

CONIC SEMESP

15º Congresso Nacional de Iniciação Científica

TÍTULO: DESENVOLVIMENTO DE APLICATIVO PARA AVALIAÇÃO DOS ESFORÇOS EM LAJES

CATEGORIA: CONCLUÍDO

ÁREA: ENGENHARIAS E ARQUITETURA

SUBÁREA: ENGENHARIAS

INSTITUIÇÃO: CENTRO UNIVERSITÁRIO DO INSTITUTO MAUÁ DE TECNOLOGIA

AUTOR(ES): MARIANA SILVA SERAPIÃO, GUSTAVO ELIAS KHOURI

ORIENTADOR(ES): SANDER DAVID CARDOSO JUNIOR

Realização:



Apoio:



RESUMO

As pontes são de extrema importância para a sociedade e o cálculo dos esforços em suas lajes se dá de uma forma muito trabalhosa e complicada. Isso ocorre, pois é necessário analisar o posicionamento mais desfavorável das cargas móveis por meio das superfícies de influência. A resolução deste problema se dá por programas que utilizam o Método dos Elementos Finitos, que exigem mais conhecimento e tempo. Em contrapartida, existe o método das tabelas de Rüschi no qual o problema é simplificado em tabelas, podendo agilizar a determinação dos esforços. Tendo em vista a inexistência de um aplicativo que utilize este método mais simples, o trabalho visou seu desenvolvimento a fim de auxiliar estudantes e engenheiros por otimizar e prevenir erros de projetos. O software em questão, denomina-se TRüschi, foi desenvolvido na linguagem Java com uma simples interface e de fácil compreensão. A partir dos dados inseridos pelo usuário e do trem-tipo TB-450 da NBR 7188, é exibida a tabela, os valores dos esforços devido às cargas variáveis e permanentes e seus respectivos diagramas.

Palavras-chave: tabelas de Rüschi, lajes de pontes, aplicativo, diagramas e esforços.

1. INTRODUÇÃO

As primeiras pontes foram construídas de forma empírica e com restrição dos materiais disponíveis no local. Com a evolução das técnicas na Engenharia Civil, as pontes passaram a ser projetadas a partir de cálculos que estão baseados em diferentes métodos.

Além da melhora nos cálculos, o uso de softwares em projetos de Engenharia Civil tem aumentado nos últimos anos. Isso se dá graças à otimização no serviço garantida pelo uso de aplicativos, prevenindo possíveis erros de projeto e agilizando o processo.

Neste cenário, o trabalho visa o desenvolvimento de um aplicativo em linguagem *Java* para o cálculo de esforços em lajes de pontes. O software em questão possui disponibilização gratuita online e interface simples, possibilitando seu uso por estudantes e engenheiros sem a necessidade de um curso.

A partir do método da elasticidade desenvolveram-se processos de cálculo como a superfície de influência. Esta ilustra a variação dos esforços em uma estrutura a partir do posicionamento de uma carga vertical unitária em diferentes locais. O estudo detalhado dessas superfícies gerou os ábacos de Homberg, que permitem o cálculo dos momentos nas lajes de pontes.

Tendo como base os ábacos e fixando as condições de contorno das lajes para os trens-tipo da norma alemã DIN-1072 foram criadas as tabelas de Rüschi. As tabelas foram um grande avanço em relação aos ábacos de Homberg, por garantirem uma maior precisão e facilitarem o encontro dos esforços, sendo uma ferramenta fundamental para a determinação das solicitações em lajes.

2. OBJETIVOS

O trabalho tem como objetivo o estudo do cálculo de esforços em lajes de pontes pelas tabelas de Rüsç e o desenvolvimento e disponibilização de um aplicativo para automatizar o processo por este método.

3. METODOLOGIA

Inicialmente foi feita a maior parte da pesquisa de referência do assunto abordado em apostilas de estudo, teses, dissertações, artigos, trabalhos de conclusão de curso e livros. Com isso foi analisado e separado o material mais coerente com o tema.

Na próxima etapa, foi estudada a linguagem *Java*, por ser uma ferramenta imprescindível para a elaboração do programa. Simultaneamente com o curso foram desenvolvidas as etapas para o cálculo dos esforços em lajes de pontes pelo método de Rüsç de acordo com a NBR 7188:2013 e NBR 7187:2003.

