



COPPE/UFRJ

GERAÇÃO DE DADOS PARA MODELO DINÂMICO DE CARGAS MÓVEIS
EM PONTES

Raphael Faria de Mendonça

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadores: Michèle Schubert Pfeil

Ronaldo Carvalho Battista

Rio de Janeiro

Março de 2009

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

GERAÇÃO DE DADOS PARA MODELO DINÂMICO DE CARGAS MÓVEIS
EM PONTES

Raphael Faria de Mendonça

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Aprovada por:

Prof^ª. Michèle Schubert Pfeil, D.Sc.

Prof. Ronaldo Carvalho Battista, Ph.D.

Prof^ª. Eliane Maria Lopes Carvalho, D.Sc.

Prof. Luís Volnei Sudati Sagrilo, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO DE 2009

Mendonça, Raphael Faria de

Geração de dados para modelo dinâmico de cargas móveis em pontes/Raphael Faria de Mendonça. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2009.

XVI, 125 p.: il.; 29, 7cm.

Orientadores: Michèle Schubert Pfeil

Ronaldo Carvalho Battista

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Civil, 2009.

Referências Bibliográficas: p. 92 – 94.

1. Pontes. 2. Cargas Móveis. 3. Análise Dinâmica. 4. Tráfego Rodoviário. I. Pfeil, Michèle Schubert *et al.*. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

*Esta dissertação é dedicada ao
meu pai Sérgio Ramos de
Mendonça (in memoriam) por
me ensinar tudo que sei como
engenheiro e como homem.*

Agradecimentos

Primeiramente a Deus pela saúde e pela oportunidade de realizar este trabalho.

À minha esposa Letícia, pelo carinho, amor, paciência, dedicação e cumplicidade durante este momento tão importante da minha vida. E que sem o seu apoio eu não teria conseguido finalizar este trabalho.

À toda minha família, por me educar e proporcionar os estudos que tive.

Aos meus orientadores, Michèle Schubert Pfeil e Ronaldo Carvalho Battista, por apostarem no meu trabalho, pela dedicação, amizade, orientação e paciência.

Aos amigos, Marco, Maurício e Elvis que ingressaram junto comigo neste desafio e me ajudaram a chegar até aqui.

Aos colegas da COPPE/UFRJ, Adcleides e Carlos Rossigali pela ajuda nos momentos críticos.

À todos que de alguma forma contribuíram, muito obrigado.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

GERAÇÃO DE DADOS PARA MODELO DINÂMICO DE CARGAS MÓVEIS EM PONTES

Raphael Faria de Mendonça

Março/2009

Orientadores: Michèle Schubert Pfeil

Ronaldo Carvalho Battista

Programa: Engenharia Civil

De acordo com as normas brasileiras de projeto, os esforços solicitantes devidos ao tráfego em pontes rodoviárias podem ser obtidos por meio de modelo estrutural submetido a carregamentos estáticos extraídos das antigas normas alemães e multiplicados pelo coeficiente de impacto, para levar em conta os efeitos dinâmicos, oriundos da interação veículo-estrutura. Este procedimento não representa a ação do tráfego real de veículos nas rodovias brasileiras e pode conduzir a resultados por vezes conservadores e por vezes, ainda pior, não conservadores com respeito à segurança dependendo da concepção da estrutura e vãos considerados. Com vistas ao desenvolvimento de novos modelos de cargas móveis calibrados para melhor simular a ação do tráfego real, este trabalho apresenta um programa computacional que permite o cálculo automático de histogramas de frequência de esforços críticos em pontes típicas da malha rodoviária brasileira. Esses esforços já incluem os efeitos dinâmicos devidos à passagem de veículos pesados, já que são calculados por meio de análise dinâmica no domínio do tempo da interação veículo-pavimento-estrutura. O programa está dirigido a pontes com superestrutura convencional em grelha com vãos curtos, entre 10 e 40m, sob ação da passagem de veículos isolados. Consideram-se a rugosidade do pavimento e a presença de irregularidades na pista, tal como os ressaltos comumente encontrados nas cabeceiras destas pontes.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

DATA GENERATION FOR BRIDGE LIVE LOAD DYNAMIC MODELS

Raphael Faria de Mendonça

March/2009

Advisors: Michèle Schubert Pfeil

Ronaldo Carvalho Battista

Department: Civil Engineering

According to the Brazilian bridge design codes, the internal forces may be obtained by multiplying the static results for the bridge under an arbitrary live load taken from old German codes, to the impact coefficient in order to account for the effects of the dynamic interaction between vehicles and structure. This procedure does not represent the action of the real traffic on Brazilian highways and may lead to conservative or, even worse, non-conservative results depending on the structural systems and the span lengths. Aiming to develop new live load models calibrated to better simulate the real traffic in Brazil, this work presents a software that allows for the automatic calculation of histograms of internal forces in bridges typical of the Brazilian highways. These internal forces are obtained by means of a time domain analysis of the vehicle - pavement - structure dynamic interaction. The software is addressed to bridges having a conventional grid-like superstructure with small span lengths, ranging from 10 to 40m, subjected to the passage of isolated vehicles. The pavement roughness is taken into account as well as the presence of local irregularities usually found at the bridge ends, simulated as a 20mm thick plank. The user - software interaction is made through windows of pre and post graphic processing to allow for both input and output data visualization and also for checking intermediate results such as the numeric models generated by the software.

Sumário

Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xvi
1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivo e Metodologia	5
1.3 Organização da dissertação	6
2 Modelagem da Interação Veículo-Pavimento-Estrutura	7
2.1 Modelos dos Veículos	7
2.1.1 Monolítico - 2C	7
2.1.2 Monolítico - 3C	11
2.2 Equações de Movimento da Estrutura	16
2.3 Modelagem da interação dinâmica veículo-pavimento-estrutura	18
2.4 Modelo da Interação Dinâmica	20
2.4.1 Modelo com 4 GL's para veículo 2C	20
2.4.2 Modelo com 5 GL's para veículo 3C	24
3 Implementação Computacional	29
3.1 Comunicação entre linguagens	29
3.2 Visão geral do software	30
3.3 Pré-processamento	30
3.3.1 Interface	30
3.3.2 Parâmetros de geometria e dos materiais	32
3.3.3 Processo de discretização do modelo	34

3.3.4	Propriedades das seções transversais	35
3.3.5	Dados dos veículos	36
3.3.6	Dados sobre o pavimento	36
3.4	Processador	37
3.4.1	Análise de Vibrações Livres 3D	38
3.4.2	Coordenadas dos nós	39
3.4.3	Tipos de Esquemas Estruturais	39
3.4.4	Matrizes de Rigidez e Massa	40
3.4.5	Autovalores e Autovetores	42
3.4.6	Integração numérica no tempo	43
3.4.7	Leitura e Normalização dos autovetores	46
3.4.8	Massas Modais e Posição do veículo no tempo	48
3.4.9	O Método de Runge-Kutta de 4ª Ordem	49
3.4.10	Dados de Entrada para Integração Numérica	50
3.5	Pós-Processamento e Interpretação dos Resultados	51
3.5.1	Geometria 3D	53
3.5.2	Modelo Numérico	53
3.5.3	Visualização dos Modos de Vibração da Estrutura	54
3.5.4	Superfície de Deslocamentos Dinâmicos	56
3.5.5	Deformada da Estrutura no Tempo	57
3.5.6	Deslocamento e Esforços Dinâmicos no Tempo	60
3.5.7	Gerenciamento dos arquivos de análise e geração de histogramas	60
4	Histogramas de Esforços Críticos	63
4.1	Descrição dos casos analisados	63
4.1.1	Distribuição de Pesos por eixo	63
4.1.2	Perfil de Rugosidades do pavimento e obstáculos	65
4.1.3	Seções de esforços críticos	67
4.1.4	Histograma de frequência conjunta de velocidade e peso	68
4.1.5	Validações do programa IVPE-v.2	71
4.1.6	Histogramas de Esforços	77

5	Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros	88
5.1	Conclusões	88
5.2	Sugestões	90
	Referências Bibliográficas	92
A	- Normas para Cargas Móveis de Pontes	95
A.1	Evolução da Norma Brasileira	95
A.1.1	A NB-6/1943	95
A.1.2	A NB-6/1960	98
A.1.3	A NBR-7188/1982	101
A.2	A Norma Européia - EUROCÓDIGO	104
A.3	Norma Norte-Americana - AASHTO	108
B	MANUAL PRÁTICO DE UTILIZAÇÃO DO PROGRAMA IVPE-	
v.2		114
B.1	Introdução	114
B.2	Exemplo de Utilização	114

Lista de Figuras

1.1	Veículos mais pesados da malha rodoviária brasileira.	4
2.1	Veículo com 4GL ($u_v, \theta_v, u_{p1}, u_{p2}$) sobre superfície rígida lisa.	8
2.2	Veículo de classe 2C	8
2.3	DCL e DFR da massa suspensa e dos eixos	10
2.4	Veículo de classe 3C	11
2.5	Veículo com 5GL ($u_v, \theta_v, u_{p1}, u_{p2}, u_{p3}$) sobre superfície rígida lisa.	12
2.6	DCL e DFR da massa suspensa e do eixo 1	14
2.7	DCL e DFR da massa do eixo 2 e 3	15
2.8	Modelo 3D e modelo unifilar utilizados na análise.	18
2.9	Eixo do veículo sobre superfície flexível irregular.	19
2.10	DCL da estrutura.	20
2.11	Diagrama de corpo livre (DCL) da estrutura.	21
3.1	Fluxograma geral do IVPE-v.2	31
3.2	Janela de abertura do software IVPE-v.2	31
3.3	Fluxograma do pré-processador	32
3.4	Distância de aproximação considerada.	32
3.5	Geometria das longarinas	33
3.6	Geometria das transversinas	33
3.7	Espessura da Laje do Tabuleiro	34
3.8	Geometria do Guarda-Rodas	34
3.9	Menu de discretização do Modelo	34
3.10	Seção Transversal das longarinas	35
3.11	Largura de mesa colaborante NBR-6118 (2003)	35

3.12	Distribuição de frequências para os veículos mais pesados. (ROSSIGALI, 2006)	36
3.13	Processo de suavização do perfil de irregularidade longitudinal. MELO (2007)	37
3.14	Fluxograma da análise de vibrações livres 3D	39
3.15	Orientação dos eixos coordenados no espaço	39
3.16	Esquemas estruturais	40
3.17	Elemento de pórtico espacial.	40
3.18	Matriz de rigidez do elemento de pórtico espacial	41
3.19	Matriz de massa do elemento de pórtico espacial	41
3.20	Fluxograma da integração numérica no tempo	45
3.21	Representação da estrutura com elementos de pórtico espacial.	46
3.22	Primeiro modo de flexão	47
3.23	Primeiro modo de torção	47
3.24	Atualização dos graus de liberdade.(a) posição do eixo antes do ponto M, (b) posição do eixo após o ponto M.	48
3.25	Fluxograma do pós-processamento	52
3.26	Modelo 3D de ponte biapoiada com 10m de vão	53
3.27	Modelo numérico 3D	54
3.28	Modelo 3D do 1º modo de flexão	55
3.29	Modelo 3D do 1º modo de torção	55
3.30	Superfície de deslocamentos-espaço-tempo	56
3.31	Vista superior da Superfície de deslocamentos-espaço-tempo	57
3.32	Animação da deformada da estrutura no tempo	59
3.33	Deslocamento da estrutura para várias velocidades do veículo	60
3.34	Gerenciamento dos dados	61
3.35	Frequência de ocorrência de velocidades e pesos do veículo 3C	62
4.1	Tipos de ressaltos: a - Recalque do pavimento sobre a laje de acesso; b - Giro da Laje de apoio	64
4.2	Tabuleiro de modelo atual do DNER - unidades em cm - (PFEIL, 1985)	64
4.3	Variação do peso percentual por eixo nos veículos de classe 3C, (ROSSIGALI, 2006)	65

4.4	Perfis de rugosidade do pavimento com e sem ressalto	67
4.5	Esquemas estruturais e linhas de influência consideradas, (ROSSIGALI, 2006)	68
4.6	Distribuição de velocidades: caminhões monolíticos e reboques. (ROSSIGALI, 2006)	71
4.7	Excentricidade o veículo em relação ao eixo da ponte	72
4.8	Distância entre os eixos o centro da massa suspensa do veículo	74
4.9	Comparação entre deslocamentos estáticos no meio do vão de 10m para a passagem do veículo 3C com peso total de 250kN e excentricidade de 4,65m em relação ao eixo da ponte, considerando um pavimento bom e sem ressalto.	74
4.10	Deslocamentos do IVPE-U no tempo - meio do vão	75
4.11	Deslocamentos do IVPE-v.2 no tempo - meio do vão	75
4.12	Esforço cortante no apoio no tempo	76
4.13	Momento fletor no meio do vão no tempo	76
4.14	Distribuição de frequências para o Momento fletor estático com distribuição de pesos por eixo constante.	78
4.15	Distribuição de frequências para o Momento fletor estático com distribuição de pesos por eixo segundo SIURB-SP.	79
4.16	Distribuição de frequências para o Momento fletor dinâmico - SIURB-SP.	80
4.17	Distribuição de frequências para o Momento fletor dinâmico para pavimento com ressalto - SIURB-SP.	80
4.18	Distribuição de frequências para o Momento fletor dinâmico com nova distribuição de faixas - SIURB-SP.	81
4.19	Distribuição de frequências para o Momento fletor dinâmico para pavimento com ressalto e com nova distribuição de faixas - SIURB-SP.	81
4.20	Densidade de frequência para comparação do momento fletor estático e dinâmico.	82
4.21	Ampliação da cauda do histograma de densidade de frequência da Figura 4.20 para comparação do momento fletor estático e dinâmico.	83

4.22	Densidade de frequência para comparação do momento fletor estático e dinâmico com ressalto.	83
4.23	Ampliação da cauda do histograma de densidade de frequência da Figura 4.22 para comparação do momento fletor estático e dinâmico com ressalto.	84
4.24	Distribuição de frequências Cortante estático - SIURB/SP.	84
4.25	Distribuição de frequências para o Cortante dinâmico com nova distribuição faixas - SIURB/SP.	85
4.26	Distribuição de frequências para o Cortante dinâmico com ressalto e com nova distribuição faixas - SIURB/SP.	85
4.27	Densidade de frequência para comparação do cortante estático e dinâmico - SIURB/SP.	86
4.28	Ampliação da cauda do histograma de densidade de frequência da Figura 4.27 para comparação do cortante estático e dinâmico - SIURB/SP.	86
4.29	Densidade de frequência para comparação do cortante estático e dinâmico com ressalto - SIURB/SP.	87
4.30	Ampliação da cauda do histograma de densidade de frequência da Figura 4.29 para comparação do cortante estático e dinâmico com ressalto - SIURB/SP.	87
A.1	Compressor e caminhão utilizado no trem-tipo da NB-6 - ABNT (1943)	97
A.2	Classes de Veículos-Tipo da NB-6 - ABNT (1960)	100
A.3	Veículo-Tipo e multidão em planta para NB-6 - ABNT (1960)	100
A.4	Classes de Veículos-Tipo da NBR-7188 - ABNT (1982)	103
A.5	Veículo-Tipo e multidão em planta para NBR-7188 - ABNT (1982) .	103
A.6	Tabuleiro carregado para o Modelo de carga 1	107
A.7	Modelo de carga 2	107
A.8	Faixas de carga - PCI (2003)	111
A.9	Caminhões Padronizados - PCI (2003)	112
B.1	Tela Principal do Programa.	115
B.2	Dados das longarinas.	116

B.3	Dados das transversinas.	116
B.4	Dados da laje do tabuleiro.	116
B.5	Balanços da laje do tabuleiro.	117
B.6	Número de modos a serem considerados na análise de vibrações livres.	117
B.7	Discretização do modelo numérico.	117
B.8	Tela Principal do menu Resultados.	118
B.9	Geometria 3D da estrutura a ser analisada.	118
B.10	Modelo numérico de grelha 3D.	119
B.11	Relatório da análise modal.	119
B.12	Primeiro modo de flexão vertical da estrutura.	120
B.13	Primeiro modo de torção da estrutura.	120
B.14	Tela Principal do Programa.	121
B.15	Dados adicionais do veículo.	121
B.16	Excentricidade do veículo em relação ao eixo da ponte.	122
B.17	Velocidade inicial do veículo.	122
B.18	Relatório da análise da interação veículo-pavimento-estrutura.	123
B.19	Deslocamentos no meio do vão no tempo.	124
B.20	Superfície de deslocamentos.	124
B.21	Vista superior da superfície de deslocamentos.	125

Lista de Tabelas

4.1	Classificação da superfície de rolamento	67
4.2	Frequência de ocorrência de pesos para os veículos mais pesados (ROSSIGALI, 2006)	69
4.3	Distribuição de probabilidades de ocorrência para o veículo 3C.	70
4.4	Dimensões dos elementos estruturais	72
4.5	Frequências Naturais e Modos de Vibração da Estrutura	73
4.6	Validação dos deslocamentos estáticos	75
4.7	Frequências Naturais e Modos de Vibração da Estrutura	78
A.1	Cargas de Multidão segundo a NB-6 - ABNT (1943)	96
A.2	Cargas para Compressores segundo a NB-6 - ABNT (1943)	97
A.3	Cargas para Caminhões segundo a NB-6 - ABNT (1943)	97
A.4	Cargas segundo a NB-6 - ABNT (1960)	99
A.5	Características do veículos-tipo - NB-6 - ABNT (1960)	99
A.6	Cargas segundo a NBR-7188 - ABNT (1982)	101
A.7	Características do veículos-tipo - NBR-7188 - ABNT (1982)	102
A.8	Número e largura das faixas de tráfego - Eurocódigo - CEN (2002)	104
A.9	Cargas para cada faixa - Modelo 1 - CEN (2002)	106
A.10	Fatores de redução AASHTO <i>STD Specifications</i> - PCI (2003)	109

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

O desenvolvimento do tráfego de veículos no Brasil tem se caracterizado pela multiplicidade de configurações dos veículos, bem como o acréscimo de seu peso bruto total e seu volume de tráfego. Além disso, a evolução dos métodos executivos, dos materiais empregados na construção e com o rápido avanço das ferramentas computacionais, os engenheiros passaram a dispor de maiores possibilidades no que diz respeito tanto ao projeto de novas estruturas quanto a avaliação de estruturas já existentes, criando um novo contexto no âmbito dos projetos estruturais.

Este, por sua vez, abrange também o universo das pontes rodoviárias, que ao longo dos anos foi evoluindo consideravelmente em termos de projeto e construção. Observa-se que estas obras vêm se tornando cada vez mais esbeltas e que muitas delas encontram-se no limite máximo de comprimento de vão livre para o tipo de sistema estrutural que possuem.

Para considerar o aumento do peso dos veículos, a norma brasileira de cargas móveis para pontes rodoviárias, NBR-7188 (1982), antiga NB-6 (1960), evoluiu no sentido de substituir os veículos-tipo de 12, 24 e 36 toneladas por classes mais pesadas (atualmente 12, 30 e 45 toneladas), aumentando também os valores das “cargas de multidão” (dadas em unidade de força por m^2) que acompanham o veículo-tipo, para simular os efeitos da passagem simultânea de veículos mais leves na ponte. A configuração do veículo, no entanto, foi convenientemente mantida para que não se perdesse o uso das tabelas utilizadas durante décadas na prática de projetos para determinação de esforços em lajes e vigas.

Tradicionalmente nas normas brasileiras, a consideração dos efeitos dinâmicos é feita através da multiplicação dos efeitos estáticos pelo coeficiente de impacto, função apenas do comprimento do vão. Em alguns casos este procedimento pode ser insuficiente para garantir o conforto e segurança dos usuários perante deformações excessivas ou até mesmo a estabilidade da estrutura.

A abordagem das mais modernas normas de projeto de pontes (Eurocódigo 1-2003, AASHTO 2005) consiste em se utilizar modelos de cargas móveis desenvolvidos e calibrados de forma a cobrir os efeitos do tráfego rodoviário, com certo grau de confiabilidade, e já incluindo os efeitos dinâmicos devidos à passagem dos veículos (PRAT, 2002).

Este trabalho está inserido em uma linha de pesquisa que pretende contribuir com a modernização das normas de cargas de veículos no Brasil. Tratando estas cargas como variáveis aleatórias no contexto do método semi-probabilístico de projeto, denominado no Brasil método dos estados limites, pretende-se obter modelos de cargas de veículos que representem o tráfego real e efetuar calibração de novos coeficientes de segurança.

No que se refere ao desenvolvimento dos modelos de carga, prevê-se um extenso programa de trabalho, cujas etapas são resumidas a seguir (ROSSIGALI, 2006).

1. Seleção dos sistemas estruturais representativos das obras de arte existentes na malha rodoviária brasileira e das tendências das obras a serem projetadas no futuro.
2. Monitoração do tráfego real e posterior estudo estatístico envolvendo as seguintes variáveis: classificação dos veículos por número de eixos, distâncias entre eixos, peso total dos veículos e sua distribuição por eixo, comprimento dos veículos, espaçamento entre veículos, velocidade e densidade de veículos por faixa de rolamento.
3. Simulação de situações de tráfego tais como escoamento livre com um ou mais veículos sobre a pista e engarrafamentos, que reproduzam as condições reais.
4. Cálculo dos efeitos dinâmicos do tráfego real em pontes representativas das obras brasileiras considerando diferentes comprimentos de vão, números de faixas de tráfego e classes de rodovia.

5. Extrapolação dos efeitos calculados para um determinado período de retorno. Os efeitos a serem calculados são esforços solicitantes em seções transversais críticas dos elementos estruturais das obras representativas.
6. Busca, através de processos de otimização, de modelos de carga, compostos de forças concentradas e distribuídas, que reproduzam os efeitos do tráfego real levando em conta os níveis de probabilidade selecionados.

Os modelos de carga assim desenvolvidos substituiriam o carregamento de projeto constante atualmente na NBR-7188, devendo estar sujeitos a periódicas recalibrações em função de novos dados de tráfego e de sua própria evolução.

Como primeira etapa na elaboração de modelos de cargas móveis no Brasil, ROSSIGALI (2006) utilizou dados de tráfego coletados e publicados pelo DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes) para construir um base reduzida de dados, composta dos seis tipos de veículos mais pesados que constam nas rodovias federais brasileiras (ver Figura 1.1). A partir dos histogramas de frequência de ocorrência dos veículos por faixa de peso bruto total, foram construídos os histogramas dos esforços solicitantes nas seções críticas das pontes consideradas devido à passagem de veículos isolados. O ajuste de funções de densidade de probabilidade a estes histogramas permitiu o uso da estatística de extremos para se estimar os máximos efeitos do tráfego real no intervalo de tempo de referência.

Das etapas de trabalho mencionadas anteriormente, ROSSIGALI (2006) abordou os itens 1, 2 e 5. Entretanto, neste trabalho os esforços solicitantes foram calculados estaticamente e posteriormente multiplicados pelo coeficiente de impacto conforme expresso pela NBR-7188 como uma função do vão da obra. Para incluir de forma mais realista os efeitos dinâmicos (item 4 exposto acima), MELO (2007) apresentou um modelo analítico-numérico simplificado para interação entre veículo, pavimento e estrutura em sistemas de pontes típicas das rodovias brasileiras. Foi feita uma comparação teórico-experimental em termos de deslocamentos para validação do modelo analítico dos veículos e da estrutura para a resposta no tempo. Com isto, os efeitos da passagem dos veículos sobre a posição mais desfavorável do tabuleiro, foram avaliados e comparados com o coeficiente de impacto da norma NBR-7188 para diversos vãos biapoiados.

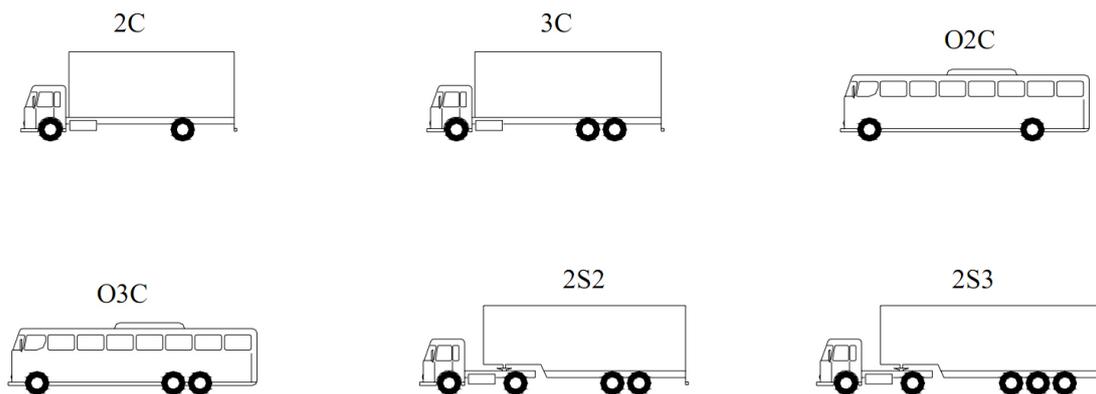


Figura 1.1: Veículos mais pesados da malha rodoviária brasileira.

Os estudos vêm sendo dirigidos inicialmente a pontes de vãos curtos, entre 10 e 40m, em grelha, com longarinas e transversinas intermediárias e de apoio. Os esquemas estruturais considerados e os respectivos esforços críticos são:

- momento fletor máximo positivo e esforço cortante no apoio de vãos biapoiados.
- momentos fletores máximo positivo e negativo e esforço cortante em apoio extremo de vigas contínuas.
- momento fletor negativo e esforço cortante máximo de vãos em balanço.

Considera-se, a princípio, a passagem de veículos isolados em tráfego livre, o que é perfeitamente compatível com a faixa selecionada de comprimentos de vão. Para estes vãos, a situação de acúmulo de veículos ou engarrafamentos não é determinante. Já para grandes vãos, os maiores esforços são oriundos do acúmulo de veículos pesados trafegando em baixa velocidade (praticamente sem efeito dinâmico).

Para a reavaliação dos histogramas de esforços críticos obtidos por análise estática por ROSSIGALI (2006), serão necessárias, para considerar os efeitos dinâmicos através de análise da interação veículo-pavimento-estrutura, 6 tipos de veículos x 13 faixas de peso x 6 valores de velocidade, totalizando 468 análises dinâmicas para cada comprimento de vão de cada esquema estrutural. Somente para os 3 esquemas mencionados e 4 comprimentos de vão (10, 20, 30 e 40m), são previstas 5616 análises.

1.2 Objetivo e Metodologia

O objetivo deste trabalho é a criação de um programa computacional que permite automatizar a elaboração dos histogramas de esforços críticos em pontes devido à ação dinâmica do tráfego de veículos pesados. A obtenção de histogramas é uma das etapas do desenvolvimento de modelos de cargas móveis.

A partir dos dados da geometria da ponte, o “software” prepara automaticamente os dois modelos numéricos (usando elementos finitos de barra) necessários: um modelo tridimensional para a determinação de modos e frequências naturais de vibração e um modelo unifilar para análise dinâmica no domínio do tempo por superposição de modos de flexão e torção do modelo.

Com os dados do veículo, suas faixas de peso e valores de velocidade, e com a seleção do tipo de pavimento, o programa procede a análise da interação veículo-pavimento-estrutura para ação e cada veículo isolado conforme modelo analítico apresentado em MELO (2007). De cada análise são determinados os valores máximos dos esforços críticos.

Finalmente, a partir do histograma de frequências de ocorrência conjunta de velocidade e peso de todos os veículos da base de dados de tráfego, o programa elabora os histogramas dos esforços críticos da ponte.

A comunicação com o usuário é feita por meio de janelas de pré e pós-processamento gráfico para visualizar tanto os dados quanto os modelos numéricos construídos e os resultados obtidos.

O programa computacional foi aqui denominado IVPE-v.2, nele estão implementadas as equações referentes aos veículos monolíticos de 2 e 3 eixos. O programa IVPE versão 1, implementado por MELO (2007), efetua análises individuais para estes mesmos veículos e para estrutura já representada pelo modelo unifilar, fornecendo respostas somente em termos de deslocamentos. Na presente versão 2 foram incorporados as respostas em termos de esforços e a geração automática dos histogramas de esforços críticos.

1.3 Organização da dissertação

O texto do trabalho é apresentado em capítulos com a formatação indicada a seguir:

No Capítulo 2 apresenta-se o modelo analítico numérico da interação veículo-pavimento-estrutura.

O Capítulo 3 aborda toda a implementação computacional envolvida neste trabalho seguindo-se os fluxogramas das diversas partes do programa. Apresenta-se também o método de solução numérica de equações diferenciais de segunda ordem, Runge-Kutta.

O Capítulo 4 ilustra os resultados em geral obtidos com o programa para algumas pontes sob ação do veículo de 3 eixos. Em particular os histogramas de esforços críticos obtidos são comparados aos respectivos histogramas obtidos por análise estática. Apresenta também exemplos de validações do programa frente ao pacote comercial *SAP2000*[®] (para análises quase-estáticas, isto é, a baixas velocidades) e frente aos resultados obtidos por MELO (2007).

No Capítulo 5 são expostas as conclusões e sugestões para futuros trabalhos desta linha de pesquisa.

Por fim, o Anexo A apresenta a evolução histórica das normas de cargas em pontes no mundo e no Anexo B consta o manual de utilização do software IVPE-v.2.

Capítulo 2

Modelagem da Interação

Veículo-Pavimento-Estrutura

Com a modelagem analítica dos veículos e da estrutura foram formuladas as equações de movimento da interação dinâmica veículo-pavimento-estrutura como apresentado em MELO (2007). A formulação foi revisada e é apresentada neste capítulo para os casos de veículos monolíticos de dois e três eixos, classificados segundo os padrões de nomenclatura rodoviários e técnicos (www.dnit.gov.br, WIDMER, 2004), como 2C, O2C, 3C e O3C (ver Figura 1.1).

A estrutura foi modelada extraindo-se as características dinâmicas, os modos de flexão vertical e torção do modelo espacial, e transformando-as para o modelo unifilar que considera barras de elementos finitos com propriedades de pórtico.

2.1 Modelos dos Veículos

2.1.1 Monolítico - 2C

Apresenta-se esquematicamente na Figura 2.1, o modelo matemático que será utilizado para formulação das equações de movimento do veículo de 2 (dois) eixos composto por quatro graus de liberdade, o movimento vertical e rotacional da massa suspensa como corpo rígido e as duas translações verticais das massas localizadas dos conjuntos eixo-roda-pneu. Na Figura 2.2 é mostrada a representação do veículo 2C.

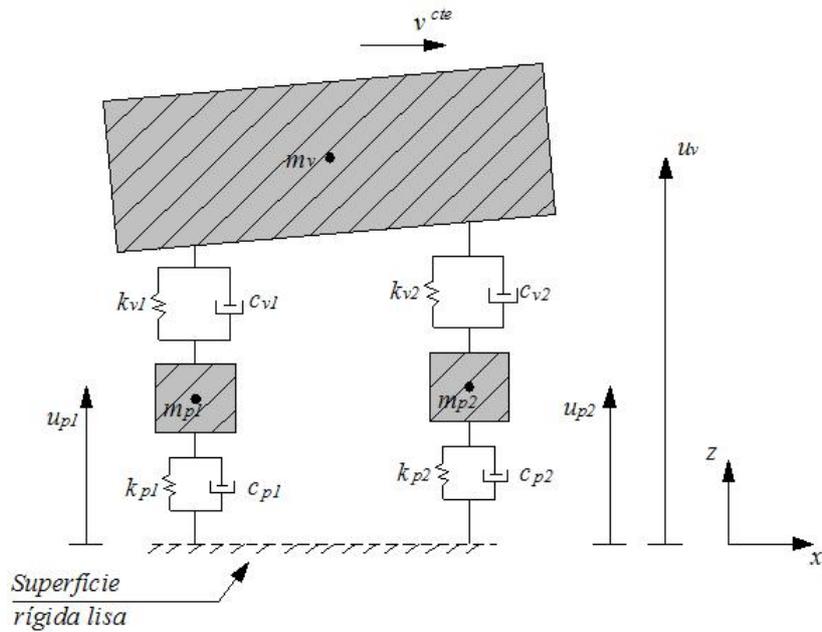


Figura 2.1: Veículo com 4GL ($u_v, \theta_v, u_{p1}, u_{p2}$) sobre superfície rígida lisa.

Neste modelo a massa suspensa do veículo se apóia sobre as suspensões formadas pelo conjunto mola-amortecedor. Estas por sua vez estão ligadas aos eixos, aqui simulados pelo conjunto massa-mola-amortecedor. Essa configuração incorpora os efeitos dinâmicos causados pela interação entre a massa suspensa e as massas locais dos eixos.

De acordo com os diagramas de corpo livre (DCL) e de forças resultantes (DFR) apresentados na Figura 2.3, obtêm-se por equilíbrio das forças verticais e dos momentos em relação ao centro de massa as equações de movimento para cada grau de liberdade baseadas na segunda lei de Newton.

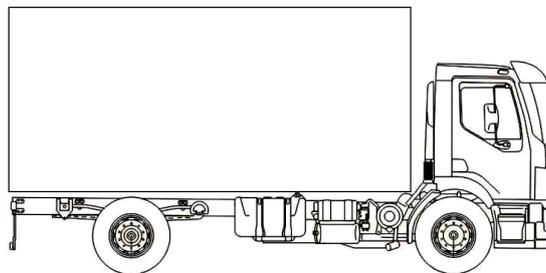


Figura 2.2: Veículo de classe 2C

Primeiramente são obtidas as equações para a massa suspensa.

$$m_v \ddot{u}_v = - \sum_{i=1}^2 (f_{evi} + f_{avi}) - P_v \quad (2.1)$$

$$I_v \ddot{\theta}_v = \sum_{i=1}^2 (f_{evi} + f_{avi}) L_i \quad (2.2)$$

onde, f_{evi} e f_{avi} são, respectivamente, a força elástica e a força de amortecimento correspondentes a suspensão do veículo no eixo i ($i = 1, 2$); L_i é a distância do eixo i ao centro de massa (CM) da massa suspensa e I_v e $\ddot{\theta}_v$ são, respectivamente, o momento de inércia (de massa) e a aceleração angular da massa suspensa do veículo (m_v).

Considerando-se devidamente as forças atuantes no veículo, as equações 2.1 e 2.2 podem ser escritas da seguinte forma:

$$\begin{aligned} m_v \ddot{u}_v = & -c_{v1}[\dot{u}_v - (L_1 \dot{\theta}_v + \dot{u}_{p1})] - k_{v1}[u_v - (L_1 \theta_v + u_{p1})] + \\ & - c_{v2}[\dot{u}_v - (\dot{u}_{p2} - L_2 \dot{\theta}_v)] - k_{v2}[u_v - (u_{p2} - L_2 \theta_v)] - P_v \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} I_v \ddot{\theta}_v = & \{c_{v1}[\dot{u}_v - (L_1 \dot{\theta}_v + \dot{u}_{p1})] + k_{v1}[u_v - (L_1 \theta_v + u_{p1})]\} L_1 + \\ & - \{c_{v2}[\dot{u}_v - (\dot{u}_{p2} - L_2 \dot{\theta}_v)] - k_{v2}[u_v - (u_{p2} - L_2 \theta_v)]\} L_2 \end{aligned} \quad (2.4)$$

O índice $i = 1$ está associado à massa m_{p1} (eixo traseiro) enquanto que o índice $i = 2$ representa os parâmetros da massa m_{p2} (eixo dianteiro). A equação de movimento da massa do eixo i do veículo transitando sobre uma superfície lisa é dada por (Figura 2.1):

$$m_{p1} \ddot{u}_{p1} = f_{ev1} + f_{av1} - f_{ep1} + f_{ap1} - P_{p1} \quad (2.5)$$

Conforme a Figura 2.3, para o caso do eixo traseiro tem-se:

$$m_{p1} \ddot{u}_{p1} = c_{v1}[\dot{u}_v - (L_1 \dot{\theta}_v + \dot{u}_{p1})] + k_{v1}[u_v - (L_1 \theta_v + u_{p1})] - c_{p1} \dot{u}_{p1} - k_{p1} u_{p1} - P_{p1} \quad (2.6)$$

E para o caso do eixo dianteiro as equações são:

$$m_{p2} \ddot{u}_{p2} = c_{v2}[\dot{u}_v - (\dot{u}_{p2} - L_2 \dot{\theta}_v)] + k_{v2}[u_v - (u_{p2} - L_2 \theta_v)] - c_{p2} \dot{u}_{p2} - k_{p2} u_{p2} - P_{p2} \quad (2.7)$$

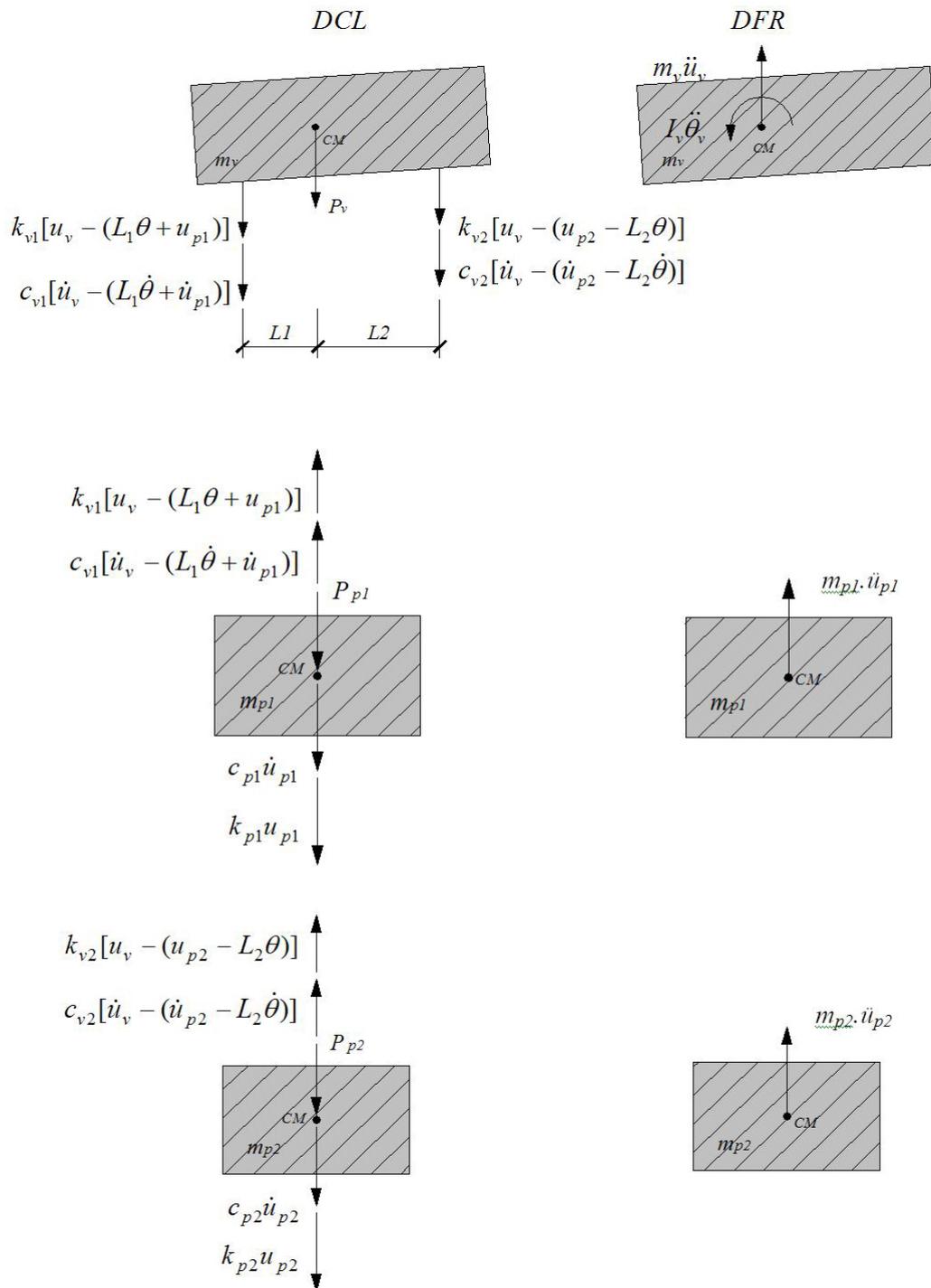


Figura 2.3: DCL e DFR da massa suspensa e dos eixos

Explicitando-se nas equações 2.3, 2.4, 2.6 e 2.7 os graus de liberdade do sistema chega-se às equações de movimento para o veículo simulado através de 4 GL's:

$$\begin{aligned}
m_v \ddot{u}_v &= (c_{v1} + c_{v2}) \dot{u}_v + (-c_{v1}L_1 + c_{v2}L_2) \dot{\theta}_v - c_{v1} \dot{u}_{p1} - c_{v2} \dot{u}_{p2} + \\
&\quad (k_{v1} + k_{v2}) u_v + (-k_{v1}L_1 + k_{v2}L_2) \theta_v - k_{v1} u_{p1} - k_{v2} u_{p2} - P_v \\
I_v \ddot{\theta}_v &= (-c_{v1}L_1 + c_{v2}L_2) \dot{u}_v + (c_{v1}L_1^2 + c_{v2}L_2^2) \dot{\theta}_v + (c_{v1}L_1) \dot{u}_{p1} - (c_{v2}L_2) \dot{u}_{p2} + \\
&\quad (-k_{v1}L_1 + k_{v2}L_2) u_v + (k_{v1}L_1^2 + k_{v2}L_2^2) \theta_v + (k_{v1}L_1) u_{p1} - (k_{v2}L_2) u_{p2} \\
m_{p1} \ddot{u}_{p1} &= -c_{v1} \dot{u}_v + (c_{v1}L_1) \dot{\theta}_v + (c_{v1} + c_{p1}) \dot{u}_{p1} - \\
&\quad k_{v1} u_v + (k_{v1}L_1) \theta_v + (k_{v1} + k_{p1}) u_{p1} - P_{p1} \\
m_{p2} \ddot{u}_{p2} &= -c_{v2} \dot{u}_v - (c_{v2}L_2) \dot{\theta}_v + (c_{v2} + c_{p2}) \dot{u}_{p2} - \\
&\quad k_{v2} u_v - (k_{v2}L_2) \theta_v + (k_{v2} + k_{p2}) u_{p2} - P_{p2}
\end{aligned} \tag{2.8}$$

2.1.2 Monolítico - 3C

Este modelo apresenta-se da mesma forma que o anterior (com quatro graus de liberdade). Entretanto, o modelo com 5 GL's (Figura 2.5) representa de forma mais exata os veículos compostos por 3 eixos, conforme configuração ilustrada na Figura 2.4. Assim, os dois eixos traseiros (tandem duplo) são representados de forma mais realística.

