



SE-
F/02/
02/02/02

XXX JORNADAS SUL-AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL

27 a 31 de Maio de 2002

Brasília, DF, Brasil

ANAIS COM OS ARTIGOS COMPLETOS

Editores: Guilherme Sales S. de A. Melo
Luciano Mendes Bezerra

Programa de Pós Graduação em Estruturas e Construção Civil
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental
Universidade de Brasília – UnB

Associação Sulamericana de Engenharia Estrutural



27 a 31 de Maio de 2002 – Universidade de Brasília – UnB
Brasília, DF – Brasil

Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural

UM ESTUDO DAS CONSEQUÊNCIAS DO TRÁFEGO DE COMBINAÇÕES DE VEÍCULOS DE CARGA SOBRE AS PONTES DA REDE VIÁRIA DO DER-SP

Mounir Khalil El Debs (1)

D288e

Maximiliano Malite (1)

Toshiaki Takeya (1)

Jorge Munaiar Neto (1)

João Bento de Hanai (1)

Paulo Eduardo de Oliveira (2)

- (1) Docentes do Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo
- (2) Engenheiro Civil do Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo

RESUMO

O trabalho apresenta um estudo das consequências do tráfego de Combinações de Veículos de Carga (CVC) regulamentadas pelo novo Código de Trânsito e Resolução 68/98, do CONTRAN, sobre as pontes da rede viária do DER. O procedimento utilizado no estudo é baseado em comparações teóricas entre os máximos esforços solicitantes provenientes dos trens-tipo normativos empregados no projeto estrutural das pontes, com os máximos esforços gerados pelas CVCs. Foram empregadas as cargas previstas para classes 24 e 36 da NB-6/60 e classe 45 da NBR-7188/84. Foram utilizadas 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). As comparações dos esforços solicitantes foram feitas para casos representativos escolhidos com base em um levantamento de cerca de 1200 obras da rede viária do DER. As principais conclusões do estudo foram: a) sistematicamente, para todos os tipos de sistemas estruturais, as solicitações produzidas pelas CVCs analisadas ultrapassam significativamente as solicitações produzidas pela classe 24; b) as CVCs RT 74/25 e BT 74/25 são compatíveis com os carregamentos das classes 36 e 45 e c) a CVC RT 74/20 mostrou-se incompatível com as classe 36 e 45, sendo que os esforços produzidos só são menores que os produzidos pelas cargas normativas para pontes de pequenos vãos.

SYSNO	1262022
PROD	002251
ACERVO EESC	



1. INTRODUÇÃO

Este trabalho 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 pontes (obras de arte especiais) da rede viária do DER-SP.

As CVCs correspondem a composições de uma unidade tratora com mais de uma unidade rebocada. Estas CVCs atingem peso bruto total combinado (PBTC) de 74t, bem superior ao limite de peso bruto total de 45t, indicado pela “lei da balança” (resolução 12/98 do CONTRAN).

Este estudo foi objeto de um contrato de prestação de serviços entre o Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos e o Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo - DER-SP, realizado no período de outubro de 2000 a junho de 2001.

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

O objetivo deste artigo é apresentar uma visão geral do trabalho realizado e uma síntese dos principais resultados obtidos, que foram apresentados no relatório referente ao citado contrato de prestação de serviço [1].

2. DEFINIÇÃO DOS CARREGAMENTOS

Apresenta-se aqui uma discussão e definição dos trens-tipo normativos e quais CVCs a serem consideradas no estudo.

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, que versam sobre as cargas móveis 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 [2] (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 CVCs previstas na resolução do CONTRAN são inúmeras, de forma que não seria exequível varrer todas elas.

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. Embora o limite de peso do caminhão basculante, de acordo com a “lei da Balança”, seja de 45t, foi considerada a possibilidade de todos os eixos estarem com a carga máxima, o que implica no valor de 48,5t para o peso total do veículo. De acordo com informações de especialistas, esta possibilidade existe devido a liminares obtidas por transportadoras, com base nas cargas limites por eixos.

