

ANÁLISE NÃO LINEAR DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO UTILIZANDO SAP 2000 COM A METODOLOGIA DE BRANSON

Cristian Moreira de Souza (1); Ângela Costa Piccinini (2).

LEE - Laboratório Experimental de Estruturas
UNESC - Universidade do Extremo Sul Catarinense
(1) Orientando: cristian.mds@hotmail.com
(2) Orientador: acp@unescc.net

RESUMO

O objetivo deste trabalho é analisar deformação em vigas de concreto armado, considerando a não-linearidade, através do método de Branson e do método dos elementos finitos, utilizando o *software* SAP 2000, versão 18. Foram comparadas em um gráfico a curva de carga versus deformação de vigas ensaiadas no Laboratório Experimental de Estruturas do Iparque da UNESC com a curva obtida através do *software*. Para a validade da análise numérica, foi necessário inserir no programa um coeficiente de redução de inércia que representa a variação da inércia da seção transversal ao longo da viga devido à fissuração, o qual foi obtido através da metodologia de Branson programada em uma planilha do Excel. As deformações encontradas através do *software* comparadas com aquelas encontradas no método experimental, apresentaram resultados satisfatórios. Por este meio, se conclui que o programa é capaz de prever a flecha imediata.

Palavras-Chave: viga, concreto, fissuração, Branson, deformação.

1. INTRODUÇÃO

Segundo Chust (2014, p. 185), a NBR 6118:2014 define no item 13.3 que os deslocamentos excessivos dos elementos estruturais são indesejáveis por diversos motivos, que podem ser: efeito visual desagradável, deslocamentos visíveis em elementos estruturais, limitar a função de superfícies que devem drenar água, pavimentos não ficarem planos, desnivelamentos de equipamentos sensíveis, mau funcionamento de alvenarias, caixilhos, revestimentos, divisórias, entre outros. Ainda, segundo ele, os valores dos deslocamentos deverão ser determinados por meio de modelos que considerem a rigidez efetiva das seções da peça estrutural, ou seja, levem em consideração a presença da armadura, a existência de fissuras no concreto ao longo dessa armadura e as deformações diferidas no tempo.

De acordo com Soriano (2003), o método dos elementos finitos é uma eficiente ferramenta numérica de resolução de problema de meio contínuo. O método é voltado principalmente a análise de estruturas, área onde o método se originou e onde mais se desenvolveu. Hoje não se imagina projetar estruturas contínuas inovadoras e/ ou arrojadas sem fazer uso deste método. A concepção do método dos elementos finitos é muito simples, no sentido de fazer-se a divisão do domínio de um meio contínuo em um número discreto de subdomínios interligados entre si por pontos em seus contornos de maneira que o conjunto se comporte de forma semelhante ao meio contínuo original.

Segundo Salvadori (2006, p. 1-6), o uso de computadores tem se mostrado útil devido à sua capacidade de realizar milhões de operações por segundo, enquanto simultaneamente tomam decisões lógicas. Essas operações resultaram em programas que levam em consideração as leis da física, normas vigentes, o impacto do comportamento dinâmico e as propriedades dos materiais. Facilmente o computador permite variações, por tentativa e erro, de todos os parâmetros do projeto estrutural, e desse modo torna possível a pesquisa de práticas que minimizavam os custos de construção. Outra grande contribuição vem da possibilidade dos desenhos a um custo extremamente reduzido e num tempo extremamente curto, além de permitir representações tridimensionais. No entanto, o “infalível” computador é operado por seres humanos falíveis e não se pode confiar neles para se obter respostas certas o tempo todo. Nenhum engenheiro estrutural aceita o resultado de uma operação computadorizada a menos que ele esteja de acordo com aquilo que a experiência lhe diz ser a resposta correta.

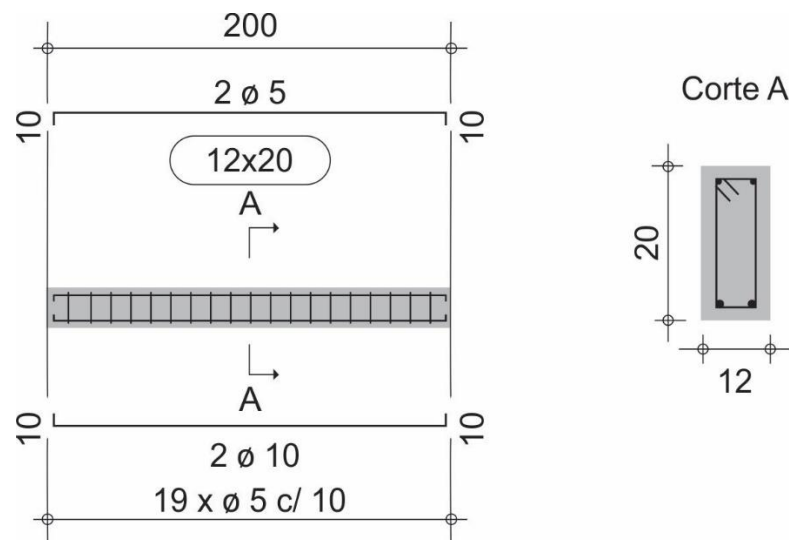
Diante da importância da consideração das deformações, em função das exigências normativas, e também da necessidade dos programas de computador reproduzirem resultados de acordo com a realidade, o objetivo deste trabalho é comparar as flechas imediatas obtidas por um programa de computador de elementos finitos, SAP 2000 versão 18, com os resultados obtidos pelos experimentos em laboratório, os quais foram realizados no LEE, Laboratório Experimental de Estruturas do Iparque, UNESC.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 MÉTODO EXPERIMENTAL

