ)			Atrito estático (μ)			Atrito estático(μ)		
		0,60	0,68	0,87	0,60	0,68	0,87	0,60	0,68	0,87	0,60	0,68	0,87	0,60	0,68	0,87
Constante	20	0,72	x ¹	x ¹	x ¹											
		0,76	x ¹	x ¹	x ¹	x ¹	x ¹	x ¹	x ¹	x ¹	x ¹	x ¹	x ¹	x ¹	x ¹	x ¹
		0,83	x ¹	x ¹	x ¹											
		0,86	x ¹	x ¹	x ¹											
	40	0,72	x ¹	x ¹	x ¹											
		0,76	x ¹	x ¹	x ¹	x ¹	x ¹	x ¹	x ¹	x ¹	x ¹	x ¹	x ¹	x ¹	x ¹	x ¹
		0,83	x ¹	x ¹	x ¹											
		0,86	x ¹	x ¹	x ¹											
	60	0,72	x ¹	x ¹	x ¹											
		0,76	x ¹	x ¹	x ¹	x ¹	x ¹	x ¹	x ¹	x ¹	x ¹	x ¹	x ¹	x ¹	x ¹	x ¹
		0,83	x ¹	x ¹	x ¹											
		0,86	x ¹	x ¹	x ¹											
Frenagem	20 - 0	0,72														
		0,76	x ²	x ²	x ²		x ²		x ²		x ²		x ²			
		0,83														
		0,86														
	40 - 0	0,72														
		0,76	x ²	x ²	x ²		x ²		x ²		x ²		x ²			
		0,83														
		0,86														
	60 - 0	0,72														
		0,76	x ²	x ²	x ²		x ²		x ²		x ²		x ²			
		0,83														
		0,86														
Aceleração	0 - 20	0,72														
		0,76	x ²	x ²	x ²		x ²		x ²		x ²		x ²			
		0,83														
		0,86														
	0 - 40	0,72														
		0,76	x ²	x ²	x ²		x ²		x ²		x ²		x ²			
		0,83														
		0,86														
	0 - 60	0,72														
		0,76	x ²	x ²	x ²		x ²		x ²		x ²		x ²			
		0,83														
		0,86														

OBS: As componentes de tensão e deformação avaliados são descritas:

¹ S_z (revestimento e subleito), U_z (revestimento), S_x, S_y e S_{xy} (topo e fundo do revestimento)

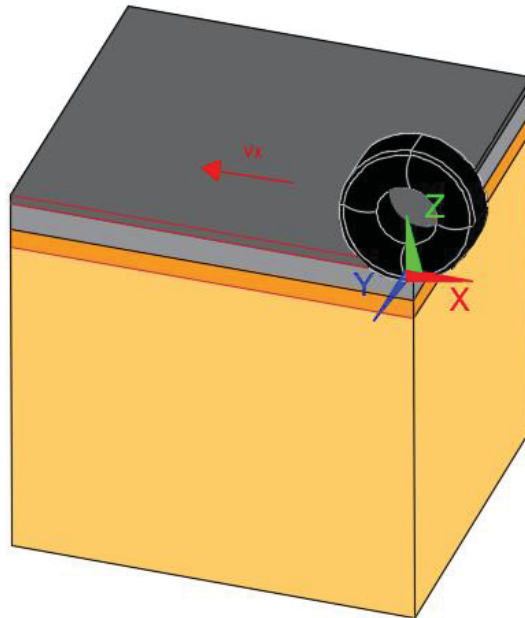
² S_z (subleito), U_z (revestimento), S_x e S_{xy} (topo e fundo do revestimento)

O sinal +/- indica a realização de duas simulações, uma em trechos em acive e outra em declive, respectivamente.

FONTE: A autora (2019).

Os pontos avaliados situam-se sob o eixo (-x) de aplicação da carga, ou seja, no sentido de deslocamento do pneu como identificado na FIGURA 46. Os resultados são apresentados nos tópicos a seguir.

FIGURA 46 – ALINHAMENTO DOS PONTOS ANALISADOS NO SENTIDO DO EIXO -X



FONTE: A autora (2019).

5.2.1 Resultados do modelo com inclinação longitudinal $i=0\%$ e velocidade constante

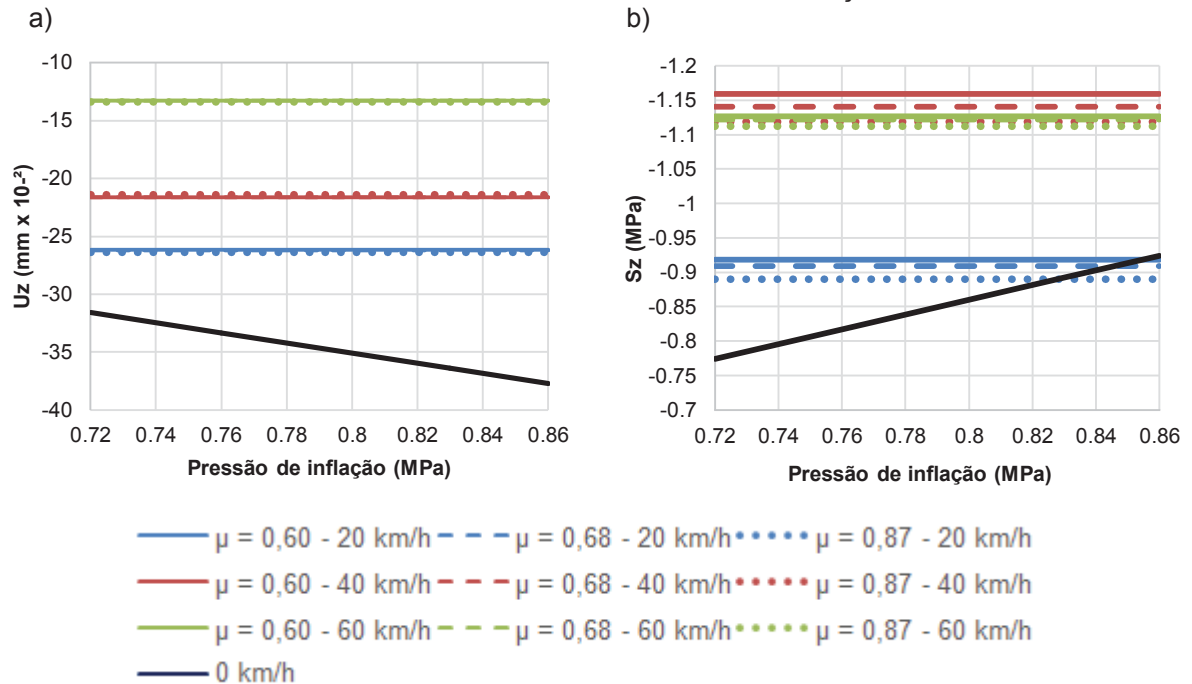
Nesta etapa foi estudada a influência da rugosidade da pista, velocidade do veículo e pressão de inflação do pneu, conforme os parâmetros definidos nos Itens 4.2.1, 4.2.2 e 4.2.3, respectivamente.

- U_z e S_z no topo do revestimento

A FIGURA 47 apresenta os valores de deflexão U_z (FIGURA 47a) e tensão vertical S_z (FIGURA 47b) no topo da camada de revestimento para a declividade $i=0\%$, rugosidades lisa, média e rugosa ($\mu = 0,60, 0,68$ e $0,87$, respectivamente) e pressões de inflação de $0,72, 0,76, 0,83$ e $0,86$ MPa. Os valores apresentados na FIGURA 47 referem-se às tensões normais de compressão e deflexões máximas apresentadas pelo modelo ao longo das simulações nos instantes $t = 0,300s, 0,178s$ e $0,098s$ para as velocidades de $20, 40$ e 60 km/h, respectivamente. A resposta

estática é obtida para fim de comparação, esta, porém, devido às limitações do próprio modelo não permite aferir a influência da rugosidade.

FIGURA 47 – DEFORMAÇÕES E TENSÕES NORMAIS DE COMPRESSÃO (VERTICAIS) a) U_z E b) S_z NO TOPO DA CAMADA DE REVESTIMENTO PARA VELOCIDADES CONSTANTES E DÉCLIVIDADE $I=0\%$ PARA DIFERENTES VELOCIDADE E CONDIÇÕES DE SUPERFÍCIE.



FONTE: A autora (2019).

Em uma primeira análise da figura é possível notar que, para a estrutura em estudo, a inflação do pneu apresenta influência quase imperceptível nos resultados do modelo dinâmico, o que o difere do caso estático, onde o aumento da pressão de inflação (de 0,72 MPa para 0,86 MPa), resultou em um aumento de cerca de 20% na amplitude tanto das deflexões (de $31,57 \text{ mm} \times 10^{-2}$ para $37,72 \text{ mm} \times 10^{-2}$) como das tensões (de 0,77 MPa para 0,92 MPa). Essa baixa ou pouca influência da pressão de inflação no comportamento das deflexões e tensões no pavimento do modelo dinâmico concorda com os resultados obtidos por Sebaaly e Tabatabaee (1989) (Item 2.1.1.) os quais verificaram que, em pavimentos com camadas de asfalto mais espessas (acima de 100 mm), o efeito da pressão inflacionária torna-se menos pronunciado.

Do mesmo modo, a rugosidade da pista (de Lisa a Rugosa) se mostrou pouco influente. Esta baixa influência da rugosidade nas deflexões e tensões verticais encontra justificativa nas considerações de atrito adotadas pelo software, que, como

visto no Item 3.4.5.1. o considera como uma tensão de cisalhamento equivalente (no contato pneu-pavimento), resultando em um maior impacto na amplitude das tensões horizontais e cisalhantes, como será visto posteriormente.

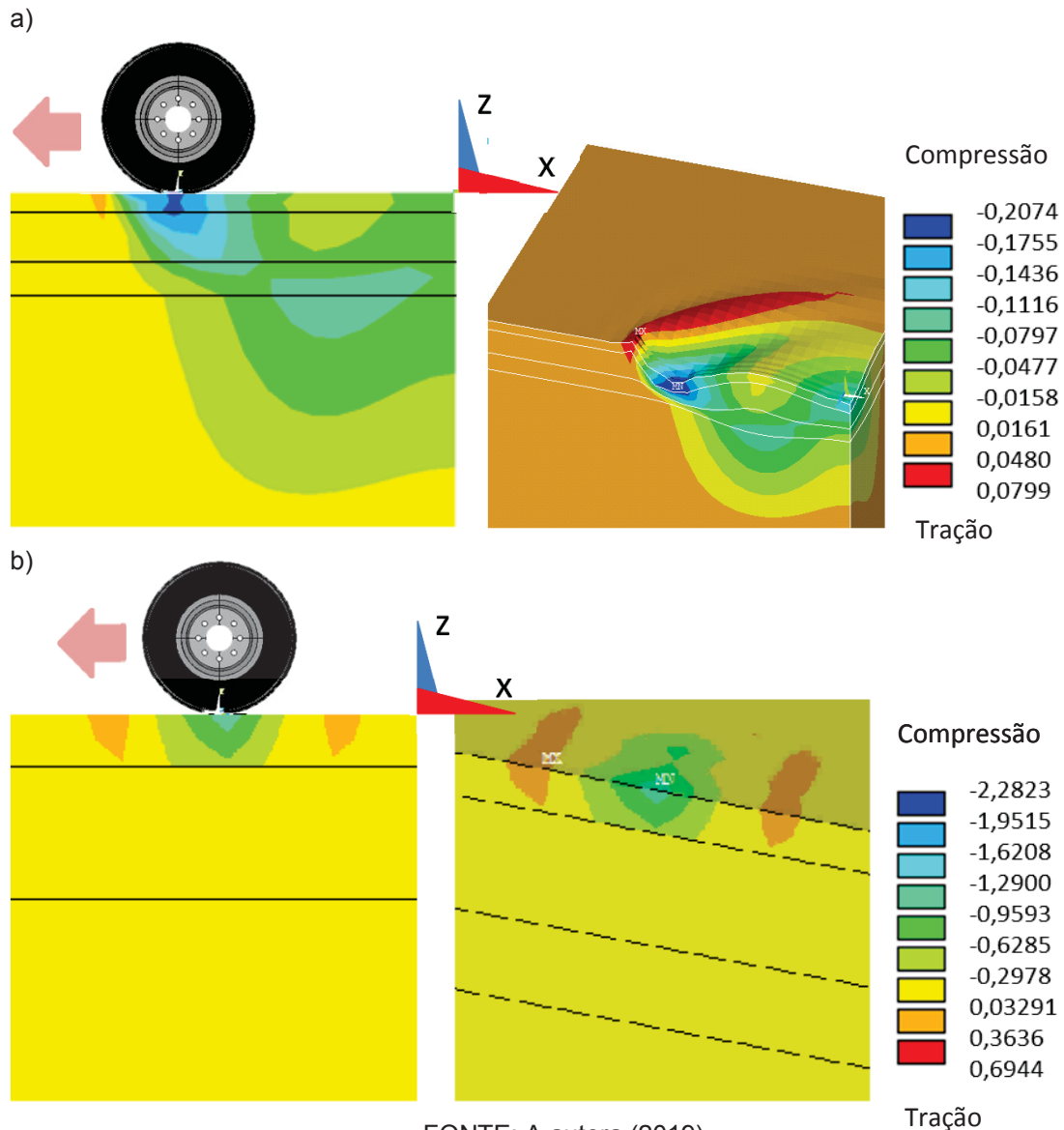
Agora, ao contrário dos demais parâmetros anteriormente discutidos, a velocidade de deslocamento do pneu, graficamente, exerce um impacto significativo na amplitude das deflexões e tensões verticais. A FIGURA 47a) mostra que o aumento da velocidade resulta em uma diminuição na deflexão na superfície da camada de revestimento próximo a 20, 35 e 60% para as velocidades de 20, 40 e 60 km/h, respectivamente, quando comparadas com a velocidade $v = 0$ km/h e pressão de inflação de 0,76 MPa. Já em termos de tensão vertical S_z (FIGURA 47b), estas aumentam com a velocidade em torno de 12% (20 km/h) e 40% (40 e 60 km/h).

Este aumento das tensões verticais, por sua vez, contrapondo a redução das deflexões, pode ser atribuído às cargas adicionais estabelecidas no contato entre o pneu e o pavimento. No entanto, ao aumentar-se a velocidade de deslocamento da carga, o tempo de contato entre o pneu e pavimento diminui, reduzindo assim o tempo de reação e conseqüentemente, a intensidade das deformações.

A FIGURA 48, por sua vez, traz a representação gráfica do pavimento para a velocidade de 40 km/h, pressão de inflação de 0,76 MPa e atrito estático de 0,68. O tempo $t = 0,178$ s indica o instante no qual foram lidas as tensões e deflexões das situações analisadas na FIGURA 47. A partir da FIGURA 48a) pode-se verificar que a bacia defletométrica no modelo dinâmico não é simétrica em relação ao eixo de aplicação da carga, apresentando uma leve inclinação para o lado contrário ao deslocamento do pneu, o que pode ser explicado devido à atuação das cargas residuais presentes no pavimento imediatamente após a passagem do pneu, e atuantes nas camadas inferiores ao revestimento.

A FIGURA 48b, porém, traz, para o mesmo instante, as tensões atuantes. Nota-se que no ponto de aplicação da carga e pontos próximos, o revestimento é submetido a tensões de tração-compressão-tração, os quais se dissipam conforme o pneu se desloca sobre o pavimento, reafirmando assim as considerações obtidas dos estudos de Mahony et al. (2000) e Perret (2003), citados anteriormente neste trabalho.

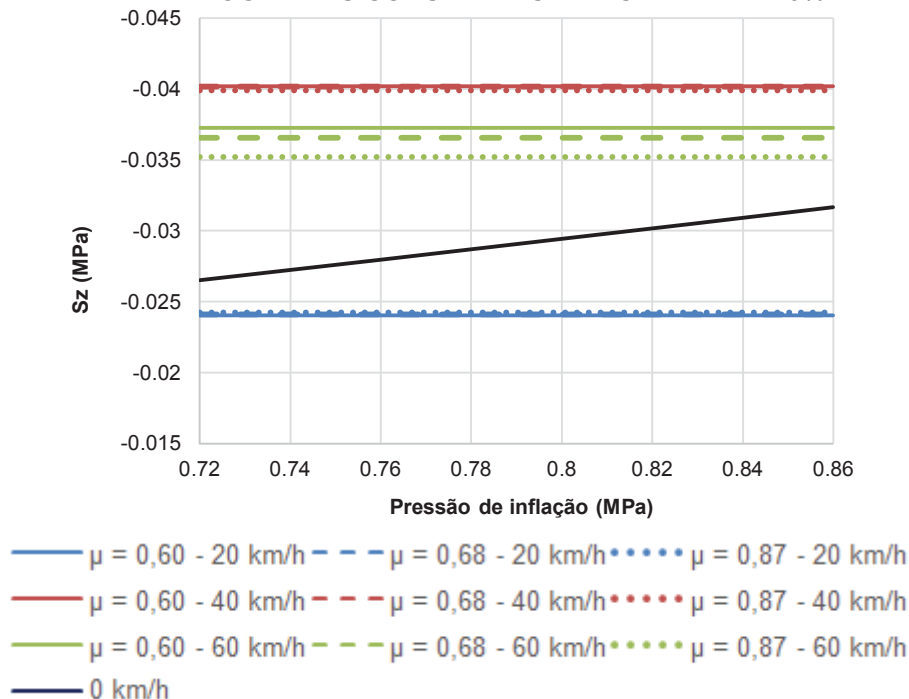
FIGURA 48 – TENSÕES NORMAIS E DEFORMAÇÕES (VERTICAIS) a) U_z E b) S_z , AMBOS PARA $V=40$ km/h; $q = 0,76$ MPa; $\mu = 0,68$; $t = 0,178$ s



- S_z no topo do subleito

A FIGURA 49 apresenta os valores de tensão vertical S_z no topo da camada do subleito para a declividade $i = 0\%$, rugosidades lisa, média e rugosa ($\mu = 0,60$, $0,68$ e $0,87$) e pressões de inflação de $0,72$, $0,76$, $0,83$ e $0,86$ MPa. Os resultados da FIGURA 49 são as tensões normais máximas de compressão para os mesmos instantes e velocidades analisados na FIGURA 47. A resposta estática, novamente é obtida para fim de comparação.

FIGURA 49 – TENSÕES NORMAIS DE COMPRESSÃO (VERTICAIS) S_z NO TOPO DO SUBLEITO PARA VELOCIDADES CONSTANTES E DECLIVIDADE $i=0\%$.



FONTE: A autora (2019).

Analisando-se a FIGURA 49 tem-se que a variação da velocidade, mais uma vez, foi numericamente mais influente sobre os resultados se comparada à pressão de inflação e a rugosidade da pista de modo que ao aumentar a velocidade de deslocamento do pneu ocorre um aumento na amplitude das tensões (compressão) que atingem o topo do subleito. Esse acréscimo chega a cerca de 50% quando do aumento da velocidade de 0 km/h para 40 e 60 km/h e pressão de inflação de 0,72 MPa. Por outro lado, para a velocidade 20 km/h ocorre uma redução na amplitude das tensões, se comparada com o modelo estático.

Essa intensificação não prevista das tensões no topo do subleito no modelo dinâmico, comparado ao estático, pode estar associada ao desenvolvimento de defeitos em pavimentos asfálticos como o afundamento de consolidação, causado pela consolidação diferencial de uma ou mais camadas do pavimento, neste caso o subleito.

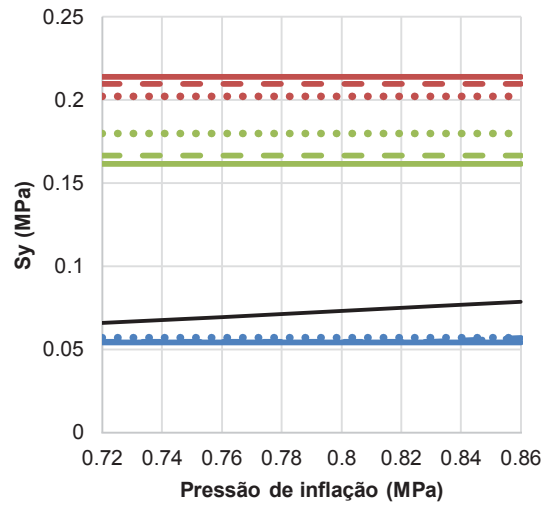
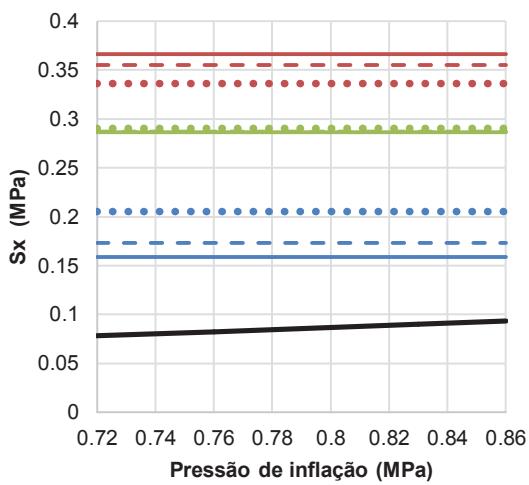
- S_x e S_y no topo e fundo do revestimento

A FIGURA 50 apresenta os valores das tensões horizontais S_x e S_y no topo (FIGURA 50 a) e fundo (FIGURA 50 b) do revestimento para a declividade $i=0\%$, rugosidades lisa, média e rugosa ($\mu=0,60$, $0,68$ e $0,87$, respectivamente) e pressões

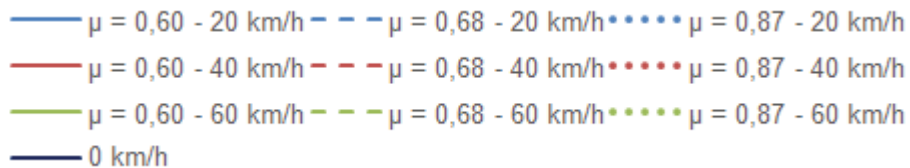
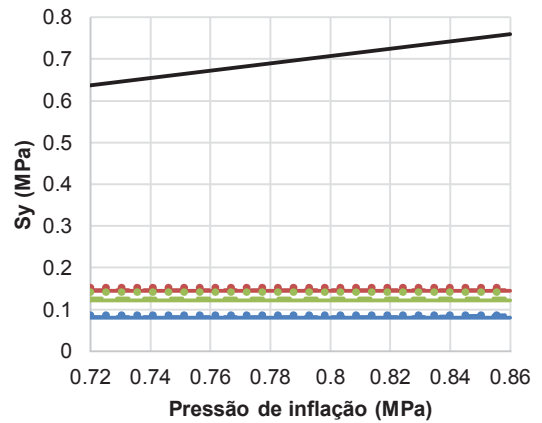
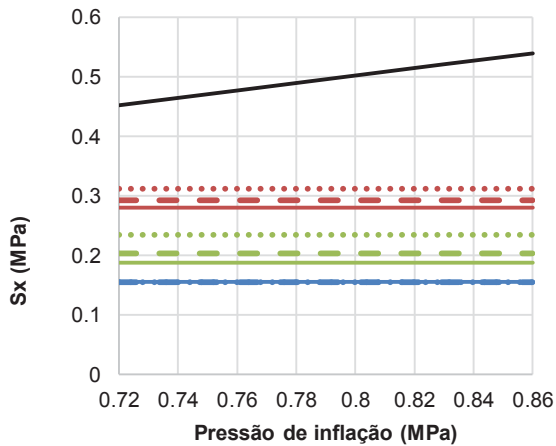
de inflação de 0,72, 0,76, 0,83 e 0,86 MPa. Os valores apresentados na FIGURA 50 são as tensões normais máximas de tração apresentadas pelo modelo ao longo das simulações para os instantes $t = 0,300s$, $0,178s$ e $0,098s$ e velocidades 20, 40 e 60 km/h, respectivamente.

