UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

RELATÓRIO TÉCNICO

ANÁLISE DAS CONSEQÜÊNCIAS DO TRÁFEGO DE CVCs (COMBINAÇÕES DE VEÍCULOS DE CARGA) SOBRE AS OBRAS DE ARTE ESPECIAIS DA REDE VIÁRIA DO DER-SP

Interessado

DER - Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo

São Carlos, junho de 2001

FICHA TÉCNICA

Interessado: **DER - DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO**

Assunto: **ANÁLISE DAS CONSEQÜÊNCIAS DO TRÁFEGO DE CVCs (COMBINAÇÕES DE VEÍCULOS DE CARGA) SOBRE AS OBRAS DE ARTE ESPECIAIS DA REDE VIÁRIA DO DER-SP**

Contrato DER: **11.188-0**

Período: **Setembro/2000 a Junho/2001**

Equipe técnica:

Docentes do SET-EESC/USP:

Mounir Khalil El Debs

Maximiliano Malite

Toshiaki Takeya

Jorge Munaiar Neto

João Bento de Hanai

Colaboradores:

Admilson A. Bortolin *(Engenheiro Civil)*

Gustavo Monteiro de Barros Chodraui *(Engenheiro Civil)*

Luiz Liserre *(Engenheiro Civil)*

CONTEÚDO

1- INTRODUÇÃO 1

2- DEFINIÇÃO DOS CARREGAMENTOS 2

3- CONHECIMENTO DO UNIVERSO 5

3.1- Preliminares 5
3.2- Cadastramento das obras de arte especiais da rede viária sob jurisdição do DER 5
3.3- Banco de dados para o software Microsoft Access 7
3.4- Planilhas para o software Microsoft Excel 15
3.5- Resultados da análise do banco de dados 15

4- CASOS ANALISADOS 16

5- CÁLCULO DOS ESFORÇOS SOLICITANTES 27

5.1- Software utilizado 27
5.1.1- Características principais.....27
5.1.2- Aspectos do módulo de pontes 30

5.2- Aspectos adotados para a modelagem das pontes 34
5.2.1- Pontes de viga T 35
5.2.2- Pontes de laje (maciças e vazadas) 36
5.2.3- Pontes de seções transversais celulares.....37

6- COMPARAÇÃO ENTRE ESFORÇOS SOLICITANTES.....40

7- RECOMENDAÇÕES PARA TOMADA DE DECISÃO 49

ANEXO 1 (2 CDs)

ANEXO 2 (Tabelas e gráficos – 17 páginas)

ANEXO 3 (Tabelas e gráficos – 136 páginas)

1- INTRODUÇÃO

Este relatório apresenta o estudo técnico para análise das conseqüências do tráfego de Combinações de Veículos de Carga (CVC) regulamentados pelo novo Código de Trânsito e Resolução 68/98, do CONTRAN, sobre as obras de arte especiais da rede viária do DER, objeto do contrato 11.188-0 celebrado entre o DER e a FIPAI.

O procedimento utilizado no estudo é baseado em comparações teóricas entre os máximos esforços solicitantes provenientes dos trens-tipo normativos empregados no projeto estrutural da obra de arte especial, com os máximos esforços gerados pelas Combinações de Veículos de Carga - CVC. Desta forma, admitiu-se que os elementos estruturais analisados tenham sido adequadamente dimensionados e executados, assim como não apresentam patologias de execução ou deterioração que possam comprometer sua capacidade estrutural.

Este relatório está estruturado da seguinte forma:

a) **Definição dos carregamentos** – apresentação, discussão e justificativas dos carregamentos empregados no estudo;

b) **Conhecimento do universo** – resultados do levantamento das obras de arte da malha viária, realizado com base no material disponibilizado pelo DER, que são os desenhos registrados em 8 CDs;

c) **Casos analisados** – apresentação e justificativas dos casos analisados;

d) **Cálculo dos esforços solicitantes** – apresentação do software empregado e das principais características dos modelos de cálculo;

e) **Comparação das solicitações** – comparações entre as solicitações produzidas pelas CVCs com as produzidas pelos trens-tipo normativos;

f) **Recomendações para tomadas de decisão** – apresentação das ponderações pertinentes e das recomendações para tomadas de decisões.

O relatório inclui ainda os seguintes anexos:

Anexo 1 - Banco de dados (ACCESS) e planilhas (EXCEL) do levantamento (em 2 CDs)

Anexo 2 - Tabelas e gráficos dos resultados do levantamento

Anexo 3 - Gráficos dos valores relativos entre os efeitos da carga móvel CVC e carga móvel normativa

2- DEFINIÇÃO DOS CARREGAMENTOS

Considerando que a maior parte das obras de arte especiais tenha sido construída a partir da década de 60 (1960), as duas versões da NB-6 (NBR-7188), que versam sobre as cargas em pontes rodoviárias, são:

a) norma NB-6 de 1960 (válida até 1984), que especifica as seguintes classes:
CLASSE 12
CLASSE 24
CLASSE 36

b) norma NBR-7188 de 1984 (em vigor atualmente), que especifica as classes:
CLASSE 12
CLASSE 30
CLASSE 45

A Classe 12, das duas versões, não foi incluída no estudo por se tratar de situação característica de ponte rural.

Tendo em vista que os carregamentos das classes 24 e 36 produzem solicitações inferiores que as correspondentes das classes 30 e 45, e ainda que a maior parte das pontes foram projetadas antes de 1984, julgou-se mais apropriado realizar o estudo com os carregamentos das classes 24 e 36 da norma antiga. Além destas duas classes, foi incluída, naturalmente, a classe 45 da norma atual.

Desta forma, foram considerados para o cálculo dos esforços solicitantes devidos aos trens-tipo normativos, os carregamentos definidos pelas seguintes classes:

(a) CLASSE 24 (da norma antiga)
(b) CLASSE 36 (da norma antiga)
(c) CLASSE 45 (da norma atual)

As possibilidades de variações das Combinações de Veículos de Carga -CVCs previstas na resolução do CONTRAN são inúmeras, de forma que não seria exeqüível varrer todas as possibilidades.

Para este estudo, julgou-se que seria mais apropriado escolher os casos mais críticos. Dessa forma foram selecionadas as seguintes CVCs: a) Rodotrem de 74t com 19,80m (RT 74/20), b) Rodotrem de 74t com 25,00m (RT 74/25) e c) Bi-trem de 74t com 24,90m (BT 74/25). Além das CVCs, foi incluído no estudo um caminhão basculante de areia ou pedra, que em tese é o veículo de tráfego normal mais severo com relação às solicitações nas pontes.

Em resumo, as CVCs e o veículo definidos para a análise foram:

Rodotrem de 74t com 19,80m (RT 74/20)
Rodotrem de 74t com 25,00m (RT 74/25)
Bi-trem de 74t com 24,90m (BT 74/25)
Caminhão basculante de areia ou pedra de 48,5t com 13,50m (BB 48/14)

Na definição das cargas das CVCs e caminhão basculante foram consideradas ainda as tolerâncias de peso previstas na resolução 104 de 21/12/1999, do CONTRAN, de 7,5% no peso por eixo e de 5% no peso total. Assim, as CVCs de 74t passaram para 77,7t e o caminhão basculante de 48,5t passou para 51t. As configurações das CVCs e do caminhão basculante utilizadas na análise são apresentadas na Tabela 2.1.

O carregamento considerado no estudo foi constituído por uma CVC, ou um caminhão basculante, e carga uniformemente distribuída de 0,5 t/m^2 no restante do tabuleiro, o que corresponde à substituição do veículo normativo pela CVC, ou pelo caminhão basculante, mantendo-se a mesma carga distribuída especificada para a classe 45 da atual norma.

A substituição dos veículos de norma por CVC ou caminhão basculante, que têm cargas das rodas menores, se justifica pelo fato de que o objetivo do estudo é a verificação da estrutura principal. Os esforços dos veículos das classes 36 e 45 devem ser mais críticos em regiões da estrutura secundária, como as lajes. Desta forma, supondo que essas regiões foram dimensionadas adequadamente para as forças das rodas dos veículos de norma, a passagem das CVCs com menores cargas por rodas que os veículos das classes 36 e 45, não deve ser crítica. Nas pontes de classe 24 esta consideração pode não ser válida, mas ela deixa de ser importante pois as cargas por eixo das CVCs não são maiores que as dos veículos com tráfego normal.

Outro aspecto que merece ser discutido é a possibilidade de associar-se mais de uma CVC sobre o tabuleiro da ponte, na forma de comboio ou passando em faixas adjacentes. Este tipo de análise poderia ser feito considerando situações representativas de CVCs, mas sem as cargas distribuídas. A consideração de situações possíveis de associações extremamente desfavoráveis de CVCs configuraria uma situação excepcional e seria, portanto, objeto de coeficientes de ponderação de ações menores que os empregados em projeto.

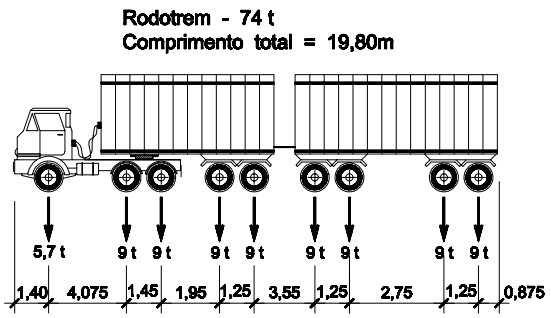
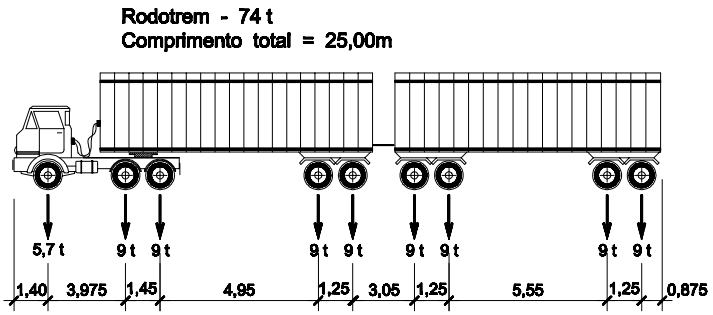
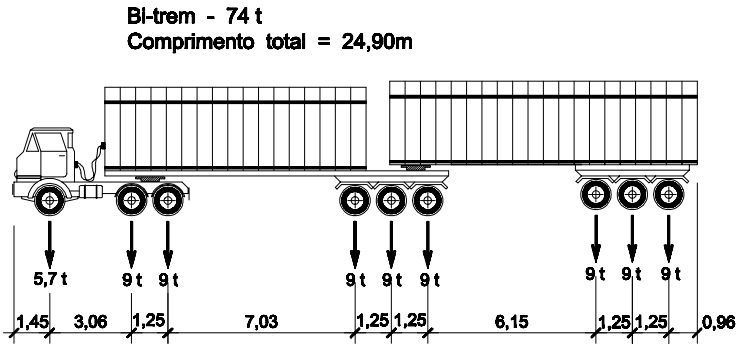
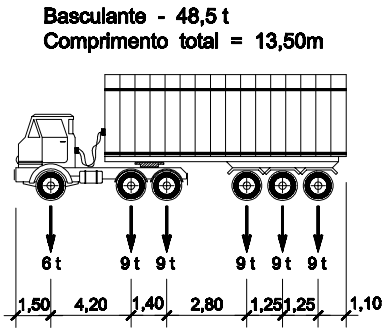
Para a definição das ações a serem consideradas é necessário levar em conta o efeito dinâmico das cargas. Isto é feito majorando-se as cargas pelo coeficiente de impacto vertical. É sabido que o coeficiente de impacto aumenta com o acréscimo da relação carga móvel / peso da estrutura, mas, por outro lado, diminui com o decréscimo da velocidade do tráfego. Também não existem estudos consagrados para levar em conta o impacto com a utilização de eixos em *tandem*. Em função da dificuldade de levar em conta esses aspectos, foi considerado que o impacto vertical seja o mesmo dos veículos normativos, ou seja, a mesma expressão da norma de pontes para considerar o efeito dinâmico das CVCs. Sendo assim, não foi considerado o efeito do impacto vertical, no cálculo dos esforços solicitantes utilizados na comparação entre as CVCs e os veículos normativos, objeto principal do estudo. No entanto, para a avaliação da relação entre a solicitação da carga móvel e a solicitação da carga total (permanente + móvel), o efeito do impacto vertical foi considerado, como indica a NBR-7187.

A segurança das pontes, com relação à resistência, era feita antigamente, antes de 1978, considerando um coeficiente de segurança único (global) de 1,65 para as cargas permanentes e de 2,0 para as cargas móveis, tendo em vista a natureza distinta desses dois carregamentos. A NB-1 de 1978 não é explícita neste aspecto e a própria norma de ações e segurança nas estruturas NBR-8681, de 1984, não faz esta diferenciação. Assim, é de se esperar que as pontes projetadas antes de 1978 apresentem coeficiente de segurança das cargas móveis 1,21 vezes o coeficiente de segurança normal. Nas pontes projetadas entre 1978 e 1984, época da mudança da NB-6, a consideração desde coeficiente adicional de 1,21 ficou por conta da interpretação do projetista. A partir de 1984, com as cargas da nova NB-6 (NBR-7188), pode-se supor que as pontes foram projetadas sem a diferença de coeficientes. Com a entrada em vigor da nova NB-2 (NBR-7187), de 1986, aparece novamente uma diferença na segurança com a consideração de coeficiente de ponderação de 1,35 para as ações permanentes e de 1,50 para as ações da carga móvel, o que corresponde a uma relação entre os coeficientes de 1,11, diferente do valor 1,21 da relação da antiga NB-2.

Em função dessas mudanças, nas pontes projetadas entre 1978 e 1984, fica praticamente impossível conhecer os coeficientes de segurança dos esforços solicitantes das ações normativas, para se obter a capacidade portante, teórica, das pontes.

Dessa forma, a comparação dos esforços solicitantes das cargas normativas e com os obtidos com as CVCs foi feita sem a inclusão dos coeficientes de segurança e sem o impacto vertical.

Tabela 2.1 Esquemas dos veículos considerados na análise

Rodotrem 74 t com 19,80m de comprimento (+5% = 77,7 t)	
Rodotrem 74 t com 25,00m de comprimento (+5% = 77,7 t)	
Bi-trem 74 t com 24,90m de comprimento (+5% = 77,7 t)	
Caminhão basculante 48,5 t com 13,50m de comprimento (+5% = 51 t)	

3- CONHECIMENTO DO UNIVERSO

3.1- PRELIMINARES

O levantamento do universo de obras de arte especiais da rede viária sob jurisdição do DER foi realizado com o objetivo de definir os grupos estruturais representativos desse universo, a partir da classificação em função das características principais, tais como classe, geometria, dimensões do tabuleiro e tipologia estrutural, e sistematizar esta classificação na forma de tabelas, planilhas, gráficos, etc.

O levantamento foi feito com base na documentação técnica registrada em oito CDs, que foram disponibilizados pelo DER à equipe de trabalho da EESC-USP; a documentação técnica era composta por 17.542 "arquivos" do tipo TIF, cada "arquivo" correspondendo à digitalização de uma das pranchas de desenhos dos projetos das obras de arte especiais.

A partir da análise dessa documentação foi feito o cadastramento de cada obra de arte identificada, em um Banco de Dados utilizando o software Microsoft Access.

O resultado final da análise dos 17.542 desenhos foi a identificação e o cadastramento de 2.276 obras de arte especiais, sendo que em 1.146 obras os dados cadastrados estão completos.

Foram elaboradas também planilhas para o software Microsoft Excel, que realizam pesquisas e análises dos dados cadastrados no Banco de Dados.

Cabe registrar que o Banco de Dados não contém a totalidade das obras de arte atualmente existente na malha viária do DER, pois como já foi descrito acima, estão cadastradas no Banco de Dados apenas as obras que foram identificadas nos oito CDs.

3.2- CADASTRAMENTO DAS OBRAS DE ARTE ESPECIAIS DA REDE VIÁRIA SOB JURISDIÇÃO DO DER

O cadastramento foi feito com base na classificação apresentada a seguir:

(A) IDENTIFICAÇÃO:
- (1) Nome:
- (2) Arquivo do CD-DER:
- (3) Rodovia:
- (4) Localização:
- (5) Data do projeto:
- (6) Data da construção:
- (7) Projetista:
- (8) Construtora:
- (9) Condições dos dados: completa, incompleta

(B) CLASSE:
- (1) NB-6/1960: 12, 24, 36
- (2) NBR-7188/1984: 12. 30, 45

(C) MATERIAL:
- (1) Concreto armado
  - (1.1) Classe do concreto:
  - (1.2) Classe da armadura:
- (2) Concreto protendido
  - (2.1) Classe do concreto:
  - (2.2) Classe da armadura:

(3) Metálica
(3.1) Tipo de aço:
(4) Mista
(4.1) Classe do concreto:
(4.2) Classe do armadura:
(4.3) Tipo de aço:

(D) SISTEMA ESTRUTURAL
(1) Desenhos: plantas, elevação
(2) Desenvolvimento planimétrico: reta ortogonal, esconsa, curva
(3) Desenvolvimento altimétrico: horizontal, em rampa, convexo, côncavo
(4) Sistema estrutural
(4.1) Viga
(4.1.1) Simplesmente apoiada
(4.1.1.1) Número de tramos:
(4.1.1.2) Vãos dos tramos:
(4.1.2) Simplesmente apoiada com balanços
(4.1.2.1) Comprimento dos balanços:
(4.1.2.2) Comprimento do vão central:
(4.1.3) Gerber
(4.1.3.1) Número de tramos:
(4.1.3.2) Vãos dos tramos:
(4.1.3.3) Comprimento dos balanços:
(4.1.4) Contínua
(4.1.4.1) Número de tramos:
(4.1.4.2) Vãos dos tramos:
(4.1.4.3) Comprimento dos balanços:
(4.2) Pórtico
(4.2.1) Número de tramos:
(4.2.2) Vãos dos tramos:
(4.3) Arco
(4.3.1) Posição do tabuleiro: normal, rebaixado
(4.3.2) Número de tramos:
(4.3.3) Vãos dos tramos:

(E) SEÇÃO TRANSVERSAL
(1) Desenhos da seção transversal
(2) Largura da pista:
(3) Largura do passeio:
(4) Tipo de seção
(4.1) Laje maciça
(4.1.1) Espessura da laje:
(4.1.2) Largura da laje:
(4.2) Laje vazada
(4.2.1) Espessura total da laje:
(4.2.2) Largura da laje:
(4.2.3) Espaçamento entre nervuras:
(4.2.4) Espessura da mesa superior:
(4.2.5) Espessura da mesa inferior:
(4.2.6) Largura das nervuras:
(4.3) Viga T
(4.3.1) Número de vigas:
(4.3.2) Espaçamento entre vigas:

(4.3.3) Altura total das vigas:
(4.3.4) Largura da alma:
(4.3.5) Espessura da mesa superior:
(4.3.6) Espessura da mesa inferior:
(4.3.7) Largura da mesa inferior:
(4.4) Seção celular
(4.4.1) Número de células:
(4.4.2) Altura total da seção:
(4.4.3) Espessura da mesa superior:
(4.4.4) Espessura da mesa inferior:
(4.4.5) Largura das almas:

(F) TRANSVERSINAS
(1) Tipo: solidária, não solidária
(2) Espaçamento entre transversinas:
(3) Altura total da seção:
(4) Largura da alma:

(G) APARELHOS DE APOIO
(1) Tipo: neoprene, metálico, concreto, especial
(2) Dimensões:

(H) PILARES
(1) Seção transversal: circular, retangular, laminar, outro
(2) Número de pilares em cada apoio:

(I) FUNDAÇÃO
(1) Tipo: sapata, estacas, tubulão, especial

3.3- BANCO DE DADOS PARA O SOFTWARE MICROSOFT ACCESS

O Banco de Dados do cadastramento elaborado utilizando o software Microsoft Access está registrado nos dois CDs que constituem o Anexo 1 deste relatório.

Está estruturado em três opções principais (Figura 3.1):

Cadastro
Consulta/Edição
Consulta/Relatório.

Dependendo do tipo de estrutura a ser cadastrada, serão ativados ou não campos específicos, sendo que estes foram definidos à priori, pois nem todas as estruturas possuem informações para o preenchimento de todos os campos.