Na parte experimental deste artigo, foram utilizadas as informações do experimento realizado por Costa (2014). Ela produziu cinco vigas com seção transversal de 12x20 cm e 200 cm de comprimento. Utilizou 2Ø10 mm para armaduras de flexão, resultando em uma área de aço de 1,6 cm². Para os estribos foram utilizados Ø5 mm com espaçamento de 10 cm. As armaduras foram detalhadas de acordo com as recomendações da NBR 6118:2014 e todas foram de aço CA-50 com nervuras. O detalhamento das armaduras pode ser visto na Figura 1. Foram moldados cinco corpos de prova cilíndricos (Ø10x20 cm) para o controle da resistência à compressão do concreto. As vigas passaram pelo processo de cura ao longo de 28 dias e posteriormente encaminhadas ao LEE – Laboratório Experimental de Estruturas do Iparque – UNESC. Na mesma data dos ensaios das vigas, foram realizados os ensaios de compressão. A partir da resistência dos corpos de prova, adotou-se como resistência característica do concreto à compressão o valor de 18,8 Mpa, e tendo o correspondente módulo de elasticidade secante relativo ao agregado graúdo de basalto, 24,68 GPa.

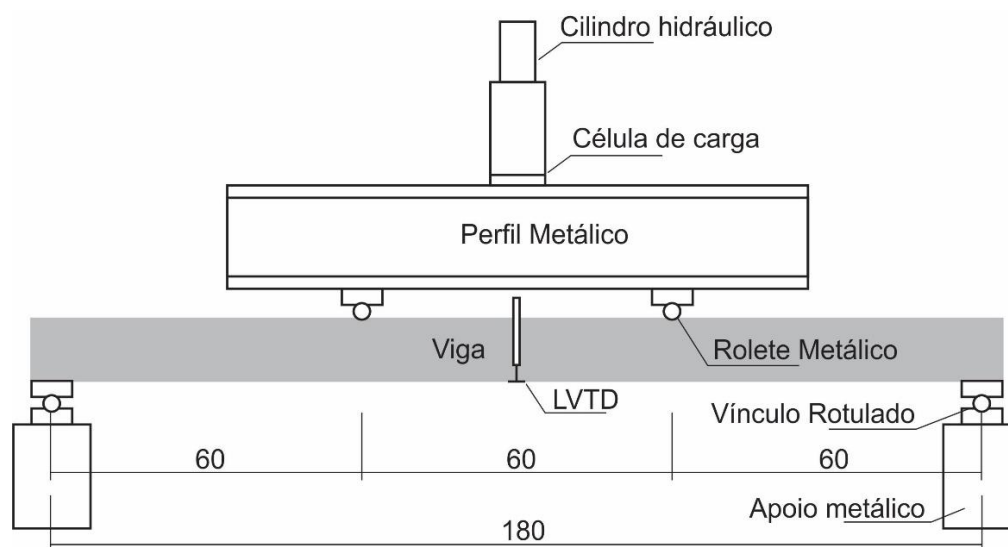
Figura 1 - Detalhamento das armaduras nas vigas



Fonte: Angélica Medeiros de Costa, 2014.

Para a realização dos ensaios de flexão a quatro pontos foi utilizado um pórtico metálico de reação, onde está um cilindro hidráulico e uma célula de carga acoplada em sua base com capacidade de leitura de 500 KN e para a medida da deflexão da viga um transdutor de deslocamento de 100 mm (LVDT) localizado no centro do vão. Todos os equipamentos ligados ao sistema de aquisição de dados Quantum X® que utiliza o software Catman Easy®, ambos da marca HBM® (Figura 2).

Figura 2 - Visão e esquema geral do ensaio



Fonte: Angélica Medeiros de Costa, 2014.

Primeiramente foram ensaiadas duas vigas de referência, nas quais foram medidos os deslocamentos e cargas necessárias para atingir cada Estádio de deformação (I, II e III). Após esse procedimento, as três vigas restantes foram levadas a 85% da carga máxima obtida nas vigas de referência e foram medidos os deslocamentos.