FIGURA 50 – TENSÕES NORMAIS DE TRAÇÃO (HORIZONTAIS) S_x e S_y a) TOPO E b) FUNDO DA CAMADA DE REVESTIMENTO PARA VELOCIDADES CONSTANTES E DECLIVIDADE $I=0\%$.

a) Topo



b) Fundo



FONTE: A autora (2019).

Observando-se os resultados verifica-se que a pressão de inflação novamente não exerce influência perceptível nos resultados do modelo dinâmico. A rugosidade, no entanto, sim.

Comparando-se agora a amplitude dos valores de tensão no eixo x com o eixo y, percebe-se que as tensões mais críticas ocorrem sobre o primeiro, no sentido do deslocamento, onde as tensões máximas estiveram em torno de 0,35 MPa para a velocidade de 40 km/h, enquanto que no eixo y, limitaram-se a valores perto de 0,20 MPa, para as mesmas velocidades (FIGURA 50a) porém superiores as tensões apresentadas pelo modelo estático na respectiva direção de análise. Assim, para reduzir o volume de dados de análise, a partir deste ponto, as tensões horizontais analisadas foram limitadas ao eixo x.

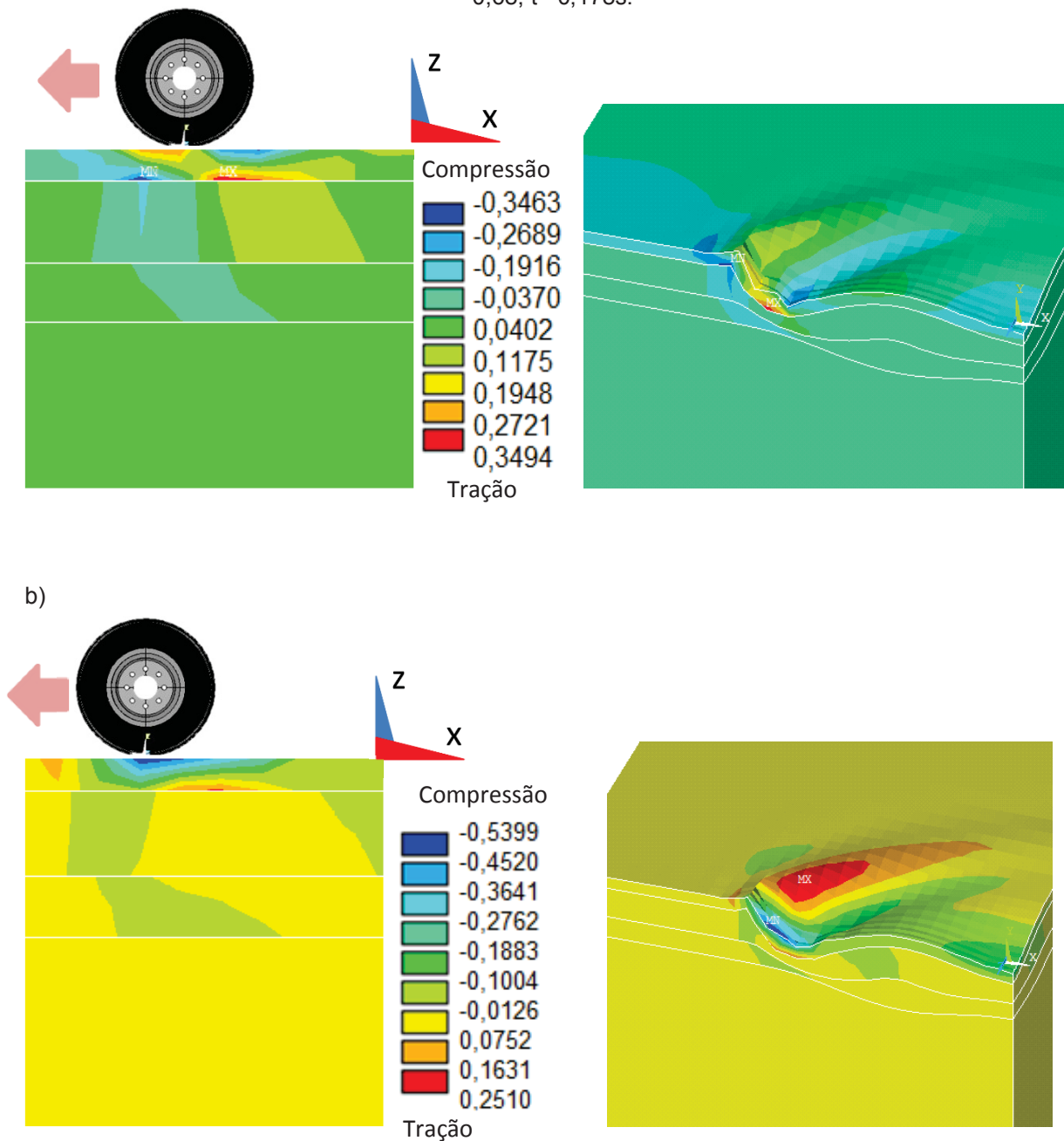
Agora, finalizando a análise das tensões horizontais para velocidade constante e declividade $i = 0\%$, a FIGURA 51 contém a distribuição das isolinhas de tensão do modelo para a velocidade de 40 km/h, pressão de inflação de 0,76 MPa e atrito estático de 0,68. O tempo $t = 0,178s$ indica o instante no qual foram lidas as tensões e deflexões das situações analisadas na FIGURA 50.

Observando-se inicialmente o comportamento das isolinhas de tensão, nota-se uma descontinuidade destas, especialmente na interface entre as camadas da estrutura do pavimento. Este comportamento acontece devido ao baixo grau de refinamento adotado para as camadas inferiores (sub-base e subleito), resultando em elementos finitos muito grandes. Para melhor resolução, admite-se ser necessário um maior grau de refinamento destas camadas.

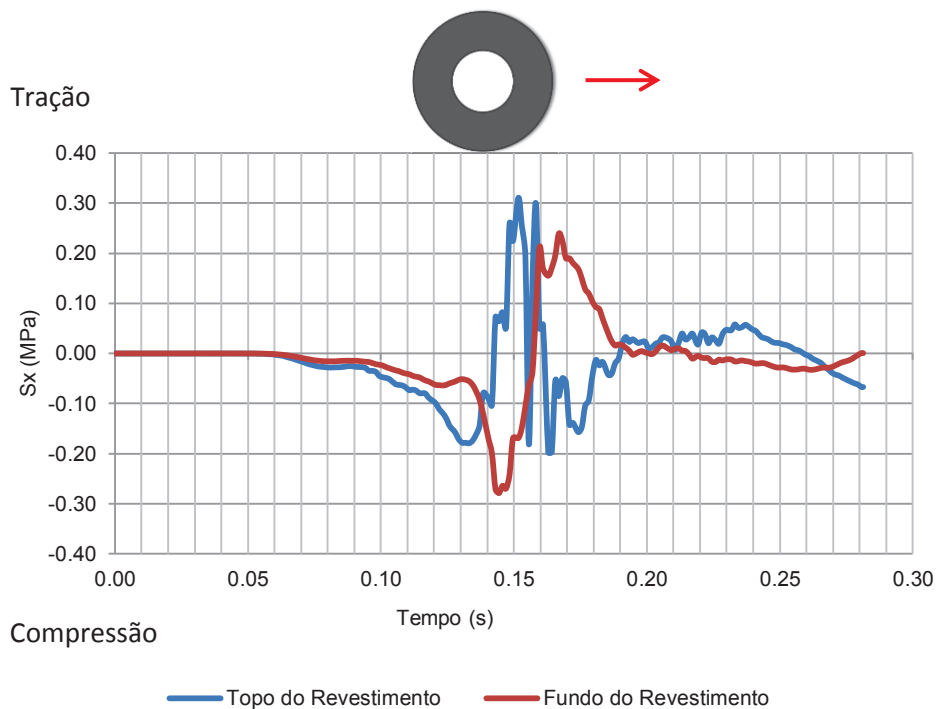
Analisando agora o comportamento das tensões percebeu-se que, tanto para o eixo x como para o eixo y ocorre uma sucessão de esforços de tração e compressão, no topo e no fundo do revestimento, o que pode ser observado com maior detalhe na FIGURA 52. Esta mostra o comportamento do ponto de coordenadas (-1500;0;0 mm) no topo do revestimento ao longo do tempo de análise e um ponto no mesmo alinhamento vertical, porém no fundo do revestimento de coordenadas (-1500; -80;0 mm).

Outro comportamento observado, tanto para o eixo x com o y, esta no fato de o dinâmico apresentar tensões de tração no topo e fundo do revestimento, muito próximas. Ao voltar-se a análise da FIGURA 51, nota-se tensões de tração, em um momento imediatamente antes da passagem do pneu, com praticamente a mesma amplitude das tensões no fundo da camada após a passagem do pneu.

FIGURA 51 – TENSÃO NORMAL (HORIZONTAL) a) S_x E b) S_y , PARA $V=40$ km/h; $q = 0,76$ MPa; $\mu = 0,68$; $t = 0,178$ s.



FONTE: A autora (2019).

FIGURA 52 – TENSÃO NORMAL (HORIZONTAL) S_x PARA $V=40$ km/h; $q = 0,76$ MPa; $\mu = 0,68$ 

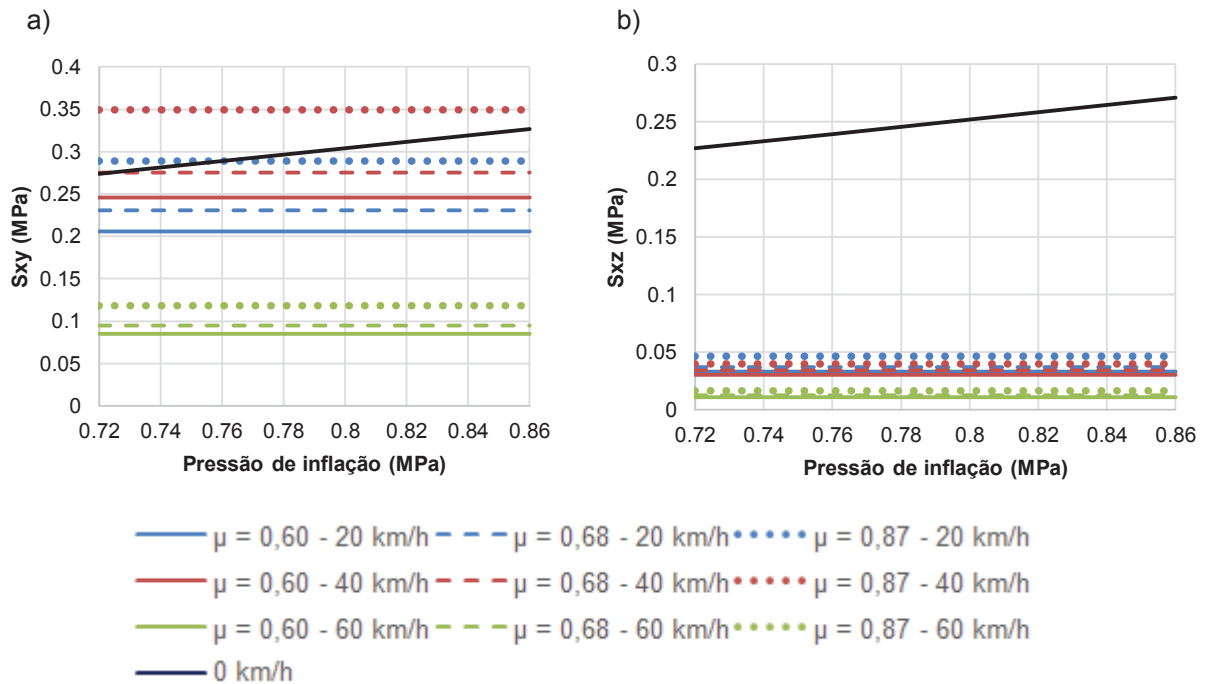
FONTE: A autora (2019).

- S_{xy} no topo e fundo do revestimento

A FIGURA 53 apresenta os valores da tensão de cisalhamento no topo (FIGURA 53a) e fundo (FIGURA 53b) da camada de revestimento para a declividade $i = 0\%$, rugosidades lisa, média e rugosa ($\mu = 0,60, 0,68$ e $0,87$, respectivamente) e pressões de inflação de $0,72, 0,76, 0,83$ e $0,86$ MPa. O plano considerado nesta etapa é o xy , paralelo ao plano que define a face superior do revestimento. Os valores de tensão apresentados são dados em módulo e correspondem às tensões cisalhantes máximas apresentadas pelo modelo nos instantes $t = 0,300s, 0,178s$ e $0,098s$ e velocidades $20, 40$ e 60 km/h, respectivamente.

Assim, analisando-se a FIGURA 53, entre os parâmetros listados, a rugosidade e a velocidade interferem significativamente nos valores de cisalhamento resultando em um aumento expressivo dessas tensões, notadamente no topo da camada de revestimento (FIGURA 53 a) onde, para as velocidades de 20 e 40 km/h, as tensões cisalhantes se aproximam daquelas apresentadas pelo modelo estático quando do aumento da rugosidade da pista.

FIGURA 53 – TENSÕES CISALHANTES S_{xy} : a) NO TOPO E b) FUNDO DO REVESTIMENTO PARA VELOCIDADES CONSTANTES E DECLIVIDADE $I=0\%$.



FONTE: A autora (2019).

Neste contexto, para a velocidade de 20 km/h, a mudança da rugosidade da pista, de lisa para rugosa, resultou em um aumento um pouco superior a 40% (de 0,20 MPa para 0,28 MPa) na intensidade das tensões resultantes. Para as demais velocidades, 40 km/h e 60 km/h, esse aumento ficou próximo a 40% (de 0,24 MPa e 0,08 MPa para 0,34 MPa e 0,11 MPa, respectivamente).

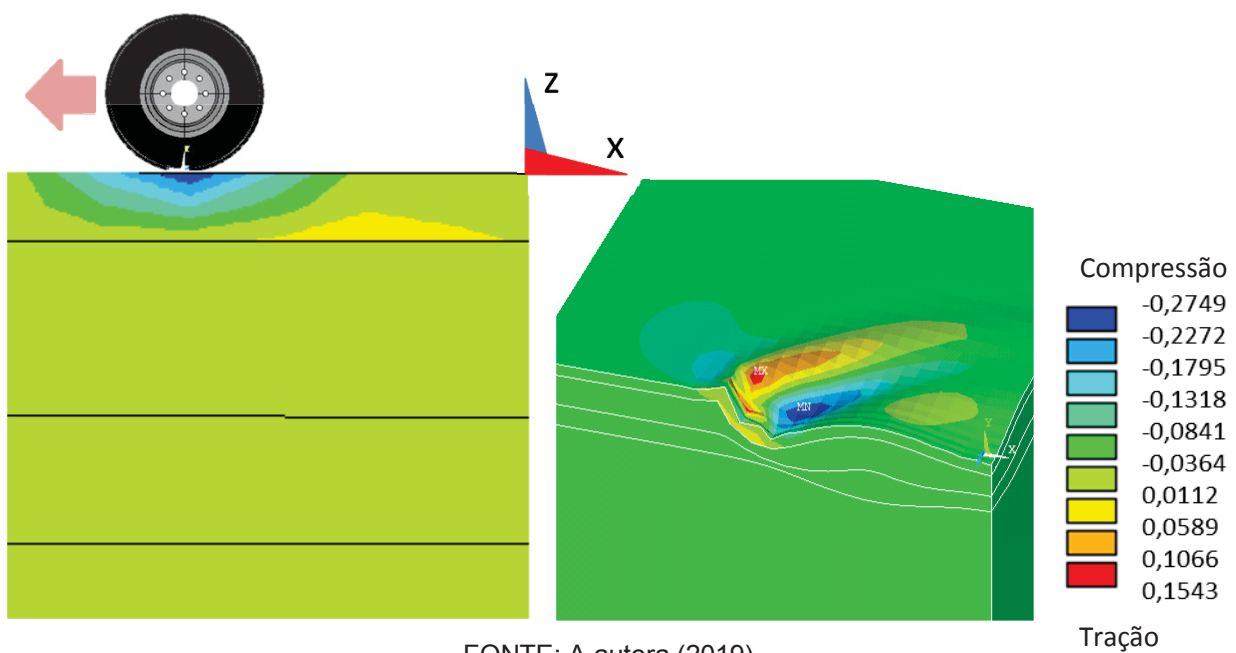
Por outro lado, no fundo da camada de revestimento (FIGURA 53b), o modelo dinâmico apresentou tensões menores às apresentadas pelo estático, apresentando uma redução de quase 80% na amplitude dos resultados (de 0,27 MPa para entorno de 0,01 e 0,045 MPa para as velocidades analisadas) e pressão de inflação de 0,86 MPa. Este fato pode ser melhor observado a partir da FIGURA 54, que traz a representação da distribuição das tensões cisalhantes no Plano xy para a velocidade de 40 km/h, pressão de inflação de 0,76 MPa e atrito estático de 0,68. O tempo $t = 0,178\text{s}$ indica o instante no qual foram lidas as tensões e deflexões das situações analisadas na FIGURA 53, a partir do qual é possível notar que as tensões cisalhantes mais críticas acontecem no topo do revestimento.

Essa ampliação na concentração de tensões cisalhantes, especialmente no topo da camada de revestimento, com o aumento da rugosidade da pista, como visto

no Item 3.4.5.1., está relacionada à tensão cisalhante adicional advinda da consideração do atrito durante o contato.

E por fim, essa intensificação das tensões horizontais (S_x e S_y) e cisalhantes (S_{xy}) no topo da camada de revestimento (modelo dinâmico) pode estar associada à ocorrência das fissuras por fadiga, mais especificamente, as do tipo “top-downcracking” as quais se propagam do topo para baixo na camada de revestimento resultando em trincas longitudinais no pavimento. Esse processo por sua vez, é intensificado pelo enrijecimento do ligante asfáltico por oxidação, situação esta identificada na camada de revestimento em estudo (concreto asfáltico deteriorado com baixo módulo de resiliência).

FIGURA 54 – TENSÕES CISALHANTES S_{xy} PARA $V=40$ km/h; $q = 0,76$ MPa; $\mu = 0,68$; $t = 0,178$ s.

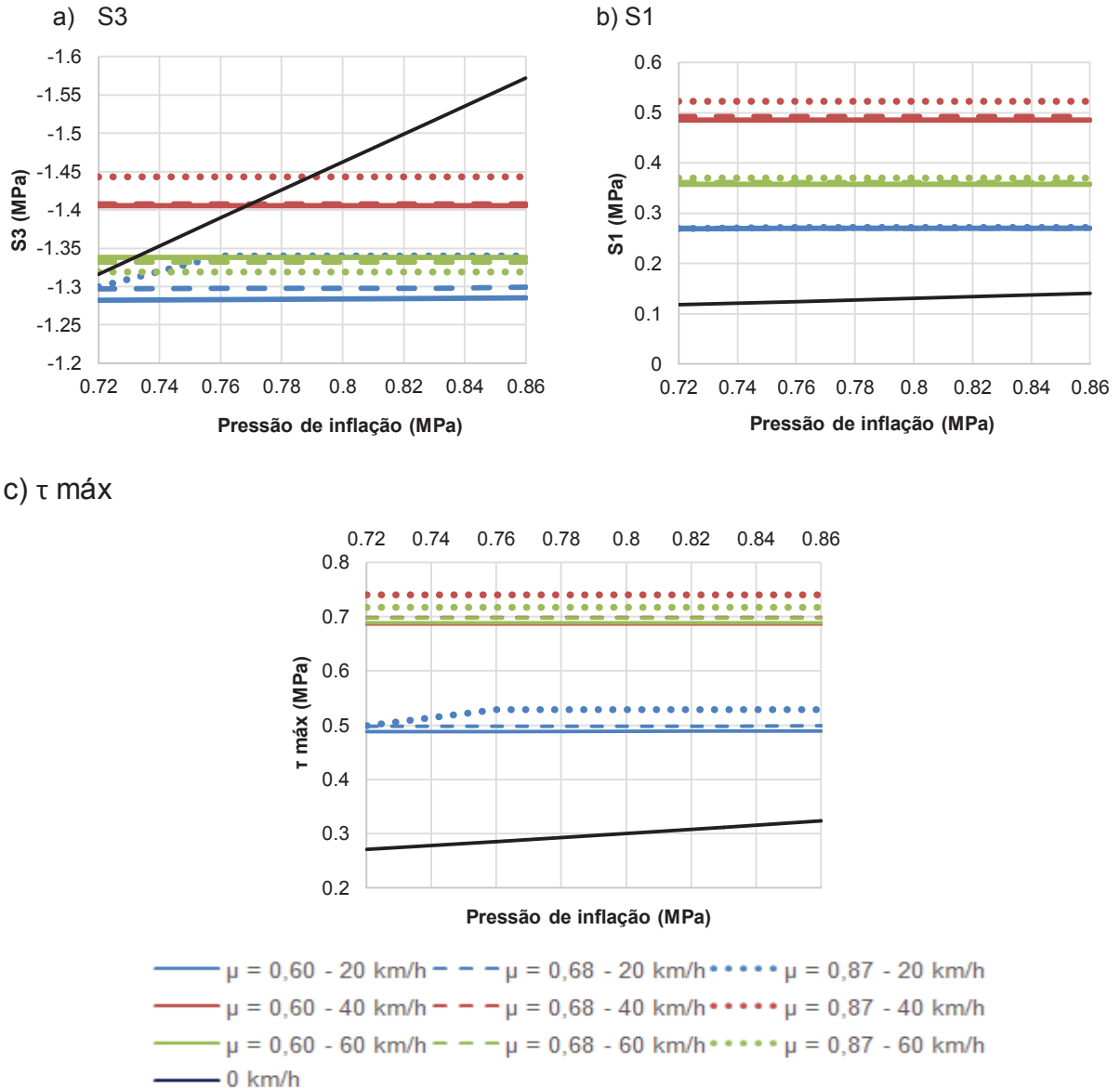


FONTE: A autora (2019).

5.2.1.1. Tensões principais para $i=0\%$ e velocidades contantes

A FIGURA 55 apresenta os valores das componentes S_3 (compressão), S_1 (tração) e $\tau_{\text{máx}}$ das tensões principais para as condições do pavimento analisadas no Item 5.2.1. Os valores apresentados correspondem às tensões apresentadas pelo modelo nos instantes $t = 0,300$ s, $0,178$ s e $0,098$ s e velocidades 20, 40 e 60 km/h, respectivamente.

