



IX CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS  
18 a 20 de maio, 2016 - Everest Rio Hotel

## **Análise comparativa dos métodos simplificado e computacional no cálculo da longarina de uma ponte em concreto armado**

**Luiz Octavio de Souza B. Oliveira<sup>1</sup>; Regina Helena F. de Souza<sup>2</sup>; Juzian Castro Azevedo<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>UERJ / Dept. Estruturas e Fundações / Mestrando / luizoctavio.uerj@gmail.com

<sup>2</sup>UERJ / Dept. Estruturas e Fundações / Doutor / reginahsouza@gmail.com

<sup>3</sup>UERJ / Dept. Estruturas e Fundações / Graduando / castrojca@hotmail.com

### **Resumo**

Atualmente, a análise dos esforços atuantes nas pontes pode ser realizada com utilização de ferramentas computacionais, como o CSI Bridge, do mesmo fabricante do conhecido SAP2000. Entretanto, a utilização deste programa ainda é incipiente, visto que o produto é relativamente novo. Modelos computacionais são mais precisos, resultando em esforços e deformações mais exatos, comparados aos obtidos por métodos manuais, normalmente mais conservadores e a favor da segurança. No modelo computacional, por exemplo, é possível considerar de forma mais realista os efeitos da carga móvel nos elementos estruturais, pois o programa trabalha com o conceito de superfícies de influência, ao mesmo tempo em que as ligações entre os elementos são modeladas com maior precisão, através da inserção de suas corretas rigidezes. Já no método manual, a distribuição dos esforços é feita através de processos simplificados, pela análise estática da grelha constituída pelas vigas principais e transversais, resultando num modelo 2D de pórtico plano ou viga contínua, em que os aparelhos de apoio são considerados como nós fixos. No modelo computacional, ao contrário, é possível considerar a rigidez dos aparelhos de apoio de neoprene, e com isso avaliar as deformações na superestrutura de maneira mais precisa. No intuito de prezar pela otimização do processo e, principalmente, pela segurança da estrutura, vê-se necessário o estudo dos resultados do programa, estabelecendo a eles critérios de confiabilidade. No presente trabalho, apresenta-se um resumo de uma análise comparativa dos esforços devidos às ações verticais e deformações atuantes nas longarinas de uma ponte rodoviária de concreto armado. Com o estudo foi possível dizimar algumas dúvidas de modelagem, fazer um passo-a-passo para utilização do programa, confirmar a validade dos resultados finais apresentados pela análise.

### **Palavras-chave**

Concreto Armado; Ponte; Análise de Esforços; CSI Bridge.

### **Introdução**

A chegada da computação aos diversos setores comerciais trouxe a possibilidade de automatização de procedimentos e execução de cálculos numéricos refinados que, dada a quantidade de operações matemáticas envolvidas, seriam inviáveis em processos manuais. Especificamente na Engenharia Civil, o emprego dos computadores teve grande relevância na análise estrutural dos mais diversos tipos de obras, desde a utilização mais simples da análise matricial de estruturas até os refinados softwares que trabalham com elementos finitos, não só em elementos de barra, mas também em elementos planos e de volume. Adicionalmente, são capazes de realizar outras operações de pré e pós processamento, como por exemplo a