2.2 MÉTODO NUMÉRICO

O método escolhido de análise numérica, é basicamente dividido em duas partes. Na primeira parte foi elaborada uma planilha no Excel, para se encontrar valores e informações a serem utilizados no programa. Na segunda parte da análise numérica, estes dados foram introduzidos no programa, para serem processados e se obter as deformações que serviram para plotar o gráfico de carga versus deformação, onde,

enfim, se fez a comparação entre as deformações obtidas pelo método numérico com as deformações obtidas pelo método experimental.

2.2.1 Cálculos preliminares necessários para utilização do programa

Inicialmente, encontrou-se, para a viga do experimento, o momento máximo resistente de cálculo e a carga correspondente. Para tanto, foram aplicadas nas equações de dimensionamento do concreto armado as informações da seção transversal: as características geométricas e do concreto armado. Esta informação é essencial, pois durante a utilização do programa é onde deve-se encerrar a análise. A carga de cálculo encontrada corresponde a aproximadamente a 85% da resistência, por isto foi adotado este limite para a comparação das deformações das cinco vigas com as deformações encontradas através do programa.

Ainda na primeira parte, encontrou-se o momento de fissuração do concreto, a partir do qual a inércia da seção vai reduzindo simultaneamente ao aumento do carregamento. Esta informação é essencial que seja observada na utilização do programa, pois para momentos atuantes acima deste, no programa, é necessário aplicar um coeficiente de redução de inércia na seção transversal. Para se obter este coeficiente de redução de inércia, utilizou-se da equação ABNT NBR 6116:2014, item 17.3.2.1, onde foi feita uma adaptação da equação de Branson, que fornece uma inércia equivalente considerando as partes da viga que estão atuando no estágio I, onde a inércia é constante, e as partes que estão atuando no estágio II, onde as inércias diminuem por causa da fissuração. A planilha do Excel pode ser vista na Figura 3. Na figura 4, o gráfico destaca a variação dos coeficientes de redução de inércia em função do carregamento.

