

IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL PARA A DETERMINAÇÃO DE LINHAS DE INFLUÊNCIA EM PÓRTICOS ESPACIAIS COM BARRAS DE SEÇÃO VARIÁVEL PROVOCADAS POR CARGAS MÓVEIS DE TODAS AS NATUREZAS E EM TODAS AS ORIENTAÇÕES.

IMPLEMENTATION OF A COMPUTER PROGRAM TO DETERMINE INFLUENCE LINES IN 3D FRAMES WITH VARIABLE SECTION BEAMS CAUSED BY MOVING LOADS OF EVERY NATURE AND ORIENTATION

Caio Felipe Laurindo (1); Edilson Morais Silva (2); Remo Magalhães de Souza (3)

(1) *Mestrando, PPGEC - UFPA*

(2) *MsC, Instituto de Tecnologia – NITCAE*

(3) *Professor Doutor, Faculdade de engenharia civil - UFPA*

Endereço para correspondência: Travessa dos Tupinambás, 1220 CEP 66033124, Belém- PA

Resumo

O Traçado de linhas de influência é o método mais eficiente para se determinar a posição de uma carga móvel que provocará o máximo ou mínimo esforço em uma determinada seção de uma estrutura. Este método é amplamente divulgado na literatura com a carga móvel sendo uma força vertical de modo a representar a atuação de um veículo. Entretanto, em algumas situações, cargas móveis que apresentam outras orientações e até mesmo cargas de outra natureza (cargas momento) devem ser consideradas. Um exemplo das referidas cargas se encontra no trecho abaixo, transcrito da NBR7187- Projeto e execução de pontes de concreto armado item 7.2.1.4.

"O choque lateral das rodas, considerado apenas em pontes ferroviárias, é equiparado a uma força horizontal móvel, aplicada na altura do topo do trilho, normal ao eixo da linha..."

Na prática, o traçado de linhas de influência para tais situações não é usual, isso reduz a precisão da determinação dos esforços máximos e mínimos. Este trabalho trata da implementação computacional, em plataforma MATLAB®, de um programa para a determinação espontânea das linhas de influência de pórticos espaciais para todas as orientações e naturezas de cargas móveis, utilizando-se o método da rigidez direta para a solução do sistema estrutural.

Palavra-Chave: Análise de pontes, Linhas de influência, envoltória de máximos e mínimos, Método da rigidez direta.

Abstract

The construction of influence lines is the most efficient method to determine the position of a moving load which will cause the maximum and minimum effort in a particular section of a structure. This method is widely reported in literature with the live load as a vertical force in order to represent the performance of a vehicle. However, in some situations, moving loads that have other orientations and even other nature of loads (moment loads) should be considered. An example of such loads is in the following passage, transcribed from the Brazilian standard NBR7187 Projeto e execução de pontes de concreto armado (Design and execution of reinforced concrete bridges) item 7.2.1.4.

"The side impact of wheels, considered only in railway bridges, is treated as a moving horizontal force applied at the rail top, normal to the axis of the line ..."

In practice, the construction of influence lines in such situations is unusual, and this reduces the precision of the determination of the maximum and minimum efforts. This work presents the implementation of a computer program, in MATLAB® language, to determine influence lines of 3D frames for every nature and orientation of moving loads, using the direct stiffness method for solving the structural system.

Keywords: Bridge analysis, Influence lines, maximum and minimum force envelope and the direct stiffness method

1 Introdução

1.1 Linhas de influência

De maneira geral, analisar uma estrutura para as várias posições de suas cargas móveis é muito trabalhoso. O modo mais eficiente de se determinar as posições de cargas móveis que provocarão os valores extremos (máximo e mínimo de um determinado esforço) em uma seção da estrutura é através do traçado das Linhas de influência. Uma LI corresponde à variação de uma resposta da estrutura (reação de apoio ou esforço interno) para uma seção, devido à passagem de uma carga unitária ao longo da extensão de uma via e pode ser apresentada como um gráfico, no qual seus eixos são definidos da seguinte maneira: A abscissa contém as posições da carga ao longo da ponte e a ordenada contém as respostas como esforços, reações ou até mesmo deslocamentos na seção estudada correspondentes a cada posição da carga. O objetivo do traçado das Linhas de influência é obter a envoltória limite de esforços que contém os valores máximos e mínimos dessas respostas em cada uma das seções da estrutura e é usada no dimensionamento destas seções de forma análoga ao diagrama de esforços em uma estrutura submetida a cargas estáticas.

2 Implementação Computacional

2.1 Métodos utilizados

O programa aplica o processo espontâneo na determinação das Linhas de influência, ou seja, um processo que decorre da definição de LI para o cálculo dos esforços internos causados pela aplicação da carga móvel unitária que percorre um trecho previamente definido da estrutura "Lane". A cada passo dado pela carga unitária na "Lane", a resposta que se deseja obter é calculada utilizando-se o Método da Rigidez Direta para pórticos espaciais formados por elementos de barra com seis graus de liberdade por nó (Figura 1). O programa desenvolvido neste trabalho, LILAB, está explicado no fluxograma contido na (Figura 2).