(A) **Cadastro**

Esta opção é utilizada para a inclusão de novos dados, e está dividida em:

(1) Identificação (Figura 3.2)
(2) Classe/Material (Figura 3.3)
(3) Sistema Estrutural (Figura 3.4)
(4) Seção Transversal (Figura 3.5)
(5) Demais Elementos (Figura 3.6))

Para cada item acima existe uma subdivisão:

(1) Identificação

Nome
Arquivo do CD-DER
Rodovia
Localização (estaca, por exemplo)
Data do Projeto
Data da Construção
Projetista
Construtora
Condição dos Dados (Completa ou incompleta, para indicar se a Obra de Arte em questão possui todas as informações relevantes para seu cadastramento ou não)
Observações (Campo destinado a todos os tipos de observações pertinentes à obra)

(2) Classe

Norma (NB-6/1960 ou NBR-7188/1984)
Classe (24, 36, 45, ou outra)

(3) Material

Material (Concreto Armado, Concreto Protendido, Metálica ou Mista)
Classe do Concreto
Classe da Armadura
Tipo do Aço

(4) Sistema Estrutural

Desenvolvimento planimétrico (Curva, Esconsa, ou Reta Ortogonal)
Desenvolvimento altimétrico (Côncavo, Convexo, Em rampa, ou Horizontal)
Sistema estrutural (Arco, Pórtico, ou Viga)
Tipo viga (Contínua, Especial, Gerber, Simplesmente apoiada, ou Simplesmente apoiada com balanços)
Posição tabuleiro (Normal ou Rebaixado)
Número de tramos
Comprimento do balanço esquerdo
Comprimento do balanço direito
Comprimento do vão central
Desenhos do sistema estrutural
Tabela (número do vão, comprimento do vão, número de transversinas, espaçamento das transversinas)

(5) Seção Transversal

Largura da pista
Largura do passeio
Tipo de seção (Laje maciça, Laje vazada, Seção celular, Seção mista, Viga T, Viga V)
Espessura da laje
Espaçamento entre nervuras
Espessura mesa superior

Espessura mesa inferior
Largura das nervuras
Espaçamento entre vigas
Seção da viga metálica
Número de transversinas
Número de vigas
Número de almas
Altura total das vigas
Altura total da seção
Desenhos seção transversal
Tabela (número, largura da alma, altura total da viga, espessura mesa inferior, largura mesa inferior, espaçamento entre vigas)

(6) Transversinas

Tipo (Solidária ou Não Solidária)
Espaçamento entre transversinas
Altura total da seção transversinas
Largura da alma transversinas

(7) Aparelhos de Apoio

Tipo (Neoprene, Metálico, Concreto, ou Especial)
Dimensões

(8) Pilares

Seção transversal (Circular, Retangular, Laminar, ou Outro)
Número de pilares em cada apoio

(9) Fundação

Tipo (Sapata, Estacas, Tubulão, ou Especial)

(B) Consulta/Edição

Nesta opção pode-se realizar a consulta aos dados dos cadastros já feitos, e também a alteração dos dados de um cadastro em específico.

Está subdividida nos mesmos itens que o Cadastro, sendo que a única diferença é que agora os campos relevantes já estão preenchidos.

Ao ser acionada esta opção, visualiza-se inicialmente uma pilha de dados em ordem alfabética, com os seguintes itens:

Nome da Obra de Arte
Rodovia
Localização (estaca, por exemplo)
Condição dos Dados
Arquivo do CD-DER.

(C) Consulta/Relatório

Nesta opção podem ser elaborados os relatórios do Banco de Dados: estatísticas, gráficos, relações, etc.

É possível realizar pesquisas de valores e dados especificados em relação ao universo total de dados do campo ou a um grupo em particular. Quando for especificado o asterisco(*) para algum campo, será feita uma pesquisa geral, para todas as possibilidades dentro do respectivo campo.

Os relatórios podem ser feitos considerando os seguintes itens (Figura 3.7):

Filtros gerais (Rodovia - todas ou uma em específico)

Sistema estrutural (Arco, Pórtico, ou Viga)

- **Sistema estrutural Viga** (Todas, ou Contínua, Especial, Gerber, Simplesmente apoiada, ou Simplesmente apoiada com balanços)
- **Faixa dos vãos**
- **Seção transversal** (Todas, ou Laje maciça, Laje vazada, Seção celular, Seção mista, Viga T, ou Viga V)
- **Número de vigas**
- **Número de transversinas**

Seção transversal

- **Tipo de seção** (Laje maciça, Laje vazada, Seção celular, Seção mista, Viga T, ou Viga V)
- **Definição do intervalo do número de vãos**

Saídas gerais em forma de gráficos

- **Sistema estrutural**
- **Seção transversal**

Saídas por faixas em forma de gráficos

- **Vigas**
- **Simplesmente apoiadas**
- **Simplesmente apoiadas com balanço**
- **Vigas contínuas**
- **Simplesmente apoiadas** - todas
- **Simplesmente apoiadas com balanço** - todas

Obs.: neste dois últimos itens é possível realizar a pesquisa através de gráficos levando em conta caso por caso o número de vigas da seção transversal.

As pesquisas permitem, além da obtenção de gráficos, a elaboração de relatórios com resultados e médias dos parâmetros pesquisados.

Antes de executar o cálculo de médias dos parâmetros, o software pede para que se confirmem os casos analisados na pesquisa, pois é possível a exclusão das obras com cadastros incompletos no cálculo das médias, as quais poderão causar uma distorção dos valores calculados; para isso basta tirar o X da frente dos cadastros descritos como Incompletos.

Em relação aos dados cadastrados cabem ainda as seguintes observações:

- É muito importante ler o campo **Observações** do Banco de Dados (existe um campo para cada Obra de Arte cadastrada), pois algumas informações referentes às obras de arte somente se encontram nesses campos.

- Em relação ao desenvolvimento altimétrico, adotou-se como **Horizontal** as Obras de Arte com inclinação inferior a 2%, ou que não apresentavam nos desenhos inclinação visível.

- Quando um determinado campo do Banco de Dados está em branco ou com valor nulo, significa normalmente que o dado correspondente não existe, ou não foi possível visualizá-lo com clareza no desenho digitalizado, mas recomenda-se consultar o campo **Observações** onde pode estar alguma informação.

- O "número do arquivo" descrito no campo correspondente no Banco de Dados, representa o arquivo correspondente ao número do desenho (numeração da planta do CD) da vista longitudinal e seção transversal da referida Obra de Arte.

- As "datas de projeto" que aparecem nos respectivos campos do Banco de Dados, como 05/09/69 (ou outro dia, mas neste mesmo mês e ano) possivelmente não são corretas, pois são provenientes de um carimbo cujo significado não foi identificado, e aparecem repetidos em vários outros projetos. As outras datas são corretas, pois são provenientes de carimbos do calculista. Cabe registrar ainda que na maioria dos casos não existe nenhuma referência quanto às datas nas plantas.

- Com relação à distinção entre ponte de laje vazada e ponte de seção celular com várias células, adotou-se o critério de cadastramento pela altura da seção transversal. Seções com alturas pequenas, foram cadastradas como pontes de laje vazada; e seções com alturas maiores como pontes de seção celular de várias células.

- Algumas pontes com datas anteriores a 1940 não foram cadastradas, pois supôs-se que elas já não existam mais, ou foram reformadas, não correspondendo ao projeto original.

- Quando foi necessária a sub-divisão de uma ponte em mais de um arquivo no Banco de Dados (devido ao fato de a obra estar separada por juntas, por exemplo, o que implica em considerá-la como sendo composta de várias estruturas independentes), e nos casos em que somente as informações diferentes foram preenchidas (sistema estrutural normalmente), subentende-se que as outras informações (seção transversal e infraestrutura) são as mesmas do arquivo cadastrado por completo.

- Para algumas pontes foram criados cadastros no Banco de Dados com o mesmo número de arquivo e mesmo nome com sufixos diferentes (por exemplo, no caso de pontes simplesmente apoiadas com vários tramos: Ponte A - tramos centrais, Ponte A - tramo esquerdo, Ponte A - tramo direito). Isto para não ocorrer o cadastro de uma mesma ponte com números de arquivos diferentes.

As Figuras 3.1 a 3.7 a seguir apresentadas são reproduções das telas principais do Banco de Dados.