Finalizado o curso foi projetado o layout do aplicativo de forma clara e simples para fácil uso e compreensão de seus usuários, em seguida foi elaborado seu código. Com o software funcionando, foi analisado se o aplicativo produzido possui resultados coerentes através da comparação com os valores obtidos analiticamente. Por fim, foi redigida a parcela final do trabalho e tiradas as devidas conclusões sobre o assunto abordado.

4. DESENVOLVIMENTO

4.1 Método de Rüsç

O método de Rüsç baseia-se na utilização de suas tabelas para a determinação dos esforços em lajes de pontes. Para isto é necessário saber quais as cargas permanentes e variáveis que serão consideradas na laje.

A carga permanente **g** é composta pelo peso próprio do pavimento e peso próprio da laje, sendo o momento **M** devido à carga permanente determinado pela Equação 1, em que **k** é o coeficiente que será retirado da tabela de Rüsç e **l_x** a largura da laje analisada.

$$M = k \times g \times l_x^2 \quad (1)$$

O momento **M** devido às cargas variáveis é determinado pela Equação 2, onde φ é o coeficiente de impacto, **M_L**, **M_p** e **M_{p'}**, são os momentos fletores para **P** = 1 t e **p** = **p'** = 1 t/m², obtidos da tabela de Rüsck. Para o trem-tipo analisado, TB-450, conforme NBR 7188, o valor do peso de cada roda **P** = 75 kN, e as sobrecargas de multidão **p** e **p'** iguais a 5 kN/m².

$$M = \varphi \times (P \times M_L + p \times M_p + p' \times M_{p'}) \tag{2}$$

4.2 Tabelas de Rüsck

As tabelas de Rüsck foram desenvolvidas com o auxílio de ábacos de superfícies de influência fixando-se diferentes condições de contorno. E também utilizaram os trens-tipo da norma alemã DIN-1072, que são compatíveis aos trens-tipos brasileiros. A Figura 1 apresenta um exemplo de uma das tabelas de Rüsck.

Figura 1 – Tabela de Rüsck

Gleichlast über die ganze Platte
Für M_{xx} $k = 0,125$
Für M_y $k = 0,0131$
 $M = k \cdot g \cdot l_x^2$
oder p im t/m²; l_x in m

Brückenkategorie 30t bis 60t					Raddruck des SLW von 1,0t				Gleichlast um SLW von 11m ²							
l_x/a	M_{xx} Mitte d. freien Randes								M_y bei $x = 0, y = 0,25 l_x$				M_{xx}		M_y	
	t/a								t/a				für alle Werte t/a			
	0,125	0,250	0,50	1,0	0,125	0,250	0,50	1,0	p	p'	p	p'				
0,50	0,480	0,350	0,200	0,120	0,118	0,068	0,033	0,015	—	0,05	—	0,02	—			
1,00	0,67	0,52	0,380	225	179	110	064	034	—	20	—	04	—			
1,50	0,89	0,72	0,54	390	251	180	106	064	—	30	0,02	12	—			
2,00	1,19	1,03	0,85	58	323	261	151	109	—	50	04	26	—			
2,50	1,43	1,30	1,12	0,79	385	330	179	159	—	1,13	08	40	—			
3,00	1,68	1,54	1,38	1,03	438	386	249	217	0,10	1,80	11	59	—			
4,00	1,99	1,93	1,80	1,40	0,34	0,493	0,366	0,324	0,20	3,80	0,20	1,11	—			
5,00	2,22	2,21	2,13	1,68	62	59	46	420	0,78	6,28	33	1,79	—			
6,00	2,42	2,42	2,40	1,93	69	66	55	51	1,40	10,20	49	2,59	—			
7,00	2,59	2,59	2,59	2,13	75	73	63	58	2,40	15,60	70	3,98	—			
8,00	2,73	2,73	2,73	2,28	80	78	70	65	3,40	21,80	97	5,32	—			
9,00	2,84	2,84	2,84	2,42	84	81	76	71	4,30	28,40	1,26	7,13	—			
10,00	2,92	2,92	2,92	2,54	87	85	80	75	5,32	36,20	1,51	8,91	—			