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)

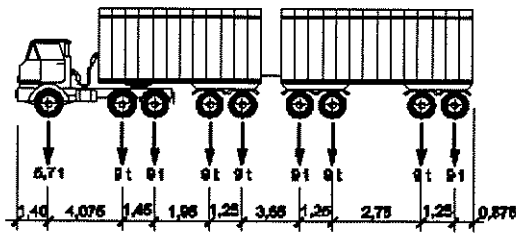
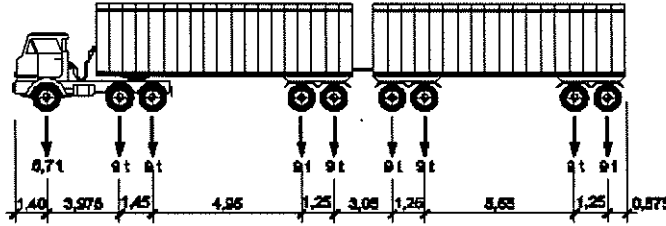
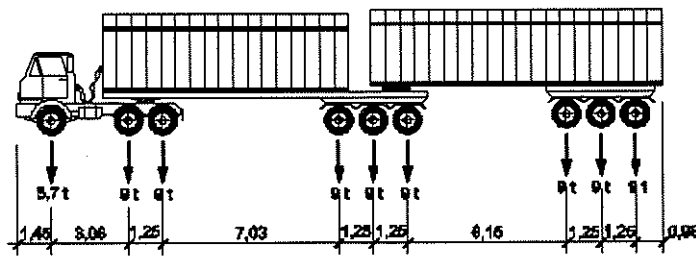
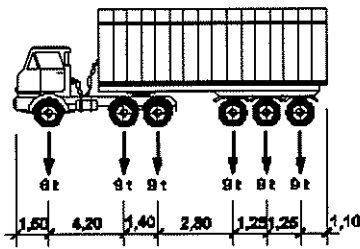
Na definição das cargas das CVCs e caminhão basculante foi considerada ainda a tolerância de 5% no peso total prevista na resolução 104, de 21/12/1999, do CONTRAN. Assim, as CVCs de 74t passaram para 77,7t e o caminhão basculante de 48,5t passou para 51t. As configurações das CVCs e do caminhão basculante utilizadas na análise são apresentadas na Tabela 1.

O carregamento considerado no estudo foi constituído por uma CVC, ou um caminhão basculante, e carga uniformemente distribuída de $0,5 \text{ t/m}^2$ 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.



Tabela 1 Pesos e dimensões dos veículos considerados na análise

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



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 feita 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 (combinações últimas excepcionais).

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, NBR-7187 [3], para considerar o efeito dinâmico das CVCs.

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 [4], não é explícita neste aspecto e a própria norma de ações e segurança nas estruturas NBR-8681, de 1984 [5], 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 desse 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 com os obtidos com as CVCs foi feita sem a inclusão dos coeficientes de segurança. No entanto, na análise de casos críticos foram feitas ponderações com relação a esses coeficientes de segurança.

3. DEFINIÇÃO DOS CASOS ANALISADOS

A definição dos casos analisados foi feita com base em um levantamento do universo das pontes da rede viária sob jurisdição do DER, 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.

O levantamento foi feito com base na documentação técnica fornecida pelo DER-SP, constituída de arquivos com a digitalização das pranchas de desenhos dos projetos das pontes. O resultado final da análise foi a identificação e o cadastramento de aproximadamente 2300 pontes, sendo que em aproximadamente 1200 obras os dados cadastrados estão completos. Estima-se que este número de obras com dados completos corresponde a cerca de 20% das pontes da rede viária do DER-SP.



A partir deste levantamento 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 para cobrir todas as situações reais;
- 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

Simplemente apoiada

Simplemente 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 desse 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 2.

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.



Tabela 2 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)



A título de ilustração, estão mostradas na Tabela 3 as características geométricas dos casos de pontes de duas vigas de seção T, simplesmente apoiadas, sem e com balanços, com tabuleiro estreito (TE).