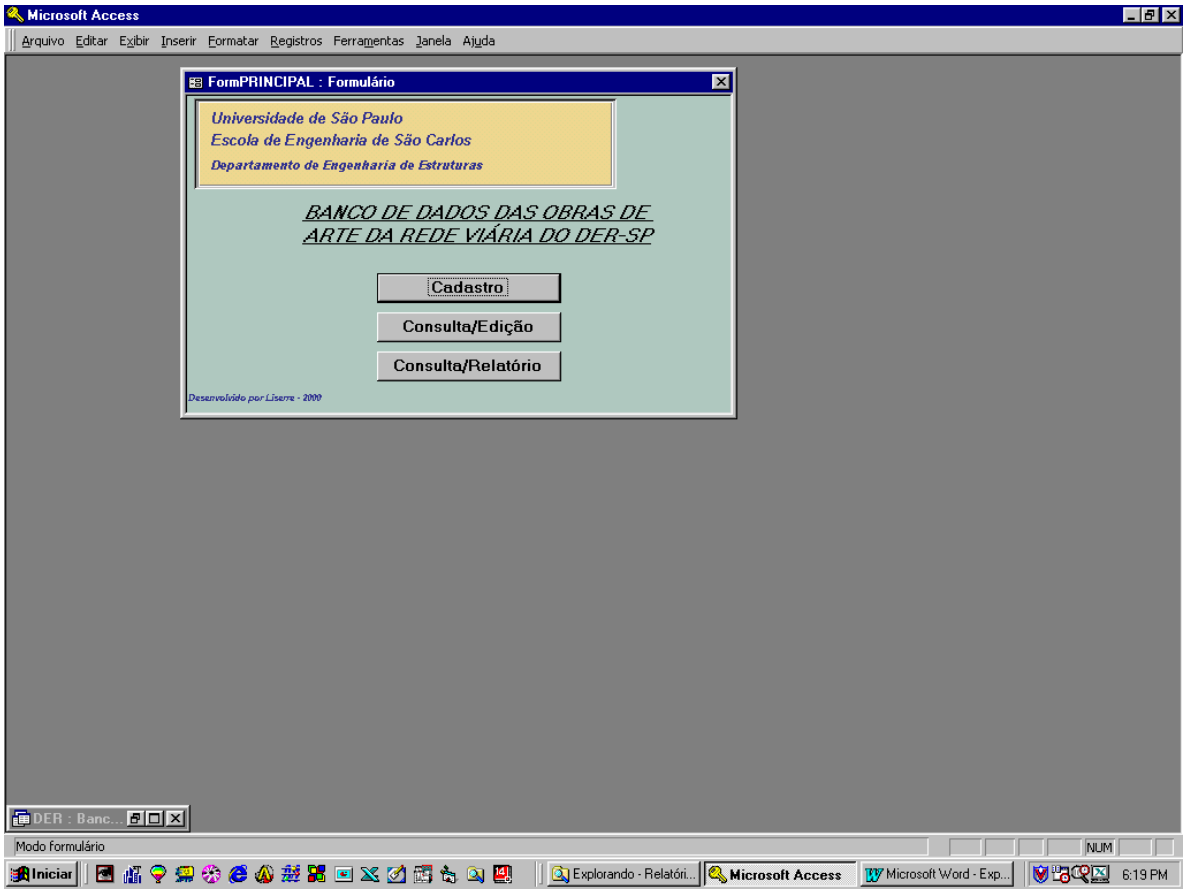


Figura 3.1 - Tela inicial do Banco de Dados

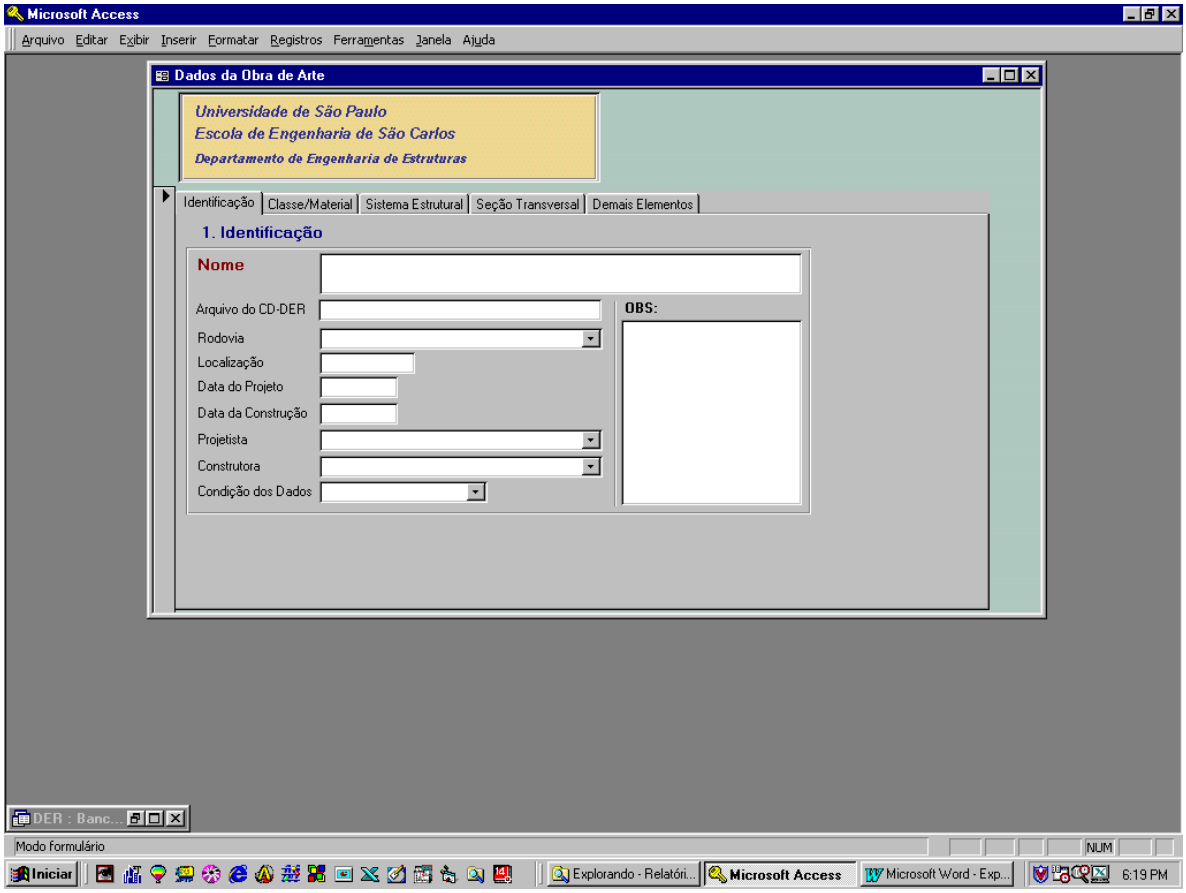


Figura 3.2 – Tela da opção Cadastro - Identificação

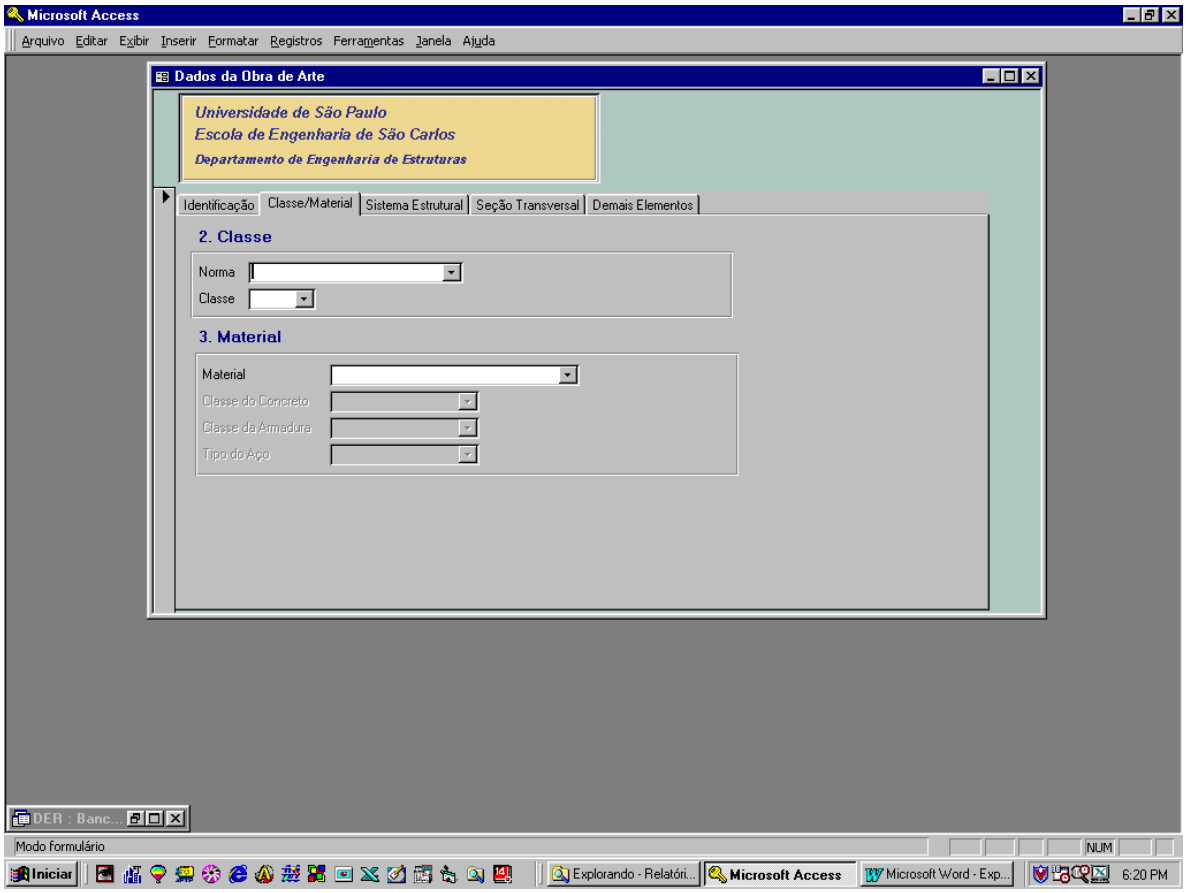


Figura 3.3 – Tela da opção Cadastro - Classe/ Material

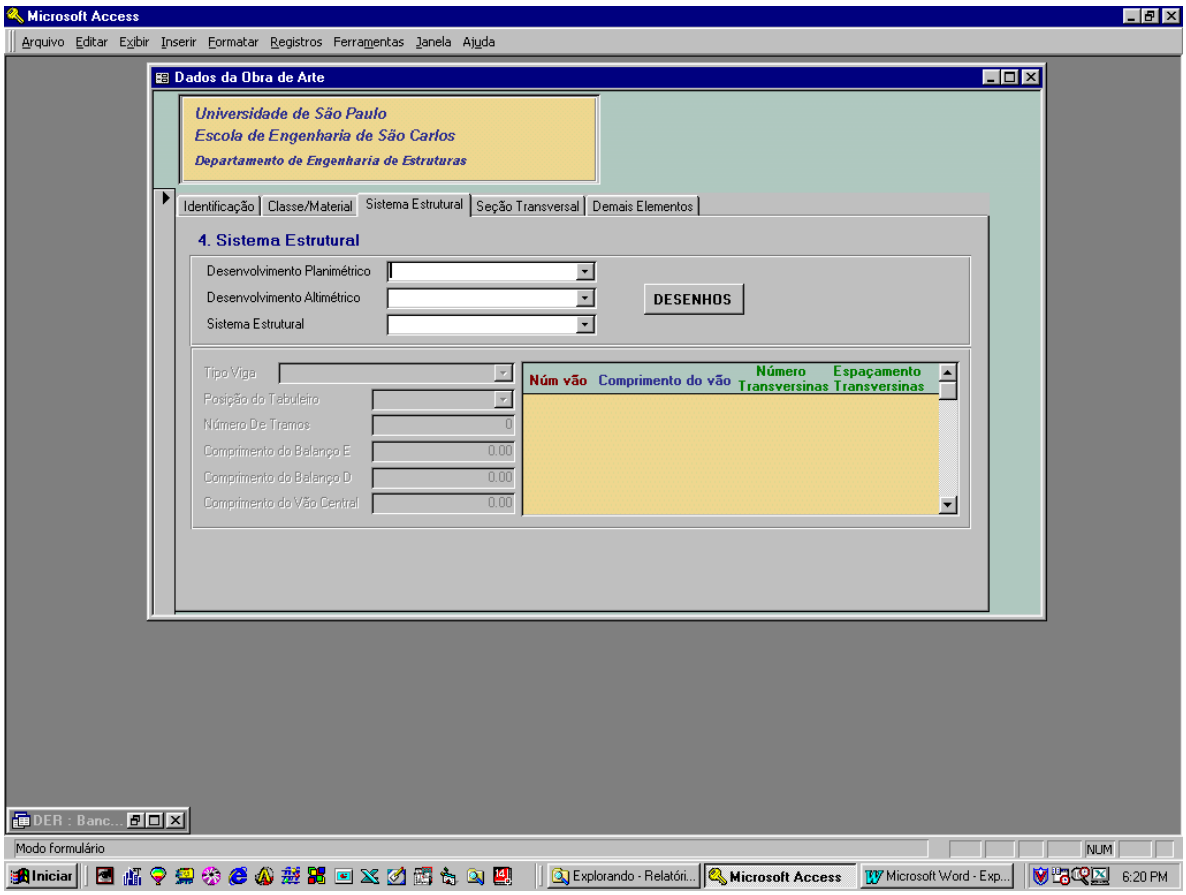


Figura 3.4 – Tela da opção Cadastro – Sistema estrutural

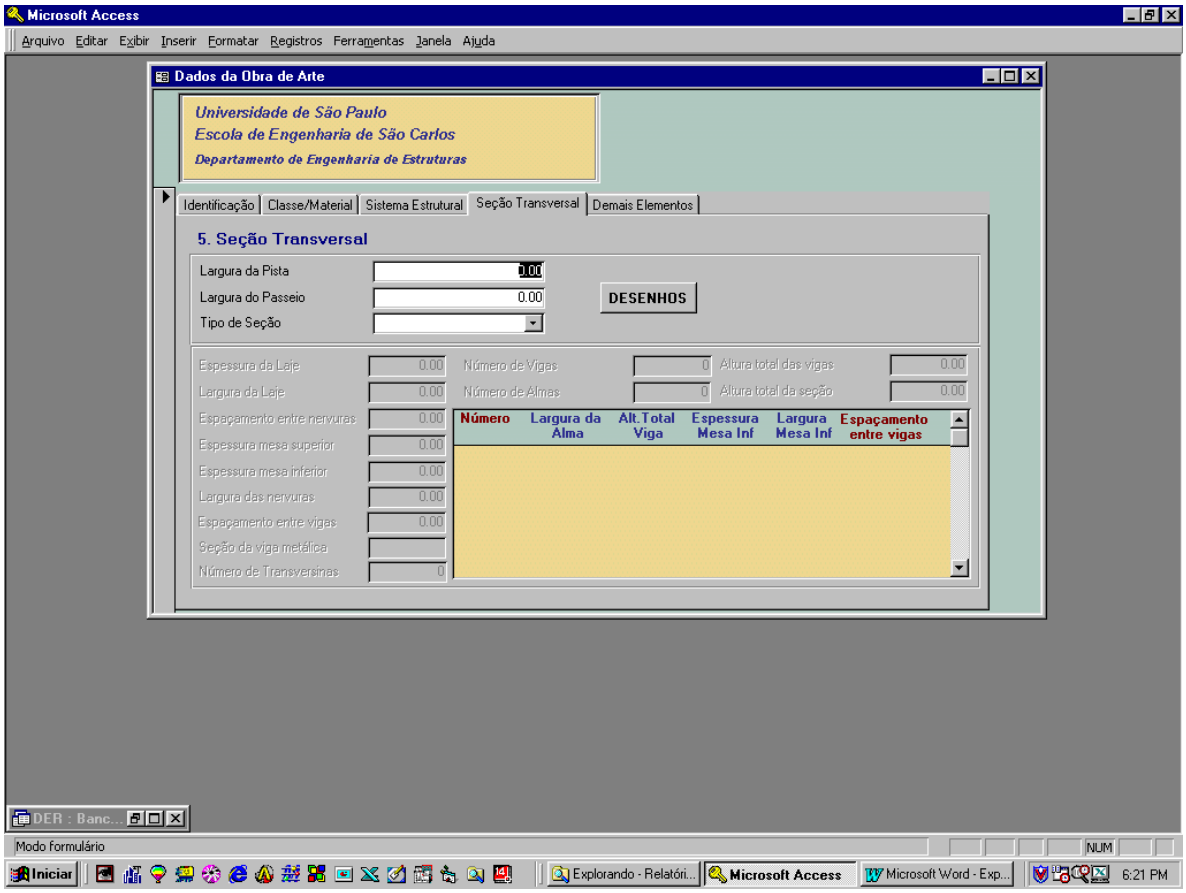


Figura 3.5 – Tela da opção Cadastro – Seção transversal

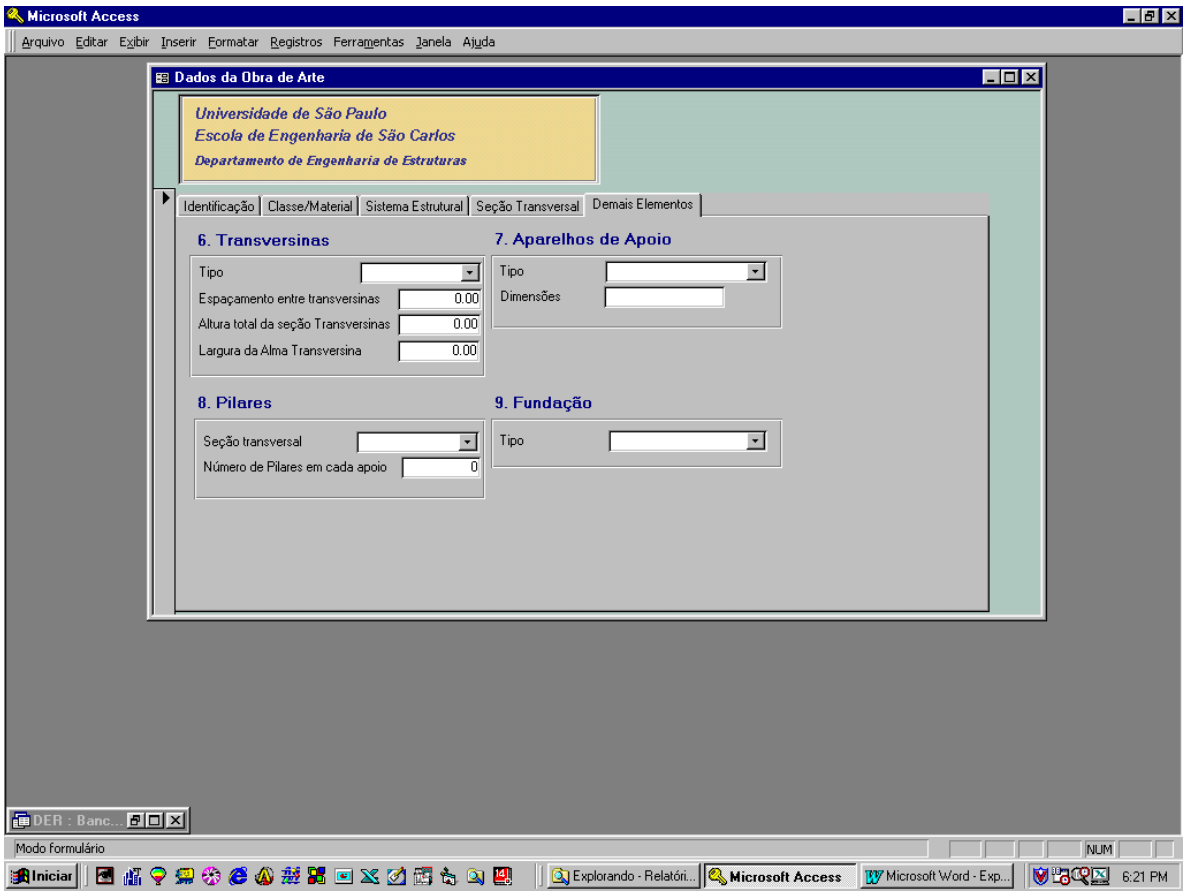


Figura 3.6 – Tela da opção Cadastro – Demais elementos

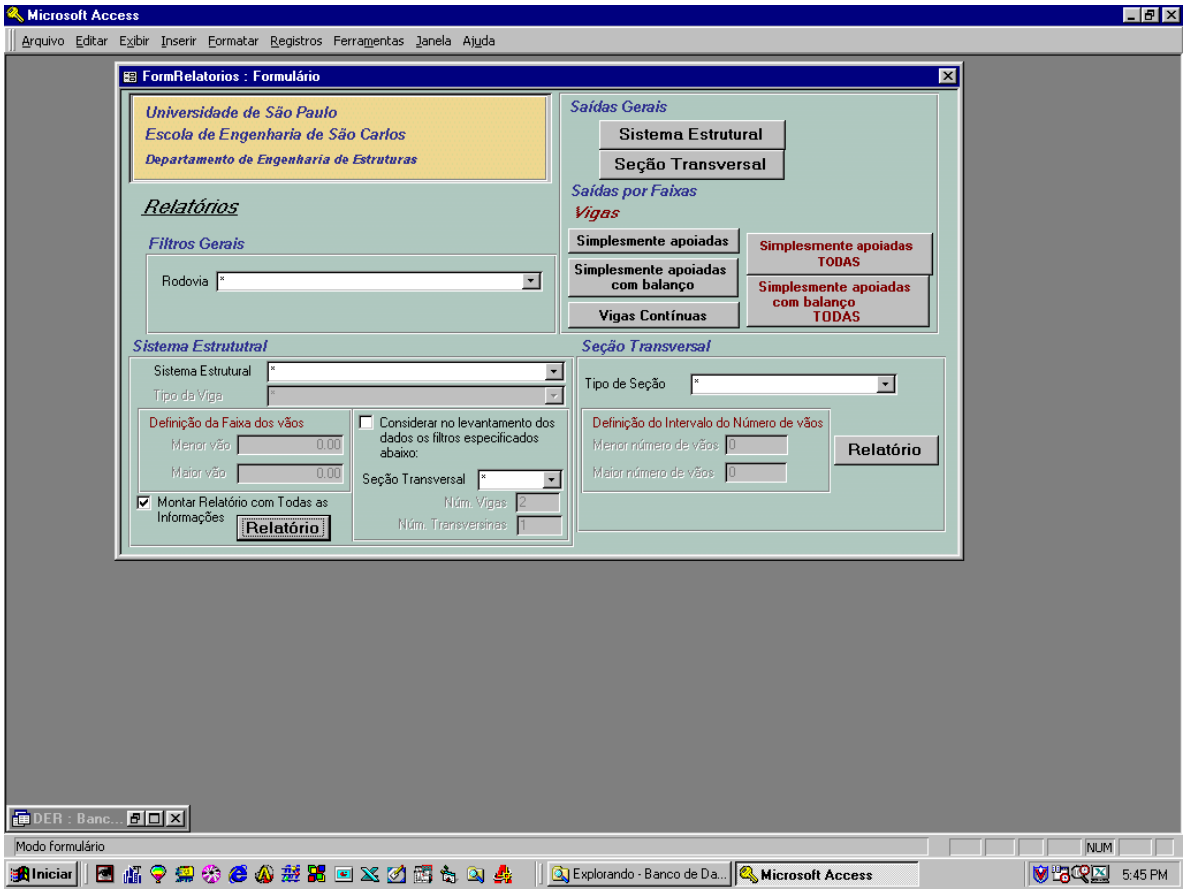


Figura 3.7 – Tela da opção Consulta/ Edição

3.4- PLANILHAS PARA O SOFTWARE MICROSOFT EXCEL

Foram criadas duas planilhas utilizando o software Microsoft Excel, para realizar pesquisas e análises complementares dos dados cadastrados no Banco de Dados.

Essas planilhas estão registradas em conjunto com o Banco de Dados nos dois CDs que constituem o Anexo 1, com os seguintes nomes: Planilha de busca-1 e Planilha de busca-2.

As planilhas podem funcionar com tabelas dinâmicas ou não, sendo que existem pastas dentro de cada planilha, que permitem buscas especificadas para um determinado tipo de estrutura. Para tal busca deve-se "clicar" na primeira linha da planilha correspondente à análise requerida (algumas planilhas somente servem para a apresentação dos dados do cadastro) de modo a escolher os parâmetros para uma busca em particular. Quando a seta de busca passar de preta para azul esta coluna estará ativada e com uma restrição de dados imposta pelo usuário para que tal busca seja adequada. Portanto, para cada coluna podemos fazer a busca para o universo global dos dados, ou para uma condição em específico.

3.5- RESULTADOS DA ANÁLISE DO BANCO DE DADOS

As tabelas e os gráficos apresentados no Anexo 2 são os resultados da análise do Banco de Dados.

Com relação às tabelas de resultados em porcentagens, a coluna referente ao Somatório do número de pontes de cada Sistema transversal, indicada com o símbolo (Σ) representa a quantidade de pontes da linha em questão. Esse número difere do valor apresentado na coluna da esquerda porque este último leva em conta: as pontes em vigas Gerber, e as pontes cadastradas com o mesmo nome em vários arquivos.

4- CASOS ANALISADOS

A partir do levantamento descrito na seção anterior foram escolhidos os casos a serem analisados, tomando como base as seguintes diretrizes:

(a) Procurou-se atender mais diretamente aos tipos estruturais mais comuns;
(b) Buscaram-se as envoltórias das situações reais, mesmo que seja com situações fictícias;
(c) Utilizou-se o menor travamento transversal para se obter distribuições de esforços mais desfavoráveis.

Foram selecionadas as seguintes variáveis para a escolha dos casos:

Seção transversal
Laje – maciça e vazada
Viga T – duas e cinco vigas (1)
Viga de seção celular – duas e quatro células (2)

Esquema longitudinal
Simplesmente apoiada
Simplesmente apoiada com balanços
Contínua de dois e três tramos (3)

Vãos principais
10, 20, 30 e 40 metros

Largura do tabuleiro (4)
Estreito – 8 metros
Largo – 12 metros

Observações:
(1) As situações de três e quatro vigas estariam cobertas por estes casos.
(2) Pretendeu-se utilizar a seção de uma célula como limite inferior, mas, devido à inexistência desde tipo no levantamento e em função da forma da análise estrutural para as pontes de seção celular, o limite inferior foi de duas células.
(3) Não é de se esperar mudanças para maior número de tramos.
(4) Estas duas larguras correspondem aos limites da grande maioria das pontes.

Com base no exposto, foram escolhidos para a análise os casos apresentados na Tabela 4.1.

Cabe salientar os seguintes aspectos:

(a) as pontes contínuas com vãos iguais servem de referência, pois em geral os vãos são desiguais;
(b) as pontes de cinco vigas sem transversinas foram incluídas por serem casos que existem, mas que não aparecem no cadastro, por serem de utilização mais recente;
(c) pode-se considerar que a seção com mais de três células e a seção de laje vazada sejam equivalentes em termos de distribuição de esforços.

Nas Tabelas 4.2 a 4.5 estão apresentadas as principais características dos casos analisados, adotadas a partir das informações dos cadastros. Os símbolos TE e TL utilizados nas tabelas significam respectivamente Tabuleiro Estreito e Tabuleiro Largo.

Em relação a essas tabelas merecem ainda serem destacados os seguintes pontos:

(a) Nas pontes de viga de seção T, o número e a altura de transversinas foram adotados de forma a conduzir ao menor travamento transversal. A altura das transversinas foi padronizada para todos os casos com 0,8 da altura das longarinas e largura de 0,20 m;
(b) Não foram incluídos os passeios das pontes nessas análises, pelo fato da carga nesses elementos ser igual para os carregamentos normativos e para os carregamentos com veículos especiais;
(c) Na maioria das vezes, as dimensões das seções transversais foram ajustadas a partir de médias das dimensões reais;
(d) Para facilitar a comparação dos casos analisados, procurou-se padronizar os valores das dimensões;
(e) Nem sempre as dimensões saíram diretamente do levantamento, em alguns casos foram feitas extrapolações em função das relações altura/vão dos casos reais.

Tabela 4.1 – CASOS ANALISADOS

Seção transversal		Largura do tabuleiro	Esquema longitudinal											
			SA				SAB				C3			
			10 m	20 m	30 m	40 m	10 m	20 m	30 m	40 m	10 m	20 m	30 m	40 m
Laje	Maciça	Estreito	X								X			
		Largo	X								X			
	Vazada	Estreito		X								X		
		Largo		X								X		
Viga T	2 vigas	Estreito	X	X			X	X	X	X		X	X	X
		Largo	X	X			X	X	X	X		X	X	X
	5 vigas	Estreito	X	X	X	X								
		Largo	X	X	X	X							X	
Seção celular	2 células	Estreito												
		Largo		X	X	X							X	
	4 células	Estreito												
		Largo			X									

Casos especiais que não estão indicados na tabela:

1- Ponte de 5 vigas sem transversinas, simplesmente apoiada – tabuleiro estreito e tabuleiro largo
2- Ponte de 2 vigas contínuas com dois tramos iguais de 30m – tabuleiro largo
3- Ponte de 2 vigas contínuas com três tramos desiguais, de 20, 25 e 20m, com balanços de 5m - tabuleiro estreito e tabuleiro largo
4- Ponte de 2 vigas contínuas com três tramos desiguais, de 25, 30 e 25m, com balanços de 5m - tabuleiro estreito e tabuleiro largo
5- Ponte de 5 vigas contínuas com três tramos desiguais, de 25, 30 e 25m, com balanços de 5m - tabuleiro estreito e tabuleiro largo

SA = simplesmente apoiada
SAB = simplesmente apoiada com balanços
C3 = contínua com 3 tramos

Tabela 4.2 - Características geométricas dos casos analisados
LAJE

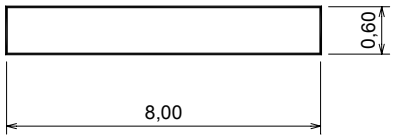
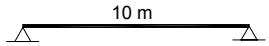
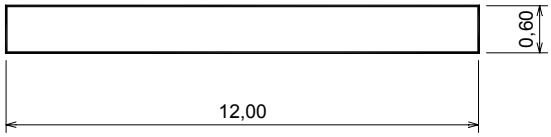
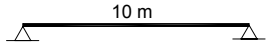
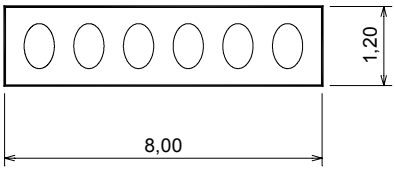
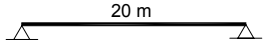
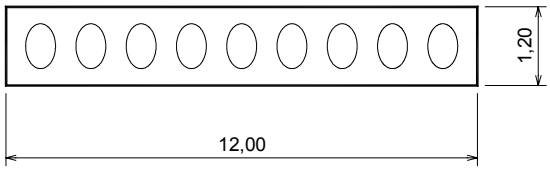
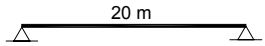
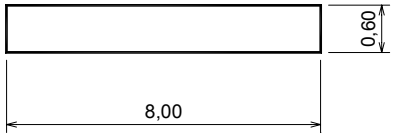
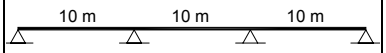
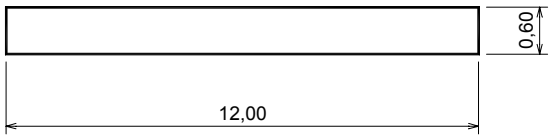
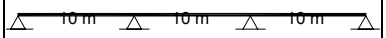
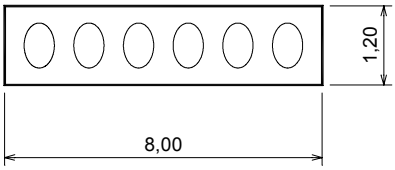
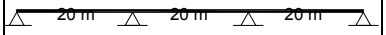
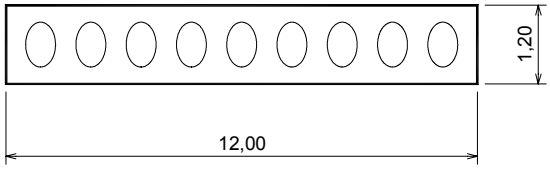
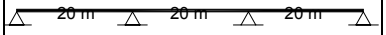
Ordem	Caso	Esquema transversal	Esquema longitudinal
1	Laje maciça TE		
2	Laje maciça TL		
3	Laje vazada TE		
4	Laje vazada TL		
5	Laje maciça TE		
6	Laje maciça TL		
7	Laje vazada TE		
8	Laje vazada TL		

Tabela 4.3 - Características geométricas dos casos analisados
VIGA T - 2 VIGAS

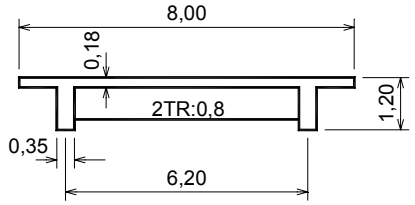
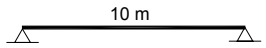
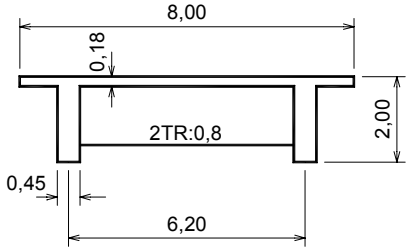
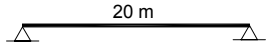
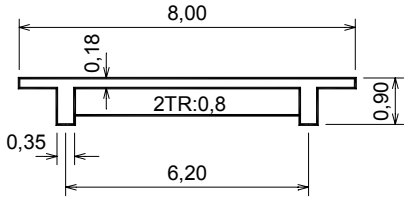
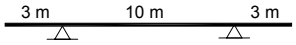
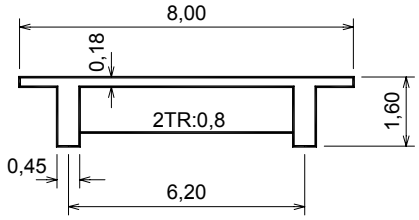
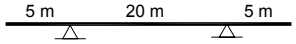
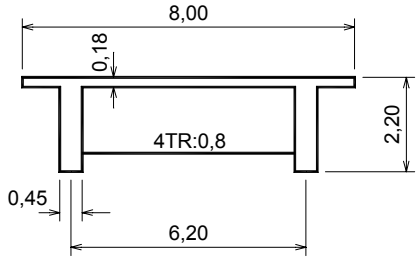
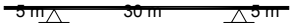
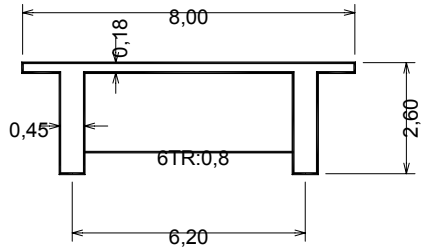
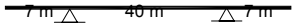
Ordem	Caso	Esquema transversal	Esquema longitudinal
1	2 vigas TE		
2	2 vigas TE		
3	2 vigas TE		
4	2 vigas TE		
5	2 vigas TE		
6	2 vigas TE		