Brückenkategorie 3t bis 12t								Hinterraddruck des LKW von 1,0t								Gleichlast um LKW von 11m ²								
l_x/a	M_{xx} Mitte d. freien Randes																M_y bei $x = 0, y = 0,25 l_x$				M_{xx}		M_y	
	t/a																t/a				für alle Werte t/a			
	0,125	0,250	0,50	1,0	0,125	0,250	0,50	1,0	L	L'	L	L'	L	L'	L	L'	p	p'	p	p'				
0,50	0,480	—	0,350	—	0,200	—	0,120	—	0,118	—	0,069	—	0,035	—	0,009	—	—	—	—	—				
1,00	77	0,010	52	0,010	380	0,010	225	0,010	185	0,026	112	0,030	067	0,027	021	0,003	—	—	—	—				
1,50	84	060	64	060	470	060	375	060	228	036	158	036	092	035	033	011	—	0,01	—	—				
2,00	91	117	83	117	58	117	50	117	259	041	190	037	118	045	043	024	0,01	04	0,01	0,01				
2,50	98	171	95	171	71	171	58	190	281	048	218	046	141	058	063	038	04	08	02	04				
3,00	1,08	260	1,02	260	85	260	67	270	312	067	241	065	163	074	081	052	10	40	05	07				
4,00	1,24	0,410	1,15	0,410	1,08	0,410	0,82	0,410	0,337	0,100	0,281	0,098	0,208	0,105	0,116	0,075	0,45	1,80	0,13	0,22				
5,00	1,38	53	1,26	53	1,22	53	0,97	52	368	149	317	128	231	134	144	097	1,09	4,24	23	42				
6,00	1,50	66	1,38	66	1,33	66	1,12	66	398	157	355	155	256	161	188	118	1,60	7,90	39	71				
7,00	1,61	77	1,48	77	1,42	77	1,24	77	423	181	381	178	321	185	224	138	2,30	12,40	65	1,14				
8,00	1,68	85	1,56	85	1,49	85	1,36	85	448	204	414	200	355	207	260	155	3,15	18,00	94	1,70				
9,00	1,74	93	1,64	93	1,54	93	1,45	92	470	224	448	224	390	227	297	171	3,90	24,50	1,24	2,30				
10,00	1,75	98	1,69	97	1,57	97	1,53	96	500	0,238	0,479	0,238	0,422	0,334	0,166	—	4,79	32,22	1,53	3,00				

Momente errechnet aus Einflußflächen nach: Ossen-Reinitzhuber (Lit. 34)
Dimensionen aller Momente: t/m/m

SLW = Schwerverkehrswagen; LKW = Leichterwagen
L = SLW bzw. LKW in der Hauptspur
L' = LKW außerhalb Hauptspur
p = Gleichlast in Hauptspur
p' = Gleichlast außerhalb Hauptspur

FONTA: RÜSCH, 1979

“A utilização das tabelas consiste de duas etapas: determinação do caso em que se encontra a laje e retirada dos coeficientes que fornecem os momentos

solicitantes das tabelas referentes ao caso determinado na 1ª etapa.” (TINOCO *et al.*,1977, p.111).

Para determinar qual tabela de Rüsç será utilizada é preciso saber as condições de contorno da laje, a relação entre os vãos e a direção do tráfego.

Seguindo o exemplo da tabela de Rüsç apresentada na Figura 1, é possível observar na parte superior desta que a tabela em questão pode ser utilizada para uma laje com borda superior indefinida, borda inferior livre, bordas direita e esquerda apoiadas, direção horizontal e $I_y/I_x = \infty$.

O próximo passo é escolher se será usada a tabela de Rüsç superior ou a inferior, para isto deve-se verificar qual o trem-tipo analisado para a laje em questão. No Brasil, segundo a NBR 7188:2013 é usual definir o trem-tipo como o TB-450 que é um veículo tipo de 450 kN ou 45 t. Logo, para esse trem-tipo, escolhe-se a tabela de Rüsç superior, que pode ser utilizada para um intervalo de 30 t a 60 t.

Feito isso, o próximo passo é retirar desta os coeficientes que fornecem os momentos solicitantes, estes podem ser permanentes e variáveis. Os coeficientes permanentes são os valores de **k** para cada tipo de solicitação presentes na parte acima da tabela de Rüsç, juntamente com os parâmetros para a escolha desta.

Os coeficientes que fornecem os momentos solicitantes variáveis por sua vez são os valores obtidos nas tabelas de Rüsç. Para determinação do **L**, os parâmetros de entrada são os valores de l_x/a e t/a , sendo **a** a distância entre as rodas do trem-tipo analisado, que no caso do TB-450 é igual a 2 m, e **t** a largura de distribuição de pressão na roda.