FIGURA 55 – COMPONENTES DAS TENSÕES PRINCIPAIS NO TOPO DO REVESTIMENTO a) S3; b) S1 e c) $\tau_{\text{máx}}$.

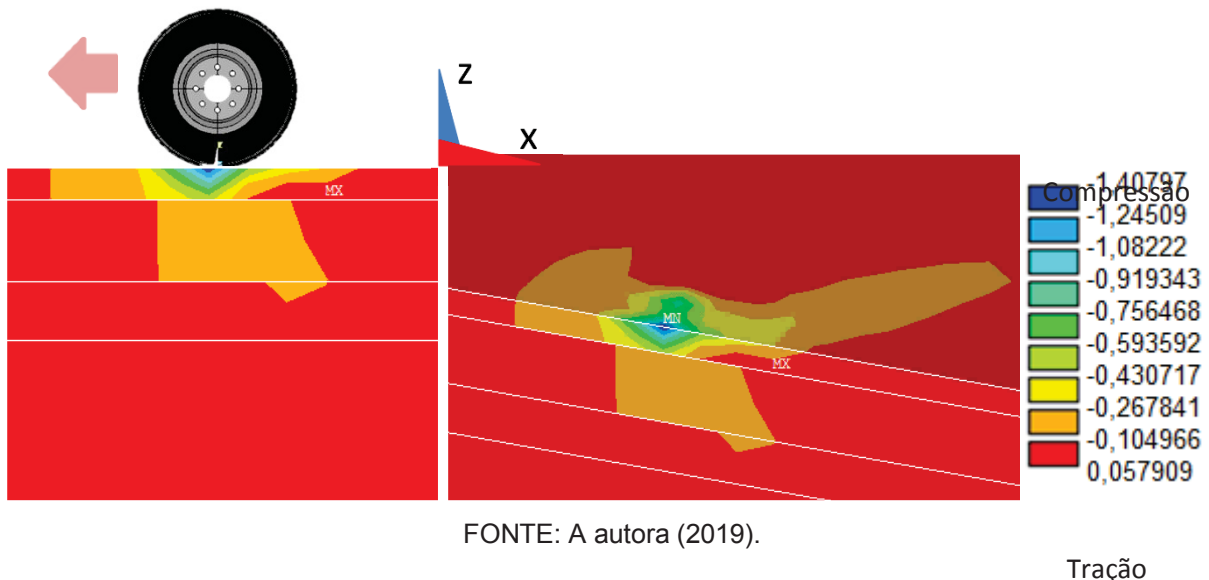


FONTE: A autora (2019).

De imediato, comparando-se agora os valores de tensão normal (S_z) analisadas no Item 5.2.1. (FIGURA 47b) com a tensão S3, esta representa em relação aquela um aumento na amplitude das tensões em cerca de 40% para a velocidade de 20 km/h (de cerca de $S_y = 0,90$ MPa para $S_3 = 1,30$ MPa) e 20 % para as velocidade de 40 e 60 km/h (de $S_y = 1,15$ e $1,12$ MPa para $S_3 = 1,40$ e $1,33$ MPa, respectivamente). A FIGURA 56 mostra ainda a distribuição da tensão principal S3 para a mesma situação da FIGURA 48b, onde é possível perceber a

proximidade de seu comportamento em termos tanto de amplitude como de comportamento das isolinhas de tensão.

FIGURA 56 – COMPONENTE S3 DAS TENSÕES PRINCIPAIS PARA $V=40$ km/h; $q = 0,76$ MPa; $\mu = 0,68$; $t = 0,178$ s.



FONTE: A autora (2019).

Por outro lado, analisando as tensões principais de tração (S_1) com as tensões normais horizontais (S_x da FIGURA 50a), o acréscimo daquela em relação a esta, considerando a condição de rugosidade Lisa, foi de cerca de 70, 30 e 25 % para as velocidades de 20, 40 e 60 km/h, respectivamente (ou seja, de $S_x = 0,15$, $0,35$ e $0,30$ MPa para $S_1 = 0,25$, $0,50$ e $0,35$ MPa, respectivamente). Tal diferença na amplitude das tensões normais com as principais atribui-se a ausência das tensões cisalhantes nos planos das tensões principais (S_1 , S_2 e S_3).

A FIGURA 55c por sua vez, traz os valores das tensões cisalhantes máximas ($\tau_{\text{máx}}$) obtidas a partir da média das tensões S_1 e S_3 . Nota-se que, para determinadas situações de velocidade e rugosidade, as tensões cisalhantes se tornam mais importantes que as tensões propriamente de tração (S_1).

E por fim, essa ampliação das tensões do modelo dinâmico em função do modelo estático, especialmente em termos de tensão de tração (S_1) e cisalhamento ($\tau_{\text{máx}}$), é atribuída ao fato de que no modelo dinâmico ocorre propagação das tensões de um tempo anterior sobre um posterior, ou seja, a dissipação das deformações e tensões não é imediata após a passagem do pneu ocorrendo a

sobreposição das deformações e tensões residuais de um determinado tempo sobre um tempo posterior ou posição seguinte do pneu sobre o pavimento.

5.2.2 Resultados do modelo com aclive e declive para velocidade constante

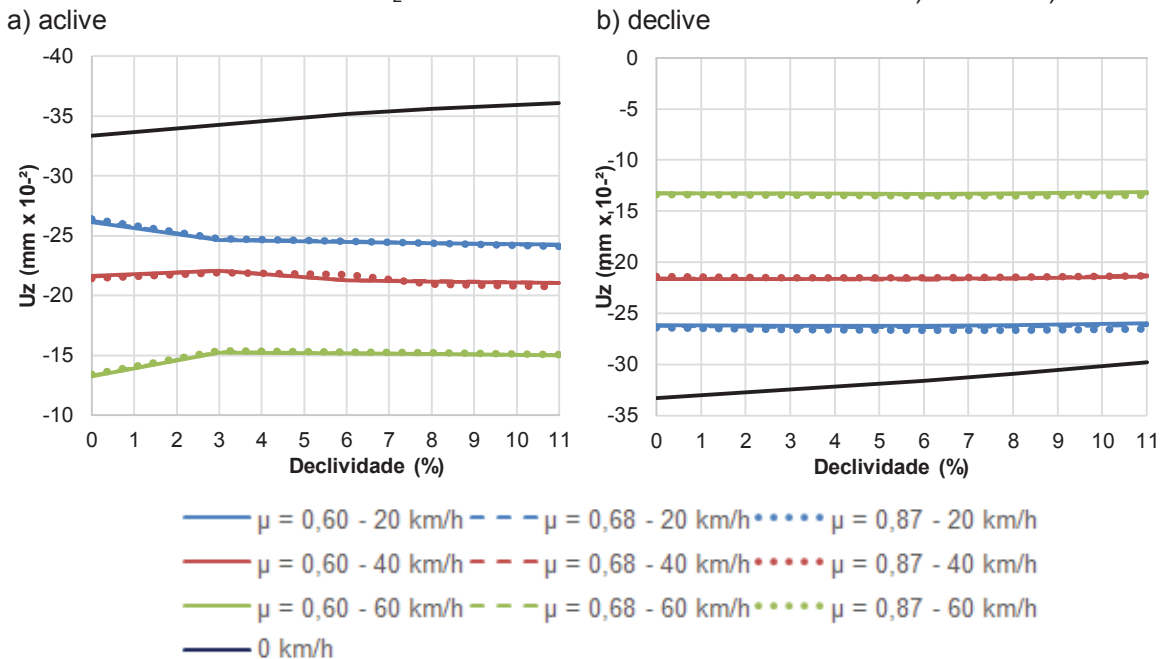
Nesta etapa além dos parâmetros analisados anteriormente (rugosidade da pista e velocidade do veículo) foi inserido um parâmetro adicional: a declividade da pista, conforme Item 4.2.4. Foi estudada a distribuição das deflexões e tensões no pavimento considerando trechos tanto em aclive (pneu subindo) como em declive (pneu descendo). Nesta etapa a pressão de inflação foi fixada em 0,76 MPa, a mais empregada nos ônibus de Curitiba. Segue a apresentação e análise dos resultados.

- U_z no topo do revestimento

A FIGURA 57 apresenta os valores de deflexão no topo da camada de revestimento para as declividades $i = 0, \pm 3, \pm 6, \pm 8$ e $\pm 11\%$, rugosidades lisa, média e rugosa ($\mu = 0,60, 0,68$ e $0,87$, respectivamente) e pressão de inflação de 0,76 MPa. A resposta estática novamente é obtida para fim de comparação. Os valores da FIGURA 57 correspondem às deflexões máximas na compressão, apresentadas pelo modelo ao longo das simulações para $t = 0,300s, 0,178s$ e $0,098s$ e velocidades 20, 40 e 60 km/h, respectivamente.

Considerando a FIGURA 57, observa-se que a rugosidade novamente não traz impacto significativo, tanto para o trecho em aclive como para o em declive. A velocidade, por sua vez, com o aumento da declividade, retornou comportamentos diversos para as velocidade em estudo. Para o trecho em aclive foram verificadas reduções de cerca de 7% e 3% (20 e 40 km/h, respectivamente) enquanto que para 60 km/h houve um aumento na amplitude das deflexões de cerca de 13% quando o aclive passa de 0 para 11%. Já em trechos em declive as deflexões no topo do revestimento mantiveram os valores apresentados pelo modelo com declividade nula.

FIGURA 57 – DEFLEXÕES U_z PARA VELOCIDADE CONSTANTE EM: a) ACLIVE b) DECLIVE.



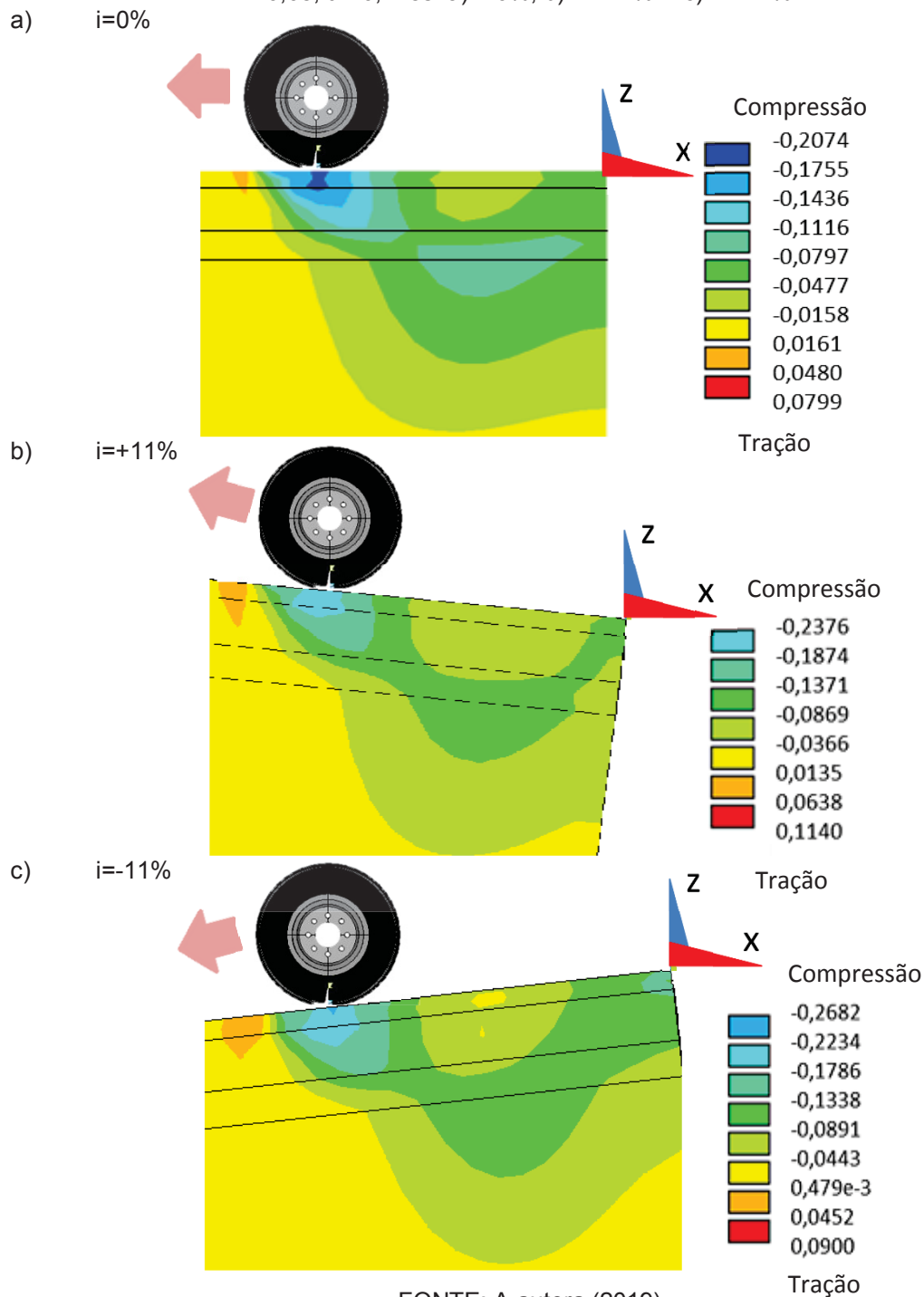
FONTE: A autora (2019).

Para melhor compreensão, na FIGURA 58 são apresentadas as bacias defletométricas para as declividades de 0%, +11% e -11%, para a velocidade de 40 km/h. O tempo $t = 0,178\text{s}$ indica o instante no qual foram lidas as deflexões das situações analisadas na FIGURA 55.

Observando-se a FIGURA 58, percebe-se que a amplitude das deflexões foi pouco afetada; em contrapartida, em trechos com aclive, o formato das bacias tornou-se levemente mais inclinado em direção ao sentido contrário do deslocamento do pneu, sendo favorecida pela geometria do pavimento. Já em trecho com declive, essa inclinação da bacia tende a minizar e se aproximar da simetria.

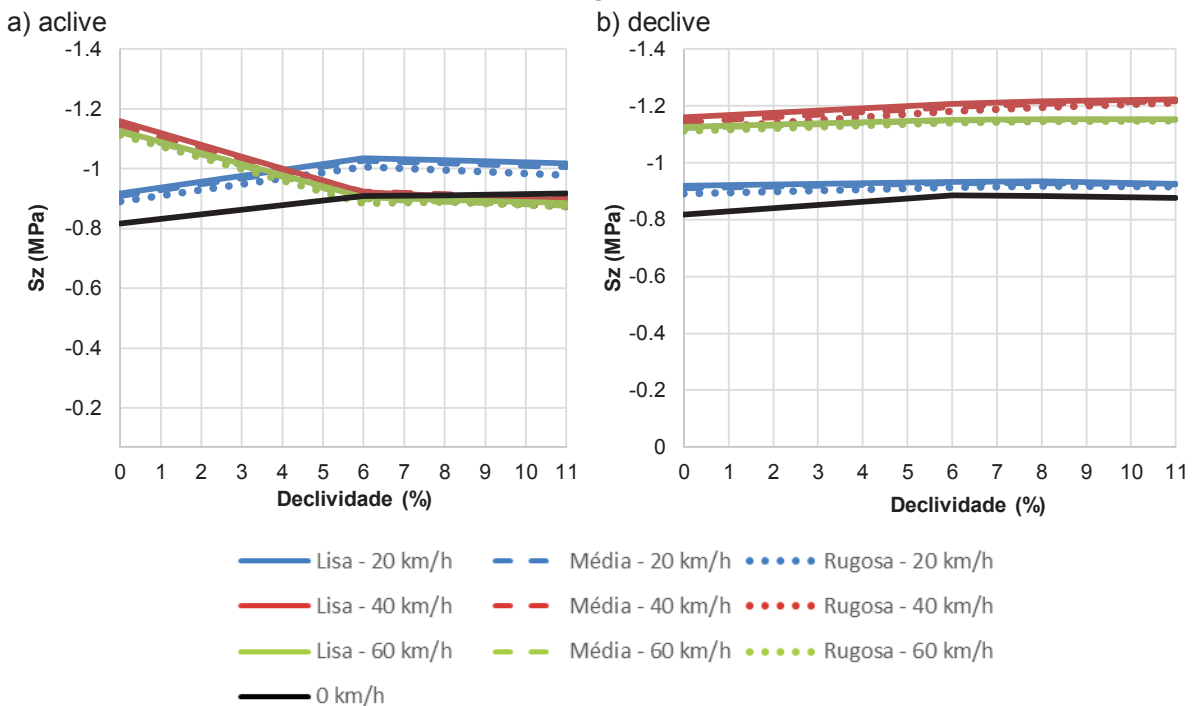
Neste contexto, tem-se que com a inserção da declividade do pavimento ocorre a decomposição da carga de roda aplicada sobre o pavimento, resultando em um alívio das cargas no eixo vertical (eixo z) e inserção de cargas horizontais, especialmente no sentido de deslocamento do pneu, no eixo x. Em vista disso, espera-se que ocorra uma minimização ou manutenção das deflexões e tensões verticais e um aumento das tensões horizontais e cisalhantes, como será visto posteriormente.

FIGURA 58 – DEFORMAÇÕES (VERTICAIS) U_z PARA $V=40$ km/h; $q = 0,76$ MPa; $\mu = 0,68$; $t = 0,178$ s: a) $i=0\%$; b) $i=+11\%$ E c) $i= -11\%$.



Prosseguindo-se análise das simulações, para as mesmas condições de velocidade, declividade, rugosidade e pressão de inflação do pneu da FIGURA 57, a FIGURA 59 apresenta os valores de tensão S_y no topo da camada de revestimento.

FIGURA 59 – AVALIAÇÃO DAS TENSÕES S_z A VELOCIDADE CONSTANTE EM: a) ACLIVE b) DECLIVE.



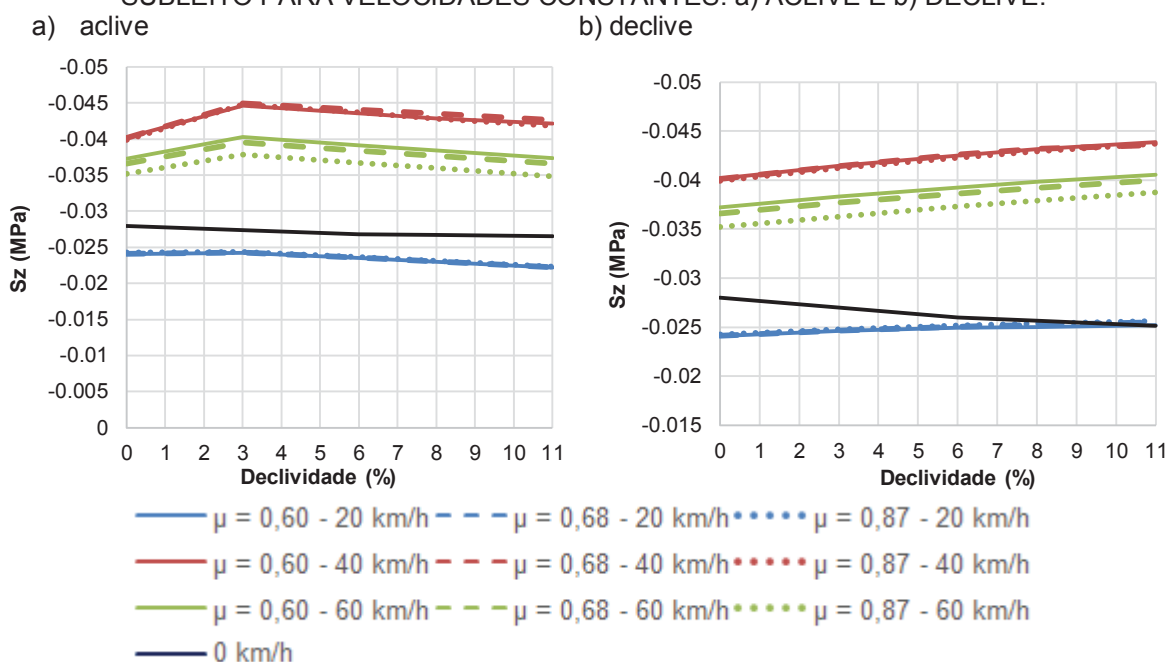
FONTE: A autora (2019).

Prontamente, para as tensões verticais, enquanto que para a velocidade de 20 km/h as tensões sofrem um leve aumento com o aumento da declividade mantendo-se em torno de 1,00 MPa no acrive e 0,90 MPa no declive; para as velocidades maiores de 40 km/h e 60 km/h, o comportamento difere quando em trechos em acrive e declive. Ou seja, enquanto que no acrive a tensão vertical, para ambas as velocidades, diminui a valores próximos do modelo estático, para o declive ocorre uma ampliação dessas tensões.

- S_z no topo do subleito

Retomando a análise das tensões no topo do subleito, a FIGURA 60 apresenta os valores de tensão S_z no topo da camada do subleito para as declividade $i = 0, \pm 3, \pm 6, \pm 8$ e $\pm 11\%$, rugosidades lisa, média e rugosa e pressões de inflação de 0,76 MPa. A FIGURA 60 apresenta as tensões normais máximas de compressão do modelo ao longo das simulações para $t = 0,300s, 0,178s$ e $0,098s$ e velocidades 20, 40 e 60 km/h, respectivamente.

FIGURA 60 – TENSÕES NORMAIS DE COMPRESSÃO (VERTICAIS) S_z NO TOPO DO SUBLEITO PARA VELOCIDADES CONSTANTES: a) ACLIVE E b) DECLIVE.