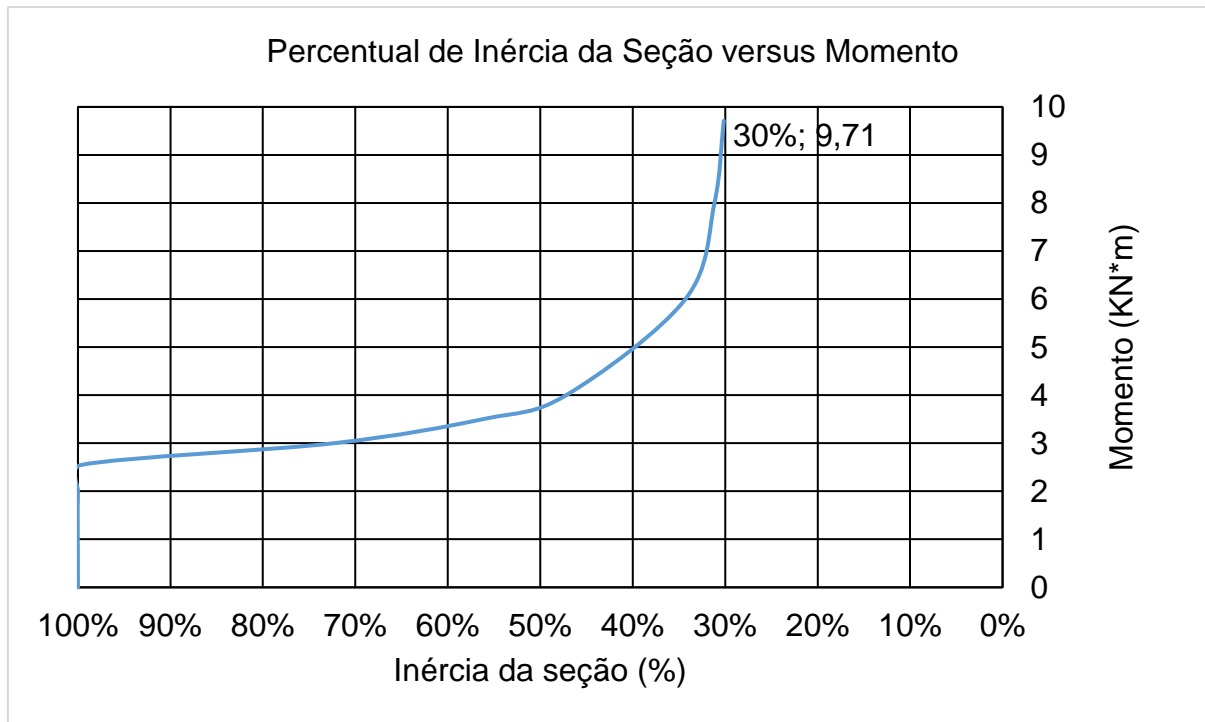
Figura 3 – Planilha de Cálculo do Excel

As (m²)	1,60E-04	Ycg (m)	0,10	Fct,m (Mpa)	2,12	a2	0,002
d (m)	0,165	Ic (m⁴)	8,00E-05	Mr (KN*m)	2,55	a3	-2,3E-04
A's (m²)	3,92E-05	x (cm)	0,0635	Pr (KN)	8,48	x''II (m)	0,050
d' (m)	3,25E-02	Md (KN*m)	9,71	Es (N/m²)	2,1E+11	x'''II (m)	-7,8E-02
Fck (Mpa)	18,80	Mk (KN*m)	6,9	Eci (N/m²)	2,91E+10	xII válido (m)	0,050
Fyk (N/m²)	5,00E+08	Pd (kN)	32,34	Ecs (N/m²)	2,47E+10	Ix,II (m⁴)	2,3E-05
Bw (m)	0,12	Pk (kN)	23,10	αe	8,5092	n	3
H (m)	0,20	α	1,50	a1	0,06	Im (m⁴)	2,4E-05

Momento (KN*m)	Carga P (KN)	Carga P/2 (KN)	Im (m⁴)	Flecha Imediata SAP2000 (mm)	Flecha Imediata SAP2000 sem fissuração (mm)	Flecha Imediata equação (mm)
0,00	0,00	0,00	8,0E-05	0,00	0,00	0,00
2,00	6,66	3,33	8,0E-05	0,36	0,35	0,35
2,55	8,49	4,25	8,0E-05	0,46	0,45	0,45
3,00	9,99	5,00	5,8E-05	0,74	0,52	0,72
3,50	11,66	5,83	4,5E-05	1,11	0,61	1,09
4,00	13,32	6,66	3,8E-05	1,51	0,70	1,48
6,00	19,98	9,99	2,7E-05	3,08	1,05	3,05
8,00	26,64	13,32	2,5E-05	4,54	1,40	4,48
9,71	32,33	16,17	2,4E-05	5,67	1,70	5,62

Fonte: Autor, 2016.

Figura 4 – Gráfico Percentual de Inércia da Seção Transversal versus Momento

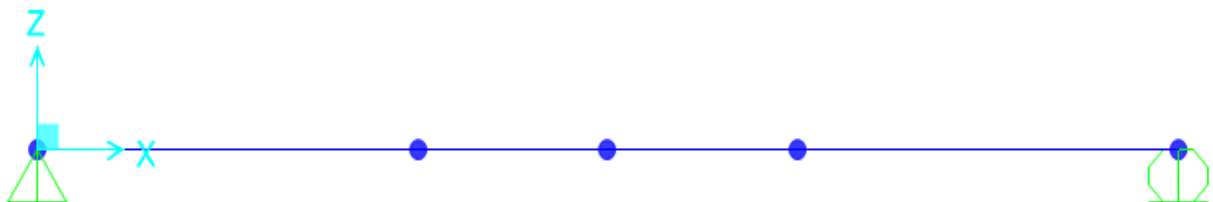


Fonte: Autor, 2016.

2.2.1 Utilização do programa.

Nesta segunda parte da análise, foi primeiramente reproduzida a viga do experimento, no programa SAP 2000, v.18. Para isso foi criada uma barra com os pontos para aplicação das cargas, os pontos de apoio com suas restrições, e o ponto central para se medir o deslocamento, como pode ser visto na figura abaixo.