Enquanto para a determinação dos coeficientes **p** e **p'** é necessário saber o valor apenas de l_x/a , sendo independente de t/a .

Quando a entrada dos parâmetros t/a ou l_x/a estiver entre os valores presentes na tabela de Rüsç, os valores imediatamente maior e menor devem ser interpolados para a determinação dos coeficientes desejados. Podendo ser feita a interpolação de um ou dos dois parâmetros.

5. RESULTADOS

5.1 Programa TRüsch

O aplicativo, implementado em linguagem *Java*, foi desenvolvido para o cálculo de esforços em lajes de pontes pelo método de Rüsç. A partir dos dados inseridos pelo usuário, é exibida a tabela de Rüsç, onde são destacadas as constantes utilizadas, são determinados os esforços permanentes e variáveis e os diagramas. Além disso, o software possui a opção de gerar uma memória de cálculo em arquivo html.

5.1.1 Tela principal

O layout da tela principal está organizado para uma fácil compreensão do usuário, sendo simples a entrada de dados e clara a visualização dos resultados obtidos. Este pode ser observado na Figura 2.

Figura 2 – Layout do programa

lx/a	t/a				Para todos os valores de t/a	
	0,125	0,250	0,5	1,0	p	p'
0,5	0,118	0,083	0,041	0,02	0,0	0,0
1,0	0,171	0,129	0,078	0,061	0,0	0,0
1,5	0,266	0,216	0,175	0,12	0,0	0,05
2,0	0,332	0,29	0,25	0,195	0,0	0,1
2,5	0,399	0,357	0,318	0,264	0,0	0,27
3,0	0,452	0,415	0,37	0,33	0,3	0,53
4,0	0,56	0,52	0,485	0,44	0,8	1,11
5,0	0,65	0,62	0,58	0,53	1,25	1,79
6,0	0,74	0,71	0,67	0,63	1,65	2,9
7,0	0,82	0,79	0,75	0,7	2,0	4,5
8,0	0,87	0,85	0,81	0,76	2,4	6,3
9,0	0,91	0,89	0,85	0,8	2,75	8,4
10,0	0,94	0,91	0,87	0,82	3,12	10,55

Resultados:
Tabela Utilizada: 27
Cargas Móveis:
L=0,49
p=0,80
p'=1,11
Mxm=62,42 kN.m/m
Cargas Permanentes:
kxm=0,04
Mxm=35,76 kN.m/m

5.1.2 Tabela de Rüsçh

A determinação da tabela de Rüsçh é feita de acordo com a relação entre os lados da laje, suas vinculações e direção do tráfego. Cada esforço no qual a laje está submetida apresenta uma tabela, onde são marcadas as constantes utilizadas na determinação dos esforços. Para os casos em que a relação entre os lados da laje não está presente em nenhuma das tabelas, é possível escolher nas **Opções** entre interpolar os valores das tabelas existentes ou utilizar a mais próxima.

5.1.3 Resultados

Os esforços devido às cargas móveis são calculados a partir dos valores indicados na tabela, sendo feita a interpolação destes quando necessário. Enquanto os esforços permanentes são calculados a partir de suas constantes. Seu resultado é expresso em função da carga permanente total, o que pode ser alterado nas **Opções**. Na Figura 3 pode-se observar a tabela de Rüsçh e os resultados para o caso definido pelo usuário.

Figura 3 – Layout dos resultados

lx/a	t/a				Para todos os valores de t/a	
	0,125 L	0,250 L	0,5 L	1,0 L	p	p'
0,5	0,118	0,083	0,041	0,02	0,0	0,0
1,0	0,171	0,129	0,078	0,061	0,0	0,0
1,5	0,266	0,216	0,175	0,12	0,0	0,05
2,0	0,332	0,29	0,25	0,195	0,0	0,1
2,5	0,399	0,357	0,318	0,264	0,0	0,27
3,0	0,452	0,415	0,37	0,33	0,3	0,53
4,0	0,56	0,52	0,485	0,44	0,8	1,11
5,0	0,65	0,62	0,58	0,53	1,25	1,79
6,0	0,74	0,71	0,67	0,63	1,65	2,9
7,0	0,82	0,79	0,75	0,7	2,0	4,5
8,0	0,87	0,85	0,81	0,76	2,4	6,3
9,0	0,91	0,89	0,85	0,8	2,75	8,4
10,0	0,94	0,91	0,87	0,82	3,12	10,55