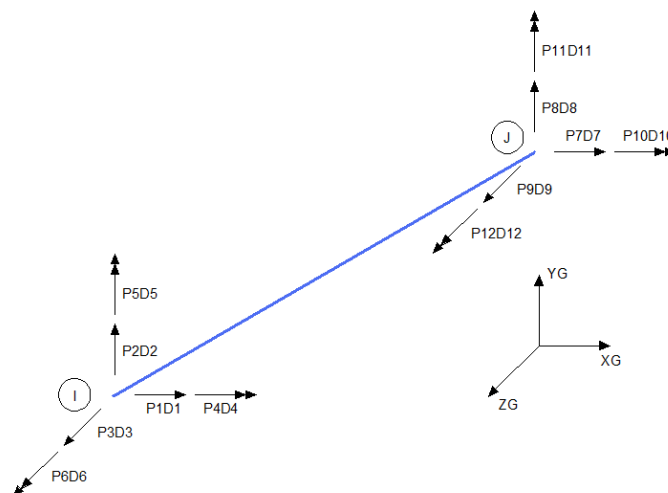


Figura 1 - Elemento de pórtico espacial

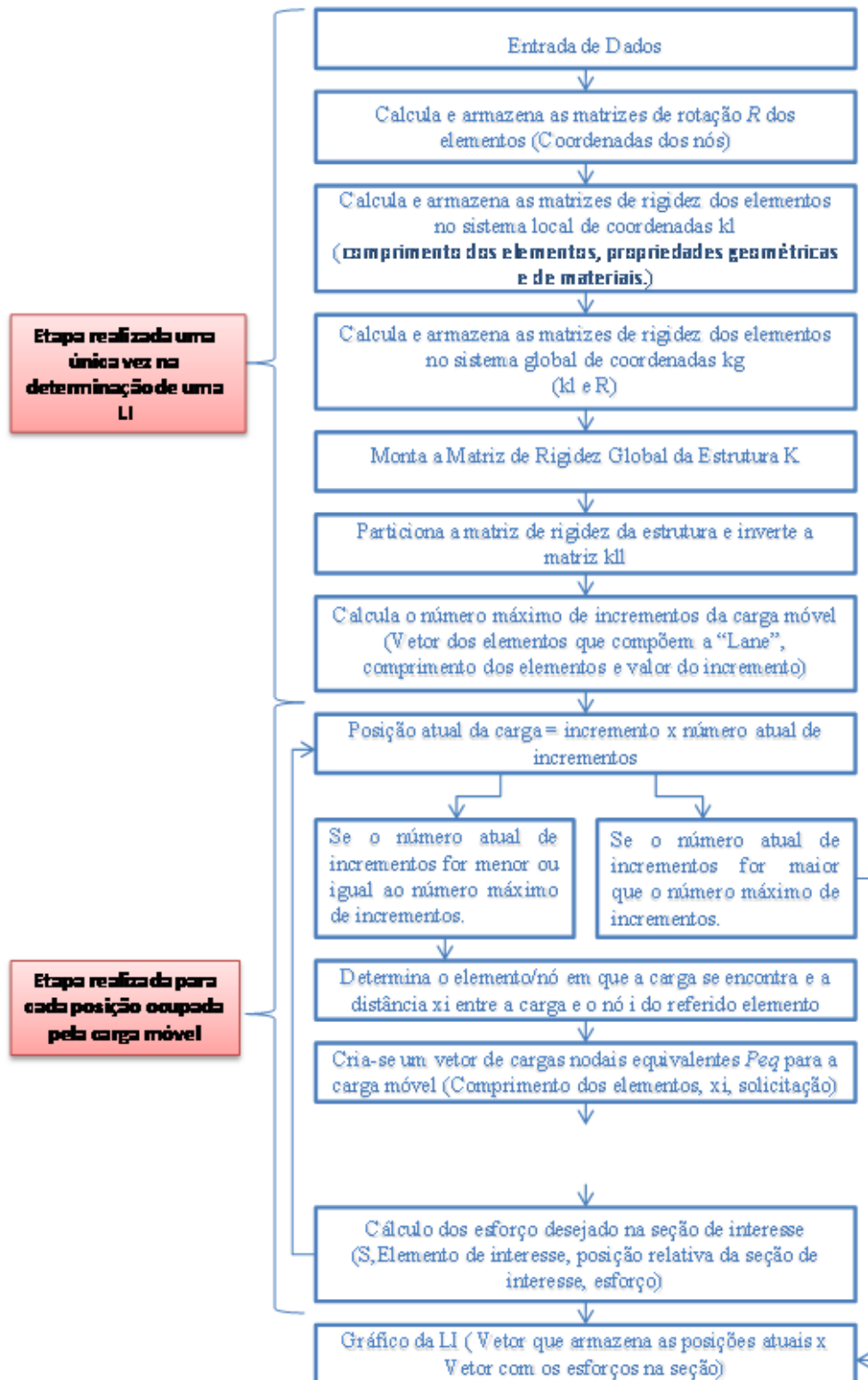


Figura 2 - Fluxograma do programa LILAB

A partir do momento em que o programa é rodado, após a entrada de dados como coordenadas dos nós da estrutura e dos vértices das seções bem como as propriedades dos materiais em cada elemento, segue uma série de procedimentos comuns a qualquer análise estrutural pelo método da rigidez direta, que vão da obtenção das matrizes de rotação e de rigidez locais de todos os elementos até a determinação da matriz de rigidez da estrutura no sistema global e sua partição nas matrizes K_{ll} , K_{lr} , K_{rl} e K_{rr} . Tais procedimentos são realizados uma única vez durante a análise pois independem da posição da carga móvel unitária utilizada na obtenção de uma LI. De posse das referidas matrizes e dos vetores de força nos nós livres e de deslocamento nos nós restringidos, a partir das equações 1 e 2 obtêm-se os vetores de força nos nós restringidos (reações) e deslocamentos nos nós livres da estrutura para uma determinada posição da carga móvel. Sendo assim, é necessário que estes vetores sejam obtidos tantas vezes quantas forem as posições ocupadas pela carga móvel para que finalmente seja traçada uma LI.

$$\{D_l\} = [K_{ll}]^{-1} (\{P_l\} - [K_{lr}]\{D_r\}) \quad (\text{Equação 1})$$

$$\{P_r\} = [K_{rl}]\{D_l\} + [K_{rr}]\{D_r\} \quad (\text{Equação 2})$$

2.2 Dados de entrada necessários ao traçado de uma LI

Além dos dados de entrada comuns a uma análise estática já citados, é necessário que se defina o esforço e a seção para os quais a linha será traçada, bem como a orientação da carga móvel que provocará o esforço escolhido. Também é importante que se defina o conjunto de elementos da estrutura os quais a carga móvel irá percorrer (Lane) e o incremento de distância percorrida pela carga entre um passo e outro. Estas definições são feitas no programa da seguinte forma.

Esforço de interesse e orientação da Carga móvel:

Código	Esforço de interesse	Orientação da Carga móvel
1	Esforço Normal	Força paralela ao eixo x global da estrutura
2	Esforço Cortante paralelo ao eixo local Y do elemento	Força paralela ao eixo Y global da estrutura
3	Esforço Cortante paralelo ao eixo local Z do elemento	Força paralela ao eixo Z global da estrutura
4	Momento Torsor	Carga Momento em torno do eixo x global da estrutura
5	Momento fletor em torno do eixo local Y do elemento	Carga Momento em torno do eixo x global da estrutura
6	Momento fletor em torno do eixo local Z do elemento	Carga Momento em torno do eixo x global da estrutura

Tabela 1 - Códigos

Seção para a qual a LI será traçada: Define-se o elemento que contém a seção desejada e a posição relativa da seção no elemento que varia de 0 a 1 do nó i ao nó J do mesmo.

Lane: Definida por meio de um vetor linha que contém em seqüência os elementos pelos quais a carga irá passar. A Lane deve ser contínua.

Incremento: Pode ser qualquer valor entre zero e o comprimento total da Lane. Usualmente mede um décimo do(s) vão(s) livre(s) da estrutura. É a partir do incremento e do comprimento total da Lane que se determina o número máximo de incrementos da carga móvel e, conseqüentemente, o número de análises que serão realizadas pelo LILAB.

2.3 Cálculo dos esforços internos na seção

O resultado da aplicação do método da rigidez direta são os vetores completos de forças e deslocamentos nodais da estrutura, que ainda não são suficientes para o traçado de uma LI já que se busca esforços em uma seção qualquer que pode não coincidir com um nó. A seguir (Figura 3), será exemplificada a obtenção do momento fletor em torno do eixo local 3 do elemento em uma seção "S" a partir dos momentos nos nós. Cabe observar como a presença ou ausência da carga móvel no elemento que contém a seção afeta os resultados.