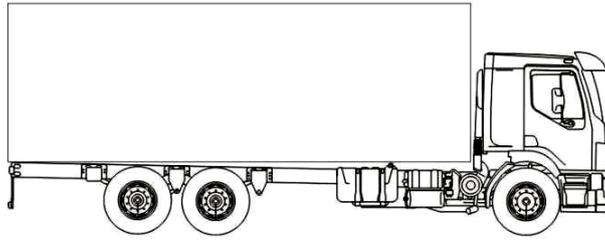


Figura 2.4: Veículo de classe 3C

De acordo com o procedimento adotado para o modelo de 4 GL's, são deduzidas as equações de movimento do veículo a partir dos diagramas de corpo livre e de força resultante apresentados nas Figuras 2.6 e 2.7. As equações do movimento para a massa suspensa do veículo de 5 GL's são dadas por:

$$m_v \ddot{u}_v = - \sum_{i=1}^3 f_{evi} + f_{avi} - P_v \tag{2.9}$$

$$I_v \ddot{\theta}_v = \sum_{i=1}^3 f_{evi} + f_{avi} L_i \quad (2.10)$$

Considerando-se devidamente as forças atuantes no veículo, as equações 2.9 e 2.10 podem ser escritas da seguinte forma:

$$\begin{aligned} m_v \ddot{u}_v &= -c_{v1} [\dot{u}_v - (L_1 \dot{\theta} + u_{p1})] - k_{v1} [u_v - (L_1 \theta + u_{p1})] \\ &\quad - c_{v2} [\dot{u}_v - (L_2 \dot{\theta} + u_{p2})] - k_{v2} [u_v - (L_2 \theta + u_{p2})] \\ &\quad - c_{v3} [\dot{u}_v - (u_{p3} - L_3 \dot{\theta})] - k_{v3} [u_v - (u_{p3} - L_3 \theta)] - P_v \end{aligned} \quad (2.11)$$

$$\begin{aligned} I_v \ddot{\theta}_v &= \{c_{v1} [\dot{u}_v - (L_1 \dot{\theta} + u_{p1})] - k_{v1} [u_v - (L_1 \theta + u_{p1})]\} L_1 \\ &\quad + \{c_{v2} [\dot{u}_v - (L_2 \dot{\theta} + u_{p2})] - k_{v2} [u_v - (L_2 \theta + u_{p2})]\} L_2 \\ &\quad - \{c_{v3} [\dot{u}_v - (u_{p3} - L_3 \dot{\theta})] - k_{v3} [u_v - (u_{p3} - L_3 \theta)]\} L_3 \end{aligned} \quad (2.12)$$

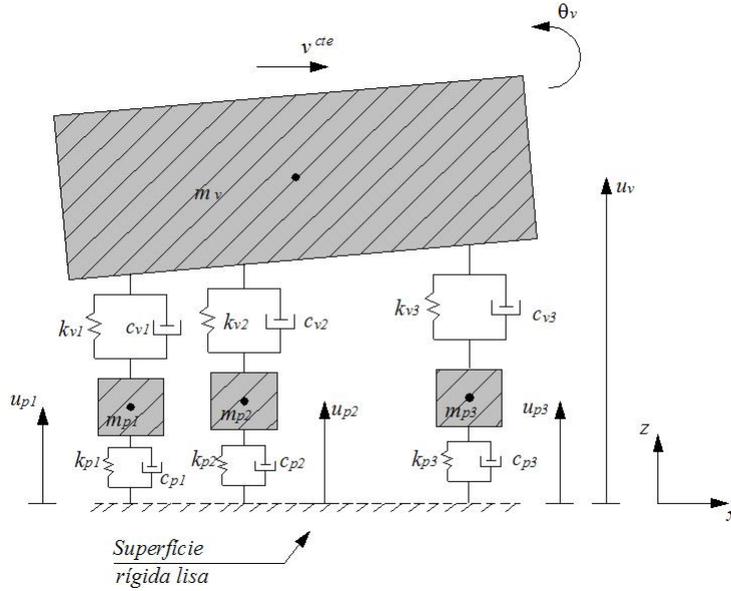


Figura 2.5: Veículo com 5GL ($u_v, \theta_v, u_{p1}, u_{p2}, u_{p3}$) sobre superfície rígida lisa.

A equação de movimento das rodas do eixo i do veículo transitando sobre uma superfície lisa é dada pela equação 2.5. Conforme a Figura 2.5, para o caso do primeiro eixo traseiro tem-se:

$$\begin{aligned} m_{p1} \ddot{u}_{p1} &= \{c_{v1} [\dot{u}_v - (L_1 \dot{\theta} + u_{p1})] + k_{v1} [u_v - (L_1 \theta + u_{p1})]\} L_1 \\ &\quad - c_{p1} \dot{u}_{p1} - k_{p1} u_{p1} - m_{p1} g \end{aligned} \quad (2.13)$$

$$\begin{aligned}
m_{p2}\ddot{u}_{p2} &= \{c_{v2}[\dot{u}_v - (L_2\dot{\theta} + u_{p2})] + k_{v2}[u_v - (L_2\theta + u_{p2})]\}L_2 \\
&\quad - c_{p2}\dot{u}_{p2} - k_{p2}u_{p2} - m_{p2}g
\end{aligned} \tag{2.14}$$

$$\begin{aligned}
m_{p3}\ddot{u}_{p3} &= \{c_{v3}[\dot{u}_v - (u_{p3} - L_3\dot{\theta})] + k_{v3}[u_v - (u_{p3} - L_3\theta)]\}L_3 \\
&\quad - c_{p3}\dot{u}_{p3} - k_{p3}u_{p3} - m_{p3}g
\end{aligned} \tag{2.15}$$

Explicitando, nas equações 2.11 a 2.15 os graus de liberdade do sistema chega-se ao sistema de equações de movimento para o veículo simulado através de 5GL:

$$\begin{aligned}
m_v\ddot{u}_v &= (c_{v1} + c_{v2} + c_{v3})\dot{u}_v + (-c_{v1}L_1 - c_{v2}L_2 + c_{v3}L_3)\dot{\theta}_v \\
&\quad (k_{v1} + k_{v2} + k_{v3})u_v + (-k_{v1}L_1 - k_{v2}L_2 + k_{v3}L_3)\theta_v \\
&\quad - c_{v1}\dot{u}_{p1} - c_{v2}\dot{u}_{p2} - c_{v3}\dot{u}_{p3} \\
&\quad - k_{v1}u_{p1} - k_{v2}u_{p2} - k_{v3}u_{p3} - m_vg \\
I_v\ddot{\theta}_v &= (c_{v1}L_1 + c_{v2}L_2 - c_{v3}L_3)\dot{u}_v + (c_{v1}L_1^2 + c_{v2}L_2^2 + c_{v3}L_3^2)\dot{\theta}_v + \\
&\quad (k_{v1}L_1 + k_{v2}L_2 - k_{v3}L_3)u_v + (k_{v1}L_1^2 + k_{v2}L_2^2 + k_{v3}L_3^2)\theta_v + \\
&\quad (c_{v1}L_1)\dot{u}_{p1} + (c_{v2}L_2)\dot{u}_{p2} - (c_{v3}L_3)\dot{u}_{p3} + \\
&\quad (k_{v1}L_1)u_{p1} + (k_{v2}L_2)u_{p2} - (k_{v3}L_3)u_{p3} \\
m_{p1}\ddot{u}_{p1} &= -c_{v1}\dot{u}_v + (c_{v1}L_1)\dot{\theta}_v + (c_{v1} + c_{p1})\dot{u}_{p1} + \\
&\quad - k_{v1}u_v + (k_{v1}L_1)\theta_v + (k_{v1} + k_{p1})u_{p1} - P_{p1} \\
m_{p2}\ddot{u}_{p2} &= -c_{v2}\dot{u}_v + (c_{v2}L_2)\dot{\theta}_v + (c_{v2} + c_{p2})\dot{u}_{p2} + \\
&\quad - k_{v2}u_v + (k_{v2}L_2)\theta_v + (k_{v2} + k_{p2})u_{p2} - P_{p2} \\
m_{p3}\ddot{u}_{p3} &= -c_{v3}\dot{u}_v - (c_{v3}L_3)\dot{\theta}_v + (c_{v3} + c_{p3})\dot{u}_{p3} + \\
&\quad - k_{v3}u_v - (k_{v3}L_3)\theta_v + (k_{v3} + k_{p3})u_{p3} - P_{p3}
\end{aligned} \tag{2.16}$$

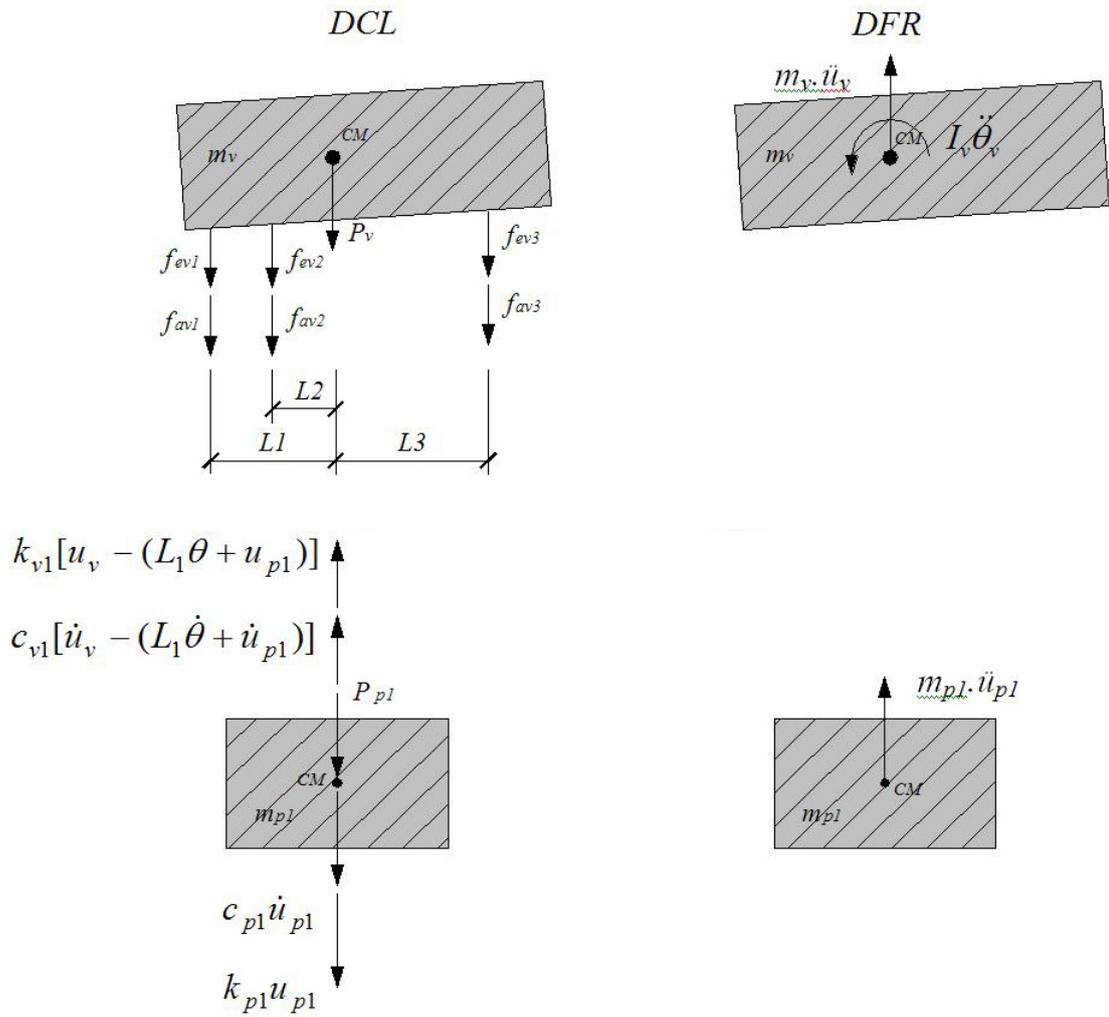


Figura 2.6: DCL e DFR da massa suspensa e do eixo 1

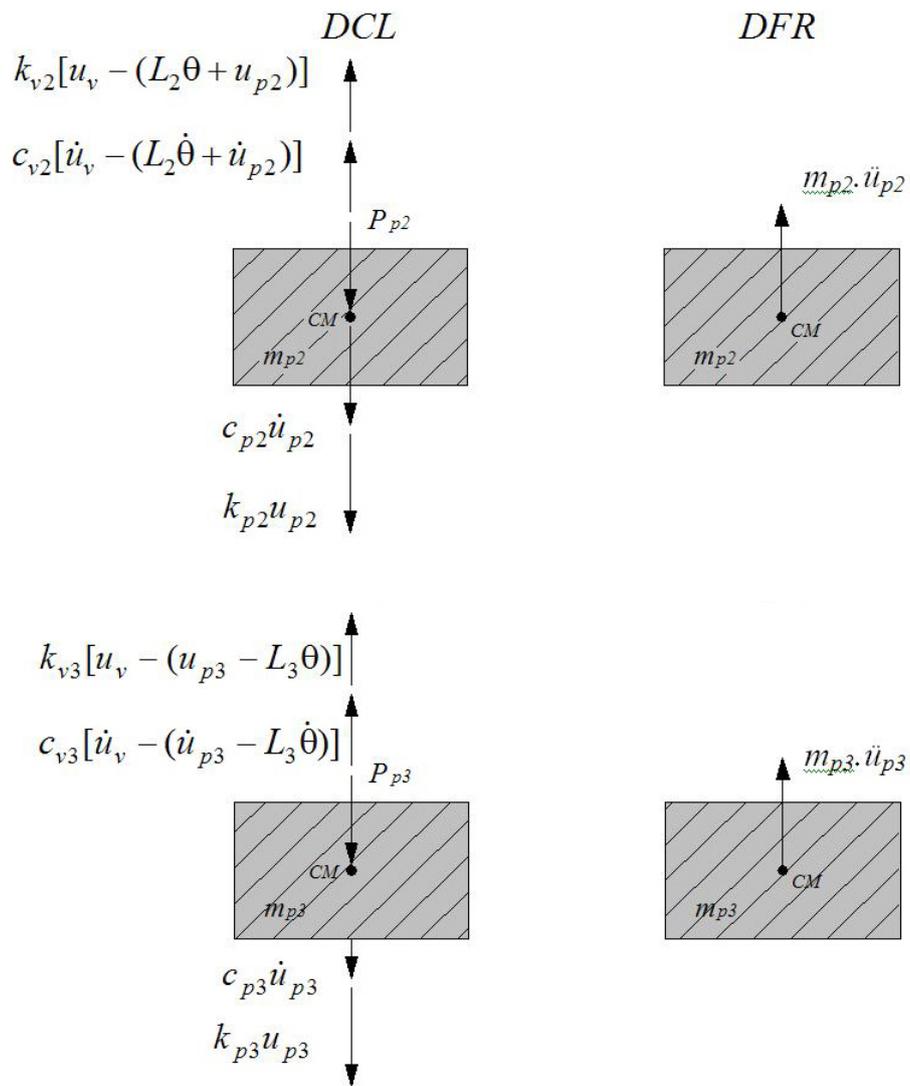


Figura 2.7: DCL e DFR da massa do eixo 2 e 3

2.2 Equações de Movimento da Estrutura

Discretizando-se uma estrutura contínua via Método dos Elementos Finitos (MEF), a equação de movimento é dada por:

$$M_e \ddot{U}_e + C_e \dot{U}_e + K_e U_e = F \quad (2.17)$$

onde,

M_e é a matriz de massa global da estrutura;

C_e é a matriz de amortecimento global da estrutura;

K_e é a matriz de rigidez global da estrutura;

\ddot{U}_e, \dot{U}_e e U_e são, respectivamente, vetores de aceleração, velocidade e deslocamento dos pontos nodais da estrutura e F é o vetor de forças nodais variável no tempo e no espaço.

Determinando-se os modos e frequências naturais de vibração, por meio da análise de vibrações livres, pode-se assumir as amplitudes das componentes modais como coordenadas generalizadas.

O deslocamento total (U_k) de um ponto nodal qualquer k dessa estrutura é dado pela superposição modal das amplitudes de seus n principais modos de vibração, descrito pela seguinte expressão:

$$U_{ek} = \phi_1 u_{e1}(t) + \phi_2 u_{e2}(t) + \dots + \phi_{nk} u_{en}(t) = \sum_{j=1}^n \phi_{jk} u_{ej}(t) \quad (2.18)$$

onde,

u_{ej} é a amplitude do modo j ,

n é o número de modos do sistema,

ϕ_{jk} é o elemento do auto-vetor associado ao modo j e ao ponto nodal k .

Utilizando-se o principio da superposição modal (CLOUGH e PENZIEN, 1993) o sistema de equações 2.17 transforma-se em n equações desacopladas da seguinte forma:

$$m_{ej} \ddot{u}_{ej} + c_{ej} \dot{u}_{ej} + k_{ej} u_{ej} = F_j \quad (2.19)$$

onde,

m_{ej} , é a massa modal da estrutura para o j -ésimo modo de vibração da estrutura;

c_{ej} , é a constante de amortecimento modal para o j -ésimo modo de vibração da estrutura;

k_{ej} , é a rigidez generalizada para o j -ésimo modo de vibração da estrutura;

F_j , é a força generalizada associada ao modo j , calculada pelo produto vetorial $\phi_j F$, sendo ϕ_j o autovetor do modo j ;

Pode-se ainda realizar as seguintes substituições (CLOUGH e PENZIEN, 1993):

$$c_{ej} = 2\omega_{ej}m_{ej}\xi_{ej} \quad (2.20)$$

$$k_{ej} = m_{ej}\omega_{ej}^2 \quad (2.21)$$

Obtendo-se a seguinte equação:

$$\ddot{u}_{ej} + 2\omega_{ej}\xi_{ej}\dot{u}_{ej} + \omega_{ej}^2u_{ej} = \frac{F_j}{m_{ej}} \quad (2.22)$$

onde,

ω_{ej} é a frequência angular da estrutura para o j -ésimo modo;

ξ_{ej} é a taxa de amortecimento da estrutura para o j -ésimo modo.

No presente trabalho utilizou-se um modelo tridimensional para análise de vibrações livres e suas propriedades modais foram transferidas para o modelo unifilar de forma a representar a estrutura espacial (ver Figura 2.8). Para tal, foram considerados modos de vibração de flexão vertical e de torção. Para os modos de torção (α_j) a equação 2.22 é escrita na seguinte forma:

$$\ddot{\alpha}_{ej} + 2\omega_{ej}\xi_{ej}\dot{\alpha}_{ej} + \omega_{ej}^2\alpha_{ej} = \frac{T_j}{I_{ej}} \quad (2.23)$$

onde,

T_j é o momento torçor generalizado;

I_{ej} é a massa rotacional modal para o modo j .

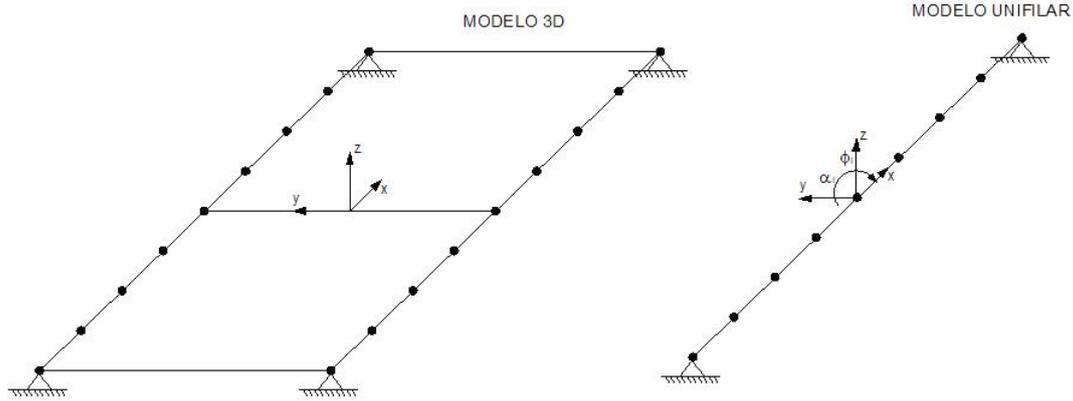


Figura 2.8: Modelo 3D e modelo unifilar utilizados na análise.

2.3 Modelagem da interação dinâmica veículo-pavimento-estrutura

O veículo atua como sistema mecânico móvel, que varia no tempo e no espaço, e que, devido a sua ação dinâmica, excita a estrutura da ponte quando trafega pela mesma sob determinada velocidade. Esta excitação é provocada pelo efeito inercial da massa suspensa do veículo, cujo movimento vertical é induzido pela irregularidade geométrica do pavimento e pelo próprio movimento da estrutura. Em casos especiais o veículo pode atuar como um sistema atenuador de vibrações.

Assim, a equação de movimento da estrutura de uma ponte submetida a esse tipo de carregamento, pode ser escrita como:

$$M_e \ddot{u}_e + C_e \dot{u}_e + K_e u_e = F_{int}(t) \quad (2.24)$$

onde $F_{int}(t)$ é a força de interação veículo-pavimento-estrutura em cada ponto k de contato entre os pneus do veículo e o pavimento aderente a superfície da estrutura, que pode ser escrita como:

$$F_{int}(t) = \sum_{i=1}^n (f_{ei} + f_{ai}) \quad (2.25)$$

onde f_{ei} e f_{ai} são, respectivamente, as forças elásticas e amortecedoras exercidas pelos componentes de mola e amortecimento do eixo i do veículo (pneus) em contato com a estrutura.

Considera-se que não há perda de contato do pneu com o pavimento, isto é, as forças de interação estão sempre presentes.

O modelo da Figura 2.9, representa um sistema mecânico-estrutural acoplado, onde se levam em consideração a irregularidade do pavimento e o deslocamento da estrutura.

As forças de interação que o veículo exerce sobre a estrutura no ponto k de contato (Figura 2.10) são as forças f_e (elástica) e f_a (amortecimento), funções do movimento vertical do veículo em relação a estrutura e não mais do movimento absoluto do veículo como ilustrado nas Figuras 2.1 e 2.5.

Sendo assim:

$$F_{int}(t) = f_e + f_a = k_v[u_v - (U_e + u_r)] + c_v[\dot{u}_v - (\dot{U}_e + \dot{u}_r)] \quad (2.26)$$

onde u_r é a coordenada vertical dos pontos na superfície irregular do pavimento, e \dot{u}_r sua derivada no tempo dada pela expressão:

$$\left(\dot{u}_r = \frac{du}{dt} = \frac{du}{dx}v \right)$$

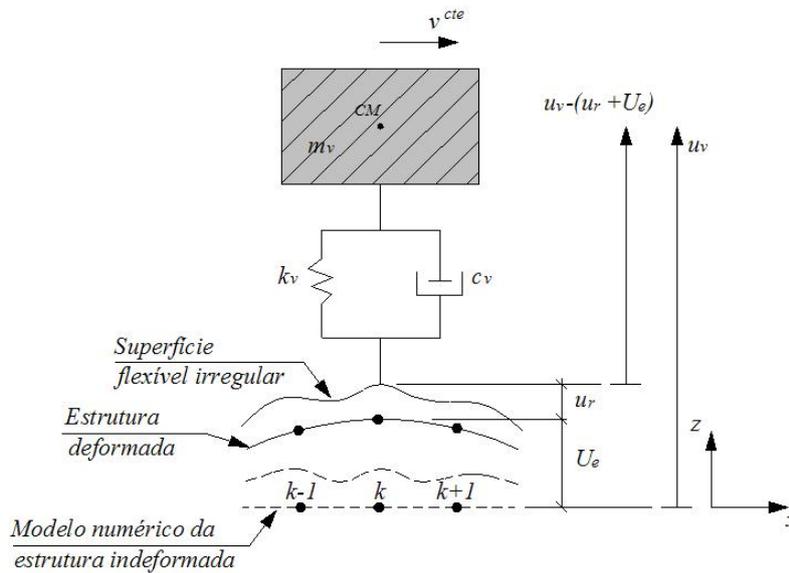


Figura 2.9: Eixo do veículo sobre superfície flexível irregular.

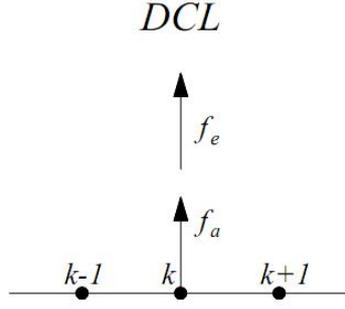


Figura 2.10: DCL da estrutura.

2.4 Modelo da Interação Dinâmica

2.4.1 Modelo com 4 GL's para veículo 2C

O veículo de 4 GL's da Figura 2.2 tem dois pontos de contato com a estrutura, correspondentes aos eixos dianteiro (sub-índice 2) e traseiro (sub-índice 1). As forças de interação para cada eixo i , ilustrados na Figura 2.11 podem ser escritas como:

$$F_{ei}(t) = f_{ei} + f_{ai}, \quad i = 1, 2 \quad (2.27)$$

onde,

$$\begin{aligned} f_{ei} &= k_{pi}[u_{pi} - (U_{ei} + u_{ri})] \\ f_{ai} &= c_{pi}[\dot{u}_{pi} - (\dot{U}_{ei} + \dot{u}_{ri})] \end{aligned} \quad (2.28)$$

Nas equações 2.28 U_{ei} é o deslocamento vertical do ponto da estrutura em contato com o eixo i em cada instante de tempo obtido através da superposição das formas modais:

$$U_{ei}(t) = \sum_{j=1}^n u_{ej} \phi_{ij} \quad (2.29)$$

sendo, n o número de modos de vibração. Nas equações 2.28 o termo u_{ri} é a coordenada do perfil longitudinal do pavimento no ponto de contato com o eixo i em cada instante de tempo.

Substituindo a equação 2.27 em 2.17 e realizando as devidas operações, chega-se ao sistema de equações de movimento acopladas do sistema mecânico-estrutural, expresso pelas equações 2.30 e 2.31 para a estrutura e o veículo, respectivamente.

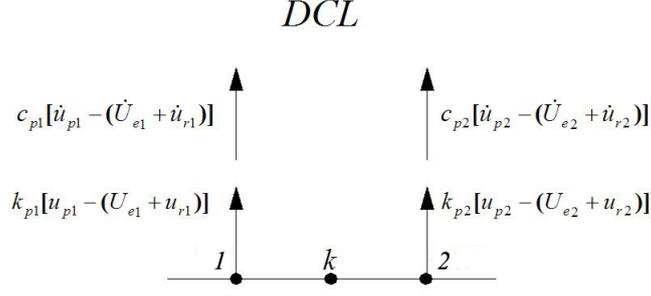


Figura 2.11: Diagrama de corpo livre (DCL) da estrutura.

$$\begin{aligned}
m_{ej}\ddot{u}_{ej} + c_{ej}\dot{u}_{ej} + k_{ej}u_{ej} &= \phi_{1j}(f_{e1} + f_{a1}) + \phi_{2j}(f_{e2} + f_{a2}) \\
m_{ej+1}\ddot{u}_{ej+1} + c_{ej+1}\dot{u}_{ej+1} + k_{ej+1}u_{ej+1} &= \phi_{1j+1}(f_{e1} + f_{a1}) + \phi_{2j+1}(f_{e2} + f_{a2}) \\
&\vdots \\
m_{en}\ddot{u}_{en} + c_{en}\dot{u}_{en} + k_{en}u_{en} &= \phi_{1n}(f_{e1} + f_{a1}) + \phi_{2n}(f_{e2} + f_{a2})
\end{aligned} \tag{2.30}$$

$$\begin{aligned}
m_v\ddot{u}_v &= (c_{v1} + c_{v2})\dot{u}_v + (-c_{v1}L_1 + c_{v2}L_2)\dot{\theta}_v - c_{v1}\dot{u}_{p1} - c_{v2}\dot{u}_{p2} + \\
&\quad (k_{v1} + k_{v2})u_v + (-k_{v1}L_1 + k_{v2}L_2)\theta_v - k_{v1}u_{p1} - k_{v2}u_{p2} - P_v \\
I_v\ddot{\theta}_v &= (-c_{v1}L_1 + c_{v2}L_2)\dot{u}_v + (c_{v1}L_1^2 + c_{v2}L_2^2)\dot{\theta}_v + (c_{v1}L_1)\dot{u}_{p1} - (c_{v2}L_2)\dot{u}_{p2} + \\
&\quad (-k_{v1}L_1 + k_{v2}L_2)u_v + (k_{v1}L_1^2 + k_{v2}L_2^2)\theta_v + (k_{v1}L_1)u_{p1} - (k_{v2}L_2)u_{p2} \\
m_{p1}\ddot{u}_{p1} &= -c_{v1}\dot{u}_v + (c_{v1}L_1)\dot{\theta}_v + (c_{v1} + c_{p1})\dot{u}_{p1} - \\
&\quad k_{v1}u_v + (k_{v1}L_1)\theta_v + (k_{v1} + k_{p1})u_{p1} - P_{p1} \\
m_{p2}\ddot{u}_{p2} &= -c_{v2}\dot{u}_v - (c_{v2}L_2)\dot{\theta}_v + (c_{v2} + c_{p2})\dot{u}_{p2} - \\
&\quad k_{v2}u_v - (k_{v2}L_2)\theta_v + (k_{v2} + k_{p2})u_{p2} - P_{p2}
\end{aligned} \tag{2.31}$$

Nas equações 2.30 e 2.31, as forças elásticas (f_e) e amortecedoras (f_a) de interação veículo-estrutura para os dois eixos do veículo são expressas de acordo com as equações 2.28. Estas equações são então escritas na forma matricial para facilitar a conferência e implementação computacional das mesmas.

Nas matrizes apresentadas à seguir, ϕ_{1j} e ϕ_{2j} representam as componentes do autovetor do modo j correspondentes aos pontos de contato da estrutura com os

eixos 1 e 2 do veículo respectivamente, os quais variam ao longo do tempo.

$$\ddot{U} = \begin{bmatrix} \ddot{u}_{ej} \\ \ddot{u}_{ej+1} \\ \vdots \\ \ddot{u}_{en} \\ \ddot{u}_v \\ \ddot{\theta}_v \\ \ddot{u}_{p1} \\ \ddot{u}_{p2} \end{bmatrix}; \dot{U} = \begin{bmatrix} \dot{u}_{ej} \\ \dot{u}_{ej+1} \\ \vdots \\ \dot{u}_{en} \\ \dot{u}_v \\ \dot{\theta}_v \\ \dot{u}_{p1} \\ \dot{u}_{p2} \end{bmatrix} \text{ e } U = \begin{bmatrix} u_{ej} \\ u_{ej+1} \\ \vdots \\ u_{en} \\ u_v \\ \theta_v \\ u_{p1} \\ u_{p2} \end{bmatrix}$$

$$M_{(n+4)x(n+4)} = \begin{bmatrix} M_{ee(nx n)} & 0_{(nx4)} \\ 0_{(4xn)} & M_{vv(4x4)} \end{bmatrix}$$

$$K_{(n+4)x(n+4)} = \begin{bmatrix} K_{ee(nx n)} & K_{ev(nx4)} \\ K_{ve(4xn)} & K_{vv(4x4)} \end{bmatrix}$$

$$C_{(n+4)x(n+4)} = \begin{bmatrix} C_{ee(nx n)} & C_{ev(nx4)} \\ C_{ve(4xn)} & C_{vv(4x4)} \end{bmatrix}$$

$$\text{e } P_{(n+4)x(1)} = \begin{bmatrix} P_{e(nx1)} \\ P_{v(4x1)} \end{bmatrix}.$$

onde,

$$M_{ee(nx n)} = \begin{bmatrix} m_{e_j} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & m_{e_{j+1}} & 0 & 0 \\ \vdots & 0 & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & m_{e_n} \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
M_{vv(4x4)} &= \begin{bmatrix} m_v & 0 & \dots & 0 \\ 0 & I_v & 0 & 0 \\ \vdots & 0 & m_{p1} & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & m_{p2} \end{bmatrix} \\
C_{ee(nxn)} &= \begin{bmatrix} c_{ej} + \sum_{i=1}^2 c_{pi}\phi_{ij}^2 & \sum_{i=1}^2 c_{pi}\phi_{ij}\phi_{ij+1} & \dots & \sum_{i=1}^2 c_{pi}\phi_{ij}\phi_{in} \\ \sum_{i=1}^2 c_{pi}\phi_{ij+1}\phi_{ij} & c_{ej+1} + \sum_{i=1}^2 c_{pi}\phi_{ij+1}^2 & \dots & \sum_{i=1}^2 c_{pi}\phi_{ij+1}\phi_{in} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \sum_{i=1}^2 c_{pi}\phi_{in}\phi_{ij} & \sum_{i=1}^2 c_{pi}\phi_{in}\phi_{ij+1} & \dots & c_{en} + \sum_{i=1}^2 c_{pi}\phi_{in}^2 \end{bmatrix} \\
C_{vv(4x4)} &= \begin{bmatrix} c_{v2} + c_{v1} & -L_1c_{v1} + L_2c_{v2} & -c_{v1} & -c_{v2} \\ -L_1c_{v1} + L_2c_{v2} & L_1^2c_{v1} + L_2^2c_{v2} & L_1c_{v1} & -L_2c_{v2} \\ -c_{v1} & L_1c_{v1} & c_{v1} + c_{p1} & 0 \\ -c_{v2} & -L_2c_{v2} & 0 & c_{v2} + c_{p2} \end{bmatrix} \\
C_{ve(4xn)} &= \begin{bmatrix} 0 & \dots \\ 0 & \dots \\ -c_{p1}\phi_{1j} & -c_{p1}\phi_{1j+1} & \dots & -c_{p1}\phi_{1n} \\ -c_{p2}\phi_{2j} & -c_{p2}\phi_{2j+1} & \dots & -c_{p2}\phi_{2n} \end{bmatrix} \\
C_{ev(nx4)} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & -c_{p1}\phi_{1j} & -c_{p2}\phi_{2j} \\ \vdots & \vdots & -c_{p1}\phi_{1j+1} & -c_{p2}\phi_{2j+1} \\ & & \vdots & \vdots \\ & & -c_{p1}\phi_{1n} & -c_{p2}\phi_{2n} \end{bmatrix} \\
K_{ee(nxn)} &= \begin{bmatrix} k_{ej} + \sum_{i=1}^2 k_{pi}\phi_{ij}^2 & \sum_{i=1}^2 k_{pi}\phi_{ij}\phi_{ij+1} & \dots & \sum_{i=1}^2 k_{pi}\phi_{ij}\phi_{in} \\ \sum_{i=1}^2 k_{pi}\phi_{ij+1}\phi_{ij} & k_{ej+1} + \sum_{i=1}^2 k_{pi}\phi_{ij+1}^2 & \dots & \sum_{i=1}^2 k_{pi}\phi_{ij+1}\phi_{in} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \sum_{i=1}^2 k_{pi}\phi_{in}\phi_{ij} & \sum_{i=1}^2 k_{pi}\phi_{in}\phi_{ij+1} & \dots & k_{en} + \sum_{i=1}^2 k_{pi}\phi_{in}^2 \end{bmatrix} \\
K_{vv(4x4)} &= \begin{bmatrix} k_{v2} + k_{v1} & -L_1k_{v1} + L_2k_{v2} & -k_{v1} & -k_{v2} \\ -L_1k_{v1} + L_2k_{v2} & L_1^2k_{v1} + L_2^2k_{v2} & L_1k_{v1} & -L_2k_{v2} \\ -k_{v1} & L_1k_{v1} & k_{v1} + k_{p1} & 0 \\ -k_{v2} & -L_2k_{v2} & 0 & k_{v2} + k_{p2} \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
k_{ve(4xn)} &= \begin{bmatrix} 0 & \dots & & \\ 0 & \dots & & \\ -k_{p1}\phi_{1j} & -k_{p1}\phi_{1j+1} & \dots & -k_{p1}\phi_{1n} \\ -k_{p2}\phi_{2j} & -k_{p2}\phi_{2j+1} & \dots & -k_{p2}\phi_{2n} \end{bmatrix} \\
K_{ev(nx4)} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & -k_{p1}\phi_{1j} & -k_{p2}\phi_{2j} \\ \vdots & \vdots & -k_{p1}\phi_{1j+1} & -k_{p2}\phi_{2j+1} \\ & & \vdots & \vdots \\ & & -k_{p1}\phi_{1n} & -k_{p2}\phi_{2n} \end{bmatrix} \\
P_{e(nx1)} &= \begin{bmatrix} -\phi_{1j}(k_{p1}u_{r1} + c_{p1}\dot{u}_{r1}) - \phi_{2j}(k_{p2}u_{r2} + c_{p2}\dot{u}_{r2}) \\ -\phi_{1j+1}(k_{p1}u_{r1} + c_{p1}\dot{u}_{r1}) - \phi_{2j+1}(k_{p2}u_{r2} + c_{p2}\dot{u}_{r2}) \\ \vdots \\ -\phi_{1n}(k_{p1}u_{r1} + c_{p1}\dot{u}_{r1}) - \phi_{2n}(k_{p2}u_{r2} + c_{p2}\dot{u}_{r2}) \end{bmatrix} \\
P_{e(4x1)} &= \begin{bmatrix} -P_v \\ 0 \\ -P_{p1} \\ -P_{p2} \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

2.4.2 Modelo com 5 GL's para veículo 3C

Para o veículo de 5 GL's existem 3 pontos de contato com a estrutura. As forças de interação são então aplicadas nestes 3 pontos e são escritas segundo a equação 2.27 sendo $i = 1, 3$.

Substituindo a equação 2.27 em 2.17 e realizando as devidas operações, chega-se ao sistema de equações de movimento acopladas do sistema mecânico-estrutural, expresso por:

$$\begin{aligned}
m_{ej}\ddot{u}_{ej} + c_{ej}\dot{u}_{ej} + k_{ej}u_{ej} &= \sum_{i=1}^3 \phi_{ij}(f_{ei} + f_{ai}) \\
m_{ej+1}\ddot{u}_{ej+1} + c_{ej+1}\dot{u}_{ej+1} + k_{ej+1}u_{ej+1} &= \sum_{i=1}^3 \phi_{i,j+1}(f_{ei} + f_{ai}) \\
&\vdots \\
m_{en}\ddot{u}_{en} + c_{en}\dot{u}_{en} + k_{en}u_{en} &= \sum_{i=1}^3 \phi_{in}(f_{ei} + f_{ai})
\end{aligned} \tag{2.32}$$

$$\begin{aligned}
m_v\ddot{u}_v &= (c_{v1} + c_{v2} + c_{v3})\dot{u}_v + (-c_{v1}L_1 - c_{v2}L_2 + c_{v3}L_3)\dot{\theta}_v - c_{v1}\dot{u}_{p1} - c_{v2}\dot{u}_{p2} - c_{v3}\dot{u}_{p3} + \\
&\quad (k_{v1} + k_{v2} + k_{v3})u_v + (-k_{v1}L_1 - k_{v2}L_2 + k_{v3}L_3)\theta_v - k_{v1}u_{p1} - k_{v2}u_{p2} - k_{v3}u_{p3} \\
&\quad - P_v \\
I_v\ddot{\theta}_v &= (-c_{v1}L_1 - c_{v2}L_2 + c_{v3}L_3)\dot{u}_v + (c_{v1}L_1^2 + c_{v2}L_2^2 + c_{v3}L_3^2)\dot{\theta}_v + \\
&\quad (c_{v1}L_1)\dot{u}_{p1} + (c_{v2}L_2)\dot{u}_{p2} + (c_{v3}L_3)\dot{u}_{p3} + \\
&\quad (-k_{v1}L_1 - k_{v2}L_2 + k_{v3}L_3)u_v + (k_{v1}L_1^2 + k_{v2}L_2^2 + k_{v3}L_3^2)\theta_v + \\
&\quad (k_{v1}L_1)u_{p1} + (k_{v2}L_2)u_{p2} + (k_{v3}L_3)u_{p3} \\
m_{p1}\ddot{u}_{p1} &= -c_{v1}\dot{u}_v + (c_{v1}L_1)\dot{\theta}_v + (c_{v1} + c_{p1})\dot{u}_{p1} + \\
&\quad - k_{v1}u_v + (k_{v1}L_1)\theta_v + (k_{v1} + k_{p1})u_{p1} - P_{p1} \\
m_{p2}\ddot{u}_{p2} &= -c_{v2}\dot{u}_v + (c_{v2}L_2)\dot{\theta}_v + (c_{v2} + c_{p2})\dot{u}_{p2} + \\
&\quad - k_{v2}u_v + (k_{v2}L_2)\theta_v + (k_{v2} + k_{p2})u_{p2} - P_{p2} \\
m_{p3}\ddot{u}_{p3} &= -c_{v3}\dot{u}_v - (c_{v3}L_3)\dot{\theta}_v + (c_{v3} + c_{p3})\dot{u}_{p3} + \\
&\quad - k_{v3}u_v - (k_{v3}L_3)\theta_v + (k_{v3} + k_{p3})u_{p3} - P_{p3}
\end{aligned} \tag{2.33}$$

A representação matricial das equações 2.32 e 2.33 possuem os seguintes vetores de aceleração, velocidade e deslocamento, matrizes de massa, rigidez, amortecimento e vetor de forças:

$$\ddot{U} = \begin{bmatrix} \ddot{u}_{ej} \\ \ddot{u}_{ej+1} \\ \vdots \\ \ddot{u}_{en} \\ \ddot{u}_v \\ \ddot{\theta}_v \\ \ddot{u}_{p1} \\ \ddot{u}_{p2} \\ \ddot{u}_{p3} \end{bmatrix}; \dot{U} = \begin{bmatrix} \dot{u}_{ej} \\ \dot{u}_{ej+1} \\ \vdots \\ \dot{u}_{en} \\ \dot{u}_v \\ \dot{\theta}_v \\ \dot{u}_{p1} \\ \dot{u}_{p2} \\ \dot{u}_{p3} \end{bmatrix} \text{ e } U = \begin{bmatrix} u_{ej} \\ u_{ej+1} \\ \vdots \\ u_{en} \\ u_v \\ \theta_v \\ u_{p1} \\ u_{p2} \\ u_{p3} \end{bmatrix}$$

$$M_{(n+5)x(n+5)} = \begin{bmatrix} M_{ee(nx n)} & 0_{(nx 5)} \\ 0_{(5xn)} & M_{vv(5x5)} \end{bmatrix}$$

$$K_{(n+5)x(n+5)} = \begin{bmatrix} K_{ee(nx n)} & K_{ev(nx 5)} \\ K_{ve(5xn)} & K_{vv(5x5)} \end{bmatrix}$$

$$C_{(n+5)x(n+5)} = \begin{bmatrix} C_{ee(nx n)} & C_{ev(nx 5)} \\ C_{ve(5xn)} & C_{vv(5x5)} \end{bmatrix}$$

$$\text{e } P_{(n+5)x(1)} = \begin{bmatrix} P_{e(nx 1)} \\ P_{v(5x 1)} \end{bmatrix}.$$

onde,

$$M_{ee(nx n)} = \begin{bmatrix} m_{ej} & 0 & \dots & & \\ 0 & m_{ej+1} & 0 & \dots & \\ \vdots & 0 & \ddots & \vdots & \vdots \\ \vdots & 0 & 0 & \ddots & \vdots \\ & 0 & 0 & 0 & m_{en} \end{bmatrix}$$

$$M_{vv(5 \times 5)} = \begin{bmatrix} m_v & 0 & \dots & & \\ 0 & I_v & 0 & \dots & \\ \vdots & 0 & m_{p1} & 0 & 0 \\ & \vdots & 0 & m_{p2} & 0 \\ & & 0 & 0 & m_{p3} \end{bmatrix}$$

$$C_{ee(n \times n)} = \begin{bmatrix} c_{ej} + \sum_{i=1}^3 c_{pi} \phi_{ij}^2 & \sum_{i=1}^3 c_{pi} \phi_{ij} \phi_{ij+1} & \dots & \sum_{i=1}^3 c_{pi} \phi_{ij} \phi_{in} \\ \sum_{i=1}^3 c_{pi} \phi_{ij+1} \phi_{ij} & c_{ej+1} + \sum_{i=1}^3 c_{pi} \phi_{ij+1}^2 & \dots & \sum_{i=1}^3 c_{pi} \phi_{ij+1} \phi_{in} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \sum_{i=1}^3 c_{pi} \phi_{in} \phi_{ij} & \sum_{i=1}^3 c_{pi} \phi_{in} \phi_{ij+1} & \dots & c_{en} + \sum_{i=1}^3 c_{pi} \phi_{in}^2 \end{bmatrix}$$

$$C_{vv(5 \times 5)} = \begin{bmatrix} c_{v1} + c_{v2} + c_{v3} & -c_{v1}L_1 - c_{v2}L_2 + c_{v3}L_3 & -c_{v1} & -c_{v2} & -c_{v3} \\ -c_{v1}L_1 - c_{v2}L_2 + c_{v3}L_3 & c_{v1}L_1^2 + c_{v2}L_2^2 + c_{v3}L_3^2 & c_{v1}L_1 & c_{v2}L_2 & -c_{v3}L_3 \\ -c_{v1} & c_{v1}L_1 & c_{v1} + c_{p1} & 0 & 0 \\ -c_{v2} & c_{v2}L_2 & 0 & c_{v2} + c_{p2} & 0 \\ -c_{v3} & -c_{v3}L_3 & 0 & 0 & c_{v3} + c_{p3} \end{bmatrix}$$

$$C_{ve(5 \times n)} = \begin{bmatrix} 0 & \dots & & & \\ 0 & \dots & & & \\ -c_{p1}\phi_{1j} & -c_{p1}\phi_{1j+1} & \dots & \dots & -c_{p1}\phi_{1n} \\ -c_{p2}\phi_{2j} & -c_{p2}\phi_{2j+1} & \dots & \dots & -c_{p2}\phi_{2n} \\ -c_{p3}\phi_{3j} & -c_{p3}\phi_{3j+1} & \dots & \dots & -c_{p3}\phi_{3n} \end{bmatrix}$$

$$C_{ev(n \times 5)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -c_{p1}\phi_{1j} & -c_{p2}\phi_{2j} & -c_{p3}\phi_{3j} \\ \vdots & \vdots & -c_{p1}\phi_{1j+1} & -c_{p2}\phi_{2j+1} & -c_{p3}\phi_{3j+1} \\ & & \vdots & \vdots & \vdots \\ & & -c_{p1}\phi_{1n} & -c_{p2}\phi_{2n} & -c_{p3}\phi_{3n} \end{bmatrix}$$

$$K_{ee(n \times n)} = \begin{bmatrix} k_{ej} + \sum_{i=1}^3 k_{pi} \phi_{ij}^2 & \sum_{i=1}^3 k_{pi} \phi_{ij} \phi_{ij+1} & \dots & \sum_{i=1}^3 k_{pi} \phi_{ij} \phi_{in} \\ \sum_{i=1}^3 k_{pi} \phi_{ij+1} \phi_{ij} & k_{ej+1} + \sum_{i=1}^3 k_{pi} \phi_{ij+1}^2 & \dots & \sum_{i=1}^3 k_{pi} \phi_{ij+1} \phi_{in} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \sum_{i=1}^3 k_{pi} \phi_{in} \phi_{ij} & \sum_{i=1}^3 k_{pi} \phi_{in} \phi_{ij+1} & \dots & k_{en} + \sum_{i=1}^3 k_{pi} \phi_{in}^2 \end{bmatrix}$$

$$K_{vv(5x5)} = \begin{bmatrix} k_{v1} + k_{v2} + k_{v3} & -k_{v1}L_1 - k_{v2}L_2 + k_{v3}L_3 & -k_{v1} & -k_{v2} & -k_{v3} \\ -k_{v1}L_1 - k_{v2}L_2 + k_{v3}L_3 & k_{v1}L_1^2 + k_{v2}L_2^2 + k_{v3}L_3^2 & k_{v1}L_1 & k_{v2}L_2 & -k_{v3}L_3 \\ -k_{v1} & k_{v1}L_1 & k_{v1} + k_{p1} & 0 & 0 \\ -k_{v2} & k_{v2}L_2 & 0 & k_{v2} + k_{p2} & 0 \\ -k_{v3} & -k_{v3}L_3 & 0 & 0 & k_{v3} + k_{p3} \end{bmatrix}$$

$$K_{ve(5xn)} = \begin{bmatrix} 0 & \dots \\ 0 & \dots \\ -k_{p1}\phi_{1j} & -k_{p1}\phi_{1j+1} & \dots & \dots & -k_{p1}\phi_{1n} \\ -k_{p2}\phi_{2j} & -k_{p2}\phi_{2j+1} & \dots & \dots & -k_{p2}\phi_{2n} \\ -k_{p3}\phi_{3j} & -k_{p3}\phi_{3j+1} & \dots & \dots & -k_{p3}\phi_{3n} \end{bmatrix}$$

$$K_{ev(nx5)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -k_{p1}\phi_{1j} & -k_{p2}\phi_{2j} & -k_{p3}\phi_{3j} \\ \vdots & \vdots & -k_{p1}\phi_{1j+1} & -k_{p2}\phi_{2j+1} & -k_{p3}\phi_{3j+1} \\ & & \vdots & \vdots & \vdots \\ & & -k_{p1}\phi_{1n} & -k_{p2}\phi_{2n} & -k_{p3}\phi_{3n} \end{bmatrix}$$

$$P_{e(nx1)} \begin{bmatrix} -\phi_{1j}(k_{p1}u_{r1} + c_{p1}\dot{u}_{r1}) - \phi_{2j}(k_{p2}u_{r2} + c_{p2}\dot{u}_{r2}) - \phi_{3j}(k_{p3}u_{r3} + c_{p3}\dot{u}_{r3}) \\ -\phi_{1j+1}(k_{p1}u_{r1} + c_{p1}\dot{u}_{r1}) - \phi_{2j+1}(k_{p2}u_{r2} + c_{p2}\dot{u}_{r2}) - \phi_{3j+1}(k_{p3}u_{r3} + c_{p3}\dot{u}_{r3}) \\ \vdots \\ -\phi_{1n}(k_{p1}u_{r1} + c_{p1}\dot{u}_{r1}) - \phi_{2n}(k_{p2}u_{r2} + c_{p2}\dot{u}_{r2}) - \phi_{3n}(k_{p3}u_{r3} + c_{p3}\dot{u}_{r3}) \end{bmatrix}$$

$$P_{e(5x1)} \begin{bmatrix} -P_v \\ 0 \\ -P_{p1} \\ -P_{p2} \\ -P_{p3} \end{bmatrix}$$

Capítulo 3

Implementação Computacional

Com o avanço da tecnologia dos multiprocessadores e das placas gráficas (GPU's), os métodos numéricos vêm ganhando cada vez mais espaço na engenharia estrutural. Além disso, os softwares estão sendo programados com ferramentas mais modernas e rápidas.

