

ESTIMATIVA DOS MOMENTOS DE SEGUNDA ORDEM EM EDIFÍCIOS DE CONCRETO ARMADO UTILIZANDO OS COEFICIENTES γ_z E B_2

OLIVEIRA, Danielle Meireles de

Doutora em Eng. de Estruturas,
Profª Adjunta – Deptº Eng. Materiais e Construção,
Universidade Federal de Minas Gerais
danielle@demc.ufmg.br

SILVA, Ney Amorim

Doutor em Eng. Civil (Eng. de Estruturas),
Prof. Associado – Deptº Eng. Estruturas,
Universidade Federal de Minas Gerais
ney@dees.ufmg.br

OLIVEIRA, Priscilla Meireles de

Graduada em Eng. Civil pela Universidade Federal de Minas Gerais
priscillameireles@gmail.com

RESUMO

Neste trabalho apresenta-se uma alternativa para estimar o majorador dos momentos de primeira ordem que deve ser aplicado em cada pavimento das estruturas de concreto armado, a partir dos valores obtidos para os coeficientes γ_z e B_2 , utilizados para avaliar os efeitos de segunda ordem em estruturas de concreto armado e de aço, respectivamente. Para conduzir o estudo, inicialmente um edifício de médio porte de concreto armado é processado em primeira e segunda ordem utilizando o programa ANSYS. Em seguida, são calculados os valores dos coeficientes γ_z e B_2 , bem como dos acréscimos sofridos pelos momentos de primeira ordem, quando considerados os efeitos de segunda ordem, ao longo da altura do edifício. Finalmente, a partir dos resultados obtidos, estima-se o majorador dos momentos de primeira ordem, diferenciado para cada pavimento da estrutura e calculado a partir de ambos os

coeficientes γ_z e B_2 , e avalia-se a eficiência do método simplificado de obtenção dos momentos finais utilizando o majorador estimado.

Palavras-Chave: Concreto armado, Efeitos de segunda ordem, Coeficiente γ_z , Coeficiente B_2

ABSTRACT

This paper presents an alternative to estimate the magnifier of first order moments to be applied on each storey of reinforced concrete structures, from the values obtained for the γ_z and B_2 coefficients, used to evaluate second order effects in reinforced concrete structures and in steel structures, respectively. In order to develop the study, initially a reinforced concrete building of medium height is processed, in first order and in second order, using the ANSYS software. Next, γ_z , B_2 and the increase in first order moments, when considering the second order effects along the height of the building, are calculated. Finally, from the results obtained, the magnifier of the first order moments, differentiated for each storey of the structure and calculated from both γ_z and B_2 coefficients, is estimated and the efficiency of the simplified method of obtaining final moments using the magnifier proposed is evaluated.

Keywords: Reinforced concrete, Second order effects, γ_z Coefficient, B_2 Coefficient

INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, seguindo o exemplo de outras áreas, a engenharia sofreu grandes avanços, particularmente a de projetos e a de construção civil. As técnicas de otimização no que diz respeito ao peso e à forma, o desenvolvimento de equipamentos de teste e computacionais e modelagens numéricas eficientes levaram a construções mais econômicas e esbeltas, e edifícios mais altos e arrojados.

Dessa forma, questões antes não convenientemente abordadas passaram a assumir fundamental importância no projeto estrutural. Dentre estas questões, destacam-se a análise da estabilidade e a avaliação dos efeitos de segunda ordem.

Quando o estudo do equilíbrio da estrutura é efetuado considerando a configuração deformada, ocorre a interação entre as forças existentes e os deslocamentos, o que promove o aparecimento de esforços adicionais. Nestas condições, surgem os denominados efeitos de segunda ordem. Estes efeitos podem ser extremamente importantes e significativos em algumas estruturas; em outras, não precisam ser levados em conta.

Caso os efeitos de segunda ordem sejam significativos, deve-se realizar uma análise de segunda ordem. Sendo esta análise muitas vezes incompatível com fatores limitadores como tempo e praticidade, tem-se buscado processos simplificados capazes de prever o comportamento das estruturas em segunda ordem.