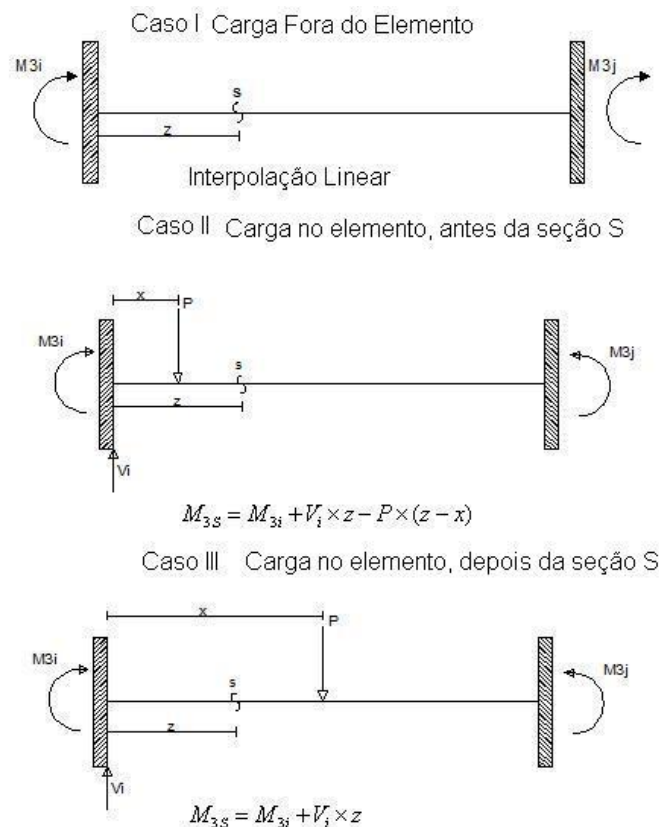


Figura 3 - Cálculo do Momento fletor em torno de z na seção S

Finalmente, após a determinação do esforço escolhido para todas as posições da carga ao longo da Lane, é traçado um gráfico em que a abscissa contem as posições da carga para as quais análises foram feitas e a ordenada contém os esforços escolhidos na seção escolhida devido a carga cuja orientação foi também escolhida correspondentes a cada posição contida na abscissa.

3 Resultados

De modo a avaliar a eficácia do programa desenvolvido, se optou por obter as linhas de influência de uma estrutura previamente analisada, com o uso do programa SAP2000. A estrutura escolhida para o teste é a OAE 20-Ponte sobre o rio olho d'água dos carneiros, localizada na EFC (Estrada de ferro Carajás). Comparou-se as linhas de influência obtidas com o uso do programa apresentado neste trabalho (LILAB) com as obtidas com o uso do SAP2000.

3.1 Descrição da estrutura

A OAE20 possui traçado horizontal retilíneo, executada em concreto armado "in loco", transpondo o rio Olho D'água dos Carneiro que se encontra sob a projeção do segundo, terceiro e quarto vãos da estrutura. A ponte tem comprimento total de 140,2 m e largura total de 5,85 m.

A superestrutura é constituída por cinco vãos, em apenas um único segmento hiperestático. O arranjo estrutural do tabuleiro (Figura 4), constitui-se de dois tramos de vigas principais (longarinas) enrijecidas por vigas secundárias (transversinas), apoiadas em aparelhos de apoio em neoprene fretado assentes nos pilares e no encontro E1. A ponte se encontra engastada no encontro E2. Na Figura 4 é possível notar a variação da largura das longarinas em todos os vão.

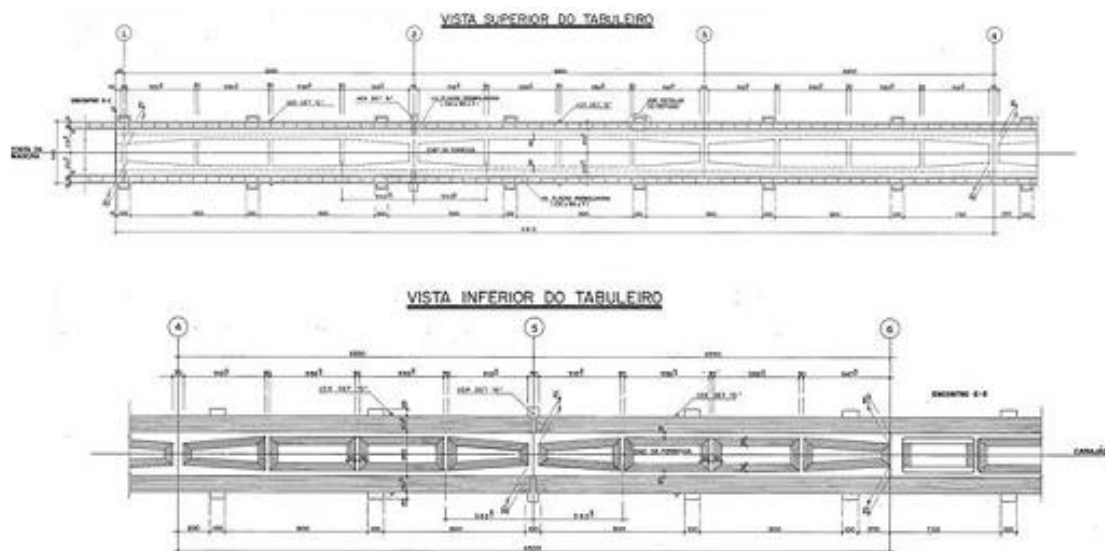


Figura 4 - Vistas superior e inferior da OAE 20

A mesoestrutura é constituída por quatro pilares de seção retangular que por sua vez são ligados a blocos de transição, de seção retangular, engastados em tubulões de concreto armado (\varnothing 1,40 m), com bases alargadas.

Os encontros são constituídos por estruturas executadas em concreto armado, com largura de 2,80 m e comprimento de 12,15 m (E1 – São Luis) e 15,55 m (E2 – Carajás). O encontro E1 possui duas células e o E2 três células, ambas preenchidas com brita. Os encontros se encontram engastados em tubulões de bases alargadas.

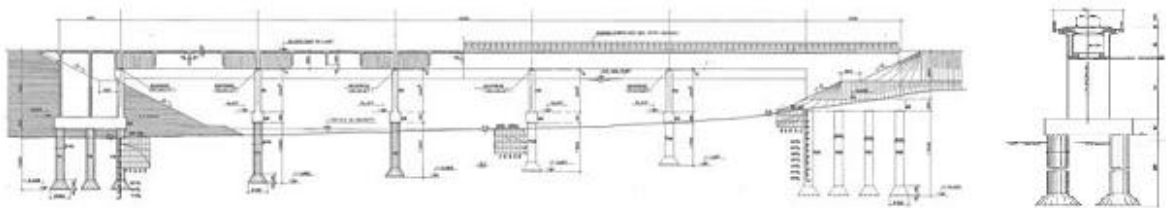


Figura 5 - Vista Lateral e Seção Transversal da OAE 20

3.2 Descrição dos Modelos

Devido a limitações do LILAB, “links” e molas foram ignorados, e as seguintes simplificações foram feitas:

- A superestrutura foi considerada perfeitamente apoiada no encontro E1 e engastada no encontro E2.
- A superestrutura está diretamente ligada aos pilares por elementos rígidos cujos comprimentos distam do centróide da seção da superestrutura até a cota o topo dos apoios citados.
- As bases dos pilares estão perfeitamente engastadas.