A introdução das GPU's para o processamento de dados numéricos e não só dos dados gráficos, possibilitou que linguagens de programação orientadas a objetos, como *Object C++* e *Object Pascal*, pudessem interagir de forma ágil com linguagens de fácil programação numérica como o *FORTRAN*, executando milhares de linhas de códigos matemáticos em segundos.

Para que este trabalho pudesse ser realizado de forma organizada e precisa, houve a necessidade de desenvolver uma ferramenta computacional interativa que auxilie o usuário no pré e pós-processamento dos resultados para que uma grande massa de dados possa ser analisada simultaneamente e automaticamente organizada.

3.1 Comunicação entre linguagens

A interface gráfica foi desenvolvida em linguagem *Object Pascal* através do software *Borland Delphi*. As rotinas referentes aos cálculos da interação veículo-pavimento-estrutura foram realizadas em linguagem *FORTRAN*.

As transferências de dados entre linguagens utilizadas foram feitas com arquivos de interconexão, ou seja, arquivos que simultaneamente enviam e recebem dados durante a execução das análises.

A parte gráfica foi implementada em linguagem *OpenGL* com o pacote (*toolkit*) *Open Source GLScene*.

Todas as rotinas foram comentadas durante a programação para que futuras implementações ocorram com facilidade e agilidade no software IVPE-v.2. Além disso, no anexo B está descrito o manual de utilização que segue com o programa.

3.2 Visão geral do software

O software possui uma interface gráfica amigável, projetada para facilitar a interação com o usuário.

Na implementação, as técnicas de pré e pós-processamento gráfico foram desenvolvidas para o controle visual dos dados de entrada e dos resultados das análises realizadas.

O programa utiliza o Método dos Elementos Finitos para efetuar a análise linear estática e dinâmica de pórticos espaciais, possibilitando o cálculo de deslocamentos, esforços e reações de apoio além das frequências naturais e modos de vibração da estrutura previstos pelo usuário.

Um sistema de documentação *online* orienta o usuário na utilização do software, bem como na atribuição de valores para parâmetros de cálculo e interpretação dos resultados. Por fim, um relatório da análise estrutural é apresentado em arquivo texto que pode ser editado pelo usuário. A Figura 3.1 mostra o fluxograma geral do software.

3.3 Pré-processamento

3.3.1 Interface

A interface proporciona ao usuário um rápido acesso aos comandos mais importantes da análise estática e modal, como a geometria da seção transversal da ponte, as propriedades dos materiais empregados, tipo de pavimento e seus parâmetros de rugosidade além dos dados do veículo. A Figura 3.2 mostra a janela de abertura do software e a Figura 3.3 o fluxograma do pré-processador.

O sistema de unidades incorporado no programa é o SI (Sistema Internacional).

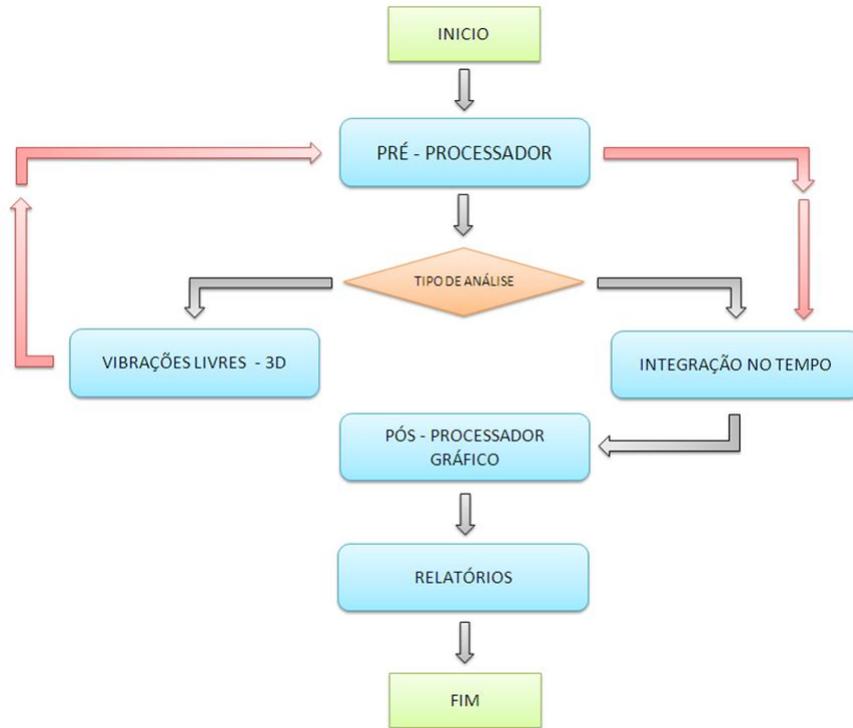


Figura 3.1: Fluxograma geral do IVPE-v.2

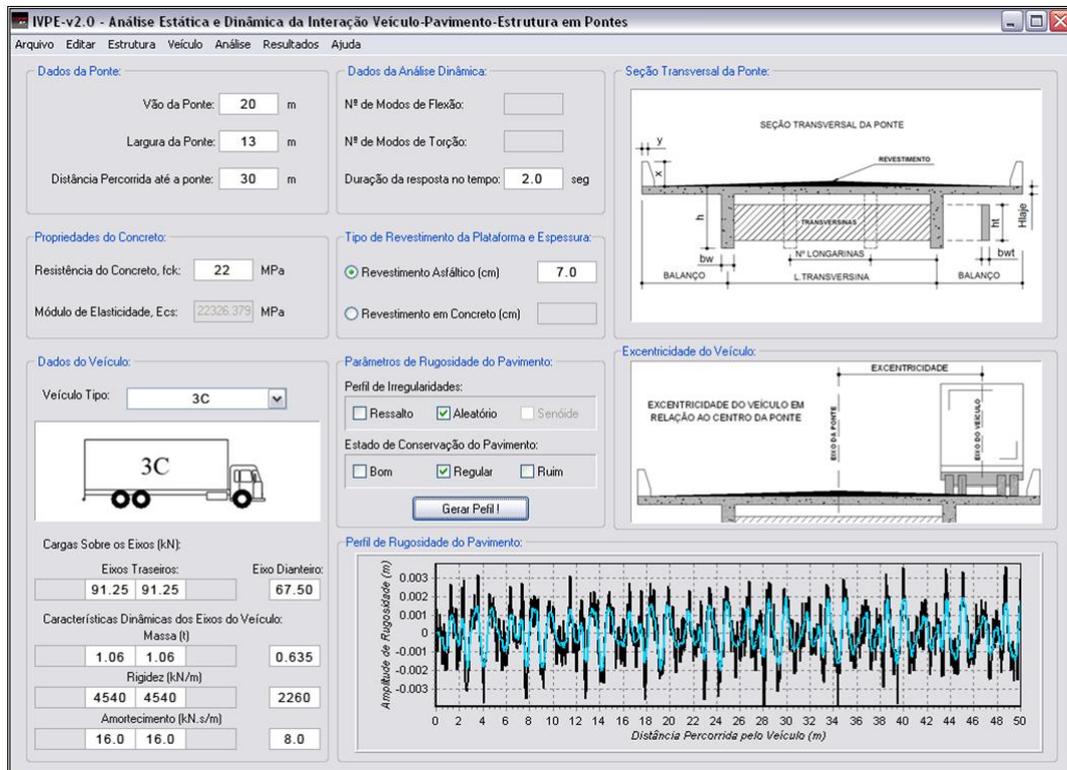


Figura 3.2: Janela de abertura do software IVPE-v.2

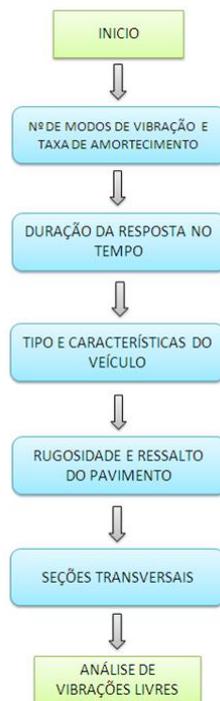


Figura 3.3: Fluxograma do pré-processador

3.3.2 Parâmetros de geometria e dos materiais

Para a definição dos parâmetros de cálculo podemos acessar o grupo de dados da ponte no canto superior esquerdo, como mostra a Figura 3.2. Nesta área são definidos, o vão livre entre apoios da ponte, a largura total da plataforma, incluindo os balanços da laje e a distância de aproximação do veículo sobre base rígida até a chegada à cabeceira da ponte. Esta distância, ilustrada na Figura 3.4, é fundamental para que o veículo estabilize seus deslocamentos em função da rugosidade do pavimento antes de passar sobre a estrutura, procedimento este que evita erros numéricos.

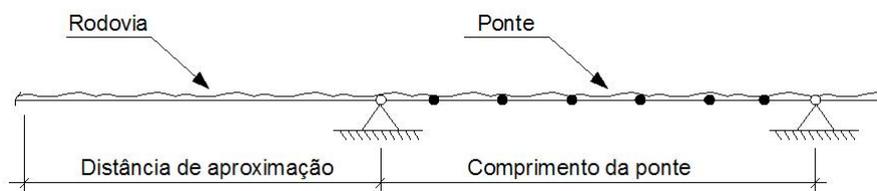


Figura 3.4: Distância de aproximação considerada.

À direita da janela ilustrada na Figura 3.2, são introduzidos os números de modos

de vibração de flexão e torção escolhidos previamente pelo usuário, através de um sistema gráfico e a duração da resposta no tempo para integração numérica das equações de movimento apresentadas no Capítulo 2.

Nos dois grupos inferiores o usuário define a resistência a compressão (f_{ck}) do concreto e o tipo e espessura da camada de pavimentação asfáltica ou de concreto. O módulo de elasticidade secante do concreto é automaticamente calculado pelo programa utilizando a equação prevista na norma brasileira NBR-6118 (2003).

As imagens que são apresentadas na tela principal auxiliam toda a fase de pré-processamento do software. Os menus de acesso às geometrias são apresentados nas Figuras 3.5 a 3.8.



Figura 3.5: Geometria das longarinas



Figura 3.6: Geometria das transversinas

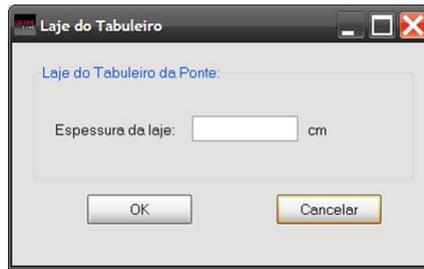


Figura 3.7: Espessura da Laje do Tabuleiro



Figura 3.8: Geometria do Guarda-Rodas

3.3.3 Processo de discretização do modelo

A discretização do modelo numérico espacial da ponte pode ser feita através do menu mostrado na Figura 3.9. Existem três níveis possíveis de discretização: normal, médio e refinado. Para pontes de vãos acima de 30m é interessante que o nível esteja estabelecido em médio ou refinado para que dois nós consecutivos do modelo não fiquem distantes um do outro, prejudicando a passagem do veículo no tempo.



Figura 3.9: Menu de discretização do Modelo

3.3.4 Propriedades das seções transversais

As propriedades como espessura da laje, balanços do tabuleiro e as seções transversais das longarinas, transversinas e guarda-rodas podem ser acessadas pelos menus mostrados nas Figuras 3.5 a 3.8. A seção transversal das longarinas é calculada como uma seção “T” assimétrica, incorporando a laje, o balanço do tabuleiro e a meia distância até a outra longarina, como mostra a Figura 3.10. O usuário também tem a opção de efetuar os cálculos com a seção “T” prevista na NBR-6118 (2003) através da largura efetiva (b_f) da mesa colaborante mostrada na Figura 3.11.

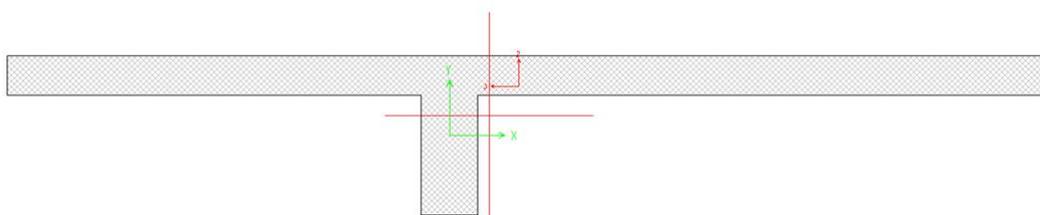


Figura 3.10: Seção Transversal das longarinas

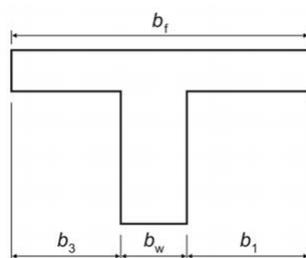


Figura 3.11: Largura de mesa colaborante NBR-6118 (2003)

Para o guarda-rodas o programa permite duas considerações. A primeira admite que o guarda-rodas é colocado na plataforma após a concretagem das lajes, com isto o software não inclui a contribuição daquele para o cálculo da rigidez à flexão da seção das longarinas, mas adiciona uma massa por unidade de comprimento correspondente para o cálculo de vibrações livres. O mesmo acontece para a massa adicional da pavimentação. A segunda opção é a concretagem do guarda-rodas junto com o tabuleiro, aumentando a rigidez da seção.

3.3.5 Dados dos veículos

O software conta com um banco de dados já cadastrado com as seis classes de veículos pesados mais comuns nas rodovias brasileiras segundo o histograma de pesos descrito em (ROSSIGALI, 2006) e mostrado na Figura 3.12.

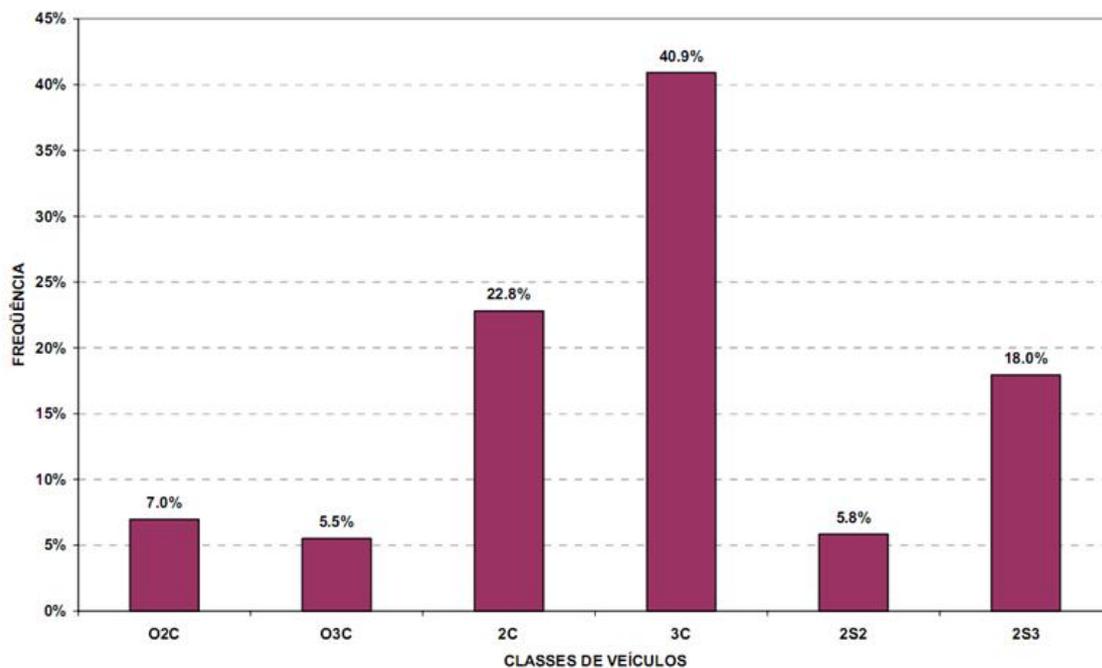


Figura 3.12: Distribuição de frequências para os veículos mais pesados.

(ROSSIGALI, 2006)

Com a escolha de um determinado veículo, automaticamente as propriedades de massa, rigidez, amortecimento e as distâncias entre eixos são preenchidas considerando características médias de veículos comerciais. Porém, se o usuário desejar ele pode alterar qualquer um dos campos na cor branca (Figura 3.2). Os campos na cor cinza são bloqueados em função das escolhas realizadas evitando o preenchimento incorreto e conseqüentemente erros de análise.

3.3.6 Dados sobre o pavimento

O perfil de irregularidades do pavimento e o estado de conservação da via podem ser definidos nos grupos à direita dos parâmetros dos veículos (ver Figura 3.2). É possível utilizar uma função senoidal ou perfis gerados por um processo aleatório gaussiano, ergódico com três tipos de ressaltos: recalque da laje de acesso a ponte,

uma ripa de madeira que pode ser posicionada ao longo da pista ou juntas de dilatação. Após esta etapa de preenchimento pode-se gerar o gráfico do perfil com um simples clique do mouse.

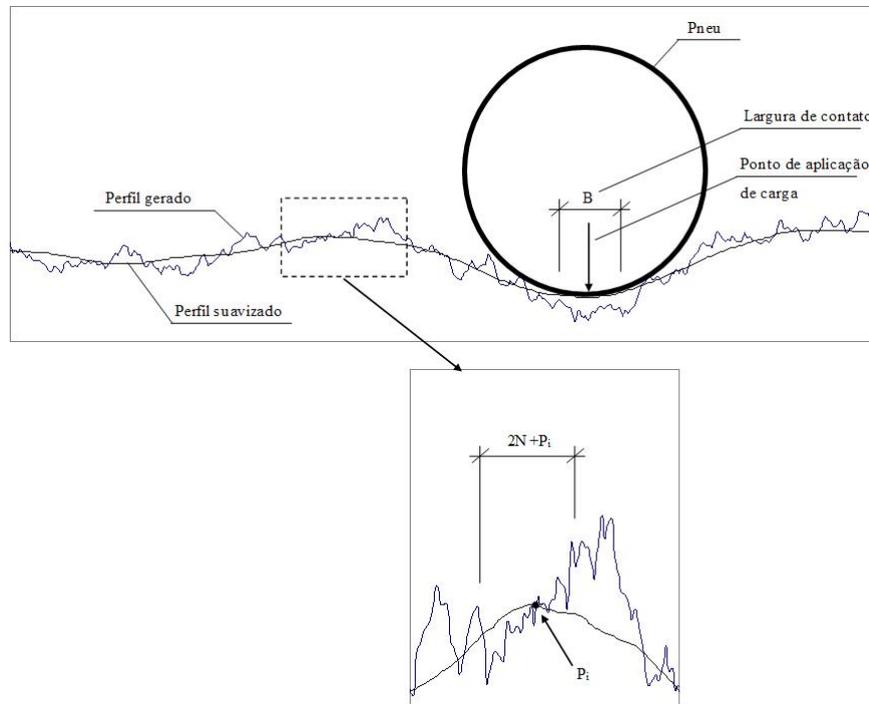


Figura 3.13: Processo de suavização do perfil de irregularidade longitudinal. MELO (2007)

O perfil foi submetido a uma suavização para que se pudesse considerar a área de contato entre os pneus e o pavimento de forma mais realística. Para a suavização foi aplicado um processo conhecido como média móvel, onde se substitui cada ponto P_i do perfil original pelo valor da média aritmética calculada entre N pontos à esquerda e N pontos a direita de P_i , além é claro do próprio valor da amplitude em P_i . A Figura 3.13 ilustra mais claramente o processo de aplicação da média móvel. Foi considerada uma distância de aproximação de 50m para o veículo antes de trafegar sobre a estrutura.

3.4 Processador

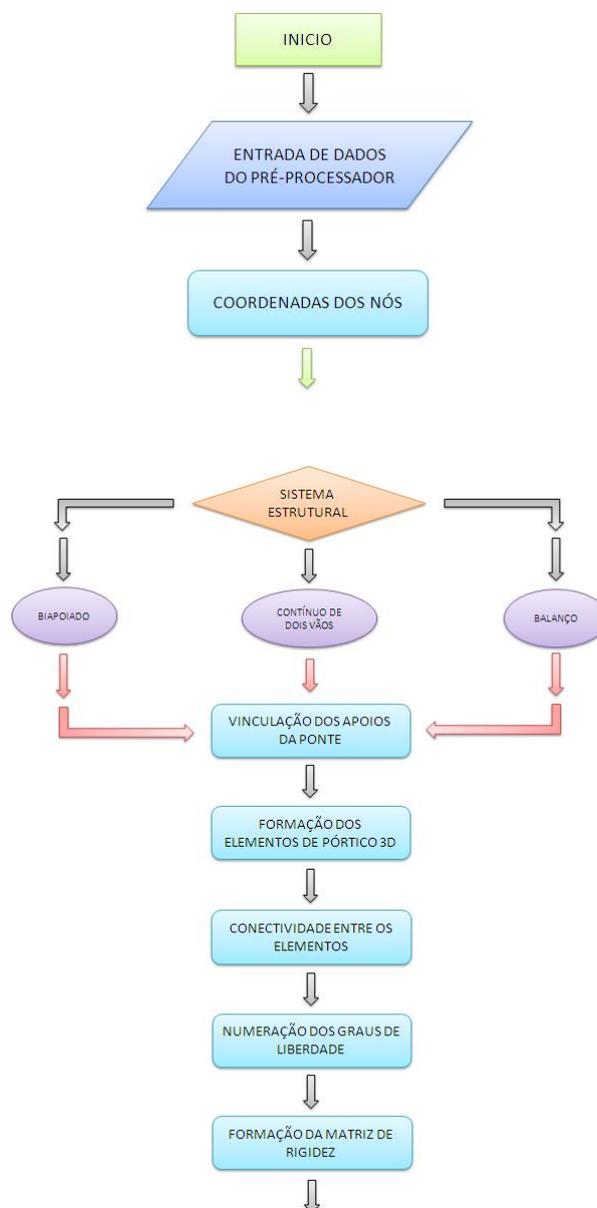
O processamento das análises é dividido em duas etapas. Primeiramente é feito a análise de vibrações livres do pórtico espacial e depois a análise da integração

numérica no tempo, com o modelo unifilar através do método de Runge-Kutta de 4ª ordem para resolução do sistema de equações diferenciais de movimento no tempo.

3.4.1 Análise de Vibrações Livres 3D

Após a fase do pré-processamento, o software entra com os dados da análise de vibrações livres nas rotinas de formação das matrizes de rigidez e massa, e na rotina de Jacobi (BATHE, 1992) para o cálculo dos autovalores e autovetores.

O fluxograma da Figura 3.14 mostra as etapas principais que serão descritas neste item do capítulo.



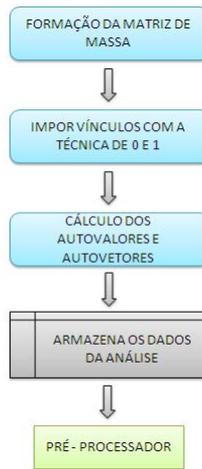


Figura 3.14: Fluxograma da análise de vibrações livres 3D

3.4.2 Coordenadas dos nós

Com os dados recebidos do pré-processador o fluxo de processo segue para a geração da posição dos nós dos elementos no espaço xyz , cuja orientação dos eixos é mostrada na Figura 3.15. Neste momento, em função da discretização pré-definida do modelo, os nós são renumerados, assim como os seus respectivos graus de liberdade para a transformação do modelo 3D em modelo unifilar.

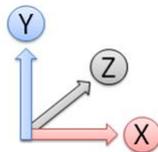


Figura 3.15: Orientação dos eixos coordenados no espaço

3.4.3 Tipos de Esquemas Estruturais

Existem três possíveis sistemas estruturais que podem ser utilizados para avaliação da influência da interação dinâmica entre veículo-pavimento-estrutura: o sistema biapoiado, o com dois vãos contínuos e o sistema biapoiado com balanço, sendo o último uma situação crítica para a passagem dos veículos quando existe o ressalto na ponta do balanço. A Figura 3.16 apresenta os modelos implementados.

Com o sistema escolhido, são então atribuídos aos nós dos apoios os vínculos necessários e os elementos do pórtico espacial são formados através de um vetor de conectividade entre os nós.

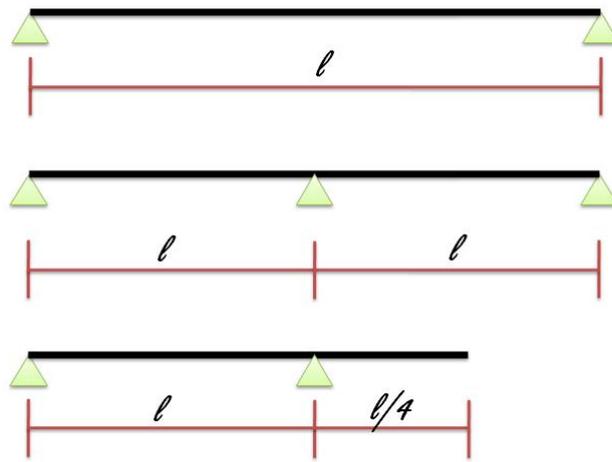


Figura 3.16: Esquemas estruturais

3.4.4 Matrizes de Rigidez e Massa

A biblioteca de elementos do IVPE-v.2 contempla elementos de pórtico espacial e pórtico plano. A seguir é feita uma descrição dos elementos empregados.

Para o pórtico espacial, o elemento tridimensional é definido por dois pontos nodais, com seis graus de liberdade em cada nó (três deslocamentos e três rotações) e cujo comprimento (L) é relativamente maior que as dimensões da seção transversal, conforme observado na Figura 3.17.

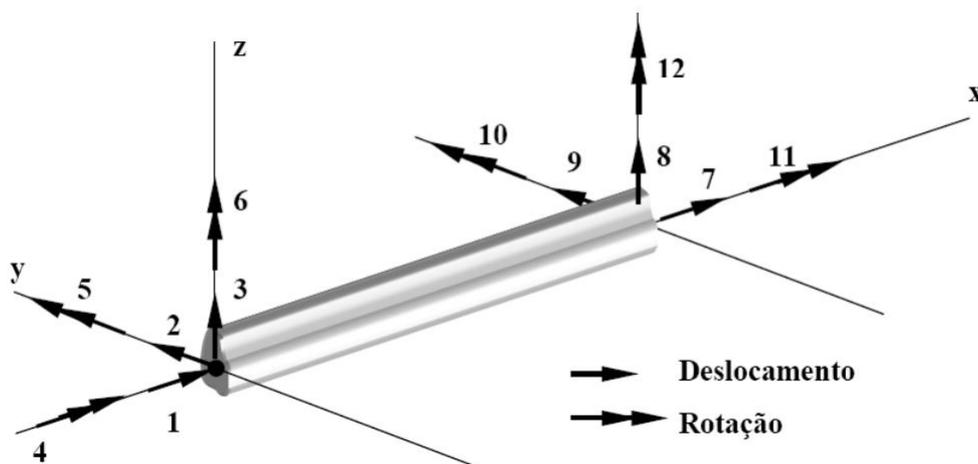


Figura 3.17: Elemento de pórtico espacial.

A formulação do elemento de pórtico espacial, cuja matriz de rigidez possui dimensão 12×12 , é facilmente encontrada na literatura técnica (BATHE, 1992; COOK, 1995). As Figuras 3.18 e 3.19 apresentam as matrizes de rigidez e massa.

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix}
\frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & \frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_z}{L^2} & 0 & -\frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_z}{L^2} \\
0 & 0 & \frac{12EI_y}{L^3} & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2} & 0 & 0 & 0 & -\frac{12EI_y}{L^3} & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2} & 0 \\
0 & 0 & 0 & \frac{GI_x}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{GI_x}{L} & 0 & 0 \\
0 & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2} & 0 & \frac{4EI_y}{L} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_y}{L^2} & 0 & \frac{2EI_y}{L} & 0 \\
0 & \frac{6EI_z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_z}{L} & 0 & -\frac{6EI_z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{2EI_z}{L} \\
-\frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & -\frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & -\frac{6EI_z}{L^2} & 0 & \frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & -\frac{6EI_z}{L^2} \\
0 & 0 & -\frac{12EI_y}{L^3} & 0 & \frac{6EI_y}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{12EI_y}{L^3} & 0 & \frac{6EI_y}{L^2} & 0 \\
0 & 0 & 0 & -\frac{GI_x}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{GI_x}{L} & 0 & 0 \\
0 & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2} & 0 & \frac{2EI_y}{L} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_y}{L^2} & 0 & \frac{4EI_y}{L} & 0 \\
0 & \frac{6EI_z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{2EI_z}{L} & 0 & -\frac{6EI_z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_z}{L}
\end{bmatrix}$$

Figura 3.18: Matriz de rigidez do elemento de pórtico espacial

Com relação à matriz de massa, optou-se pelo emprego de uma matriz de massa consistente a qual é também definida por uma matriz de dimensão 12x12.

$$\mathbf{M} = \rho A l \begin{bmatrix}
\frac{1}{3} & & & & & & & & & & & \\
0 & \frac{13}{35} & & & & & & & & & & \\
0 & 0 & \frac{13}{35} & & & & & & & & & \\
0 & 0 & 0 & \frac{J}{3A} & & & & & & & & \\
0 & 0 & -\frac{11}{210}l & 0 & \frac{l^2}{105} & & & & & & & \\
0 & \frac{11}{210}l & 0 & 0 & 0 & \frac{l^2}{105} & & & & & & \\
\frac{1}{6} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{3} & & & & & \\
0 & \frac{9}{70} & 0 & 0 & 0 & \frac{13}{420}l & 0 & \frac{13}{35} & & & & \\
0 & 0 & \frac{9}{70} & 0 & -\frac{13}{420}l & 0 & 0 & 0 & \frac{13}{35} & & & \\
0 & 0 & 0 & \frac{J}{6A} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{J}{3A} & & \\
0 & 0 & \frac{13l}{420} & 0 & -\frac{l^2}{140} & 0 & 0 & 0 & \frac{11}{210}l & 0 & \frac{l^2}{105} & \\
0 & -\frac{13}{420}l & 0 & 0 & 0 & -\frac{l^2}{140} & 0 & -\frac{11}{210}l & 0 & 0 & 0 & \frac{l^2}{105}
\end{bmatrix}$$

Simétrica

Figura 3.19: Matriz de massa do elemento de pórtico espacial

Na Figura 3.19 (ρ) é a massa específica, (A) a área da seção transversal, (l) o comprimento e (J) o momento polar de inércia do elemento.

3.4.5 Autovalores e Autovetores

Em geral existem dois tipos de métodos disponíveis para a solução de problemas de autovalor, os métodos de transformação e os iterativos (BATHE, 1992). Os métodos de transformação, como os de Jacobi, Givens e Householder são preferíveis quando todos os autovalores e autovetores são necessários. Os métodos iterativos, como o método da potência, são melhores aproveitados quando somente alguns autovalores e autovetores são requeridos. Neste trabalho o método escolhido foi o de Jacobi, devido a fácil implementação.

A forma básica é representada pela expressão abaixo.

$$[H]\{X\} = \lambda\{X\} \quad (3.1)$$

onde $[H]$ é uma matriz simétrica, $\{X\}$ são os autovetores e λ os autovalores.

A base do método é um teorema da álgebra linear que diz que a matriz $[H]$ possui apenas autovalores reais e existe a matriz $[P]$ real e ortogonal à $[H]$ de forma que o produto $[P]^T[H][P]$ é diagonal. Os elementos desta diagonal são os autovalores e as colunas da matriz $[P]$ são os autovetores. A matriz $[P]$ é chamada matriz de transformação.

O Método de Jacobi consiste em aplicar à matriz $[H]$ simétrica, sucessivas “rotações” de tal forma a anular todos os elementos posicionados fora da diagonal principal. Desta forma, os elementos restantes na diagonal principal serão exatamente os autovalores de $[H]$. Onde $[H']$ é a matriz diagonalizada.

$$H = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & \dots & \dots & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & a_{ij} & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & a_n \end{bmatrix}$$

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \cos\alpha & 0 & \sin\alpha & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \sin\alpha & 0 & -\cos\alpha & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

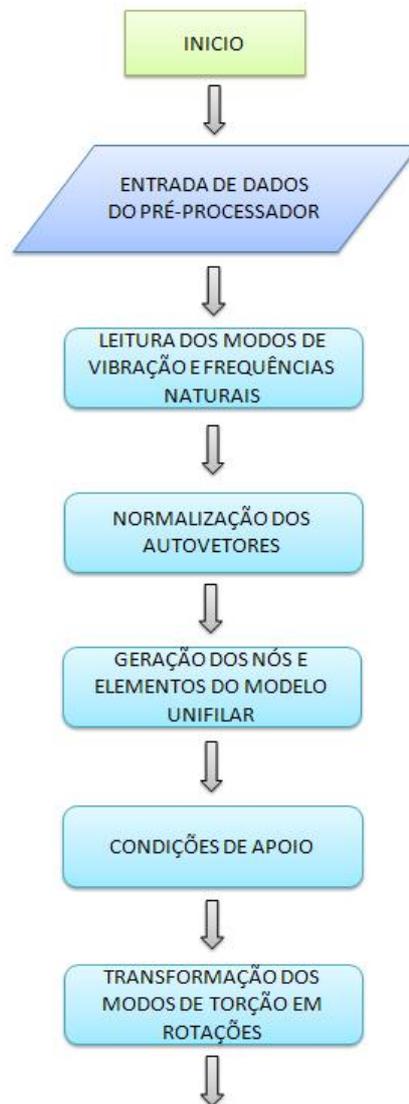
fazendo $[P]^T[H][P]$ temos,

$$H' = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_{ij} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_{nn} \end{bmatrix}$$

Com os dados gerados através do método de Jacobi, o IVPE-v.2 transfere os vetores contendo as formas modais para o pós-processador para que o usuário possa visualizar e escolher os modos de vibração que interessam para a análise da passagem dos veículos.

3.4.6 Integração numérica no tempo

Com os modos de vibração escolhidos e os dados da análise dinâmica que vêm do pré-processador as variáveis para a análise da passagem dos veículos com a interação com o pavimento e com a estrutura estão definidas. Da mesma forma que no item anterior serão descritas aqui as etapas principais de implementação da integração numérica no tempo. Na Figura 3.20 é apresentado o fluxograma deste processo.



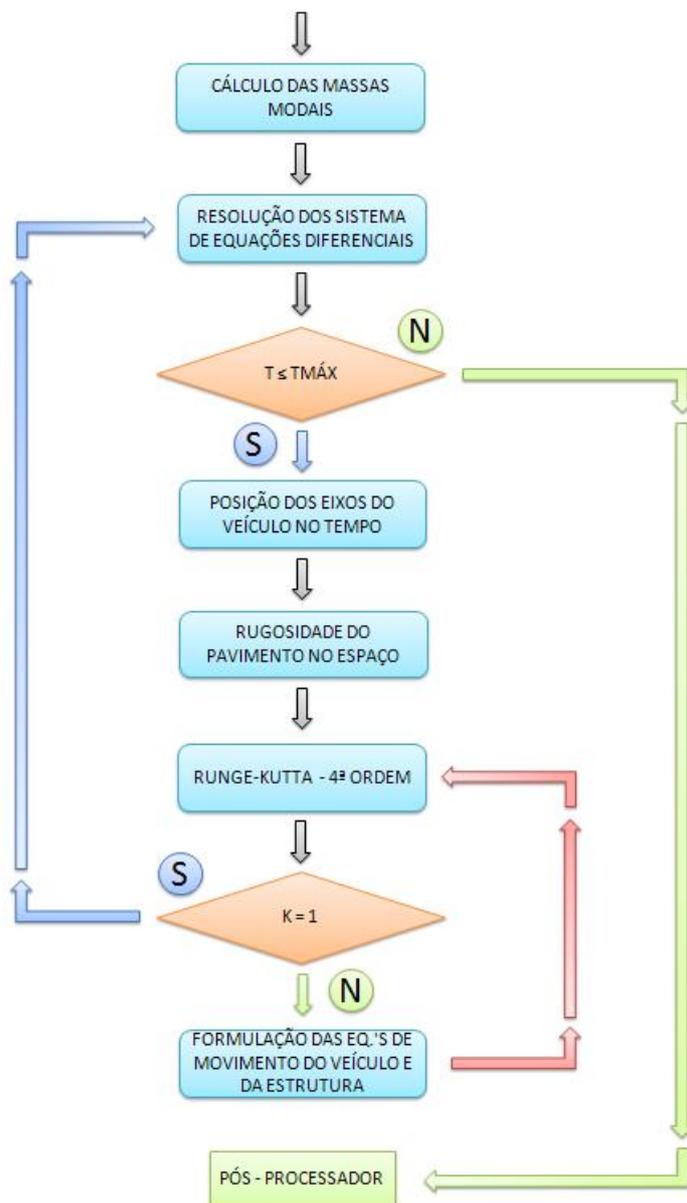


Figura 3.20: Fluxograma da integração numérica no tempo

3.4.7 Leitura e Normalização dos autovetores

Primeiro, o IVPE-v.2 calcula e extrai os modos de flexão vertical e torção de um modelo de grelha representativo da estrutura. A estrutura é modelada em elementos de pórtico espacial (Figura 3.21) com inércia e área equivalentes à seção transversal da estrutura. Observa-se, também na Figura 3.21, a ampliação e representação de um dos nós do modelo 3D e o grau de liberdade vertical considerado para a montagem dos autovetores do modelo unifilar. As rotações são obtidas através do giro da seção transversal como será explicado à seguir.

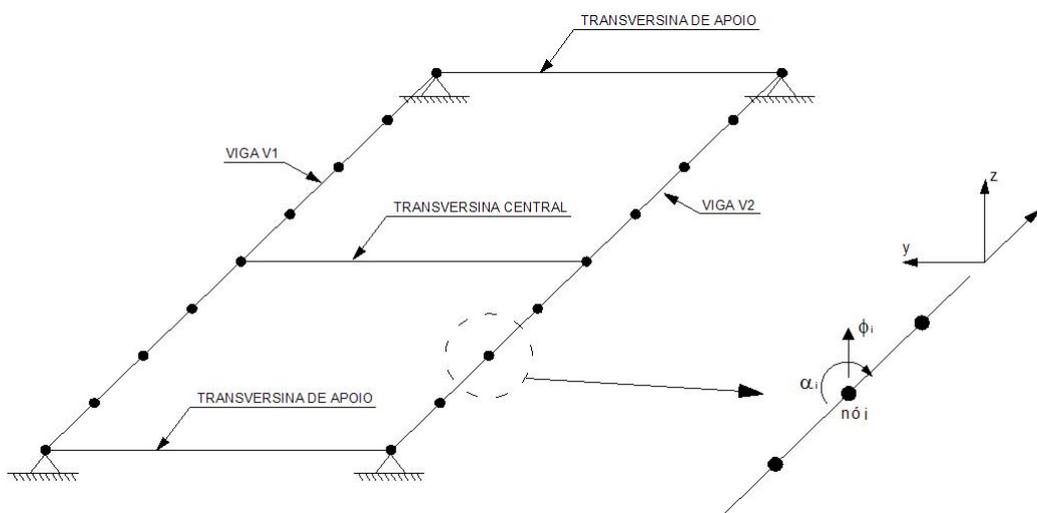


Figura 3.21: Representação da estrutura com elementos de pórtico espacial.