Tabela 4.3 (continuação) – Características geométricas dos casos analisados
VIGA T – 2 VIGAS

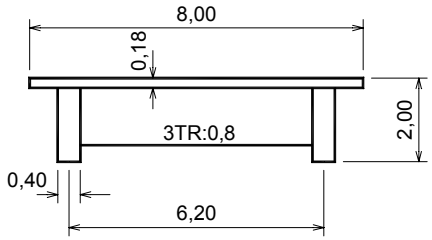
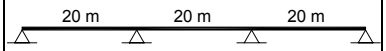
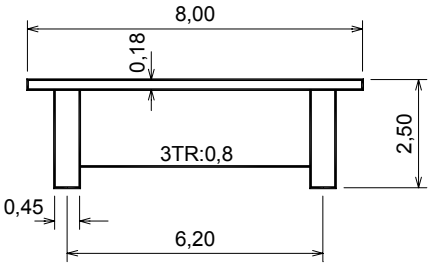
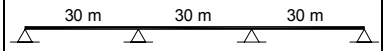
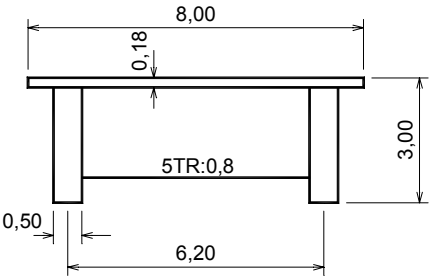
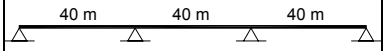
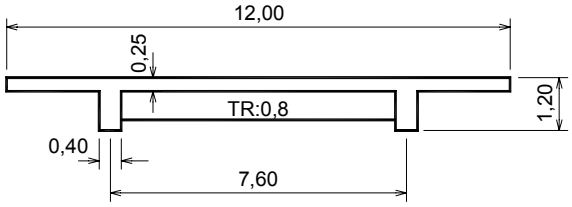
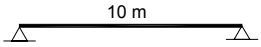
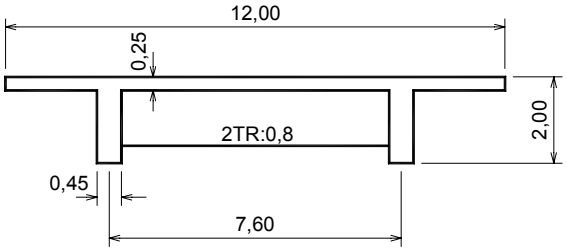
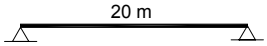
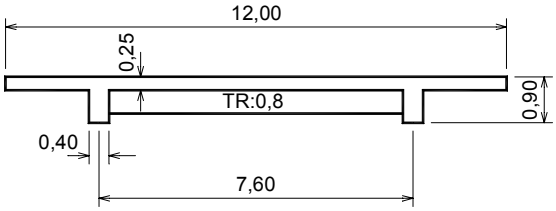
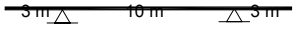
Ordem	Caso	Esquema transversal	Esquema longitudinal
7	2 vigas TE		
8	2 vigas TE		
9	2 vigas TE		
10	2 vigas TL		
11	2 vigas TL		
12	2 vigas TL		

Tabela 4.3 (continuação) - Características geométricas dos casos analisados
VIGA T - 2 VIGAS

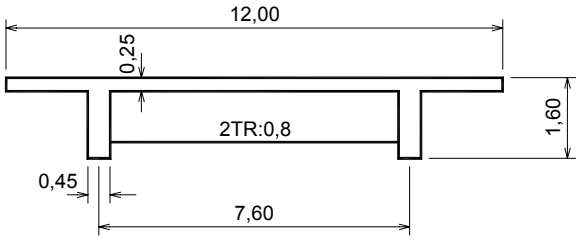
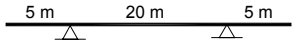
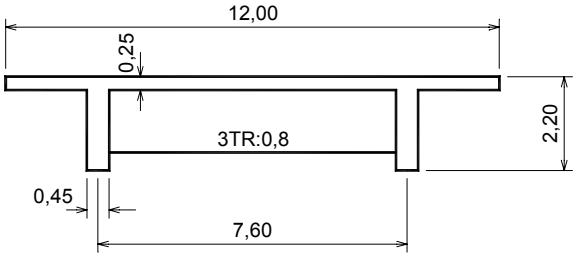
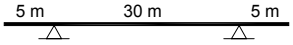
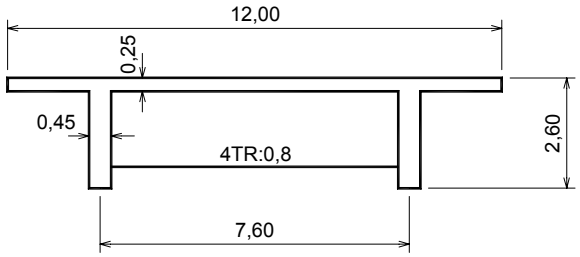
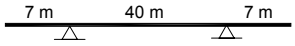
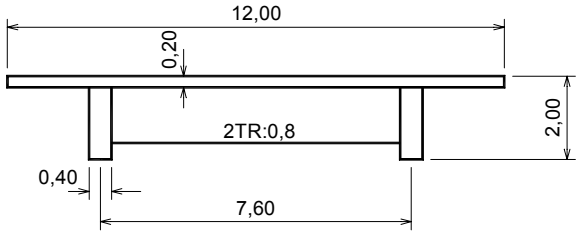
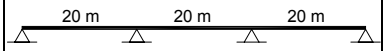
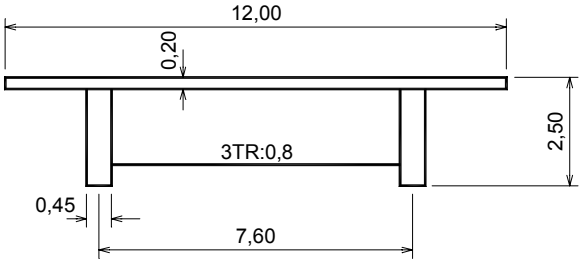
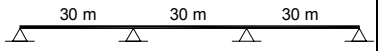
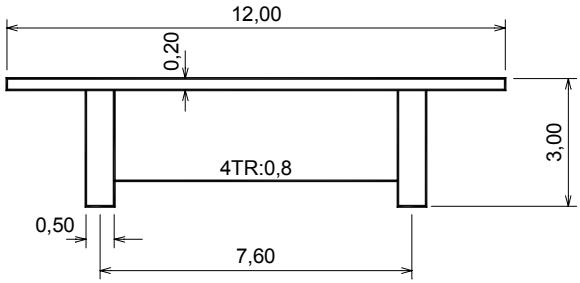
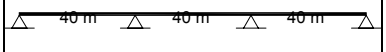
Ordem	Caso	Esquema transversal	Esquema longitudinal
13	2 vigas TL		
14	2 vigas TL		
15	2 vigas TL		
16	2 vigas TL		
17	2 vigas TL		
18	2 vigas TL		

Tabela 4.3 (continuação) - Características geométricas dos casos analisados
VIGA T - 2 VIGAS

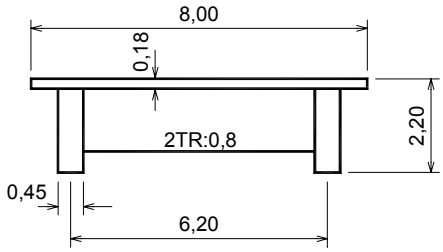
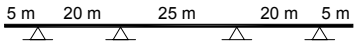
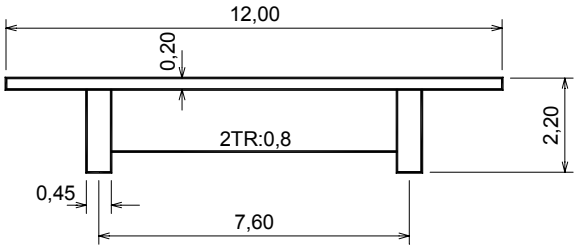
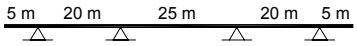
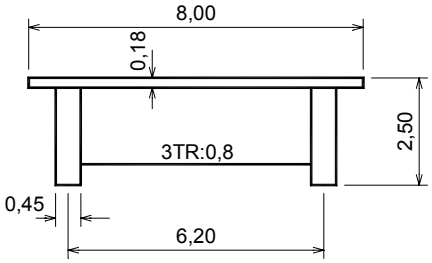
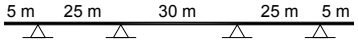
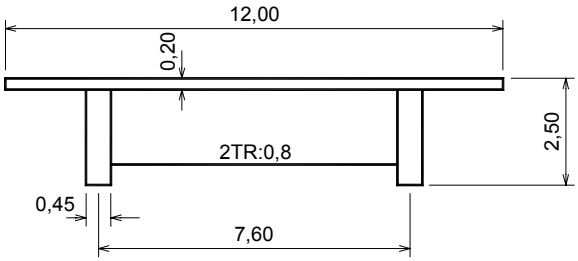
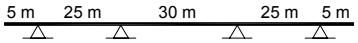
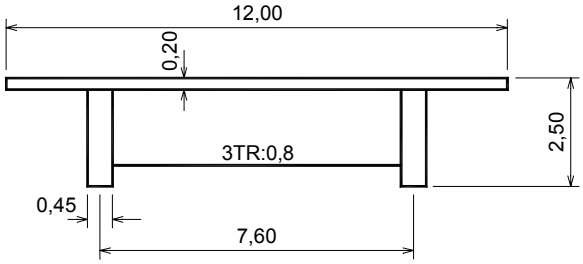
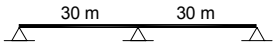
Ordem	Caso	Esquema transversal	Esquema longitudinal
19	2 vigas TE		
20	2 vigas TL		
21	2 vigas TE		
22	2 vigas TL		
23	2 vigas TL		

Tabela 4.4 - Características geométricas dos casos analisados
VIGA T - 5 VIGAS

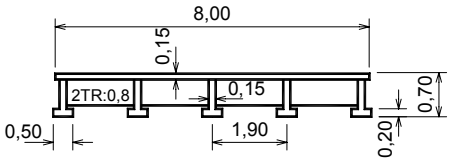
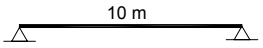
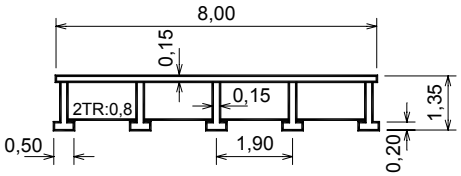
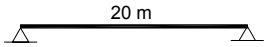
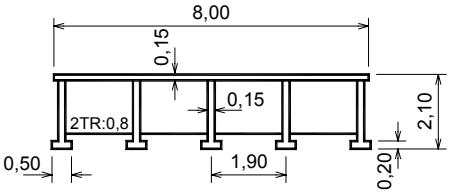
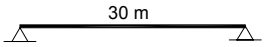
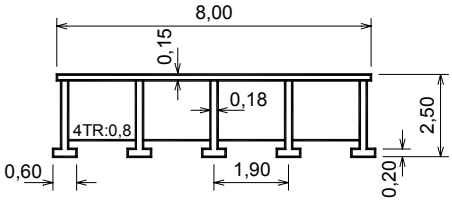
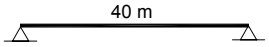
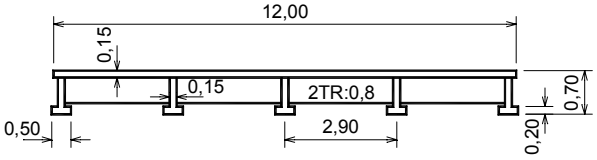
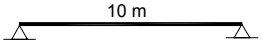
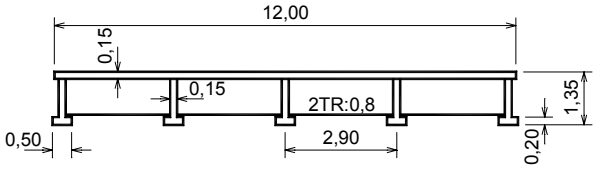
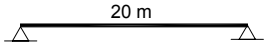
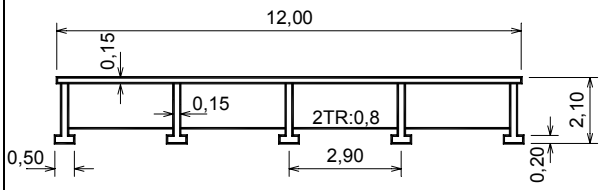
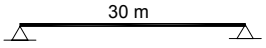
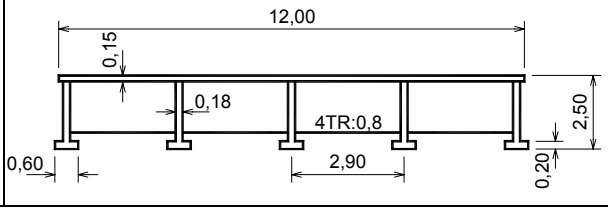
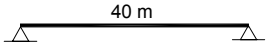
Ordem	Caso	Esquema transversal	Esquema longitudinal
1	5 vigas TE		
2	5 vigas TE		
3	5 vigas TE		
4	5 vigas TE		
5	5 vigas TL		
6	5 vigas TL		
7	5 vigas TL		
8	5 vigas TL		

Tabela 4.4 (continuação) - Características geométricas dos casos analisados
VIGA T - 5 VIGAS

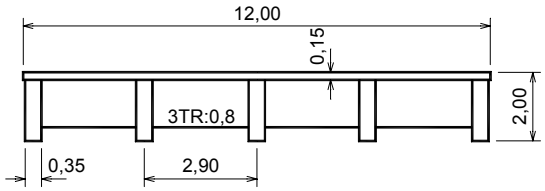
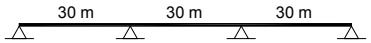
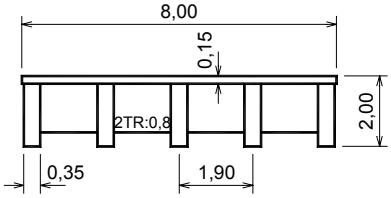
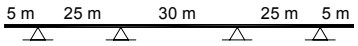
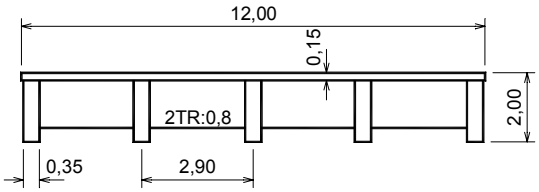
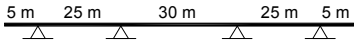
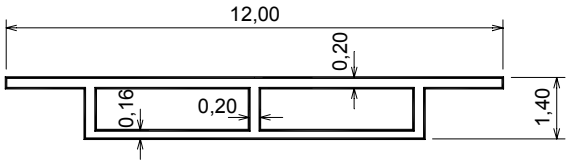
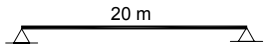
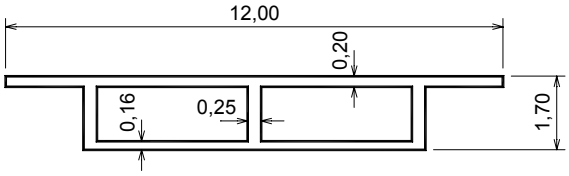
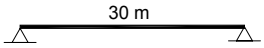
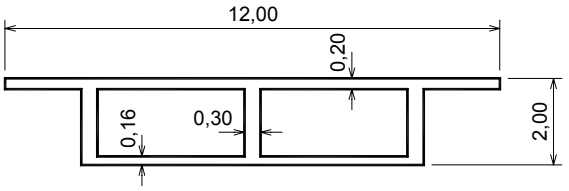
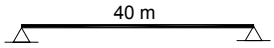
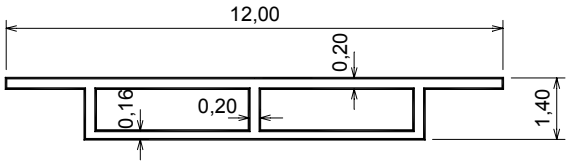
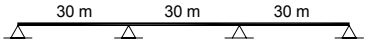
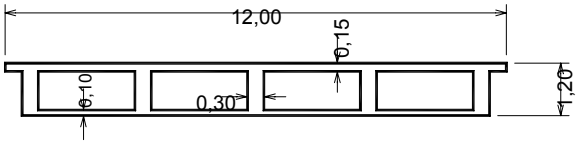
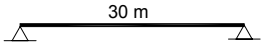
Ordem	Caso	Esquema transversal	Esquema longitudinal
9	5 vigas TL		
10	5 vigas TE		
11	5 vigas TL		
12 a 15	5 vigas TE	Iguais aos dos casos 1 a 4 porém sem transversinas	Iguais aos dos casos 1 a 4
16 a 19	5 vigas TL	Iguais aos dos casos 5 a 8 porém sem transversinas	Iguais aos dos casos 5 a 8

Tabela 4.5 - Características geométricas dos casos analisados
VIGA DE SEÇÃO CELULAR

Ordem	Caso	Esquema transversal	Esquema longitudinal
1	2 células TL		
2	2 células TL		
3	2 células TL		
4	2 células TL		
5	4 células TL		

5- CÁLCULO DOS ESFORÇOS SOLICITANTES

5.1- SOFTWARE UTILIZADO

5.1.1- Características Principais

A determinação dos esforços solicitantes foi feita por meio da utilização do software ***STRAP (Structural Analysis Programs)***. Trata-se de um software comercial, desenvolvido e patenteado em Israel, e com representação, aqui no Brasil, feita pela *SAE Informática S/C LTDA*, Sistemas de Análise Estrutural, com sede na cidade de São Paulo, estado de São Paulo.

O software mencionado foi elaborado com base no Método dos Elementos Finitos (em geral, utilizado pela grande maioria dos softwares comerciais). Permite a modelagem de uma grande gama de sistemas estruturais, tanto para análise de estruturas planas como tridimensionais, por meio de um mapeamento do modelo, mais comumente denominado de discretização, que consiste de um agregado de elementos mecânicos admitidos como contínuos, conectados entre si por pontos denominados de nós.

Vale mencionar que o software em questão disponibiliza ao usuário menus para a seleção de Nós (pontos discretos), Elementos Lineares (barras), Elementos de Superfície (Placas e Chapas) e Elementos de Volume (sólidos), os quais permitem as modelagens de diversos tipos. A figura 5.1 ilustra um dos tabuleiros modelados (vão de 20m, largura de 12m e balanços de 5m), com sua discretização feita por meio de nós, vigas (barras azuis) e laje maciça (elementos de placa vermelhos).

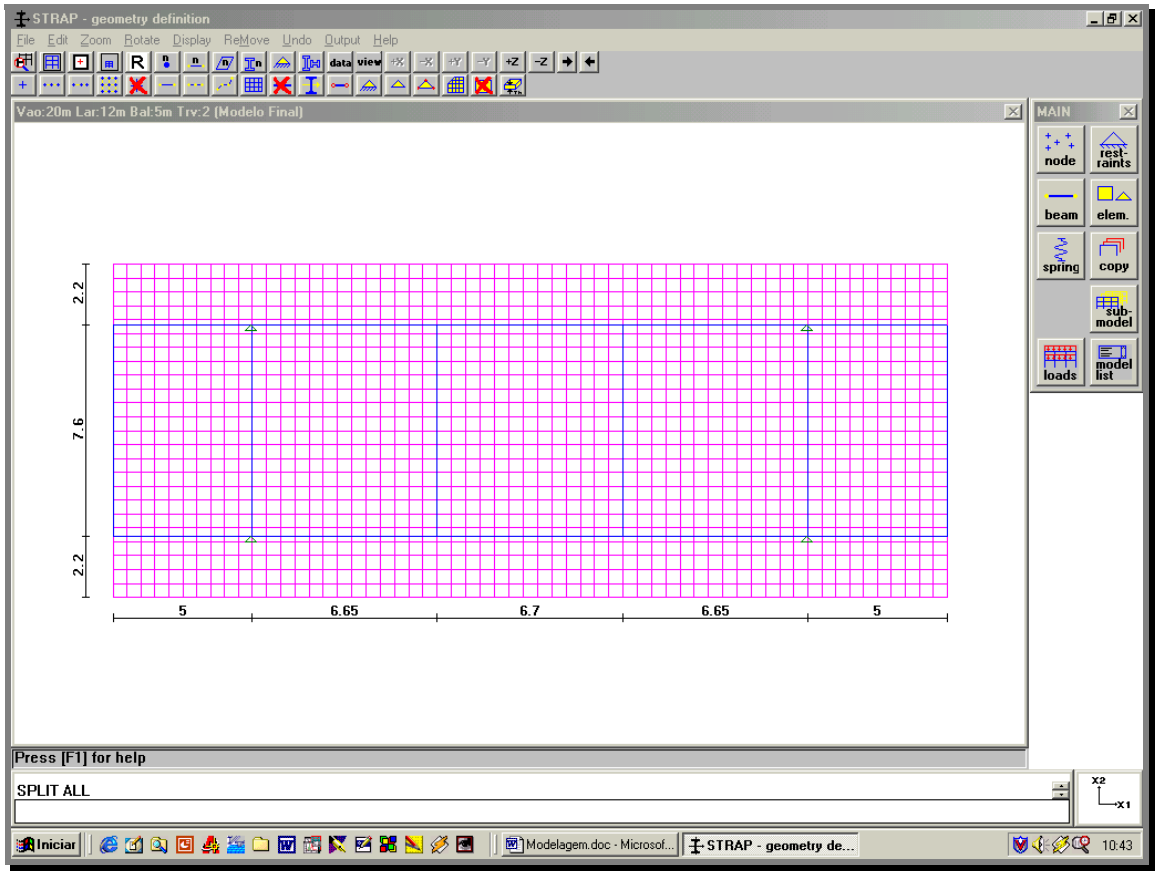


Figura 5.1 *– Discretização da superestrutura em nós, barras e elementos de placa.*

Como pode ser notado na figura 5.1, além de disponibilizar menus que objetivam definição de nós, barras e elementos, ***Node, Beam e Elements***, respectivamente, para modelo a ser analisado, o software também disponibiliza ao usuário menus para selecionar as condições de contorno, no caso seus apoios fixos (triângulos verdes), bem como os carregamentos a serem aplicados ao modelo, por meio dos menus ***Restrains e Loads.***

Deve-se ressaltar que as ferramentas que permitem definir as propriedades físicas e geométricas para as barras e elementos de placa, como ilustrado na figura 5.2, estão inseridas nos menus Beam e Elements, também ilustrado na figura 5.2, e cuja visualização pode ser identificada por meio de números e/ou cores.