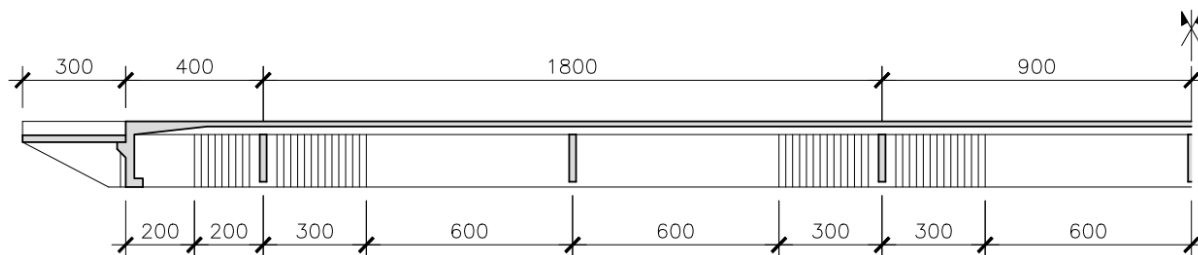


aplicação de superfícies de influência, cálculo da variação das propriedades dos materiais ao longo do tempo (como a retração e a fluência no concreto e também as perdas de protensão em armaduras ativas) e o dimensionamento e a verificação de elementos estruturais como vigas e pilares, inclusive levando em consideração efeitos de segunda ordem nestes últimos. Dentre as famílias de softwares de uso comercial que se destacam está o SAP2000, desenvolvido pela *CSI America*, uma empresa situada em Berkley e devotada à produção de programas computacionais para análise estrutural desde 1975. Os softwares da família SAP encontram hoje grande aceitação nos escritórios de cálculo brasileiros, dada a sua facilidade de utilização e de interpretação de resultados, bem como a ampla gama de recursos que tais softwares oferecem. Um dos programas desta família é denominado *CSI Bridge*, derivado do SAP2000, e é o objeto de estudo do presente trabalho. Esta ferramenta tem como principal objetivo realizar a análise estrutural (e, eventualmente o dimensionamento) de estruturas de obras de arte de ponte. Seu interesse principal reside na facilidade de obtenção de superfícies de influência para estruturas sujeitas a carregamento móvel (*moving loads*), como são as pontes e as estruturas portuárias, por exemplo.

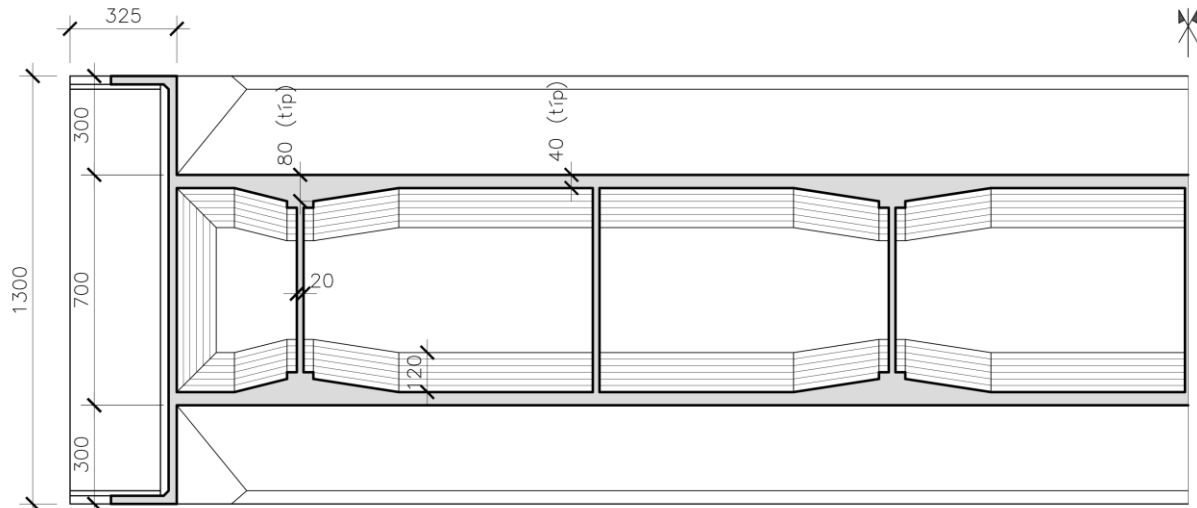
Neste trabalho não há a pretensão de “validar” os resultados apresentados pelo programa *CSI Bridge*, que já conta com grande aceitação por conta da comunidade técnica, mas apenas obter uma ordem de grandeza dos esforços solicitantes, a fim de compará-los com aqueles obtidos por métodos manuais, tidos como mais conservadores, com o intuito de gerar maior confiança em um usuário “de primeira viagem”.

### Descrição da Ponte-Exemplo

A ponte exemplo utilizada neste trabalho é uma ponte sobretudo didática, cuja geometria é explorada no curso de Pontes ministrado pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Uerj, uma vez que por questões econômicas e de prazo de obra, grande parte dos projetos de pontes da atualidade são realizados em concreto protendido. Esta ponte, no entanto, é uma ponte hiperestática em concreto armado, de carácter rodoviário, composta por um tabuleiro com 13 metros de largura e 62 metros de comprimento, além de lajes de transição com 3 metros de largura. A ponte apresenta três vãos, com 18 metros de comprimento, cada. As figuras a seguir apresentam a ponte em planta e também em elevação, na direção longitudinal:

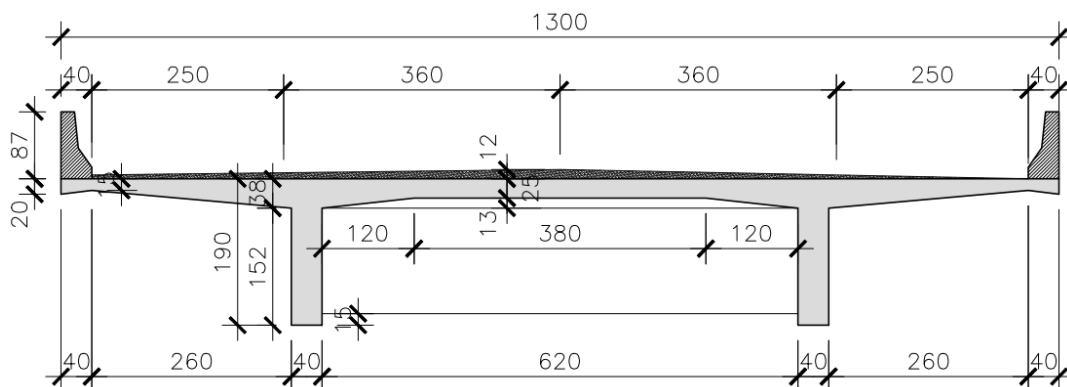


**Figura 1 – Tabuleiro em elevação (sem escala).**

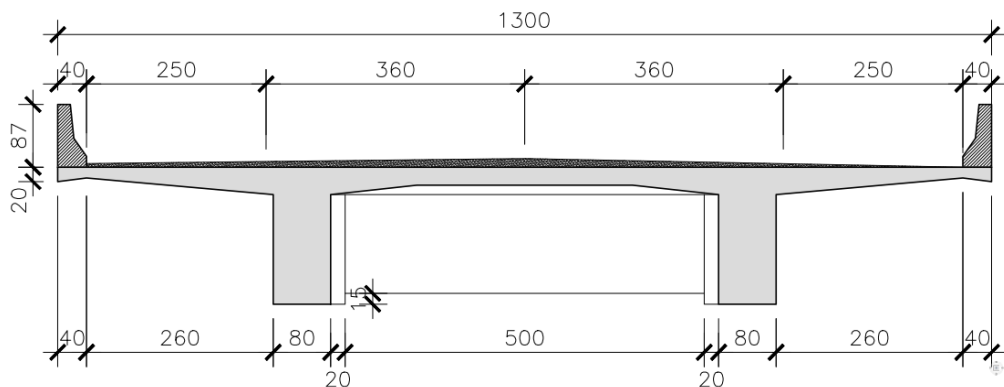


**Figura 2 – Tabuleiro em planta (sem escala).**

A seção transversal da ponte é constituída por uma estrutura monolítica, em Duplo-T, cuja largura das almas varia de 40 centímetros na região da metade do vão até 80 centímetros na região dos apoios, mas sempre com altura constante de 190 centímetros, desde sua base até o topo da laje.

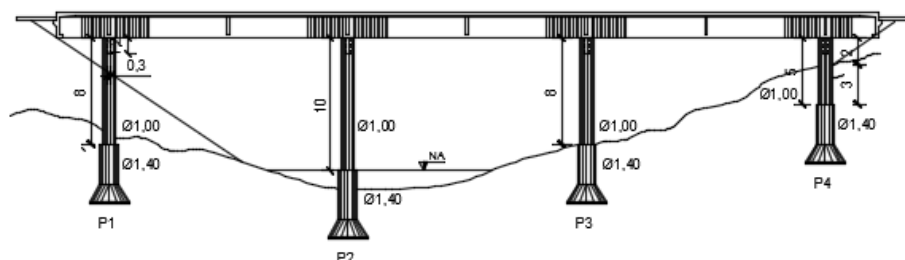


**Figura 3 – Seção transversal corrente do tabuleiro, no meio do vão (sem escala).**



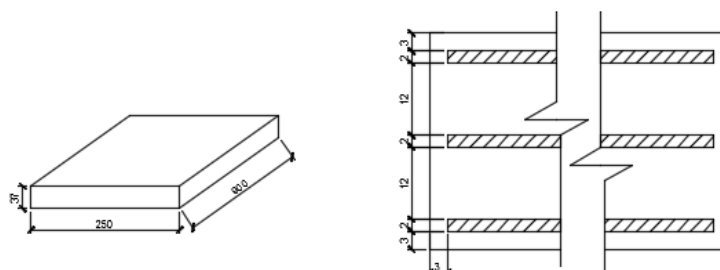
**Figura 4 – Seção transversal corrente do tabuleiro, próximo aos apoios (sem escala).**

A ponte também é dotada de transversinas de apoio, de seção retangular de 20 centímetros de largura por 135 centímetros de altura, estando elas desligadas da laje e, ao mesmo tempo localizadas a 15 centímetros da face inferior das longarinas, para evitar o confronto de armaduras destes dois tipos de viga. A face inferior da laje apresenta mísulas, com intuito de aumentar a rigidez da seção nas proximidades das longarinas, fazendo com que a espessura da laje varie entre 25 e 38 centímetros, conforme visto na Figura 3. Nas extremidades dos balanços das lajes foram projetadas pingadeiras com espessura de 20 centímetros. Isto também pode ser observado nas Figuras 3 e 4. Esta ponte pertence à Classe 1 de acordo com o Manual de Projeto de Obras de Arte Especiais, Quadro 1 do DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte. Ainda de acordo com esse manual, a largura mínima da faixa de rolamento é de 3,60 metros. Os guarda-rodas desta ponte são do tipo “New Jersey”, com largura de 40 centímetros, portanto, sobram para cada lado, uma faixa de 2,50 metros para acostamento, perfazendo o total de 13 metros da largura do tabuleiro no total. A mesoestrutura é composta por estruturas aperticadas dotadas de pilares com 1,00 metro de diâmetro unidos, dois a dois, no sentido transversal por vigas de amarração que conferem maior rigidez ao conjunto e possuem seção retangular com 20 centímetros de largura por 120 centímetros de altura. Os pilares possuem alturas que variam entre 5, 8 ou 10 metros, conforme se observa na figura abaixo:



**Figura 5 – Ponte em elevação – superestrutura e mesoestrutura.**

Finalmente, a ligação da superestrutura com a mesoestrutura se dá através de aparelhos de apoio em neoprene fretado, presentes no topo de todos os pilares, cujas dimensões em planta são de 90 por 250 mm, e cuja altura de cada um deles é de 37 mm. Estes aparelhos possuem três chapas de aço com espessura de 2 mm, permeadas por duas camadas de neoprene de 12 mm cada, conforme se vê na Figura 6.



**Figura 6 – Aparelho de apoio em neoprene fretado.**

Adotou-se para análise um concreto com  $f_{ck} = 20$  MPa. Embora o presente trabalho não trate do dimensionamento e a análise estrutural seja feita de maneira linear e elástica, o que está de acordo com o item 14.2.3. da NBR 6118:2014, a fixação de um valor para a resistência



característica à compressão do concreto é importante porque a partir deste valor se correlaciona o valor do módulo de elasticidade do material, importante para análise das deformações apresentadas pela ponte carregada.

### Ações e Carregamentos

No modelo computacional da ponte, foram considerados os seguintes casos de carga referente às ações estáticas: (a) *peso próprio*, correspondente ao peso dos elementos estruturais constituintes da ponte, cujo valor é calculado automaticamente pelo programa – este caso de carga recebeu o nome de “*DEAD*”, que é uma designação *default* do software; (b) caso de carga “*PAVIMENTAÇÃO*”: referente ao capeamento na ponte, na largura compreendida entre os guarda-rodas e considerada uniformemente distribuída de valor igual a 1,0 kN/m<sup>2</sup>; (c) caso de carga “*GUARDA-RODAS*”, aplicado diretamente sobre o tabuleiro como carga uniformemente distribuída com valor de 11,6 kN/m<sup>2</sup> (d) caso de carga “*TEMP*”, referente a uma variação uniforme de temperatura de 5°C a 15°C, conforme item 11.4.2.1 da NBR 6118:2014; (e) caso de carga “*RET*”, referente à retração do concreto, considerada como uma variação uniforme de temperatura de magnitude de -15°C, de acordo com a NBR 6118:2014 item 13.3.3.1, aplicada em todos os elementos do modelo; (f) caso de carga “*LAJE DE TRANSIÇÃO*” referente ao peso próprio da laje de transição, que não colabora com a rigidez do modelo por estar simplesmente apoiada no dente da cortina, com valor igual a 7,5 kN/m, uniformemente distribuída; (g) caso de carga “*ATERRO*”, referente ao aterro sobre a laje de transição, igualmente aplicada de maneira uniforme sobre a cortina, com magnitude igual a 10,8 kN/m; (h) caso de carga “*EMPUXO*”, referente ao empuxo de terra atuante sobre a cortina e calculado como sendo um empuxo do tipo ativo com  $k = 1/3$ . A resultante deste carregamento é aplicada de maneira uniforme na direção horizontal com valor de 11,4 kN/m.

Em relação à carga móvel considerou-se o trem-tipo padrão para este tipo de obra, TB 450, de acordo com a NBR 7188:2013 que, como se sabe, é composto por um veículo-tipo com área de 6,0 por 3,0m, de 450 kN (45 tf) de peso total distribuído em 6 rodas, com 75 kN cada uma delas além de uma carga de multidão com valor constante de 5,0 kN/m<sup>2</sup> atuando na área externa ao veículo. O coeficiente de impacto para esta configuração, de acordo com os cálculos apresentados item 5.1.2 desta mesma norma é  $CIV = 1,312$ .