Os modos de flexão vertical, utilizados no programa, são obtidos diretamente pelas amplitudes modais (ϕ_{v1}) e (ϕ_{v2}) geradas no modelo 3D, conforme mostra a Figura 3.22. Já os modos de torção são considerados pela rotação (α_k) da seção transversal que é obtida pela relação entre as amplitudes verticais (ϕ_{T1}) e (ϕ_{T2}) dos modos de torção e a meia-distância ($\frac{e}{2}$) entre estes pontos e o eixo longitudinal de simetria (ver Figura 3.23). A relação é expressa pela equação 3.2.

$$\alpha_{ij} = \frac{\phi_{T1i} + \phi_{T2i}}{e} \quad (3.2)$$

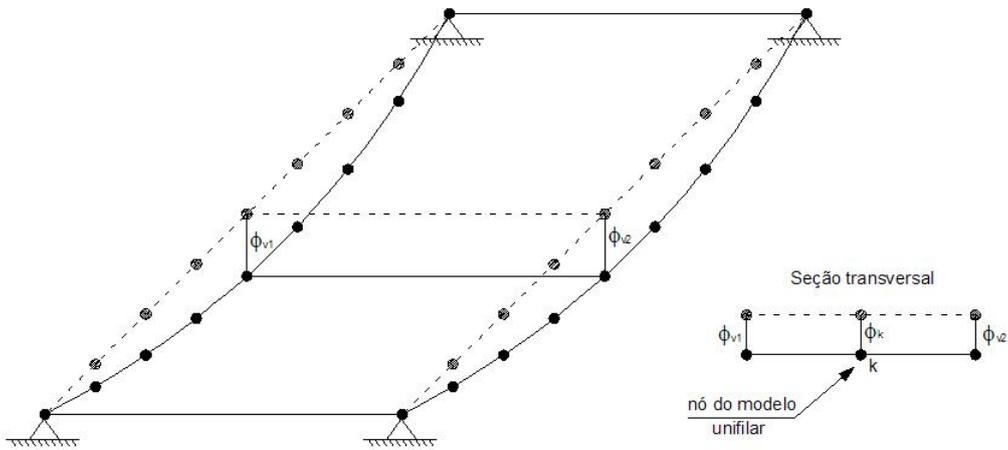


Figura 3.22: Primeiro modo de flexão

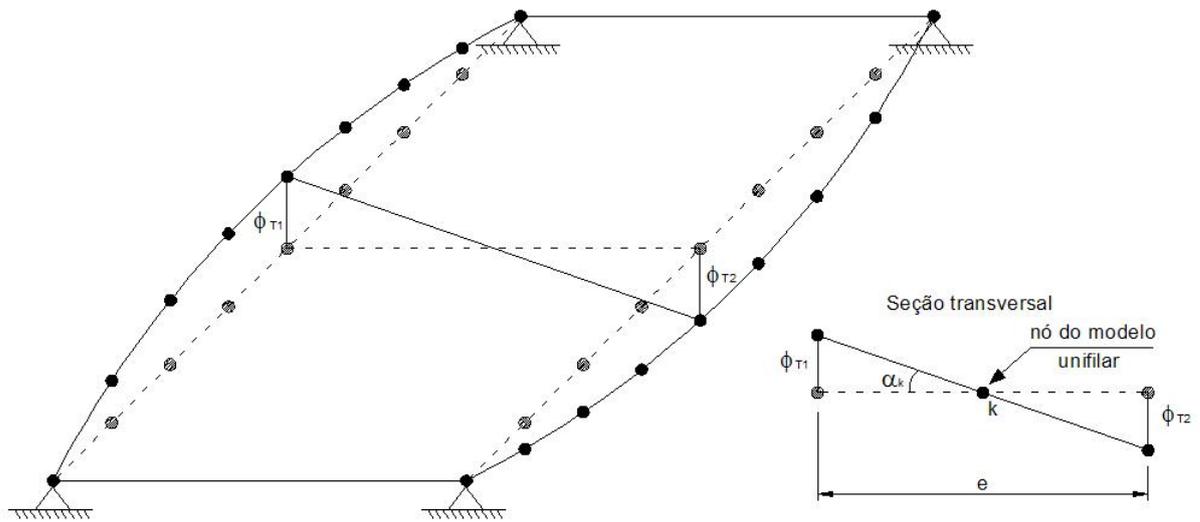


Figura 3.23: Primeiro modo de torção

3.4.8 Massas Modais e Posição do veículo no tempo

Após a normalização dos autovetores, calculam-se as massas modais para os modos de flexão e de torção de acordo com as equações 3.3 e 3.4 - válidas para estruturas de inércia constante ao longo do vão.

$$M_{Fj} = \bar{m}L \sum_{i=1}^n (\phi_{ij}^2) \quad (3.3)$$

$$M_{Tj} = I_p L \sum_{i=1}^n (\alpha_{ij}^2) \quad (3.4)$$

Nas equações acima, M_{Fj} é a massa modal para um modo j qualquer de flexão; M_{Tj} é a massa modal para um modo j qualquer de torção; L é o comprimento do elemento; $I_p = (I_y + I_z)$ é o momento de inércia de massa em torno do eixo longitudinal (momento polar de inércia); I_y e I_z são respectivamente os momentos de inércia (de massa) por unidade de comprimento em torno do eixo y e do eixo z do elemento de pórtico espacial; ϕ_{ij} e α_{ij} são componentes dos autovetores representativos das formas modais.

A atualização do grau de liberdade referente a posição dos eixos do veículo é feita de acordo com o seguinte procedimento: Num determinado instante de tempo $t_i \leq t < T$, com a posição do eixo do veículo até o ponto médio do elemento (ponto M), os arranjos são montados admitindo o grau de liberdade ϕ_i como sendo ϕ_c , onde c é o ponto de contato. Para um instante de tempo $T \leq t < t_j$, com o eixo posicionado à frente do ponto M o grau de liberdade ϕ_c passa a ser ϕ_j . A Figura 3.24 ilustra o procedimento.

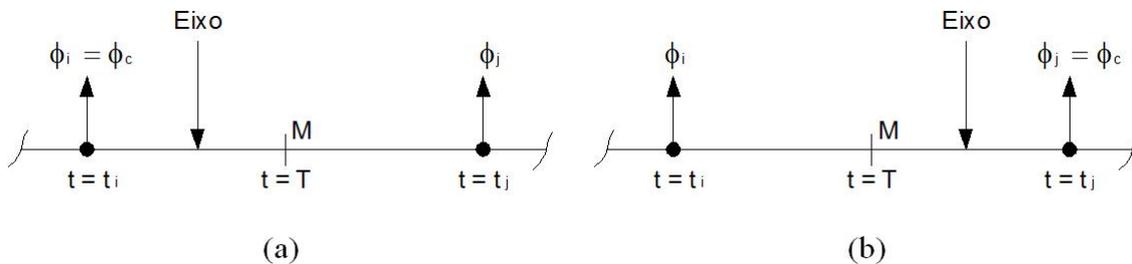


Figura 3.24: Atualização dos graus de liberdade.(a) posição do eixo antes do ponto M, (b) posição do eixo após o ponto M.

Deve-se ressaltar que as imprecisões geradas por este tipo de atualização dos graus de liberdade, para um refinamento razoável, são toleráveis (CARNEIRO, 1986).

3.4.9 O Método de Runge-Kutta de 4ª Ordem

O programa utiliza o Método de Runge-Kutta (PACITTI, 1976) para a integração das equações diferenciais no tempo. Abaixo é feito um resumo do método que é de importância fundamental para este trabalho.

Os métodos de Runge (Carl D. T. Runge, 1856-1927, matemático alemão) e Kutta (Martin W. Kutta, 1867-1944, matemático alemão) são dos mais antigos já utilizados para resolução de equações diferenciais. Todas as fórmulas de Runge-Kutta (de várias ordens, segundo a ordem de precisão das séries de Taylor correspondentes), destinadas a resolução de,

$$y' = f(x, y), \quad (3.5)$$

procuram exprimir y_{i+1} em termos de y_i e de $f(x, y)$, calculada em um ou mais pontos da região onde se encontram y_i e y_{i+1} .

Os métodos de Runge-Kutta admitem como forma genérica,

$$y_{i+1} = y_i + \left(\sum_{l=1}^m a_l k_l \right), \quad (3.6)$$

em que m é a ordem do método, os a_l são constantes e os k_l são produtos da amplitude do passo, h , pela função $f(x, y)$, calculada em vários pontos:

$$\left[x_i + p_l h, y_i + \left(\sum_{j=1}^{l-1} r_{lj} k_j \right) \right].$$

A determinação das constantes a_l , p_l e r_l é feita por meio da expansão da função $f(x, y)$ e dos k_l em séries de *Taylor*. Usando as expressões resultantes, determinamos as constantes de modo a otimizar a precisão do método.

O método de “quarta ordem”, apresenta precisão da ordem de $(\Delta x)^5$ e é utilizado para produzir uma solução precisa de um conjunto de equações diferenciais de primeira ordem. A forma final da equação de Runge-Kutta de quarta ordem é a seguinte:

$$y_{i+1} = y_i + \left[\frac{1}{6}k_1 + \frac{1}{3}k_2 + \frac{1}{3}k_3 + \frac{1}{6}k_4 \right],$$

onde,

$$\begin{aligned} k_1 &= [\Delta x]f(x_i, y_i) \\ k_2 &= [\Delta x]f\left(x_i + \frac{\Delta x}{2}, y_i + \frac{1}{2}k_1\right) \\ k_3 &= [\Delta x]f\left(x_i + \frac{\Delta x}{2}, y_i + \frac{1}{2}k_2\right) \\ k_4 &= [\Delta x]f(x_i + \Delta x, y_i + k_3) \end{aligned}$$

Um ponto importante a ressaltar, quanto a este método, é o de que conduz a solução bastante precisa, para um passo de amplitude relativamente grande, da ordem de $\Delta t = 0,001s$, apesar de se tratar de um método de “passo único”.

3.4.10 Dados de Entrada para Integração Numérica

Os dados de entrada para utilização do método de integração numérica são:

- Modos de vibração e frequências naturais da estrutura;
- Massas suspensas (e momentos de inércia) e não suspensa dos veículos;
- Valores de rigidez (k) e coeficiente de amortecimento (c) dos veículos;
- Distância dos eixos ao centro de massa do veículo;
- Os dados do pavimento são fornecidos através de tabelas com amplitudes do perfil ao longo da posição longitudinal e com a declividade em cada ponto.

A determinação das condições iniciais dos graus de liberdade do veículo (u_v, θ_v, u_{p1} e etc) é tomada pelos deslocamentos (ou rotações) obtidos pelo equilíbrio estático sob a ação do peso próprio do veículo.

Com a convergência do método, os resultados de saída da solução das equações diferenciais são expressos em deslocamentos e velocidades do veículo e da estrutura do modelo unifilar no tempo. Para a determinação dos esforços críticos, momento fletor no meio do vão e cortante no apoio, os elementos dos autovetores ϕ_{jk} são multiplicados pelas amplitudes modais u_e através da equação 2.29 para obtenção

dos deslocamentos da estrutura do modelo 3D em função da passagem do veículo. Os esforços são então finalmente obtidos pela expressão 3.7 no referencial local de cada elemento de pórtico espacial.

$$\{E\} = [K]\{U\} \quad (3.7)$$

Os dados são então enviados ao pós-processador para interpretação dos resultados através de gráficos, animações e relatórios.

3.5 Pós-Processamento e Interpretação dos Resultados

O pós-processador gráfico foi desenvolvido em linguagem *Object Pascal* implementado com a API gráfica *OpenGL*. Apesar de levar muito tempo para ser desenvolvido, desde o início do trabalho já se vislumbrou que a idéia de um pós-processador seria de grande utilidade na fase de interpretação dos resultados devido a grande massa de resultados a serem avaliados. A geração destes resultados somente numéricos para todos os graus de liberdade do modelo no tempo criaria arquivos de dados da ordem de $250Mb$ por caso analisado, tornando seu armazenamento praticamente inviável, além da enorme mão-de-obra para gerar gráficos com esse tamanho no *Excel*®, que limita seus gráficos de dados a 32000 pontos, metade do necessário para o pior caso.

Para que este e outros problemas computacionais fossem resolvidos, a interface gráfica também usou o recurso do tempo para criar animações do movimento da estrutura analisada de forma que os dados fossem alocados na memória de forma dinâmica, economizando espaço e velocidade de processamento.

Neste item serão descritos todos os tipos de visualização disponíveis no software IVPE-v.2. O fluxograma básico é mostrado na Figura 3.25.

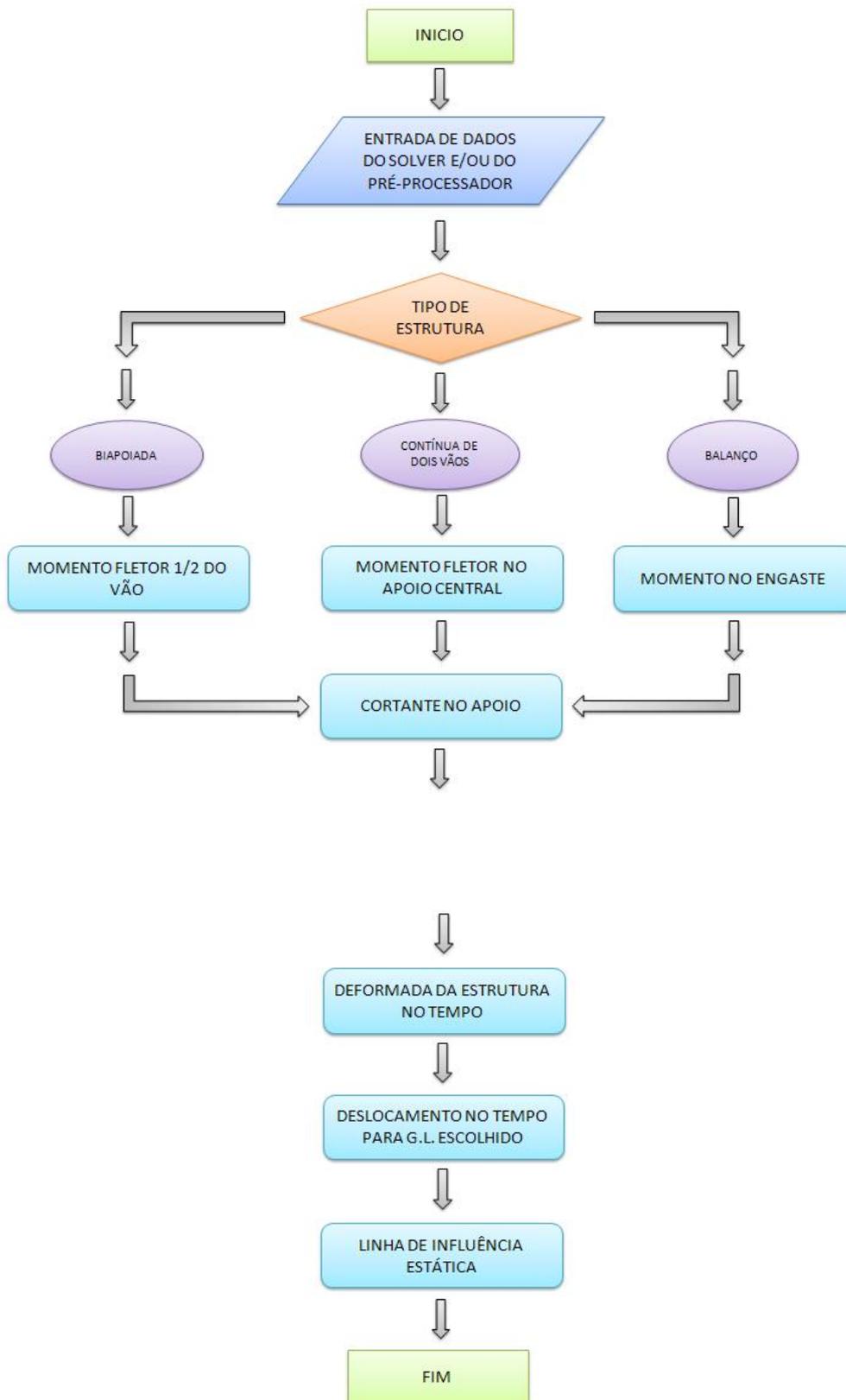


Figura 3.25: Fluxograma do pós-processamento

3.5.1 Geometria 3D

O modelo da geometria tridimensional foi desenvolvido para que a conferência das proporções da estrutura fosse facilitada. A geometria 3D representa todas as dimensões reais da estrutura tais como lajes, balanços, longarinas e transversinas. A Figura 3.26 mostra um exemplo de uma ponte com 10m de vão, duas longarinas e quatro transversinas.

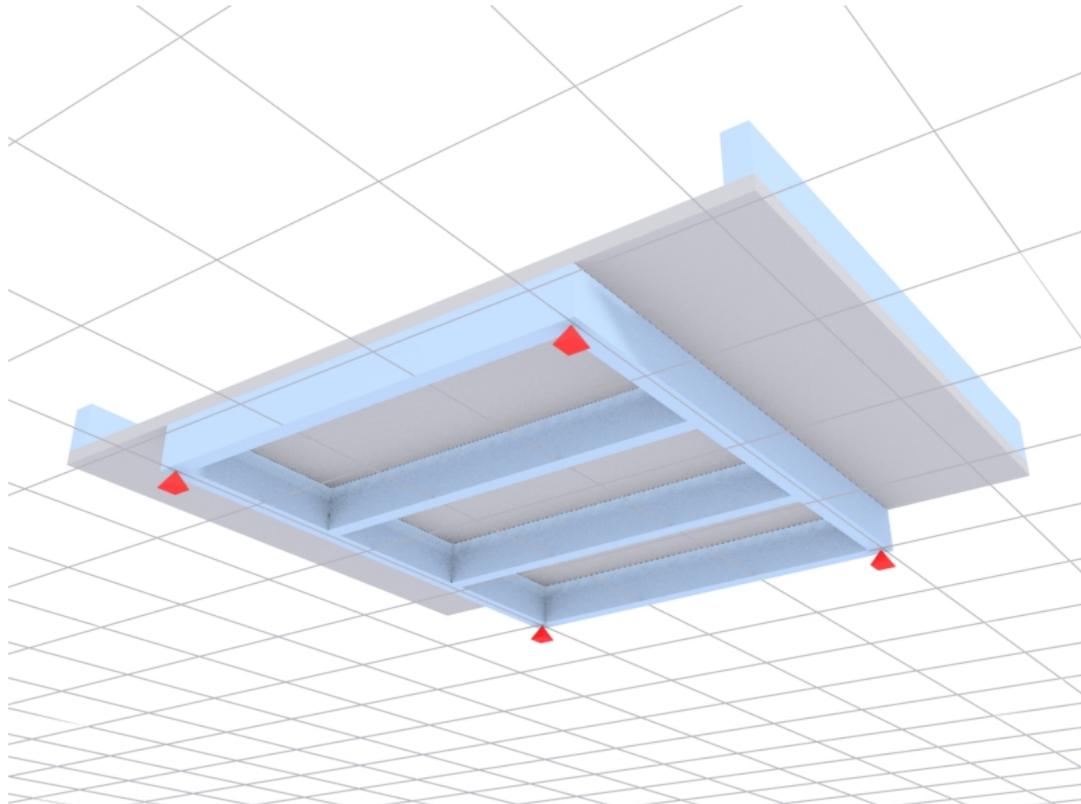


Figura 3.26: Modelo 3D de ponte biapoiada com 10m de vão

3.5.2 Modelo Numérico

O modelo numérico apresenta a estrutura a ser analisada já discretizada em elementos finitos de barras espaciais compostas pelos elementos, nós de ligação e condições de apoio conforme o tipo de esquema estrutural adotado. A Figura 3.27 mostra este tipo de visualização para o modelo de ponte apresentado no item anterior.

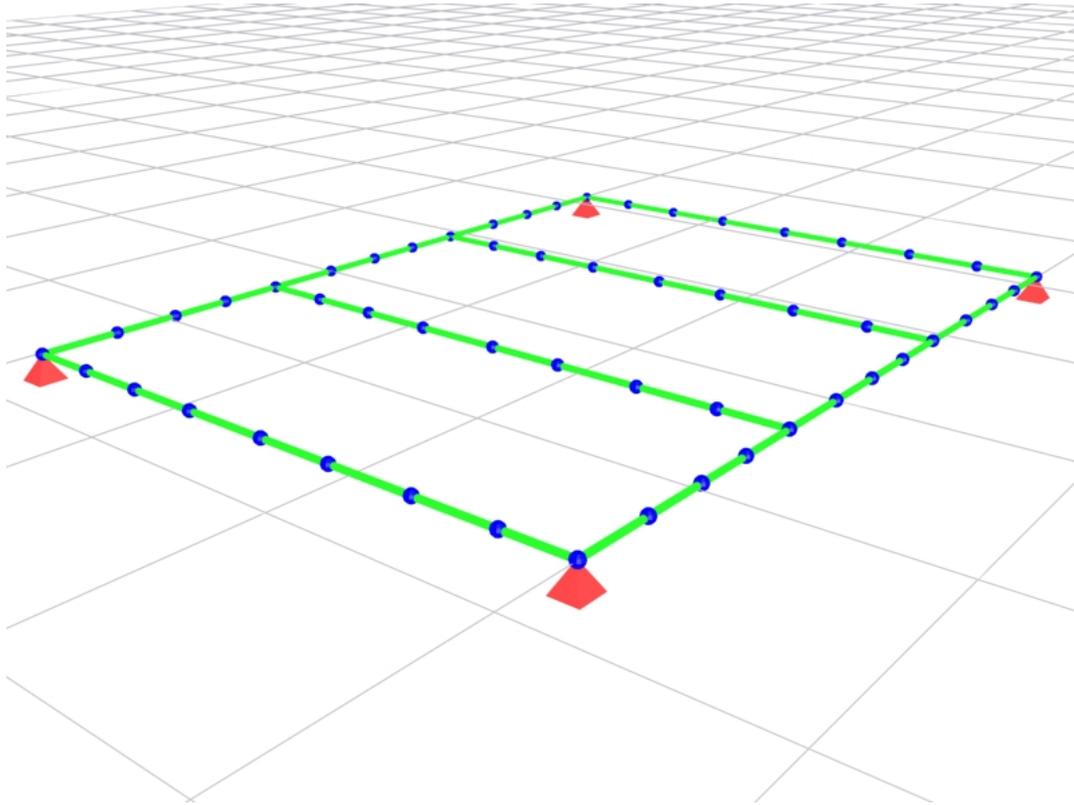


Figura 3.27: Modelo numérico 3D

3.5.3 Visualização dos Modos de Vibração da Estrutura

Antes de realizar a análise da passagem dos veículos sobre a estrutura é necessário visualizar as formas modais resultantes da análise de vibrações livres. Com isto pode-se definir quais os modos de flexão e torção serão utilizados na integração no tempo.

O pós-processador permite que os modos de vibração sejam visualizados em um ambiente tridimensional e que as formas modais possam ser amplificadas para melhor compreensão do comportamento da estrutura. A Figuras 3.28 e 3.29 mostram um modo de flexão vertical e um modo de torção típicos de uma ponte biportalada.

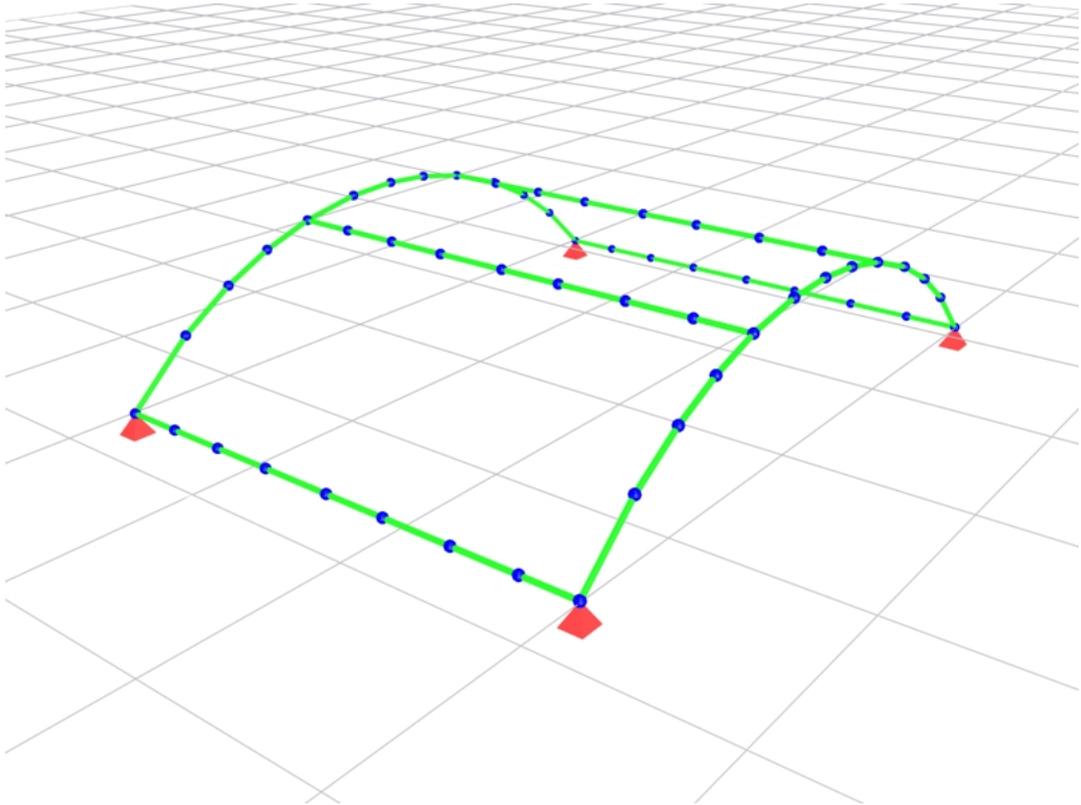


Figura 3.28: Modelo 3D do 1º modo de flexão

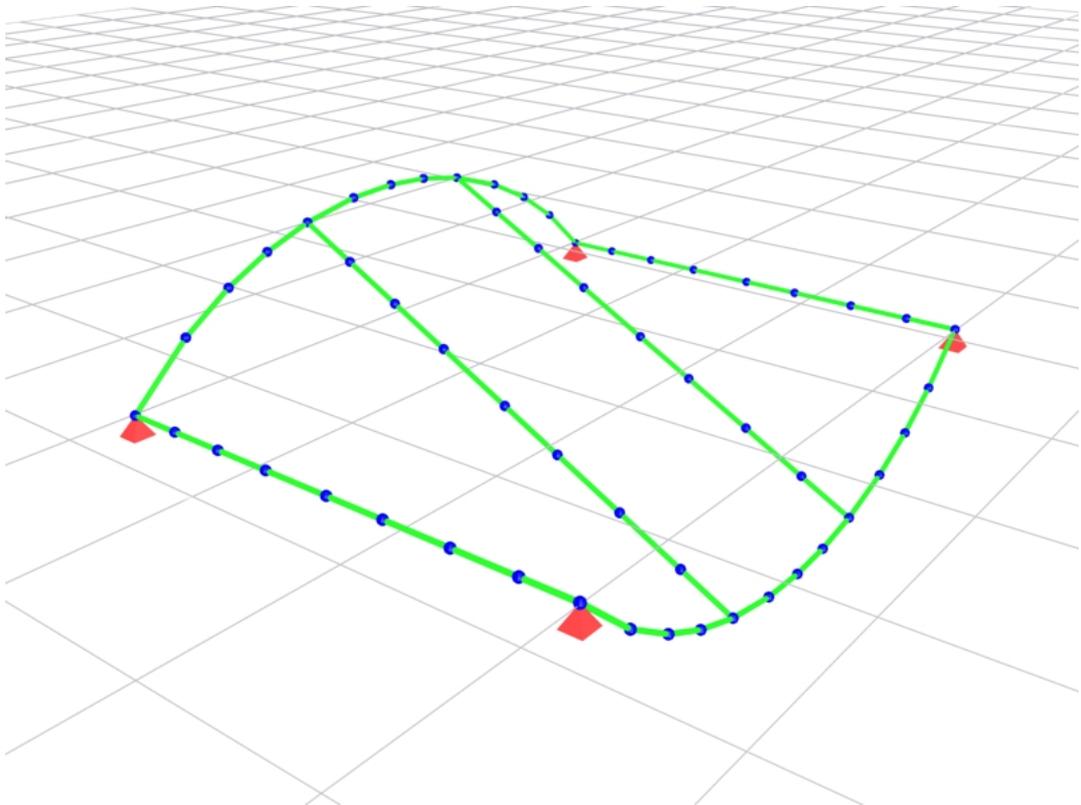


Figura 3.29: Modelo 3D do 1º modo de torção

3.5.4 Superfície de Deslocamentos Dinâmicos

Após todas as análises estarem concluídas o software gera, através dos dados armazenados ao longo do tempo, uma superfície de deslocamentos 3D, onde são representados os eixos do tempo, do espaço e as amplitudes de deslocamento vertical devido à passagem do veículo interagindo com a estrutura. Esta superfície é importante, pois a partir dela que serão geradas as seções de deformada da estrutura. Junto com a superfície é representada também um tabela de variação de cores em função das amplitudes de tal forma que a consulta a qualquer ponto do gráfico resulte no valor do deslocamento. A Figura 3.30 mostra esta superfície 3D e a Figura 3.31 mostra uma vista superior dos resultados.

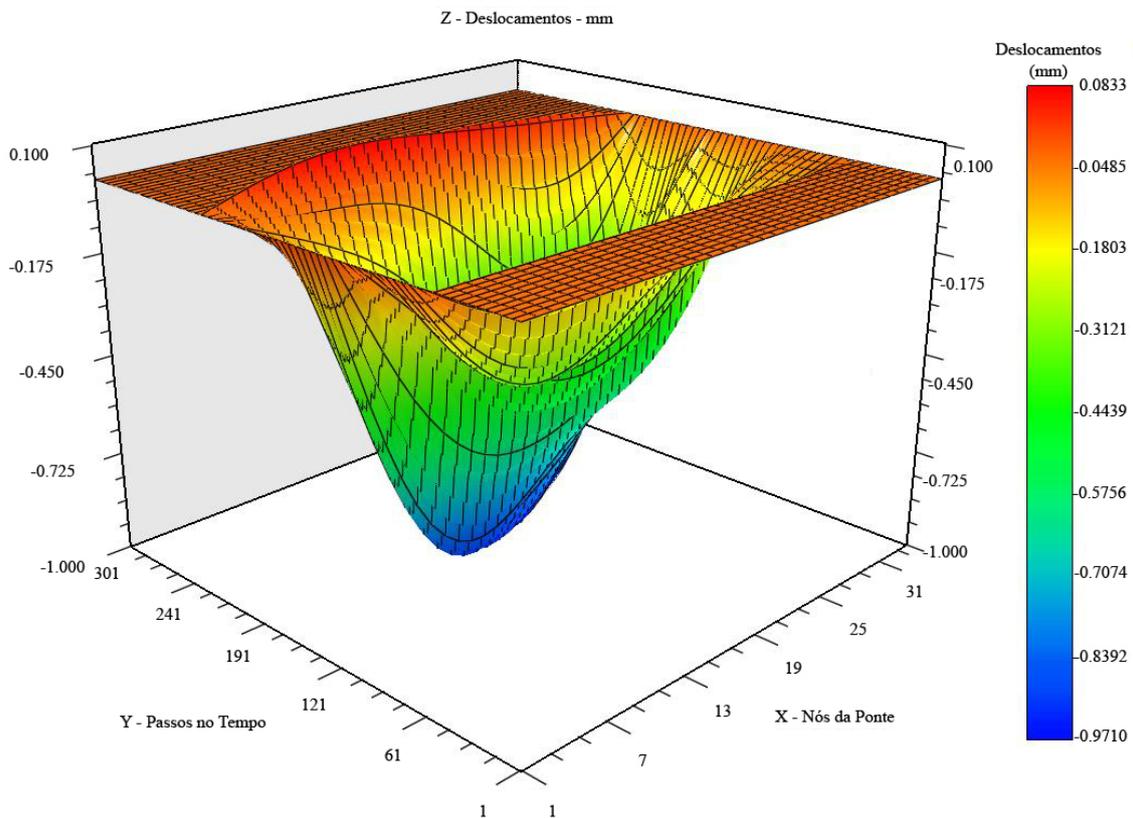


Figura 3.30: Superfície de deslocamentos-espaco-tempo

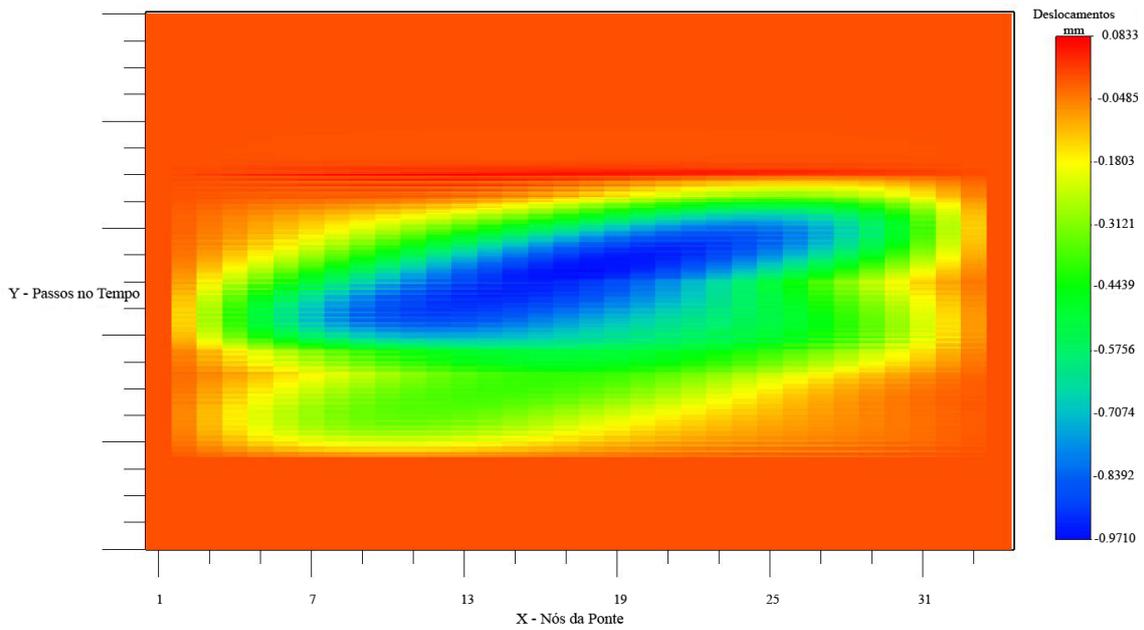
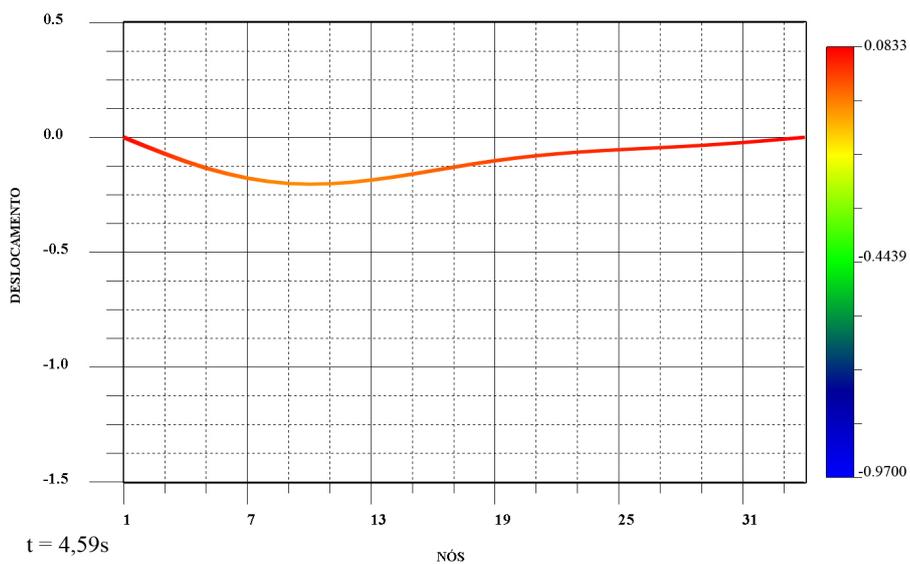
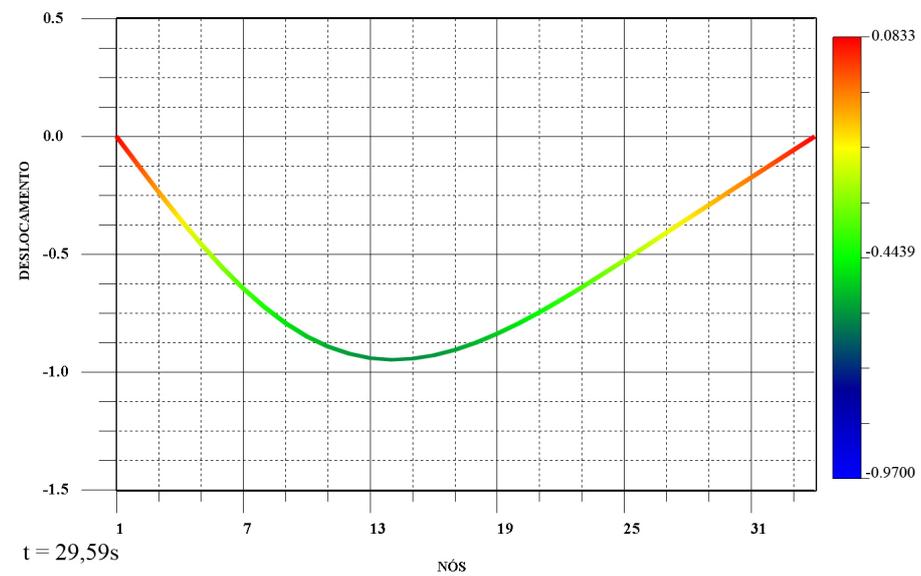
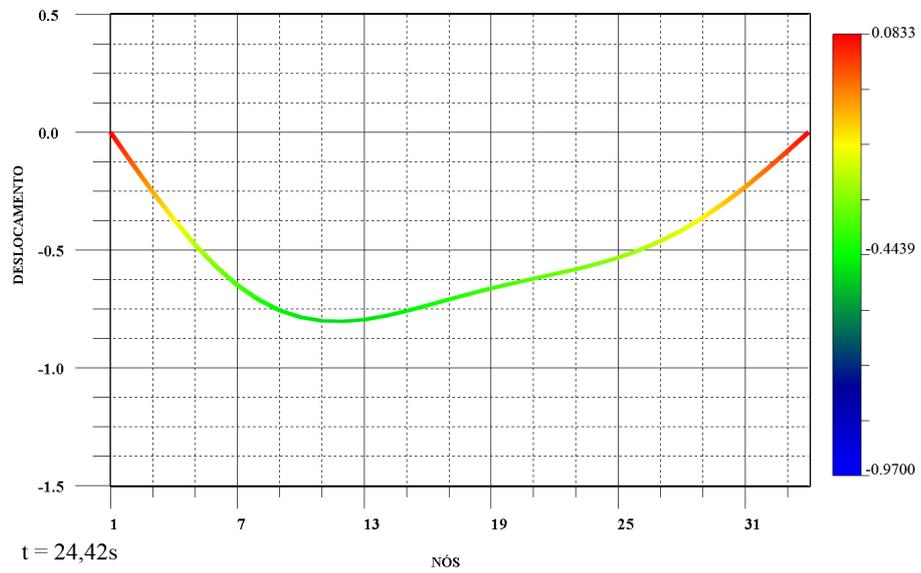
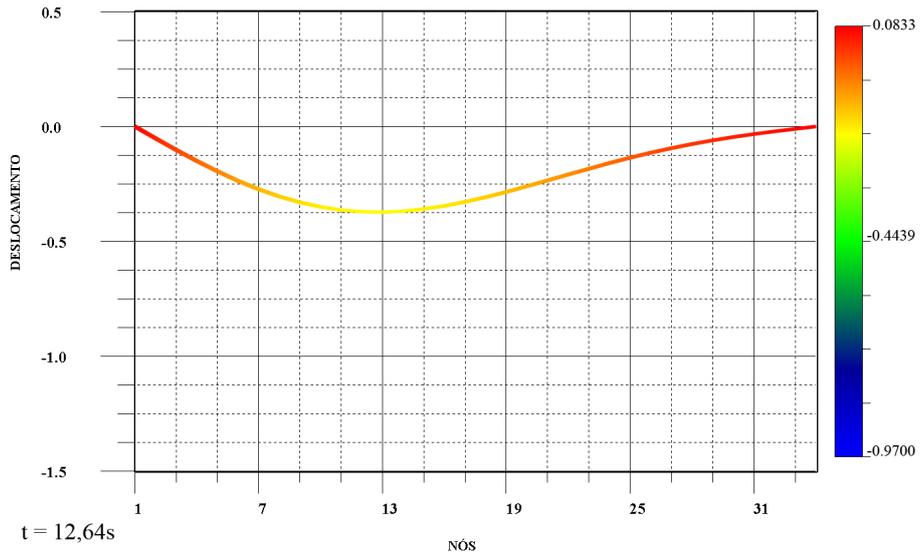


Figura 3.31: Vista superior da Superfície de deslocamentos-espaco-tempo

3.5.5 Deformada da Estrutura no Tempo

A deformada da estrutura no tempo permite a visualização em forma de animação, da passagem do veículo no tempo. Com isto é possível ver os resultados em termos de deslocamentos para todos os nós da ponte como mostram os *screenshots* da animação da deformada da estrutura na Figura 3.32.