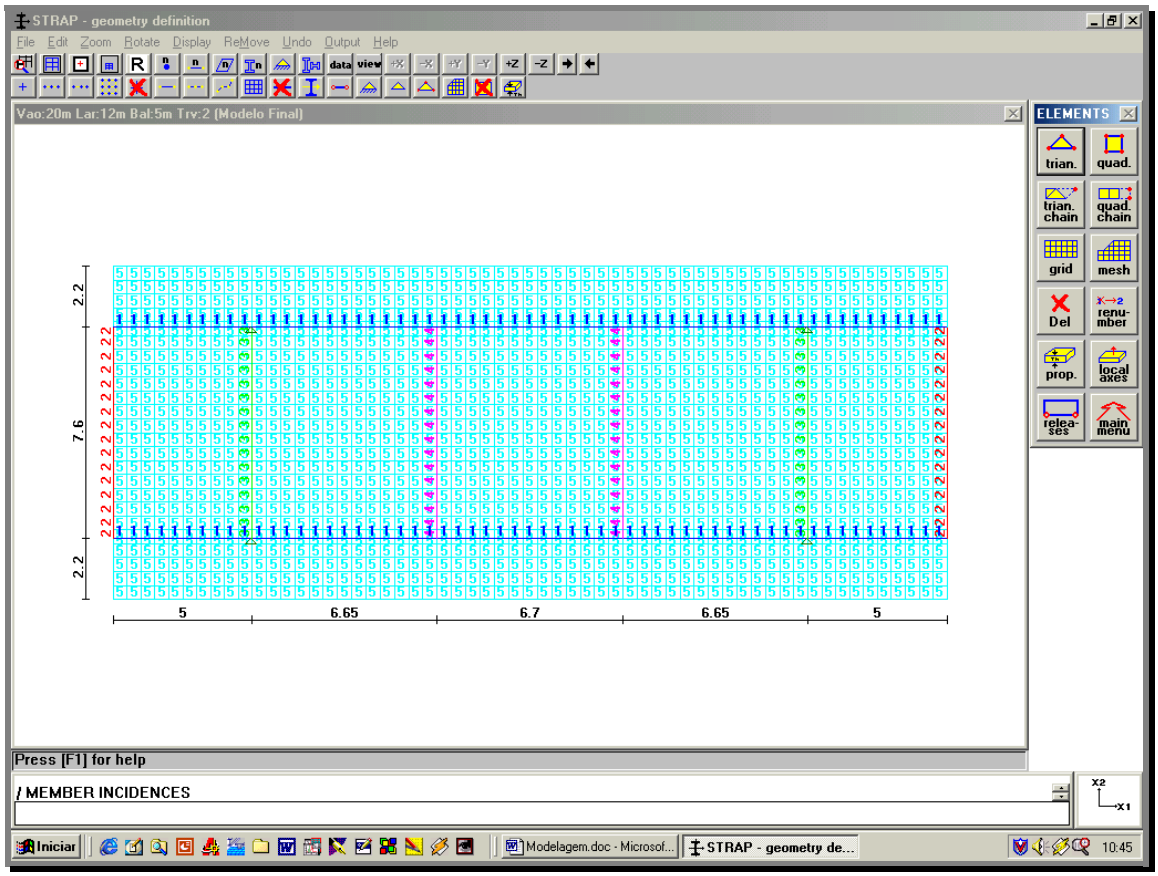


Figura 5.2 *– Definição das propriedades de barras e elementos.*

Nota-se, pela figura 5.2, que para as barras foram atribuídas as propriedades 1 para longarinas, 2, 3 e 4 para as transversinas, e finalmente, 5 para a laje do tabuleiro. Com relação aos carregamentos, deve-se ressaltar que os mesmos foram feitos previamente dentro do módulo principal do STRAP, ilustrados nas figuras 5.1 e 5.2, com referência aos casos de cargas permanentes, como por exemplo, o peso próprio da superestrutura e da pavimentação.

Os demais carregamentos de interesse para todos os casos analisados no presente estudo foram definidos dentro do Módulo de Pontes, o qual está inserido no pacote completo do software, e que será o assunto do próximo item.

Dentre os carregamentos, podem ser citados os veículos considerados para o presente estudo, bem como carregamentos distribuídos no tabuleiro, referente à multidão. Apenas como informação complementar, são apresentadas nas figuras 5.3 e 5.4, os ambientes do software referentes às opções de carregamentos disponibilizadas e da análise de esforços solicitantes (momento fletor para carregamento permanente), respectivamente.

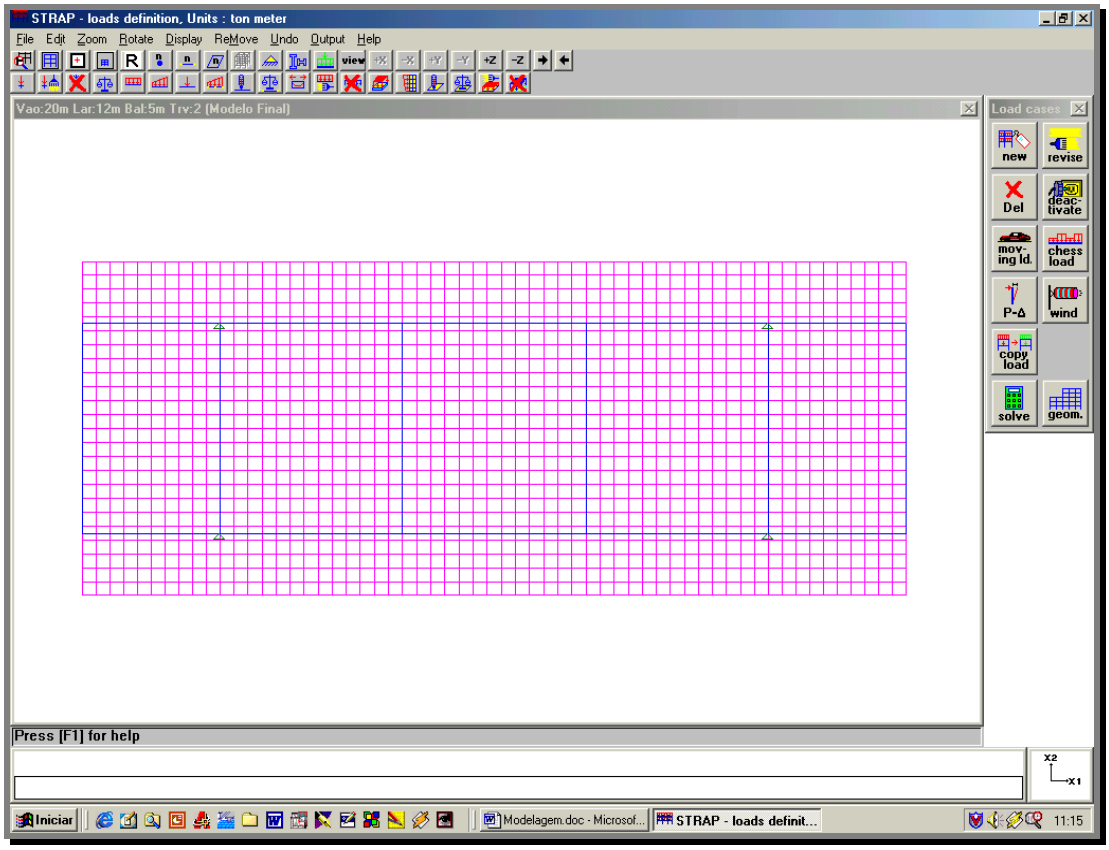


Figura 5.3 *– Menus para definição dos carregamentos.*

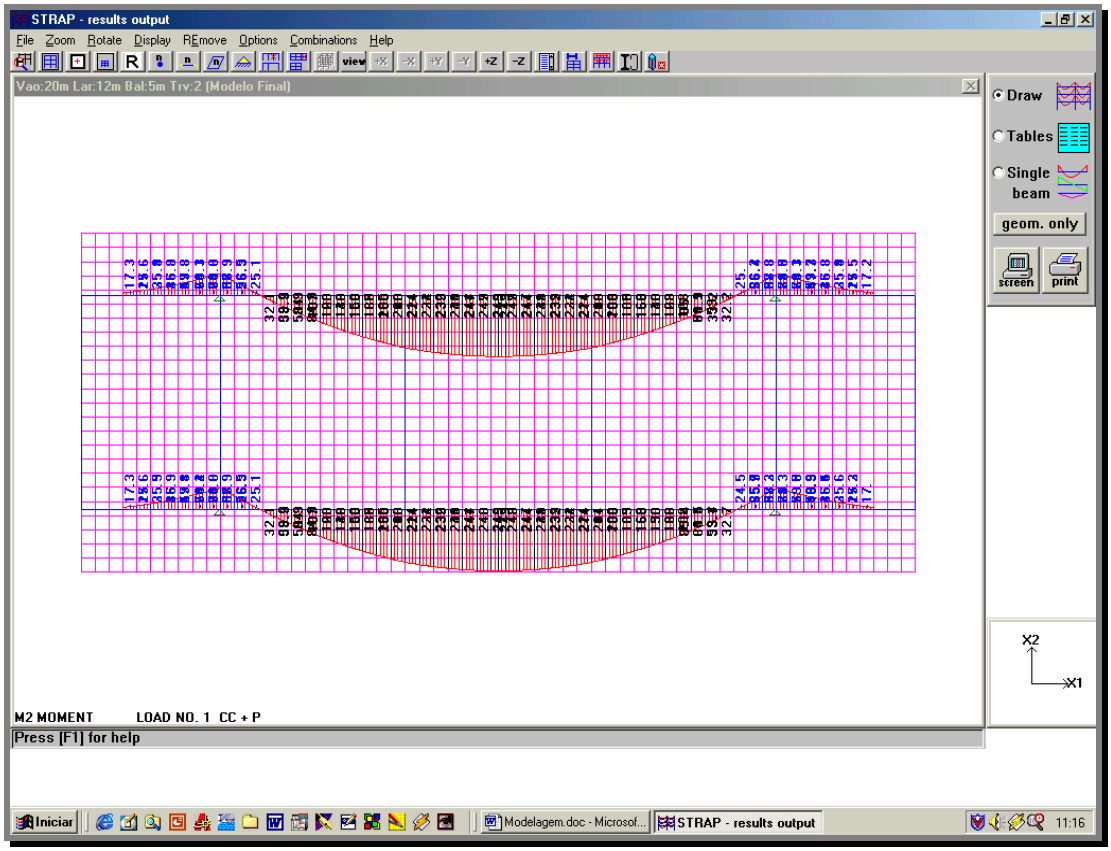


Figura 5.4 *– Resultado de Momento Fletor para as longarinas.*

5.1.2- Aspectos do Módulo de Pontes

Para análise de pontes, o STRAP disponibiliza (desde que adquirido pelo usuário) um módulo específico para o cálculo dos esforços solicitantes de pontes com referência às cargas móveis. O módulo de pontes adota como ponto de partida o modelo discretizado em elementos finitos, elaborado dentro do ambiente principal (ilustrado nas figuras 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4), no qual definem-se as faixas de rolamento (as Lanes) para os veículos, tantas quantas forem desejadas.

No presente trabalho, foram adotadas para todos os modelos analisados, faixas de 2 m de largura, que corresponde à distância transversal entre rodas dos veículos normativos. A adoção de faixas de 2 m não implica em penalização na precisão dos resultados, uma vez que os carregamentos de multidão são informados ao programa na forma de carga por unidade de comprimento de faixa (no caso, o comprimento da ponte).

Além da definição das faixas (Lanes) para o tabuleiro da ponte, o software divide cada faixa definida, em fatias (Strips), por um valor previamente definido (no caso, 0,25 m), ou qualquer outro valor desejado pelo usuário. A figura 5.5 ilustra o tabuleiro da ponte ilustrada nas figuras já apresentadas, com seis (6) faixas de rolamento e fatias de 0,25 m, totalizando 120 fatias (strips), definidas pelo comando ***lanes.***

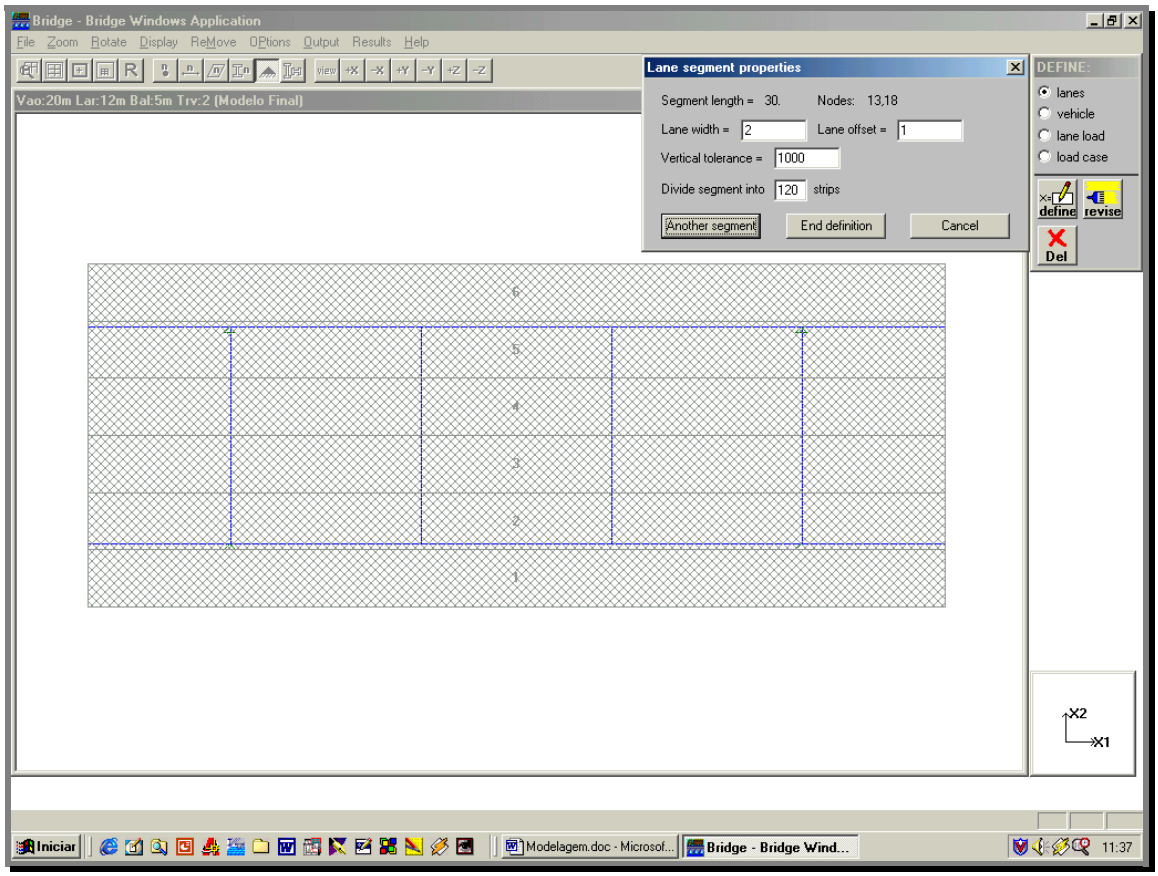


Figura 5.5 *– Tabuleiro com seis faixas de rolamento.*

A definição das faixas e fatias (lanes e strips), consiste no procedimento do software necessário para a obtenção das linhas de influência para qualquer resultado de interesse do usuário. Vale ressaltar que quanto maior o número de fatias (strips), maior o refinamento da modelagem, porém, às custas de um maior esforço computacional, com uma relação entre

benefício e custo insatisfatória, identificada ao longo das análises, razão pela qual foi adotado o valor 0,25 m (padrão do software). A figura 5.6 ilustra as linhas de influência, com respectivos valores, para o momento fletor no meio do vão da longarina referente a lane de número 2.

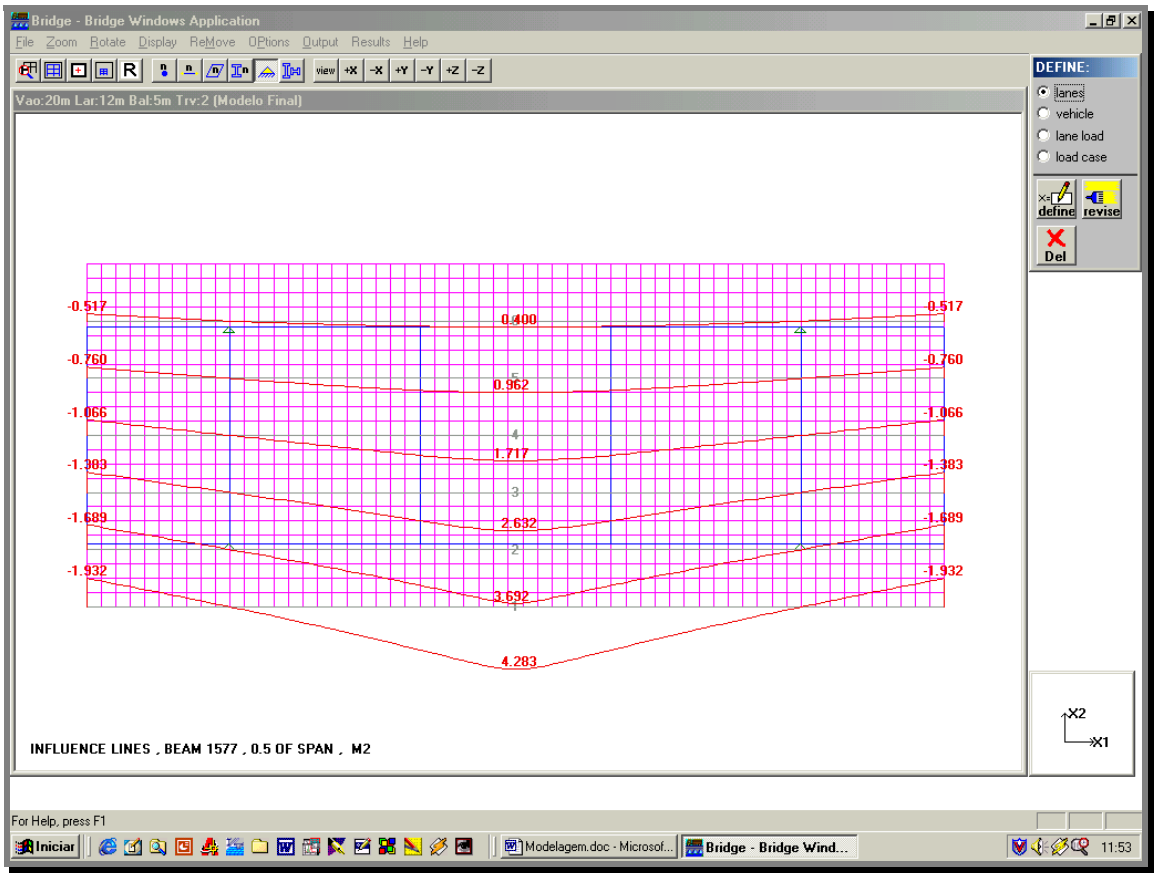


Figura 5.6 *– Linhas de Influência para longarinas.*

Como é possível identificar na figura 5.6, o módulo de pontes, além de disponibilizar o comando ***lanes*** para a definição das faixas, fornece também comandos para escolha de veículos e carregamento distribuído (multidão), ***vehicle e lane load***, respectivamente, os quais irão atuar nas faixas previamente definidas pelo usuário.