Resultados:
Tabela Utilizada: 27

Cargas Móveis:
L=0,49
p=0,80
p'=1,11
Mxm=62,42 kN.m/m

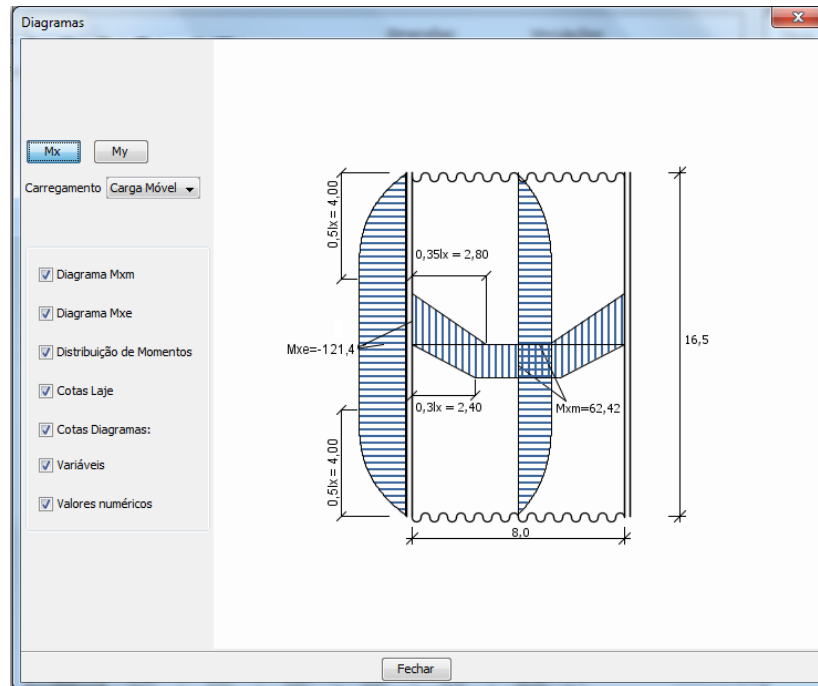
Cargas Permanentes:
kxm=0,04
Mxm=35,76 kN.m/m

FONTE: AUTORES, 2015

5.1.4 Diagramas

Em **Resultados** é possível abrir a janela **Diagramas** onde pode-se exibir os esforços para as cargas móveis e permanentes, além da variação dos esforços. A Figura 4 ilustra esta janela.

Figura 4 – Diagrama de momentos

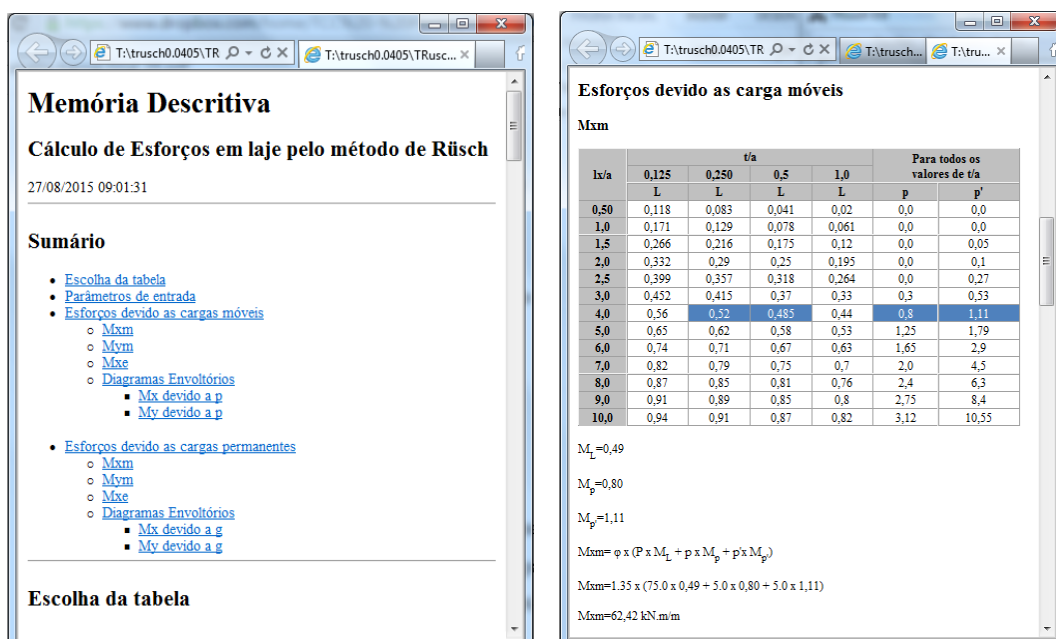


FONTE: AUTORES, 2015

5.1.5 Memória de cálculo

Em **Resultados** é possível abrir a **Memória** de cálculo em arquivo html, onde são exibidas todas as tabelas utilizadas, as contas que foram feitas para a determinação dos momentos e os diagramas. Pode-se visualizar esta memória na Figura 5.