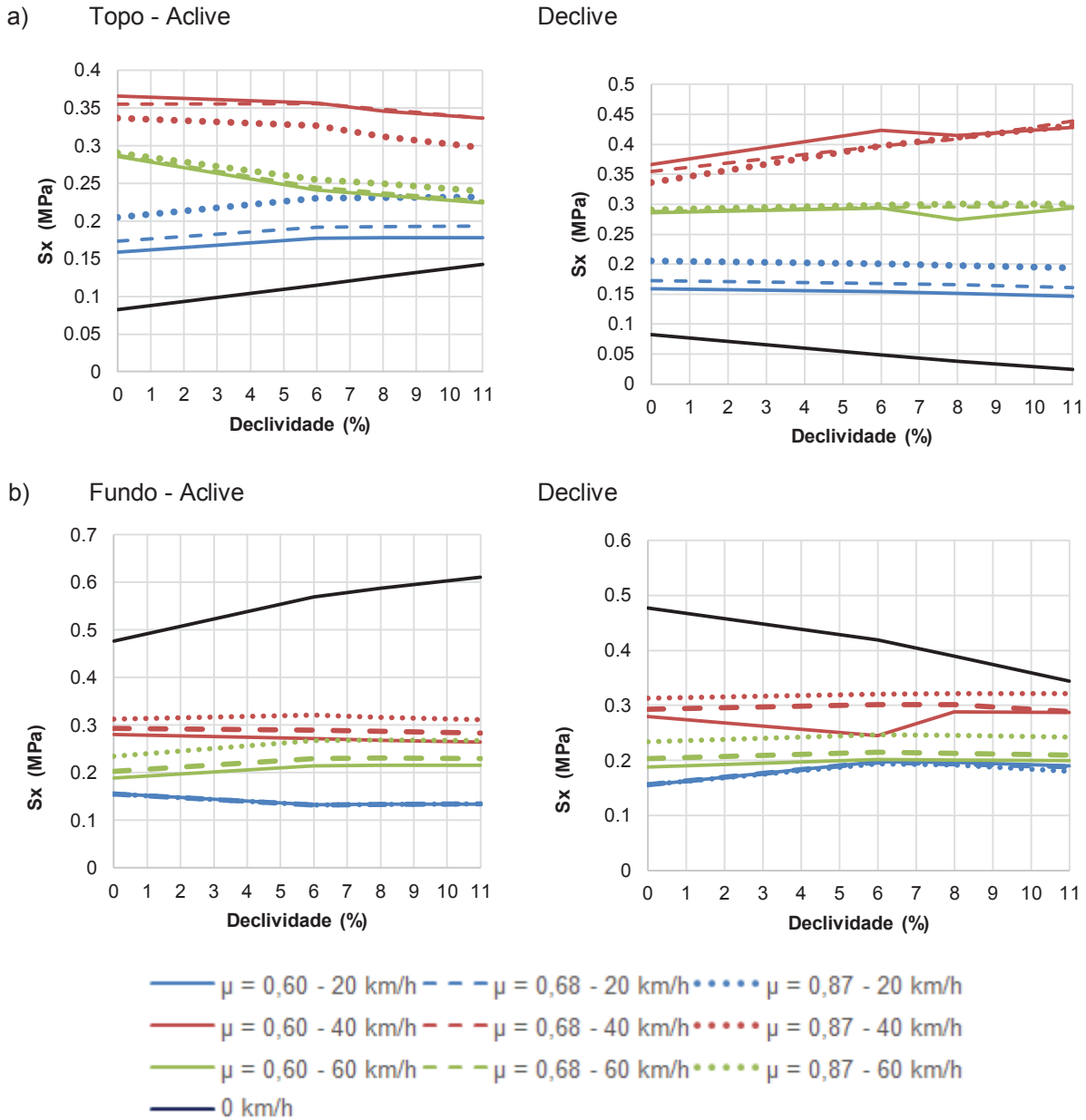
FONTE: A autora (2019).

A partir da observação dos dados apresentados na FIGURA 60, viu-se que, do mesmo modo que ocorre para as deflexões e tensões verticais, a inserção de aclive na pista não influencia de maneira significativa nos resultados apresentados. Para o trecho em declive, por sua vez, quando a declividade passa de 0% para - 11%, esse aumento é próximo a 10% para as velocidades de 40 e 60 km/h.

- S_x no topo e fundo do revestimento

Agora para os eixos horizontais, a intensidade e o comportamento das tensões no eixo X (S_x) são apresentados na FIGURA 61 para as declividades $i = 0, \pm 3, \pm 6, \pm 8$ e $\pm 11\%$ (aclive e declive), rugosidades lisa, média e rugosa ($\mu = 0,60, 0,68$ e $0,87$, respectivamente) e pressões de inflação de $0,76 \text{ MPa}$. Em uma primeira análise verifica-se que a inserção da declividade implica em um aumento das tensões de tração, sobretudo no topo da camada de revestimento, tanto para a situação de aclive como declive. Os valores de tensão apresentados na FIGURA 61 são as normais máximas de tração apresentadas pelo modelo ao longo das simulações para $t = 0,300\text{s}, 0,178\text{s}$ e $0,098\text{s}$ e velocidades $20, 40$ e 60 km/h , respectivamente.

FIGURA 61 – TENSÕES NORMAIS DE TRAÇÃO (HORIZONTAIS) S_x a) TOPO e b) FUNDO DO REVESTIMENTO PARA VELOCIDADES CONSTANTES E DECLIVIDADE VARIÁVEL.



FONTE: A autora (2019).

Em um estudo mais detalhado, considerando o trecho em active, percebe-se que as tensões no topo do revestimento, chegam a aumentar em até cerca de 10% (de 0,15 MPa para 0,17 MPa) quando a declividade da pista aumenta de 0% para +11% para a velocidade de 20 km/h. Já para 40 km/h e 60 km/h, ocorre uma redução também próxima de 10% (de 0,36 para 0,33 Mpa) e 20% (de 0,28 MPa para 0,22 MPa), respectivamente. Já para o trecho em declive verificou-se um aumento em torno de 20% (de 0,36 MPa para 0,42 MPa) para 40 km/h. Ou seja, os trechos em active apresentam situação mais crítica para velocidades mais lentas enquanto

que no declive, velocidades maiores implicam em um maior acréscimo das tensões horizontais devido ao aumento da declividade.

Retomando agora a análise das tensões no fundo da camada de revestimento (FIGURA 61b), tem-se que as tensões atuantes no modelo dinâmico ainda são menores que as do modelo estático permanecendo entre 0,20 MPa e 0,30 MPa (eixo x), para ambos os modelos, enquanto que no topo as tensões máximas avaliadas são de aproximadamente 0,35 MPa (aclive) e 0,45 MPa (declive).

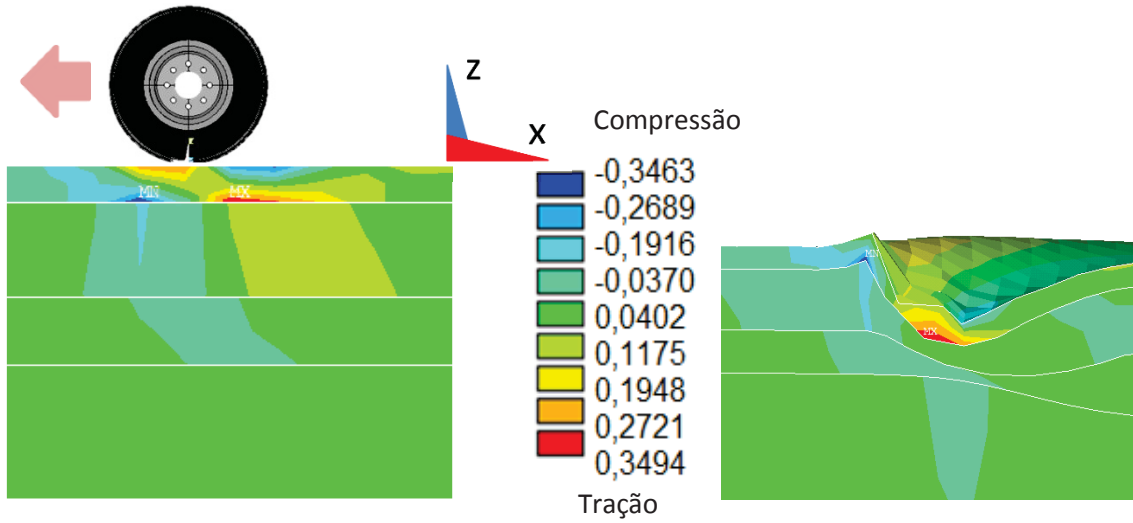
A FIGURA 62, por sua vez, traz a representação das isolinhas de tensão S_x para as declividades de 0%, +11% e -11%, para a velocidade de 40 km/h. O tempo $t = 0,178s$ indica o instante no qual foram lidas as tensões das situações analisadas na FIGURA 61.

Observa-se na FIGURA 62 praticamente o mesmo comportamento entre o trecho com declividade $i = 0\%$ e os trechos de aclive e declive, em regiões próximas à aplicação da carga, ou seja, a face inferior do revestimento é submetida à tração enquanto que em um ponto sob a carga, na face superior do revestimento, há compressão. Em um instante imediatamente anterior a passagem do pneu o revestimento sofre compressão, como se o movimento do pneu esmagasse a camada asfáltica imediatamente a sua frente.

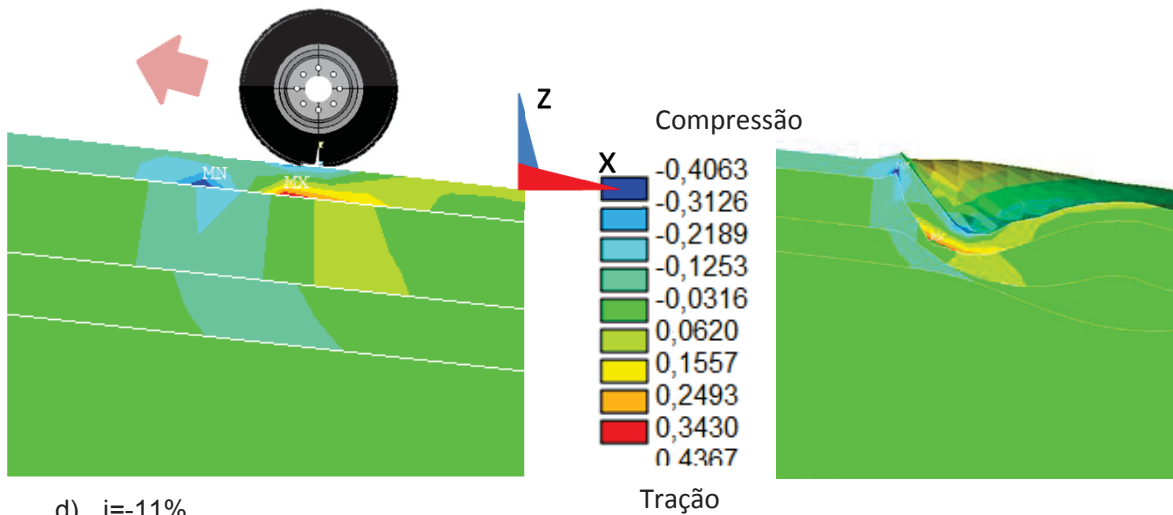
Esta intensificação das tensões horizontais, no topo do revestimento, como o aumento da declividade podem estar relacionados à ocorrência de defeitos como os escorregamentos, caracterizado pelo deslocamento da camada de revestimento em relação à camada inferior (camada de base), produzindo uma ondulação ou fenda em forma de meia lua. A intensidade dessas tensões e conseqüentemente frequência desses defeitos, por sua vez, pode ser ampliada em situação de aclive e declive com aceleração e frenagem dos veículos como será visto posteriormente.

FIGURA 62 – TENSÕES NORMAIS (HORIZONTAIS) S_x PARA $V=40$ km/h; $q = 0,76$ MPa; $\mu = 0,68$; ; $t = 0,178$ s E PARA A DECLIVIDADE: a) $i=0\%$; b) $i=+11\%$ E c) $i=-11\%$.

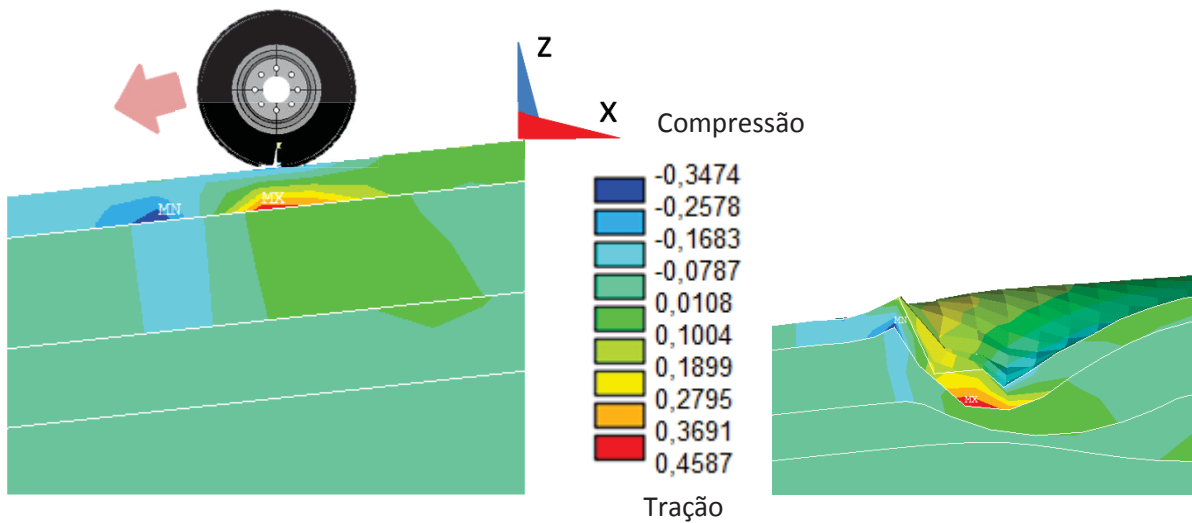
a) $i=0\%$



c) $i=+11\%$



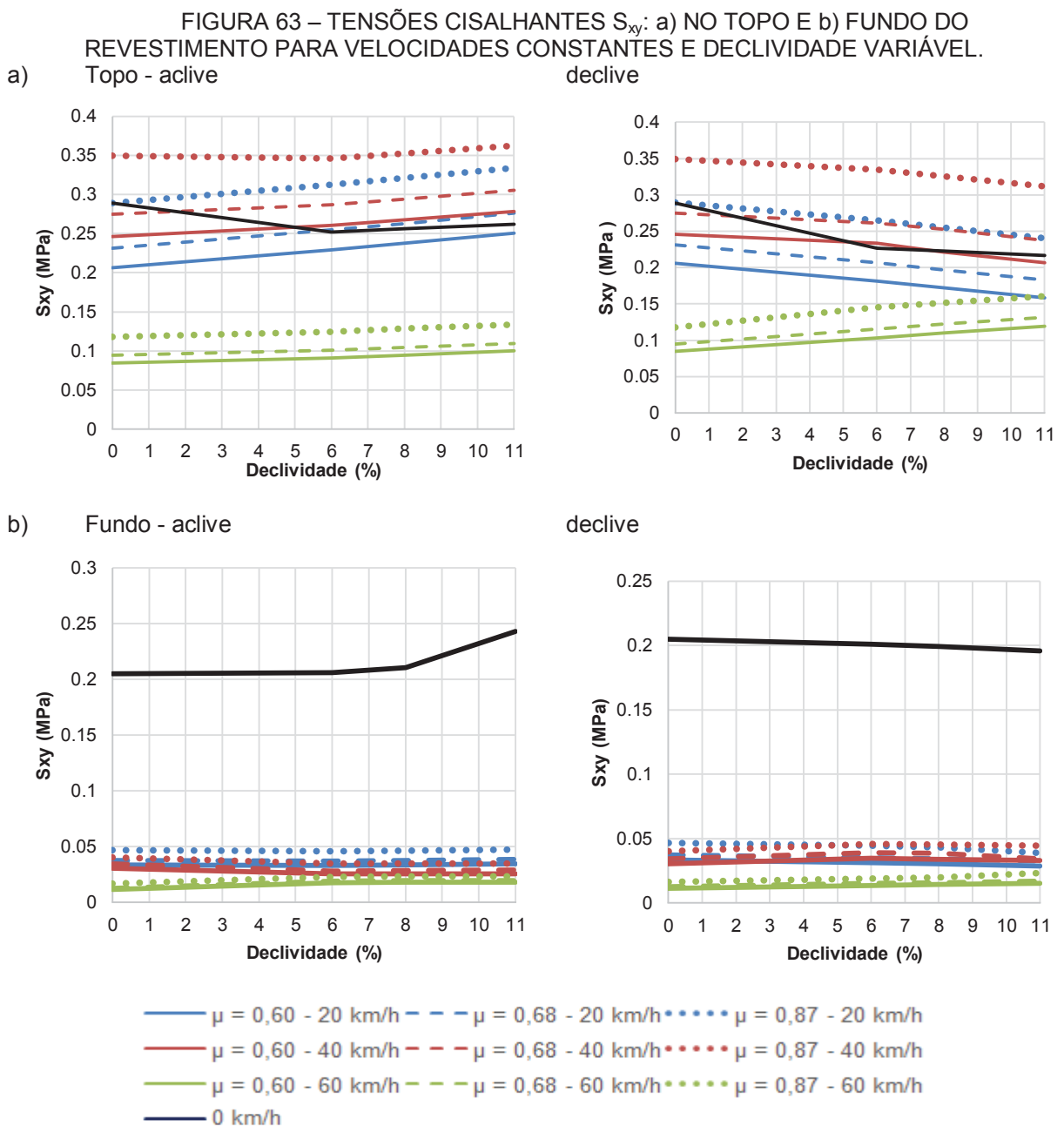
d) $i=-11\%$



FONTE: A autora (2019).

- S_{xy} no topo e fundo do revestimento

A FIGURA 63 apresenta o comportamento das tensões cisalhantes S_{xz} para as declividades i= 0, ±3, ±6, ±8 e ±11%, rugosidades lisa, média e rugosa (μ = 0,60, 0,68 e 0,87, respectivamente) e pressões de inflação de 0,76 MPa. Os valores de tensão apresentados na FIGURA 63 são as cisalhantes, em módulo, apresentadas pelo modelo ao longo das simulações para t = 0,300s, 0,178s e 0,098s e velocidades 20, 40 e 60 km/h, respectivamente.



FONTE: A autora (2019).

Observa-se inicialmente que, do mesmo modo que nos eixos horizontais, no plano xy, as tensões de cisalhamento são fortemente influenciadas pela declividade da pista, no entanto, se por um lado o aumento no aclive resulta em aumento das tensões cisalhantes, no declive retorna redução para as velocidades menores de 20 e 40 km/h, seguindo a tendência do modelo estático (FIGURA 62 a).

Analisando com maior detalhe a FIGURA 62, observa-se que no aclive, a maior amplitude é observada no topo do revestimento para a velocidade de 20 km/h e condição da superfície do pavimento Lisa ($\mu = 0,60$) onde as tensões cisalhantes passam de 0,20 MPa para 0,25 MPa, um aumento próximo a 20%. Agora no declive, para a mesma velocidade de 20 km/h ocorreu uma redução das tensões cisalhantes, a qual passou de cerca de 0,20 MPa para 0,15 MPa, uma diminuição de 25 %, e condição de rugosidade Lisa.

Já no fundo do revestimento a amplitude dos resultados, porém permanece próxima a 0,05 MPa, muito inferior à apresentada no caso estático que apresenta valores perto de 0,020 a 0,045 MPa.

A FIGURA 64, por sua vez, traz o comportamento das isolinhas de tensão extraídos do modelo para as tensões cisalhantes nas declividades de 0%, +11% e -11%, para a velocidade de 40 km/h. Percebe-se a partir deste, a pouca variação das tensões cisalhantes no fundo da camada de revestimento em face das tensões mais críticas no topo.

5.2.2.1. Tensões principais para o aclive e declive e velocidades contantes

A FIGURA 65 apresenta os valores das componentes S_3 (compressão), S_1 (tração) e $\tau_{m\acute{a}x}$ das tensões principais para as condições do pavimento analisadas no Item 5.2.2. Os valores apresentados correspondem às tensões apresentadas pelo modelo nos instantes $t = 0,300s$, $0,178s$ e $0,098s$ e velocidades 20, 40 e 60 km/h, respectivamente.

FIGURA 64 – TENSÕES CISALHANTES S_{xy} PARA $V=40$ km/h; $q = 0,76$ MPa; $\mu = 0,68$; $T = 0,178$ s E PARA AS DECLIVIDADES: a) $i=0\%$; b) $i=+11\%$ E c) $i=-11\%$.

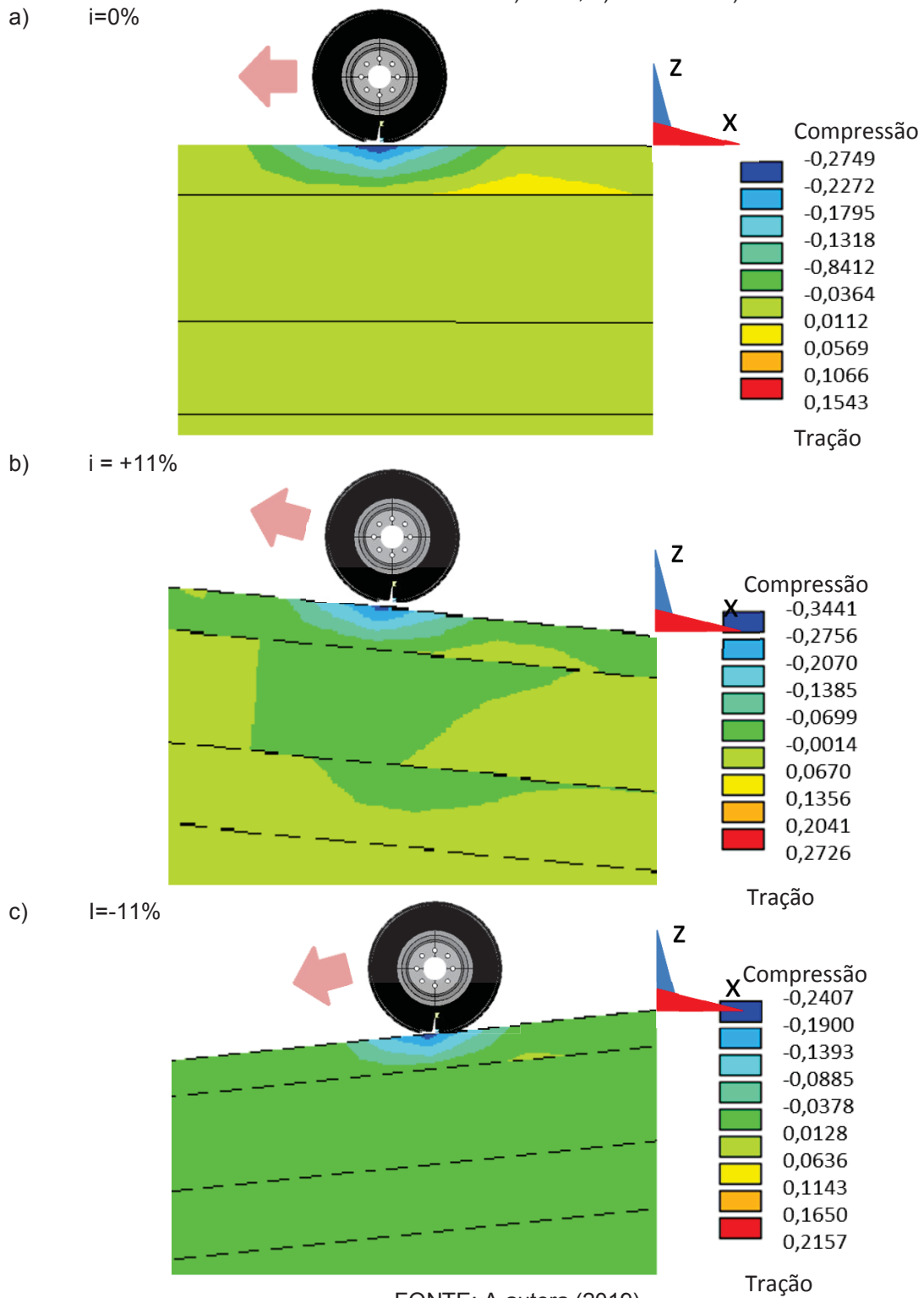
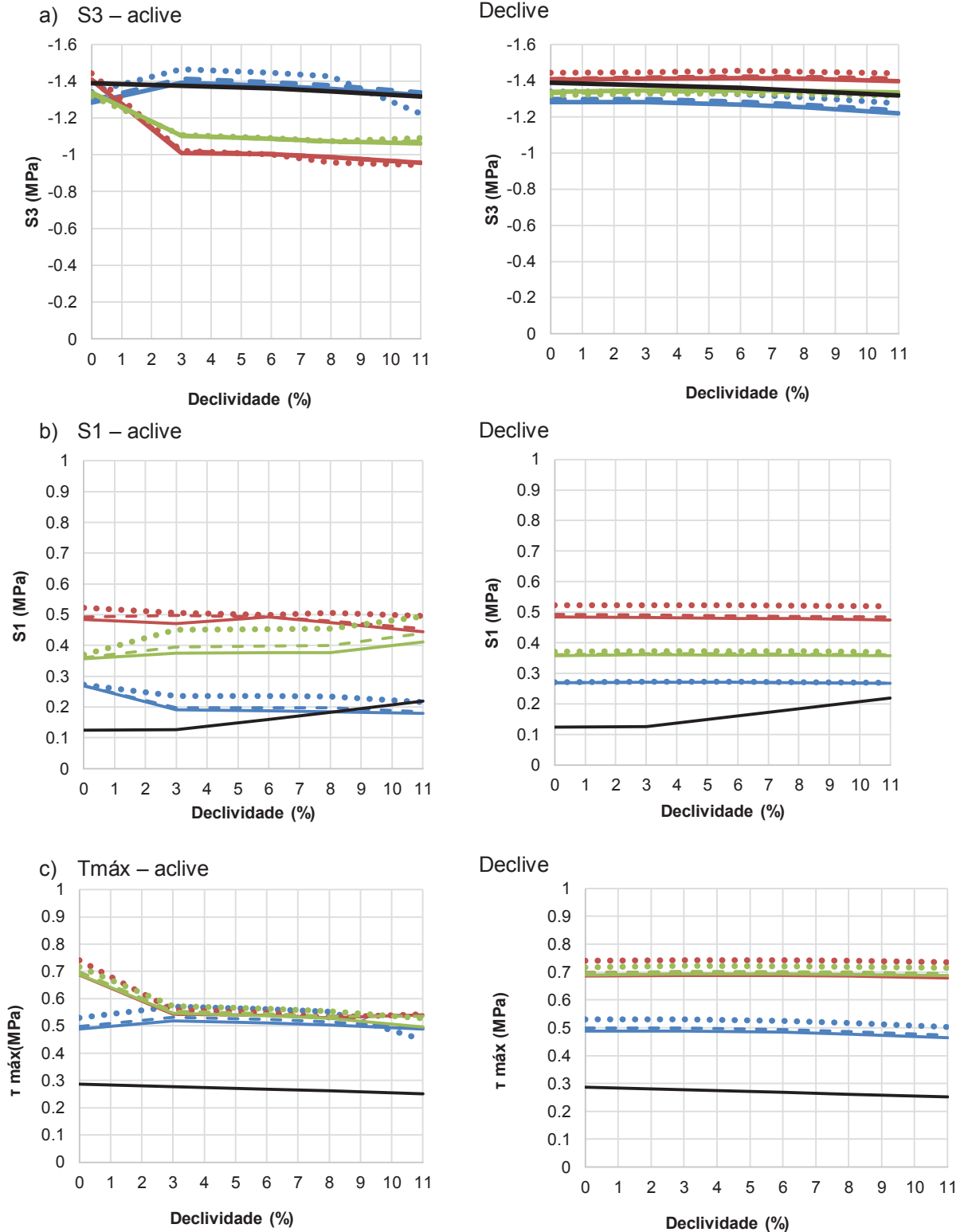