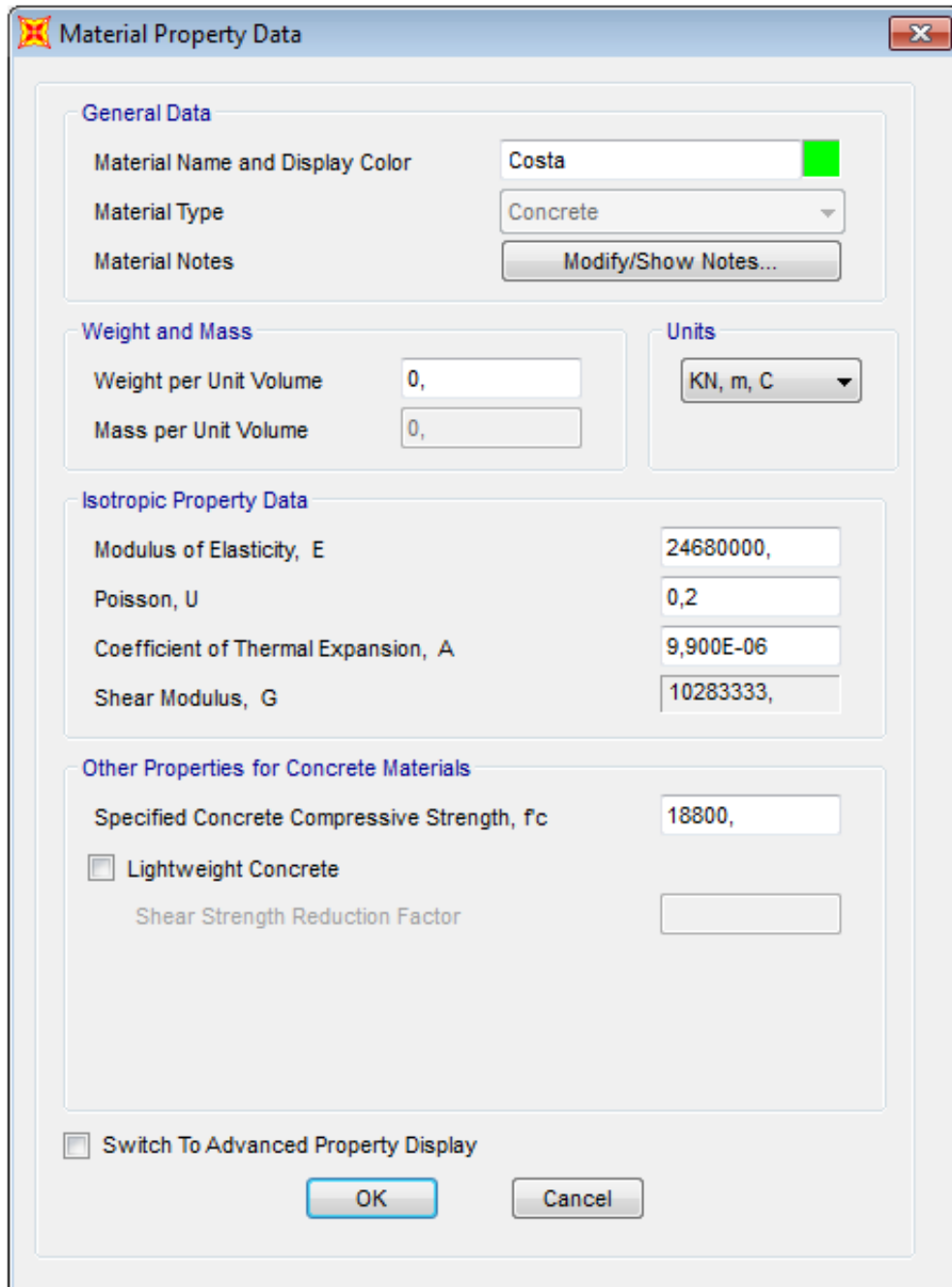
Figura 5 - Reprodução da viga do experimento.



Fonte: Autor, 2016.

Depois, foi criado um material concreto com a resistência característica do concreto a compressão e tendo o correspondente módulo de elasticidade secante relativo ao agregado gráudo de basalto, conforme pode ser visto na figura abaixo.