A opção ***vehicle*** permite ao usuário definir todos os tipos de veículos que desejar considerar na sua análise, bem como utilizar veículos previamente definidos em um arquivo denominado *vehicles.dat*, caminho esse adotado nesse trabalho, onde foram adotados: RT 74/20, RT 74/25, BT 74/25, BB 48/14, TB24, TB36 e TB45 (definição dos veículos). Uma vez definidos os veículos, a próxima etapa é a de criar tipos diferentes de carregamento para as faixas, combinando-se veículo e/ou carga distribuída, de acordo com a análise de interesse do usuário. Essa etapa é feita por meio do comando ***lane load***. A figura 5.7 ilustra a associação do veículo TB45 com carga distribuída na lane de 1 tf/m.

Após a definição dos tipos de carregamentos, passa-se à etapa de atribuição dos diferentes tipos de carregamento, definidos em ***lane load***, com as várias faixas definidas no comando ***lane***, objetivando a obtenção dos esforços desejados. A figura 5.8 ilustra um dos vários casos de carregamentos analisados, *load case no. 1*, definido pelo comando ***load case***, disponível no mesmo quadro de comandos.

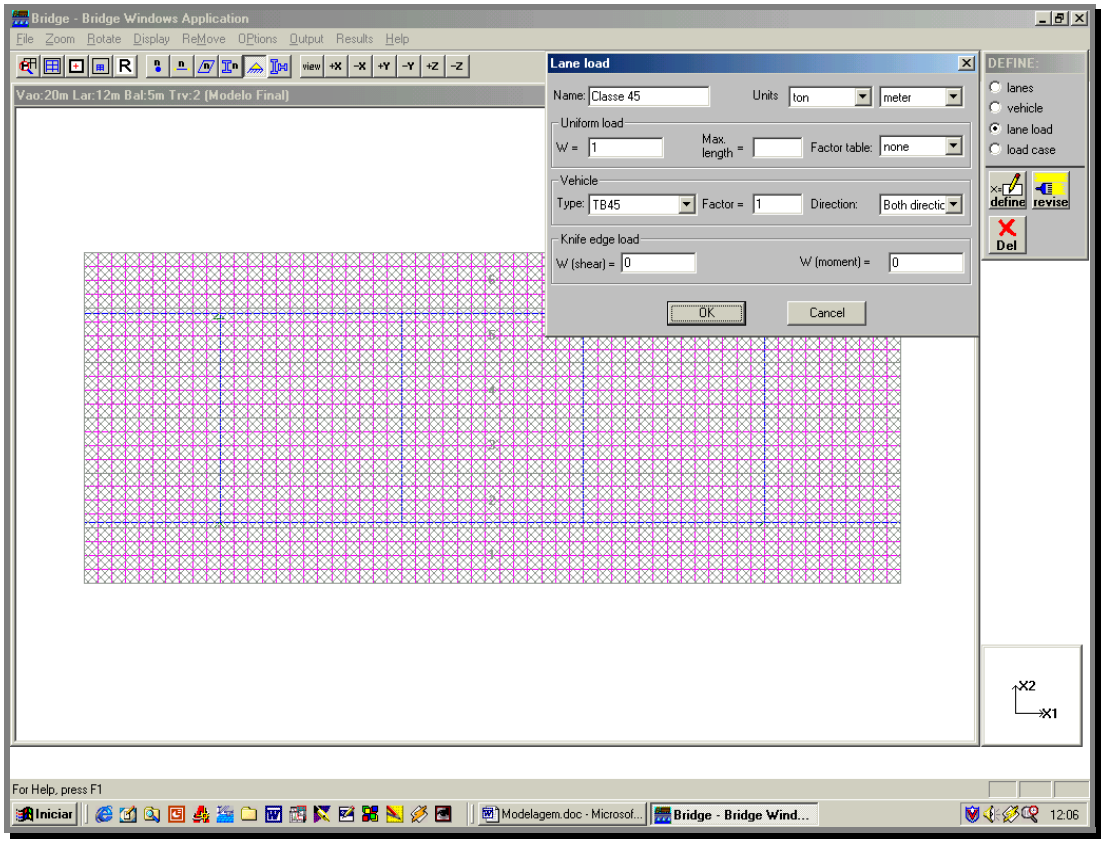


Figura 5.7 *– Combinação TB45 com carga distribuída de 1 tf/m*

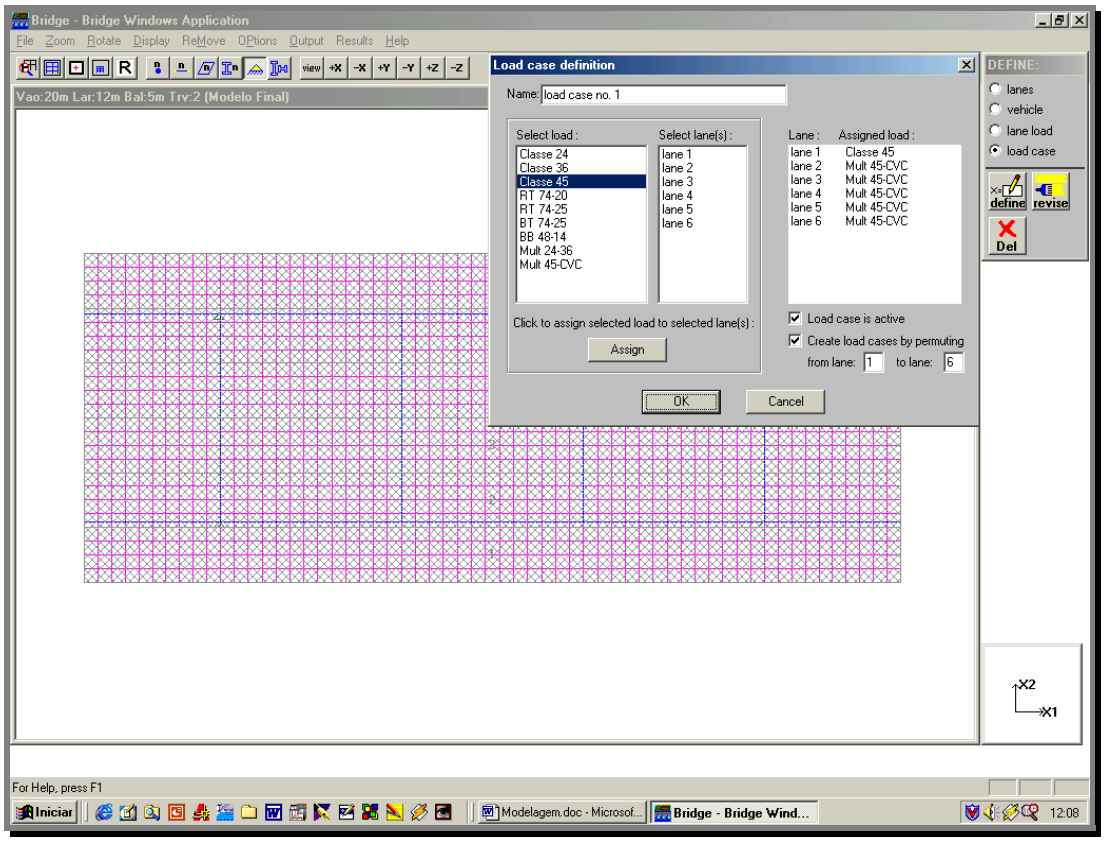


Figura 5.8 *– TB45 e carga distribuída de 1 tf/m, com permutação*

A opção permutação permite testar veículo e carga distribuída em diferentes posições (diferentes faixas), de modo a identificar aquela que conduz à situação crítica para o tipo de esforço a ser estudado. Vale ressaltar que as cargas nos passeios não foram consideradas no presente estudo, uma vez que a consideração dessas impossibilitaria a utilização do recurso de permutação. Além desse fato, foi possível perceber, ao longo das análises, que a carga de passeio pouco interferia nos resultados, quando comparada à carga de multidão e do veículo.

Para o caso de carregamento apresentado na figura 5.8, com a possibilidade de permutação de carregamentos entre as seis faixas, é possível obter o máximo esforço solicitante de interesse para qualquer ponto do modelo, tanto para os elementos de barras (vigas), quanto para os elementos de placa (laje). A figura 5.9 ilustra a situação crítica de carregamento da ponte para a obtenção do máximo momento no meio do vão da longarina.

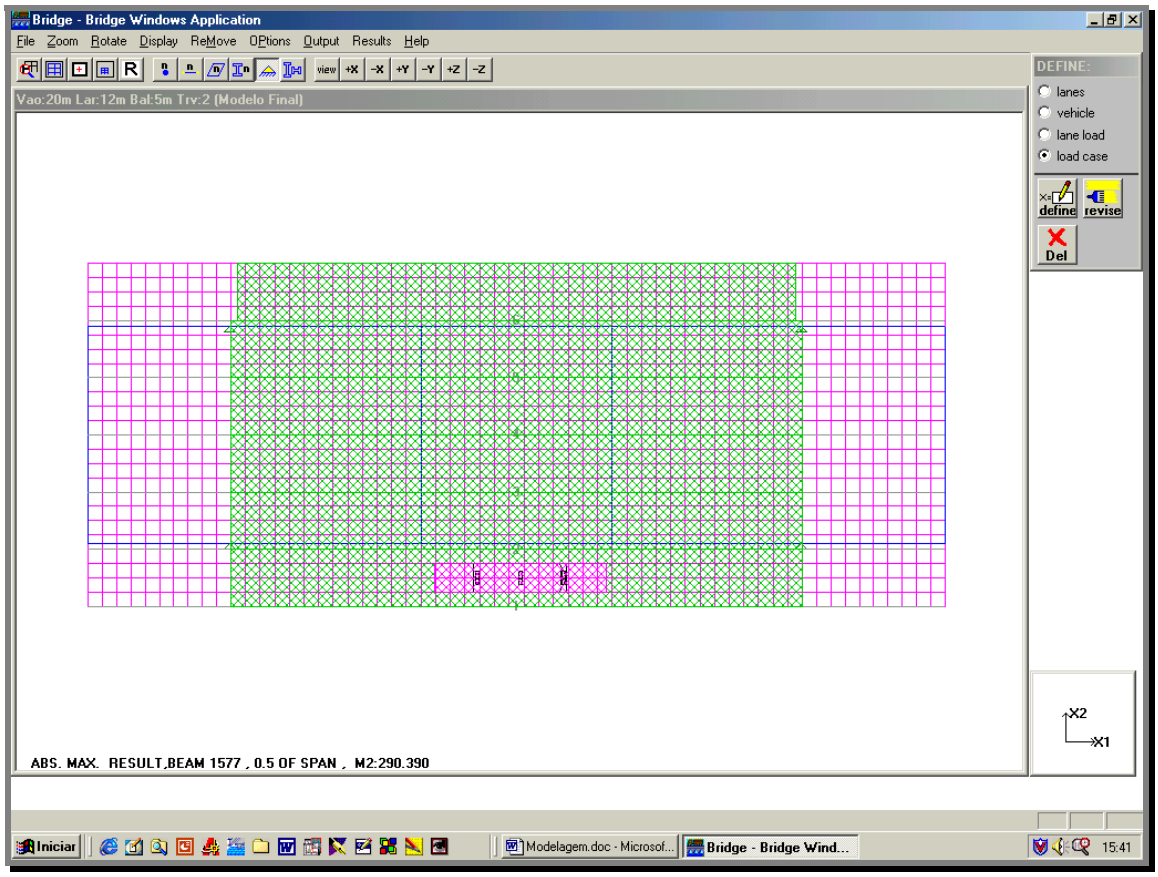


Figura 5.9 *– Carregamentos críticos para momento na longarina*

Vale ressaltar que a carga distribuída foi desconsiderada na projeção do veículo. Pode-se perceber que o software faz as devidas considerações de carregamentos que, de fato, serão criticos para a viga de interesse. Para a obtenção do momento máximo, nesse caso igual a 290,39 tf.m, o veículo aparece na sua posição mais desfavorável e a carga distribuída é desconsiderada nos balanços.

Para a determinação de qualquer outro esforço de interesse, como a força cortante na região dos apoios, o software adota um procedimento idêntico àquele usado na determinação do momento fletor apresentado na figura 5.9. A figura 5.10 ilustra o esquema de carregamento para a determinação da força cortante máxima na região dos apoios, no caso igual a 57,29 tf, com o correspondente carregamento.

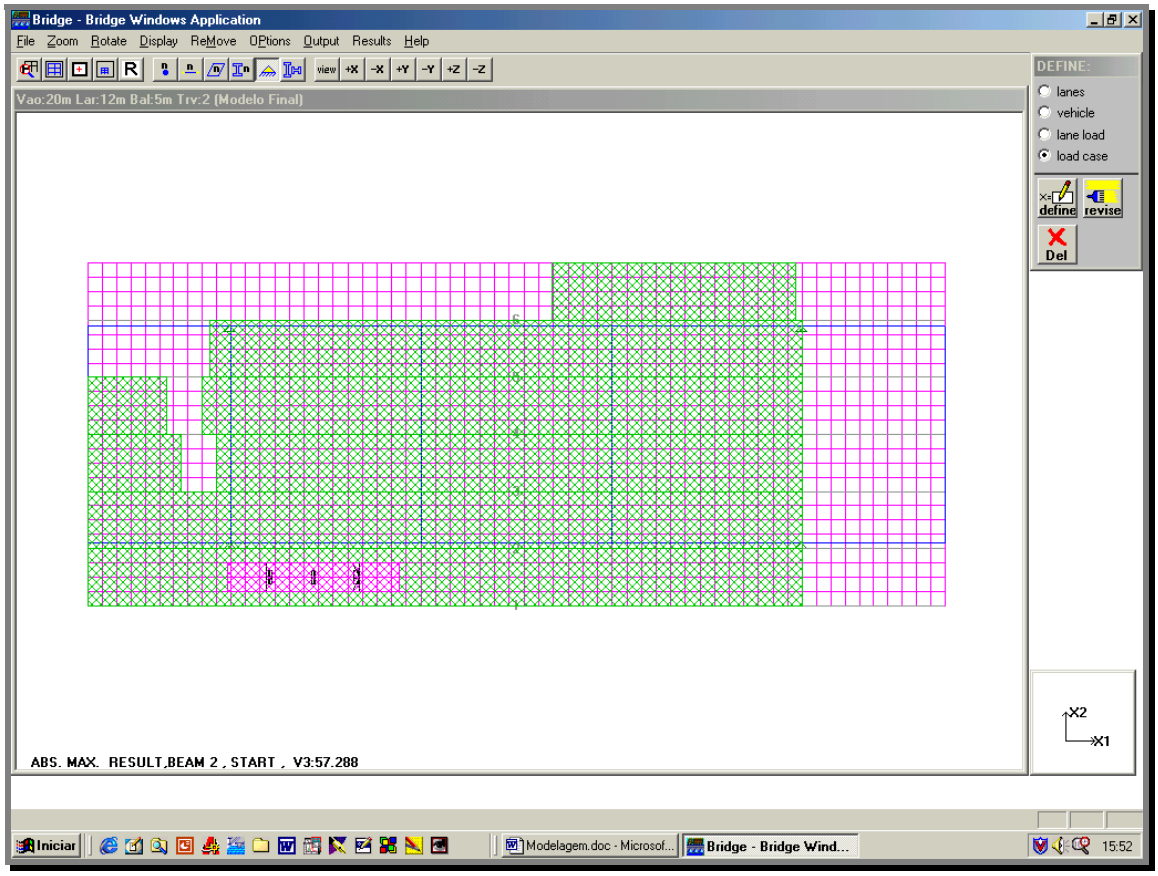


Figura 5.10 *– Carregamento crítico para força cortante nos apoios*

Para as demais pontes analisadas com o software STRAP, foram utilizados os mesmos comandos para a consideração do carregamento, lembrando-se que no módulo de pontes, são analisados os esforços apenas como resultado dos carregamentos dos veículos e de multidão. Para uma análise conjunta dos resultados obtidos dentro do módulo de pontes, com aqueles referentes às cargas permanentes, faz-se necessário transferir resultados do módulo de pontes para o ambiente geral do STRAP, e executar a superposição dos efeitos de cada caso.

5.2- ASPECTOS ADOTADOS PARA A MODELAGEM DAS PONTES

Os itens descritos a seguir objetivam informar as características e hipóteses adotadas para a modelagem das diversas pontes analisadas no presente trabalho, uma vez que os resultados obtidos por meio da utilização do software STRAP estão diretamente relacionados às considerações e simplificações referentes a essas hipóteses. No caso, foram modeladas pontes com seção transversal dos tipos ***de viga T, de laje e de seção celular.***

Para a pavimentação, foi considerado um carregamento uniformemente distribuído por unidade de área, de 0,24 tf/m^2, sobre os elementos de placa.

Não foram feitas considerações para a avaliação de ações horizontais (frenagem) e, por conseqüência, foram obtidos apenas esforços solicitantes provenientes das ações verticais.

5.2.1- Pontes de viga T

As pontes de viga T foram modeladas com vigas ortogonais, as longarinas e as transversinas, as quais constituíram o sistema estrutural denominado grelha. Tanto as longarinas como as transversinas foram discretizadas no modelo por meio de barras e, para ambas, foram adotadas seções transversais do tipo T, como ilustra a figura 5.11.

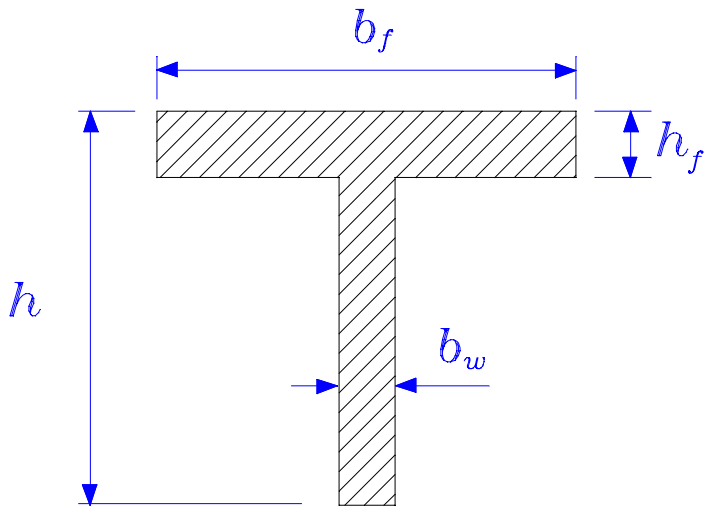


Figura 5.11 *– Esquema para seção transversal T*

Além dos elementos de barras, também foram utilizados elementos de superfície, no caso as placas, como já ilustrados nas figuras 5.1 e 5.2, e com ilustração em destaque na figura 5.12. Deve-se ressaltar que o acoplamento entre elementos de barra e de placa dá-se por um plano que contém os centros geométricos de ambos os elementos, ou seja, os CGs de ambos os elementos, barras e placas, estão contidos em um mesmo plano. Nesse caso, é possível admitir que a inércia dos elementos de placa praticamente não altera a inércia das vigas, o que foi possível constatar nos modelos analisados.

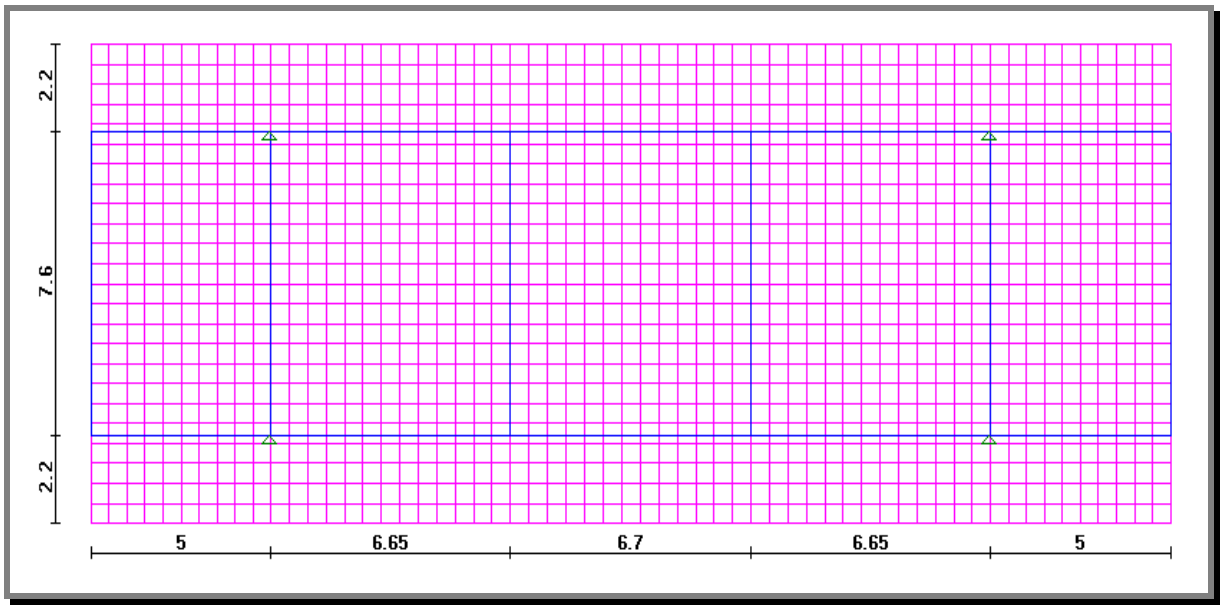


Figura 5.12 *– Elementos dos tipos barra e placa.*

No caso das longarinas, foram adotadas seções T com as dimensões b_w, h, e h_f, indicadas nas tabelas apresentadas na seção 4. Já a largura da mesa (b_f) foi adotada como sendo a largura de influência entre duas vigas paralelas. Por exemplo, para as longarinas da figura 5.2, foi admitida uma largura de influência b_f igual a 7,6/2 + 2,2 = 6,0 metros.