A Figura 6 mostra o modelo feito com o uso do programa SAP 2000.

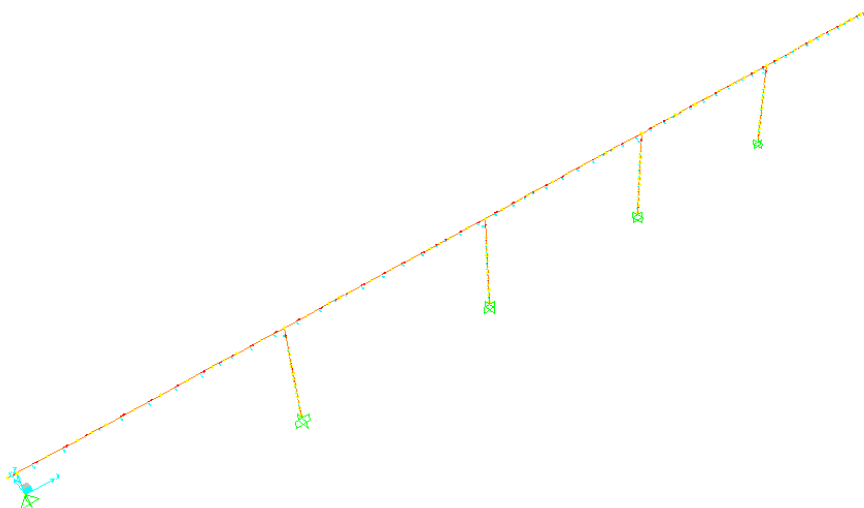


Figura 6 - Modelo da estrutura no programa SAP 2000

A mostra o modelo feito com o uso do programa SAP 2000.

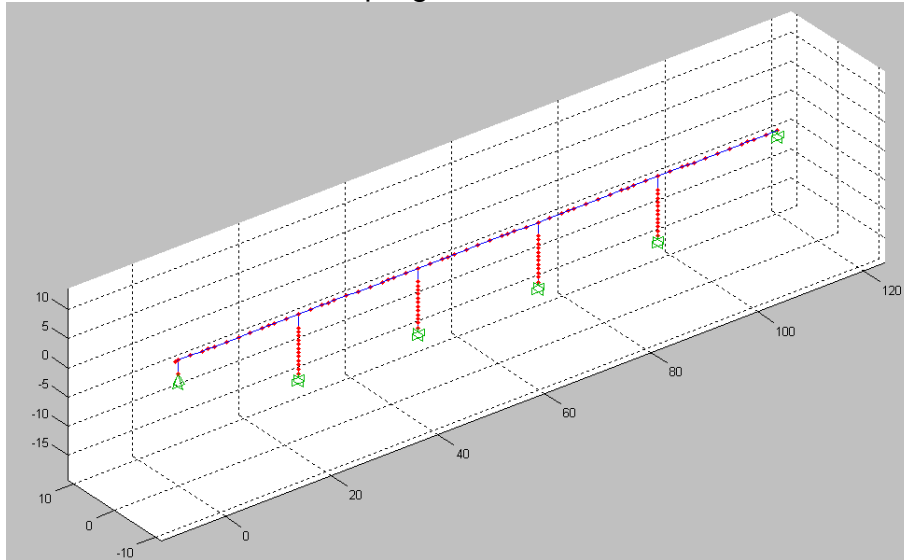


Figura 7 - Modelo da estrutura no programa LILAB

3.3 Comparações entre LI's

As linhas de influência escolhidas para fazer a comparação são aquelas usualmente obtidas nas análises da superestrutura e dos pilares. Para efeito de comparação, as seções escolhidas como representativas da superestrutura e dos pilares estão respectivamente localizadas no meio do vão central que será chamada de seção 1 e no primeiro nó livre da base do pilar 4 (o mais próximo do engaste) que será chamada de seção 2.

Para cada seção foram obtidas duas linhas de influência de momento fletor e duas de esforço cortante ocasionados por uma força móvel unitária na direção vertical e por uma força móvel unitária na direção horizontal transversal ao eixo da ponte. Especialmente para a seção 2, foi determinada uma linha de esforço torsor causada por uma carga momento em torno do eixo da ponte que percorre o vigamento principal da estrutura.

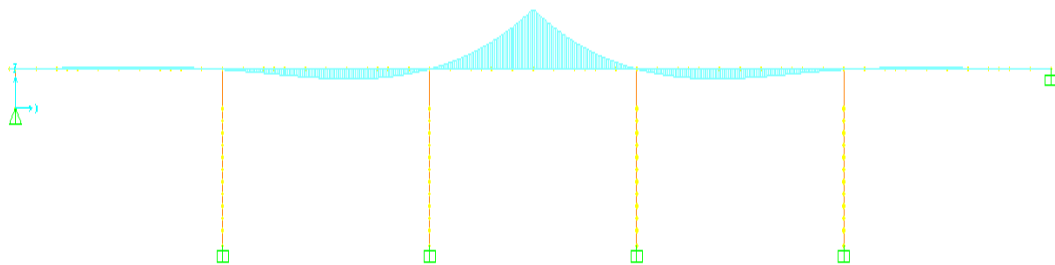


Figura 8 - LI obtida com o programa SAP2000

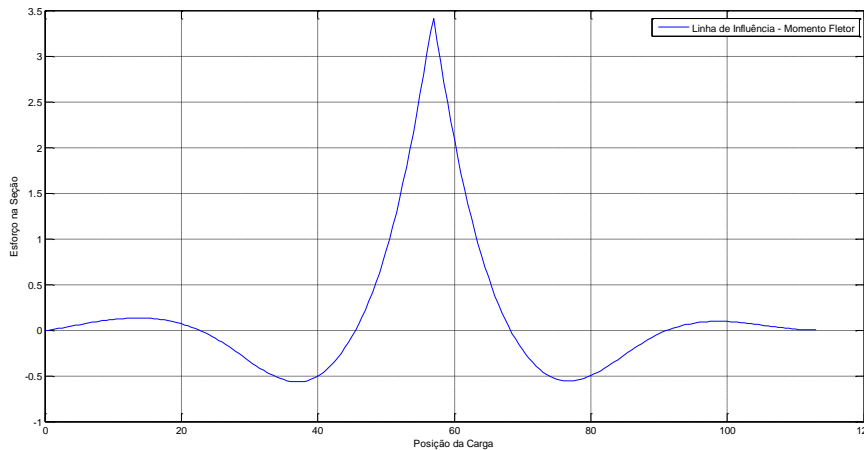


Figura 9 - LI obtida com o programa LILAB

Devido ao SAP2000 definir as ordenadas de uma LI para abscissas aleatórias “stations”, a comparação entre as linhas com o uso da estatística foi considerada inviável, a comparação visual direta entre as Linhas obtidas com os dois programas também é dificultada pela diferença na exibição dos resultados. Optou-se então por transferir os resultados dos dois programas para o programa EXCEL2007 para que as duas linhas de influência fossem exibidas em um mesmo gráfico e com o mesmo formato, de modo a tornar possível uma comparação visual entre os dois resultados.