Para obtenção dos esforços solicitantes, procedeu-se à combinação das ações de acordo com os preceitos da NBR 8681:2004. Para o caso do E.L.U., combinação normal de ações, utilizaram-se os seguintes coeficientes de ponderação das ações:

**Tabela 1 – Coeficientes de ponderação de ações e de concomitância utilizados**

Coeficientes	C.Perm.	Temperatura	Retração	Emp. Terr.	C. Móvel
$\gamma_f$ (sit. desfav.)	1,35	1,20	1,20	1,35	1,50
$\gamma_f$ (sit. fav.)	1,00	1,20	0,00	0,00	0,00
$\Psi_0$	1,00	0,60	0,00	1,00	0,70



IX CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS  
18 a 20 de maio, 2016 - Everest Rio Hotel

## Implementação do modelo computacional

Ao se implementar o modelo computacional, a primeira medida a ser tomada é selecionar o sistema de unidades que se deseja trabalhar. No caso optou-se pelo Sistema Internacional, com forças em kN, comprimentos em metros e temperatura em °C.

A seguir foram definidas as propriedades do material. No programa, ao se criar um material do tipo concreto, o *CSI Bridge* solicita as informações de peso específico (25 kN/m<sup>3</sup>), módulo de elasticidade (21,3 GPa calculados de acordo com a NBR 6118:2014, utilizando-se módulo secante e agregado graúdo do tipo gnaíse), coeficiente de Poisson (adotado igual a 0,2) e coeficiente de expansão térmica (adotado igual a  $1,0 \cdot 10^{-5} \text{m}/^\circ\text{C}$ ). Adicionalmente foi especificada a resistência à compressão do material, porém este dado não foi utilizado pelo *software* uma vez que no trabalho não se utilizou das rotinas de dimensionamento e verificação de seções presentes no programa.

Depois definiu-se a grade (“*grid*”) que nada mais é do que uma máscara que serve de eixo para os elementos estruturais. Determinou-se a grade de forma que no eixo *x* ficassem localizadas as posições relevantes ao início e final da ponte, localização dos pórticos e início e fim de cada trecho de seção variável, pois como se vê na Figura 2, a ponte apresenta seção transversal variável nas proximidades do apoio. Na grade do eixo *y*, localizaram-se o início e final do tabuleiro no sentido transversal e localização dos pilares nos pórticos. Finalmente no eixo *z*, foram criadas linhas de grade referentes à cota inicial de cada pilar, ao topo dos pórticos e à cota que representa o centro de gravidade médio da seção transversal. No intervalo de distância entre o topo dos pilares e a superestrutura foram localizados, posteriormente, os aparelhos de apoio neoprene.

Definiram-se, em seguida, as seções transversais dos elementos de *frame* da ponte. A seção transversal é composta por duas vigas “T”. Como a laje é colaborante, isto é, a laje influencia a rigidez da viga aumentando seu momento de inércia, este efeito foi levado em conta no modelo através da consideração dessa largura colaborante, calculada de acordo com os preceitos da NBR 6118:2014. No entanto, como posteriormente são implementadas a laje no modelo através de elementos de *shell*, ocorre um aumento de volume de concreto e de peso próprio que não corresponde à realidade.

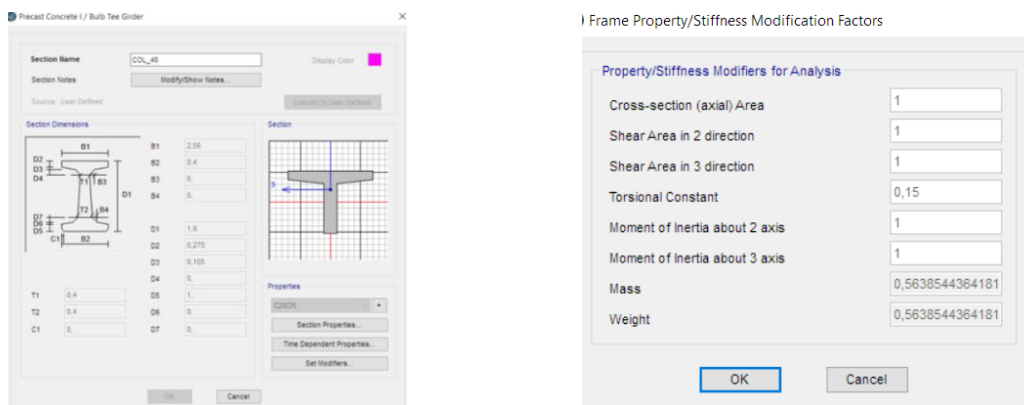


Figura 7 – Introdução da seção de uma Viga “T” no modelo.





Para corrigir esta questão, utilizou-se de um fator de redução do peso da viga, dado por  $A_{s,real}/A_{s,total}$ . Naturalmente, considerar a inércia da viga e da laje acarreta em um aumento total de inércia do modelo que, igualmente, não corresponde à realidade. Contudo, como os elementos de *shell* e os elementos de *frame* estão unidos pelo centro de gravidade, o aumento total de inércia na superestrutura pode ser negligenciado sem problemas, pois a parcela de Steiner é igual a zero.