Figura 5 – Memória descritiva

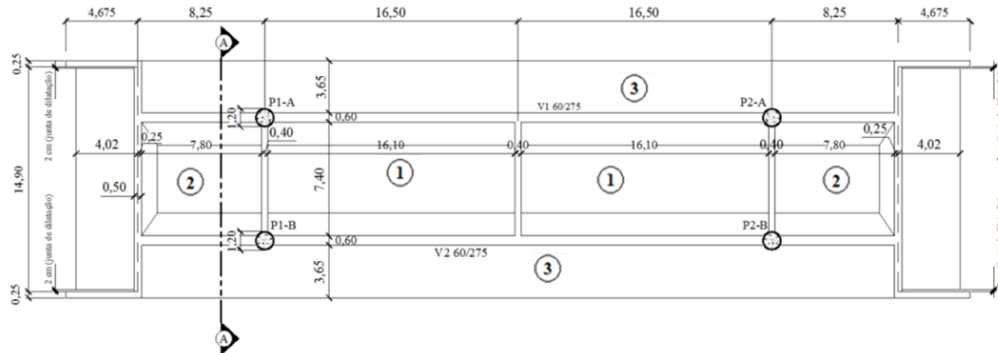


FONTE: AUTORES, 2015

5.2 Exemplo numérico

No presente trabalho estuda-se uma ponte em concreto armado sobre duas longarinas, ilustrada na Figura 6, a qual possui um comprimento total de 49,50 m, sendo o vão central de 33m e os laterais de 8,25 m. O tabuleiro possui largura total de 15,40 m estando apoiado em duas vigas longarinas.

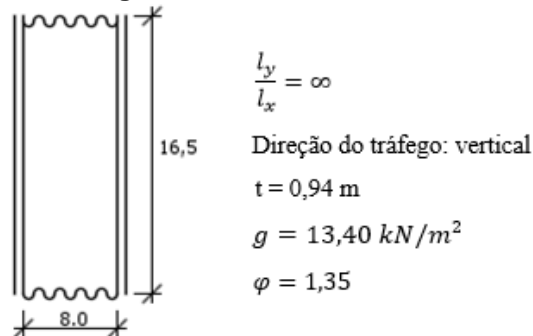
Figura 61 – Planta do tabuleiro



FONTE: CARDOSO JÚNIOR, 2015

Para a determinação da tabela de Rüsç utilizada para a laje 1 foram determinadas as condições de contorno desta, a relação entre seus vãos e a direção do tráfego, o que pode ser observado na Figura 7.

Figura 7 – Dados de entrada



FONTE: AUTORES, 2015

De acordo com o índice do livro de H.Rüsç, foram analisados quais os esforços da laje em questão e quais suas respectivas tabelas para a determinação de seus coeficientes, sendo eles: M_{xm} – tabela 27.1, M_{ym} – tabela 27.2 e M_{xe} – tabela 27.3.

Os esforços devido às cargas permanentes podem ser calculados como mostrado na Equação 1, sendo $M = k \times g \times l_x^2$, em que $k = 0,0417$ para M_{xm} , $k = 0,0069$ para M_{ym} e $k = -0,0833$ para M_{xe} .

$$M_{xm} = 0,0417 \times 13,40 \times 8^2 = 35,762 \text{ kNm/m}$$

$$M_{ym} = 0,0069 \times 13,40 \times 8^2 = 5,917 \text{ kNm/m}$$

$$M_{xe} = -0,0833 \times 13,40 \times 8^2 = -71,44 \text{ kNm/m}$$

Com os valores: $\frac{l_x}{a} = 4$ e $\frac{t}{a} = 0,47$, foram determinados os coeficientes destas tabelas e os momentos a partir destes. Para o cálculo dos esforços variáveis foi usada a Equação 2, sendo $M = \varphi \times (P \times M_L + p \times M_p + p' \times M_{p'})$.