As linhas de influência originadas por uma força vertical que percorre o vigamento principal da estrutura, obtidas com o uso do SAP2000, são calculadas por meio de uma função específica e geradas a partir da definição de um caso de carga do tipo carga móvel. Para se determinar linhas de influência geradas por uma carga horizontal que atua transversalmente ao eixo da estrutura, é possível utilizar a referida função desde que a estrutura sofra uma rotação de noventa graus em torno de seu eixo. Para uma força longitudinal ao eixo da estrutura ou cargas momento em qualquer orientação, que percorram o vigamento principal da estrutura, não é possível se determinar linhas de influência da maneira descrita acima, sendo necessário o uso de um método que pode ser bastante exaustivo. Este método consiste na aplicação de cargas unitárias ao longo do vigamento da ponte, sendo que para cada carga é criado um caso de carga, de modo que após o modelo ser rodado, é obtida uma tabela que relaciona os esforços que ocorrem em um determinado elemento com seus respectivos casos de carga. Ao se relacionar a posição em que cada caso de carga se encontra com o esforço gerado por este caso de carga no elemento selecionado, tem-se uma LI.

A distinção das linhas é feita com o uso de linhas contínuas e tracejadas e por cores diferentes. A linha obtida com o programa apresentado neste trabalho terá a legenda LILAB. A legenda SAP1 será para as linhas obtidas com o programa SAP2000 usando o recurso específico para este fim, e, em certas ocasiões aparecerá a legenda SAP2 que corresponde linhas obtidas com o SAP2000 usando o método descrito acima.

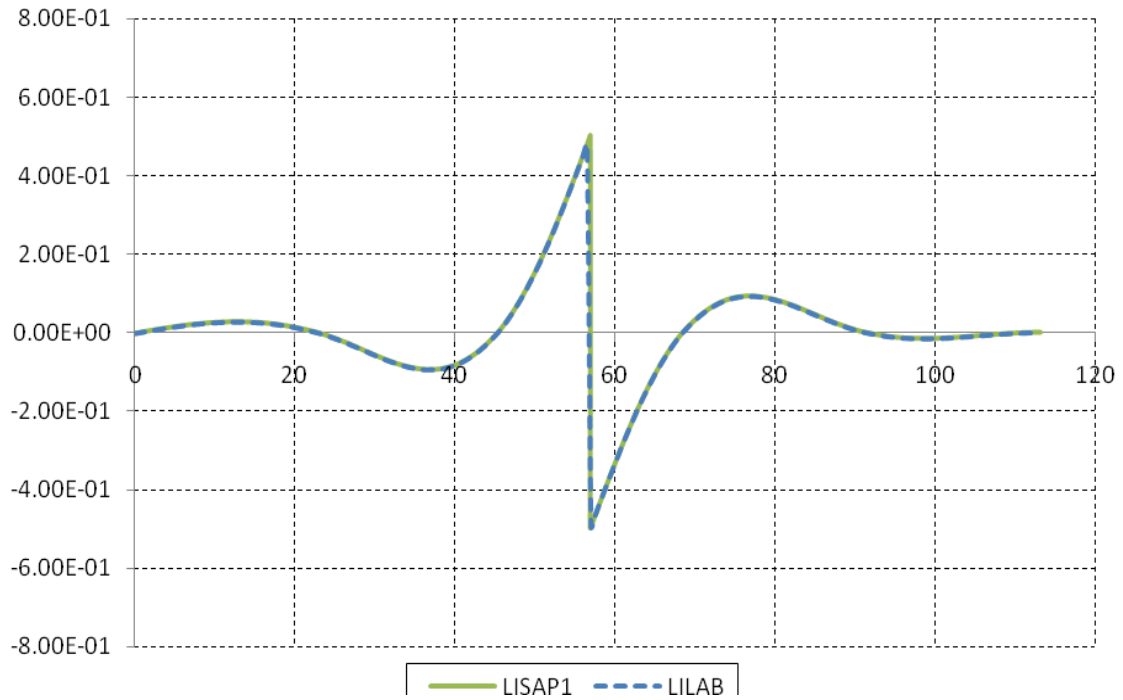


Figura 10 - LI de esforço cortante paralelo ao eixo local 2 na seção 1 causada por uma força paralela ao eixo global 2

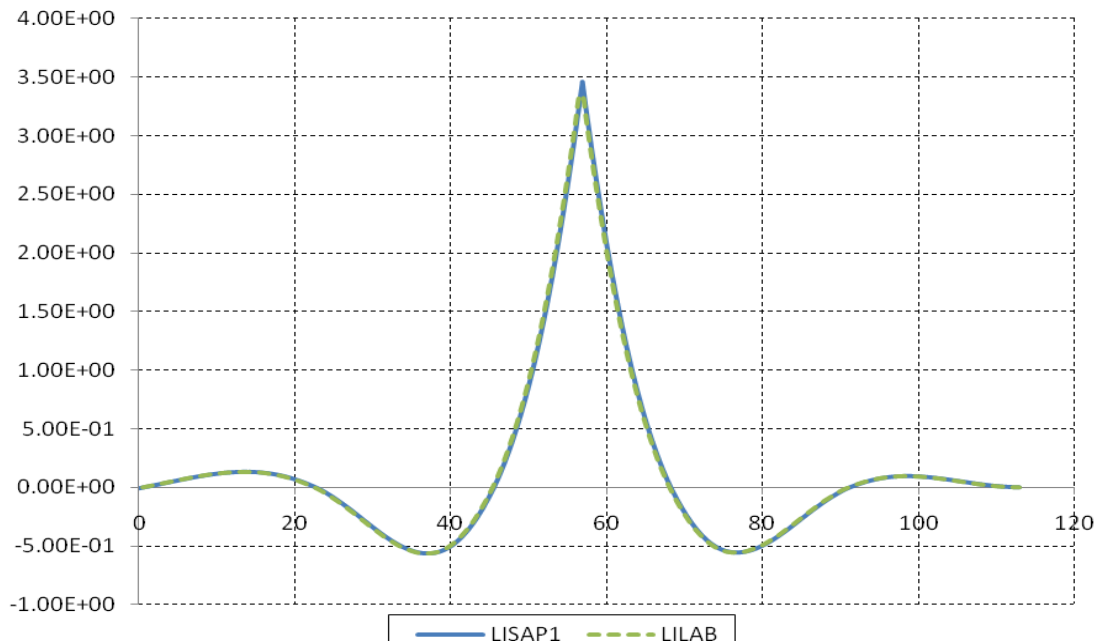


Figura 11 - LI de momento em torno do eixo local 3 na seção 1 causado por uma força paralela ao eixo global 2