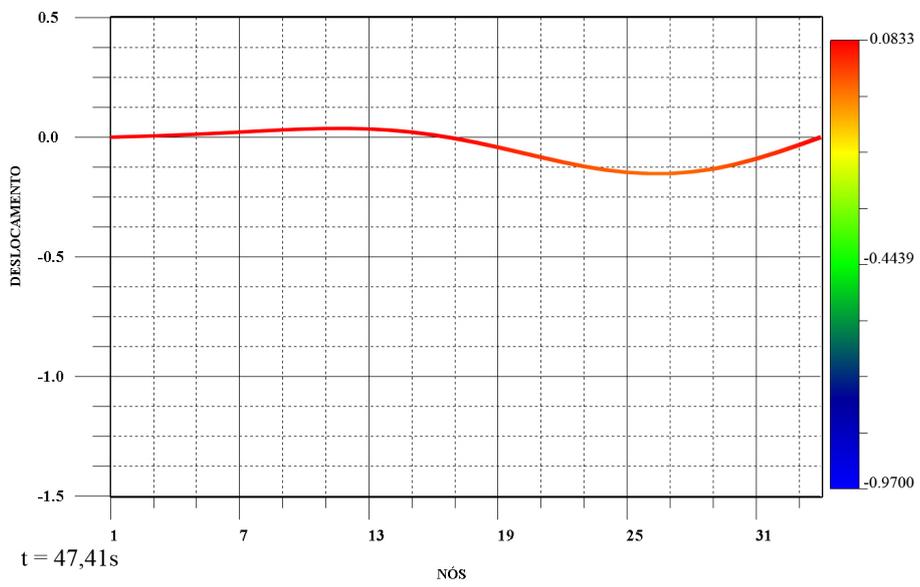
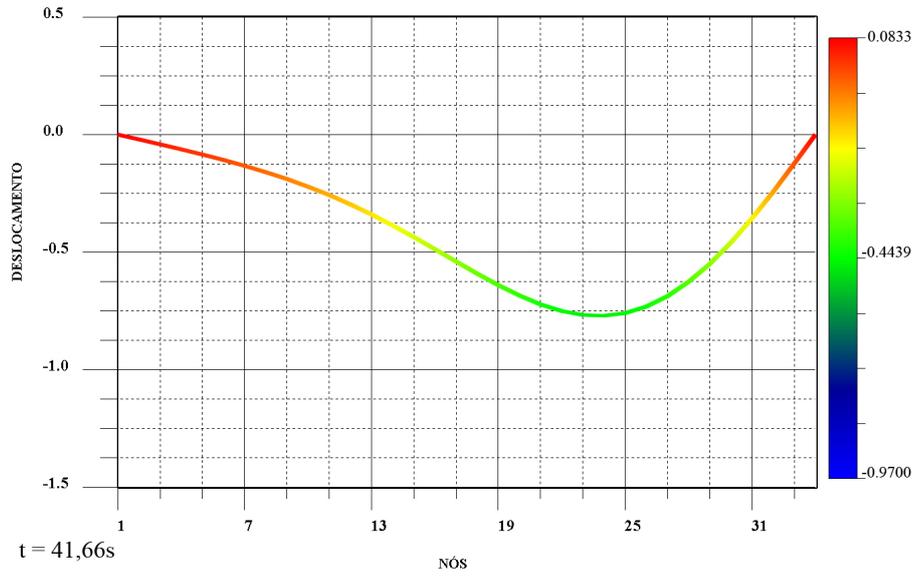


Figura 3.32: Animação da deformada da estrutura no tempo

3.5.6 Deslocamento e Esforços Dinâmicos no Tempo

Além de todas as formas de apresentação de resultados apresentadas até aqui, o IVPE-v.2 ainda permite a visualização do deslocamento vertical de um grau de liberdade específico escolhido pelo usuário além dos esforços cortantes e momentos fletores nas seções críticas. Esta forma será bastante explorada no capítulo 4, devido à fácil compreensão e comparação entre resultados de várias análises de velocidade dos veículos sobre o mesmo esquema estrutural e pavimento.

A Figura 3.33 mostra o deslocamento para o grau de liberdade vertical correspondente ao nó do meio do vão da ponte, para uma excentricidade, massa e condição do pavimento constante e várias velocidades de passagem do veículo.

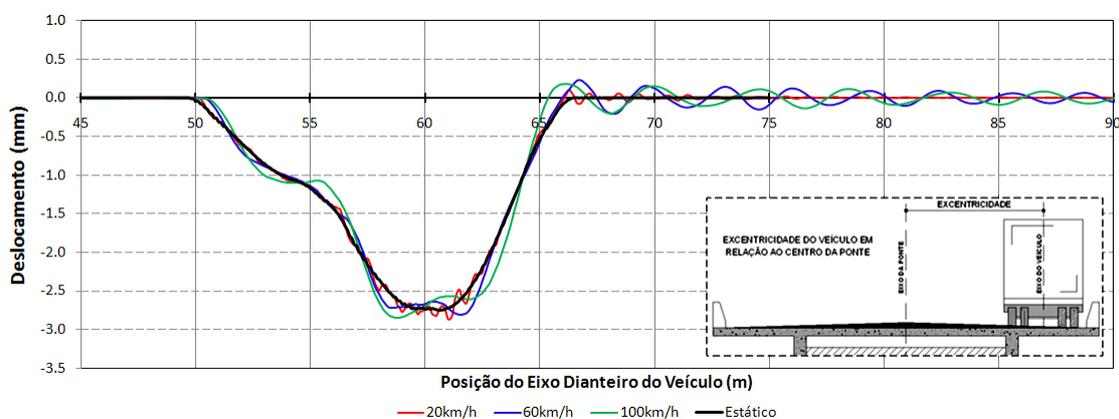


Figura 3.33: Deslocamento da estrutura para várias velocidades do veículo

3.5.7 Gerenciamento dos arquivos de análise e geração de histogramas

O processo de geração dos histogramas de esforços críticos produz uma grande quantidade de resultados da análise da interação veículo-estrutura. Com isto, foi necessário criar uma organização de arquivos de saída do IVPE-v.2 em estruturas do tipo árvore (ver Figura 3.34), de forma que não houvessem erros na interpretação dos resultados.

A estrutura foi dividida em cinco níveis que são:

1. Nível Principal da análise: Tipo de Sistema Estrutural
2. Tipo de Veículo

3. Tipo de Pavimento e obstáculo
4. Pesos dos Veículos
5. Relatório de deslocamentos e esforços para diversas velocidades

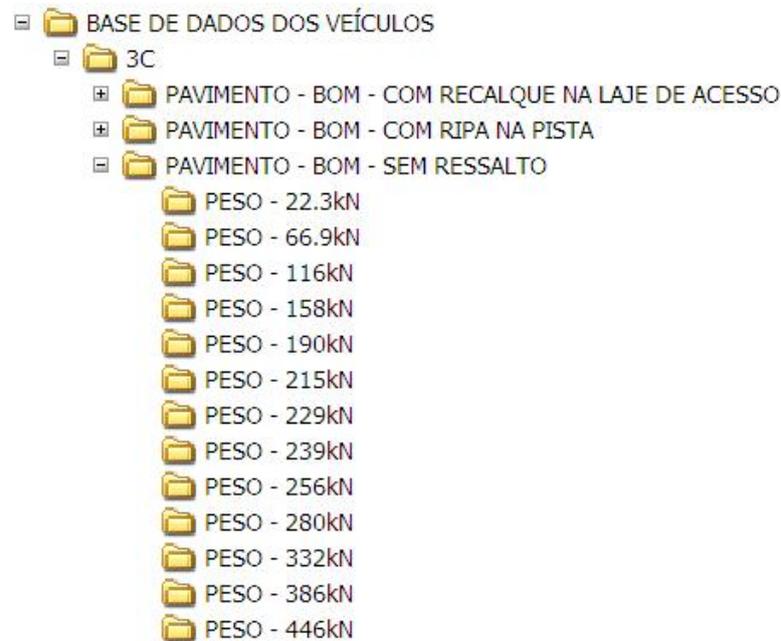


Figura 3.34: Gerenciamento dos dados

Cada pacote de dados, por exemplo, “PESO - 22.3kN”, reúne todas as informações componentes do histograma de frequência de ocorrência da velocidade dos veículos nesta faixa de peso. Sendo assim, o IVPE-v.2 coleta os valores dos esforços máximos nas seções críticas para todo o espectro de pesos e divide as faixas de ocorrência pré-definidas pelo usuário para gerar os histogramas de esforços cortantes e momentos fletores. A Figura 3.35 mostra como exemplo o histograma de frequências de ocorrência conjunto de velocidades e pesos para o veículo 3C. A obtenção deste histograma será descrita mais adiante no item 4.1.4.

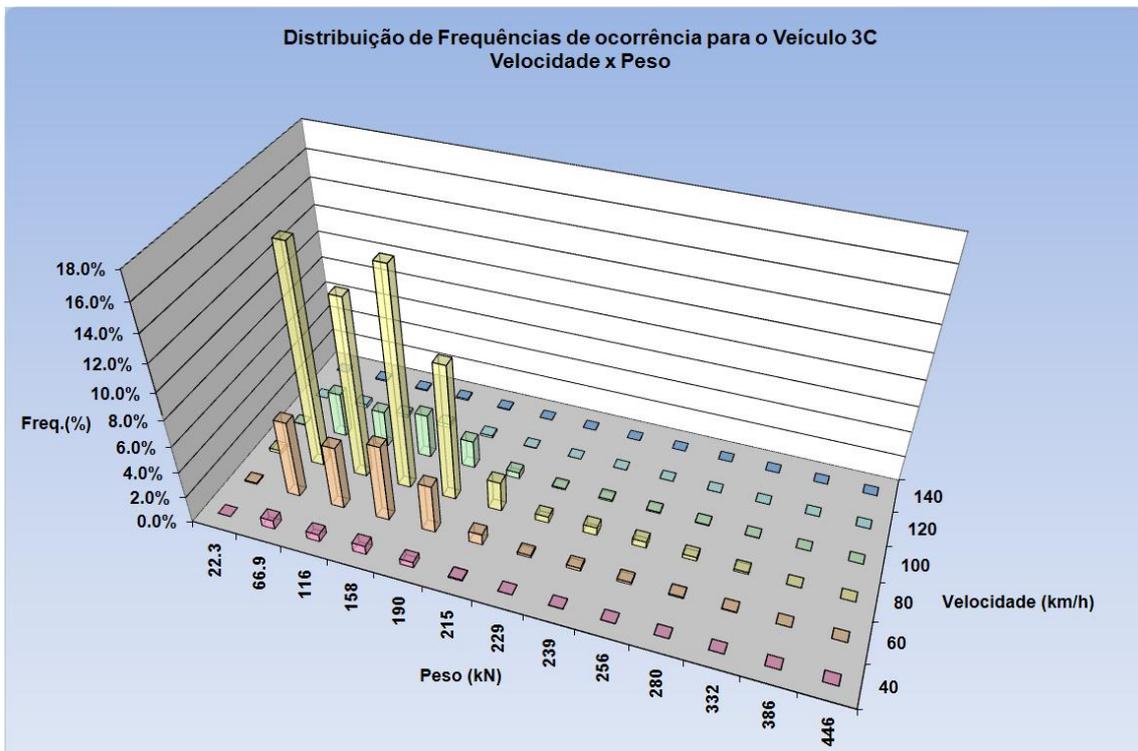


Figura 3.35: Frequência de ocorrência de velocidades e pesos do veículo 3C

Capítulo 4

Histogramas de Esforços Críticos

Este capítulo apresenta uma descrição dos estudos de caso analisados, bem como as respostas estáticas e dinâmicas no tempo para os deslocamentos e esforços em seções críticas de pontes típicas da malha rodoviária brasileira, além dos histogramas de esforços considerando a ação da passagem do veículo 3C.

4.1 Descrição dos casos analisados

Para a validação do software IVPE-v.2 e para a geração dos histogramas de esforços foram consideradas pontes com duas vigas principais biapoiadas e biapoiadas com balanço, com vãos de 10 e 30m sujeitas a passagem de veículos da classe 3C com diferentes velocidades e distribuições de peso por eixo. Admitiu-se o pavimento com perfil classificado como regular, como será descrito a seguir. Considerou-se também a possibilidade de existência de descontinuidade na pista de rolamento (Figura 4.1) devido a recalques do pavimento sobre a laje de acesso do modelo atual de ponte do DNER (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem) conforme ilustrado pela Figura 4.2 e foi dado ao veículo uma distância de aproximação de 50m antes de passar sobre a estrutura.

4.1.1 Distribuição de Pesos por eixo

Os pesos percentuais por eixo de qualquer veículo variam com o seu peso total. Quando vazios, os caminhões têm maior carga no eixo dianteiro, devido à presença do motor na sua porção anterior. Com o aumento da carga transportada, a distribuição

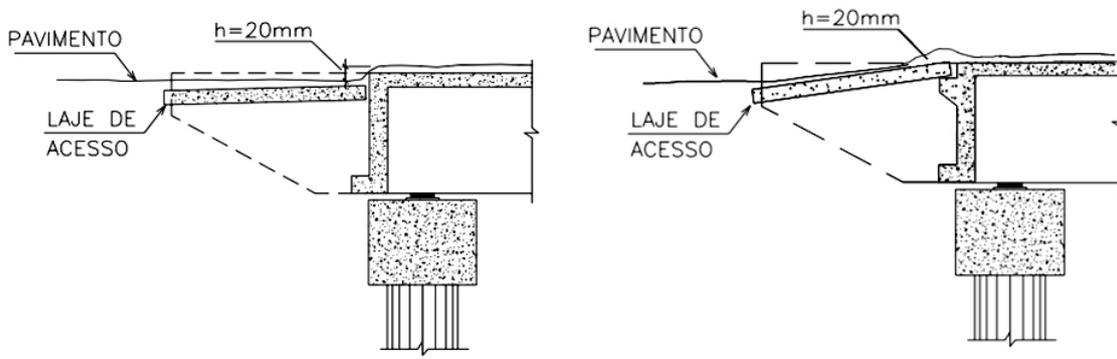


Figura 4.1: Tipos de ressalto: a - Recalque do pavimento sobre a laje de acesso; b - Giro da Laje de apoio

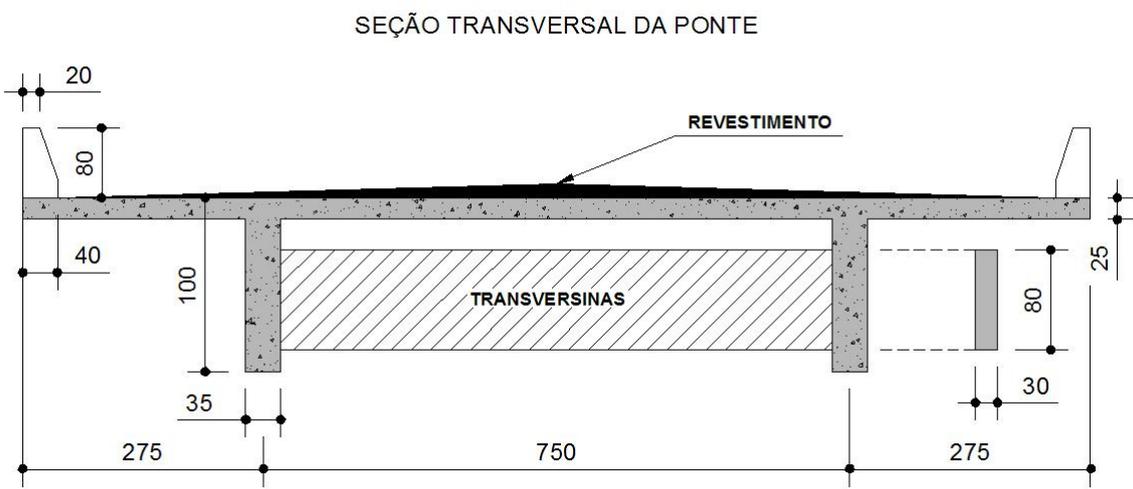


Figura 4.2: Tabuleiro de modelo atual do DNER - unidades em cm - (PFEIL, 1985)

de pesos por eixo aumenta no eixos traseiros aliviando o dianteiro.

Os modelos experimentais considerados pela SIURB-SP(2006) (Secretaria de Infraestrutura Urbana de São Paulo) mostram variações lineares da carga em cada eixo em função do peso do veículo.

Alternativamente, pode-se relacionar o peso percentual de cada eixo contra o peso total, notando-se, neste caso, sua variação hiperbólica. O modelo de carga usado neste trabalho considera os pesos percentuais com esta última variação hiperbólica adotada pela SIURB-SP, por este ser um comportamento mais próximo do real. A Figura 4.3 mostra esta distribuição de pesos para o veículo de classe 3C.

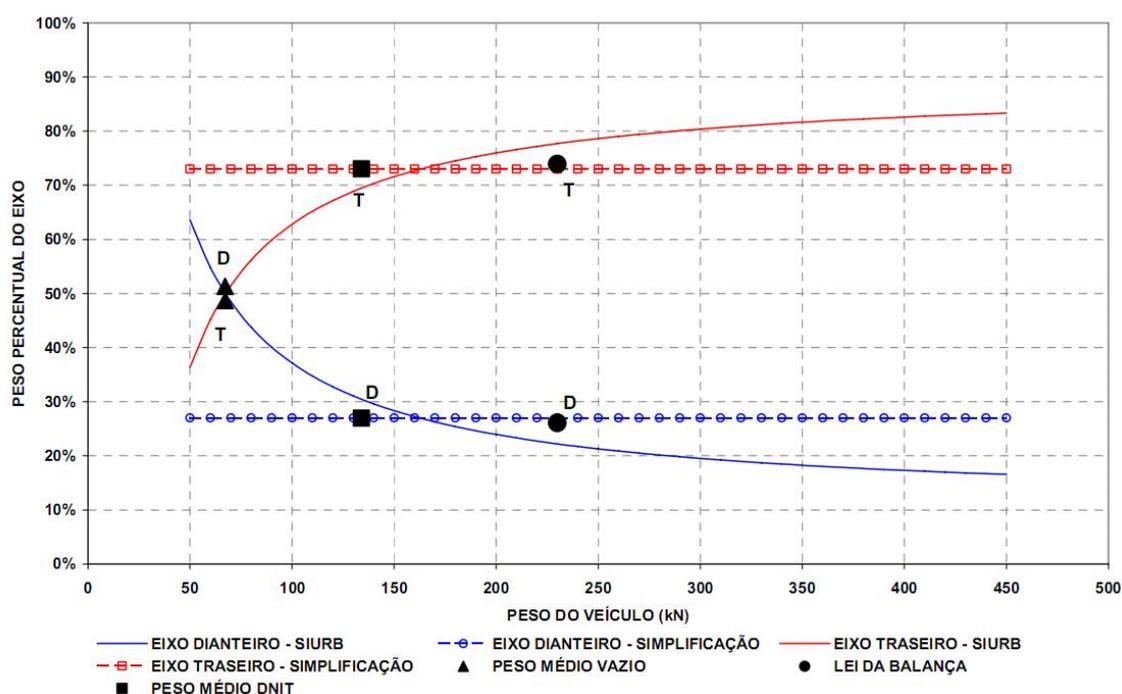


Figura 4.3: Variação do peso percentual por eixo nos veículos de classe 3C, (ROSSIGALI, 2006)

4.1.2 Perfil de Rugosidades do pavimento e obstáculos

O perfil da rugosidade de uma estrada pode ser tomado como um processo aleatório estacionário, gaussiano e ergódico, com média zero. Para a descrição da superfície de uma estrada podem ser utilizadas funções de densidade espectral obtidas experimentalmente a partir das quais são gerados perfis de irregularidade longitudinal. Em HONDA *et al.* (1982), por exemplo, o espectro que representa a

rugosidade da superfície para pontes rodoviárias é apresentado com base na medição de 84 trilhas de roda em 56 pontes diferentes no Japão. Estas pontes tinham diferentes tipos estruturais tais como sistemas de vigas simples e contínuas, treliças e arcos e pavimentos em concreto e em asfalto.

A função de densidade espectral da rugosidade do pavimento pode ser expressa por uma função exponencial da mesma forma que para o pavimento na rodovia em geral (HONDA *et al*, 1982):

$$S_r(\omega) = \bar{\alpha}(\omega_k)^{-\beta} \quad (4.1)$$

onde $\bar{\alpha}$ é o coeficiente espectral de rugosidade que depende do estado de conservação do pavimento, o qual pode ser classificado em cinco categorias de acordo com os padrões ditados pelo “*International Organization for Standardization (ISO)*” (ver Tabela 4.1); e β é o expoente de rugosidade do espectro, tomado igual a 2,03 por HONDA *et al.* (1982) como um valor médio quando se trata de pavimentos asfálticos, e igual a 1,85 para pavimento em concreto. Estes perfis foram gerados (SANTOS, 2005) a partir do espectro da equação 4.1 como uma série de co-senos:

$$u_{ir}(x) = \sum_{k=1}^N \alpha_k \cos(2\pi\omega_k x + \phi_k) \quad (4.2)$$

onde $u_{ir}(x)$ é a rugosidade aleatória do pavimento, α_k é a amplitude de rugosidade, ω_k é a frequência de rugosidade em ciclos por metro, ϕ_k é o ângulo de fase aleatória definido no intervalo $[0, 2\pi]$, x é a posição do eixo do veículo ao longo da sua trajetória e N é o número total de termos da série.

Neste trabalho foram utilizadas as condições de pavimento asfáltico boa e regular com os parâmetros apresentados na Tabela 4.1, além da utilização do ressalto de 20mm na cabeceira da ponte devido à rotação da laje de acesso a estrutura.

A geração aleatória do perfil de irregularidades para o pavimento com a condição de conservação regular e com obstáculo é apresentada na Figura 4.4. Em preto temos o sinal gerado bruto e em azul o sinal suavizado pela média móvel.

Tabela 4.1: Classificação da superfície de rolamento

Condição do Pavimento	$\bar{\alpha}(m^2/(m/ciclo))$
Muito Boa	$\bar{\alpha} \leq 0,24 \cdot 10^{-6}$
Boa	$0,24 \cdot 10^{-6} < \bar{\alpha} < 1,0 \cdot 10^{-6}$
Regular	$1,0 \cdot 10^{-6} < \bar{\alpha} < 4,0 \cdot 10^{-6}$
Ruim	$4,0 \cdot 10^{-6} < \bar{\alpha} < 16,0 \cdot 10^{-6}$
Muito Ruim	$\bar{\alpha} > 16 \cdot 10^{-6}$

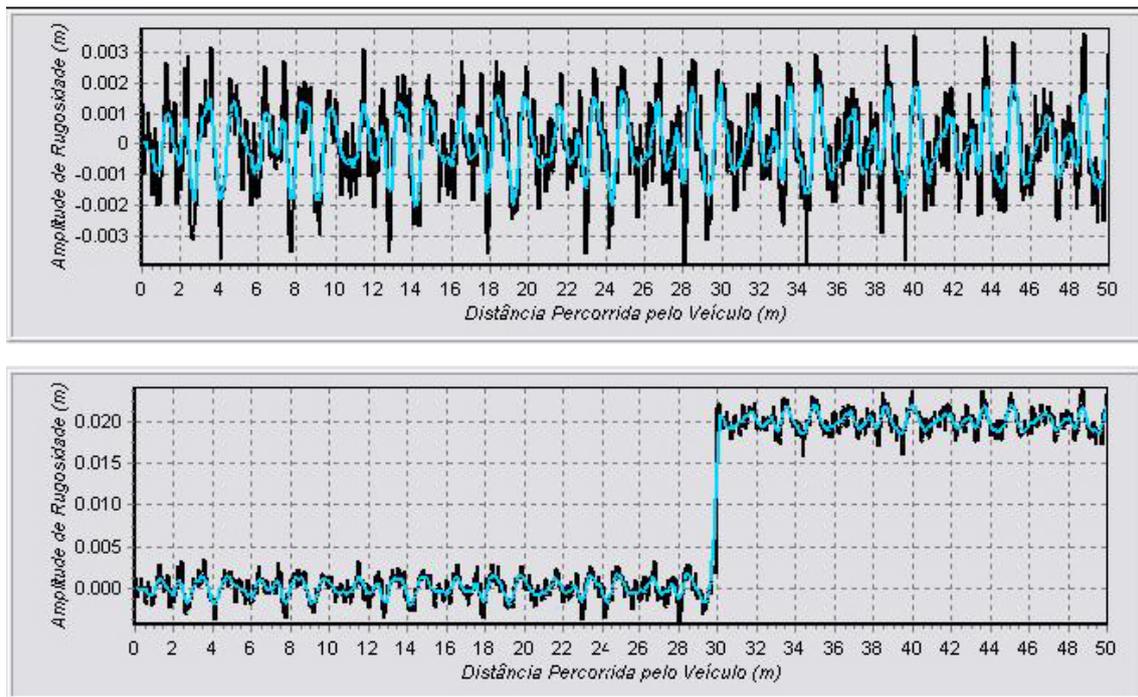


Figura 4.4: Perfis de rugosidade do pavimento com e sem ressalto

4.1.3 Seções de esforços críticos

As seções consideradas críticas para o dimensionamento de pontes com relação ao esquema estrutural adotado são apresentadas na Figura 4.5 juntamente com as linhas de influência estáticas. Neste trabalho serão abordados os esquemas biapoiado e balanço.

ESQUEMA ESTRUTURAL		VIGA BIAPOIADA	VIGA CONTÍNUA DE DOIS VÃOS	VIGA EM BALANÇO
REPRESENTAÇÃO				
L.I. FORÇA CORTANTE	DIAGRAMA			
	LOCAL	APOIO	APOIO CENTRAL	
L.I. MOMENTO FLETOR POSITIVO	DIAGRAMA			
	LOCAL	MEIO DO VÃO	MEIO DO VÃO	
L.I. MOMENTO FLETOR NEGATIVO	DIAGRAMA			
	LOCAL		APOIO CENTRAL	ENGASTE

Figura 4.5: Esquemas estruturais e linhas de influência consideradas, (ROSSIGALI, 2006)

4.1.4 Histograma de frequência conjunta de velocidade e peso

O histograma conjunto de velocidade e peso para o veículo 3C apresentado na Figura 3.35 foi obtido a partir do estudo estatístico de tráfego desenvolvido por ROSSIGALI (2006) para as frequências de ocorrência dos veículos mais pesados nas rodovias do país. A Tabela 4.2 extraída de ROSSIGALI (2006), apresenta o resultado deste estudo. A área de interesse deste trabalho engloba apenas o veículo 3C, que conforme a Figura 3.12 representa uma frequência de ocorrência de 40,916% do total analisado.

Admitindo-se que os veículos mais leves trafegam com velocidade maior que os mais pesados distribuiu-se as frequências de ocorrência da cada faixa de velocidade pelas 13 faixas de peso desse veículo, resultando nas frequências conjuntas da Tabela 4.3 onde utilizou-se também como parâmetro o histograma de velocidades para veículos monolíticos e reboques (Figura 4.6) do estudo de ROSSIGALI (2006) que mostra maior concentração de velocidades entre 60 e 100km/h.

Tabela 4.2: Frequência de ocorrência de pesos para os veículos mais pesados
(ROSSIGALI, 2006)

ÔNIBUS			CAMINHÕES RÍGIDOS			SEMI-REBOQUES		
CLASSE	PESO(kN)	FREQ.(%)	CLASSE	PESO(kN)	FREQ.(%)	CLASSE	PESO(kN)	FREQ.(%)
O2C	22,3	0,093	2C	22,3	7,790	2S2	22,3	0,005
O2C	66,9	1,305	2C	66,9	12,179	2S2	66,9	0,111
O2C	116	5,090	2C	116	2,526	2S2	116	2,948
O2C	150	0,260	2C	150	0,099	2S2	158	1,268
O2C	164	0,087	2C	164	0,085	2S2	190	0,696
O2C	173	0,015	2C	173	0,016	2S2	218	0,440
O2C	180	0,020	2C	180	0,042	2S2	263	0,330
O2C	195	0,031	2C	195	0,034	2S2	309	0,026
O2C	218	0,018	2C	218	0,014	2S2	338	0,011
O2C	263	0,016	2C	263	0,010	2S2	362	0,004
O2C	332	0,020	2C	332	0,003	2S2	376	0,002
O2C	386	0,008	2C	386	0,000	2S2	392	0,003
O2C	446	0,008	2C	446	0,000	2S2	446	0,003
O3C	22,3	0,011	3C	22,3	0,165	2S3	22,3	0,000
O3C	66,9	0,313	3C	66,9	11,021	2S3	66,9	0,037
O3C	116	2,605	3C	116	9,044	2S3	116	1,250
O3C	158	1,627	3C	158	10,934	2S3	158	0,882
O3C	183	0,245	3C	190	6,907	2S3	190	0,798
O3C	198	0,175	3C	215	1,524	2S3	218	0,575
O3C	207	0,032	3C	229	0,314	2S3	263	2,644
O3C	217	0,191	3C	239	0,402	2S3	332	8,451
O3C	229	0,050	3C	256	0,319	2S3	386	1,519
O3C	263	0,237	3C	280	0,186	2S3	404	0,143
O3C	332	0,027	3C	332	0,097	2S3	426	0,875
O3C	386	0,001	3C	386	0,002	2S3	463	0,451
O3C	446	0,000	3C	446	0,001	2S3	490	0,172
-	-	-	-	-	-	2S3	508	0,076
-	-	-	-	-	-	2S3	526	0,060
-	-	-	-	-	-	2S3	549	0,021

Tabela 4.3: Distribuição de probabilidades de ocorrência para o veículo 3C.

DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADES DE OCORRÊNCIA (%)							
PESO(kN) \ VEL.(km/h)	40	60	80	100	120	140	Σ
22,3	0,010	0,088	0,246	0,051	0,004	0,002	0,40
66,9	0,674	5,900	16,568	3,421	0,269	0,108	26,94
116	0,553	4,840	13,592	2,807	0,221	0,088	22,10
158	0,668	5,852	16,433	3,393	0,267	0,107	26,72
190	0,422	3,697	10,381	2,144	0,169	0,068	16,88
215	0,093	0,815	2,288	0,472	0,037	0,015	3,72
229	0,019	0,169	0,474	0,098	0,008	0,003	0,77
239	0,025	0,215	0,603	0,124	0,010	0,004	0,98
256	0,020	0,171	0,480	0,099	0,008	0,003	0,78
280	0,011	0,099	0,277	0,057	0,005	0,002	0,45
332	0,006	0,053	0,148	0,030	0,002	0,001	0,24
386	0,001	0,004	0,012	0,003	0,000	0,000	0,02
446	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,00
Σ	2,50	21,90	61,50	12,70	1,00	0,40	100

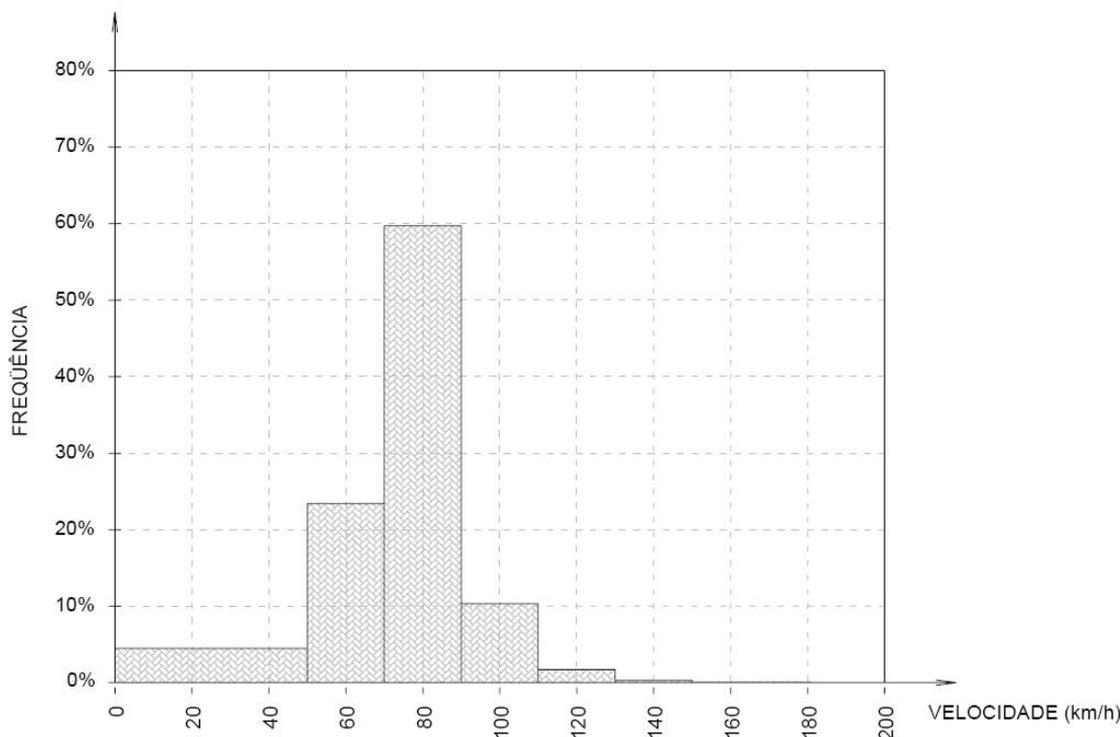


Figura 4.6: Distribuição de velocidades: caminhões monolíticos e reboques.

(ROSSIGALI, 2006)

4.1.5 Validações do programa IVPE-v.2

A validação do programa IVPE-v.2 foi feita com a comparação de resultados dinâmicos do IVPE-U, desenvolvido por MELO (2007) que por sua vez foi validado através de comparação teórico-experimental, e com o pacote comercial *SAP2000*[®] para os resultados estáticos.

As respostas em termos de deslocamentos no meio do vão para as estruturas de tabuleiro de modelo atual do DNER foram obtidas com a passagem de um veículo da classe 3C com um peso total de $250kN$ e distribuição hiperbólica de pesos entre eixos que para este caso são iguais a 73% para os eixos traseiros e 27% para o dianteiro(ver Figura 4.3). Foi empregado o pavimento considerado em bom estado de conservação de acordo com os padrões expostos no item 4.1.2. As velocidades de tráfego do veículo foram variadas de 20 km/h a 100 km/h para os casos dinâmicos. A excentricidade do veículo em relação ao eixo da ponte foi adotada para a pior situação, isto é, com o veículo próximo ao guarda-rodas como mostra a Figura 4.7.

A ponte possui um vão livre entre apoios de 10m para o esquema biapoiado com 4 transversinas. Duas nos apoios e duas intermediárias. As dimensões das longarinas

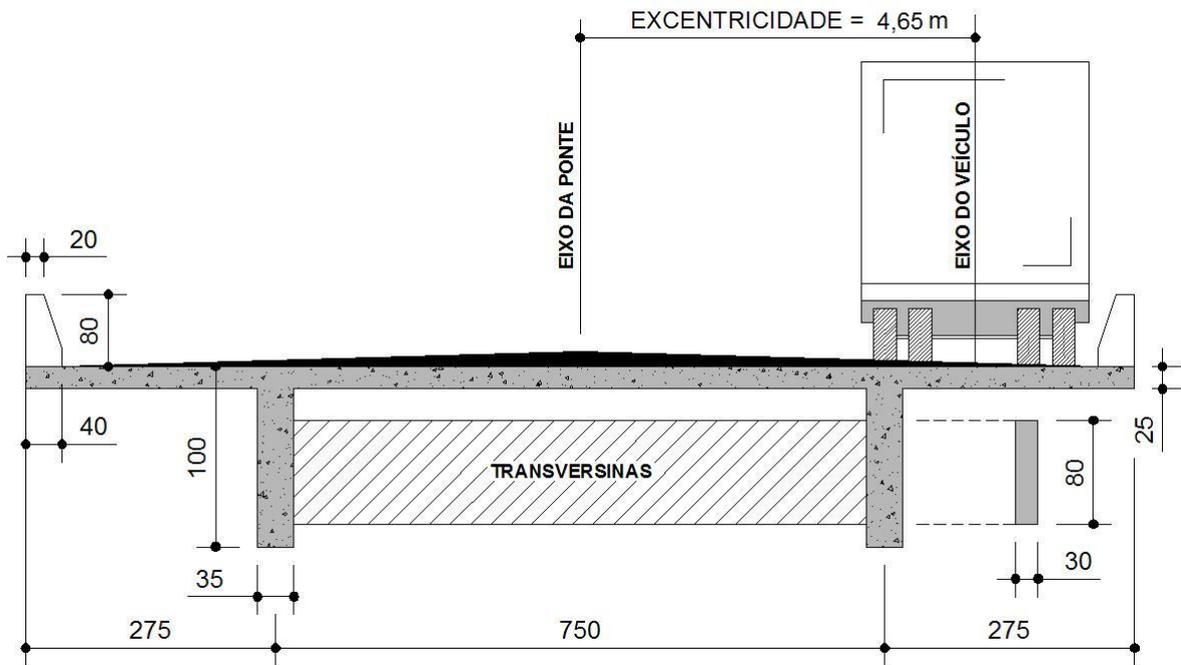


Figura 4.7: Excentricidade o veículo em relação ao eixo da ponte

Tabela 4.4: Dimensões dos elementos estruturais

Esquema	Dimensão	Sistema Biapoiado
Estrutural	(m)	10m
Longarina	h	1
	bw	0,35
Transversina	ht	0,8
	bt	0,3

e transversinas são apresentadas na Tabela 4.4. Além disso, a Tabela 4.5 mostra as frequências naturais para o 1º primeiro modo de flexão vertical e torção da ponte.

Para a comparação dos deslocamentos e esforços dinâmicos foi adotado um pavimento de boa condição de conservação com o veículo passando com velocidades de 20km/h, 60km/h e 100km/h para a ponte com 10m de vão biapoiado. Os parâmetros utilizados para obtenção das respostas dinâmicas para o veículo e estrutura, de acordo com o modelo analítico exposto no Capítulo 2, foram:

Tabela 4.5: Frequências Naturais e Modos de Vibração da Estrutura

MODO DE VIBRAÇÃO	FREQUÊNCIA (Hz)
1º Modo de Flexão Vertical	7,63
1º Modo de Torção	8,35

- Parâmetros de massa:

Massa suspensa do veículo= $22,233t$

Inércia de massa rotacional= $53t.m^2$

Massas dos conjuntos eixo-roda-pneu traseiros= $1,066t$

Massa do conjunto eixo-roda-pneu dianteiro= $0,635t$

- Parâmetros de rigidez:

Rigidez dos eixos traseiros= $1180kN/m$

Rigidez do eixo dianteiro= $580kN/m$

Rigidez dos pneus traseiros= $3360kN/m$

Rigidez dos pneus dianteiros= $1680kN/m$

- Parâmetros de amortecimento:

Amortecimento dos eixos traseiros= $12kN.s/m$

Amortecimento do eixo dianteiro= $6kN.s/m$

Amortecimento dos pneus traseiros= $4kN.s/m$

Amortecimento dos pneus dianteiros= $2kN.s/m$

- Distância entre eixos e em relação ao centro de massa (CM) segundo a Figura 4.8:

$L1 = 2,12m$

$L2 = 0,82m$

$L3 = 3,98m$

$D1 = 1,30m$

$D2 = 4,80m$

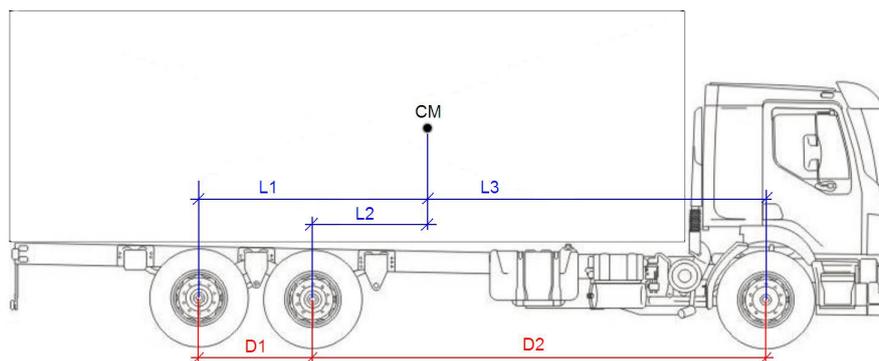


Figura 4.8: Distância entre os eixos o centro da massa suspensa do veículo

A Figura 4.9 mostra a comparação de resultados entre o pacote comercial *SAP2000*[®] e *IVPE-v.2*, para o deslocamento estático no meio do vão livre de 10m para o esquema estrutural biapoiado. A Tabela 4.6 mostra os valores dos máximos deslocamentos e as diferenças percentuais entre os dois softwares.

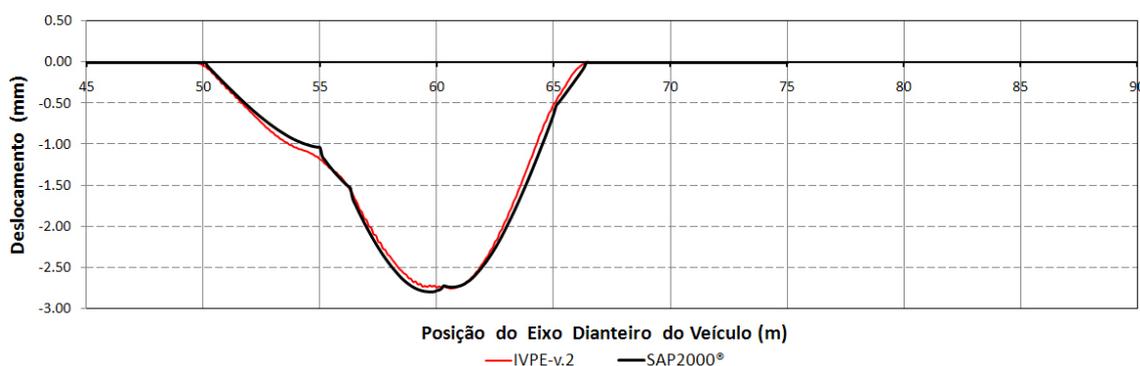


Figura 4.9: Comparação entre deslocamentos estáticos no meio do vão de 10m para a passagem do veículo 3C com peso total de 250kN e excentricidade de 4,65m em relação ao eixo da ponte, considerando um pavimento bom e sem ressalto.

As Figuras 4.10 à 4.13 mostram os resultados comparativos para o *IVPE-U* e *IVPE-v.2* em termos de deslocamentos e comparações de esforços estáticos entre *IVPE-v.2* e a linha de influência estática teórica.

Com base nos resultados apresentados neste item podemos concluir que o programa *IVPE-v.2* está validado tanto com o pacote comercial *SAP2000*[®] no que diz respeito a análise estática linear, quanto para análise dinâmica com o programa *IVPE-U* validado com dados experimentais em termos de deslocamentos por MELO (2007).