FIGURA 65 – COMPONENTES DAS TENSÕES PRINCIPAIS NO TOPO DO REVESTIMENTO PARA TRECHO EM ACLIVE E DECLIVE a) S3; b) S1 e c) $\tau_{m\acute{a}x}$.



FONTE: A autora (2019).

Analisando-se os resultados da FIGURA 65, nota-se que a inserção da declividade da pista não implica em uma influência significativa na amplitude das componentes de tensões principais analisadas (S_3 , S_1 e $\tau_{\text{máx}}$). As tensões S_3 , tanto no aclive como declive, comportam-se de modo análogo às tensões S_z da FIGURA 59 (Item 5.2.2) conservando amplitudes muito próximas. Já as tensões S_1 e $\tau_{\text{máx}}$, são pouco influenciadas pela declividade da pista, mantendo valores próximos aos apresentados pelo modelo com declividade nula.

5.2.3 Resultados do modelo com a inserção de frenagem e aceleração do veículo para a declividade do pavimento $i=0\%$

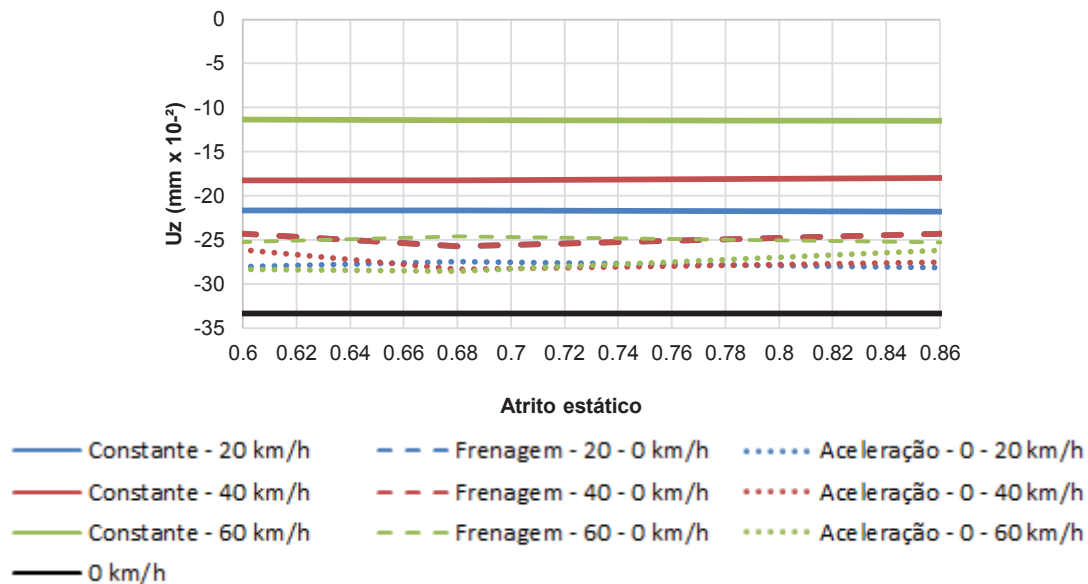
Neste item foi considerado o comportamento do pavimento durante a frenagem e aceleração do veículo, ou seja, o veículo trafegando nas velocidades de 20, 40 e 60 km/h e parando ou partindo do repouso e atingindo as mesmas velocidades. Nesta etapa a pressão de inflação também foi fixada em 0,76 MPa para as condições de rugosidade analisadas nas seções anteriores.

- U_z no topo do revestimento

A FIGURA 66 apresenta o comportamento das deflexões U_z para a aceleração (0-20, 0-40 e 0-60 km/h) e a frenagem (20-0, 40-0 e 60-0 km/h), para a declividade $i = 0\%$, rugosidades Lisa, Média e Rugosa ($\mu=0,60$, $0,68$ e $0,87$, respectivamente) e pressão de inflação de 0,76 MPa. Os dados apresentados na FIGURA 66 são as deflexões máximas de compressão apresentadas pelo modelo no início do processo de aceleração e final da frenagem

Uma primeira análise dos dados permite perceber que, tanto na aceleração como na frenagem, ocorre uma convergência dos valores para os apresentados no modelo estático, o que pode ser considerado esperado uma vez que ao se acelerar e frear, o veículo parte do repouso e o atinge, respectivamente.

FIGURA 66 – DEFLEXÕES U_z NO TOPO DA CAMADA DE REVESTIMENTO NA ACELERAÇÃO E FRENAGEM PARA DECLIVIDADE $I=0\%$.



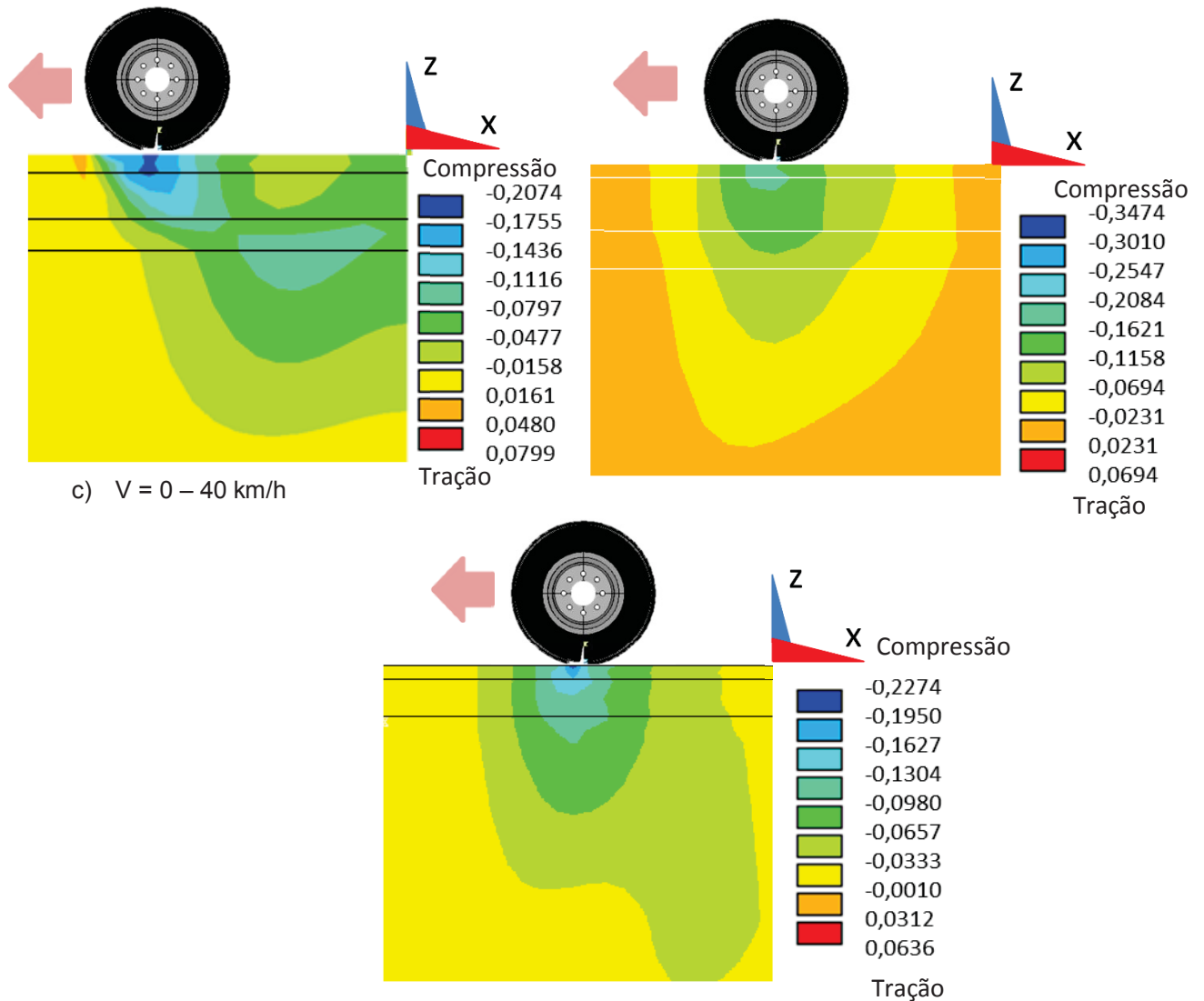
FONTE: A autora (2019).

Apurando os resultados da FIGURA 66, verifica-se que o maior acréscimo nos valores de deflexão ocorre para a velocidade de 60 km/h, a qual passa de quase 11×10^{-2} mm para 28×10^{-2} mm, um aumento de cerca de 150%, na aceleração quando comparada a situação de velocidade constante. Por outro lado, para as velocidades de 40 km/h e 20 km/h esse aumento é em torno de 40 e 30 %, respectivamente. A rugosidade da pista por sua vez, novamente não teve impacto significativo sobre os resultados de deflexão.

Ainda em termos de deflexão, a FIGURA 67 apresenta as bacias defletométricas para os três casos analisados: velocidade constante ($v = 40$ m/h); aceleração (0 - 40 km/h) e frenagem (40 - 0 km/h).

Os pontos analisados na figura anterior possuem as coordenadas (-1600; 0; 0). Os tempos (t) indicam os instantes nos quais foram lidas as deflexões das situações analisadas na FIGURA 66. A princípio nota-se que tanto na aceleração (FIGURA 67 b) como na frenagem (FIGURA 67 c), o formato da bacia se aproxima dos modelos estáticos apresentados na literatura, as quais são simétricas em relação ao eixo de aplicação da carga.

FIGURA 67 – DEFORMAÇÕES VERTICAIS U_z PARA $V=40$ km/h; $q = 0,76$ MPa; $\mu = 0,68$; E
 VELOCIDADE: a) $V=$ CONSTANTE ($t = 0,178$ s); b) $V=0-40$ km/h ($t=0,029$ s); c) $V=40-0$ km/h ($t=0,44$ s)
 a) $V=$ constante b) $V = 40 - 0$ km/h

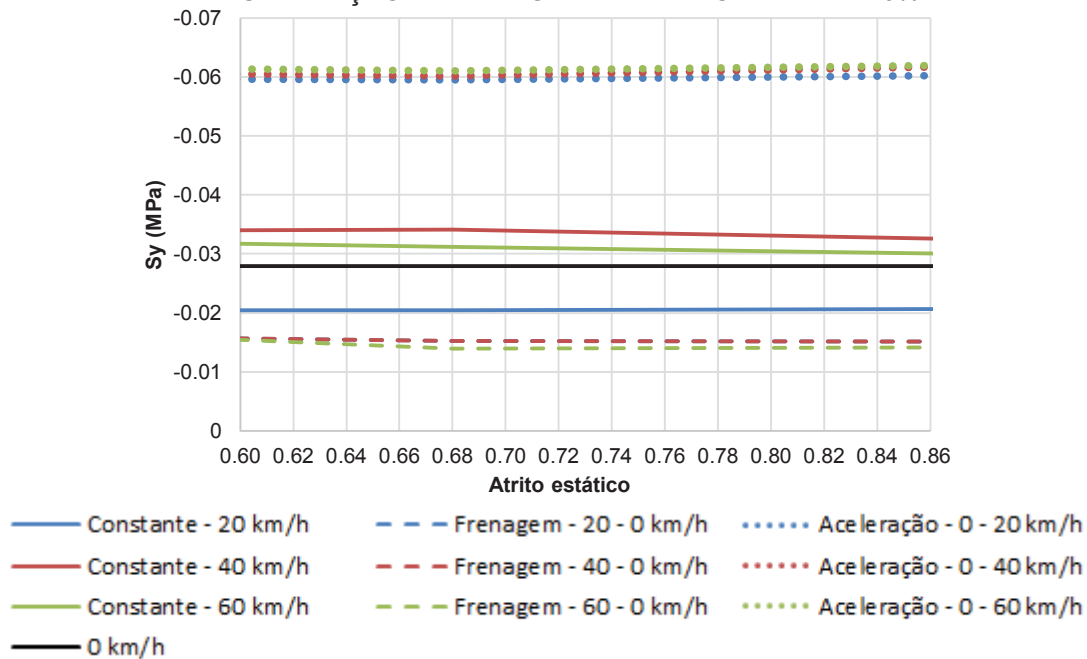


FONTE: A autora (2019).

- S_z no topo do subleito

A FIGURA 68 apresenta o comportamento das tensões S_z para a aceleração (0-20, 0-40 e 0-60 km/h) e a frenagem (20-0, 40-0 e 60-0 km/h), para a declividade $i=0\%$, rugosidades Lisa, Média e Rugosa ($\mu=0,60$, 0,68 e 0,87, respectivamente) e pressão de inflação de 0,76 MPa. Os dados apresentados na FIGURA são as tensões normais máximas de compressão apresentadas pelo modelo no início do processo de aceleração e final da frenagem.

FIGURA 68 – TENSÕES NORMAIS DE COMPRESSÃO (VERTICAIS) S_z NO TOPO DO SUBLEITO NA ACELERAÇÃO E FRENAGEM PARA DECLIVIDADE $i=0\%$.



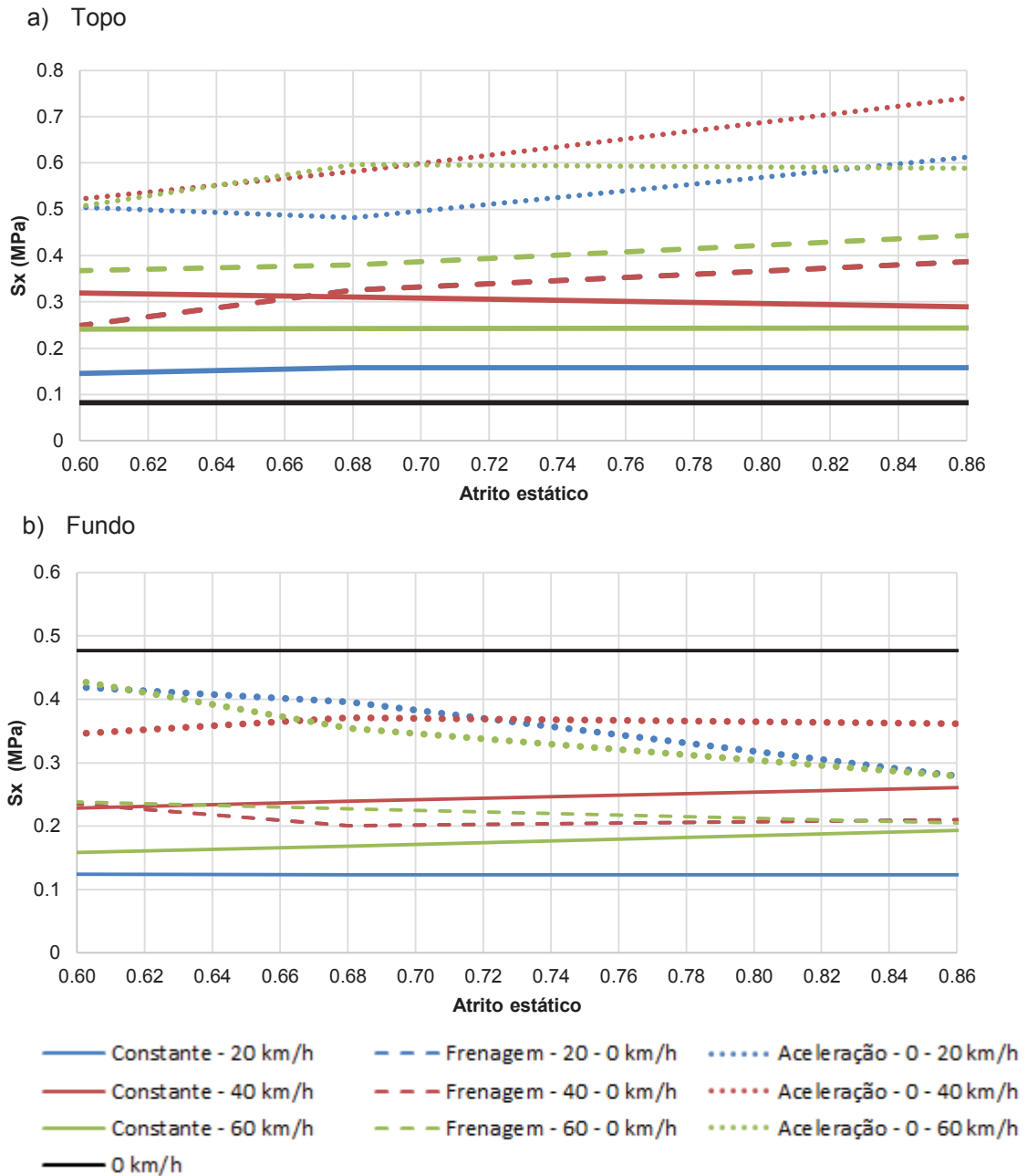
FONTE: A autora (2019).

Em princípio percebe-se que no final da frenagem ocorre um alívio das tensões que chegam ao subleito retornando tensões inferiores inclusive ao modelo estático ficando em torno de 0,015 MPa, enquanto que na aceleração ocorre uma ampliação dos resultados para cerca de 0,060 MPa. Essa ampliação na intensidade das tensões que chegam ao topo do subleito pode estar associada à ocorrência de afundamentos por consolidação das camadas inferiores do pavimento, comumente identificados em regiões próximas a semáforos e lombadas, por exemplo.

- S_x no topo e fundo do revestimento

Reconsiderando os eixos horizontais, a FIGURA 69 apresenta o comportamento das tensões S_x , no topo (FIGURA 69a) e fundo (FIGURA 69b) da camada de revestimento, para a aceleração (0-20, 0-40 e 0-60 km/h) e a frenagem (20-0, 40-0 e 60-0 km/h), para a declividade $i = 0\%$, rugosidades Lisa, Média e Rugosa ($\mu=0,60, 0,68$ e $0,87$, respectivamente) e pressão de inflação de 0,76 MPa. Os dados apresentados na FIGURA 69 são de tensões normais máximas de tração apresentadas pelo modelo no início do processo de aceleração e final da frenagem.

FIGURA 69 – TENSÕES NORMAIS DE TRAÇÃO (HORIZONTAIS) S_x : a) TOPO E b) FUNDO DO REVESTIMENTO NA ACELERAÇÃO E FRENAGEM, PARA DECLIVIDADE $i=0\%$.



FONTE: A autora (2019).

Analisando a FIGURA 69, nota-se que, tanto na aceleração como na frenagem, no topo do revestimento, ocorre uma ampliação dos resultados de tensão. No entanto, as tensões maiores são apresentadas durante a aceleração do pneu chegando a atingir cerca de 0,75 MPa no topo do revestimento e 0,39 MPa no fundo, para a velocidade de 40 km/h.

Em termos das condições de rugosidade no topo, verifica-se que, na aceleração, com o aumento da rugosidade de Lisa ($\mu = 0,6$) para uma condição

considerada Rugosa ($\mu=0,87$), a tensão aumenta em quase 45% (de 0,52 MPa para 0,75 MPa) para 40 km/h; e 20% (de 0,50 MPa para 0,62 MPa) para 20 km/h. Já na frenagem, o aumento mais significativo ocorre para as velocidades de 20 e 40 km/h, cerca de 60% (de 0,25 MPa para 0,40 MPa). Agora para o fundo do revestimento, a rugosidade da pista já não exerce a mesma influência apresentada para o topo do revestimento. No entanto, novamente a aceleração do pneu é mais crítica que a própria frenagem em termos de tensão de tração.