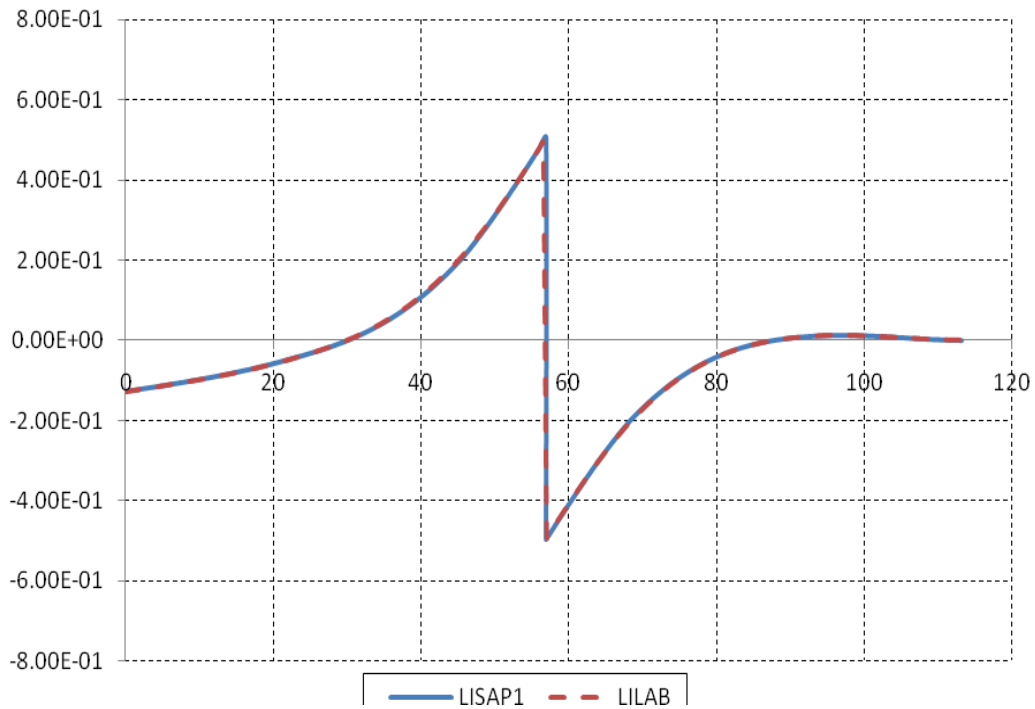


Figura 12 - LI de esforço cortante paralelo ao eixo local 3 na seção 1 causada por uma força paralela ao eixo global 3

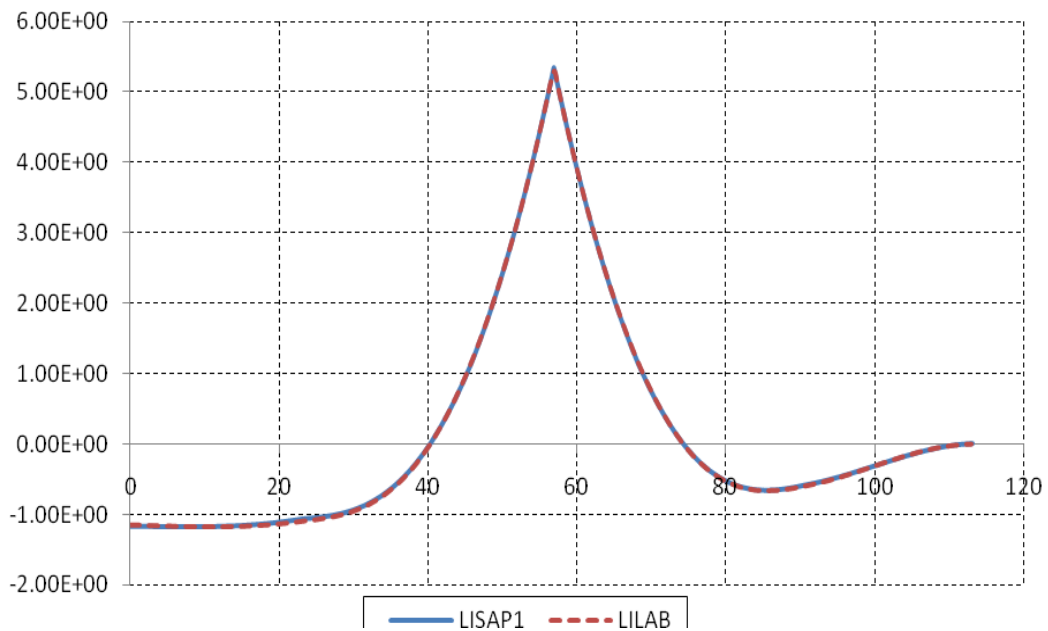


Figura 13 - LI de momento em torno do eixo local 2 na seção 1 causado por uma força paralela ao eixo global 3