Os aparelhos de apoio são modelados como elementos do tipo “link” linear, com deformações proporcionais às tensões para deslocamentos em sua própria direção (vertical) e como se funcionassem como uma ligação rígida com os pilares para deslocamento nas demais direções. Em relação às rotações, eles foram considerados sem qualquer impedimento.

A aplicação das cargas seguiu a rotina da definição dos casos de carga, “*Load Patterns*”, para os casos estáticos, e, para o trem tipo, foram utilizadas as ferramentas de análise móvel do CSIBridge. Este programa foi principalmente desenvolvido para o uso em obras de arte de estradas. Por isso, sua nomenclatura segue alguns termos de projetos de estradas. A primeira coisa que deve ser feita é definir o que se chama de “*layout line*”, que corresponde ao eixo da rodovia. Este eixo foi localizado no centro do tabuleiro. São inseridas as coordenadas em *x*, *y* e *z*, a “*station*” (a “estaca” de um projeto geométrico) inicial, a orientação da estrada em relação ao norte de projeto, considerado como sendo o eixo *y* do sistema de coordenadas globais do modelo (N90°00’00” E) e a “*end station*”, neste caso, 62 m.

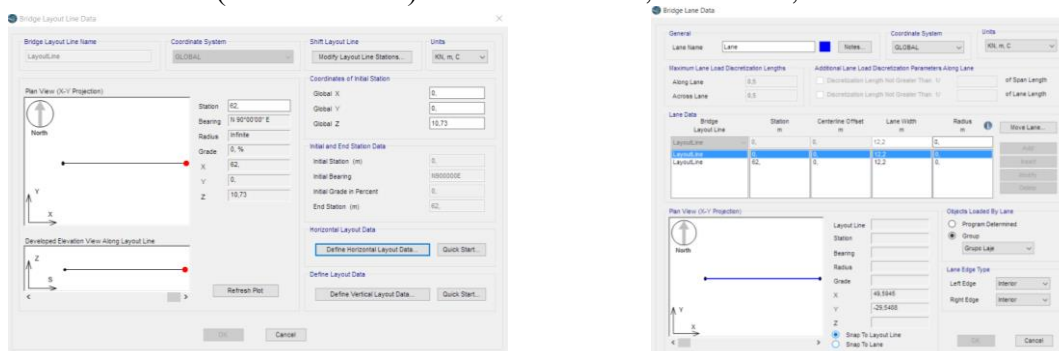


Figura 8 – Definição de *layout line* e *lane* no modelo.

A seguir define-se a *lane*, que nada mais é do que a faixa em que o veículo tipo irá trafegar. Definida a partir da *layout line*, a *lane* traz as informações de largura, discretização (na verdade, dos pontos em que serão geradas as superfícies de influência do modelo), aqui definida como 0,5 m em cada direção e também quais elementos deverão ser carregados pela carga móvel. No caso da ponte, definiu-se que apenas os elementos de *shell* devem ser carregados e estes serão os responsáveis por transmitir os esforços para os demais elementos.

Por fim define-se o veículo tipo. O programa traz, para diversas normas internacionais, veículos tipos “prontos” para serem facilmente empregados nos modelos numéricos. Infelizmente, o programa não traz por padrão os trens-tipo utilizados no Brasil. Por isso, o TB-45 necessita ser inserido manualmente. Na tela “*Vehicle Data*” e janelas subsequentes são informados ao programa as características do trem tipo.

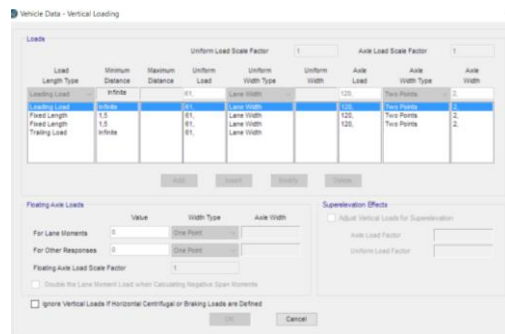
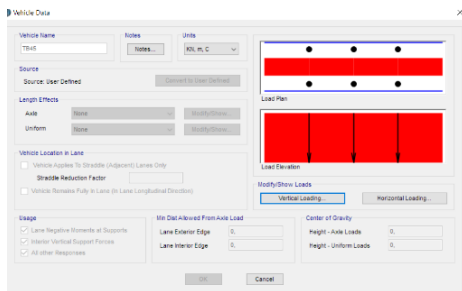


Figura 9 – Definição do veículo tipo.

Deve-se salientar que a carga de multidão (“uniform load”) deve corresponder à unidade kN/m, como uma carga linear uniformemente distribuída. Por isso, no modelo o valor a ser considerado corresponde aos 5kN/m<sup>2</sup> da norma multiplicados pela largura das faixas de rolamento. Finalmente, a utilização da carga móvel depende da criação de um caso de carga específico do tipo “Moving Load”. Observar na Figura 10 o fator de 1,312 aplicado: trata-se do coeficiente de impacto.