Figura 6 - Criação do material concreto

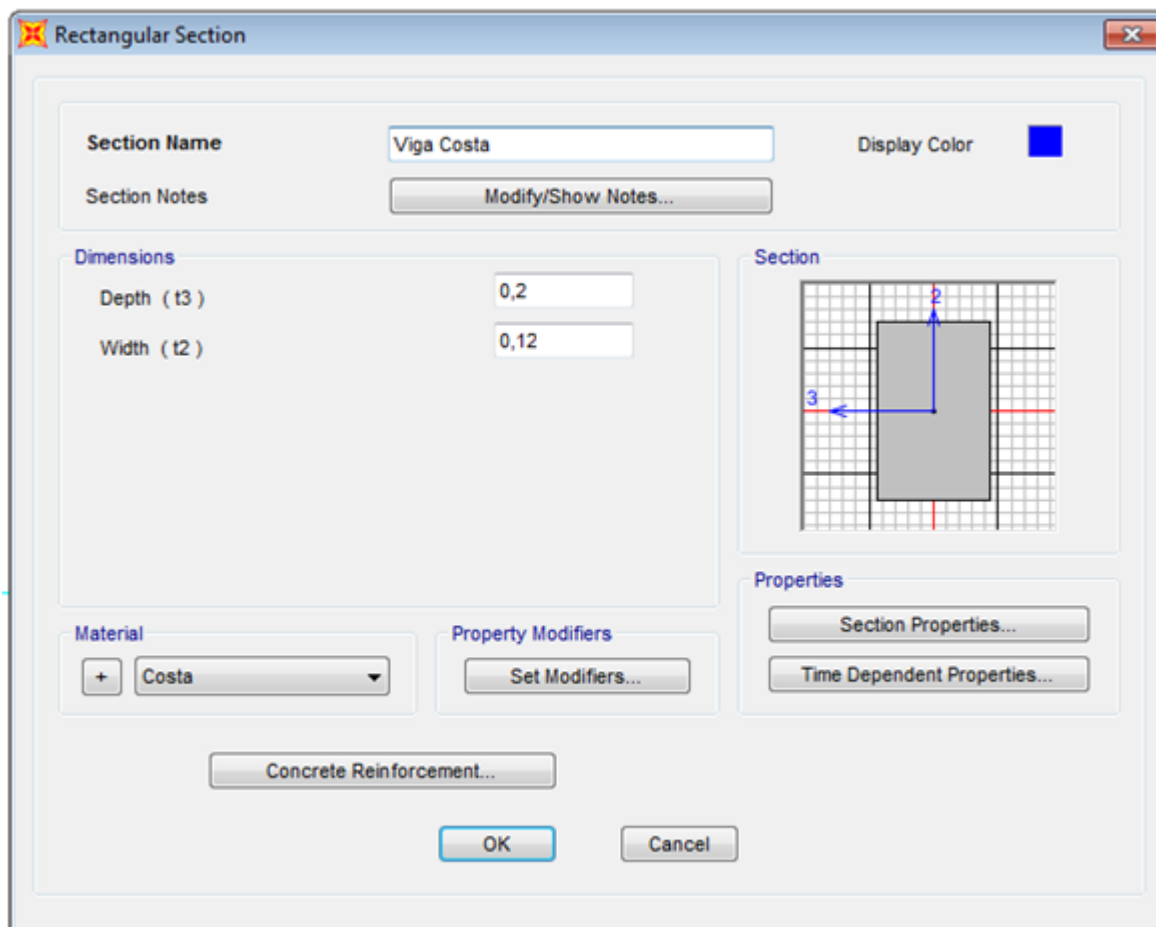


Section	Property	Value
General Data	Material Name and Display Color	Costa (Green)
	Material Type	Concrete
	Material Notes	Modify/Show Notes...
Weight and Mass	Weight per Unit Volume	0,
	Mass per Unit Volume	0,
Units	Units	KN, m, C
	Isotropic Property Data	
Isotropic Property Data	Modulus of Elasticity, E	24680000,
	Poisson, U	0,2
	Coefficient of Thermal Expansion, A	9,900E-06
	Shear Modulus, G	10283333,
Other Properties for Concrete Materials	Specified Concrete Compressive Strength, f _c	18800,
	Lightweight Concrete	<input type="checkbox"/>
	Shear Strength Reduction Factor	
Switch To Advanced Property Display: <input type="checkbox"/>		

Fonte: Autor, 2016

Em seguida foi criada a geometria da seção transversal com as características do concreto, como pode ser visto na Figura 7.

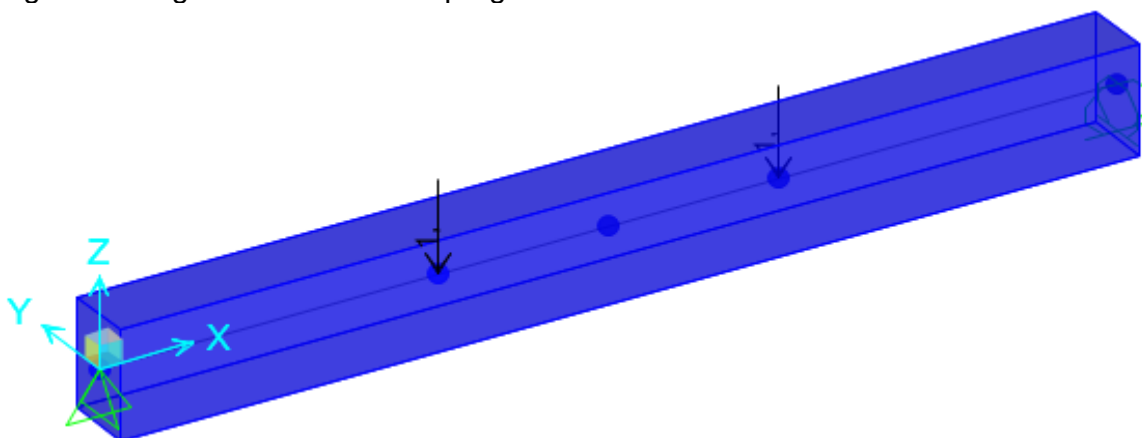
Figura 7 - Criação da geometria da seção transversal



Fonte: Autor 2016

Após, foram aplicadas nas barras as características da seção transversal, como as propriedades geométricas e do material concreto, e depois, foi criado um carregamento para os pontos de aplicação das cargas, conforme ilustrado na Figura 8.