Em relação à definição das dimensões para a análise 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 0,20m;
- (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.

4. CÁLCULO DOS ESFORÇOS SOLICITANTES

A determinação dos esforços solicitantes foi feita por meio da utilização do programa **STRAP** (*Structural Analysis Programs*). Para análise de pontes, o STRAP disponibiliza 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, no qual definem-se faixas de rolamento para os veículos, tantas quantas forem desejadas.

No presente trabalho, foram adotadas para todos os modelos analisados, faixas de 2m de largura, que corresponde à distância transversal entre rodas dos veículos normativos.

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

As pontes de viga T foram modeladas com vigas em direções ortogonais, as longarinas e as transversinas, com sistema estrutural de 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.

Além dos elementos de barras, também foram utilizados elementos de superfície, no caso as placas. 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 resultados dos modelos analisados.

No caso das longarinas, foram adotadas seções T com as dimensões de acordo com a seção transversal da definição dos casos, conforme já apresentado. A largura da mesa foi adotada como sendo a largura de influência entre duas vigas adjacentes.



Tabela 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		



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, $h_{\text{transversinas}} = 0,8 h_{\text{longarinas}}$. 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 considerados 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.

As pontes de laje foram modeladas de modo análogo ao adotado para as pontes de viga T, à exceção das barras.

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.

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.

- *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, 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.

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

No caso das transversinas, essas foram consideradas nas posições de ocorrências dos diafragmas existentes na ponte, em geral, nas extremidades e intermediários. 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.

5. 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 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 das CVCs e carga móvel normativa.

Complementando a análise, são também apresentados gráficos com valores relativos dos efeitos da carga móvel das CVCs 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 na Tabela 4. 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.

No relatório, os gráficos estão agrupados em seis partes, em função do sistema estrutural transversal.

A título de ilustração estão mostrados nos gráficos das figuras 1 a 6, alguns casos representativos da comparação das solicitações.

Tabela 4 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

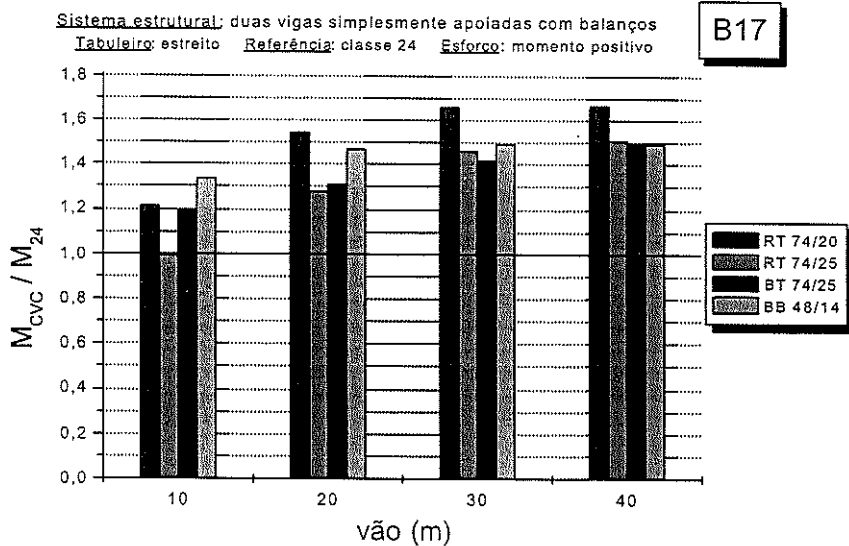


Fig. 1 - Exemplo de comparação de solicitações: ponte de duas vigas simplesmente apoiadas com balanço, com referência a ponte Classe 24