Os coeficientes Y_z e B_2 , comumente empregados em estruturas de concreto armado e de aço, respectivamente, podem ser utilizados para avaliar os efeitos de segunda ordem e fornecer uma estimativa dos esforços finais de uma estrutura, desde que seus valores não ultrapassem determinados limites.

No entanto, um importante aspecto merece ser destacado em relação ao coeficiente Y_z : ao contrário do coeficiente B_2 , ele apresenta um valor único para toda a estrutura, embora, como constatado em diversos trabalhos [CARMO (1995), LIMA & GUARDA (1999) e OLIVEIRA (2002)], os efeitos de segunda ordem sofram variações ao longo da altura do edifício.

É dentro deste contexto que está inserido o presente trabalho, no qual apresenta-se uma alternativa para avaliar os esforços finais de uma estrutura, que incluem os de segunda ordem, utilizando ambos os coeficientes Y_z e B_2 . Para conduzir o estudo, um edifício de médio porte em concreto armado é analisado em primeira e segunda ordem utilizando o “software” ANSYS-9.0, e o processo simplificado de obtenção dos esforços finais é avaliado levando-se em conta a variação dos efeitos de segunda ordem ao longo da altura da estrutura.

Coeficiente Y_z

A NBR 6118 (2007) prescreve que o coeficiente Y_z , válido para estruturas reticuladas de no mínimo quatro pavimentos, pode ser determinado a partir de uma análise linear de primeira ordem, reduzindo-se a rigidez dos elementos estruturais para considerar a não-linearidade física de forma aproximada.

Para cada combinação de carregamento, calcula-se o valor de Y_z por meio da seguinte expressão:

$$\gamma_z = \frac{I}{I - \frac{\Delta M_{tot,d}}{M_{1,tot,d}}} \quad (1)$$

sendo:

- $M_{1,tot,d}$ (momento de primeira ordem): soma dos momentos de todas as forças horizontais (com seus valores de cálculo) da combinação considerada, em relação à base da estrutura, ou seja, pode-se escrever:

$$M_{1,tot,d} = \sum (F_{hid} \cdot h_i) \quad (2)$$

sendo que F_{hid} é a força horizontal aplicada no pavimento i (com seu valor de cálculo) e h_i é a altura do pavimento i .

- $\Delta M_{tot,d}$ (acréscimo de momentos após a análise de primeira ordem): soma dos produtos de todas as forças verticais atuantes na estrutura (com seus valores de cálculo), na combinação considerada, pelos deslocamentos horizontais de seus respectivos pontos de aplicação:

$$\Delta M_{tot,d} = \sum (P_{id} \cdot u_i) \quad (3)$$

sendo que P_{id} é a força vertical atuante no pavimento i (com seu valor de cálculo) e u_i é o deslocamento horizontal do pavimento i .

Se for satisfeita a condição $Y_z \leq 1,1$, a estrutura será classificada como de nós fixos e, neste caso,

os efeitos globais de segunda ordem poderão ser desprezados.

A NBR 6118 (2007) estabelece que os esforços finais (primeira ordem + segunda ordem) podem ser avaliados a partir da majoração adicional dos esforços horizontais da combinação de carregamento considerada por $0,95Y_z$, desde que Y_z não ultrapasse 1,3. No entanto, segundo o Projeto de Revisão da NBR 6118 (2000), os valores finais dos esforços poderiam ser obtidos pela multiplicação dos momentos de primeira ordem por $0,95Y_z$, também com a condição de que $Y_z \leq 1,3$. Nota-se, portanto, que o Y_z deixou de ser o coeficiente majorador dos momentos de primeira ordem, e passou a ser o coeficiente majorador das ações horizontais.

OLIVEIRA (2007) realizou uma avaliação da eficiência do coeficiente Y_z como majorador dos esforços de primeira ordem (não só dos momentos fletores, mas também das forças normais e cortantes) e como majorador das ações horizontais, para a obtenção dos esforços finais, que incluem os de segunda ordem. O estudo foi realizado para estruturas que apresentaram valores máximos de Y_z da ordem de 1,3, ou seja, para as quais, segundo a NBR 6118 (2007), o processo simplificado de avaliação dos esforços finais utilizando o coeficiente Y_z ainda é válido. Constatou-se que o coeficiente Y_z deve ser utilizado como majorador dos momentos de primeira ordem (e não das ações horizontais) para a obtenção dos momentos finais. No caso da força normal nos pilares e da força cortante nas vigas, a majoração pelo coeficiente Y_z não se faz necessária, uma vez que, para estes esforços, os valores obtidos em primeira e em segunda ordem são praticamente os mesmos.