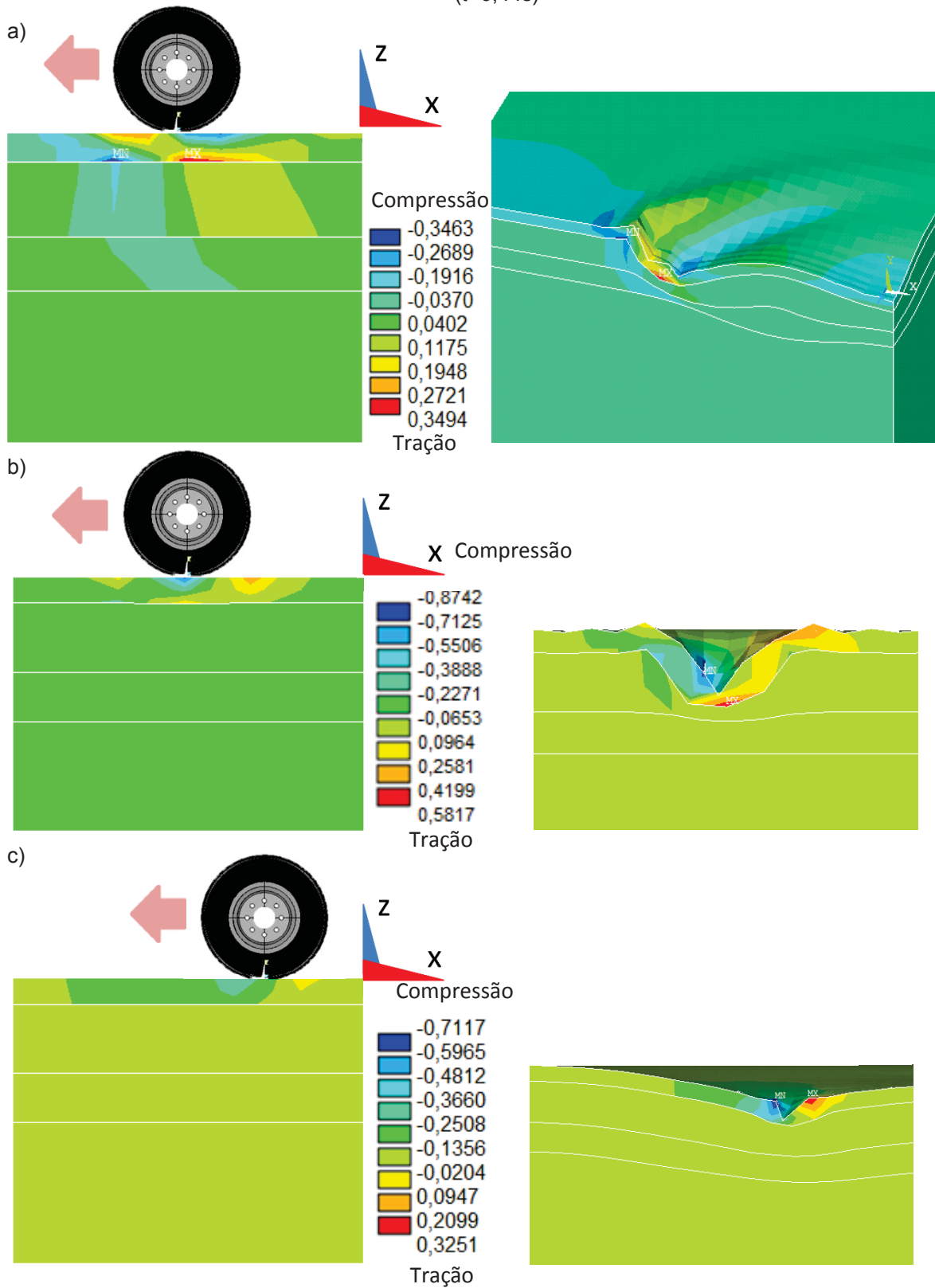
Como visto no Item 5.2.2. esta intensificação das tensões horizontais, no topo do revestimento está relacionada à ocorrência de defeitos como os escorregamentos. No entanto, com a inserção da aceleração e frenagem, podem ocorrer ainda, defeitos conhecidos como corrugações ou ondulação no sentido transversal ao de deslocamento do tráfego comumente identificados em regiões próximas à interseções.

A FIGUR 70 mostra o comportamento das camadas do pavimento, para as duas situações analisadas nesta pesquisa: o pneu partindo do repouso (0 - 40 km/h) (FIGURA 70a) e freando (40 - 0 km/h) (FIGURA 70b), em comparação à distribuição das isolinhas de tensão horizontal S_x do modelo com velocidade constante. Observa-se que tanto na aceleração como na frenagem surgem tensões de tração no topo do revestimento, em regiões imediatamente após a passagem do pneu, onde no modelo com velocidade constante havia apenas tensão de compressão.

- S_{xy} no topo e fundo do revestimento

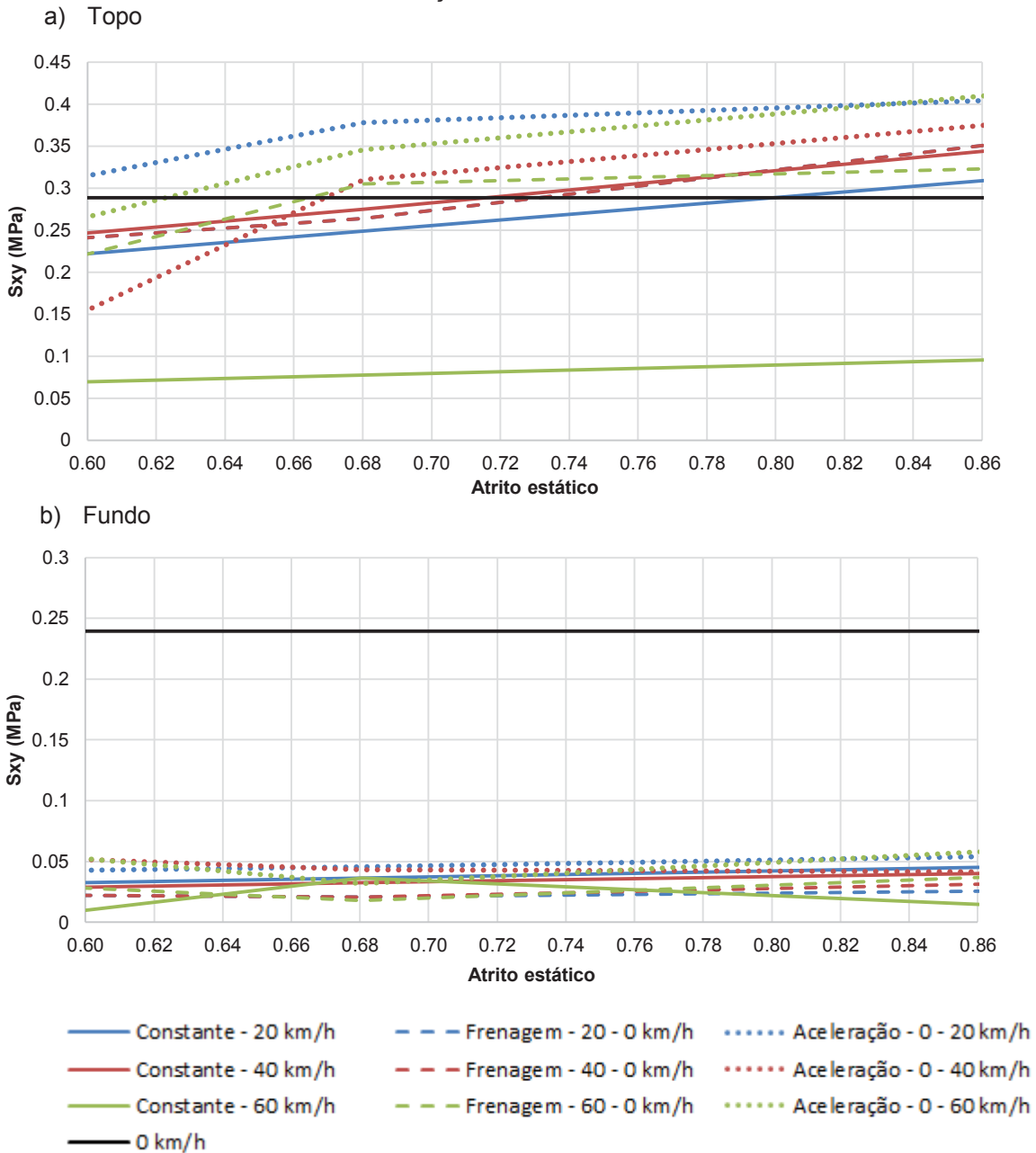
Agora no plano xy, a FIGURA 71 apresenta o comportamento das tensões cisalhantes S_{xy} , no topo (FIGURA 71 a) e fundo (FIGURA 71 b) da camada de revestimento, para a aceleração (0-20, 0-40 e 0-60 km/h) e a frenagem (20-0, 40-0 e 60-0 km/h), para a declividade $i=0\%$, rugosidades Lisa, Média e Rugosa ($\mu=0,60$, 0,68 e 0,87, respectivamente) e pressão de inflação de 0,76 MPa. A FIGURA 71 apresenta as tensões cisalhantes máximas em módulo apresentadas pelo modelo no início do processo de aceleração e final da frenagem.

FIGURA 70 – TENSÕES NORMAIS DE TRAÇÃO (HORIZONTAIS) S_x PARA $V=40$ km/h; $q = 0,76$ MPa; $\mu = 0,68$; E VELOCIDADE: a) $V=$ CONSTANTE ($t = 0,178$ s); b) $V=0-40$ km/h ($t=0,029$ s); c) $V=40-0$ km/h ($t=0,44$ s)



FONTE: A autora (2019).

FIGURA 71 – TENSÕES CISALHANTES S_{xy} : a) NO TOPO E b) FUNDO DO REVESTIMENTO NA ACELERAÇÃO E FRENAGEM PARA $i=0\%$.



FONTE: A autora (2019).

Do mesmo modo que nas tensões horizontais, a aceleração e a frenagem exercem influência sobre as tensões cisalhantes impondo-lhes uma amplificação dos valores (em módulo). No entanto, esse aumento é mais acentuado para aceleração do veículo, especialmente no topo do revestimento. Já no fundo desta camada, a ampliação dos valores de tensão é pouco acentuada, porém, ainda menores que os valores apresentados pelo modelo estático.

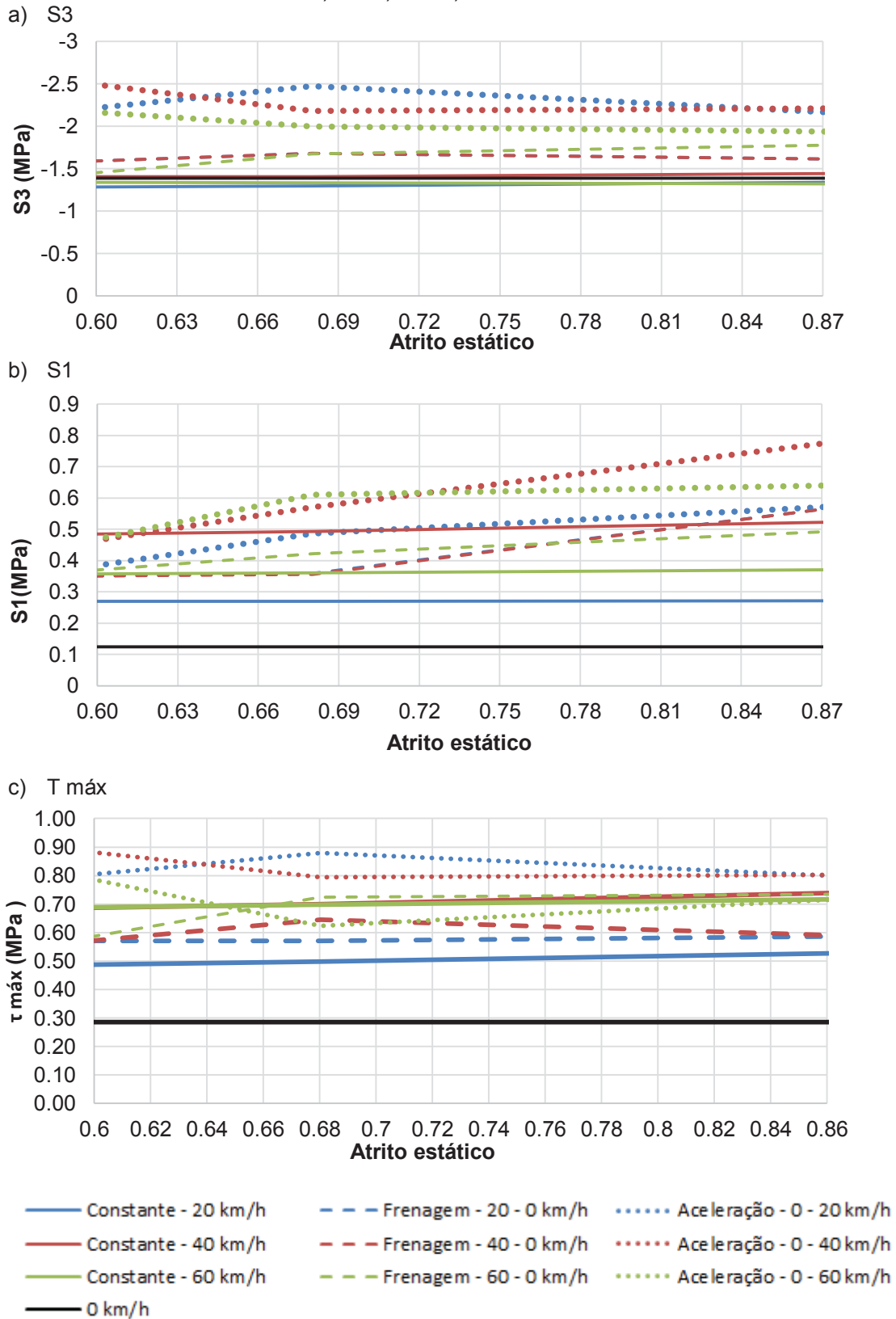
O maior crescimento de tensão foi observado durante a aceleração com velocidade final de 40 km/h e condição de pista Rugosa ($\mu = 0,87$), porém os valores mais críticos foram observados para a velocidade de 20 km/h. E ainda, tanto na aceleração como na frenagem, no topo e fundo do revestimento, as velocidades menores são mais críticas. No entanto, tensões maiores são identificadas durante a aceleração do pneu, atingindo 0,40 MPa no topo do revestimento e 0,05 MPa no fundo, também para a velocidade de 20 km/h.

Enfim, em termos das condições de rugosidade, verifica-se que, na aceleração, com o aumento da rugosidade de Lisa ($\mu=0,6$) para uma condição considerada Rugosa ($\mu=0,87$), a tensão aumenta em cerca de 30% (de 0,30 MPa para 0,40 MPa) para 20 km/h; e cerca de 150% e 60% (de 0,15 MPa para 0,37 MPa; de 0,26 MPa para 0,41 MPa) para 40 e 60 km/h, respectivamente. Já na frenagem, o aumento é cerca de 45% (de 0,24 MPa para 0,35 MPa para as velocidade de 20 e 40 km/h e de 0,22 MPa para 0,32 MPa para 60 km/h). Já para o fundo do revestimento, a rugosidade da pista, assim como ocorre para as tensões S_x , já não exerce a mesma influencia apresentada para o topo do revestimento. E novamente a aceleração do pneu é mais crítica que a própria frenagem em termos de tensão de cisalhamento.

5.2.3.1. Tensões principais para trechos com declividade $i = 0\%$, na aceleração e frenagem

A FIGURA 65 apresenta os valores das componentes S_3 (compressão), S_1 (tração) e $T_{m\acute{a}x}$ das tensões principais para as condições do pavimento analisadas no Item 5.2.2. Os valores apresentados correspondem às tensões apresentadas pelo modelo nos instantes $t = 0,300s$, $0,178s$ e $0,098s$ e velocidades 20, 40 e 60 km/h, respectivamente.

FIGURA 72 – COMPONENTES DAS TENSÕES PRINCIPAIS NO TOPO DO REVESTIMENTO PARA TRECHO EM ACLIVE E DECLIVE a) S3; b) S1 e c) $\tau_{\text{máx}}$.



FONTE: A autora (2019).

Analisando-se a FIGURA 72, observa-se que para determinadas condições de rugosidade e velocidades, as tensões S_3 atingem valores próximos a 2,5 MPa no topo da camada de revestimento, durante a frenagem, um aumento de cerca de 70 % em relação aos modelos com velocidade constantes que atingem valores próximos a 1,5 MPa.

Por outro lado, em termos das tensões S_1 (FIGURA 72b), as amplitudes destas se aproximam das apresentadas pelas tensões normais S_x (FIGURA 69a) atingindo valores próximos de até 0,70 MPa (velocidade 40 km/h e condição de rugosidade Rugosa ($\mu = 0,87$) durante a aceleração do pneu). As tensões cisalhantes máximas (τ máx), por sua vez, atingem valores de até 0,90 Mpa, também durante a aceleração do pneu.

E por fim, pelo fato de as tensões prisão mostrarem-se pouco influenciadas pela declividade da pista, mantendo valores próximos aos apresentados pelo modelo com declividade nula (Item 5.2.1), as tensões principais não foram analisados no próximo Item.

5.2.4 Resultados do modelo com a inserção de frenagem e aceleração do veículo para trechos em aclave e declive

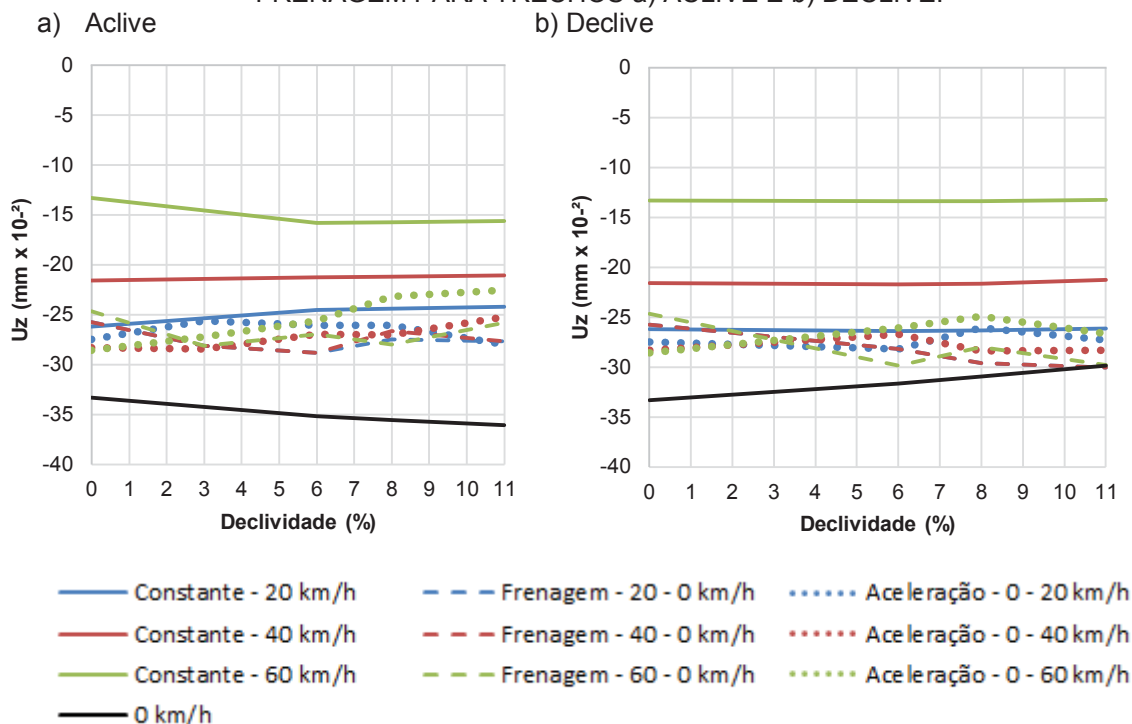
Considerando a seção anterior, a presente analisa o comportamento do pavimento também durante a frenagem e aceleração do veículo, porém para trechos em aclave e declive. A pressão de inflação do pneu foi fixada em 0,76 MPa. Do mesmo modo, a rugosidade da superfície do pavimento, apesar de exercer forte influência nas tensões horizontais e de cisalhamento, não foi analisada nesta etapa, sendo fixada para a condição Média ($\mu = 0,68$) de atrito (entre Lisa e Rugosa).

- U_z no topo do revestimento

Completando o estudo das deflexões, agora com a ocorrência da frenagem e aceleração do pneu para trechos em aclave e declive, a FIGURA 73 apresenta o comportamento das deflexões U_z no topo da camada de revestimento, para a aceleração (0-20, 0-40 e 0-60 km/h) e a frenagem (20-0, 40-0 e 60-0 km/h), para as declividades $i=0, \pm 3, \pm 6, \pm 8$ e ± 11 %, rugosidade Média ($\mu = 0,68$) e pressão de

inflação de 0,76 MPa. A FIGURA 73 apresenta as deflexões máximas apresentadas pelo modelo no início do processo de aceleração e final da frenagem.

FIGURA 73 – DEFLEXÕES U_z NO TOPO DA CAMADA DE REVESTIMENTO NA ACELERAÇÃO E FRENAGEM PARA TRECHOS a) ACLIVE E b) DECLIVE.



FONTE: A autora (2019).

A princípio notou-se que a aceleração, em trechos inclinados, resultou em uma leve diminuição na amplitude das deflexões se comparada com o pavimento onde a declividade é nula. A frenagem, por outro lado, especialmente nas velocidades maiores de 40 km/h e 60 km/h, resultou em um aumento perceptível nos resultados de deflexão devido ao aumento da declividade da pista, especialmente em trechos em declive.

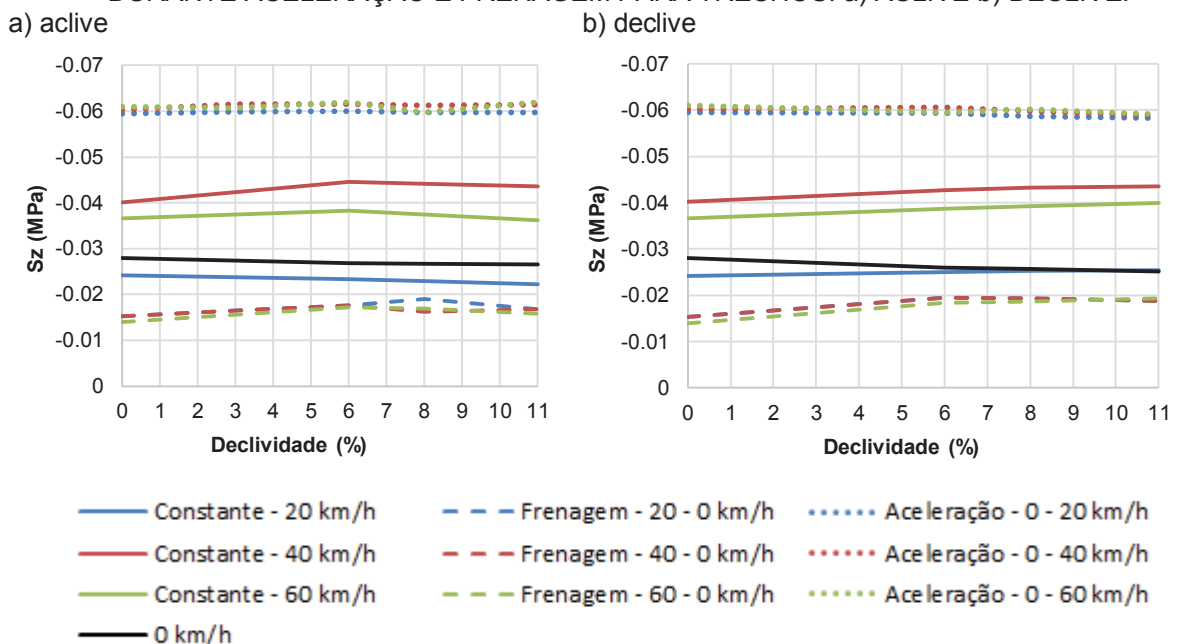
Este aumento, por sua vez, para os trechos em declive na frenagem (FIGURA 73b) chegou a cerca de 15 % (de 25×10^{-2} mm para 30×10^{-2} mm) para a velocidade de 20 e 40 km/h e 40% (de 24×10^{-2} mm para 29×10^{-2} mm) para 60 km/h, quando a declividade aumenta de $i = 0\%$ para $i = +11\%$. Para o trecho em aclive na aceleração (FIGURA 73a), a redução nas deflexões chegou a quase 20% (de 28×10^{-2} mm para 22×10^{-2} mm) para 60 km/h e 10% (de 28×10^{-2} mm para 25×10^{-2} mm) para 40 km/h. Em comparação com os modelos com velocidade constante, as deflexões na aceleração e frenagem, são ainda superiores.