$$M_{xm} = (75 \times 0,4892 + 5 \times 0,8 + 5 \times 1,11) \times 1,35 = 62,42 \text{ kNm/m}$$

$$M_{ym} = (75 \times 0,2684 + 5 \times 0,13 + 5 \times 0,57) \times 1,35 = 31,90 \text{ kNm/m}$$

$$M_{xe} = (75 \times 1,016 + 5 \times 0,55 + 5 \times 2,20) \times 1,35 = -121,43 \text{ kNm/m}$$

5.3 Comparação dos valores obtidos

Na Figura 8 pode-se observar os valores dos esforços obtidos com a utilização do aplicativo TRüsch.

Figura 8 – Esforços obtidos no aplicativo TRüsch

Resultados:	Resultados:	Resultados:
Tabela Utilizada: 27	Tabela Utilizada: 27	Tabela Utilizada: 27
<u>Cargas Móveis:</u> L=0,49 p=0,80 p'=1,11 Mxm=62,42 kN.m/m	<u>Cargas Móveis:</u> L=0,27 p=0,13 p'=0,57 Mym=31,90 kN.m/m	<u>Cargas Móveis:</u> L=1,02 p=0,55 p'=2,20 Mxe=-121,43 kN.m/m
<u>Cargas Permanentes:</u> kxm=0,04 Mxm=35,76 kN.m/m	<u>Cargas Permanentes:</u> kym=0,01 Mym=5,92 kN.m/m	<u>Cargas Permanentes:</u> kxe=-0,08 Mxe=-71,44 kN.m/m

FONTE: AURORES, 2015

Comparativamente, os valores obtidos analiticamente para os esforços devido às cargas móveis foram: $M_{xm} = 62,42 \text{ kNm/m}$, $M_{ym} = 31,90 \text{ kNm/m}$ e $M_{xe} = -121,43 \text{ kNm/m}$. Enquanto os esforços obtidos para os esforços devido às cargas permanentes foram: $M_{xm} = 35,762 \text{ kNm/m}$, $M_{ym} = 5,917 \text{ kNm/m}$ e $M_{xe} = -71,44 \text{ kNm/m}$.

Pode-se verificar que os valores determinados pelo software são iguais aos encontrados analiticamente

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo dos conceitos da teoria da elasticidade, superfícies de influência e ábacos de Homberg foi essencial para compreender como foram desenvolvidas as tabelas do método de Rüsç. Além disso, foi feita uma análise deste, para possibilitar a realização dos cálculos de esforços em lajes isoladas.

Elaborou-se um programa com o intuito de agilizar a determinação dos momentos em lajes através da busca pela tabela de Rüsç. Além de determinar os momentos, o software possui a função para exibir os diagramas de esforços de acordo com o livro de Rüsç. E também, gerar a memória de cálculo em arquivo html, apresentando todo o processo para a determinação dos resultados.

Feito isso, foi realizado o cálculo dos esforços nas lajes de um tabuleiro pelo software e analiticamente, de forma a conferir os resultados apresentados no aplicativo. Ressalta-se que apesar dos resultados terem sido satisfatórios, devem ser feitos mais testes no programa.

Terminadas todas as funções do programa e feitas às devidas verificações foi disponibilizada uma versão online para download. Assim, engenheiros e estudantes poderão utilizar esta nova ferramenta no cálculo dos esforços em lajes de pontes.

8. FONTES CONSULTADAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7188**: Carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas. Rio de Janeiro, 2013. 14 p.

_____. **NBR 7187**: Projetos de ponte de concreto armado e de concreto protendido – Procedimento. Rio de Janeiro, 2003. 11 p.

ARAÚJO, D. L. **Projeto de ponte em concreto armado com duas longarinas**. Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, Goiânia, mar. 1999. 154p. Apostila.

CARDOSO JÚNIOR, S. D. **Esforços nas lajes**. Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, 2015. 27 slides, color.

RÜSCH, H. **Tabelas para o cálculo de lajes de pontes**. 1979. 111p.

STUCCHI, F. R. **Pontes e grandes estruturas**. Apostila. Escola Politécnica, Departamento de estruturas e fundações, São Paulo, 2006. 103p.

TINOCO, S. S. *et al.* **Projeto e cálculo de pontes em concreto armado**. 1977. v. 2, p. 110-174.