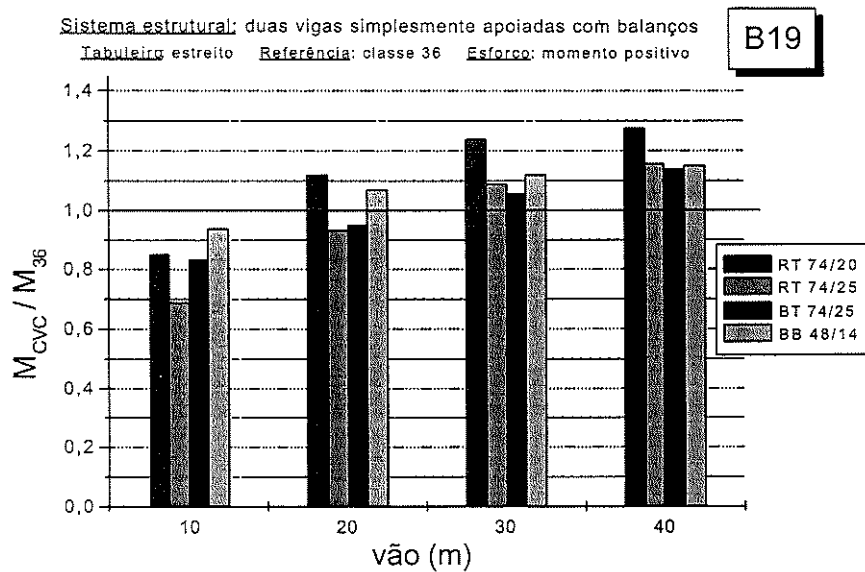


Fig. 2 - Exemplo de comparação de solicitações: ponte de duas vigas simplesmente apoiadas com balanço, com referência a ponte Classe 36

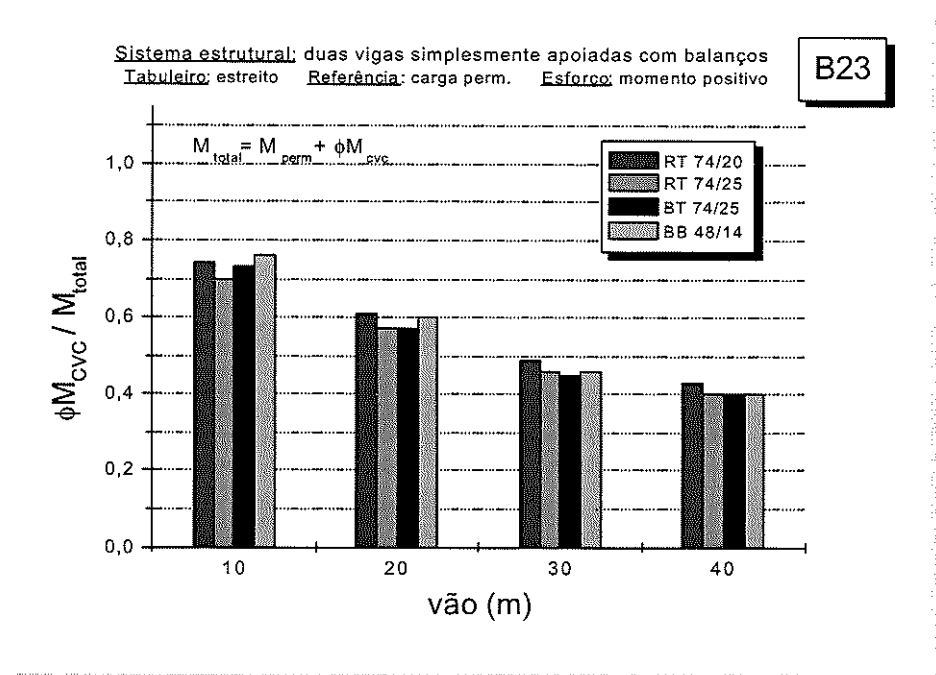


Fig. 3 - Exemplo de comparação de solicitações: ponte de duas vigas simplesmente apoiadas com balanço, com referência a ponte Classe 45