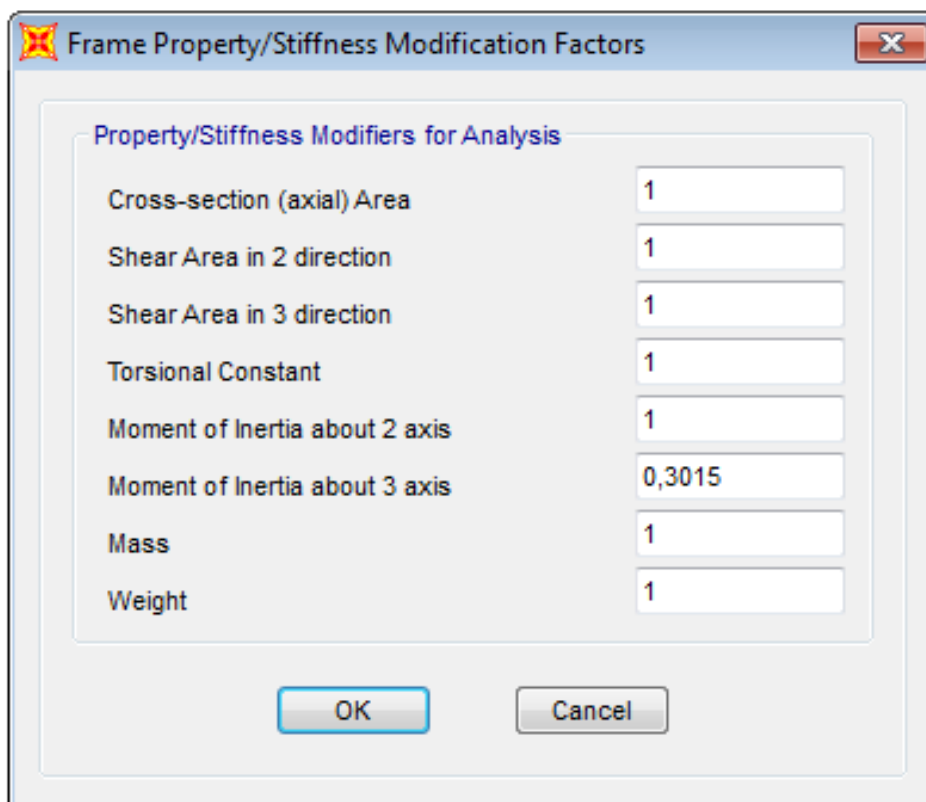
Figura 8 – Viga desenvolvida no programa



Fonte: Autor, 2016.

A partir de então, foram grandemente utilizadas as demais informações da planilha do Excel e observadas as regras que possibilitassem a análise numérica do programa. Assim sendo, aplicaram-se cargas crescentes até a carga de fissuração (P_r) e para cada carga aplicada foram medidos e anotados os deslocamentos. Até esta carga, a inércia da seção vinha sendo de 100%. Daí em diante, um novo coeficiente de redução de inércia foi aplicado à seção transversal para cada aumento de carga e as deformações foram medidas encerrando-se o processo na carga máxima de cálculo (P_d). A aplicação do coeficiente de redução de inércia pode ser vista na figura abaixo. Posteriormente foi plotado em um mesmo gráfico as informações de carga versus deslocamento dos experimentos e da análise numérica.