COEFICIENTE B_2

Para a avaliação dos efeitos de segunda ordem em estruturas de aço, o AISC/LRFD (1999) adota o método aproximado de amplificação dos momentos de primeira ordem pelos fatores de majoração B_1 e B_2 . O momento fletor solicitante de segunda ordem, M_{sd} , deve, então, ser determinado por meio da seguinte expressão:

$$M_{sd} = B_1 \cdot M_{nt} + B_2 \cdot M_{lt} \quad (4)$$

sendo M_{nt} o momento fletor solicitante de cálculo, assumindo não existir deslocamento lateral na estrutura, e M_{lt} o momento fletor solicitante de cálculo devido ao deslocamento lateral do pórtico; ambos M_{nt} e M_{lt} são obtidos por análises de primeira ordem. O coeficiente de amplificação B_1 representa o efeito $P-\delta$, relacionado à instabilidade da barra, ou aos efeitos locais de segunda ordem; B_2 considera o efeito $P-\Delta$, relacionado à instabilidade do pórtico, ou aos efeitos globais de segunda ordem.

O coeficiente B_2 pode ser calculado, para cada pavimento da estrutura, como:

$$B_2 = \frac{I}{I - \frac{\Delta_{oh}}{L} \frac{\sum N_g}{\sum H_g}} \quad (5)$$

sendo $\sum N_{sd}$ o somatório das forças normais de compressão solicitantes de cálculo em todos os pilares e outros elementos resistentes a forças verticais do pavimento, Δ_{oh} o deslocamento horizontal relativo, L o comprimento do pavimento e $\sum H_{sd}$ o somatório de todas as forças horizontais de cálculo no pavimento que produzem Δ_{oh} .

Segundo SILVA (2004), se em todos os pavimentos o coeficiente B_2 não superar o valor de 1,1 a estrutura pode ser considerada pouco sensível a deslocamentos horizontais e, neste caso, os efeitos globais de segunda ordem podem ser desprezados. Quando o maior B_2 estiver situado entre 1,1 e 1,4, o método aproximado B_1-B_2 pode ser utilizado para o cálculo do momento fletor, sendo os demais esforços (força normal e força cortante) obtidos diretamente da análise de primeira ordem. Finalmente, quando $B_2 > 1,40$, recomenda-se a realização de uma análise elástoplástica rigorosa de segunda ordem. SILVA (2004)

ainda acrescenta que, caso $1,1 < B_2 \leq 1,2$, pode-se, alternativamente, calcular os momentos fletores com base em uma análise de primeira ordem realizada com os esforços horizontais majorados pelo maior B_2 .

Nota-se então que, assim como o coeficiente Y_z , o coeficiente B_2 constitui um “indicador” da importância dos efeitos globais de segunda ordem em uma estrutura.

OLIVEIRA (2007) calculou os valores de Y_z e B_2 para dez edifícios de médio porte em concreto armado. A partir dos resultados obtidos, observou-se que os valores médios dos coeficientes B_2 ($B_{2,méd}$) apresentaram boa proximidade em relação ao Y_z e que, em todos os casos, os parâmetros Y_z e B_2 forneceram a mesma classificação das estruturas.

No entanto, vale destacar uma importante diferença entre os coeficientes B_2 e Y_z : o primeiro apresenta valores diferenciados para cada pavimento da estrutura, enquanto o segundo possui um único valor - embora, como constatado em diversos trabalhos [CARMO (1995), LIMA & GUARDA (1999) e OLIVEIRA (2002)], os efeitos de segunda ordem sofram variações ao longo da altura do edifício. Isto significa que, caso o coeficiente Y_z seja utilizado como majorador dos momentos de primeira ordem, como sugere OLIVEIRA (2007), os momentos finais poderiam ser subestimados em alguns pavimentos, e superestimados em outros.