- S_z no topo do subleito

Considerando a continuidade das análises dos resultados, agora no topo do subleito, a FIGURA 74 apresenta o comportamento das tensões S_z no topo desta camada, para a aceleração (0-20, 0-40 e 0-60 km/h) e a frenagem (20-0, 40-0 e 60-0 km/h), declividades $i = 0, \pm 3, \pm 6, \pm 8$ e ± 11 %, rugosidade Média ($\mu = 0,68$) e pressão de inflação de 0,76 MPa. A FIGURA 74 apresenta as tensões normais máximas de compressão apresentadas no início do processo de aceleração e final da frenagem.

Percebe-se que a inserção da declividade não exerce influência significativa nos valores de tensão no topo do subleito, resultando em um aumento de cerca de 13% na amplitude dessas tensões, tanto no aclive como no declive, durante a frenagem, quando a declividade para de 0% para $\pm 11\%$. Por outro lado, na aceleração, não há influência nos resultados.

FIGURA 74 – TENSÕES NORMAIS DE COMPRESSÃO (VERTICAIS) S_z NO TOPO DO SUBLEITO DURANTE ACELERAÇÃO E FRENAGEM PARA TRECHOS: a) ACLIVE b) DECLIVE.

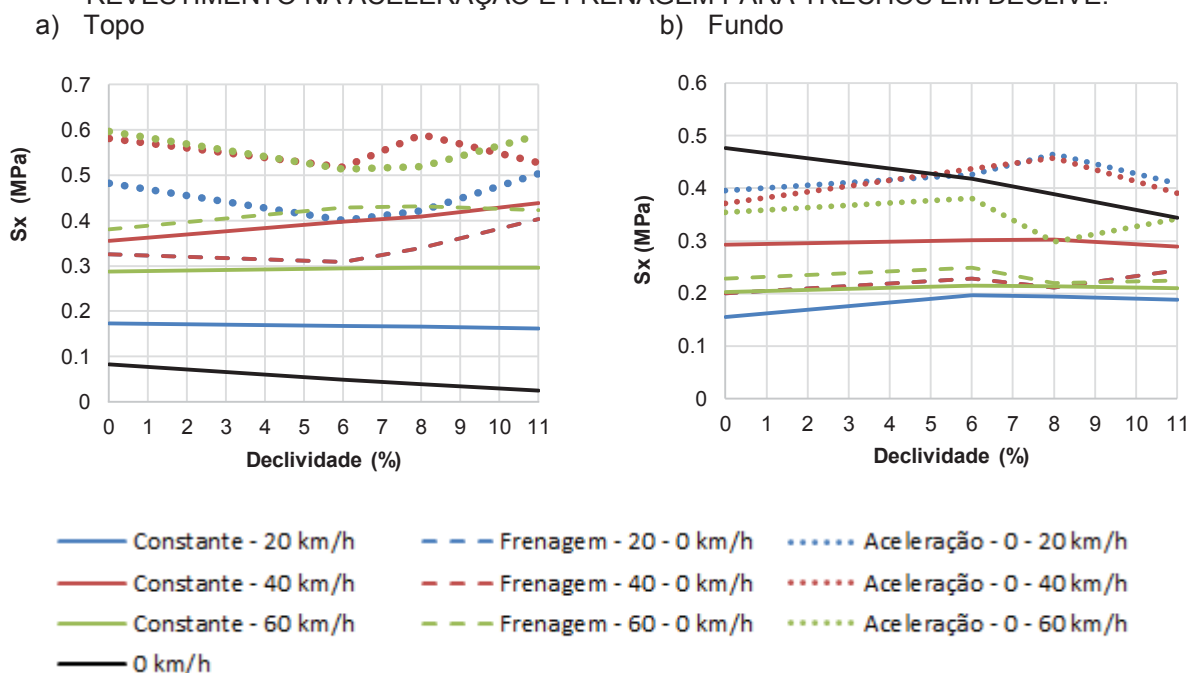


FONTE: A autora (2019).

- S_x no topo e fundo do revestimento

Priorizando novamente os resultados obtidos no eixo X, as FIGURAS 75 e 76 apresentam o comportamento das tensões S_x , no topo (FIGURAS 75a e 76a) e

FIGURA 76 – TENSÕES NORMAIS DE TRAÇÃO (HORIZONTAIS) S_x : a) TOPO e b) FUNDO DO REVESTIMENTO NA ACELERAÇÃO E FRENAGEM PARA TRECHOS EM DECLIVE.



FONTE: A autora (2019).

Voltando a análise agora para as simulações com trechos em declive (FIGURA 76), ao contrário do que ocorre no acive, o fenômeno da frenagem passa a apresentar o maior aumento na amplitude das tensões, chegando a apresentar um acréscimo de 30 %, para as velocidades de 20 e 40 km/h, atingindo tensões em torno de 0,40 MPa. No fundo da camada de revestimento esse aumento foi de 20 % para as mesmas velocidades.

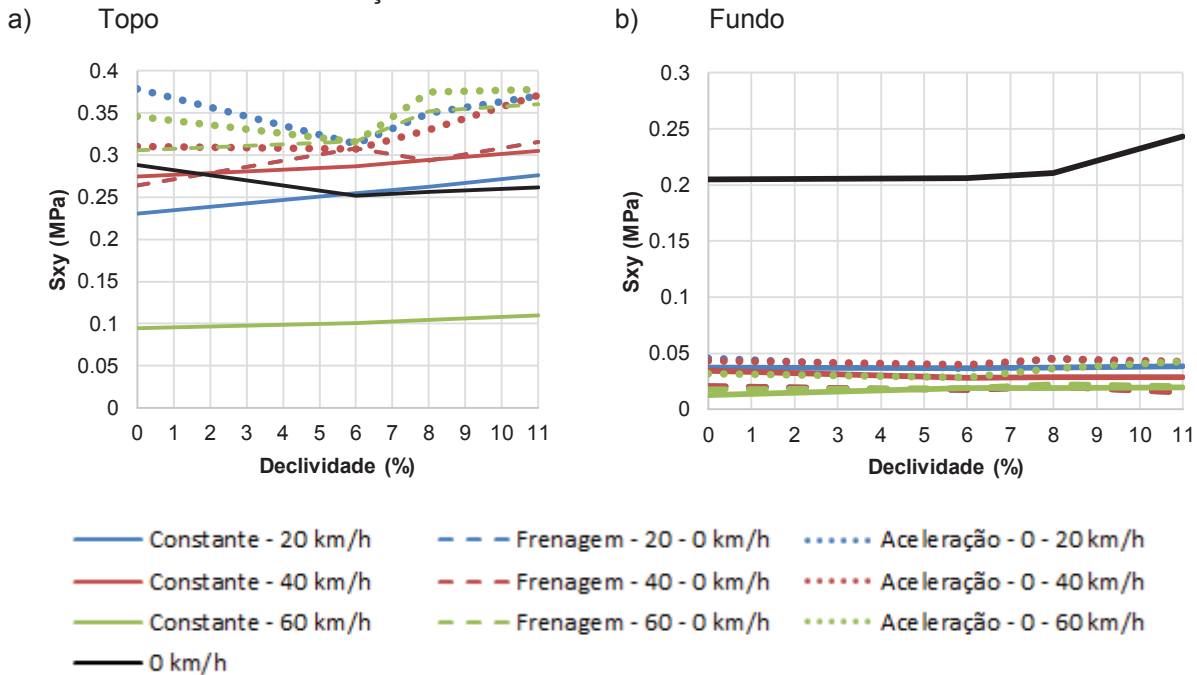
Como visto no Item 5.2.2. e 5.2.3 esta intensificação das tensões horizontais, especialmente no topo do revestimento pode estar relacionada à ocorrência de defeitos como os escorregamentos e corrugações ou ondulação no sentido transversal ao deslocamento do tráfego, especialmente devido o movimento de frenagem ou aceleração dos veículos em pavimentos com dosagem inadequada da mistura asfáltica e ligação fraca entre a camada de base e a de revestimento.

- S_{xy} no topo e fundo do revestimento

Finalizando-se o estudo, tem-se nas FIGURAS 77 e 78 o comportamento das tensões S_{xy} , no topo (FIGURAS 77a e 78 a) e fundo (FIGURAS 77b e 78b) da camada de revestimento, para a aceleração (0-20, 0-40 e 0-60 km/h) e a frenagem

(20-0, 40-0 e 60-0 km/h), declividades $i = 0, \pm 3, \pm 6, \pm 8$ e ± 11 %, rugosidade Média ($\mu=0,68$) e pressão de inflação de 0,76 MPa. As FIGURAS 77 e 78 apresentam, em módulo, as tensões cisalhantes máximas apresentadas pelo modelo no início do processo de aceleração e final da frenagem.

FIGURA 77 – TENSÕES CISALHANTES S_{xy} : a) NO TOPO E b) FUNDO DO REVESTIMENTO NA ACELERAÇÃO E FRENAGEM PARA TRECHOS EM ACLIVE.



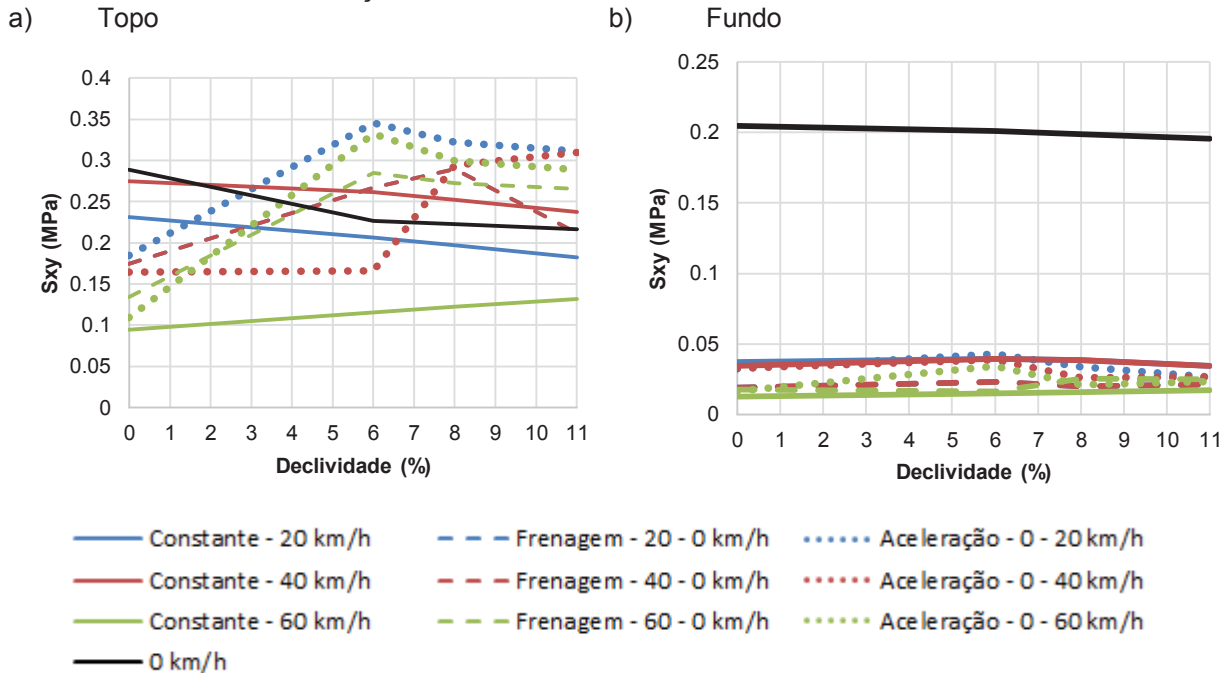
FONTE: A autora (2019).

De início, do mesmo modo que ocorre para as tensões horizontais analisadas na seção anterior, observa-se que a aceleração do pneu provoca no pavimento tensões de cisalhamento mais críticas se comparada à frenagem, ao se considerar o pavimento em aclave. O acréscimo mais acentuado é observado para a velocidade de 60 km/h, cerca de 20%, quando a declividade passa de $i = 0\%$ para $i = +11\%$. O mesmo acréscimo observado durante a frenagem para as velocidades de 20 e 40 km/h.

Ainda para o trecho em aclave, analisando agora a face inferior do revestimento, pouco impacto é observado nas intensidades das tensões cisalhantes, tanto na frenagem como aceleração do pneu, apresentando ainda tensões muito inferiores aos apresentados pelo modelo estático.

Por outro lado, em trechos em declive, o pico de tensão observado foi de 0,35 MPa, durante a aceleração a uma velocidade de 20 km/h para a declividade de 6%, valores significativamente superiores aos apresentados pelo modelo estático.

FIGURA 78 – TENSÕES CISALHANTES S_{xy} : a) NO TOPO E b) FUNDO DO REVESTIMENTO NA ACELERAÇÃO E FRENAGEM PARA TRECHOS EM DECLIVE.



FONTE: A autora (2019).

Já no fundo da camada de revestimento, o comportamento é o mesmo ao observado para os trechos em acive.

Esta ampliação das tensões cisalhantes (S_{xy}) no modelo dinâmico em comparação ao que aponta o modelo estático, especialmente em situações de acive e declive (Item 5.2.2), aceleração e frenagem (Item 5.2.3), ou a combinação desses dois fatores (Item 5.2.4), aponta para a importância da consideração dessa componente de tensão no estudo de modelos de fadiga, uma vez que essas tensões podem estar associadas, não somente à ocorrência de escorregamentos em pavimentos, mas no desenvolvimento de fissuras por fadiga.

6. CONCLUSÃO

Em virtude da amplitude de possibilidades de análise fornecidas no domínio da solução explícita, além do fato da aplicação da carga simular o fenômeno muito próximo do real (pneu rodando sobre a superfície), pode-se assegurar que o modelo desenvolvido nesta pesquisa é confiável e possibilita ainda, a inserção de diversos parâmetros como a rugosidade, velocidade, aceleração e frenagem dos veículos, dentre outros; os quais, em modelos estáticos ou até mesmo implícitos, são negligenciados ou valem-se de correlações para ter seus efeitos quantificados.

Assim, retomando o objetivo principal desta pesquisa, nomeadamente, simular as solicitações dinâmicas de veículos sobre pavimentos flexíveis, pode-se afirmar que este foi atingido, sendo apresentados os resultados de tensão e deflexão no pavimento diante das diversas combinações de parâmetros propostos, dentre os quais: velocidade, rugosidade, declividade da pista, inflação dos pneus e variação da velocidade durante a aceleração e frenagem dos veículos.

As primeiras considerações em termos dos parâmetros inseridos no modelo proposto para esta pesquisa permitem afirmar que:

- Inflação do pneu:

Numericamente, não influenciou nos resultados aqui avaliados. Resultado este que concorda com os obtidos por Sebaaly e Tabatabaee (1989), os quais verificaram que em pavimentos com camadas de asfalto mais espessas, o efeito da pressão inflacionária torna-se menos pronunciado.

- Rugosidade da pista

A rugosidade também apresentou um impacto reduzido sobre as deflexões (U_z topo do revestimento) e tensões verticais (S_z topo do revestimento e do subleito) o que pode ser atribuída ao fato de que o software empregado nas análises considera o atrito como uma tensão de cisalhamento equivalente (no contato pneu-pavimento).

Por outro lado, a influência da rugosidade da pista sobre as componentes de tensão horizontal (S_x , preferencialmente, no sentido de deslocamento do pneu) e cisalhante (S_{xy} no plano paralelo à superfície do revestimento) foi sensivelmente importante, especialmente sobre o topo da camada de revestimento, para todos os casos avaliados. No entanto, posteriormente, ao se considerar a variação da

velocidade (para $i = 0\%$), a aceleração do pneu mostrou-se a situação mais crítica comparada à própria frenagem, tanto para as tensões S_x como S_{xy} .

Esta ampliação das tensões cisalhantes (S_{xy}) e horizontais (S_x e S_y) no modelo dinâmico em comparação ao que aponta o modelo estático, especialmente em situações de aclave e declive, com ou sem a atuação da aceleração e frenagem, podem estar associadas, não somente à ocorrência de escorregamentos em pavimentos, mas também no desenvolvimento e ampliação de fissuras por fadiga em revestimentos asfálticos.

- Velocidade do pneu

As deflexões e tensões verticais foram diretamente impactadas pelo aumento da velocidade resultando em uma redução na amplitude das deflexões enquanto que um aumento nas tensões S_z foi observado. Este acréscimo na intensidade das tensões verticais em face da redução das deflexões pode ser atribuído as tensões adicionais de contato do modelo dinâmico. No entanto, apesar desse aumento, ao aumentar-se a velocidade de deslocamento da carga, o tempo de contato entre o pneu e pavimento diminui, reduzindo assim o tempo de reação e conseqüentemente, redução na intensidade das deformações.

Em face desse aumento das tensões verticais no topo do revestimento, o modelo dinâmico também mostrou uma intensificação das tensões verticais no topo do subleito com o aumento da velocidade (constante), superiores inclusive, às apresentadas pelo modelo estático. Essa intensificação das tensões no topo do subleito no modelo dinâmico pode estar associada ao desenvolvimento de defeitos em pavimentos asfálticos como afundamentos por consolidação, causado pela consolidação diferencial do subleito, o qual está sujeito a tensões superiores às previstas no modelo estático onde as tensões observadas foram menores.

Considerando agora a análise das tensões nos eixos horizontais: x , no sentido do deslocamento e y , no sentido transversal ao mesmo, observou-se que as maiores tensões ocorreram no primeiro, apesar de ambos apresentarem tensões de tração muito superiores aos apresentados pelos modelos estáticos, para o topo do revestimento e $i = 0\%$.

- Declividade da pista

Quando da inserção da declividade da pista, ainda considerando a velocidade constante, não se observa grande impacto na intensidade tanto das deflexões como

para as tensões verticais, porém, o formato da bacia defletométrica é visivelmente afetado, apresentando um leve aumento de sua assimetria, contrapondo o formato das bacias apresentadas pelos modelos estáticos. Enfim, no geral, o que se esperava com o aumento da declividade, é que, a decomposição da carga de roda nos eixos vertical e horizontal local (eixo x paralelo à superfície inclinada do pavimento) provocasse uma redução da componente vertical e inclusão de uma componente de carga de roda horizontal, o que, no eixo global, resultaria na manutenção da amplitude das tensões verticais em face de um acréscimo das tensões horizontais e cisalhantes, o que foi observado.

Em termos de tensão horizontal S_x os trechos em aclave apresentam situação mais crítica para velocidades mais lentas (20 km/h) enquanto que no declive, velocidades maiores (40 e 60 km/h) implicam em um maior acréscimo das tensões horizontais devido ao aumento da declividade.

Já as tensões cisalhantes nos modelos dinâmicos se mostraram muito mais críticas no topo da camada de revestimento, se comparadas ao fundo, onde as tensões S_{xy} foram muito inferiores àquelas identificadas no modelo estático. Este comportamento, no fundo do revestimento, se mantém quando da inserção da declividade da pista. Já no topo, a amplitude dessas tensões, por sua vez, mostrou-se numericamente muito próxima à apresentada pelas tensões horizontais S_x , avaliadas ao longo do eixo x , no sentido de deslocamento do pneu.

- Aceleração e frenagem do pneu

Ao se inserir a aceleração e a frenagem, em trechos planos, o formato da bacia defletométrica tende a se aproximar dos apresentados pelos modelos estáticos, o que teoricamente era esperado uma vez que ao se frear ou partir do repouso, situações quase estáticas são vivenciadas. Nesta etapa, deflexões muito próximas às apresentadas pelos modelos estáticos foram encontradas.

No topo do subleito por sua vez, quando da inserção do processo de frenagem em trechos com $i = 0\%$, um alívio das tensões foi observado, retornando tensões inferiores àquelas apresentadas pelo modelo estático, enquanto que na aceleração houve uma ampliação dos resultados para valores muito superiores aos apresentados pelos modelos com velocidade constante ou nula.

Em situação de aclave e declive, as maiores tensões S_x são observadas quando o pneu parte do repouso, ou seja, acelera. Já na frenagem, no entanto, apesar da situação ser menos crítica que na aceleração, as tensões observadas são

maiores que aquelas apresentadas pelos modelos com velocidade constante e nula.

Esse comportamento também é observado nas tensões cisalhantes impondo-lhes uma ampliação dos valores (em módulo). No entanto, esse aumento é mais acentuado no topo do revestimento. Já no fundo desta camada, a ampliação dos valores de tensão é pouco acentuada, porém, ainda menores que os valores apresentados pelo modelo estático. Assim, como visto no Item 5.2.2. esta intensificação das tensões horizontais em trechos com declive ou aclive e variação constante de velocidade, podem levar ao desenvolvimento de defeitos, como os escorregamentos e corrugações (ou ondulação), em pavimentos flexíveis, comumente observados em regiões próximas à interseções e trechos com declividade.

E por fim, a principal dificuldade encontrada na elaboração desta pesquisa está na limitação do poder computacional disponível para a realização das simulações, restringindo o tamanho dos modelos numéricos desenvolvidos, os quais foram elaborados com o maior número de planos de simetria possível, impedindo sua aproximação às situações mais reais vistas em serviço, mas que comprovadamente já apresentam bons resultados, com as devidas condições de contorno expostas.

6.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Em vista das dificuldades encontradas na pesquisa, resultando em um modelo com certas limitações, as recomendações para trabalhos futuros são listados a seguir:

- Inclusão da fadiga, que, para uma resposta mais generalizada e abrangente, considere as diferentes leis de comportamento dos materiais em questão, bem como o comportamento termoviscoplastico da camada asfáltica quando do aumento ou variação da temperatura, especialmente nos trechos em aclive, declive, frenagem e aceleração.
- Minimização do número de planos de simetria ou elaboração de modelos completos que simulem o eixo traseiro da carga padrão com duas rodas;
- Avaliação da influência da rugosidade para a aceleração e frenagem em trechos com declividade;

- Generalização do estudo a partir da elaboração de modelo com um maior número de seções ou estruturas de pavimento com diferentes espessuras e tipos de materiais das camadas;
- Elaboração de estudos de campo de modo a comparar os resultados obtidos numericamente;
- Implementação de algoritmos de solução para soluções dinâmicas explícitas e implícitas.