Para as transversinas adotou-se o mesmo procedimento para a determinação das dimensões da seção T das longarinas, com a ressalva de que para a altura h, foi suposta uma redução de 20% com relação à altura das longarinas, ou seja, $h_{transversinas} = 0{,}8\ h_{longarinas}$. Vale ressaltar que as transversinas foram consideradas nas regiões dos apoios, em posições intermediárias a esses mesmos apoios, bem como nas extremidades das longarinas, apenas para os casos de vigas com balanço.

Com relação aos carregamentos, além daqueles citados no módulo de pontes (veículo e multidão), foram também considerados o peso próprio da superestrutura e da pavimentação. Com relação ao peso próprio da superestrutura, foi considerado o peso próprio das longarinas (incluindo a mesa e a alma da seção T), sendo que por esse procedimento passa a ser considerado também o peso próprio da laje, que indiretamente constitui a mesa das vigas.

Para as transversinas, considerou-se apenas o peso próprio da alma, uma vez que as mesas das transversinas também estão indiretamente inseridas nas mesas das longarinas. A eventual consideração do peso próprio das mesas das transversinas ou da laje do tabuleiro implicaria num peso próprio superestimado.

5.2.2- Pontes de laje (maciças e vazadas)

As pontes de laje foram modeladas de modo análogo ao adotado para as pontes de viga T, à exceção das barras. A figura 5.13 ilustra uma das pontes de laje modelada.

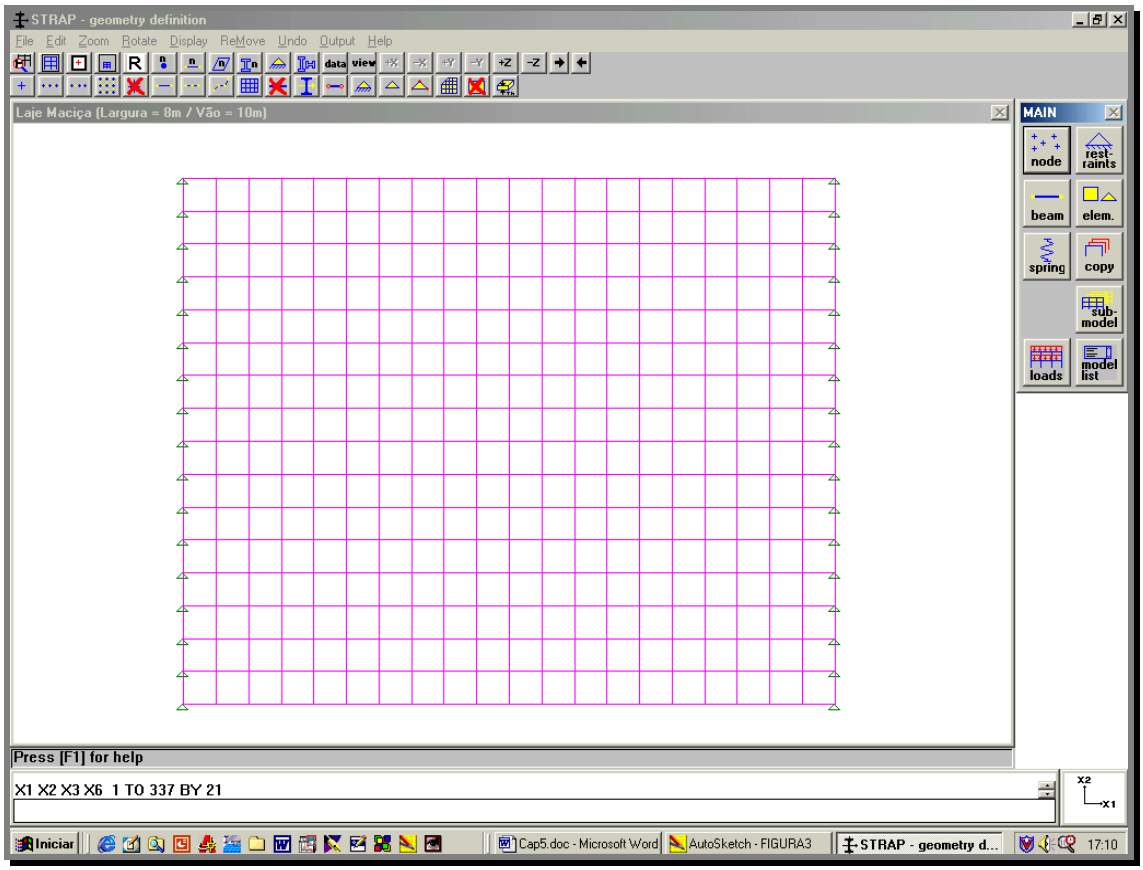


Figura 5.13 *– Ponte de laje (apenas elementos de placa).*

Portanto, para as pontes de laje, maciças ou vazadas, foram adotados apenas elementos de placa com apoios discretos ao longo das duas bordas apoiadas. Foram sempre adotadas seções maciças, mesmo quando essas possuíam seções transversais vazadas, para otimização de discretização e processamento (uma vez que esse procedimento não provoca distorções nos resultados), e com base nas seguintes considerações:

• *Pontes com vão de 10 metros*

A seção transversal considerada no modelo foi maciça com altura total de 0,60 m.

• *Pontes com vão de 20 metros*

A seção transversal considerada no modelo foi maciça com altura total de 1,20 m. Porém, neste caso, apenas a determinação do peso próprio foi feita com base em uma seção transversal maciça, com altura igual a 0,80 m. Vale ressaltar que a seção transversal equivalente objetiva garantir uma resposta similar àquela que seria obtida com a seção transversal vazada real, por meio de um procedimento simplificado de modelagem.

5.2.3- Pontes de seções transversais celulares

As pontes de seção celular foram modeladas com discretização em barras e elementos de placas, de maneira análoga àquela descrita para as pontes de viga T. No entanto, como algumas das pontes de seção celular eram compostas por mais de uma célula, algumas diferenças na modelagem foram consideradas.

• *Pontes de duas células: simplesmente apoiadas e contínuas.*

Tanto para as pontes simplesmente apoiadas como para as contínuas, no caso de duas células, adotou-se a discretização por meio de uma única barra e elementos de placa para o tabuleiro. A ligação entre viga e tabuleiro foi feita garantindo entre esses elementos rigidez à torção, além da flexão. Portanto, foram considerados vínculos para os efeitos verticais e torcionais entre ambos os elementos. Para garantir um comportamento correto de rigidez à torção, foram considerados vínculos de garfo nos apoios extremos das barras.

A consideração do peso próprio da superestrutura foi feita em relação apenas à barra longitudinal (longarina), uma vez que essa é responsável pela área, rigidez à flexão e à torção da seção transversal da ponte.

• *Pontes de 3 ou mais células: simplesmente apoiadas.*

Para as pontes simplesmente apoiadas, de três ou mais células, adotou-se a discretização por meio de barras e elementos de placa, para o tabuleiro. As barras foram dispostas nas direções longitudinal e transversal da ponte, caracterizando um sistema estrutural em grelha, análogo àquele utilizado para o caso de pontes de viga T, como ilustra a figura 5.14, com o objetivo de simular comportamentos equivalentes aos das seções celulares estudadas.

As longarinas foram locadas na posição das almas das células da seção original. Portanto, uma seção celular com ***n*** células passa a ser representada por uma seção transversal composta por ***n+1*** vigas longitudinais. Por exemplo, a ponte da figura 5.14 possui 4 células, resultando em 5 longarinas.

As propriedades das seções transversais das longarinas foram determinadas com base na largura de influência entre duas longarinas sucessivas e paralelas entre si, em analogia com o procedimento já mencionado para o caso de pontes de viga T.

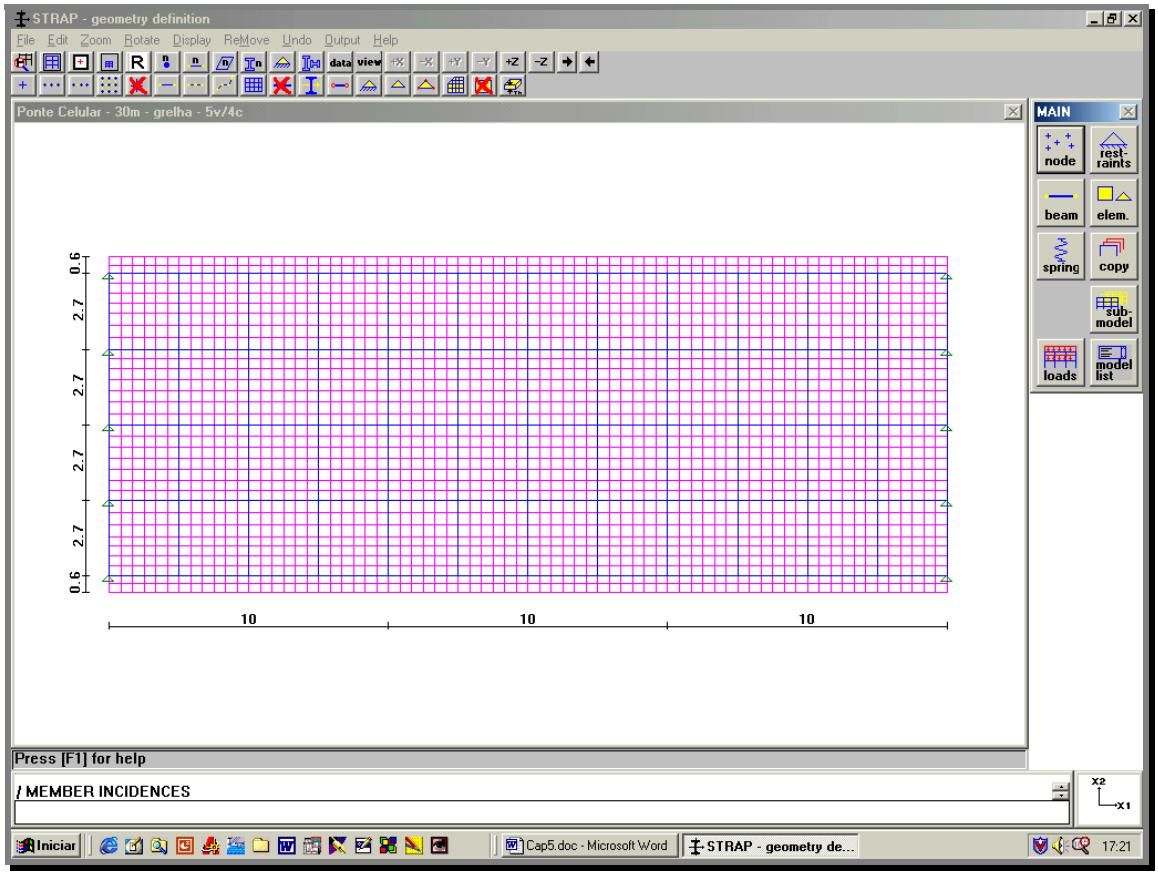


Figura 5.14 *– Ponte de seção celular com representação em grelha.*

Desse modo, no caso da figura 5.14, as seções das longarinas intermediárias resultaram em seções do tipo I, com largura de mesa de (2,7+2,7)/2 = 2,7 metros e altura de acordo com informações do Banco de Dados. Já as de extremidades resultaram com largura de mesa de (2,7/2) + 0,6 = 1,95 metros e altura também de acordo com informações do Banco de Dados.

No caso das transversinas, essas foram consideradas nas posições de ocorrências dos diafragmas existentes na ponte, em geral, nas extremidades e intermediários (por exemplo, a cada 10 metros como ilustra a figura 5.14), essas adicionadas de outras tantas barras paralelas a essas e locadas a cada ¼ da distância entre aquelas correspondentes às posições dos diafragmas. Por exemplo, a cada 2,50 metros como ilustra a figura 5.14.

As propriedades das seções transversais, assim como no caso das longarinas, foram também determinadas com base nas larguras de influência entre duas transversinas sucessivas, como mencionado para o caso de pontes de viga T.

Nesse caso, as transversinas que simulam os diafragmas de extremidades resultaram com seções transversais C, enquanto as transversinas que simulam os diafragmas intermediários resultaram com seções transversais I. Já as intermediárias às anteriores resultaram com seções transversais que levam em consideração apenas as lajes superior e inferior das células, ou seja, uma seção I desconsiderando-se a correspondente alma.

A figura 5.15 ilustra, com base em cores, as diferentes propriedades assumidas para cada barra da ponte (longarinas e transversinas), bem como os elementos de placa, representativos do tabuleiro.

A consideração do peso próprio da superestrutura foi feita em relação apenas às barras, longarina (mesa e alma) e transversinas (só alma), uma vez que elas são responsáveis pela área, rigidez à flexão e à torção, tanto longitudinais como transversais.

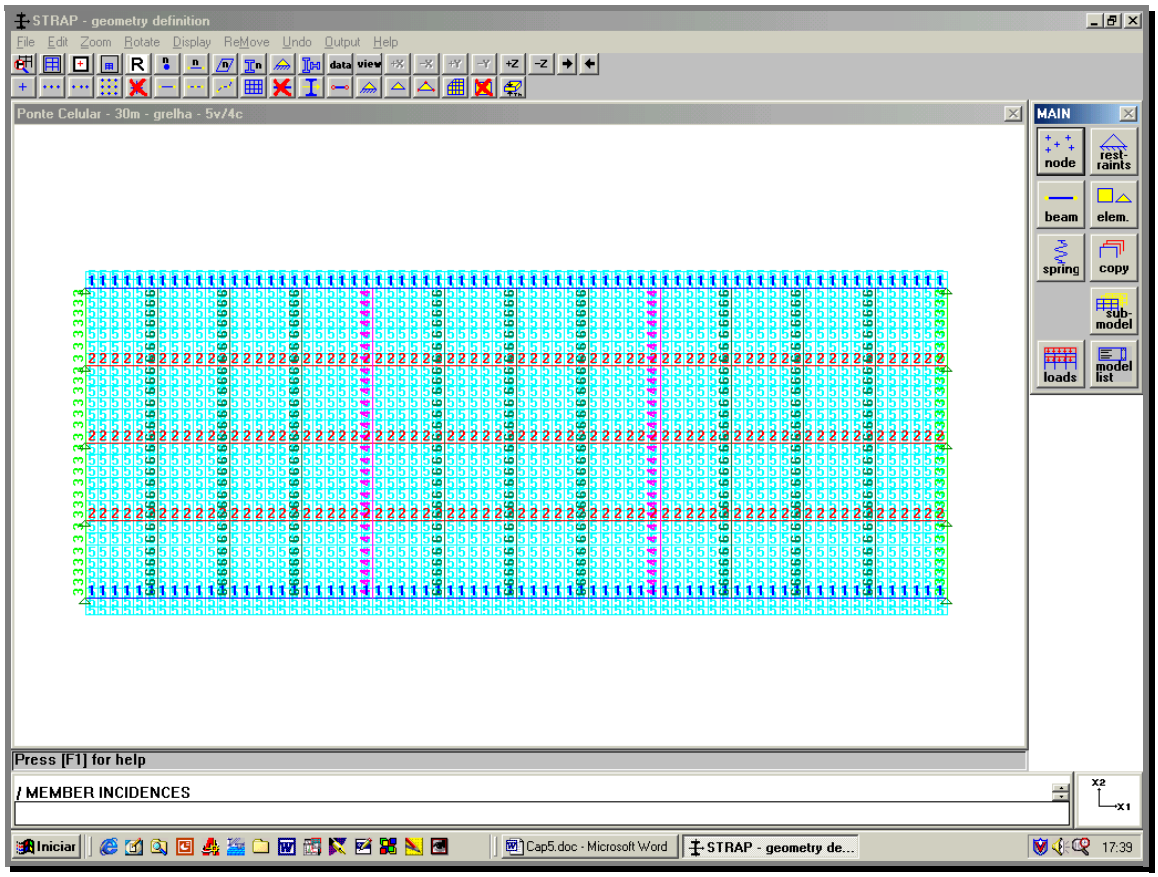


Figura 5.15 *– Propriedades para as barras (longarinas e transversinas) e tabuleiro.*

6- COMPARAÇÃO ENTRE ESFORÇOS SOLICITANTES

Os esforços obtidos da análise estrutural das obras de arte estão apresentados na forma de gráficos de colunas, tomando-se como referência para todos os casos analisados (quadro 6.1) a carga móvel das classes 24 e 36 (norma antiga) e classe 45 (norma atual). Portanto, são apresentados valores relativos entre os esforços provenientes da carga móvel CVC e carga móvel normativa. Complementando a análise, são também apresentados gráficos com valores relativos dos efeitos da carga móvel CVC em relação aos efeitos do carregamento total (carga permanente mais carga móvel).

Em todos os casos, as relações apresentadas nos gráficos referem-se aos esforços solicitantes determinados para as seções indicadas no quadro 6.2. Para seção transversal em cinco vigas, os esforços foram determinados para todas as vigas (extremidade, interna e central) e são apresentados nos gráficos apenas os valores relativos máximos para cada caso.

Os gráficos estão agrupados em seis partes (A a F), em função do sistema estrutural transversal, e numerados conforme indicado nos quadros 6.3 a 6.8.

Quadro 6.1 – Resumo dos casos analisados

		LAJE				VIGA (seção T)				CELULAR			
		maciça		vazada		2 vigas		5 vigas [1]		2 células		≥ 3 células	
		TE	TL	TE	TL	TE	TL	TE	TL	TE	TL	TE	TL
SA	10m	■	■			■	■	■	■				
	20m			■	■	■	■	■	■		■		
	30m							■	■		■		■
	40m							■	■		■		
SAB [2]	10m					■	■						
	20m					■	■						
	30m					■	■						
	40m					■	■						
C2	10m												
	20m												
	30m						■						
	40m												
C3	10m	■	■										
	20m			■	■	■	■						
	30m					■	■		■		■		
	40m					■	■						
C3B [3]	10m												
	25m [4]					■	■						
	30m [5]					■	■	■	■				
	40m												

Legenda:

SA: simplesmente apoiada
SAB: simplesmente apoiada com balanços
C2: contínua com dois tramos iguais
C3: contínua com três tramos iguais
C3B: contínua com três tramos desiguais e balanços
TE: tabuleiro estreito
TL: tabuleiro largo

Notas:

[1] com e sem transversinas para vigas simplesmente apoiadas (SA)
[2] balanços de 3m para vão de 10m; 5m para vãos de 20m e 30m e 7m para vão de 40m
[3] balanços de 5m para todos os casos
[4] refere-se ao tramo central (tramos de extremidade com vão de 20m)
[5] refere-se ao tramo central (tramos de extremidade com vão de 25m)

Quadro 6.2 – Esforços solicitantes considerados na análise

	LAJE	VIGA [1)]	CELULAR
SA	Momento fletor a meio vão: centro e borda Cortante no apoio: centro e borda	Momento fletor a meio vão Cortante no apoio	Momento fletor a meio vão Momento de torção no apoio Cortante no apoio
SAB	-	Momento fletor a meio vão Momento fletor no apoio Cortante no apoio	-
C2	-	Momento fletor a meio vão Momento fletor no apoio interno Cortante no apoio	-
C3	Momento fletor a meio vão: tramo de extremidade e tramo interno (centro e borda) Momento fletor no apoio interno (centro e borda) Cortante no apoio interno (centro e borda)	Momento fletor a meio vão: tramos de extremidade e interno Momento fletor no apoio interno Cortante no apoio interno	Momento fletor a meio vão: tramo de extremidade e interno Momento fletor no apoio interno Momento de torção nos apoios de extremidade e interno Cortante no apoio interno
C3B	-	Momento fletor a meio vão: tramos de extremidade e interno Momento fletor no apoio interno Cortante no apoio interno	-

[1)] Para seção transversal em cinco vigas, os esforços indicados foram determinados para as vigas de extremidade, interna e central.