Assim, uma melhor estimativa dos momentos finais poderia ser realizada utilizando ambos os coeficientes Y_z e B_2 , que é calculado para cada pavimento da estrutura e cujo valor médio se aproxima de Y_z . O majorador dos momentos de primeira ordem seria então, diferenciado para cada pavimento i da estrutura, e dado por $(B_{2,i}/B_{2,méd}) \cdot Y_z$. Esta alternativa para levar em conta a variação dos efeitos de segunda ordem com a altura dos pavimentos nos edifícios de concreto armado será avaliada no próximo item.

APLICAÇÃO NUMÉRICA

Para conduzir o estudo, um edifício de concreto armado composto por dezesseis pavimentos [cujas características podem ser encontradas em OLIVEIRA (2007)] foi processado em primeira e segunda ordem, utilizando modelos tridimensionais no “software” ANSYS-9.0. Para a representação dos pilares e vigas foi empregado o elemento de barra “beam 4”, que apresenta seis graus de liberdade em cada nó: três translações e três rotações, nas direções X, Y e Z.

O processamento da estrutura foi realizado para as ações verticais (compostas pelas cargas permanentes e pela carga acidental ou sobrecarga) agindo simultaneamente com o carregamento horizontal [correspondente à ação do vento, nas direções paralelas aos eixos X e Y, e calculado de acordo com as prescrições da NBR 6123 (1988)]. Os coeficientes aplicados às ações, definidos a partir da combinação última normal que considera o vento como a ação variável principal, foram determinados segundo as recomendações da NBR 6118 (2007). Vale ressaltar que o processamento do edifício em segunda ordem foi realizado por meio de uma análise não linear geométrica, reduzindo a rigidez dos elementos estruturais para considerar a não-linearidade física de forma simplificada (foram adotados os valores iguais a $0,8 I_c$ para os pilares e $0,4 I_c$ para as vigas, sendo I_c o momento de inércia da seção bruta de concreto).

Resultados Obtidos

Inicialmente, com os resultados da análise em primeira ordem, foram calculados, nas direções X e Y, os valores dos coeficientes Y_z e B_2 , bem como do majorador “estimado” dos momentos de primeira ordem, diferenciado para cada pavimento i da estrutura e dado por:

$$\gamma_{est} = \frac{B_{2,i}}{B_{2,méd}} \cdot \gamma_z \quad (6)$$

sendo $B_{2,i}$ o coeficiente B_2 do pavimento i e $B_{2,méd}$ o valor médio dos coeficientes B_2 dos pavimentos.

Em seguida, a partir do processamento do edifício em primeira e segunda ordem, foi calculada a relação entre os momentos obtidos pela análise em segunda ordem e em primeira ordem (para os pilares e vigas), ao longo da altura do edifício, nas direções X e Y.

A relação entre os momentos (momento em segunda ordem/ momento em primeira ordem) pode ser denominada de majorador dos momentos de primeira ordem, “Y”, uma vez que representa o valor pelo qual os momentos de primeira ordem devem ser multiplicados para que se obtenham os momentos finais, que incluem os de segunda ordem. Na situação ideal, na qual a majoração dos momentos de primeira ordem por Y_{est} fornece os momentos finais com 100% de precisão, os valores de Y e Y_{est} devem coincidir para todos os pavimentos dos edifícios, isto é, $Y/Y_{est} = 1$ ao longo de toda a altura.

Tendo em vista as considerações apresentadas, foram construídos os gráficos mostrados nas figuras 1 e 2, que representam a variação da razão Y/Y_{est} ao longo da altura do edifício, em ambas as direções, para os pilares e vigas, respectivamente. Nestes gráficos, o eixo das abscissas corresponde à relação y/h , onde y representa a altura do pavimento considerado e h é a altura total da estrutura.

Verifica-se nas figuras 1 e 2 que a maior parte dos valores de Y/Y_{est} parece estar situada entre, aproximadamente, 0,85 e 1,10, tanto no caso dos pilares quanto no caso das vigas. Constata-se também que não é possível avaliar com precisão a variação e a distribuição da variável Y/Y_{est} a partir da simples observação das figuras 1 e 2. Assim, para uma melhor avaliação dos resultados obtidos, foi realizada uma análise estatística, utilizando o “software” MINITAB-14.