REFERÊNCIAS

AGOSTINACCHIO, M.; CIAMPA, D.; OLITA, S. The vibrations induced by surface irregularities in road pavements - a Matlab® approach. *European Transport Research Review*, v. 6, n. 3, p. 267–275, 2014.

AHLVIN, R.G. Origin of Developments for Structural Design of Pavements. Technical Report GL-91-26. Geotechnical Laboratory, Department of the Army, Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, 1991.

ALMEIDA, L. L. de. *Acidentes de trânsito: novos métodos de cálculo de velocidade*, Editora Campinas, 2014.

ANSYS. ANSYS Mechanical APDL Theory Reference. ANSYS Inc, 2015.

ANSYS. Ls-dyna Theory Reference. ANSYS Inc, 2005.

ARAGÃO, R. F. *Acidentes de Trânsito Análise da Prova Pericial*. 6a Edição ed. Campinas, São Paulo, 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E965-96 (2001): Standard Test Method for Measuring Surface Macro texture Depth Using a Volumetric Technique, ASTM International, West Conshohocken, PA, 1996.

_____. ASTM E 1960-98: Standard Practice for calculating International Friction Index of a Pavement Surface, ASTM International, West Conshohocken, PA, 1998.

_____. ASTM E303-93 (1998): Standard Method for Measuring Frictional Properties Using The British Pendulum Tester, ASTM International, West Conshohocken, PA, 1998.

AASHTO, *Guide for design of pavement structures*. American Association of State highways and Transportation Officials, 1-640, Washington, DC, 1993.

AZEVEDO, A. F. M. *Método dos elementos finitos*. 1a Edição ed. Portugal: 2003.

BARBOSA, R. E. *Efeito das cargas dinâmicas dos veículos rodoviários no desempenho dos pavimentos e pontes*. 1999. Dissertação (Mestrado em Transportes) - Escola de Engenharia de São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 1999. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18137/tde-26012018-191849/>>. Acesso em: 2017-07-06.

BARBOSA, F.F. *Posto Integrado Automatizado de Fiscalização*, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2016. Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br/rodovias/operacoes-rodoviaras/pesagem/piaf/>>. Acesso em: 12 nov. 2018.

BATHE K.J., *Finite Element Procedures*, Prentice Hall, 1996.

BEER, M. de, Measurement of tyre/pavement interface stresses under moving wheel loads, Heavy Vehicle Systems, Special Issue, Vol. 3, Nos. 1-4, 1996

BEER, M. de, FISHER C. and JOOSTE F. J. Determination of pneumatic tyre/pavement interface contact stresses under moving loads and some effects on pavements with thin asphalt surfacing layers: ISBN 8790145356. Seattle, Washington, USA.: 1997, pp 179-227.

BENEDETTI, L.Z; FERREIRA, F.F.; ROSSO, L.T.; MARTINS,I.S.; FONTANA, T. B. Pavimento Rígido x Pavimento Flexível. Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão, v. 5, n. 2, 2013.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. 3a reimpressão ed. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2010.

BRASIL, LEI Nº 9.503, DE 23 DE SETEMBRO DE 1997, Institui o Código de Trânsito Brasileiro, Brasília, DF, dez 2017. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9503.htm> Acesso em: 05 fev. 2019.

CANDIOTO, A.R. JA037 – Expresso Azul. 2017. Disponível em: <<https://alanfellype.wordpress.com/2017/12/19/ja037-expresso-azul/>>. Acesso: 09/05/2019.

CHATTI,K; KIM H.; YUN, K; MAHONEY, J; MONISMITH, C. Field Investigation into Effects of Vehicle Speed and Tire Pressure on Asphalt Concrete Pavement Strains. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, v. 1539, p. 66–71, 1996.

CHEN, B.; WANG, X. C.; MU, K. Mechanical Response of Longitudinal Slope Segments Based on Burgers Model. Advanced Materials Research, v. 243–249, p. 4172–4177, 2011.

CHEN, J; LIN, C; STEIN, E; AND HOTHAN, J. Development of a Mechanistic-Empirical Model to Characterize Rutting in Flexible Pavements. Journal of Transportation Engineering, v. 130, n. 4, p. 519–525, 2004.

CNT (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES). Conheça os 13 principais defeitos do pavimento das rodovias, 2018. Disponível em: <<http://www.cnt.org.br/imprensa/noticia/conheca-principais-defeitos-pavimento>>. Acesso em: 25 fev. 2018.

_____. Anuário CNT do Transporte 2017: Estatísticas Consolidadas, 2017. Disponível em: <anuariodotransporte.cnt.org.br>. Acesso em: 25 fev. 2018.

COLLOP, A. C.; CEBON, D.; HARDY, M. S. A. Viscoelastic Approach to Rutting in Flexible Pavements. Journal of Transportation Engineering, v. 121, n. 1, p. 82–93, 1995.

COURANT, R.; FRIEDRICHS, K.; LEWY, H. "On the partial difference equations of mathematical physics", IBM Journal, March 1967, pp. 215-234.

DINEGDAE, Y. H.; BIRGISSON, B. Effect of Heavy Traffic Loading on Predicted Pavement Fatigue Life. 8th RILEM International Conference on Mechanisms of Cracking and Debonding in Pavements, v. 13, p. 389–395, 2016.

DNIT 005/2003 - TER. Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos Terminologia, Rio de Janeiro, 2003.

DNIT. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT): Publicação IPR - 720. Manual de restauração de pavimentos asfálticos. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 3 ed. Rio de Janeiro, 2006

_____. Publicação IPR – 740. Manual de projeto geométrico de travessias urbanas. Diretoria Executiva. Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro, 2010.

_____. Quadro de fabricantes de veículos. Diretoria de Infra-Estrutura Rodoviária. Coordenação Geral de Operações Rodoviárias, 2012.

EHSANI, M.; RAHMAN, K. M.; TOLIYAT, H.A. Propulsion system design of electric and hybrid vehicles. IEE Transactions on Industrial Electronics, [S.l.], v.44, n.1, feb. 1997.

EISENMANN, J. HILMER, A. Influence of wheel load and inflation pressure on the rutting effect at asphalt pavemente - experiments and theoretical investigations. Sixth International Conference, Structural Design of Asphalt Pavements, p. 13–17, 1987.

EL PAÍS. Curitiba, 'cidade modelo', busca novas referências: "Ao menos não somos São Paulo". brasil.elpais.com, 2016. Disponível em: <http://brasil.elpais.com/brasil/2016/06/30/politica/1467311191_496018.html>. Acesso em: 5 maio 2017.

FERNANDES JUNIOR, LEOMAR, J.; SÓRIA, ALBA, M. H. Investigação dos efeitos das solicitações do tráfego sobre o desempenho de pavimentos. 1995. Universidade de São Paulo, São Carlos, 1995. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18137/tde-09042018-102257/pt-br.php>>. Acesso em: 2017-07-06.

FRANCO, F. A. C. de P. Método de dimensionamento mecânico - empírico de pavimentos asfálticos – SISPAV. 2007. Dissertação (Doutorado em Engenharia). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: <www.coc.ufrj.br/pt/.../2007-2/887-filipe-augusto-cinque-de-proenca-franco-doutordo>. Acesso em: 2017-07-06.

HAJJ, E.; THUSHANTHAN, P.; SEBAALY, P.; SIDDHARTHAN, R. Influence of Tire-Pavement Stress Distribution, Shape, and Braking on Performance Predictions for

Asphalt Pavement. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2306, p. 73–85, 2012.

HAMMOUM, F.; CHABOT, A.; ST-LAURENT, D.; CHOLLET, H.; VULTURESCU, B.. Effects of accelerating and decelerating tramway loads on bituminous pavement. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, v. 43, n. 9, p. 1257–1269, 2009.

HELWANY, S.; DYER, J.; LEIDY, J. Finite-element analyses of flexible pavements. *Journal of transportation engineering*, v. 3, n. October, p. 491–499, 1998.

HUANG, Y. H. *Pavement Analysis and Design*. 2nd. ed. PEARSON: Prentice Hall, 1993, 775p.

KHAVASSEFAT, P.; JELAGIN, D.; BIRGISSON, B. Dynamic response of flexible pavements at vehicle–road interaction. *Road Materials and Pavement Design*, v. 16, n. 2, p. 256–276, 2014.

KIM, O. K.; BELL, C. A.; WILSON, J. E. Effect of increased truck tire pressure on asphalt concrete pavement. *Journal of Transportation Engineering, ASCE*, v. 115, n. 4, p. 329–350, 1989.

KOTSOVOS, M. D.; *Finite-Element Modelling of Structural Concrete: Short-Term Static and Dynamic Loading Conditions*, CRC Press, Taylor & Francis Group, 1st Edition, International Standard Book Number-13: 978-1-4987-1231-6 (eBook - PDF) 2015.

KUO, C.; HALL, T.; DARTER, M. I. Three-Dimensional Finite Element Model for Analysis of Concrete Pavement Support. p. 119–127, 1995.

LEE, A.; NIKRAZ, H. Effect of Horizontal Shear Load on Pavement Performance. 2nd International Conference on Geological and Civil Engineering, v. 51, n. 26, p. 139–142, 2015.

LI, C.; LI, L. Criteria for controlling rutting of asphalt concrete materials in sloped pavement. *Construction and Building Materials*, v. 35, p. 330–339, 2012.

LI, Y. C.; XIN, Y. Y. The Dynamic Response of Large Longitudinal Slope of Asphalt Road Pavement under Heavy Impulsive Load. *Advanced Materials Research*, v. 1065–1069, p. 806–813, 2014.

LIN, F.; JIANGBO, L.; HAIFENG, W.; Chengbin, W.; Shear stress of asphalt pavement in steep slope sections. *International Conference on Transportation Engineering 2009 (ICTE 2009)*, v. 2009, n. Icte, p. 869–874, 2009.

LIU, C. Pavement Response to Moving Loads. *Road Materials and Pavement Design*, v. 2, n. 3, p. 263–282, 2001.

LUSHINGA, N; XIN, J. Effect of Vertical and Horizontal Load on Pavement Interface Shear Stress. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, v. 3, n. 10, p. 1295–1299, 2015.

MACHADO, D. M. C. Avaliação de normas de identificação de defeitos para fins de gerência de pavimentos flexíveis. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2013. Disponível em: <www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18143/tde-07112013-092252/.../Denise.pdf>. Acesso em: 2017-05-06.

MAHONY, M.J.O; A.UEBERSCHAER; P.M.O.OWENDE; S.M.WARD. Bearing capacity of forest access roads built on peat soils. *Journal of Terramechanics*, v. 37, p. 127–138, 2000.

MATTOS. C. E.de A. Custo Médio Gerencial. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2015. Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br/custos-e-pagamentos/custo-medio-gerencial>>. Acesso em: 16 maio 2017.

MATTOS, J. R. G. Avaliação da aderência pneu-pavimento e tendências de desempenho para a rodovia BR-290/RS, 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/30215/000778679.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 2017/05/06.

MEDINA J. DE; MOTTA, L. M. G. DA. Mecânica dos pavimentos. 3a Edição ed. Rio de Janeiro: 2015.

MEYERS, M. A; “Dynamic behaviour of Materials”, John Wiley & Sons, ISBN 0-471-58262-X, 1994.

MEDINA, J. DE. Mecânica dos Pavimentos. Editora da ed. Rio de Janeiro: 1997.

MELLO, L. G. R. A teoria do dano em meio contínuo no estudo da fadiga em misturas asfálticas. Tese (doutorado) - Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2008. Disponível em: <<http://repositorio.unb.br/handle/10482/18543>>. Acesso em: 2017/05/06.

MEPDG. Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide, A manual of Practice, American Association of State Highway and Transportation Officials, 2008. 218 p.

MULUNGYE, R. M.; OWENDE, P. M. O.; MELLON, K. Finite element modelling of flexible pavements on soft soil subgrades. *Materials and Design*, v. 28, n. 3, p. 739–756, 2007.

MYERS, L ; ROQUE, R ; RUTH, B ; DRAKOS, C. Measurement of Contact Stresses for Different Truck Tire Types To Evaluate Their Influence on Near-Surface Cracking and Rutting. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 1655, n. 99, p. 175–184, 1999.

NONDE, L. Effect of Vertical and Horizontal Load on Pavement Interface Shear Stress. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, v. 3, n. 10, p. 1295–1299, 2014.

PERRET, J. Déformations des couches bitumineuses au passage d'une charge de trafic. Pour L'obtention du grade de docteur és sciences. Institut des infrastructures, des ressources et de l'environnement. École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2003.

PMSP-IP-08/2004. ANÁLISE MECANICISTA À FADIGA DE ESTRUTURAS DE PAVIMENTO. Especificação de serviço, São Paulo, 2004.

PMC-ES 021/99. PAVIMENTO FLEXÍVEL – SUB-BASE. Especificação de serviço, Curitiba, 1999.

RESNICK, R.; HALLIDAY, D.; KARNEK, K. Física 1. 5a ed. ed. Rio de Janeiro: 2003.

RODRIGUES FILHO, Oswaldo Sansone. Características de aderência de revestimentos asfálticos aeroportuários. Estudo de caso do aeroporto internacional de São Paulo/Congonhas. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. doi:10.11606/D.3.2006.tde-01122006-142419. Acesso em: 2017-07-06.

SAAD, B; MITRI, H.; AND POOROOSHASB, H. Three-Dimensional Dynamic Analysis of Flexible Conventional Pavement Foundation. Journal of Transportation Engineering, v. 131, n. 6, p. 460–469, 2005.

SALEH, M.; MAMLOUK, M.; OWUSU-ANTWI, E. Mechanistic roughness model based on vehicle-pavement interaction. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, n. 1699, p. 114–120, 2000.

SCHMIDT, E.P.; MAZZILLI, C. E. N. A Influência da flexibilidade do tabuleiro na resposta dinâmica de pontes rodoviárias curvas, Rev. IBRACON Estrut. Mater. vol.10 no.3 São Paulo May/June, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/s1983-41952017000300009>>. Acesso em: 2017-07-06.

SILVA, J. G. S da. Dynamical performance of highway bridge decks with irregular pavement surface. Computers and Structures, v. 82, n. 11–12, p. 871–881, 2004.

SEBAALY, P. E.; TABATABAEE, N. Effect of tire pressure and type on response of flexible pavement. Transportation Research Record, v. 1227, p. 115–127, 1989.

SENÇO, W. Manual de Técnicas de Pavimentação – Volume 2. de. São Paulo : Pini, 2001.

SHI, X. M.; CAI, C. S. Simulation of Dynamic Effects of Vehicles on Pavement Using a 3D Interaction Model. JOURNAL OF TRANSPORTATION ENGINEERING, n. October, p. 736–745, 2009.

SORIANO, H. L. Elementos Finitos: formulação e aplicação na estática e dinâmica das estruturas. Rio de Janeiro: 2009.

SOUZA, M. L. Método de projeto de pavimentos flexíveis DNER. - 1966. 25p

SU, K. et al. Analysis of shear stress in asphalt pavements under actual measured tire-pavement contact pressure. 6th ICPT, n. July, p. 11–18, 2008.

SUMAN M.L.J. Contacts in LS-Dyna, Ramaiah School of Advanced Studies, Bengaluru, PEMP AME2510.[20--] Disponível em: http://164.100.133.129:81/eCONTENT/Uploads/10_Session19and20_LS-DYNA3.pdf Acesso em: 11/05/2019.

TEIXEIRA, N. B. K. Estudo de alternativas e recuperação de pavimentos em vias de transporte coletivo na cidade de Curitiba, 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). Setor de Tecnologia. Universidade Federal do Paraná, 2015.

TIELKING, B. J. T.; ROBERTS, F. L.; ASCE, A. M. Tire contact pressure and its effect on pavement strain. *Journal of Transportation Engineering*, v. 113, n. 1, p. 56–71, 1987.

URBS (Urbanização de Curitiba), MANUAL DE ESPECIFICAÇÕES DA FROTA, RIT (Rede Integrada de Transportes), Revisão 20 de 02/03/2018, Curitiba, 2018.

_____. Composição da Frota. Urbs. Curitiba, 2017a. Disponível em: <https://www.urbs.curitiba.pr.gov.br/transporte/rede-integrada-de-transporte/42>. Acesso em: 06 de jul. 2017.

_____. Características da RIT, Urbs. Curitiba, 2017b. Disponível em: <https://www.urbs.curitiba.pr.gov.br/transporte/rede-integrada-de-transporte/18>. Acesso em: 10 maio. 2017.

WILKINS, M. L., BLUM, R. E., CRONSHAGEN, E. & GRANTHAM, P.; “A Method for Computer Simulation of Problems in Solid Mechanics and Gas Dynamics in Three Dimensions and Time.” Lawrence Livermore Laboratory Report UCRL-51574, 1974

YOO, P.; AL-QADI, I. L. Effect of Transient Dynamic Loading on Flexible Pavements. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 1990, p. 129–140, 2007.

ZAGHLOUL, S. M.; WHITE., T. Use of a Three-Dimensional, Dynamic Finite Element Program for Analysis of Flexible Pavement. *Journal of Transportation Engineering*, n. x, p. 60–69, 1993.

ZHANG, N. M.; WANG, X. D. Deformation Analysis of Pavement Structures under Coexistence of Vertical and Horizontal Loads. *Applied Mechanics and Materials*, v. 44–47, p. 3053–3059, 2010.

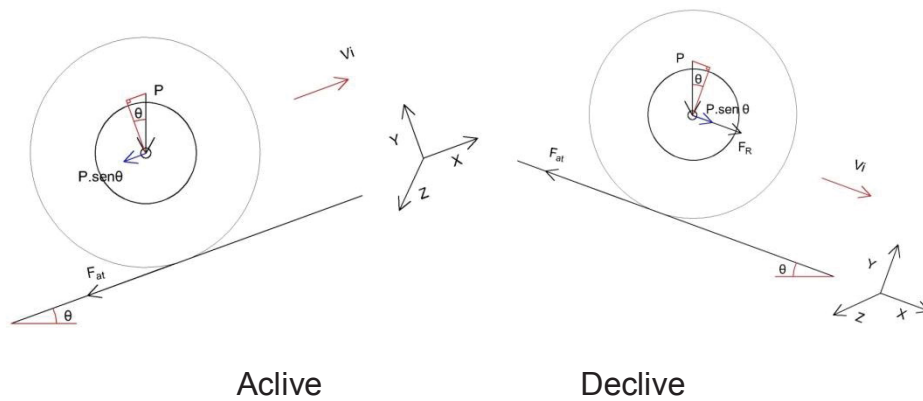
ZHENG, M. et al. Simulation of Permanent Deformation in High-Modulus Asphalt Pavement with Sloped and Horizontally Curved Alignment. *Applied Sciences*, v. 7, n. 4, p. 331, 2017.

ZHI, S.; HUI, L. X.; GUN, W. W.; BO, T. Evaluation of fatigue crack behavior in asphalt concrete pavements with different polymer modifiers. *Construction and Building Materials*, v. 27, n. 1, p. 117–125, 2012.

ANEXO 1 – DISTÂNCIA DE FRENAGEM (df) E ACELERAÇÃO DO PNEU EM FUNÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO (μ), VELOCIDADE INICIAL (v_i) E DECLIVIDADE DA PISTA (i).

Active da pista		i= 0%		i=6%		i=8%		i=11%	
Atrito (μ estático)	v_i (km/h)	df (m)	a (m/s ²)	df (m)	a (m/s ²)	df (m)	a (m/s ²)	df (m)	a (m/s ²)
0,60	20.00	2.62	-5.89	2.39	-6.46	2.32	-6.65	2.23	-6.92
	40.00	10.49		9.55		9.28		8.92	
	60.00	23.60		21.49		20.89		20.06	
0,68	20.00	2.31	-6.67	2.13	-7.25	2.08	-7.43	2.00	-7.70
	40.00	9.25		8.52		8.31		8.01	
	60.00	20.82		19.17		18.69		18.03	
0,87	20.00	1.81	-8.53	1.69	-9.11	1.66	-9.29	1.61	-9.56
	40.00	7.23		6.78		6.64		6.46	
	60.00	16.27		15.25		14.95		14.53	

Declive da pista		i= 0%		i=6%		i=8%		i=11%	
Atrito (μ estático)	v_i (km/h)	df (m)	a (m/s ²)	df (m)	a (m/s ²)	df (m)	a (m/s ²)	df (m)	a (m/s ²)
0,60	20.00	2.62	-5.89	2.92	-5.29	3.03	-5.08	3.23	-4.78
	40.00	10.49		11.67		12.14		12.92	
	60.00	23.60		26.27		27.31		29.07	
0,68	20.00	2.31	-6.67	2.54	-6.07	2.63	-5.87	2.78	-5.56
	40.00	9.25		10.17		10.52		11.11	
	60.00	20.82		22.88		23.67		24.99	
0,87	20.00	1.81	-8.53	1.95	-7.93	2.00	-7.73	2.08	-7.41
	40.00	7.23		7.78		7.99		8.33	
	60.00	16.27		17.51		17.98		18.74	



ANEXO 2 – DISTÂNCIA NECESSÁRIA (d_a) PARA ATINGIR A VELOCIDADE FINAL (v_f) PARA UMA POTÊNCIA DO MOTOR DO VEÍCULO DE 210 CV, DECLIVIDADE DA PISTA (i) E RUGOSIDADE MÉDIA ($\mu=0,68$)

Active (%)	v_f (km/h)	F (N)	t (s)	a (m/s ²)	d_a (m)
0	20.00	27720	0.51	10.877	1.42
	40.00	13860	2.04	5.439	11.35
	60.00	9240	4.60	3.626	38.31
6	20.00	26222.69	0.54	10.29	2.03
	40.00	12362.69	2.29	4.85	17.23
	60.00	7742.69	5.49	3.04	61.89
8	20.00	25726.37	0.55	10.10	2.02
	40.00	11866.37	2.39	4.66	17.50
	60.00	7246.37	5.86	2.84	64.47
11	20.00	24986.49	0.57	9.80	2.00
	40.00	11126.49	2.54	4.37	18.00
	60.00	6506.49	6.53	2.55	69.27

Declive (%)	v_f (km/h)	F (N)	t (s)	a (m/s ²)	d_a (m)
0.0	20.00	27720	0.51	10.877	1.42
	40.00	13860	2.04	5.439	11.35
	60.00	9240	4.60	3.626	38.31
6	20.00	29217.31	0.48	11.46	2.17
	40.00	15357.31	1.84	6.03	16.55
	60.00	10737.31	3.96	4.21	53.26
8	20.00	29713.63	0.48	11.66	2.21
	40.00	15853.63	1.79	6.22	16.59
	60.00	11233.63	3.78	4.41	52.68
11	20.00	30453.51	0.46	11.95	2.28
	40.00	16593.51	1.71	6.51	16.73
	60.00	11973.51	3.55	4.70	52.17