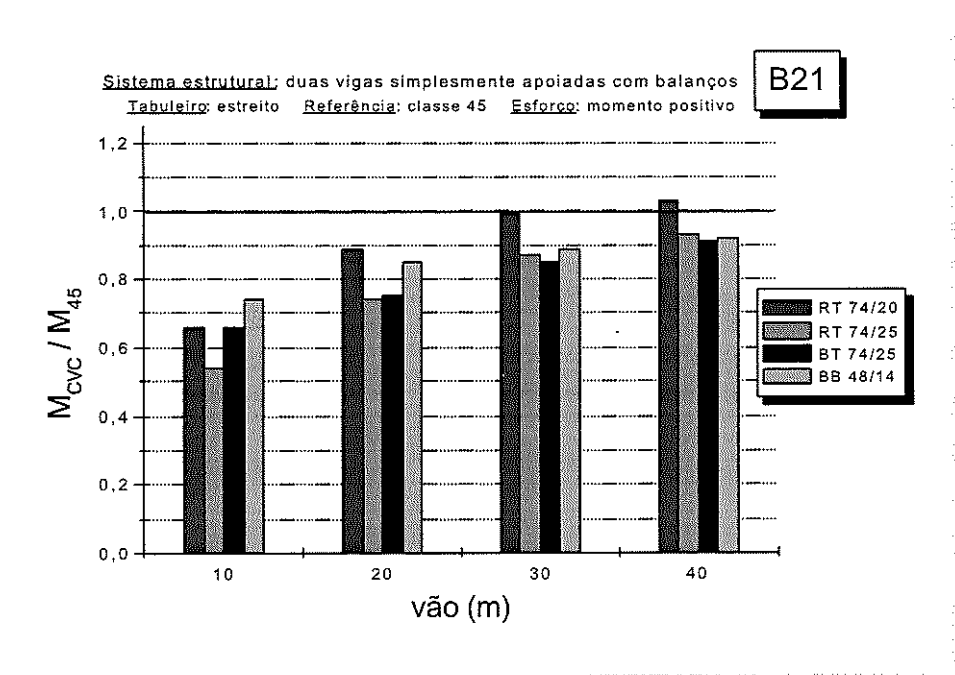


Fig. 4 - Exemplo de comparação de solicitações: ponte de duas vigas simplesmente apoiadas com balanço, com referência à carga permanente

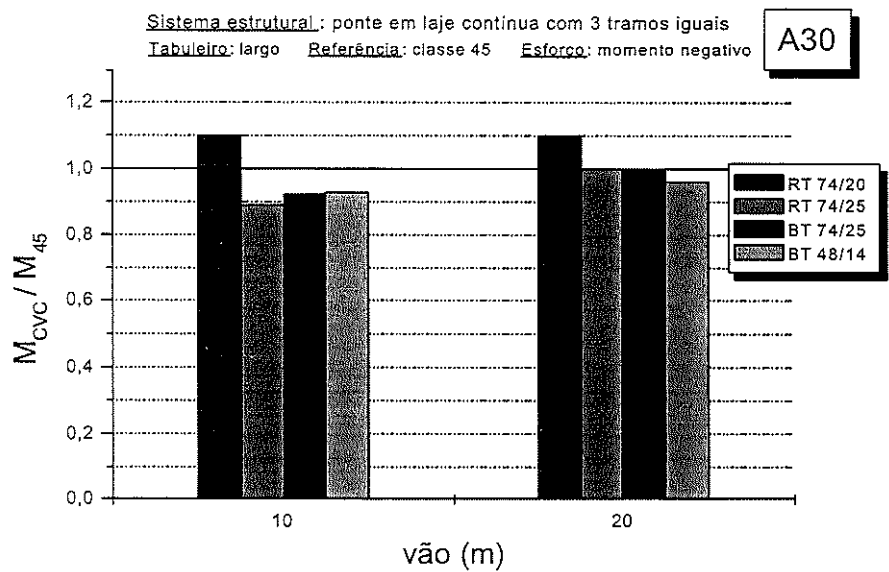


Fig. 5 - Exemplo de comparação de solicitações: momento negativo em ponte de laje contínua com três tramos iguais, com referência a ponte Classe 45