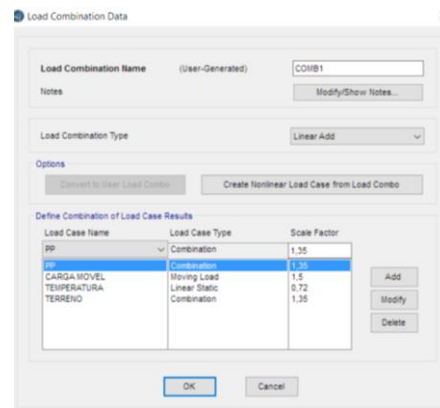
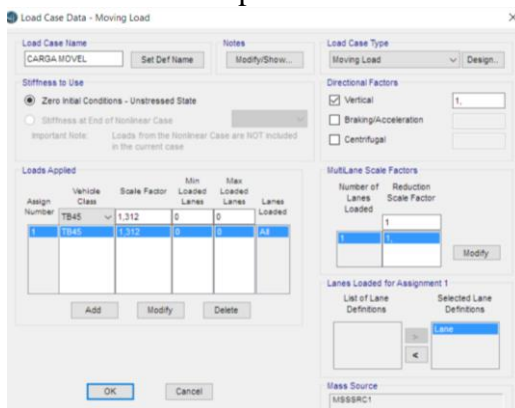


Figura 10 – Definição do Load Case referente à carga móvel.

As combinações das ações são realizadas manualmente, de acordo com os preceitos da NBR 8681:2003 e são inseridas no programa de análise, que gerará as envoltórias dos carregamentos considerando os coeficientes de ponderação informados pelo usuário.

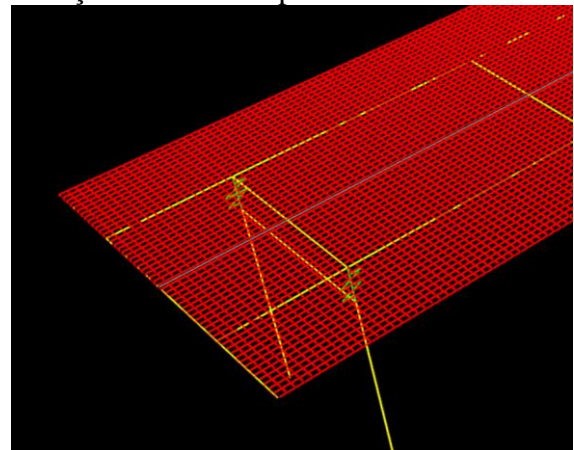
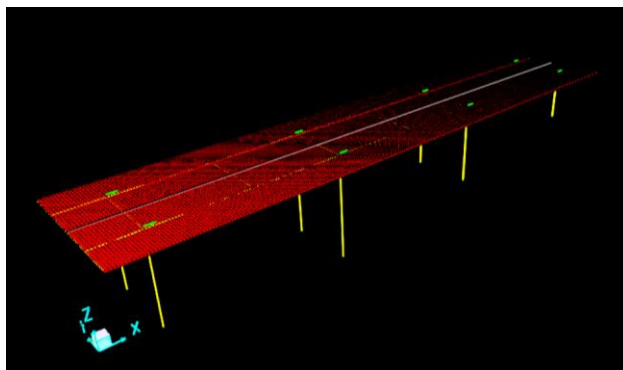


Figura 11 – Aspecto do modelo 3D.





## Análise e discussão dos resultados

Ao final da definição da geometria e dos casos de carga a que a estrutura estará sujeita, pode-se solicitar ao software que realize a análise dos dados cujo produto final será constituído das deformações que a estrutura apresentará e de seus esforços internos tais como momentos fletores, esforços normais e cortantes, para cada uma de suas seções.

Internamente, a análise do programa consiste em gerar, a partir das características dos materiais e da geometria da estrutura, uma matriz de rigidez global para o modelo numérico. Através dos casos de carga implementados, são obtidos os esforços e as deformações na estrutura, combinados através do princípio da superposição, uma vez que trata-se de análise linear, com os demais carregamentos atuantes, gerando as envoltórias de carregamento. Especificamente para o caso de estruturas com análise de carga móvel, o *CSIBridge* gera superfícies de influência para cada um dos elementos e os carrega de maneira a obter os máximos esforços. Os resultados apresentados pelo *CSIBridge* foram comparados aos obtidos por uma análise simplificada e manual. Sabe-se de antemão que as análises manuais apresentam inúmeras hipóteses simplificadoras cujo objetivo é permitir que o volume de contas seja reduzido e que o procedimento de cálculo possa ser realizado de maneira simples. O intuito da comparação de resultados não é averiguar se o *CSIBridge* apresenta, como programa de análise, resultados coerentes, mas sim ter uma ordem de grandeza dos esforços, a fim de verificar se o modelo numérico implementado corresponde à realidade física da estrutura e se não há nenhum tipo de erro que possa produzir resultados incoerentes. Desta forma, a seguir apresentam-se alguns resultados comparativos entre o método manual e o cálculo automático pelo programa:

**Tabela 2 – Comparação entre momentos fletores extremos**

Descrição	Momentos Fletores (kN.m) - CSIBridge							Mom. Flet; (kN.m) - Cálculo manual		
	Esforços Característicos					Combinações		Combinações		
	PP	Terr.	Carga Móvel		Temp	Ret.	Máx	Mín	Máx	Mín
		Mín	Máx							
$M^+_{máx}$	1.287,0	-143,7	-1.138,7	2.884,5	0,1	-0,1	6.064,2	-615,3	6.232,2	90,4
$M^-_{máx}$	2.261,9	54,3	-2.661,1	746,0	0,0	0,0	-1.069,5	-7.045,2	-2.216,5	-6.994,0

**Tabela 3 – Comparação entre esforços cortantes extremos**

Descrição	Esforços Cortantes (kN) - CSIBridge							E. Cortantes (kN) Cálculo Manual		
	Esforços Característicos					Combinações		Combinações		
	PP	Terr.	Carga Móvel		Temp.	Ret.	Máx	Mín	Máx	Mín
		Mín	Máx							
$V^+_{máx}$ (kN)	672,7	-18,3	-152,5	835,3	0,0	0,0	2.161,2	419,3	2.522,9	893,2
$V^-_{máx}$ (kN)	-683,8	17,2	-848,0	142,2	0,0	0,0	-447,2	-2.195,1	-893,2	-2.522,9



## Conclusões

A utilização de ferramentas computacionais na elaboração de projetos de engenharia civil promove uma série de facilidades no dia-a-dia dos escritórios de cálculo: tempo reduzido das análises, maior grau de refinamento, diminuição de imprecisões numéricas, emprego de técnicas sofisticadas de análise, dentre outros. No entanto, como já é de conhecimento bastante difundido pelas práticas da boa engenharia, elas devem ser utilizadas com muito cuidado. Resultados “bonitos” e bem apresentados podem esconder erros grosseiros de cálculo e dimensionamento que, em última instância, podem levar à ruína os elementos projetados.

Daí a necessidade de se avaliar e de se questionarem os dados obtidos através de cálculos mais simples e manuais, aferindo sempre a ordem de grandeza. No caso desta ponte-exemplo, uma ferramenta refinada foi utilizada – o *CSIBridge*, capaz de analisar a estrutura com o auxílio de refinadas superfícies de influência para casos de carga móvel. A comparação dos resultados obtidos para o programa, no E.L.U, com aqueles obtidos por processos simplificados levaram a uma diferença de cerca de 3% entre os modelos para momento fletor positivo máximo, 0,7% de diferença para momento fletor negativo máximo e 0,15% para esforço cortante máximo. Ressalta-se que o modelo simplificado considerou os apoios das vigas longitudinais como nós fixos, o modelo numérico representou com mais fidelidade os aparelhos de apoio neoprene e os pórticos de apoio – elementos que possuem suas rigidezes e são, portanto, deformáveis. Este tipo de refinamento faz surgir momentos fletores positivos próximos ao apoio, que acontecem na realidade mas que não são levados em conta no modelo manual simplificado, que neste caso, acaba se tornando um pouco contrário a segurança. Em resumo, os modelos manuais são simplificados e apresentam aí suas imprecisões, que podem ser ligeiramente contra ou a favor da segurança – mas são de extrema importância para validação dos modelos numéricos sofisticados que podem ser produzidos em programas de análise como o *CSIBridge*.

## Referências

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8681 – Ações e Segurança nas Estruturas – Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7188 – Carga móvel em ponte rodoviária e passarela de pedestre – Procedimento. Rio de Janeiro, 2013.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118 – Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- AZEVEDO, J.C. – Análise comparativa dos métodos simplificado e computacional no cálculo da longarina de uma ponte em concreto armado. Projeto Final do Curso de Graduação em Engenharia Civil pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2015.
- COMPUTER AND STRUCTURES INC. – CSI Bridge V. 15.0 – Berkeley, 09/2010.
- DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – Manual de Projeto de Obras de Artes Especiais. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro, 1996.
- RÜSCH, H. Concreto armado e protendido: propriedades dos materiais e dimensionamento. Ed. Campus, 1980.
- SOUZA, R.H.F. Notas de Aula de Pontes. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2013.