Figura 9 – Janela de aplicação do coeficiente de redução de inércia



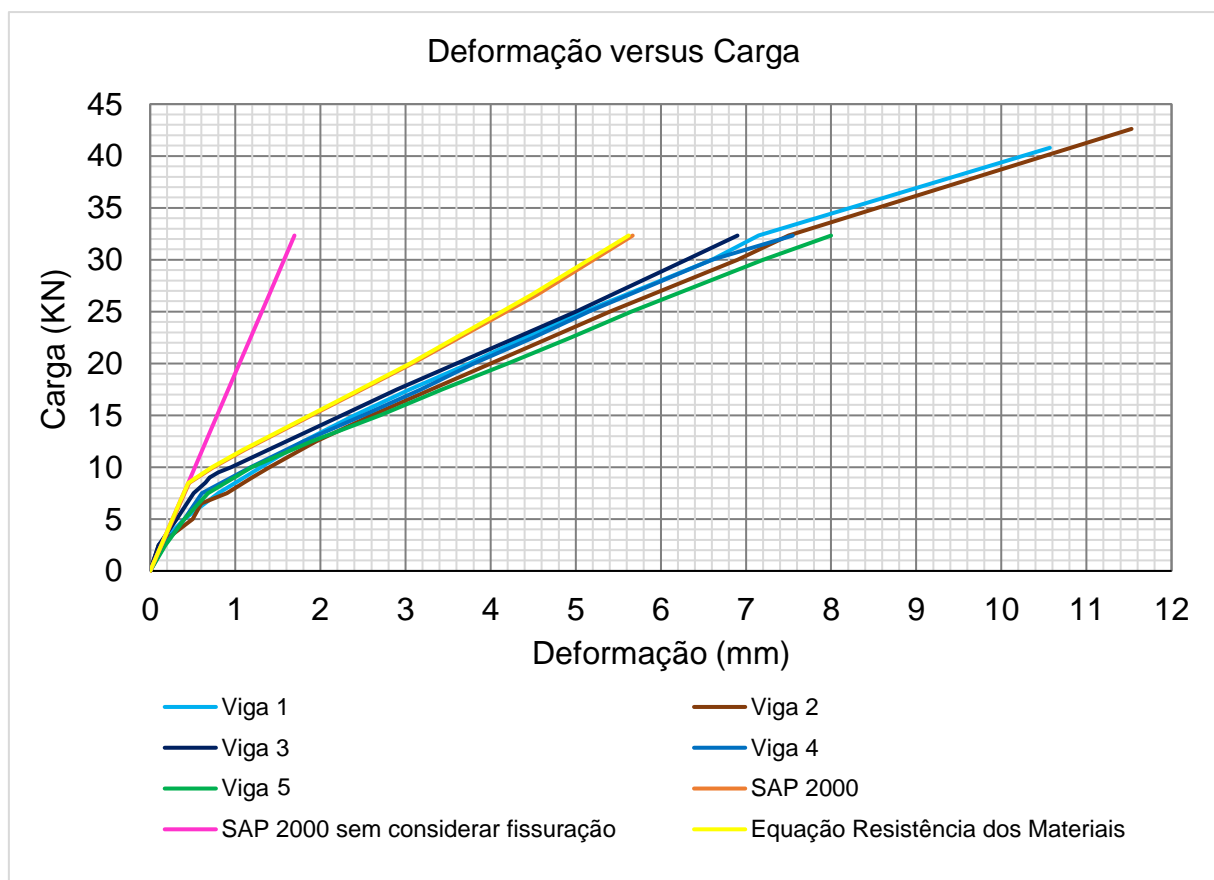
Fonte Autor, 2016.

Em seguida, foi refeito todo o processo, porém sem levar em conta a fissuração do concreto. E também foi refeito o processo, porém utilizando a equação da resistência dos materiais levando em consideração a fissuração através da metodologia de Branson.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

No gráfico da Figura 10 foram plotadas as curvas relativas às cinco vigas do ensaio experimental, a curva relativa a análise numérica que considerou a fissuração, a curva relativa a análise que não considerou a fissuração e a curva obtida através da equação de resistência dos materiais considerando a fissuração.

Figura 10 – Gráfico Deformação versus Carga



Fonte: Autor, 2016.

O gráfico demonstra que os resultados obtidos no conjunto principal de métodos adotados neste artigo, são muito similares aos encontrados pelo método experimental. Além disso, é perceptível uma grande diferença entre as deformações obtidas no ensaio experimental e as deformações obtidas pelo método que não leva em conta a fissuração. Nota-se que através da utilização da equação da resistência dos materiais, obteve-se um resultado semelhante ao apresentado pelo programa.

4. CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos, podem-se obter as seguintes conclusões:

- Apesar da necessidade de utilização da planilha do Excel, o programa é capaz de prever a flecha imediata, pois as deformações encontradas através dele comparadas com aquelas encontradas no método experimental, ficaram bem próximas.
- Foi possível conferir a validade da metodologia de Branson para representar a redução de inércia causada pela fissuração.
- A utilização do programa, sem levar em conta a perda de inércia relacionada à fissuração, mostrou-se ineficaz, pois apresentou deformações muito menores do que aquelas que realmente ocorreram no ensaio experimental.
- Foi possível comprovar também a utilidade da equação da resistência dos materiais quando utilizada com o coeficiente de redução de inércia obtidos através do método de Branson, pois os resultados fornecidos por ela foram semelhantes aos encontrados através dos ensaios experimentais.

Apesar do resultado numérico ser muito próximo ao experimental, recomenda-se estudar o porquê da diferença existente entre eles e, dentre todas as variáveis possíveis, se for o caso, propor um ajuste na equação de Branson.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: **Projeto de estruturas de concreto**. Rio de Janeiro, 2007.

CARVALHO, R.C.; FILHO, J.R.F. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado**. 4.ed. São Carlos: EdUFScar, 2014.

SORIANO, Humberto Lima. **Método de Elementos Finitos em Análise de Estruturas**. São Paulo: Editora Universidade de São Paulo, 2003.

COSTA, Angélica Medeiros de - **Avaliação do Potencial do Reforço com Chapa Colada em Vigas de Concreto Armado Pós-Fissuração**. Criciúma. 2014.

SALVADORI, Mario. **Por Que os Edifícios Ficam de Pé**. 2.ed. Brasil: Wmf Martins Fontes, 2011.

SAP 2000. **Curso Prático Interativo**. Multiplus.