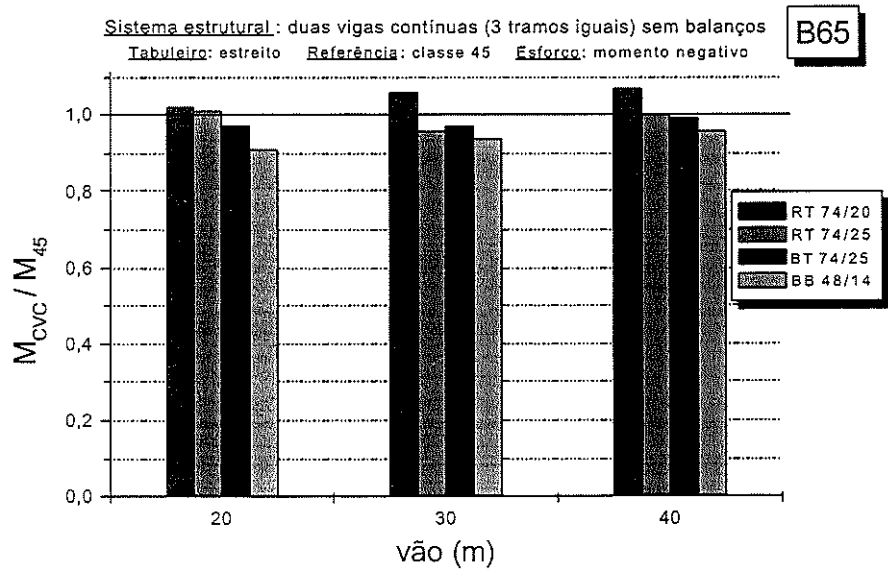


Fig. 6 - Exemplo de comparação de solicitações: momento negativo em ponte de duas vigas contínua com três tramos iguais, com referência a ponte Classe 45

6. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com base nos resultados obtidos pela análise estrutural dos casos representativos das pontes 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. No entanto, esta ultrapassagem das solicitações nas pontes classe 36 é aceitável devido aos diferentes procedimentos de introdução da segurança, antes e após 1978, conforme descrito no item 2.

7. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

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

- (a) não é recomendado o tráfego das CVCs pelas pontes classe 24 (da norma antiga) e classe 30 (da norma atual);
- (b) a CVC RT74/20 não é compatível com as pontes da malha viária, pois as solicitações ultrapassam as solicitações de projeto, mesmo da classe 45, para um grande número de casos.
- (c) as CVCs RT74/25 e BT74/25 são compatíveis com pontes classe 36 e 45.

Finalizando, cabe alertar 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 frequência 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;

Agradecimentos

Os autores agradecem à contribuição, no trabalho de prestação de serviço realizado junto ao DER-SP, dos seguintes engenheiros civis: Admilson A. Bortolin, Gustavo Monteiro de Barros Chodraui, Luiz Liserre e Luciano Barbosa dos Santos. As opiniões e conclusões aqui expressas são de responsabilidade dos autores.

Referências bibliográficas

- [1] EL DEBS, M.K. et al. "Análise das conseqüências do tráfego de CVC's (combinações de veículos de carga) sobre as obras de arte especiais da rede viária do DER-SP". Escola de Engenharia de São Carlos – USP, junho 2001 (Relatório Técnico).
- [2] ABNT. NBR 7188 "Carga móvel em ponte rodoviária e passarela de pedestre". ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Rio de Janeiro, 1984.
- [3] ABNT. NBR 7187 "Projeto e execução de pontes de concreto armado e protendido". ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Rio de Janeiro, 1986.
- [4] ABNT. NBR 6118 "Projeto e execução de obras de concreto armado". ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Rio de Janeiro, 1978.
- [5] ABNT. NBR 8681 "Ações e segurança nas estruturas. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Rio de Janeiro, 1984.