Tabela 4.6: Validação dos deslocamentos estáticos

DESLOCAMENTO ESTÁTICO		
	SAP2000®	IVPE-v.2
$\delta(mm)$	-2,79	-2,76
$e(\%)$	-	1,3

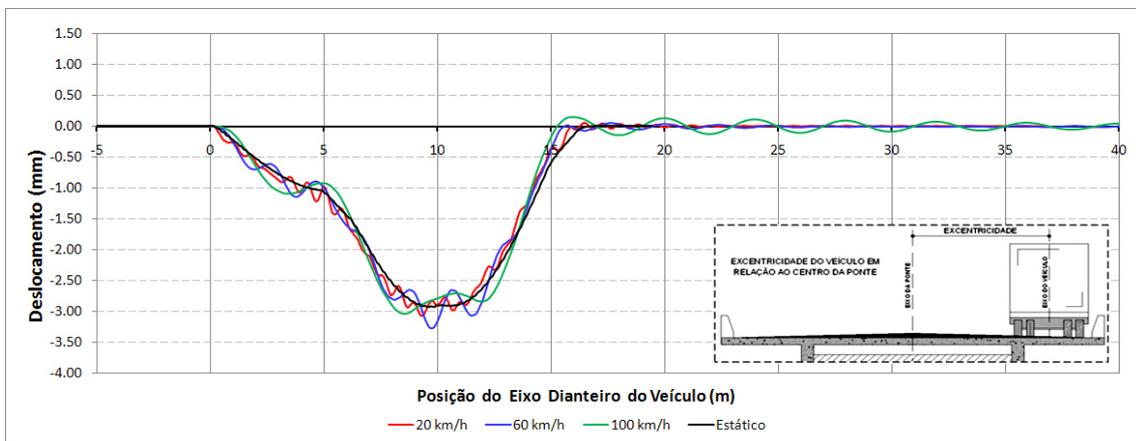


Figura 4.10: Deslocamentos do IVPE-U no tempo - meio do vão

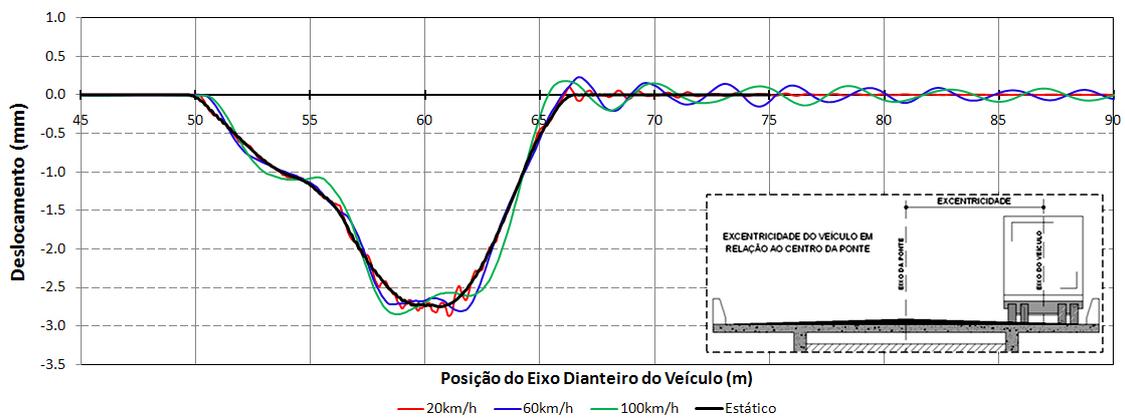


Figura 4.11: Deslocamentos do IVPE-v.2 no tempo - meio do vão

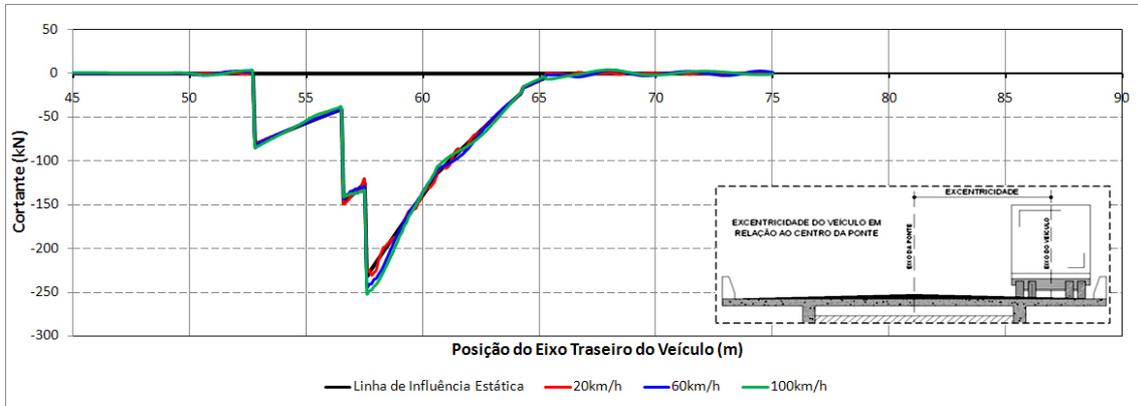


Figura 4.12: Esforço cortante no apoio no tempo

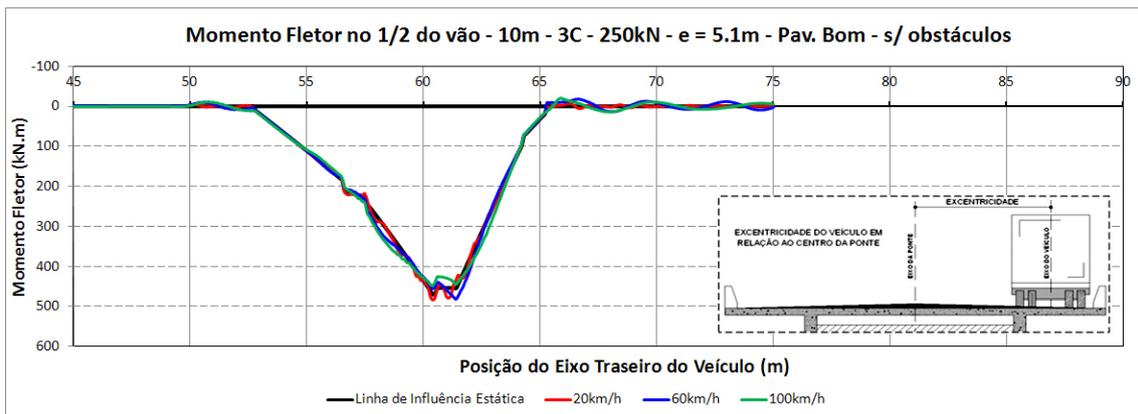


Figura 4.13: Momento fletor no meio do vão no tempo

A versão v.2 do IVPE avançou no sentido de incluir a possibilidade de avaliação dos esforços dinâmicos nos elementos estruturais, sendo estes de importância fundamental para verificação da estabilidade no estado limite de ruptura das seções de concreto armado.

4.1.6 Histogramas de Esforços

Neste item serão apresentados os resultados dos histogramas finais de esforços nas seções críticas do esquema estrutural biapoiado descrito no item 4.1.3, para o vão de 10m, devido a passagem do tráfego real de veículos de classe 3C nas rodovias brasileiras. As dimensões dos elementos estruturais adotados são mostradas na Tabela 4.4. Já na Tabela 4.7 são apresentadas as frequências naturais para os três primeiros modos de vibração de flexão vertical e torção da estrutura utilizada para a geração dos histogramas de esforços. Em relação as frequências apresentadas na Tabela 4.5 houve uma redução das frequências naturais devido à introdução de 5cm de revestimento asfáltico sobre a laje de concreto, aumentando assim a massa da estrutura.

Os histogramas de esforços estáticos apresentados já consideram o coeficiente de impacto da NBR-7188 (1982) (Equação 4.3 - função do vão l). Para os histogramas de esforços dinâmicos utilizou-se pavimento regular com e sem ressalto na cabeceira. Além disso, é apresentado um histograma comparativo entre os esforços estáticos e os dinâmicos produzidos pelo ressalto com distribuição de pesos por eixo constante e não uniforme.

$$\phi(l) = 1,4 - 0,007l \quad (4.3)$$

Nas Figuras 4.14 e 4.15 são mostrados os histogramas de momento fletor no meio do vão para uma distribuição de pesos constante e não uniforme, sendo esta última de acordo com o critério do SIURB/SP.

Tabela 4.7: Frequências Naturais e Modos de Vibração da Estrutura

MODO DE VIBRAÇÃO	FREQUÊNCIA (Hz)
1º Modo de Flexão Vertical	5,72
1º Modo de Torção	8,59
2º Modo de Flexão Vertical	9,36
2º Modo de Torção	18,58
3º Modo de Flexão Vertical	9,80
3º Modo de Torção	19,75

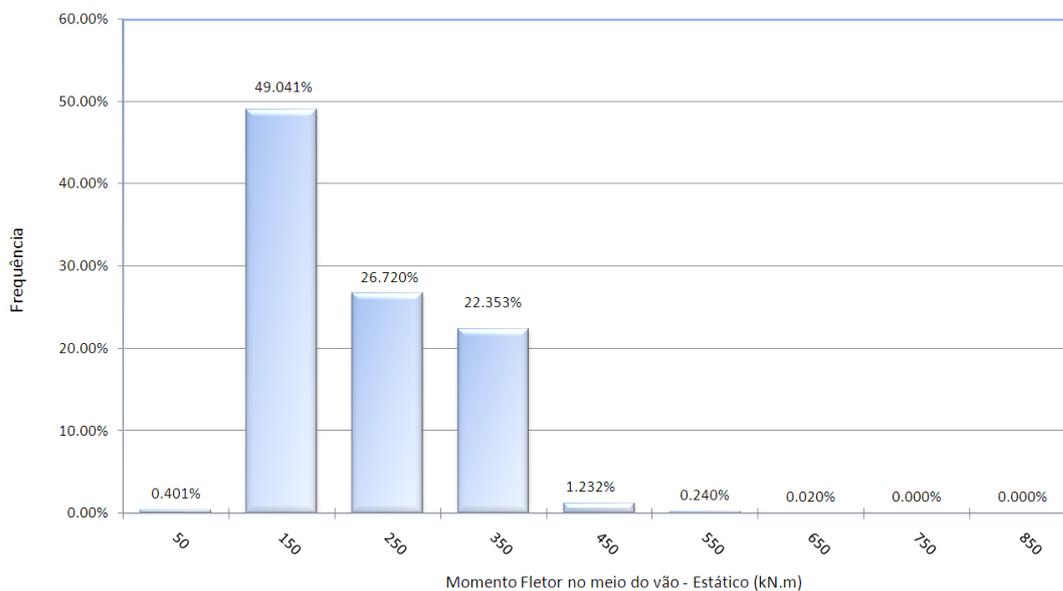


Figura 4.14: Distribuição de frequências para o Momento fletor estático com distribuição de pesos por eixo constante.

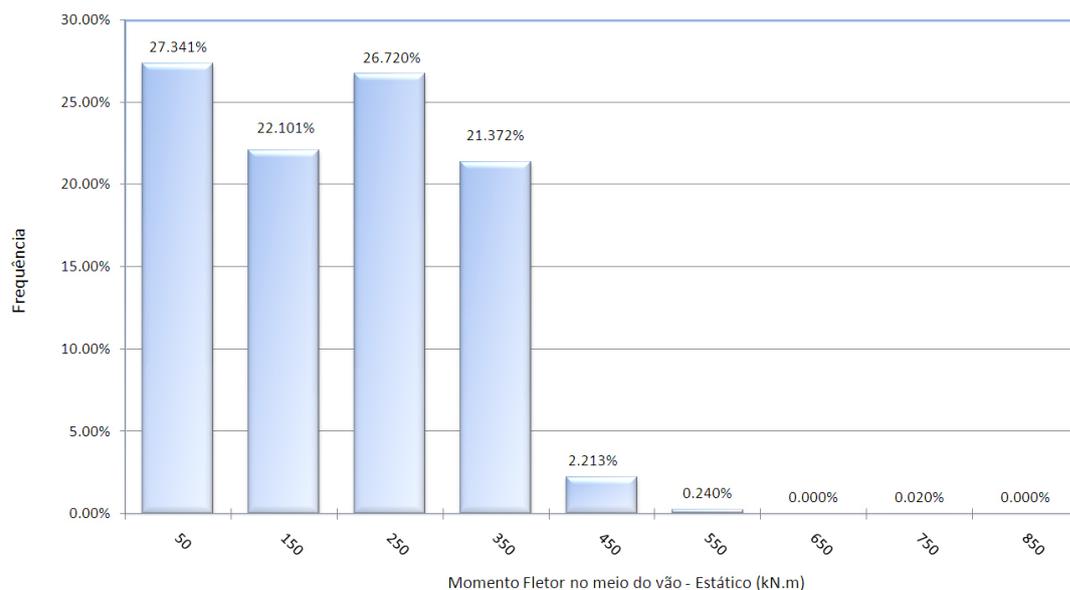


Figura 4.15: Distribuição de frequências para o Momento fletor estático com distribuição de pesos por eixo segundo SIURB-SP.

Como pode-se observar nos histogramas das Figuras 4.14 e 4.15, a distribuição de pesos por eixo difere bastante quando considerada constante para todos veículos, estejam eles carregados ou não. Sendo assim, para representarmos o tráfego de veículos pesados de forma mais realística neste trabalho consideramos a distribuição de pesos por eixo proposta pelo SIURB-SP com uma distribuição hiperbólica.

As Figuras 4.16 e 4.17 apresentam os histogramas de momento fletor dinâmico com e sem o ressalto de 20mm do pavimento localizado na cabeceira da ponte. Observou-se que com esta distribuição de faixas de momento fletor (com intervalo de 100kN.m), os histogramas estático (Figura 4.15) e os dinâmicos (Figura 4.16 e (Figura 4.17) ficaram muito parecidos, não representando a importante amplificação dinâmica que ocorreu na análise dos esforços. Sendo assim, optou-se por refinar as faixas de tal forma que essa diferença se tornasse aparente. As Figuras 4.18 e 4.19 representam a nova distribuição de faixas de esforços.

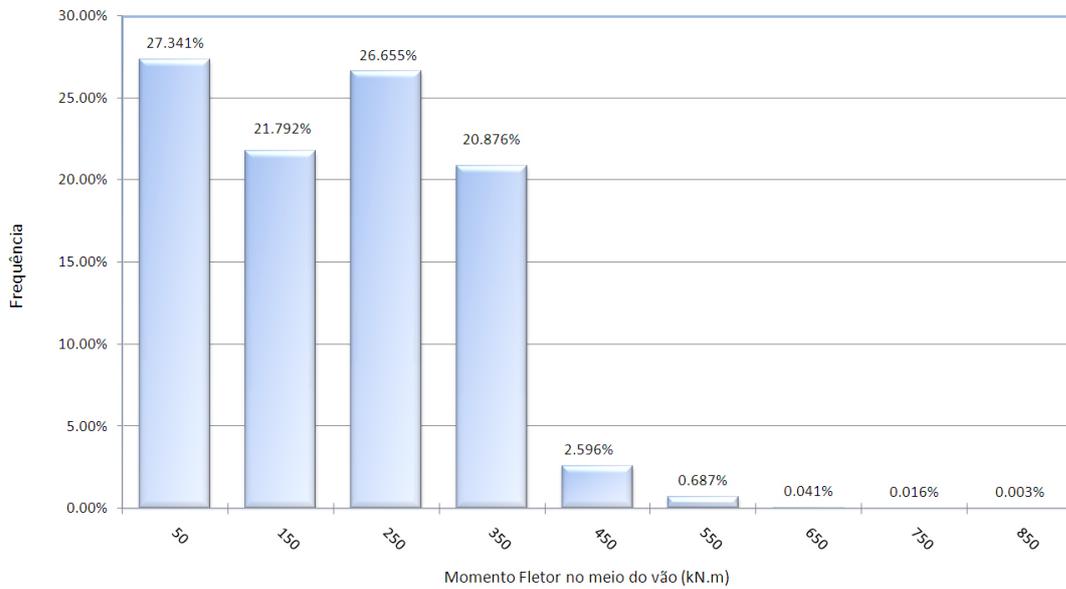


Figura 4.16: Distribuição de frequências para o Momento fletor dinâmico - SIURB-SP.

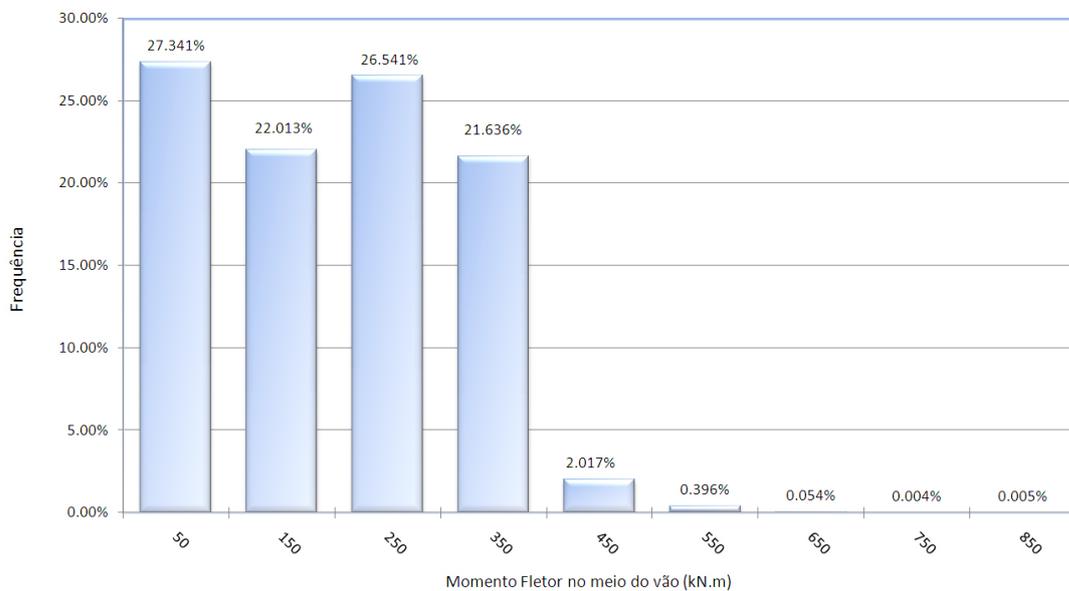


Figura 4.17: Distribuição de frequências para o Momento fletor dinâmico para pavimento com ressalto - SIURB-SP.

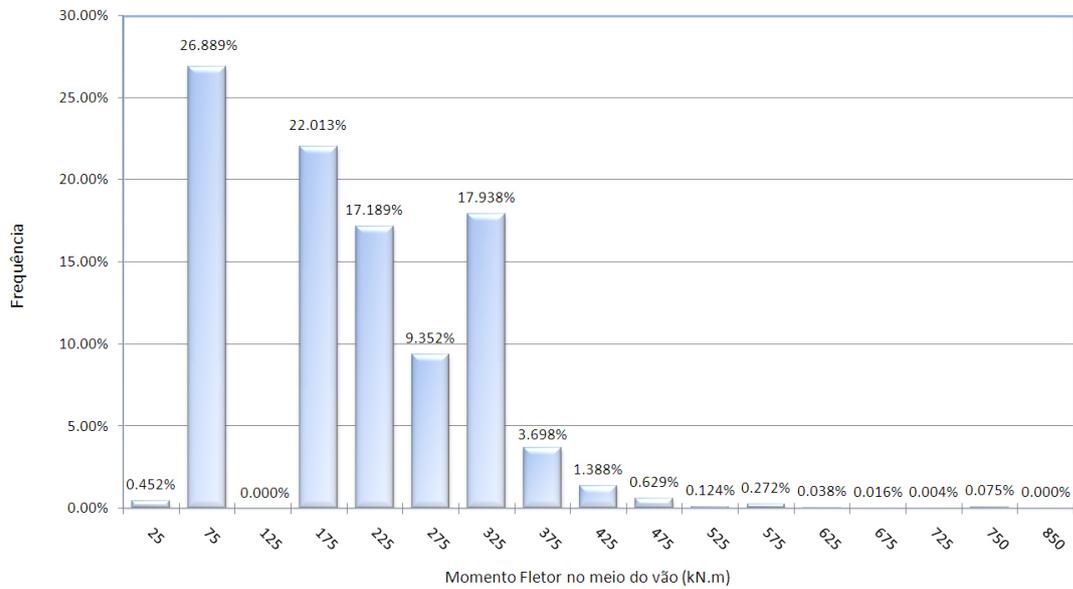


Figura 4.18: Distribuição de frequências para o Momento fletor dinâmico com nova distribuição de faixas - SIURB-SP.

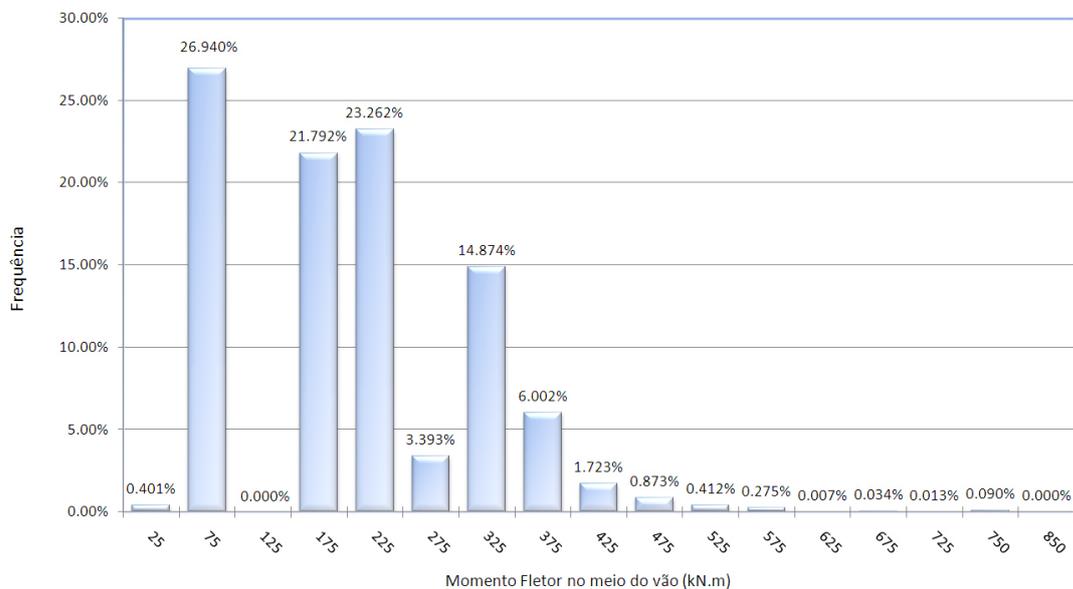


Figura 4.19: Distribuição de frequências para o Momento fletor dinâmico para pavimento com ressalto e com nova distribuição de faixas - SIURB-SP.

Para podermos comparar os histogramas estáticos com os dinâmicos temos que utilizar outro tipo de gráfico, o de densidade de frequência, onde as ordenadas que representam as frequências são divididas pela largura de cada faixa para os histogramas estático e dinâmico. Com isto, pode-se comparar dois histogramas com distribuição de faixas de esforços diferentes. As Figuras 4.20 e 4.22 exibem os histogramas de densidade de frequência para a comparação estática-dinâmica e estática-dinâmica com ressalto. Nas Figuras 4.21 e 4.23 são apresentadas ampliações das caudas dos histogramas de momento fletor das Figuras 4.20 e 4.22.

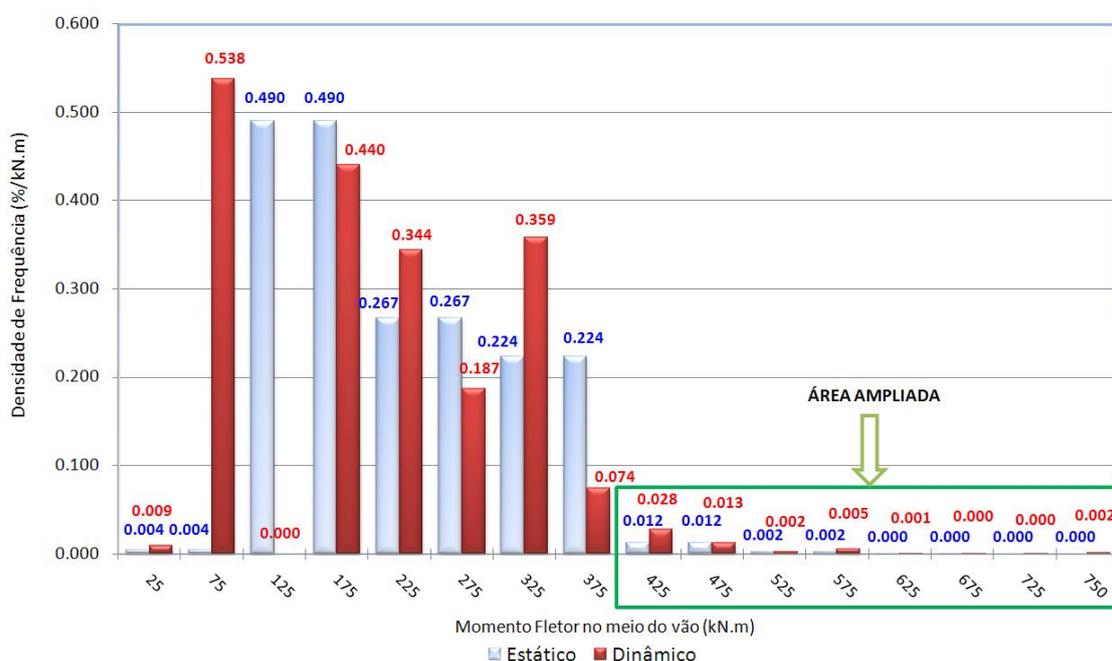


Figura 4.20: Densidade de frequência para comparação do momento fletor estático e dinâmico.

Adotando o mesmo critério que foi utilizado para os histogramas de momento fletor no meio do vão, as Figuras 4.24 à 4.30 apresentam os histogramas para o esforço cortante no apoio.

Com base nos resultados apresentados nos histogramas de esforços nota-se uma grande amplificação dos mesmos quando comparados aos esforços estáticos multiplicados pelo coeficiente de impacto na NBR7188 (1982). Este efeito será de grande importância para a extrapolação dos resultados através da estatística de extremos.

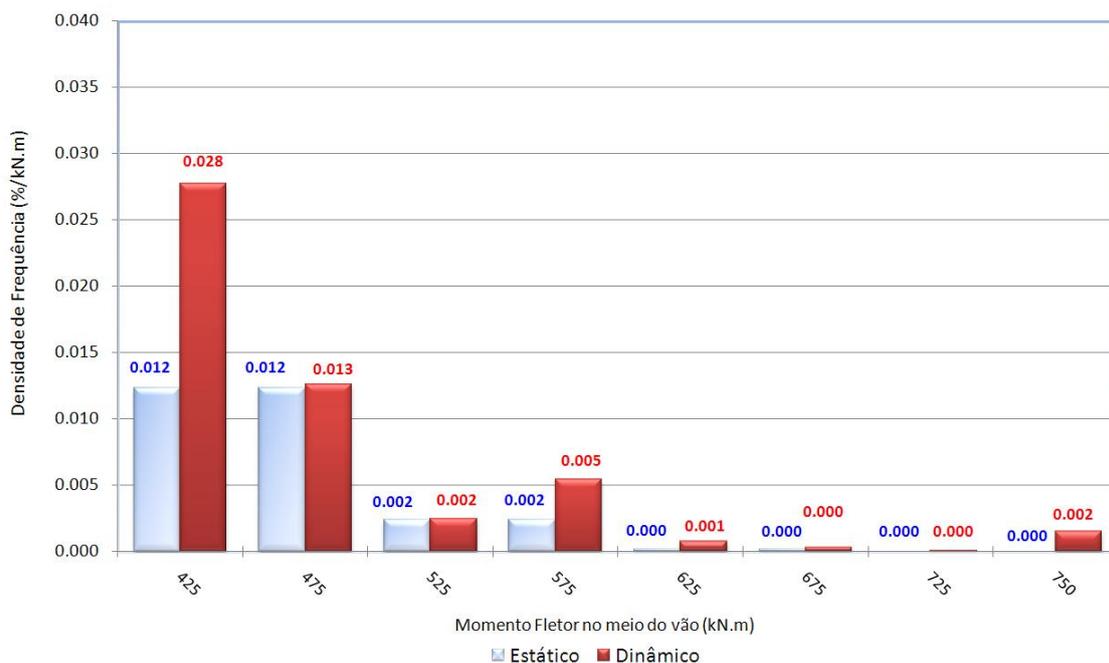


Figura 4.21: Ampliação da cauda do histograma de densidade de frequência da Figura 4.20 para comparação do momento fletor estático e dinâmico.

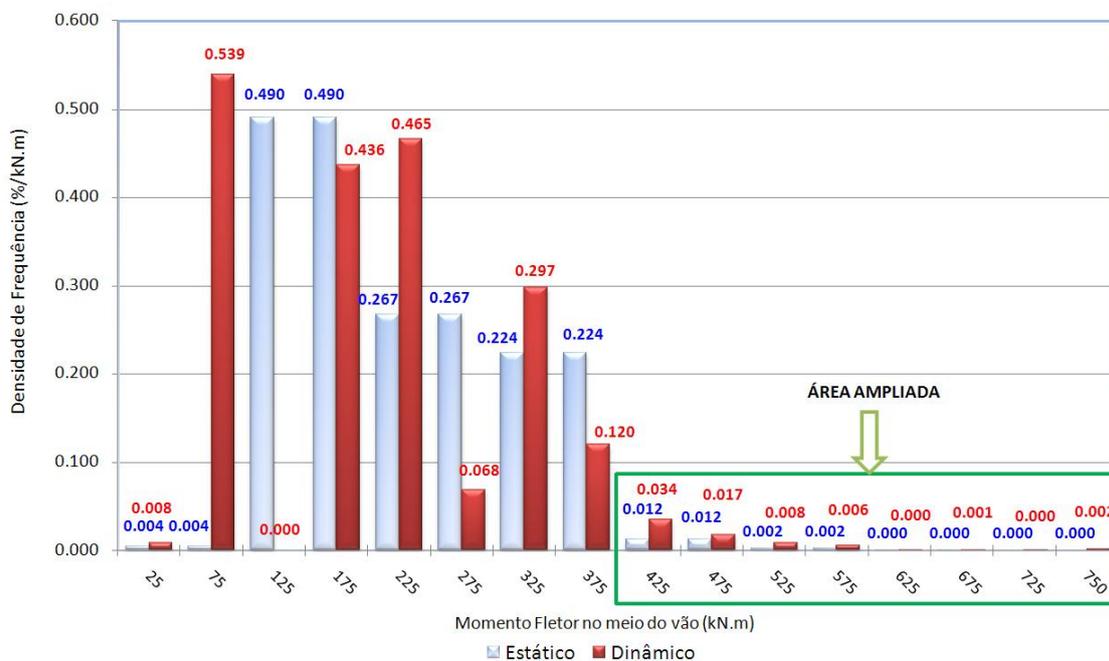


Figura 4.22: Densidade de frequência para comparação do momento fletor estático e dinâmico com ressaltos.

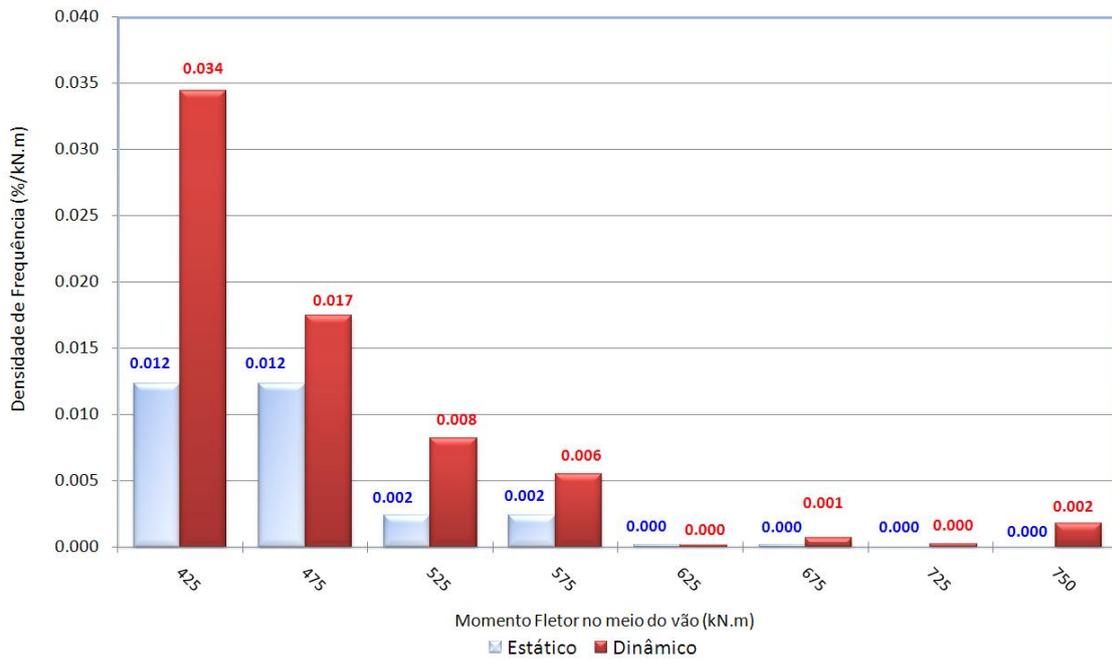


Figura 4.23: Ampliação da cauda do histograma de densidade de frequência da Figura 4.22 para comparação do momento fletor estático e dinâmico com ressaltos.

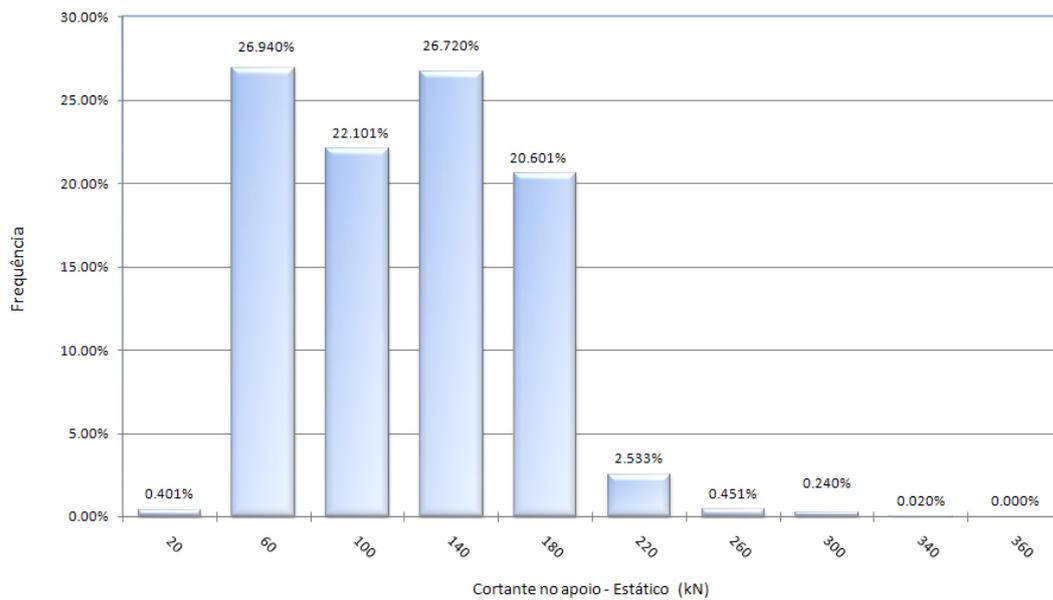


Figura 4.24: Distribuição de frequências Cortante estático - SIURB/SP.

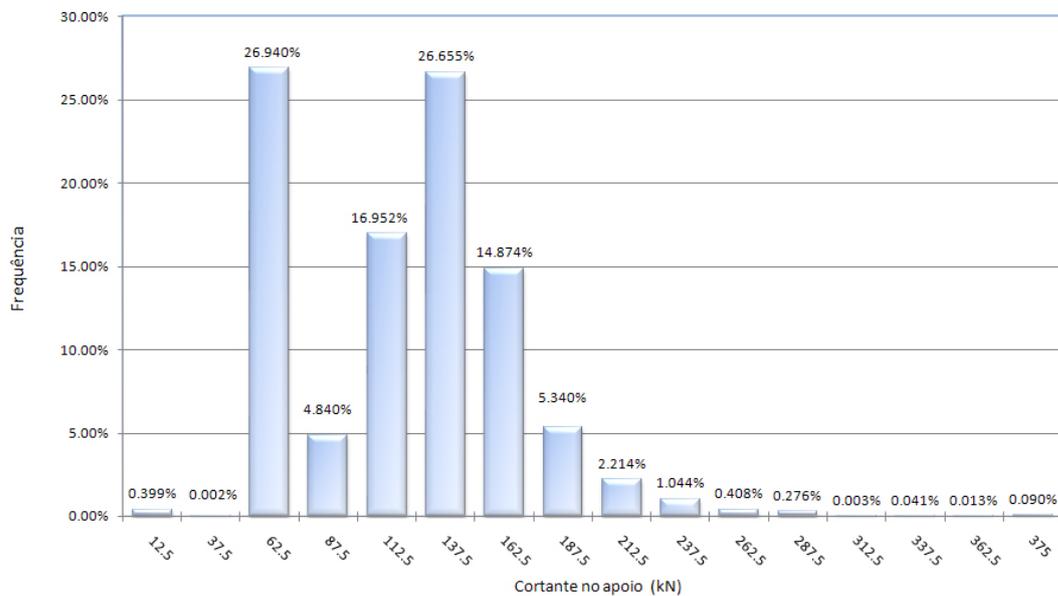


Figura 4.25: Distribuição de frequências para o Cortante dinâmico com nova distribuição faixas - SIURB/SP.

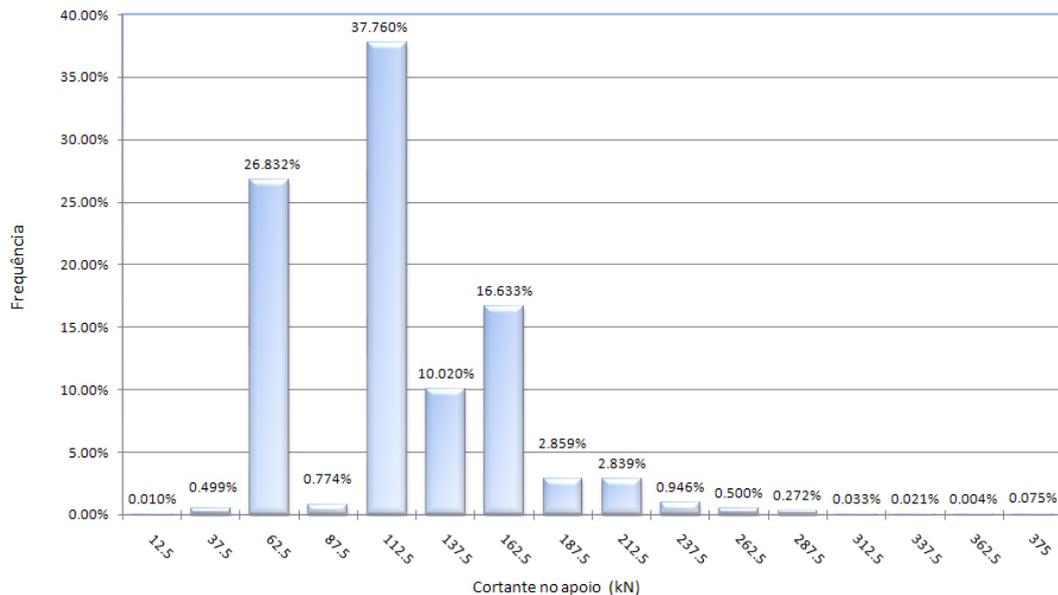


Figura 4.26: Distribuição de frequências para o Cortante dinâmico com ressaltos e com nova distribuição faixas - SIURB/SP.

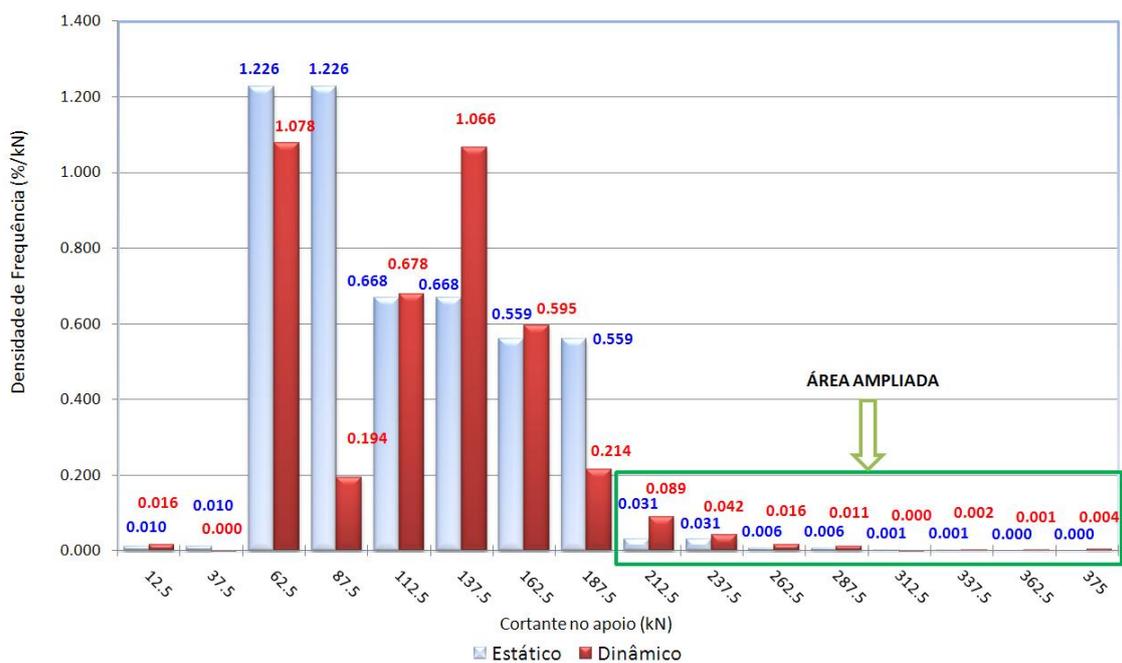


Figura 4.27: Densidade de frequência para comparação do cortante estático e dinâmico - SIURB/SP.

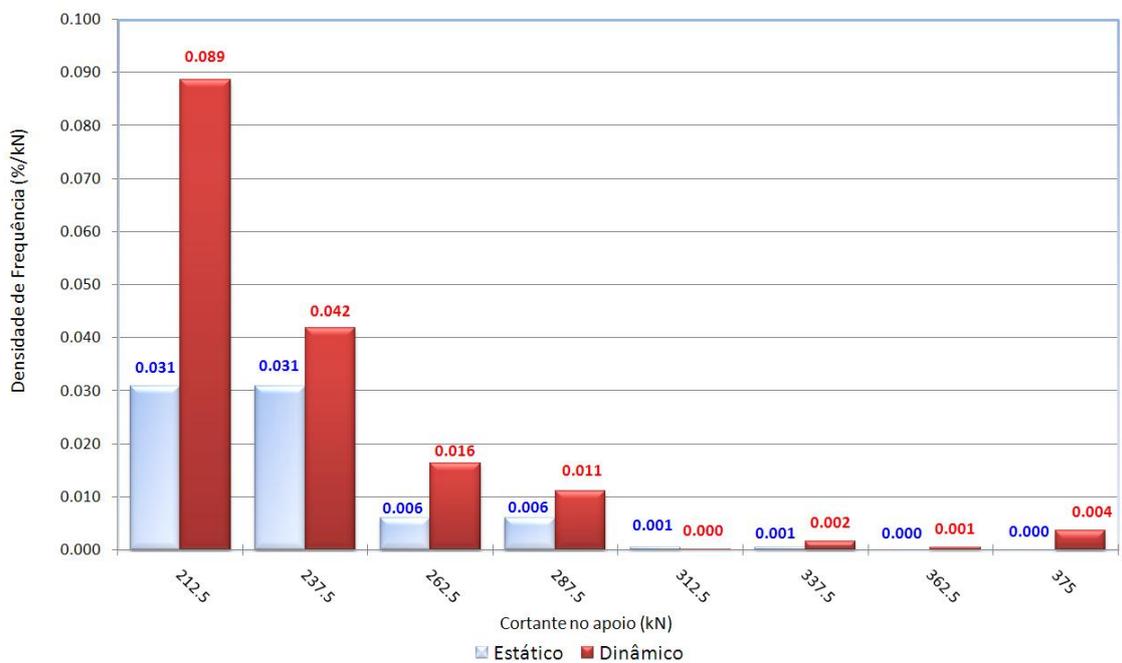


Figura 4.28: Ampliação da cauda do histograma de densidade de frequência da Figura 4.27 para comparação do cortante estático e dinâmico - SIURB/SP.

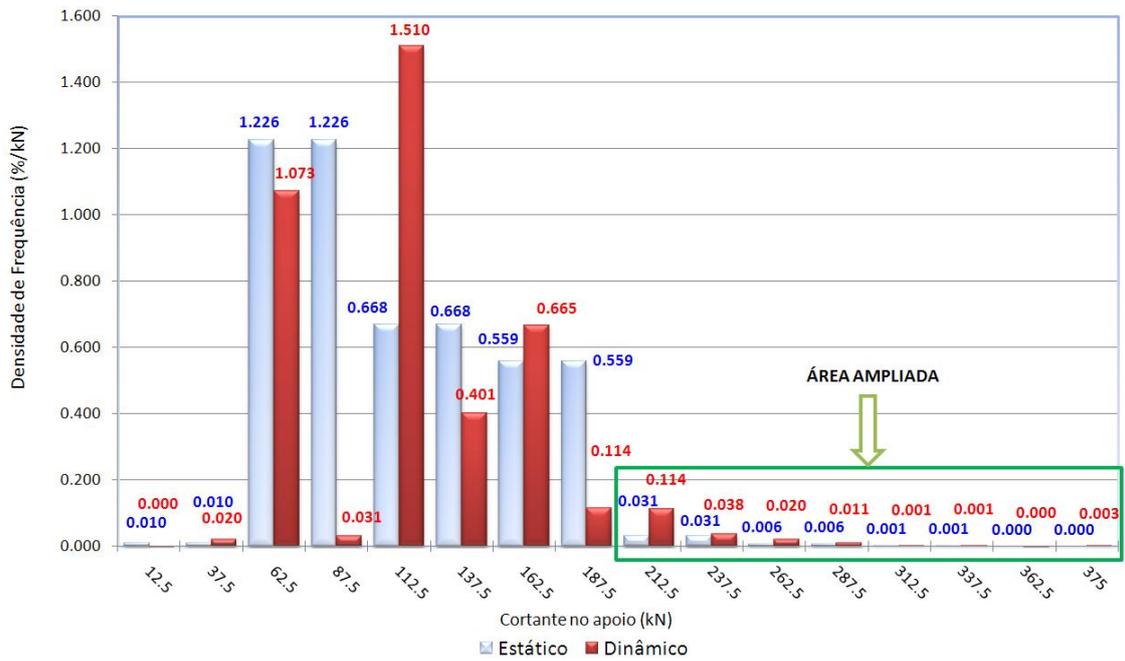


Figura 4.29: Densidade de frequência para comparação do cortante estático e dinâmico com ressalto - SIURB/SP.