Foram calculadas as medidas de tendência central (média e mediana) e de variabilidade (desvio padrão, coeficiente de variação, mínimo e máximo) para a variável envolvida no estudo, a relação Y/Y_{est} . Os resultados obtidos encontram-se na tabela 1.

Nota-se na tabela 1 que a relação Y/Y_{est} varia de 0,81 a 1,16, sendo a média obtida igual ou inferior a 1,0, tanto para os pilares quanto para as vigas. Verifica-se também que aproximadamente 50% dos valores

de Y/Y_{est} são menores que 1,00 no caso dos pilares e 0,94 no caso das vigas. Além disso, pode-se considerar pequena a variabilidade de Y/Y_{est} , uma vez que os coeficientes de variação obtidos encontram-se entre 7% e 9%. Vale comentar que o coeficiente de variação é uma medida que expressa a variabilidade em termos relativos, comparando o desvio padrão com a média, e pode ser considerado pequeno quando não ultrapassa 30%.

Verificou-se também, analisando os resultados obtidos, que a razão Y/Y_{est} apresenta valor inferior a 1,05 em aproximadamente 72% dos casos para os pilares e 94% dos casos para as vigas. Isto significa que, para a maior parte das situações, a majoração dos momentos em primeira ordem por Y_{est} forneceria um erro máximo contra a segurança inferior a 5%.

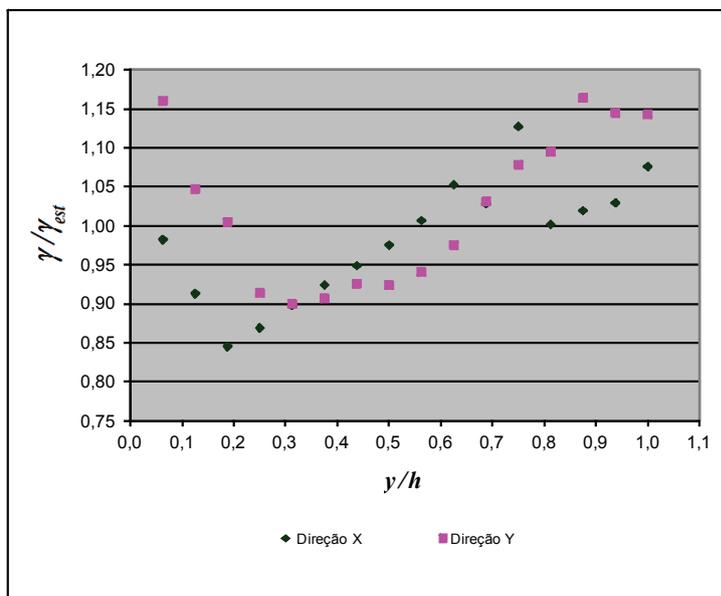


Figura 1 - Variação da razão Y/Y_{est} ao longo da altura do edifício, em ambas as direções, para os pilares.

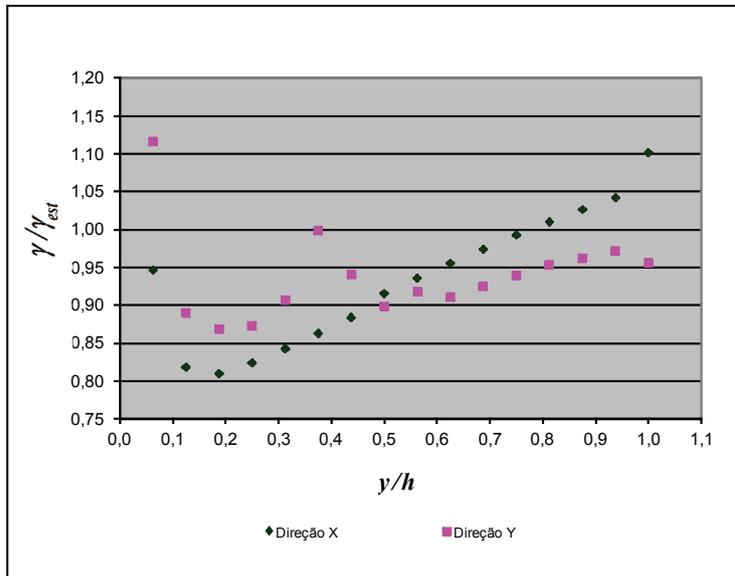


Figura 2 - Variação da razão Y/Y_{est} ao longo da altura do edifício, em ambas as direções, para as vigas.