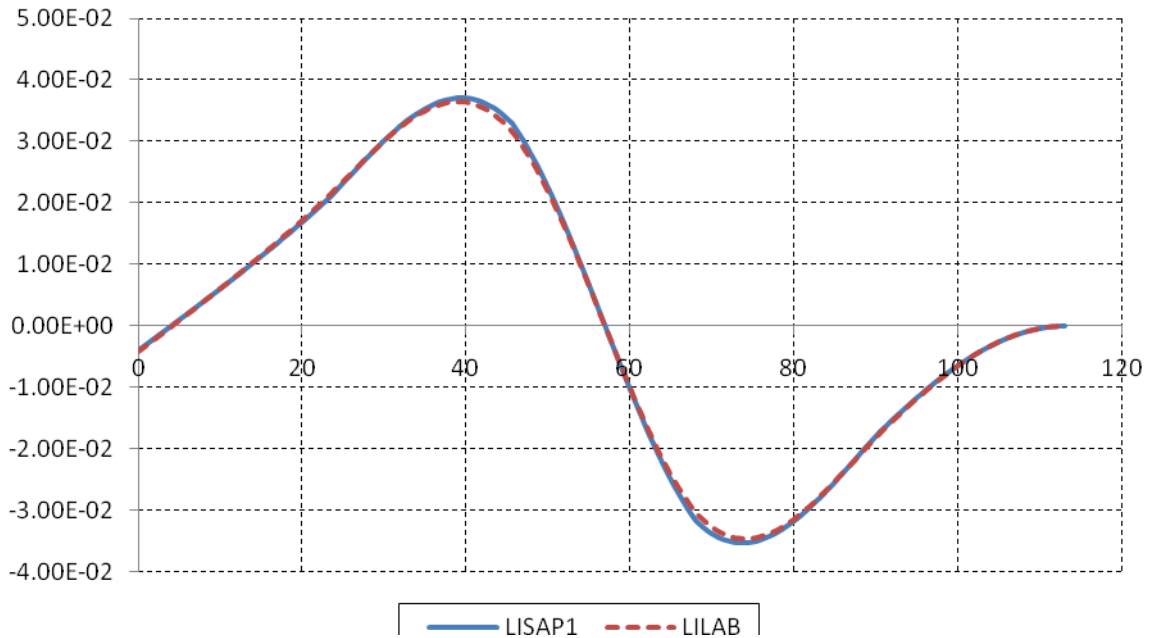


Figura 14 - de momento em torno do eixo local 1 na seção 1 causado por uma força paralela ao eixo global 3

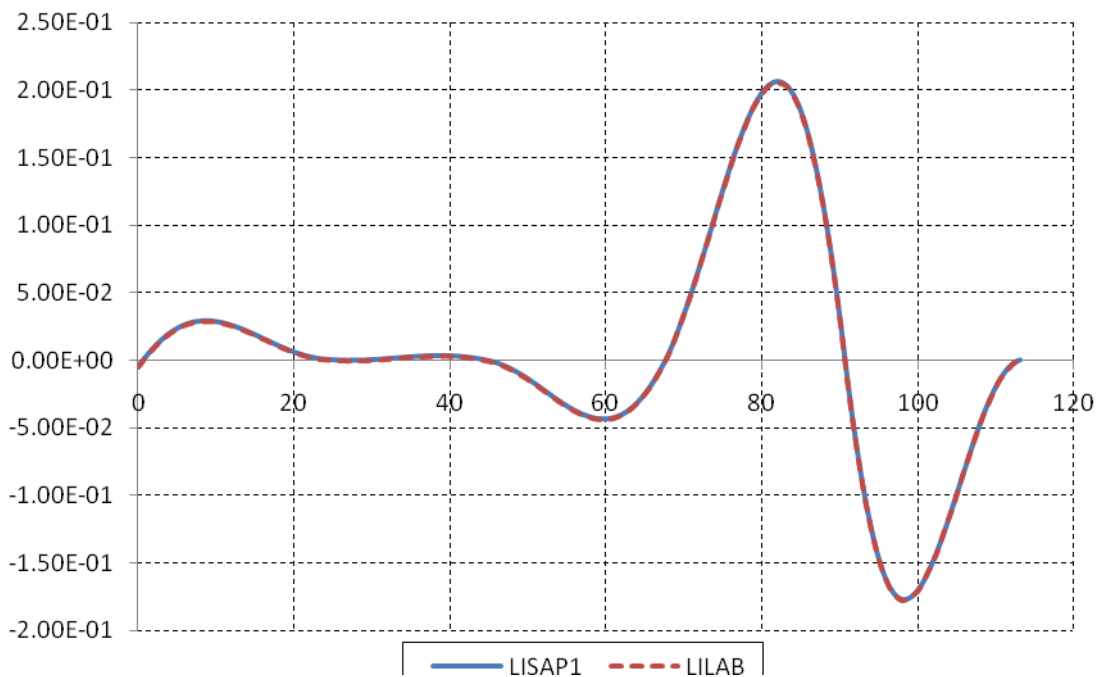


Figura 15 - de momento em torno do eixo local 3 na seção 2 causado por uma força paralela ao eixo global 2

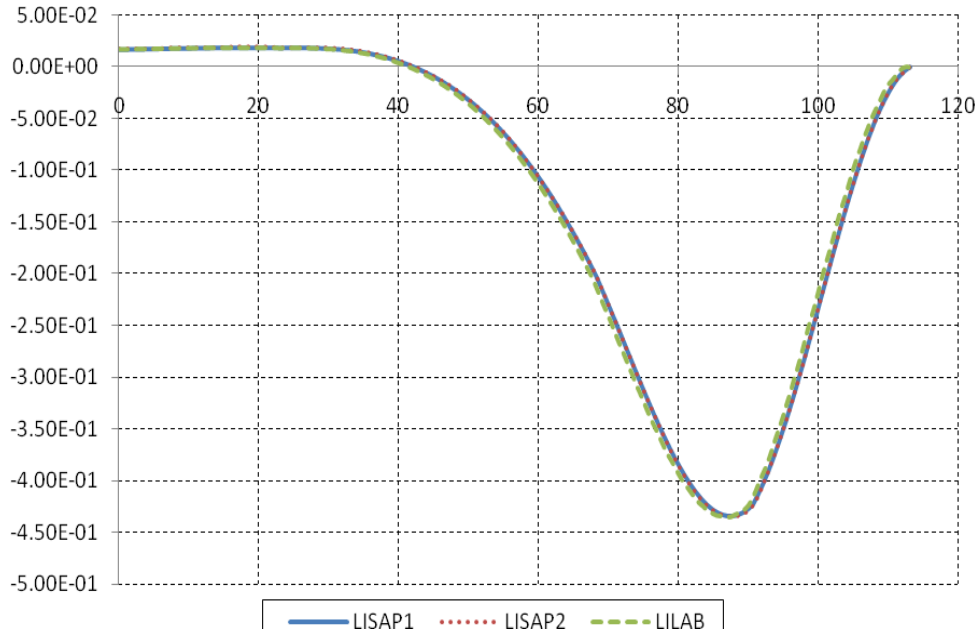


Figura 16 - LI de esforço cortante paralelo ao eixo local 3 na seção 2 causada por uma força paralela ao eixo global 3