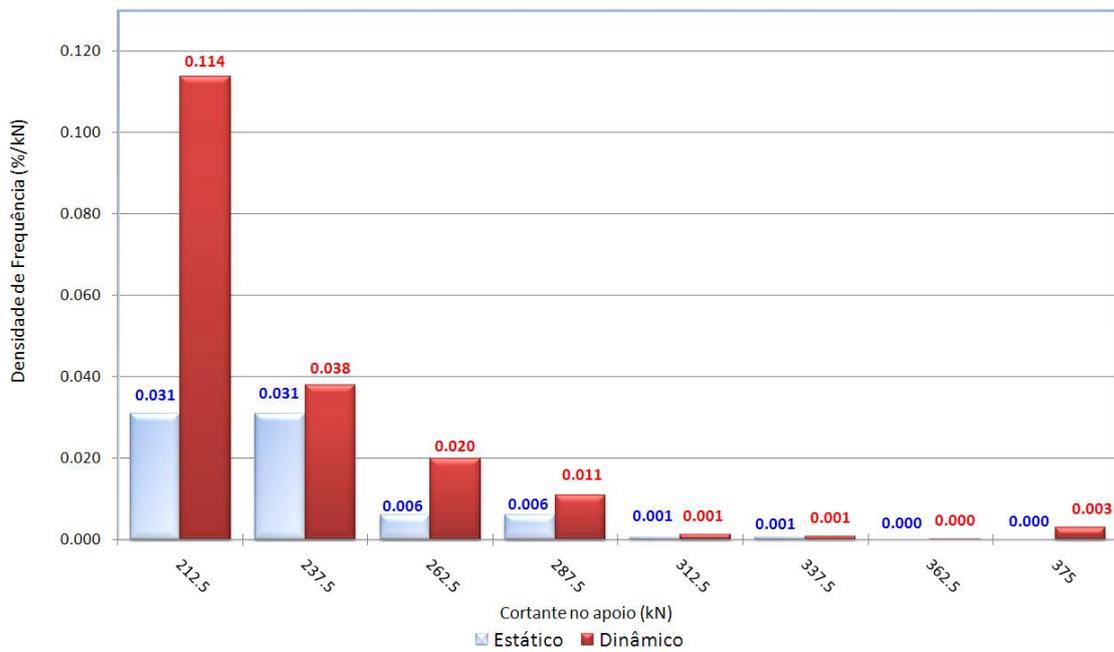


Figura 4.30: Ampliação da cauda do histograma de densidade de frequência da Figura 4.29 para comparação do cortante estático e dinâmico com ressalto - SIURB/SP.

Capítulo 5

Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

5.1 Conclusões

De acordo com a norma brasileira NBR-7188 (1982), para se levar em conta os efeitos dinâmicos das cargas móveis sobre as pontes, multiplicam-se os efeitos estáticos devido a um carregamento especificado, pelo coeficiente de impacto, função apenas do vão da ponte. Esta abordagem não corresponde à realidade do comportamento das pontes já que uma série de outros parâmetros interfere na resposta dinâmica das estruturas.

A elaboração de modelos de cargas móveis no Brasil que representam os efeitos do tráfego real de veículos nas pontes motivou o presente trabalho. Desenvolveu-se uma ferramenta numérica com pré e pós-processamento gráfico que permite a elaboração automática de histogramas de esforços críticos em pontes do tipo grelha sob ação da passagem de veículos pesados. Os esforços já incluem os efeitos dinâmicos pois são obtidos a partir de um modelo analítico-numérico da interação veículo-pavimento-estrutura (MELO, 2007). Para a aplicação do modelo utilizou-se os estudos de tráfego real de veículos elaborado por ROSSIGALI (2006).

O programa foi validado através de comparações de resultados estáticos e dinâmicos com o software comercial SAP2000® e com o IVPE-U (MELO, 2007), respectivamente.

Os histogramas gerados com o programa e apresentados neste trabalho refere-se

ao momento fletor no meio do vão biapoiado e o esforço cortante no apoio de uma ponte com duas longarinas com 10m de vão, devido a passagem de veículos de 3 eixos.

Este estudo conduziu às seguintes conclusões:

- Observou-se uma sensível diferença nos histogramas de esforços para a distribuição constante de peso para o veículo 3C e para os histogramas com a distribuição não uniforme seguindo o critério do SIURB/SP. Este critério admite que para os veículos com cargas menores ou com o veículo vazio, o peso fica mais bem distribuído entre os eixos dianteiro e traseiro devido ao peso do motor. Essa consideração é a que mais se aproxima da realidade e possui uma distribuição hiperbólica.
- Com uma distribuição larga de faixas de esforços, a influência das ações dinâmicas não foram observadas nos histogramas. Com isto houve a necessidade de refinar os histogramas para chegarmos aos resultados esperados. Para os veículos mais leves que conseqüentemente trafegam mais rápido, as análises dinâmicas mostraram que estes possuem o maior coeficiente de amplificação dinâmica, razão entre o esforço dinâmico e o esforço estático, tanto para o momento fletor no meio do vão quanto para o cortante no apoio. Pode-se concluir também que para os veículos mais pesados, representados pelas caudas dos histogramas de esforços, a amplificação dinâmica também se mostra presente e este efeito é de grande importância para a extrapolação dos valores pela estatística de extremos na busca por novos modelos de cargas móveis em pontes rodoviárias.
- A ferramenta desenvolvida neste trabalho foi preparada para que todos os tipos de veículo e esquemas estruturais possam ser implementados de tal forma que os modelos de cargas móveis sejam desenvolvidos de forma rápida e precisa.

5.2 Sugestões

Para dar continuidade a este trabalho no sentido de elaborar modelos de carga móveis que representam o tráfego real, a ferramenta computacional aqui desenvolvida deve ser utilizada para a geração de dados para a determinação de histogramas de frequência de ocorrência de esforços solicitantes para pontes com diversos comprimentos de vãos biapoiados, contínuos de dois vão e com balanços. Seguindo o trabalho realizado por ROSSIGALI (2006) para os esforços solicitantes sem considerar a interação veículo-pavimento-estrutura, após o ajuste de densidade de probabilidade destes histogramas chega-se, por meio da estatística de extremos, aos valores representativos dos esforços associados a um determinado tempo de recorrência. Os modelos de carga móvel devem ser então buscados, por otimização, de forma a reproduzir nas estruturas analisadas os esforços extremos devidos ao tráfego real.

Os dados coletados por ROSSIGALI (2006) devem ser atualizados e complementados com veículos articulados do tipo Bi-trem. Este veículo vem ganhando cada vez mais espaço no mercado nacional devido ao seu melhor custo-benefício-volume de carga transportada em relação aos veículos articulados de classe 2S2 e 2S3. Devem ser também implementados no IVPE-v.2 as equações de movimento para os veículos articulados citados acima. Desta forma pode-se cobrir boa parte do espectro de veículos pesados e pontes existentes na malha rodoviária brasileira.

Além de pontes em grelhas e de pistas simples e de vãos curtos devem ainda ser considerados outras situações tais como:

- outras classes de pontes, com 4 faixas de tráfego;
- outros sistemas estruturais e outras faixas de comprimentos de vão:
- em laje, para vãos curtos, com comprimento entre 5m e 10m;
- com mais de duas longarinas de seção aberta, (3, 4, 5, 6...);
- com longarinas de seção celular, para meios urbanos (onde há redução da altura da seção);

- vãos maiores, de 50m a 200m.
- Outro efeito de grande importância que pode ser estudado refere-se as oscilações de vibrações livres amortecidas dos deslocamentos e esforços após o veículo sair da estrutura. Este efeito provoca variação de tensões nos elementos estruturais que devem ser avaliados sob o aspecto de fadiga nas armações e fissuração no concreto;
- Calcular as distâncias dos eixos ao centro de massa do veículo para diferentes distribuições de cargas por eixo;

Referências Bibliográficas

- [1] ABNT, “NB6 - Carga móvel em ponte rodoviária e passarela de pedestre.” *Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro*, 1943.
- [2] ABNT, “NB6 - Carga móvel em ponte rodoviária e passarela de pedestre.” *Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro*, 1960.
- [3] ABNT, “NB6 - Carga móvel em ponte rodoviária e passarela de pedestre.” *Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro*, 1982.
- [4] ABNT, “NBR6118 - Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento.” *Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro*, 2003.
- [5] ABNT, “NBR7187 - Projeto e Execução de Pontes em Concreto Armado e Protendido - Procedimento”, *Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro*, 2003.
- [6] ABNT, “NBR8681 - Ações e Segurança nas Estruturas - Procedimento”, *Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro*, 2003.
- [7] BARBOSA, F. S., “Efeitos da Interação veículo-pavimento-estrutura em Pontes Metálicas com tabuleiro ortotrópico.” *Exame de Qualificação para Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*, 1998.
- [8] BATHE, K. J., *Finite element procedures*. Prentice-Hall, 1992.
- [9] BATTISTA, R. C., “Notas de Aula de Dinâmica de Estruturas.” *COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*, 2006.
- [10] CARNEIRO, R. J. F. M., *Análise de Pontes Rodoviárias sob Ação de Cargas Móveis*. Dissertação de M. Sc., PUC, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1986.

- [11] CARNEIRO, F. L. L. B., “Análise Dimensional e Teoria da Semelhança e dos Modelos Físicos.” 3ª Edição, Rio de Janeiro, Editora UFRJ., 1993.
- [12] CLOUGH, R. W., “Dynamics of Structures.” 2ª Ed., McGraw-Hill Co., 1993.
- [13] COOK, R. D., *Concepts and applications of finite elements analysis*. 3rd ed. Wiley, 1995.
- [14] “Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes”, 2008, www.dnit.gov.br.
- [15] HONDA, H., “Spectra os Road Surface Roughness on Bridges.” *Journal of the Structural Division*, v. 108, ST9, 1956-1966, 1982.
- [16] MELO, E. S., *Interação Dinâmica Veículo-Estrutura em Pequenas Pontes Rodoviárias*. Dissertação de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.
- [17] PACITTI, T., *Programação e Métodos Computacionais*. 1st ed., v. 1 e 2. Livros Técnicos e Científicos: Rio de Janeiro, 1976.
- [18] PRAT, M., “Traffic Load Models for Bridge Design: recent development and research”, *Prodress in Structural Engineering and Materials*, v. 3, pp. 326–334, 2001.
- [19] RAO, S. S., *Finite Element Method in Engineering*. 4th ed. Elsevier Science and Technology Books, 2004.
- [20] ROSSIGALI, C. E., *Estudos Probabilísticos para Modelos de Cargas Móveis em Pontes Rodoviárias no Brasil..* Dissertação de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2006.
- [21] SANTOS, E. F., *Soluções Alternativas Para o Problema de Concentração de Tensões e Fadiga em Estruturas Metálicas Esbeltas de Tabuleiros Ortotrópicos de Pontes..* Exame de qualificação para doutoramento, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2005.
- [22] TIMOSHENKO, S., *Strength os Materials*. v. 1 e 2. D. Van Nostrand Company, Inc., 1948.

- [23] TIMOSHENKO, S., *Theory of Elasticity*. McGraw-Hill, 1951.
- [24] WIDMER, J. A., “Compatibilidade de Tráfego de Bitrens de 25m com a infra-estrutura viária brasileira”, *In Anais do Segundo Colloquium Internacioanl de Suspensões*, v. 3, maio 2002.
- [25] ZIENKIEWICZ, O. C., *The finite element method*. 4th ed., v. 1 e 2. McGraw-Hill, 1989.

Apêndice A

- Normas para Cargas Móveis de Pontes

A.1 Evolução da Norma Brasileira

A.1.1 A NB-6/1943

Na década de 40, foi publicada no Brasil a primeira versão da norma NB-1, atual NBR-6118/2003, que regulamentava a análise e dimensionamento de estruturas de concreto armado. Porém, com o tempo houve a necessidade de complementar esta norma com questões mais específicas, como as pontes. Assim em 1943 foi publicada a NB-6: Cargas Móveis em Pontes Rodoviárias. As pontes rodoviárias eram classificadas em três grupos:

- Classe I: Pontes situadas em estradas-tronco federais e estaduais ou nas estradas principais de ligação entre esses troncos;
- Classe II: Pontes situadas em estradas de ligação secundárias, mas que, atendendo as circunstâncias especiais do local, haja conveniência em se prever a passagem de veículos pesados;
- Classe III: Pontes situadas em estradas de ligação secundárias não incluídas na classe II.

O trem-tipo era composto por cargas de compressores, caminhões e multidão, dispostos como descrito nas Tabelas A.2 e A.3. A multidão representa o tráfego de

veículos de pequeno porte que pode atuar em conjunto com a passagem do caminhão e/ou do compressor. A multidão é constituída por carga uniformemente distribuída cuja intensidade é função do parâmetro g_o , mostrado a seguir.

Para o cálculo dos arcos ou vigas principais:

- Com menos de 25m de vão teórico..... g_o
- Com vão L, em metros, entre 25m e 125m..... $g_o - (L - 25)m$
- Com mais de 125m de vão teórico..... $g_o - 1kN/m^2$
- Demais elementos da construção..... g_o

onde para a classe I, $g_o = 4,5kN/m^2$ e para as classes II e III, $g_o = 4kN/m^2$.

Tabela A.1: Cargas de Multidão segundo a NB-6 - ABNT (1943)

Característica da Estrutura	Carga de Multidão (kN/m^2)		
	Classe I	Classe II	Classe III
-			
$L \leq 25m$	4,5	4,0	4,0
$25m < L \leq 125m$	$4,5 - (L - 25)$	$4,0 - (L - 25)$	$4,0 - (L - 25)$
$L > 125m$	3,5	3,0	3,0

A carga de multidão distribui-se sobre os passeios e sobre a parte do tabuleiro não ocupada pelos veículos. Para esse fim, a área ocupada por um veículo (compressor ou caminhão) é suposta retangular, com 2,5 m de largura e 6,0 m de comprimento, com o centro sobre o eixo longitudinal do veículo e a igual distância dos eixos dianteiro e traseiro.

No cálculo dos arcos ou vigas principais, com 30 m ou mais de vão, permite-se ainda substituir as cargas concentradas dos veículos (compressor ou caminhão) por carga uniformemente distribuída, sobre área retangular com 2,5 m de largura e 6,0 m de comprimento, cuja resultante é igual à soma das cargas concentradas.

O trem-tipo para pontes da Classe III é composto de multidão calculada com $g_o = 400kg/m^2$ ($4,0kN/m^2$), de um compressor Tipo A e de tantos caminhões Tipo A, quantas forem as faixas de tráfego, menos uma, todos orientados na direção do tráfego e colocados na posição mais desfavorável para o cálculo de cada elemento,

PONTES DE CONCRETO ARMADO

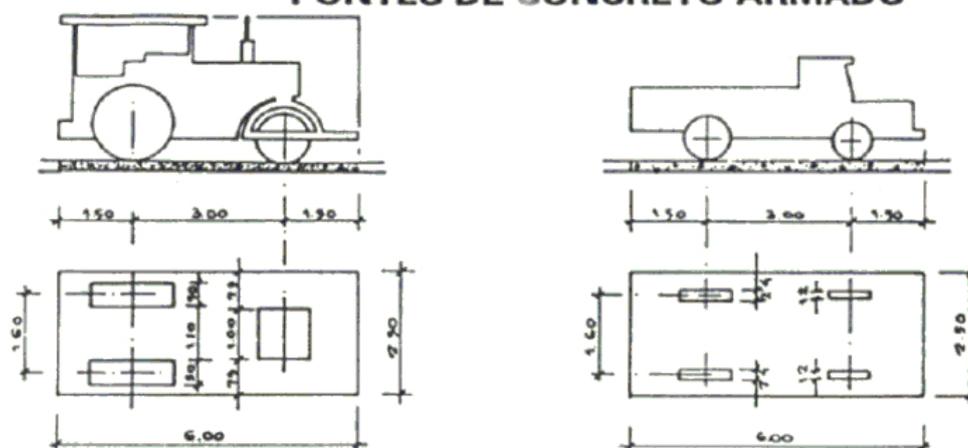


Figura A.1: Compressor e caminhão utilizado no trem-tipo da NB-6 - ABNT (1943)

Tabela A.2: Cargas para Compressores segundo a NB-6 - ABNT (1943)

COMPRESSORES	Tipo A	Tipo B	Tipo C	Unidade
Peso Total	70	160	240	kN
Peso da Roda Dianteira	50	70	100	kN
Peso da Roda Traseira	10	45	70	kN
Largura da Roda Dianteira	1	1	1	m
Largura da Roda Traseira	10	40	50	cm
Distância entre os eixos Dianteiro e Traseiro	3	3	3	m
Distância entre os meios das rodas traseiras	160	160	160	cm

Tabela A.3: Cargas para Caminhões segundo a NB-6 - ABNT (1943)

CAMINHÕES	Tipo A	Tipo B	Unidade
Peso Total	60	90	kN
Peso da Roda Dianteira	7,5	15	kN
Peso da Roda Traseira	22,5	30	kN
Largura da Roda Dianteira	8	12	cm
Largura da Roda Traseira	18	24	cm
Distância entre os eixos Dianteiro e Traseiro	3	3	m
Distância entre os meios das rodas diant. ou traseiras	160	160	cm

apenas com a seguinte restrição: nunca se colocará mais de um veículo sobre cada faixa de tráfego, nem em posição que dê lugar a afastamento de menos de 2,5m entre eixos longitudinais de dois veículos.

O trem-tipo para pontes da Classe II é o mesmo da Classe III, devendo, porém, verificar-se ainda a resistência da estrutura para um compressor Tipo B (Tabela A.2), posto isolado sobre a ponte, na posição mais desfavorável para o elemento estudado, mas sempre orientado na direção do tráfego.

O trem-tipo para pontes da Classe I compõe-se de multidão com $g_o = 450kg/m^2$ ($4,5kN/m^2$), de um compressor Tipo B e de tantos caminhões tipo B quantas forem as faixas de tráfego, menos uma, e dispostos como no caso da Classe III. A resistência da estrutura deve ainda ser verificada para um compressor Tipo C (Tabela A.2), colocado como no caso da Classe III.

A.1.2 A NB-6/1960

Em 1960 foi publicada a NB-6, que esteve em vigor por mais de 20 anos. Esta norma estabelecia as classes de cargas 360, 240 e 120kN para as rodovias de classe I, II e III, respectivamente. As cargas são consideradas através de trens-tipo idealizados que não refletem a realidade dos veículos passantes nas obras, seja em relação a carga por eixo, seja em relação à distribuição de eixos. Tais trens-tipo são idênticos aos considerados nas normas alemãs da época.

O notável crescimento do Brasil no período das décadas de 1960 e 1970 possibilitou a ampliação da malha rodoviária nacional, o que conseqüentemente trouxe a construção de milhares de obras-de-arte que foram projetadas pela NB-6, norma em vigor na época.

O trem-tipo, sempre orientado na direção do tráfego, deve ser colocado na posição mais desfavorável para o cálculo de cada elemento, não se considerando a carga do eixo ou da roda que produza redução de esforços solicitantes. Para o cálculo de placas, longarinas e transversinas junto às bordas do tabuleiro, é obrigatório encostar a roda do veículo-tipo no guarda-rodas. A carga p deve ser aplicada na faixa longitudinal correspondente ao veículo na parte não ocupada por este e a carga p' na parte restante da pista de rolamento e nos passeios, como mostra a figura 2.2. Nos casos em que os guarda-rodas tiverem altura superior a 25cm, contados a partir

Tabela A.4: Cargas segundo a NB-6 - ABNT (1960)

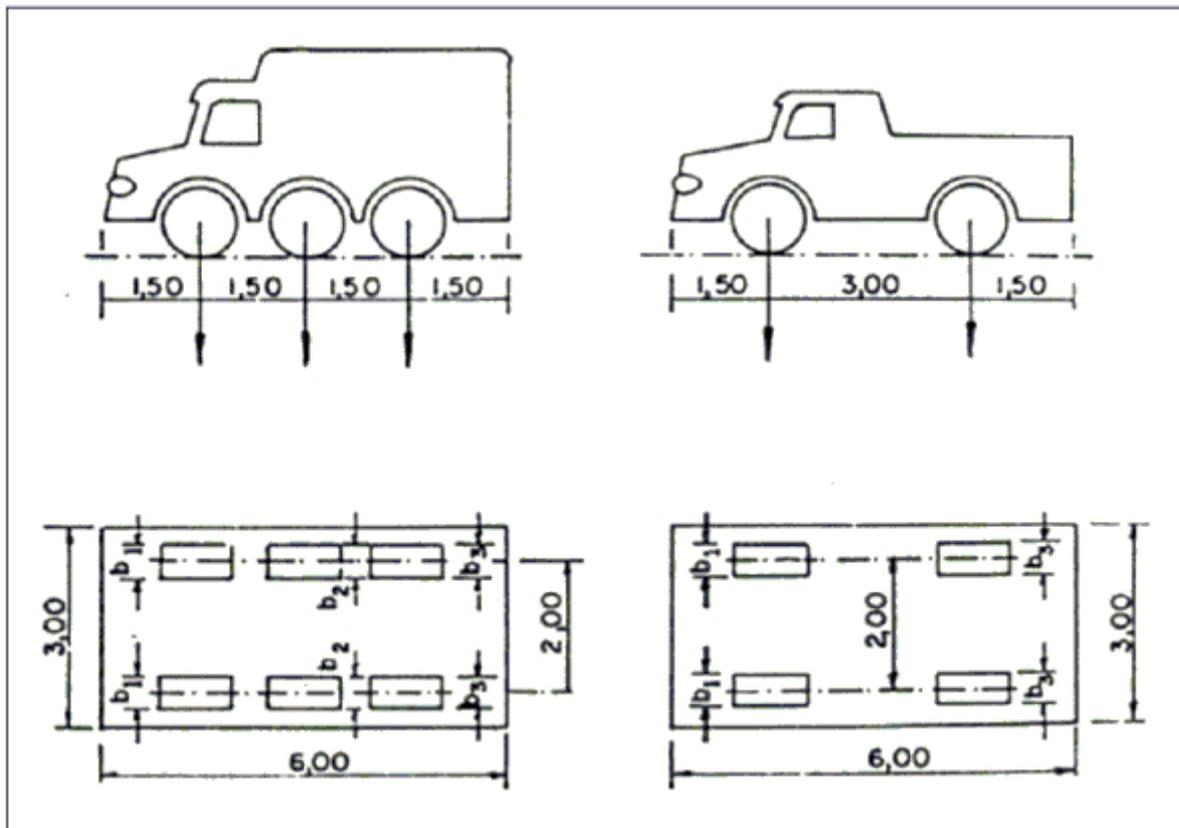
Classe da Ponte	Veículo (kN)		Carga Distribuída (kN/m^2)			Classe da Rodovia
	Tipo	Peso Total	p	p'	Disposição	
36	36	360	5	3	FT	Classe I
24	24	240	4	3	FT	Classe II
12	12	120	3	3	RP	Classe III
FT - carga p à frente e atrás do veículo						
RP - carga p' no restante da pista e passeios						

da borda de pavimentação da pista, e ocuparem faixa de largura útil de, no máximo, 75cm, não se deve dispor carga devido à multidão na faixa ocupada por ele. Nos outros casos, a multidão deve ser considerada na faixa ocupada pelo guarda-rodas. Quando se tratar de ponte com refúgios centrais elevados, em rodovias de mais de uma pista, é obrigatório o carregamento dessa área, com carga p'.

Tabela A.5: Características do veículos-tipo - NB-6 - ABNT (1960)

	Unid.	Tipo 36	Tipo 24	Tipo 12
Quantidade de eixos	Eixo	3	3	2
Peso total do veículo	kN	360	240	120
Peso de cada roda dianteira	kN	60	40	20
Peso de cada roda traseira	kN	60	40	40
Peso de cada roda intermediária	kN	60	40	-
Largura de contato b1 de cada roda dianteira	m	0,45	0,35	0,20
Largura de contato b3 de cada roda traseira	m	0,45	0,35	0,30
Largura de contato b2 de cada roda intermediária	m	0,45	0,35	-
Comprimento de contato de cada roda	m	0,20	0,20	0,20
Área de contato de cada roda	m ²	0,20 x b	0,20 x b	0,20 x b
Distância entre eixos	m	1,50	1,50	3,00
Distância entre os centros de roda de cada eixo	m	2,00	2,00	2,00

No cálculo dos arcos ou vigas principais com 30m ou mais de vão, permite-se, ainda, substituir as cargas concentradas do veículo por carga igual, mas



(a) Classes 36 e 24

(b) Classe 12

Figura A.2: Classes de Veículos-Tipo da NB-6 - ABNT (1960)

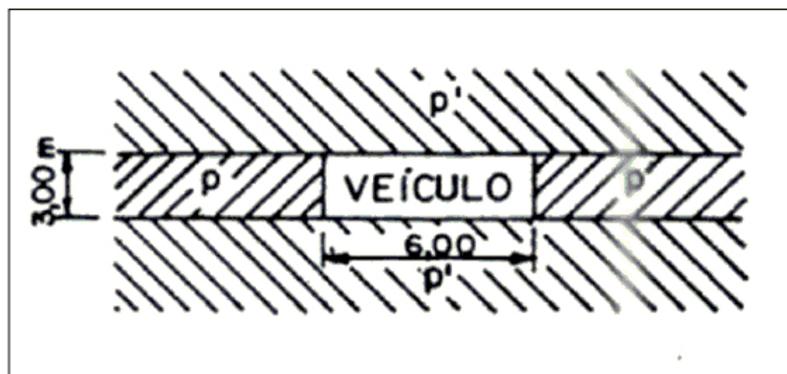


Figura A.3: Veículo-Tipo e multidão em planta para NB-6 - ABNT (1960)

uniformemente distribuída, disposta sobre área retangular ocupada pelo mesmo, o chamado trem-tipo homogeneizado.

A.1.3 A NBR-7188/1982

Em 1982, foi publicada a norma NBR-7188: Cargas Móveis em Pontes Rodoviárias e Passarelas para Pedestres, substituindo os trens-tipo de 240 e 360kN por 300 e 450kN, respectivamente. No entanto foi mantida a distribuição de eixos, continuando assim a não refletir a realidade do tráfego existente nas rodovias nacionais. Esta norma segue em vigor até os dias de hoje.

A norma define três veículos-tipo, respectivamente para as classes 12, 30 e 45. O número da classe corresponde ao peso em toneladas do veículo-tipo. A área ocupada pelo veículo é retangular, de 3,0 m de largura por 6,0 m de comprimento.

As cargas uniformemente distribuídas na pista e no passeio têm intensidade p e p' , respectivamente, dada pela Tabela A.6.

Tabela A.6: Cargas segundo a NBR-7188 - ABNT (1982)

Classe da Ponte	Veículo		Carga distribuída (kN/m ²)		Distribuição da carga
	Tipo	Peso total (kN)	p	p'	
45	45	450	5	3	TPP
30	30	300	5	3	TPP
12	12	120	4	3	TPP

A norma NBR-7188/1982 não estabelece a utilização das diferentes classes, ficando a critério dos órgãos jurisdicionais a sua definição. Nas vias principais rurais e urbanas as pontes são projetadas para a classe 45. As outras classes são utilizadas apenas para rodovias secundárias, de caráter local ou regional.

O coeficiente que leva em conta o efeito dinâmico das cargas móveis, chamado de coeficiente de impacto, é estabelecido pela norma NBR-7187/1987: Projeto e execução de pontes de concreto armado e protendido. O coeficiente de impacto, a ser aplicado nas cargas móveis para projeto da superestrutura e pilares, excetuando-se

Tabela A.7: Características do veículos-tipo - NBR-7188 - ABNT (1982)

	Unid.	Tipo 45	Tipo 30	Tipo 12
Quantidade de eixos	Eixo	3	3	2
Peso total do veículo	kN	450	300	120
Peso de cada roda dianteira	kN	75	50	20
Peso de cada roda traseira	kN	75	50	40
Peso de cada roda intermediária	kN	75	50	-
Largura de contato b1 de cada roda dianteira	m	0,50	0,40	0,20
Largura de contato b3 de cada roda traseira	m	0,50	0,40	0,30
Largura de contato b2 de cada roda intermediária	m	0,50	0,40	-
Comprimento de contato de cada roda	m	0,20	0,20	0,20
Área de contato de cada roda	m ²	0,20 x b	0,20 x b	0,20 x b
Distância entre eixos	m	1,50	1,50	3,00
Distância entre os centros de roda de cada eixo	m	2,00	2,00	2,00

o projeto da infraestrutura e as cargas p' nos passeios de pedestres, é dado por:

$$\phi = 1,4 - 0,007l \quad (\text{A.1})$$

onde

ϕ - coeficiente de impacto ≥ 1

l - comprimento do vão teórico carregado, em metros.

O veículo-tipo, sempre orientado na direção do tráfego, deve ser colocado na posição mais desfavorável para o cálculo de cada elemento, não se considerando a porção do carregamento que provoque redução nas solicitações. A carga distribuída de intensidade p pode ser aplicada em toda a pista de rolamento, nesta incluídas as faixas de tráfego, os acostamentos e os afastamentos. Deve ser descontada apenas a área ocupada pelo veículo. Os passeios, independentemente de largura ou altura, são carregados com a carga distribuída de intensidade p' , não majorada de impacto. Deve-se ainda ressaltar que a carga p' do trem-tipo da norma de 1982 não tem o mesmo significado da carga p' da norma de 1960. Neste caso, a carga p' é uma carga distribuída relativa à multidão sobre passeios e não sobre a pista de rolamento.

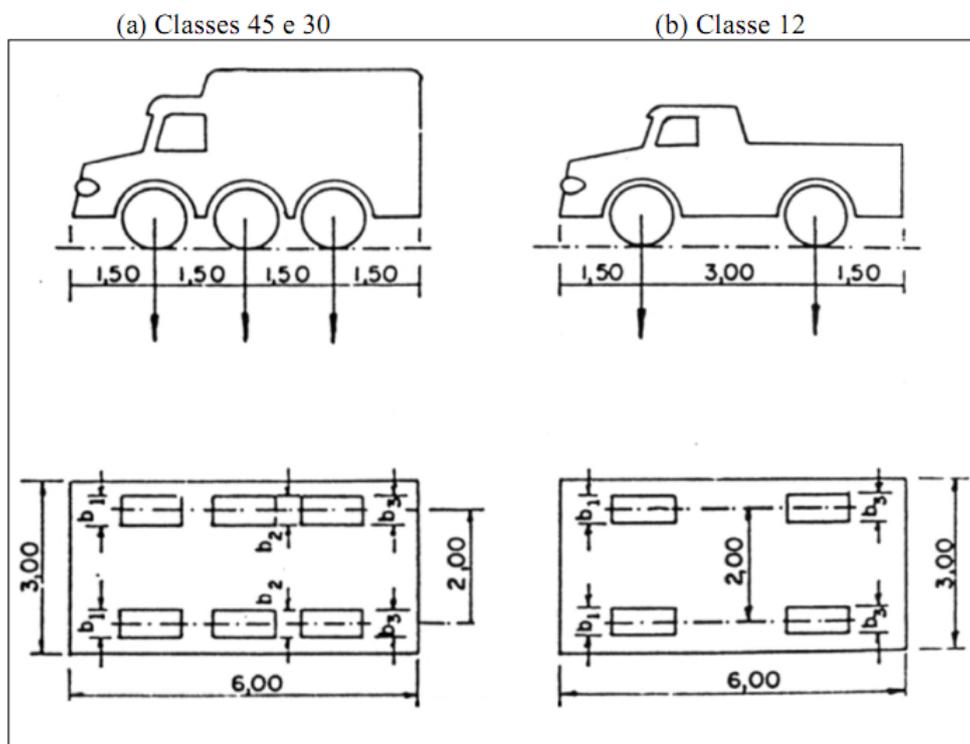


Figura A.4: Classes de Veículos-Tipo da NBR-7188 - ABNT (1982)

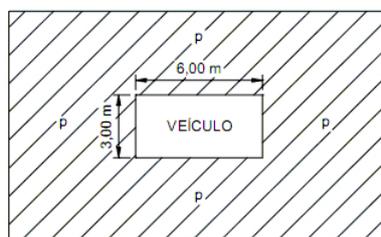


Figura A.5: Veículo-Tipo e multidão em planta para NBR-7188 - ABNT (1982)

Segundo a Norma Brasileira, o coeficiente de majoração das ações para as cargas móveis em pontes, para a verificação no Estado Limite Último é $\gamma_f = 1,5$.

A.2 A Norma Européia - EUROCÓDIGO

A maioria dos países europeus hoje utiliza o Eurocódigo. As cargas de tráfego estão definidas no Eurocódigo 1 - parte 2 (CEN, 2002). Os membros do CEN - Comitê Europeu de Normalização, que elabora esta norma são: Alemanha, Áustria, Bélgica, Dinamarca, Espanha, Finlândia, França, Grécia, Holanda, Islândia, Irlanda, Itália, Luxemburgo, Malta, Noruega, Portugal, República Tcheca, Suécia, Suíça e Reino Unido. Além das padronizações unificadas, cada país estabelece em seu anexo nacional alguns parâmetros que dependem da especificidade local.

A amplificação dinâmica já se encontra incluída nos modelos, e é definida para um pavimento de qualidade média e veículos apoiados em pneus, mas na realidade depende de vários parâmetros, inclusive da interação veículo-estrutura. Portanto, essa representação é aproximada. Assim, a Norma Européia estabelece que para verificações locais, principalmente, se deve considerar fatores de impacto em separado.

Para a obtenção da carga de projeto, a Norma Européia divide o trecho trafegável do tabuleiro em faixas de projeto. A largura w das faixas adotadas em um leito trafegável, e o número máximo possível de faixas n estão na Tabela A.8.

Tabela A.8: Número e largura das faixas de tráfego - Eurocódigo - CEN (2002)

Largura trafegável	Número de faixas de tráfego	Largura da faixa de tráfego	Largura da área remanescente
$w < 5,4\text{m}$	$n = 1$	3,0m	$w - 3,0\text{m}$
$5,4\text{m} \leq w < 6\text{m}$	$n = 2$	$w/2$	0
$6\text{m} \leq w$	$n = \text{Int}(w/3)$	3,0m	$w - 3,0 \times n$

Para cada verificação (por exemplo, estado limite último na flexão), o número de faixas a serem carregadas, a posição e a sua numeração devem ser escolhidas para que os efeitos sejam os mais desfavoráveis possíveis. Para combinação freqüente e de fadiga a posição e numeração das faixas deve ser escolhida dependendo do tráfego

esperado em condições normais. A faixa que fornece os efeitos mais desfavoráveis é numerada como faixa 1, a faixa que dá o segundo efeito mais desfavorável é a faixa 2 e assim sucessivamente.

⇒ Modelos de Carga Vertical

As cargas características são destinadas à determinação de efeitos de tráfego de veículos associado com as verificações de estado limite último e de algumas verificações em serviço. Os modelos de carga 1, 2 e 3, quando importantes, devem ser levados em conta para todos os tipos de situações de projeto (definitivas e temporárias). Já o modelo 4 somente deve ser aplicado em situações provisórias.

Nos passeios de pontes para pedestres ou ciclovias, o valor característico da carga uniformemente distribuída deve ser $q_{fk} = 5kN/m^2$.

⇒ Modelo de Carga 1

O modelo de carga 1 é destinado a cobrir o a fluidez e congestionamento de veículos com uma alta porcentagem de caminhões pesados. Ele deve ser utilizado para a verificação de efeitos globais e locais. Segundo o Eurocódigo, geralmente, quando utilizado com os valores básicos, ele cobre os efeitos de um veículo especial de 600kN. O modelo de carga 1 consiste de dois sistemas parciais:

- cargas concentradas em eixo duplo (sistema em tandem), com cada eixo possuindo a carga $\alpha_Q Q_k$, onde α_Q é um fator de ajuste.
- cargas uniformemente distribuídas (sistema UDL) com a carga distribuída por área de faixa $\alpha_q q_k$, onde α_q é um fator de ajuste.

Vale lembrar que apenas um sistema em tandem deve ser levado em consideração por faixa de tráfego. A superfície de contato de cada roda deve ser tomada como quadrada com lado igual a 0,4 metros. O modelo deve ser aplicado em cada faixa de tráfego e nas áreas remanescentes. Na faixa de tráfego número i , a magnitude das cargas é referida como $\alpha_{Qi} Q_{ik}$ e $\alpha_{qi} q_{ik}$.

Nas áreas remanescentes o valor das cargas é dado por $\alpha_{qr} q_{rk}$. Os valores de α_{Qi} , α_{qi} e α_{qr} são dados nos anexos nacionais. De qualquer modo, para pontes sem sinalização restritiva de carga, os valores recomendados pelo Eurocódigo são,

no mínimo $\alpha_{Q1} \geq 0,8$ e, para: $i \geq 2$, $\alpha_{qi} \geq 1$. Ressalta-se que esta restrição não é aplicável a α_{qr} .

Os valores dos fatores α correspondem, nos anexos nacionais, às classes de tráfego. Quando eles são tomados iguais a 1, correspondem a um tráfego no qual veículos industriais pesados internacionais são esperados, representando uma grande parte do tráfego total de veículos. Para composições mais comuns (rodovias) uma redução moderada dos fatores a aplicados a sistemas tandem e as cargas uniformemente distribuídas na faixa 1 são recomendados (10 a 20%).

Tabela A.9: Cargas para cada faixa - Modelo 1 - CEN (2002)

Posição	Sistema Tandem	Sistema UDL
	Cargas por eixo Q_{ik} (kN)	q_{ik} (kN/m ²)
Faixa número 1	300	9
Faixa número 2	200	2,5
Faixa número 3	100	2,5
Outras faixas	0	2,5
Áreas remanescentes	0	2,5

Os valores característicos de Q_{ik} e q_{ik} , já com amplificação dinâmica incluída, são dados pela Tabela A.9, e os detalhes da carga estão mostrados na Figura A.6

⇒ Modelo de Carga 2

O Modelo de Carga 2 consiste em uma carga de eixo simples $\alpha_Q Q_{ak}$ com Q_{ak} igual a $400kN$, efeito de amplificação dinâmica incluído, o qual deve ser aplicado em qualquer posição no leito trafegável. No entanto, quando relevante, pode ser levado em conta somente uma roda de $200\alpha_Q(kN)$. O valor de α_Q deve ser igual ao valor de α_{Q1} . A superfície de contato de cada roda é retangular, com dimensões de 0,35 m por 0,60 m.

As áreas de contato dos modelos 1 e 2 são diferentes, e correspondem a diferentes modelos de pneus, arranjos e distribuição de pressões. As áreas de contato do modelo 2 correspondendo a dois pneus adjacentes, são normalmente relevantes no caso de tabuleiros ortotrópicos.

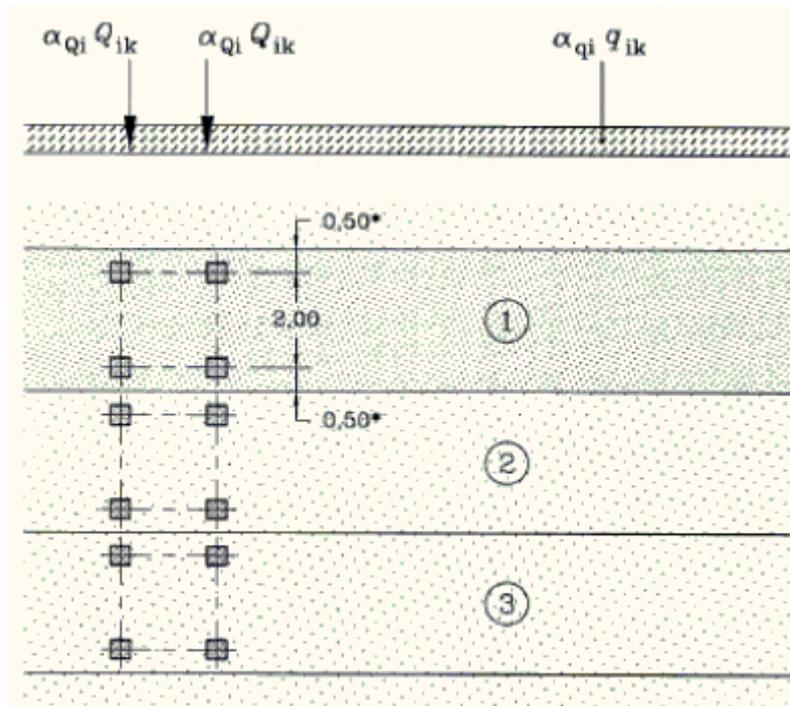


Figura A.6: Tabuleiro carregado para o Modelo de carga 1

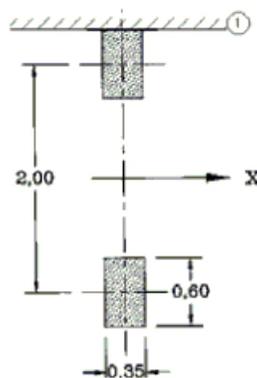


Figura A.7: Modelo de carga 2

⇒ Modelo de Carga 3 (veículos especiais)

Este modelo consiste em um grupo de cargas de eixos montados representando veículos especiais que podem trafegar em rodovias permitidas para cargas excepcionais. É destinado a verificações locais e globais. Quando importante, devem ser definidos e levados em conta modelos de veículos especiais. Neste trabalho estamos preocupados apenas com os carregamentos usuais, portanto não detalharemos este modelo de carga.

⇒ Modelo de Carga 4 (carga de multidão)

A carga de multidão, quando importante, deve ser representada por um modelo de carga consistindo de carga uniformemente distribuída (já incluindo o efeito dinâmico das cargas móveis) de $5kN/m^2$. O modelo de carga 4 deve ser aplicado nas partes relevantes do comprimento e largura da ponte, incluindo os refúgios centrais quando existentes. Esse sistema de cargas, específico para verificações globais, deve ser associado unicamente com uma situação transitória de projeto.

⇒ Combinação Última de Ações

Para verificações no Estado Limite Último, assim como a norma brasileira, a norma européia estabelece como coeficiente de majoração das cargas móveis um γ_f de 1,5.

A.3 Norma Norte-Americana - AASHTO

Nos Estados Unidos, as normas da AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*) definem as cargas móveis para pontes rodoviárias. As normas em vigor são a *AASHTO Standard Specifications for Highway Bridges* (aqui chamada de *STD Specifications*), 17^a. Edição, 2002 e *AASHTO Load and Resistance Factor Design Bridge Specifications* (no texto denominada *LRFD Specifications*), 2^a. Edição, 1998, revisada em 2003. No entanto, devido à autonomia dos estados, não possuem caráter de norma nacional. Além disso, os Departamentos

de Transporte estaduais possuem exigências adicionais para cargas, distribuição de carga e combinações de carga.

Assim como a Norma Européia, a Norma dos Estados Unidos divide o tabuleiro em faixas de projeto. As faixas devem ser de quantidades inteiras, possuindo 3,66 m de largura, espaçadas de um lado a outro em toda a largura do trecho trafegável da ponte, entre guias ou guarda-rodas. As cargas ocuparão uma largura de 3,05 m de cada faixa de tráfego.

Em virtude da baixa probabilidade das ações ocorrerem simultaneamente, A *STD Specifications* admite uma redução no valor das cargas móveis aplicadas, de acordo com a quantidade de faixas de carga existentes, mostrado na tabela 2.8.

Tabela A.10: Fatores de redução AASHTO *STD Specifications* - PCI (2003)

N.º de faixas Carregadas	Fator de redução
1 a 2	1,0
3	0,90
4 ou mais	0,75

A *LRFD Specifications* apresenta um fator de múltipla presença (m - Tabela A.10) que deve ser aplicado quando se considera uma faixa carregada, o fator de múltipla presença é opcional.