Tabela 1 - Medidas descritivas básicas para a variável Y/Y_{est}

Variável	Tamanho da Amostra (n)	Média	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)	Mínimo	Mediana	Máximo
Y/Y_{est} Pilares	32	1,00	0,09	8,94	0,85	1,00	1,16
Y/Y_{est} Vigas	32	0,94	0,07	7,90	0,81	0,94	1,12

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho apresentou-se uma alternativa para estimar o majorador dos momentos de primeira ordem que deve ser aplicado em cada pavimento das estruturas de concreto armado, a partir dos valores obtidos para os coeficientes Y_z e B_2 , utilizados para avaliar os efeitos de segunda ordem em estruturas

de concreto armado e de aço, respectivamente. Para conduzir o estudo, um edifício de médio porte em concreto armado foi analisado em primeira e segunda ordem utilizando o “software” ANSYS-9.0, e o processo simplificado de obtenção dos momentos finais foi avaliado levando-se em conta a variação dos efeitos de segunda ordem ao longo da altura da estrutura.

Definiu-se a relação g/g_{est} , sendo “ g ” denominado de majorador dos momentos de primeira ordem (relação entre os momentos obtidos pela análise em segunda e em primeira ordem, para os pilares e vigas, ao longo da altura do edifício) e g_{est} o majorador “estimado” dos momentos de primeira ordem, diferenciado para cada pavimento i da estrutura, e dado por $(B_{2,i}/B_{2,méd}) \times g_z$.

Observou-se que a razão g/g_{est} variou de 0,81 a 1,16, sendo as médias e medianas obtidas inferiores ou iguais a 1,0, tanto para os pilares quanto para as vigas. Além disso, em aproximadamente 72% dos casos para os pilares e 94% dos casos para as vigas, a razão g/g_{est} apresentou-se inferior a 1,05. Sendo assim, para a maior parte das situações analisadas, a majoração dos momentos em primeira ordem pelo majorador estimado g_{est} forneceria um erro máximo contra a segurança inferior a 5%.

Finalmente, sugere-se, como novas pesquisas, realizar outros estudos sobre o assunto, contemplando um maior número de edifícios ou estruturas que apresentem irregularidades na geometria, como, por exemplo, mudanças bruscas de inércia e de pés-direitos entre os pavimentos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa Institucional de Auxílio a Pesquisa de Doutores Recém-Contratados da PRPq/UFMG o apoio concedido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION – AISC. **Load and resistance factor design specification for structural steel buildings**. Chicago, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto de revisão da NBR 6118 – Projeto de estruturas de concreto**. Rio de Janeiro, 2000.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123 – Forças devidas ao vento em edificações**. Rio de Janeiro, 1988.

CARMO, R.M.S. **Efeitos de segunda ordem em edifícios usuais de concreto armado**. São Carlos. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1995.

LIMA, J.S.; GUARDA, M.C.C. **Comparação entre o parâmetro alfa e o coeficiente Y_z na análise da estabilidade global de edifícios altos**. *Congresso Brasileiro do Concreto*, 41., Salvador. Anais, 1999.

OLIVEIRA, D.M. **Parâmetros de instabilidade global das estruturas de concreto armado segundo a nova NBR-6118**. Belo Horizonte. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 2002.

OLIVEIRA, D.M. **Estudo dos processos aproximados utilizados para a consideração das não-linearidades física e geométrica na análise global das estruturas de concreto armado**. Belo Horizonte. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.

SILVA, R.G.L. **Avaliação dos efeitos de 2ª ordem em edifícios de aço utilizando métodos aproximados e análise rigorosa**. Belo Horizonte. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 2004.