Legenda:

SA: simplesmente apoiada
SAB: simplesmente apoiada com balanços
C2: contínua com dois tramos iguais
C3: contínua com três tramos iguais
C3B: contínua com três tramos desiguais e balanços

PARTE A
SISTEMA TRANSVERSAL: LAJE

Quadro 6.3 – Sumário dos gráficos para sistema transversal em laje

	SA		SAB		C2		C3		C3B	
	TE	TL	TE	TL	TE	TL	TE	TL	TE	TL
Momento positivo										
M_{CVC} / M_{24}	A1	A2	-	-	-	-	A17	A18	-	-
M_{CVC} / M_{36}	A3	A4	-	-	-	-	A19	A20	-	-
M_{CVC} / M_{45}	A5	A6	-	-	-	-	A21	A22	-	-
ϕM_{CVC} / M_{total}	A7	A8	-	-	-	-	A23	A24	-	-
Momento negativo										
M_{CVC} / M_{24}	-	-	-	-	-	-	A25	A26	-	-
M_{CVC} / M_{36}	-	-	-	-	-	-	A27	A28	-	-
M_{CVC} / M_{45}	-	-	-	-	-	-	A29	A30	-	-
ϕM_{CVC} / M_{total}	-	-	-	-	-	-	A31	A32	-	-
Força cortante										
V_{CVC} / V_{24}	A9	A10	-	-	-	-	A33	A34	-	-
V_{CVC} / V_{36}	A11	A12	-	-	-	-	A35	A36	-	-
V_{CVC} / V_{45}	A13	A14	-	-	-	-	A37	A38	-	-
ϕV_{CVC} / V_{total}	A15	A16	-	-	-	-	A39	A40	-	-

Legenda:

SA: simplesmente apoiada
SAB: simplesmente apoiada com balanços
C2: contínua com dois tramos iguais
C3: contínua com três tramos iguais
C3B: contínua com três tramos desiguais e balanços
TE: tabuleiro estreito
TL: tabuleiro largo
M_{CVC}: momento fletor proveniente do trem-tipo referente ao CVC
M_{24}: momento fletor proveniente do trem-tipo normativo da classe 24 (norma antiga)
M_{36}: momento fletor proveniente do trem-tipo normativo da classe 36 (norma antiga)
M_{45}: momento fletor proveniente do trem-tipo normativo da classe 45 (norma atual – NBR 7188/84)
V_{CVC}: força cortante proveniente do trem-tipo referente ao CVC
V_{24}: força cortante proveniente do trem-tipo normativo da classe 24 (norma antiga)
V_{36}: força cortante proveniente do trem-tipo normativo da classe 36 (norma antiga)
V_{45}: força cortante proveniente do trem-tipo normativo da classe 45 (norma atual – NBR 7188/84)
$M_{total} = M_{perm.} + \phi M_{CVC}$
$V_{total} = V_{perm.} + \phi V_{CVC}$
ϕ = coeficiente de impacto

PARTE B

SISTEMA TRANSVERSAL: DUAS VIGAS (seção T)

Quadro 6.4 – Sumário dos gráficos para sistema transversal em duas vigas

	SA		SAB		C2		C3		C3B	
	TE	TL	TE	TL	TE	TL	TE	TL	TE	TL
Momento positivo										
M_{CVC} / M_{24}	B1	B2	B17	B18	-	B41	B53	B54	B77	B78
M_{CVC} / M_{36}	B3	B4	B19	B20	-	B42	B55	B56	B79	B80
M_{CVC} / M_{45}	B5	B6	B21	B22	-	B43	B57	B58	B81	B82
$\phi M_{CVC} / M_{total}$	B7	B8	B23	B24	-	B44	B59	B60	B83	B84
Momento negativo										
M_{CVC} / M_{24}	-	-	B25	B26	-	B45	B61	B62	B85	B86
M_{CVC} / M_{36}	-	-	B27	B28	-	B46	B63	B64	B87	B88
M_{CVC} / M_{45}	-	-	B29	B30	-	B47	B65	B66	B89	B90
$\phi M_{CVC} / M_{total}$	-	-	B31	B32	-	B48	B67	B68	B91	B92
Força cortante										
V_{CVC} / V_{24}	B9	B10	B33	B34	-	B49	B69	B70	B93	B94
V_{CVC} / V_{36}	B11	B12	B35	B36	-	B50	B71	B72	B95	B96
V_{CVC} / V_{45}	B13	B14	B37	B38	-	B51	B73	B74	B97	B98
$\phi V_{CVC} / V_{total}$	B15	B16	B39	B40	-	B52	B75	B76	B99	B100

Legenda:

SA: simplesmente apoiada
SAB: simplesmente apoiada com balanços
C2: contínua com dois tramos iguais
C3: contínua com três tramos iguais
C3B: contínua com três tramos desiguais e balanços
TE: tabuleiro estreito
TL: tabuleiro largo
M_{CVC}: momento fletor proveniente do trem-tipo referente ao CVC
M_{24}: momento fletor proveniente do trem-tipo normativo da classe 24 (norma antiga)
M_{36}: momento fletor proveniente do trem-tipo normativo da classe 36 (norma antiga)
M_{45}: momento fletor proveniente do trem-tipo normativo da classe 45 (norma atual – NBR 7188/84)
V_{CVC}: força cortante proveniente do trem-tipo referente ao CVC
V_{24}: força cortante proveniente do trem-tipo normativo da classe 24 (norma antiga)
V_{36}: força cortante proveniente do trem-tipo normativo da classe 36 (norma antiga)
V_{45}: força cortante proveniente do trem-tipo normativo da classe 45 (norma atual – NBR 7188/84)
$M_{total} = M_{perm.} + \phi M_{CVC}$
$V_{total} = V_{perm.} + \phi V_{CVC}$
ϕ = coeficiente de impacto

PARTE C

SISTEMA TRANSVERSAL: CINCO VIGAS COM TRANSVERSINAS

Quadro 6.5 – Sumário dos gráficos para sistema transversal em cinco vigas com transversinas

	SA		SAB		C2		C3		C3B	
	TE	TL	TE	TL	TE	TL	TE	TL	TE	TL
Momento positivo										
M_{CVC} / M_{24}	C1	C2	-	-	-	-	-	C17	C29	C30
M_{CVC} / M_{36}	C3	C4	-	-	-	-	-	C18	C31	C32
M_{CVC} / M_{45}	C5	C6	-	-	-	-	-	C19	C33	C34
$\phi M_{CVC} / M_{total}$	C7	C8	-	-	-	-	-	C20	C35	C36
Momento negativo										
M_{CVC} / M_{24}	-	-	-	-	-	-	-	C21	C37	C38
M_{CVC} / M_{36}	-	-	-	-	-	-	-	C22	C39	C40
M_{CVC} / M_{45}	-	-	-	-	-	-	-	C23	C41	C42
$\phi M_{CVC} / M_{total}$	-	-	-	-	-	-	-	C24	C43	C44
Força cortante										
V_{CVC} / V_{24}	C9	C10	-	-	-	-	-	C25	C45	C46
V_{CVC} / V_{36}	C11	C12	-	-	-	-	-	C26	C47	C48
V_{CVC} / V_{45}	C13	C14	-	-	-	-	-	C27	C49	C50
$\phi V_{CVC} / V_{total}$	C15	C16	-	-	-	-	-	C28	C51	C52

Legenda:

SA: simplesmente apoiada
SAB: simplesmente apoiada com balanços
C2: contínua com dois tramos iguais
C3: contínua com três tramos iguais
C3B: contínua com três tramos desiguais e balanços
TE: tabuleiro estreito
TL: tabuleiro largo
M_{CVC}: momento fletor proveniente do trem-tipo referente ao CVC
M_{24}: momento fletor proveniente do trem-tipo normativo da classe 24 (norma antiga)
M_{36}: momento fletor proveniente do trem-tipo normativo da classe 36 (norma antiga)
M_{45}: momento fletor proveniente do trem-tipo normativo da classe 45 (norma atual – NBR 7188/84)
V_{CVC}: força cortante proveniente do trem-tipo referente ao CVC
V_{24}: força cortante proveniente do trem-tipo normativo da classe 24 (norma antiga)
V_{36}: força cortante proveniente do trem-tipo normativo da classe 36 (norma antiga)
V_{45}: força cortante proveniente do trem-tipo normativo da classe 45 (norma atual – NBR 7188/84)
$M_{total} = M_{perm.} + \phi M_{CVC}$
$V_{total} = V_{perm.} + \phi V_{CVC}$
ϕ = coeficiente de impacto

PARTE D

SISTEMA TRANSVERSAL: CINCO VIGAS SEM TRANSVERSINAS

Quadro 6.6 – Sumário dos gráficos para sistema transversal em cinco vigas sem transversinas

	SA		SAB		C2		C3		C3B	
	TE	TL	TE	TL	TE	TL	TE	TL	TE	TL
Momento positivo										
M_{CVC} / M_{24}	D1	D2	-	-	-	-	-	-	-	-
M_{CVC} / M_{36}	D3	D4	-	-	-	-	-	-	-	-
M_{CVC} / M_{45}	D5	D6	-	-	-	-	-	-	-	-
$\phi M_{CVC} / M_{total}$	D7	D8	-	-	-	-	-	-	-	-
Momento negativo										
M_{CVC} / M_{24}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
M_{CVC} / M_{36}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
M_{CVC} / M_{45}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$\phi M_{CVC} / M_{total}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Força cortante										
V_{CVC} / V_{24}	D9	D10	-	-	-	-	-	-	-	-
V_{CVC} / V_{36}	D11	D12	-	-	-	-	-	-	-	-
V_{CVC} / V_{45}	D13	D14	-	-	-	-	-	-	-	-
$\phi V_{CVC} / V_{total}$	D15	D16	-	-	-	-	-	-	-	-

Legenda:

SA: simplesmente apoiada
SAB: simplesmente apoiada com balanços
C2: contínua com dois tramos iguais
C3: contínua com três tramos iguais
C3B: contínua com três tramos desiguais e balanços
TE: tabuleiro estreito
TL: tabuleiro largo
M_{CVC}: momento fletor proveniente do trem-tipo referente ao CVC
M_{24}: momento fletor proveniente do trem-tipo normativo da classe 24 (norma antiga)
M_{36}: momento fletor proveniente do trem-tipo normativo da classe 36 (norma antiga)
M_{45}: momento fletor proveniente do trem-tipo normativo da classe 45 (norma atual – NBR 7188/84)
V_{CVC}: força cortante proveniente do trem-tipo referente ao CVC
V_{24}: força cortante proveniente do trem-tipo normativo da classe 24 (norma antiga)
V_{36}: força cortante proveniente do trem-tipo normativo da classe 36 (norma antiga)
V_{45}: força cortante proveniente do trem-tipo normativo da classe 45 (norma atual – NBR 7188/84)
$M_{total} = M_{perm.} + \phi M_{CVC}$
$V_{total} = V_{perm.} + \phi V_{CVC}$
ϕ = coeficiente de impacto

PARTE E

SISTEMA TRANSVERSAL: SEÇÃO CELULAR (DUAS CÉLULAS)

Quadro 6.7 – Sumário dos gráficos para sistema transversal em seção celular (duas células)

	SA		SAB		C2		C3		C3B	
	TE	TL	TE	TL	TE	TL	TE	TL	TE	TL
Momento fletor										
M_{CVC} / M_{24}	-	E1	-	-	-	-	-	E13	-	-
M_{CVC} / M_{36}	-	E2	-	-	-	-	-	E14	-	-
M_{CVC} / M_{45}	-	E3	-	-	-	-	-	E15	-	-
$\phi M_{CVC} / M_{total}$	-	E4	-	-	-	-	-	E16	-	-
Momento de torção										
M_{CVC} / M_{24}	-	E5	-	-	-	-	-	E17	-	-
M_{CVC} / M_{36}	-	E6	-	-	-	-	-	E18	-	-
M_{CVC} / M_{45}	-	E7	-	-	-	-	-	E19	-	-
$\phi M_{CVC} / M_{total}$	-	E8	-	-	-	-	-	E20	-	-
Força cortante										
V_{CVC} / V_{24}	-	E9	-	-	-	-	-	E21	-	-
V_{CVC} / V_{36}	-	E10	-	-	-	-	-	E22	-	-
V_{CVC} / V_{45}	-	E11	-	-	-	-	-	E23	-	-
$\phi V_{CVC} / V_{total}$	-	E12	-	-	-	-	-	E24	-	-

Legenda:

SA: simplesmente apoiada
SAB: simplesmente apoiada com balanços
C2: contínua com dois tramos iguais
C3: contínua com três tramos iguais
C3B: contínua com três tramos desiguais e balanços
TE: tabuleiro estreito
TL: tabuleiro largo
M_{CVC}: momento proveniente do trem-tipo referente ao CVC
M_{24}: momento proveniente do trem-tipo normativo da classe 24 (norma antiga)
M_{36}: momento proveniente do trem-tipo normativo da classe 36 (norma antiga)
M_{45}: momento proveniente do trem-tipo normativo da classe 45 (norma atual – NBR 7188/84)
V_{CVC}: força cortante proveniente do trem-tipo referente ao CVC
V_{24}: força cortante proveniente do trem-tipo normativo da classe 24 (norma antiga)
V_{36}: força cortante proveniente do trem-tipo normativo da classe 36 (norma antiga)
V_{45}: força cortante proveniente do trem-tipo normativo da classe 45 (norma atual – NBR 7188/84)
$M_{total} = M_{perm.} + \phi M_{CVC}$
$V_{total} = V_{perm.} + \phi V_{CVC}$
ϕ = coeficiente de impacto

PARTE F

SISTEMA TRANSVERSAL: SEÇÃO CELULAR (≥ 3 CÉLULAS)

Quadro 6.8 – Sumário dos gráficos para sistema transversal em seção celular (≥ 3 células)

	SA		SAB		C2		C3		C3B	
	TE	TL	TE	TL	TE	TL	TE	TL	TE	TL
Momento fletor										
M_{CVC} / M_{24}	-	F1	-	-	-	-	-	-	-	-
M_{CVC} / M_{36}	-	F2	-	-	-	-	-	-	-	-
M_{CVC} / M_{45}	-	F3	-	-	-	-	-	-	-	-
$\phi M_{CVC} / M_{total}$	-	F4	-	-	-	-	-	-	-	-
Momento de torção										
M_{CVC} / M_{24}	-	F5	-	-	-	-	-	-	-	-
M_{CVC} / M_{36}	-	F6	-	-	-	-	-	-	-	-
M_{CVC} / M_{45}	-	F7	-	-	-	-	-	-	-	-
$\phi M_{CVC} / M_{total}$	-	F8	-	-	-	-	-	-	-	-
Força cortante										
V_{CVC} / V_{24}	-	F9	-	-	-	-	-	-	-	-
V_{CVC} / V_{36}	-	F10	-	-	-	-	-	-	-	-
V_{CVC} / V_{45}	-	F11	-	-	-	-	-	-	-	-
$\phi V_{CVC} / V_{total}$	-	F12	-	-	-	-	-	-	-	-

Legenda:

SA: simplesmente apoiada
SAB: simplesmente apoiada com balanços
C2: contínua com dois tramos iguais
C3: contínua com três tramos iguais
C3B: contínua com três tramos desiguais e balanços
TE: tabuleiro estreito
TL: tabuleiro largo
M_{CVC}: momento proveniente do trem-tipo referente ao CVC
M_{24}: momento proveniente do trem-tipo normativo da classe 24 (norma antiga)
M_{36}: momento proveniente do trem-tipo normativo da classe 36 (norma antiga)
M_{45}: momento proveniente do trem-tipo normativo da classe 45 (norma atual – NBR 7188/84)
V_{CVC}: força cortante proveniente do trem-tipo referente ao CVC
V_{24}: força cortante proveniente do trem-tipo normativo da classe 24 (norma antiga)
V_{36}: força cortante proveniente do trem-tipo normativo da classe 36 (norma antiga)
V_{45}: força cortante proveniente do trem-tipo normativo da classe 45 (norma atual – NBR 7188/84)
$M_{total} = M_{perm.} + \phi M_{CVC}$
$V_{total} = V_{perm.} + \phi V_{CVC}$
ϕ = coeficiente de impacto

7- RECOMENDAÇÕES PARA TOMADA DE DECISÃO

Com base nos resultados obtidos pela análise estrutural dos casos representativos das pontes (seção 6 e anexo 3), podem ser registradas as seguintes constatações:

- sistematicamente, para todos os tipos de sistemas estruturais, as solicitações produzidas pelas CVCs analisadas ultrapassam significativamente as solicitações produzidas pela classe 24;

- as solicitações produzidas pela CVC RT74/20 ultrapassam consideravelmente as da classe 36 em várias situações, atingindo diferenças da ordem de 30%;

- ainda para a classe 36, observa-se que as solicitações produzidas pelas CVCs RT74/25 e BT74/25 ultrapassam em menor grau os valores normativos, tanto em ocorrências como em intensidade;

- para a maioria dos casos analisados, o veículo BB48/14 apresentou-se mais crítico que as CVCs RT74/25 e BT74/25;

- as pontes da classe 45 mostraram-se adequadas para as CVCs analisadas, exceto para a CVC RT74/20 que, em alguns casos, apresentaram solicitações ligeiramente superiores às normativas, com diferenças da ordem 10%.

Analisando os resultados pode-se concluir que as pontes classe 24 não comportam o tráfego das CVCs incluídas neste estudo, conclusão que pode também ser estendida para as pontes classe 30 da norma atual.

Comparando-se o efeito da carga móvel, conclui-se que a CVC RT74/20 acarreta solicitações ligeiramente superiores às da classe 45 em alguns casos, porém consideravelmente superiores às da classe 36 para a maioria dos casos, demonstrando a incompatibilidade dessa CVC com as pontes classe 36.

As solicitações das CVCs RT74/25 e BT74/25 resultam inferiores às da classe 45 e pouco superiores às da classe 36, exceto para as pontes de seção celular onde a diferença atinge 35%. Entretanto, tal diferença é reduzida para no máximo 10% quando a análise é estendida para a totalidade das ações (permanente + carga móvel), valor aceitável pois corresponde a uma pequena quantidade de pontes projetadas entre 1978 (publicação da NBR 6118) e 1984 (publicação da NBR 7188), período em que houve alteração no método de introdução da segurança no projeto de obras de concreto armado e nas classes das pontes rodoviárias, respectivamente.

Pelos resultados da análise comparativa dos efeitos da carga móvel das CVC em relação à carga móvel normativa e com a discussão anterior, recomenda-se que:

(a) **não seja permitido o tráfego das CVCs pelas pontes classe 24 (da norma antiga) e classe 30 (da norma atual);**

(b) **a CVC RT74/20 receba autorização para trafegar apenas nas rodovias com pontes classe 45 e vão inferior a 25m, não permitindo seu tráfego nas rodovias com pontes classe 36 e 24 (da norma antiga), classe 30 (da norma atual) e nas rodovias com pontes de laje contínua de qualquer classe e vão;**

(c) **as CVCs RT74/25 e BT74/25 recebam autorização para trafegar somente nas rodovias com pontes classe 36 e 45.**

Com relação às verificações de situações específicas, para os veículos analisados neste

trabalho, pode-se fazer uma primeira avaliação com os gráficos do anexo 3. No entanto, em situações em que houver necessidade de uma melhor definição, recomendam-se os seguintes níveis de verificação:

- análise comparativa de solicitações, como foi realizada neste estudo, complementada com inspeção, de acordo com a norma NBR 9452 – Vistorias de pontes e viadutos de concreto (1986);

- comparação entre os esforços solicitantes e os respectivos esforços resistentes obtidos do projeto, complementada com inspeção para avaliação do estado geral da ponte;

- avaliação mediante prova de carga.

Finalizando, cabe o alerta sobre os seguintes pontos:

- a análise realizada nesse trabalho tem por hipótese básica que as pontes não apresentam patologias que possam comprometer sua integridade estrutural. Entretanto, a passagem de veículos pesados (simples ou combinados) com maior freqüência e/ou com excesso de peso sobre as pontes tenderá a acelerar a deterioração dos elementos estruturais, portanto a necessidade de inspeção nas pontes e o efetivo controle do peso dos veículos são fatores fundamentais para preservar a integridade estrutural das pontes;

- o estudo realizado contemplou apenas o efeito das ações verticais das cargas móveis, como é usual na análise de veículos especiais sobre as pontes. No entanto, merece destacar que o tráfego normal de veículos pode acarretar ações horizontais, como a força de frenagem. A força de frenagem é normalmente avaliada como uma fração do peso do veículo de referência. Desta forma, a força de frenagem produzida pelas CVCs tende a ser maior que a produzida pelos veículos normativos. Esta força produz efeitos importantes apenas nos aparelhos de apoio e na infraestrutura das pontes. Normalmente, as pontes apresentam capacidade de absorver excessos de forças desse tipo, mediante reservas de resistência ou caminhos alternativos de força, como a mobilização de empuxos passivos em pontes com sistema estrutural com balanços e cortinas. Entretanto, a mobilização desses caminhos alternativos faz que os aparelhos de apoios e os pilares funcionem de forma não prevista no projeto. Este aspecto reforça ainda mais o alerta do item anterior sobre a necessidade de inspeção nas pontes, incluindo não só a superestrutura, como também os aparelhos de apoio e a infraestrutura.

- o veículo BB48/14, considerado na presente análise com peso bruto total correspondente à somatória das cargas máximas permitidas por eixo (PBT = 48,5t), mostrou-se mais desfavorável que as CVCs RT74/25 e BT74/25 na maioria dos casos analisados e até mesmo mais desfavorável que a CVC RT 74/20 em alguns casos, demonstrando que o peso bruto total desse tipo de veículo deve ser limitado em 45t, valor estabelecido pela Resolução 12/98 do CONTRAN;

- o banco de dados empregado nesse trabalho, elaborado com base em informações disponibilizadas pelo DER-SP, não abrangeu a totalidade das pontes da malha viária. Portanto não constitui um conjunto completo de informações para uso em análises específicas de uma determinada rodovia ou trecho.

São Carlos, 29 de junho de 2001.

Mounir Khalil El Debs **Maximiliano Malite**