Em relação às cargas nos passeios, a *STD Specifications*, estabelece que a estrutura da ponte deve ser dimensionada para as seguintes cargas:

- vãos de 0 a 7,62m - $4,15kN/m^2$
- vãos de 7,62m a 30,48m - $2,93kN/m^2$
- vãos maiores que 30,48m:

$$p = \left(30 + \frac{3000}{l} \right) \cdot \left(\frac{55 - W}{50} \right) \quad (A.2)$$

onde:

p - carga distribuída na área, máximo $2,93kN/m^2$

l - comprimento carregado do passeio em metros

W - largura do passeio em metros

A *LRFD Specifications* estabelece uma carga de $3,66kN/m^2$ a ser aplicada em todos os passeios em obras com vão maior que 6,10m e deve ser considerada juntamente com as cargas dos veículos.

⇒ Cargas Móveis Segundo a *Standard Specifications*

A *STD Specifications* define que as cargas móveis rodoviárias nas pontes consistem de caminhões padronizados ou faixas de carga que são equivalentes a trens de carga. Dois sistemas de cargas são fornecidos, as cargas H e as cargas HS. As cargas HS são mais pesadas que as cargas H correspondentes. Existem quatro classes padrão de cargas móveis rodoviárias: H20, H15, HS20 e HS15. Se forem necessárias cargas superiores a estas, deverão ser obtidas aumentando-se proporcionalmente as cargas para os caminhões padronizados e para as faixas de carga. Alguns estados norte-americanos começaram a utilizar veículos HS25, que representariam uma carga 25% maior em relação ao veículo HS20. Além disso, alguns estados desenvolveram configurações de cargas diferentes, que muitas vezes são importantes na análise de estruturas.

⇒ Faixas de Carga

Cada faixa de carga consiste de uma carga linearmente distribuída ou uma carga de tráfego combinada com uma carga concentrada simples (ou duas cargas concentradas no caso de vigas contínuas), posicionadas no vão de forma a produzir máximo esforço. A carga concentrada e a carga distribuída devem ser consideradas como uniformemente distribuída em uma largura de 3,05 m em uma linha normal ao centro da faixa como mostra a Figura A.8.

Para a determinação de momentos máximos negativos no projeto de vigas contínuas, a faixa de carga mostrada na Figura A.8 deve ser modificada com o acréscimo de uma segunda carga concentrada (de igual valor) em outro vão da série em uma posição tal que seja produzido o máximo esforço. Para o momento positivo máximo, somente uma carga concentrada deve ser usada por faixa, combinada com o máximo de vãos carregados pela carga distribuída.

⇒ Caminhões Padronizados

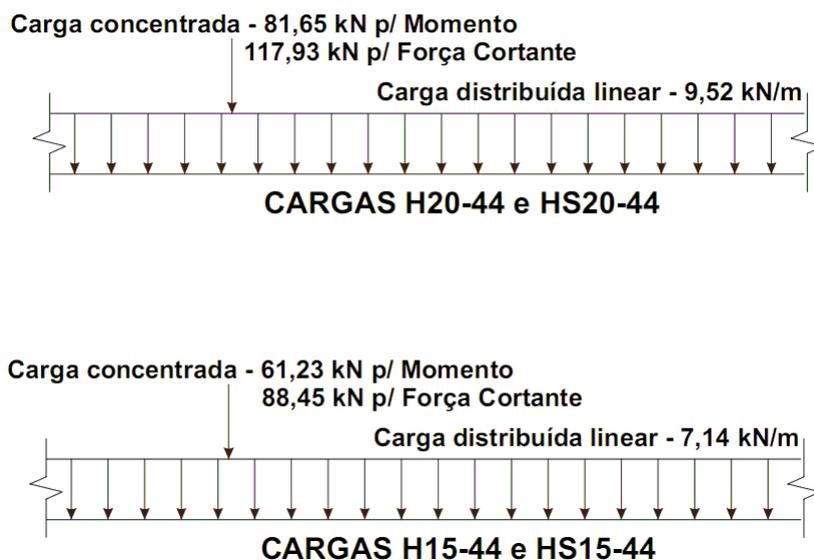


Figura A.8: Faixas de carga - PCI (2003)

O caminhão padronizado relativo às classes H15 e H20 possui um eixo traseiro e um eixo dianteiro, espaçados entre si por 4,27 metros. Já o veículo do tipo HS possui três eixos com espaçamento variável entre os eixos traseiros. Ele foi introduzido de forma que os espaçamentos dos eixos poderão se aproximar dos caminhões reais em utilização atualmente. O espaçamento variável também fornece melhores resultados em vigas contínuas, nas quais os eixos mais pesados devem ser posicionados em vãos adjacentes de modo a produzir maiores momentos negativos. Vale lembrar que somente um caminhão padronizado H ou HS pode ser utilizado por faixa de projeto na determinação dos esforços solicitantes. Os caminhões padronizados são apresentados na Figura A.9

As pontes situadas em rodovias interestaduais ou outras rodovias importantes que suportem, ou deverão suportar, tráfego de caminhões pesados deverão ser projetadas para a carga HS20-44 ou para uma Carga Alternativa Militar de dois eixos afastados de 1,22 m com cada eixo pesando 106,76kN, o que produzirá o maior efeito.

⇒ Cargas Móveis Segundo a *LRFD Specifications*

As cargas móveis em pontes, chamadas de HL-93, consistem numa combinação de um caminhão padronizado ou eixo tandem com uma carga linear de projeto.

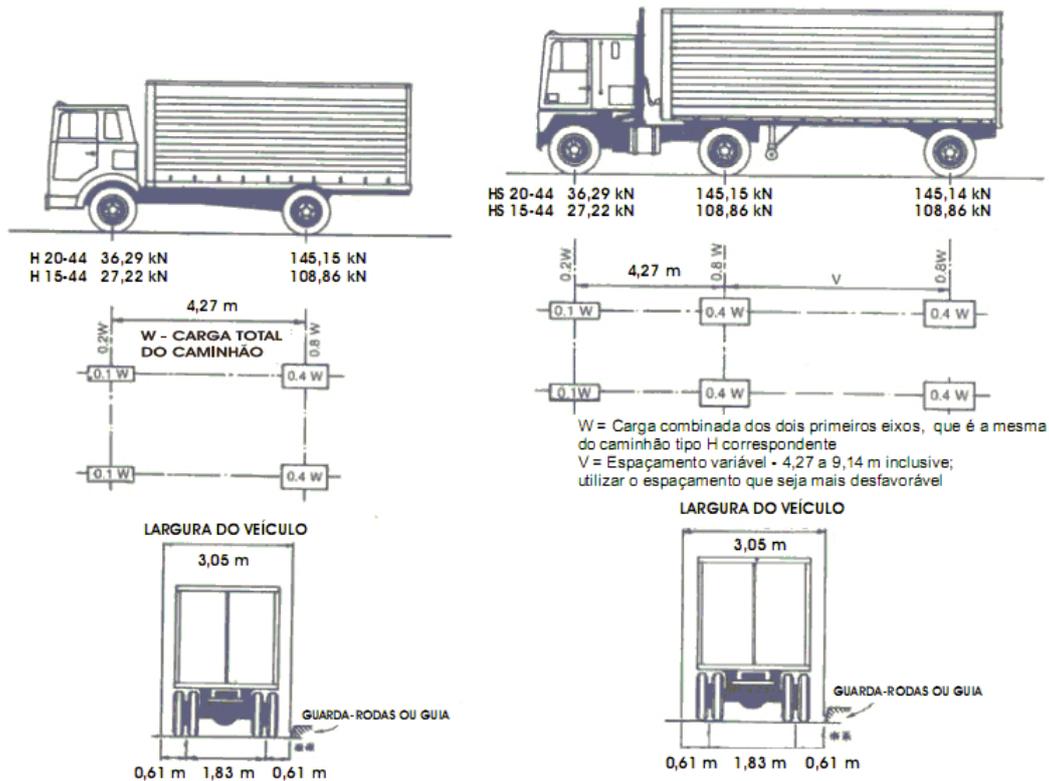


Figura A.9: Caminhões Padronizados - PCI (2003)

O caminhão padronizado é o HS20, dado pela *STD Specifications*. O Eixo tandem padronizado consiste em um par de eixos de 113,39kN afastados de 1,22 m. Em cada caso, o espaçamento transversal é de 1,83 m. A faixa de carga de projeto consiste em uma carga uniforme de 9,52 kN/m na direção longitudinal. Ela é distribuída transversalmente em uma largura de 3,05 m. Portanto, a carga móvel a ser utilizada será:

- o efeito combinado do eixo tandem padronizado e a faixa de carga de projeto, ou
- efeito combinado de um caminhão padrão e a faixa de carga de projeto, e
- para vigas contínuas, tanto para momentos negativos como para reações de apoio, ambos nos apoios internos, a combinação de 90% do efeito de dois caminhões padrão (espaçados no mínimo 15,24 m entre o eixo dianteiro de um e o eixo traseiro do outro) com 90% do efeito da faixa de carga de projeto. A distância entre os eixos de 145,14kN é de 4,27 m.

Os eixos que não contribuem para o efeito mais desfavorável não devem ser levados em conta. Todas as faixas de projeto e as cargas devem ser posicionadas para que se tenha o efeito mais desfavorável. O caminhão de projeto e o eixo tandem padronizado são posicionados, transversalmente, de modo que a distância mínima para o guarda-rodas ou a guia seja de 0,61 m.

⇒ Impacto

A Norma Americana, assim como a Norma Brasileira, possui um coeficiente que leva em conta o efeito dinâmico das cargas móveis, chamado de coeficiente de impacto. O impacto é considerado no cálculo da superestrutura e dos pilares, não devendo ser considerado no projeto da infraestrutura. Normalmente também não se considera impacto nas faixas de carga e nas cargas provenientes de pedestres.

Segundo a *STD Specifications*, o coeficiente de impacto é igual a $(1+I)$, com I sendo dado por:

$$I = \frac{15,24}{l + 38,10} \leq 0,3 \quad (\text{A.3})$$

onde:

l - comprimento em metros do vão carregado para momentos provenientes dos caminhões; comprimento do trecho carregado do vão até o apoio mais distante, para força cortante proveniente de caminhões.

Na *LRFD Specifications*, o fator de impacto é dado por $(1+IM)$, onde IM é dado por: 75% para juntas de laje em todos os estados limites; 15% para os outros elementos no estado-limite de fadiga, e 33% para os estados limites restantes.

⇒ Combinações Últimas de Ações

A *STD Specifications* estabelece algumas combinações de carregamentos a serem verificadas, levando-se em conta a simultaneidade das ações variáveis. A combinação onde as cargas móveis são predominantes estabelece um coeficiente de segurança do lado das solicitações, γ_f de 2,17. já a *LRFD Specifications*, para o mesmo caso de combinação para verificação na ruptura, estabelece um coeficiente de majoração de 1,75.

Apêndice B

MANUAL PRÁTICO DE UTILIZAÇÃO DO PROGRAMA IVPE-v.2

B.1 Introdução

O software IVPE-v.2 foi desenvolvido com a finalidade de facilitar a análise e interpretação dos resultados da interação dinâmica veículo-pavimento-estrutura em pontes rodoviárias. O programa faz análises de vibrações livres utilizando um modelo de grelha 3D e posteriormente a integração numérica no tempo das equações de movimento que governam o sistema mecânico-estrutural através de um modelo unifilar.

B.2 Exemplo de Utilização

O modelo deste exemplo possui as seguintes propriedades geométricas e dos materiais da ponte:

- Modelo atual do DNER: 2 Longarinas e 4 Transversinas
- Vão de 10m biapoiado
- Dimensões das longarinas: Largura = 35cm e Altura = 100cm

- Dimensões das transversinas: Largura = 30cm a Altura = 80cm
- Espessura da Laje do Tabuleiro = 25cm
- Distância entre longarinas = 7.5m
- Balanços dos tabuleiros = 2.75m

O primeiro passo é o preenchimento dos dados geométricos da estrutura e a resistência do concreto à compressão como na Figura B.1.

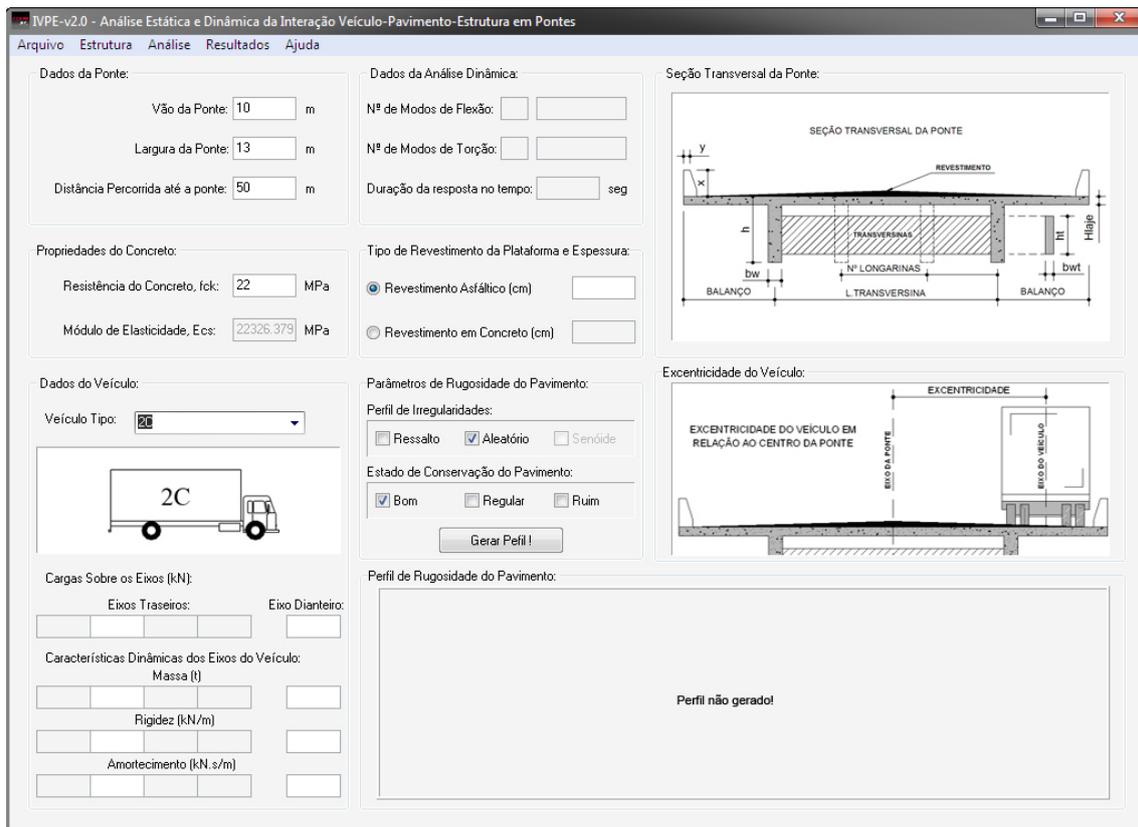


Figura B.1: Tela Principal do Programa.

Em seguida temos que preencher os dados das longarinas, transversinas, laje do tabuleiro, número de modos de vibração e a discretização do modelo (Figuras B.2 à B.7).

Longarinas

Dimensões das Longarinas:

Largura da Viga (bw): 35 cm

Altura da Viga (h): 100 cm

Distância entre Longarinas (L): 7.5 m

Nº de Longarinas: 2

Utilizar seção T da NBR-6118/2003 ?

Largura da Mesa Colaborante (bf): 2.35 m

OK Cancela

Figura B.2: Dados das longarinas.

Transversinas

Dimensões das Transversinas:

Largura da Viga (bwt): 30 cm

Altura da Viga (ht): 80 cm

Nº de Transversinas Internas: 2

OK Cancela

Figura B.3: Dados das transversinas.

Laje do Tabuleiro

Laje do Tabuleiro da Ponte:

Espessura da laje: 25 cm

OK Cancelar

Figura B.4: Dados da laje do tabuleiro.

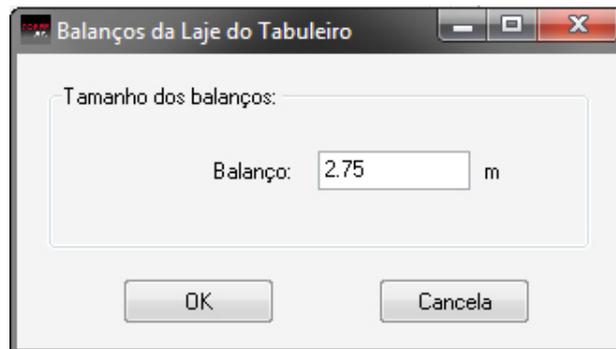


Figura B.5: Balanços da laje do tabuleiro.

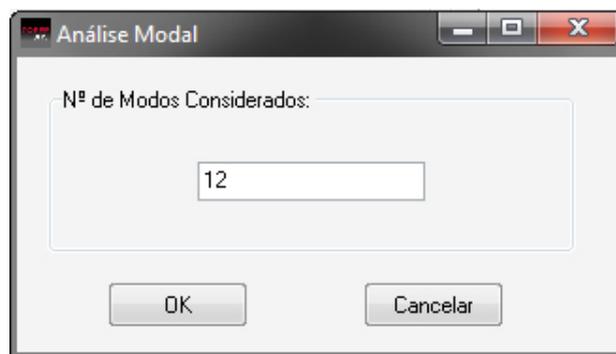


Figura B.6: Número de modos a serem considerados na análise de vibrações livres.

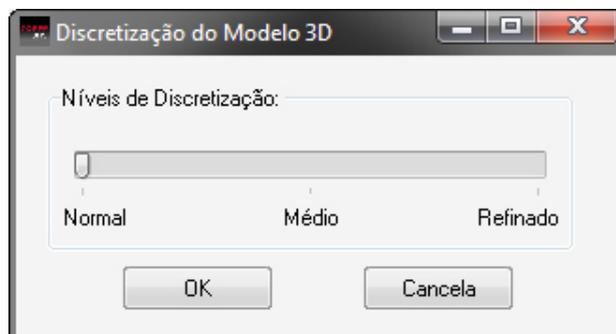


Figura B.7: Discretização do modelo numérico.

Feito isto, estamos prontos para executar a análise de vibrações livres 3D. O modelo numérico a ser analisado pode ser visualizado no menu *Resultados* ⇒ *Geometria 3D e Modelo Numérico* (Figura B.8). Os modelos são mostrados nas Figuras B.9 e B.10.

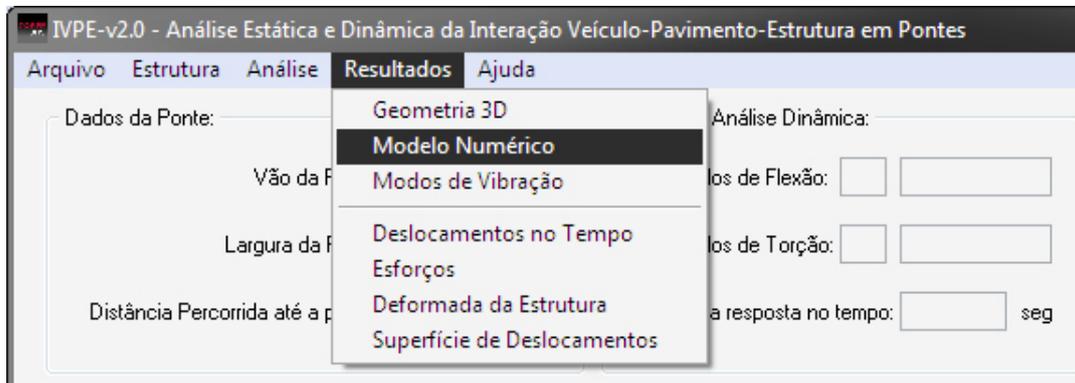


Figura B.8: Tela Principal do menu Resultados.

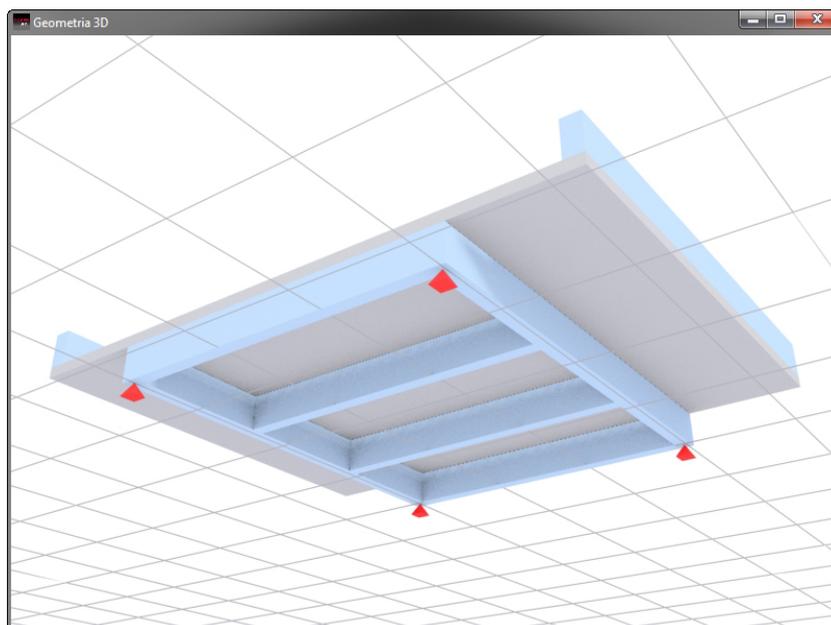


Figura B.9: Geometria 3D da estrutura a ser analisada.

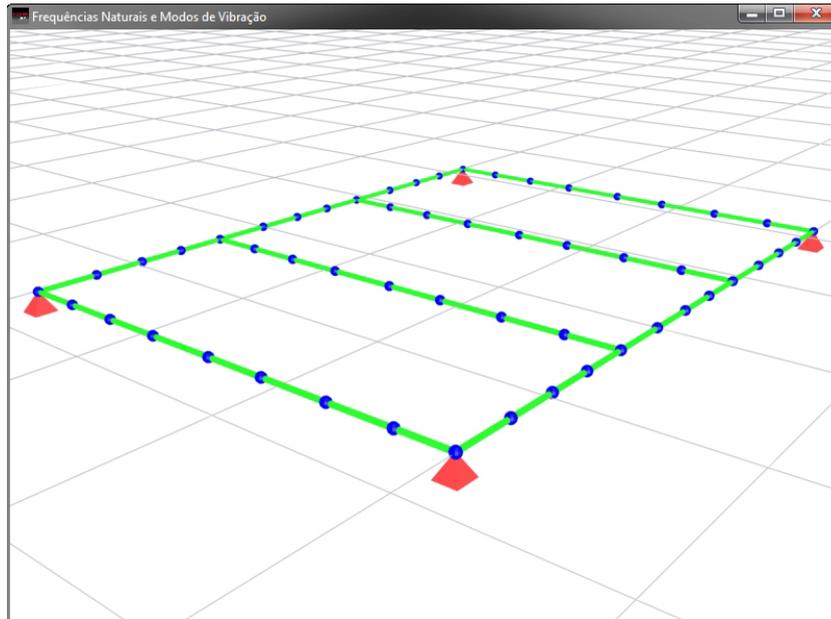


Figura B.10: Modelo numérico de grelha 3D.

Com base nos dados informados, o IVPE-v.2 calcula as frequências naturais e os modos de vibração do modelo de grelha 3D. A partir deste ponto o usuário pode escolher os modos de vibração que serão utilizados na análise da interação dinâmica através do menu *Resultados* \Rightarrow *Modos de Vibração* (Figura B.12 e B.13), além do relatório em arquivo texto contendo as frequências naturais e as formas modais da estrutura (Figura B.11).

```

REL-FREQ-MODOS.txt - Bloco de notas
Arquivo  Editar  Formatar  Exibir  Ajuda
*****
* RELATÓRIO DE FREQUÊNCIAS NATURAIS E MODOS DE VIBRAÇÃO DA ESTRUTURA *
*****
MODO DE VIBRACAO= 1  LAMBDA=          1292.0104
FREQUENCIA ANGULAR (RAD/S)=      35.9445
FREQUENCIA (HZ)=      5.7208

0.0000000  0.0000000  -0.3244311
0.0000000  -0.0983592  -0.3185361
0.0000000  -0.1946269  -0.3106551
0.0000000  -0.2881994  -0.3008014
0.0000000  -0.3784782  -0.2889964
0.0000000  -0.4648726  -0.2752699
0.0000000  -0.5468025  -0.2596593
0.0000000  -0.6237003  -0.2422099
0.0000000  -0.6950134  -0.2229736
0.0000000  -0.7602062  -0.2020094
0.0000000  -0.8187623  -0.1793821
0.0000000  -0.8701858  -0.1551619
0.0000000  -0.9132323  -0.1276051
0.0000000  -0.9478309  -0.0996588
0.0000000  -0.9738746  -0.0714061

```

Figura B.11: Relatório da análise modal.

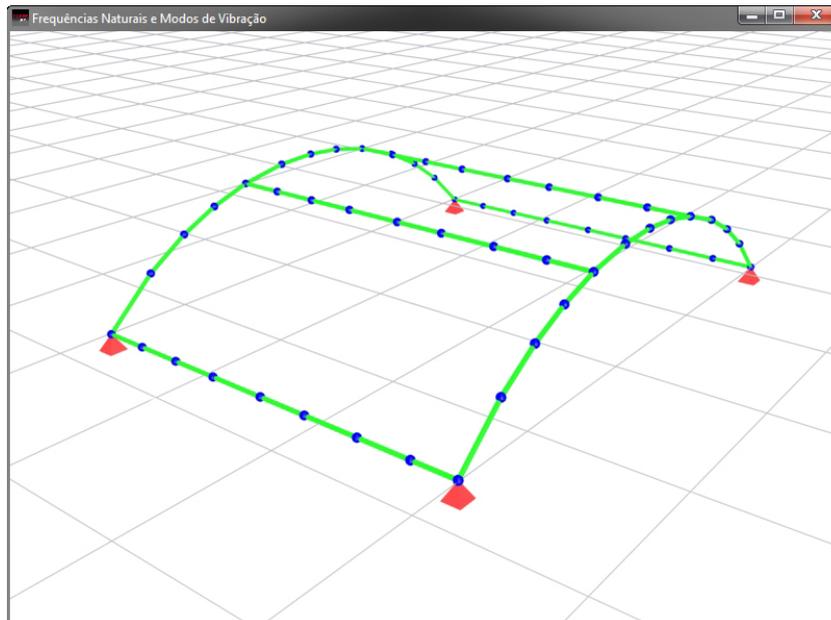


Figura B.12: Primeiro modo de flexão vertical da estrutura.

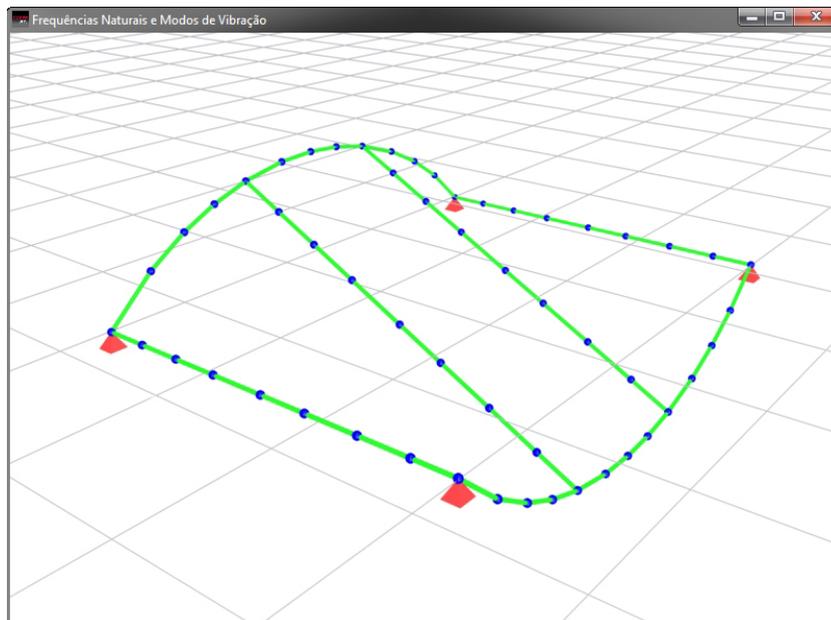


Figura B.13: Primeiro modo de torção da estrutura.

Uma vez escolhidos os modos de vibração, o usuário deve preencher os campos com os dados da análise dinâmica, revestimento, rugosidade do pavimento e dados do veículo, como mostram as Figuras B.18 à B.21, e executar os comandos *Análise* ⇒ *Preparação IVPE-v2.0* e em seguida *Análise IVPE-v2.0*.

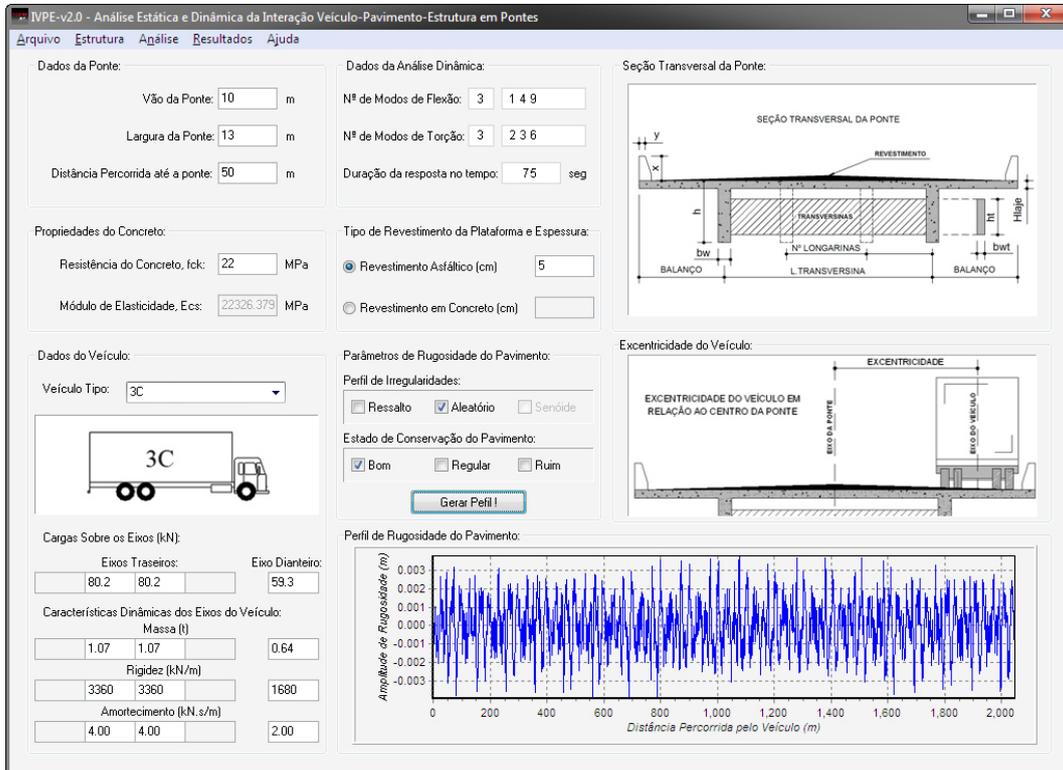


Figura B.14: Tela Principal do Programa.

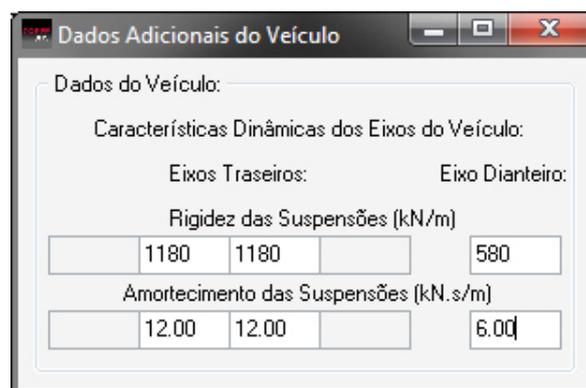


Figura B.15: Dados adicionais do veículo.

Após realizada a análise da integração numérica no tempo tornam-se disponíveis os resultados nas formas gráficas e relatórios como apresentado nas Figuras ?? à ??

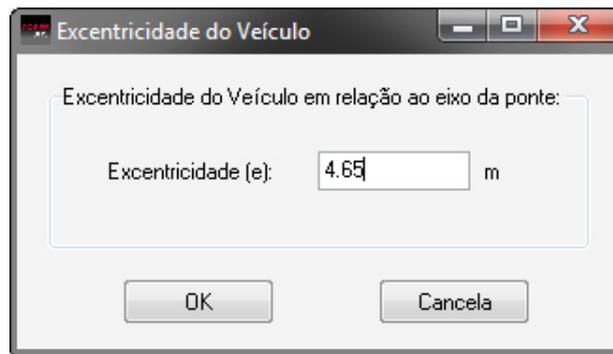


Figura B.16: Excentricidade do veículo em relação ao eixo da ponte.

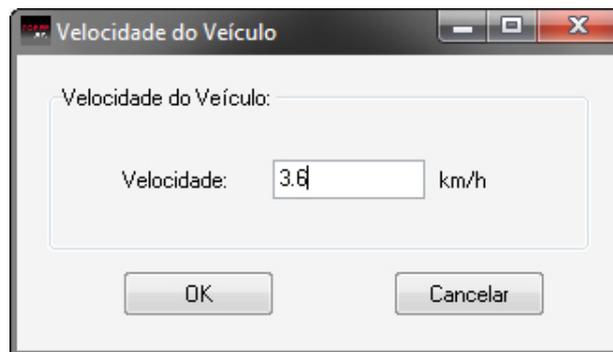


Figura B.17: Velocidade inicial do veículo.

Os histogramas resultantes das análises numéricas são acessados por um arquivo texto de relatório e os gráficos produzidos com auxílio de um programa externo, por exemplo, o Excel®.

```

RELATORIO.TXT - Bloco de notas
Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda
*****
* RELATÓRIO DE ANÁLISE DINÂMICA - IVPE-V.2 *
*****

***** TIPO DE VEÍCULO *****

VEÍCULO CLASSE = 3C

***** EXCENTRICIDADE DE VEÍCULO *****

EXCENTRICIDADE EM RELAÇÃO AO EIXO DA PONTE = 4.65 m
VELOCIDADE DO VEÍCULO = 3.60 km/h

***** MASSAS DO VEÍCULO *****

MASSA SUSPENSÃO = 21.98 t
MASSA ROTACIONAL = 32.72 t.m²
MASSA DO EIXO TRASEIRO 1 = 1.07 t
MASSA DO EIXO TRASEIRO 2 = 1.07 t
MASSA DO EIXO DIANTEIRO = 0.64 t
MASSA TOTAL = 24.75 t

***** RIGIDEZ DAS SUSPENSÕES E EIXOS DO VEÍCULO *****

RIGIDEZ DAS SUSPENSÕES TRASEIRAS = 1180.00 kN/m
RIGIDEZ DA SUSPENSÃO DIANTEIRA = 580.00 kN/m
RIGIDEZ DO EIXO TRASEIRO 1 = 3360.00 kN/m
RIGIDEZ DO EIXO TRASEIRO 2 = 3360.00 kN/m
RIGIDEZ DO EIXO DIANTEIRO = 1680.00 kN/m

** AMORTECIMENTO DAS SUSPENSÕES E EIXOS DO VEÍCULO **

AMORTECIMENTO DAS SUSP. TRASEIRAS = 12.00 kN.s²/m
AMORTECIMENTO DA SUSP. DIANTEIRA = 6.00 kN.s²/m
AMORTECIMENTO DO EIXO TRASEIRO 1 = 4.00 kN.s²/m
AMORTECIMENTO DO EIXO TRASEIRO 2 = 4.00 kN.s²/m
AMORTECIMENTO DO EIXO DIANTEIRO = 2.00 kN.s²/m

***** DISTÂNCIA ENTRE EIXOS DO VEÍCULO *****

EIXO 1 = 0.00 m
EIXO 2 = 1.30 m
EIXO 3 = 4.80 m

** RESULTADOS - DESLOCAMENTOS E ESFORÇOS CRÍTICOS **

DESLOCAMENTO ESTÁTICO NO MEIO DO VÃO OBTIDO PARA O CASO DE VELOCIDADE 3.6km/h M
OSTRADO ACIMA
DESLOCAMENTO ESTÁTICO NO MEIO DO VÃO S/e = -1.03 mm
DESLOCAMENTO DINÂMICO NO MEIO DO VÃO L.E = 0.13 mm
DESLOCAMENTO DINÂMICO NO MEIO DO VÃO L.D = -2.68 mm
MOMENTO POSITIVO NO MEIO DO VÃO = 462.9 kN.m
CORTANTE NO APOIO = 253.4 kN

```

Figura B.18: Relatório da análise da interação veículo-pavimento-estrutura.

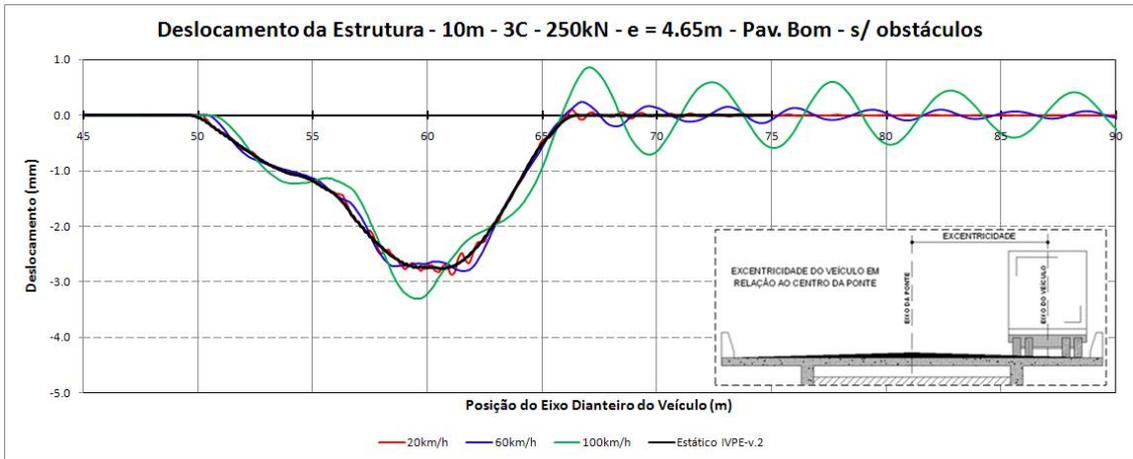


Figura B.19: Deslocamentos no meio do vão no tempo.

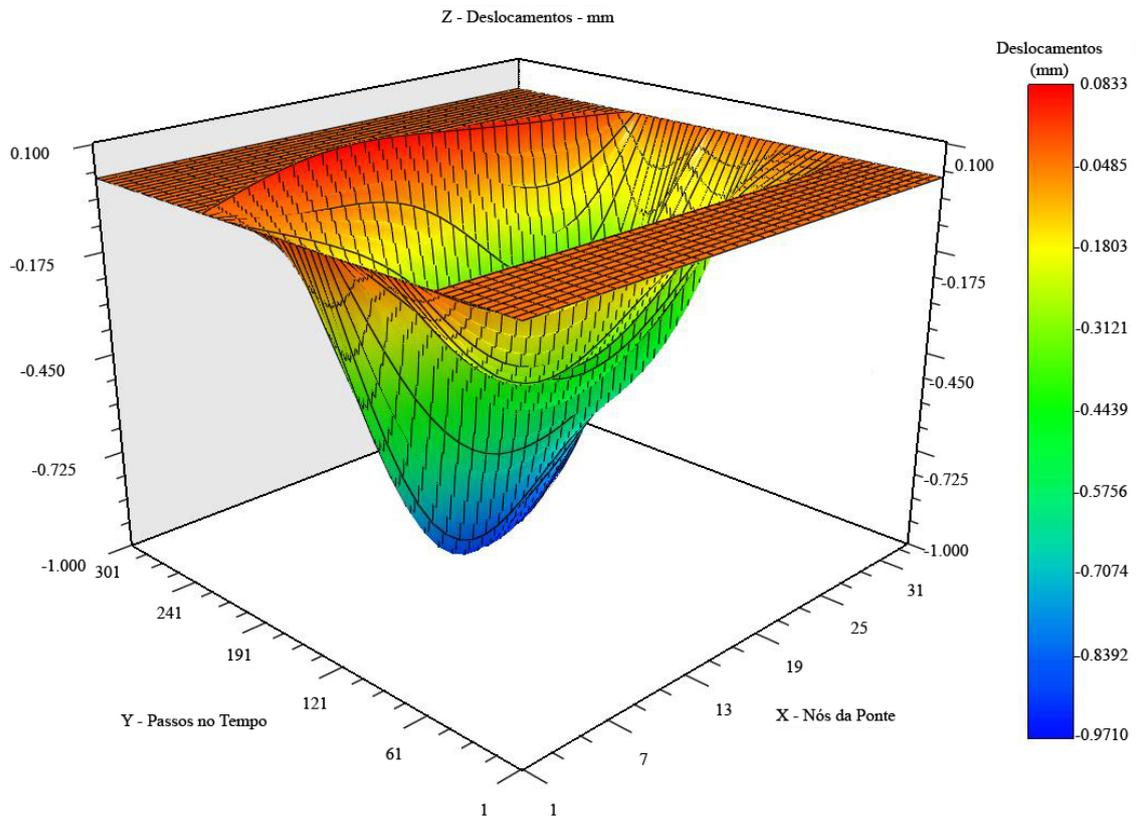


Figura B.20: Superfície de deslocamentos.

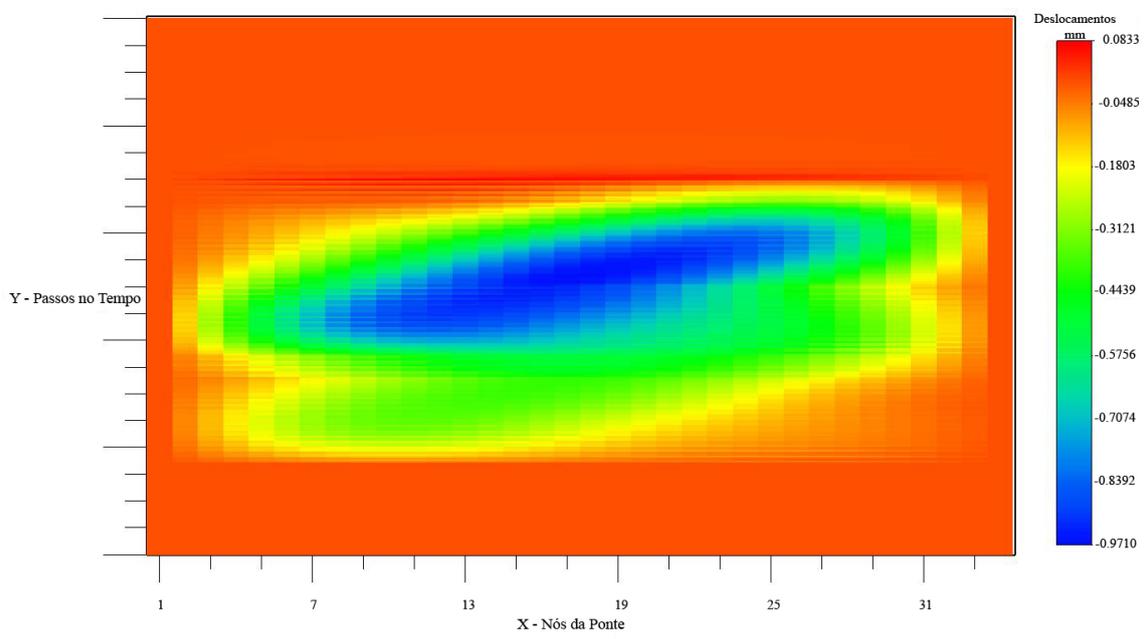


Figura B.21: Vista superior da superfície de deslocamentos.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)