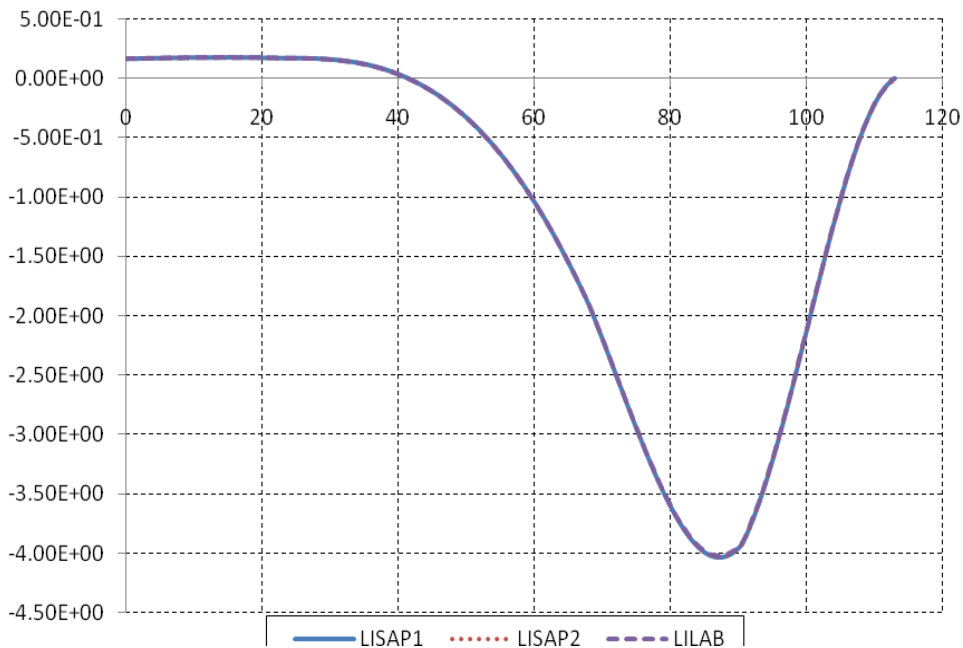


Figura 17 - LI de momento em torno do eixo local 3 na seção 2 causado por uma força paralela ao eixo global 3

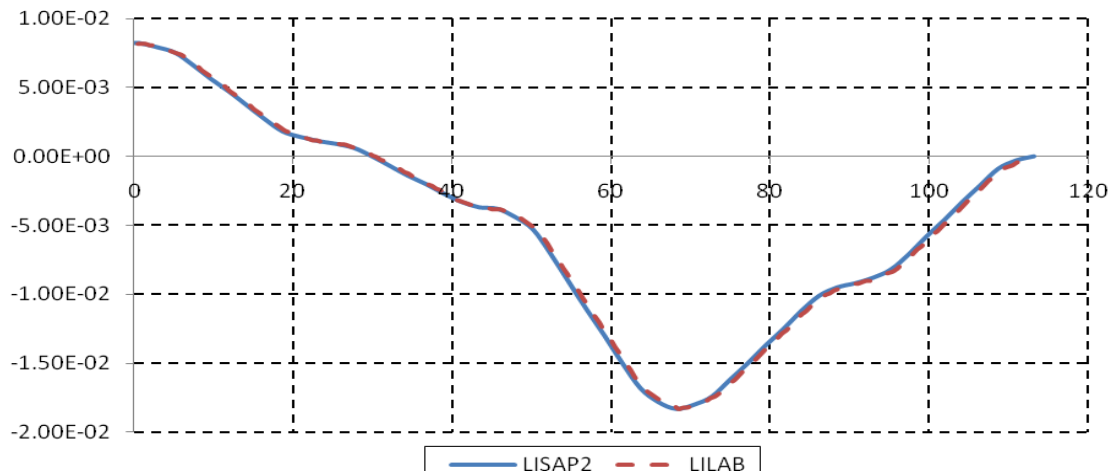


Figura 18 - LI de momento em torno do eixo local 1 na seção 2 causado por momento em torno do eixo global 1

4 Conclusões

Foi possível concluir que os objetivos deste trabalho foram alcançados uma vez que o programa computacional apresentado tem a capacidade de determinar linhas de influência de quaisquer esforços sendo estes provocados por solicitações de qualquer natureza ou orientação que podem ocorrer em um elemento de barra espacial.

Conforme se almejou com a elaboração deste trabalho, houve um considerável ganho no tempo de processamento para a obtenção de uma LI em relação ao SAP2000 com o uso de casos de cargas móveis. O tempo gasto para se determinar uma LI no programa apresentado neste trabalho chega a ser noventa vezes menor que tempo de processamento do programa comercial usado para um modelo com um caso de carga móvel. É importante ressaltar que enquanto o LILAB gera uma LI de cada vez, o SAP2000, ao processar o modelo, tem todas as linhas de influência de esforços provocados por uma carga vertical em qualquer seção de qualquer elemento do modelo. Tantos dados a disposição, no entanto, muitas vezes são dispensáveis e facilitam a ocorrência de erros humanos. Uma vez que o LILAB, assim como o SAP2000 permite o uso de elementos de barra com seção transversal variável, é importante que se faça referência à interpolação de propriedades geométricas e dos materiais das seções que variam ao longo dos elementos dada a influência que esta tem sobre os resultados. No programa apresentado neste trabalho, as propriedades citadas são interpoladas linearmente. Já o SAP2000, além da interpolação linear, utilizada na comparação de resultados, apresenta outras duas formas de interpolação, a quadrática e a cúbica. Para elementos ao longo dos quais as seções variam apenas em sua largura, o que de certa forma ocorre na maioria das pontes ao longo da EFC, a interpolação linear é apropriada. Finalmente, cabe ressaltar que o programa apresentado encontra-se em desenvolvimento para permitir uma modelagem numérica mais realista e para abranger um maior número de estruturas, como por exemplo, pontes em arco e/ou curvas.

2 Referências

AZEVEDO, A. F. M, **Método dos elementos**. Texto didático, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal, 2003.

AMADOR, S.D.R.; DE SOUZA, R.M. **Elementos Finitos de Barras Formulados Pelos Métodos dos Deslocamentos e Forças para Análise Linear Estática e Dinâmica**, Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Pará, Belém, 2002.

DE SOUZA, R.M. **Análise Matricial de Estruturas**. Notas de Aula (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Pará, Belém, 2008.

DE SOUZA, R.M. **Pontes**. Notas de Aula (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Pará, Belém, 2009.

DE SOUZA, R.M. **Teoria das Estruturas II**. Notas de Aula (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Pará, Belém, 2007.

MARTHA, L.F, **O método da rigidez direta sob um enfoque matricial**. Texto didático, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de engenharia civil, Rio de Janeiro, RJ, 1993.

PFEIL W, **Pontes em concreto armado: Elementos de projeto, solicitações e Superestrutura**. Editora livros técnicos e científicos, Rio de Janeiro 1990

QUEIROZ, R. L, **Desenvolvimento de um Software com Interface Gráfica para Análise e Verificação de Pontes Ferroviárias em Concreto Armado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Pará, Belém, 2010.

QUEIROZ, R. L., **Programa para Análise e Pós-processamento Gráfico de Pontes Ferroviárias em Concreto Armado**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Pará, Belém, 2008.

SAMPAIO, R.C.; DE SOUZA, R.M. **Desenvolvimento de metodologia para avaliação da integridade estrutural de pontes e viadutos ferroviários ao longo da Estrada de Ferro Carajás**. Convenio UFPA-Vale, 2007.

SILVA, E. M. L., **Formulação e Implementação Computacional para Análise não Linear Física de Estruturas de Concreto Armado Sob o Estado Plano de Tensões, Utilizando o Método Dos Elementos Finitos**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Pará, Belém, 2010

SÜSSEKIND J. C., **Curso de análise estrutural** Volumes 1 e 2. Editora Globo, São Paulo 1997