

CARLOS AUGUSTO BONIFÁCIO PIRES FILHO

AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO DA ANÁLISE DE SEGUNDA ORDEM
EM PÓRTICOS DE EDIFÍCIOS CORRENTES EM AÇO

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte dos requisitos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiæ*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2011

CARLOS AUGUSTO BONIFÁCIO PIRES FILHO

AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO DA ANÁLISE DE SEGUNDA ORDEM
EM PÓRTICOS DE EDIFÍCIOS CORRENTES EM AÇO

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte dos requisitos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

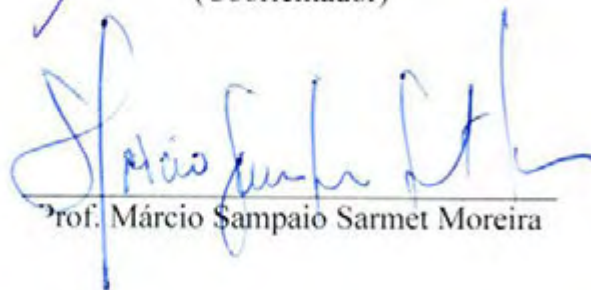
Aprovada: 01 de março de 2011



Prof. Gustavo de Souza Verissimo
(Coorientador)



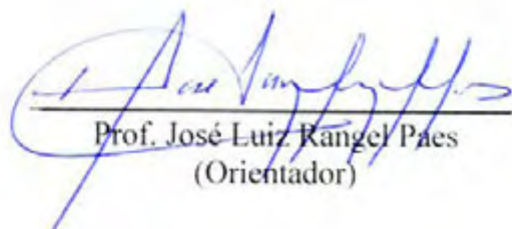
Prof.ª Rita de Cássia S. S. Alvarenga
(Coorientadora)



Prof. Márcio Sampaio Sarmet Moreira



Prof. Armando Cesar Campos Lavall



Prof. José Luiz Rangel Paes
(Orientador)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por me dar discernimento e força, condição essa, fundamental para a conclusão desse trabalho. A Ele toda honra e glória.

Aos meus pais, Miriam e Augusto, e a minha família por serem minha base e exemplos.

Ao Prof. José Luiz Rangel, exemplo de profissional e que pela convivência pude perceber que é mais que isso, um exemplo de pessoa. Agradeço pela atenção em todos os momentos, que extrapolaram o âmbito profissional.

Ao Prof. Gustavo Veríssimo, sua seriedade e serenidade servem de exemplo e foram fundamentais para o desenvolvimento desse trabalho e crescimento profissional.

Aos amigos do CENTEV-UFV, que sempre me apoiaram tornando lá uma extensão da minha casa e da minha família. Dificilmente encontrarei ambiente de trabalho mais harmonioso.

Aos professores Enivaldo Minette, Reginaldo C. Silva, Rita de Cássia, José Carlos Ribeiro, Marcio Sampaio, Carlos Alexandre, Eduardo Marques, pela convivência e auxílio.

De maneira geral, a todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa que contribuíram de alguma forma para o desenvolvimento desse trabalho.

Aos amigos e companheiros de mestrado, Tiago Albretch, André Araújo, Maila, Juliano Corrêa, Gabriela Pontes, Maria Cláudia, Gustavo Irala, Marcelo Belloni, Eliane, Luiza, Giuliana, Washington, Halley, Débora Gomide e Mariana Santos que foram fundamentais sempre, no trabalho e na companhia para o “cafezinho vespertino”.

Aos meus amigos de república Carlos Alexandre (Fubá), João Alves (GG), Caio Braga (KK), Arthur, Daniel (Kid), Paulinho e Pedrinho, por infinitas resenhas, gols e churrascos, que tornaram esse tempo mais prazeroso.

A Mel, amiga, que mesmo distante esteve sempre perto com apoio fundamental e companheirismo ímpar.

Aos amigos “de infância” que Viçosa me propiciou, amizades sinceras e espontâneas que levarei para toda a vida.

ÍNDICE

| | |
|---|------|
| RESUMO | vii |
| ABSTRACT | viii |
| 1. INTRODUÇÃO | |
| 1.1. CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES | 2 |
| 1.2. OBJETIVOS..... | 4 |
| 1.3. JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO TEMA | 4 |
| 1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO | 5 |
| 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | |
| 2.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE A ESTABILIDADE ESTRUTURAL | 8 |
| 2.2 FATORES QUE CONTRIBUEM PARA A INSTABILIDADE DE PÓRTICOS DE AÇO | 13 |
| 2.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE A ANÁLISE ESTRUTURAL | 14 |
| 2.3.1 CLASSIFICAÇÃO DA ANÁLISE QUANTO AOS MATERIAIS | 14 |
| 2.3.2 CLASSIFICAÇÃO DA ANÁLISE QUANTO AOS DESLOCAMENTOS (SOB O PONTO DE VISTAGEOMÉTRICO) | 15 |
| 2.4 CONSIDERAÇÕES E PRESCRIÇÕES DA ABNT NBR8800:1986 | 16 |
| 2.4.1 CLASSIFICAÇÃO DAS ESTRUTURAS | 16 |
| 2.4.2 VERIFICAÇÃO DE BARRAS SUBMETIDAS A ESFORÇOS COMBINADOS | 17 |
| 2.4.3 COEFICIENTE DE FLAMBAGEM (K) | 18 |
| 2.5 CONSIDERAÇÕES E PRESCRIÇÕES DA ABNT NBR8800:2008 | 21 |
| 2.5.1 CLASSIFICAÇÃO DAS ESTRUTURAS QUANTO À SENSIBILIDADE A DESLOCAMENTOS LATERAIS | 22 |
| 2.5.2 IMPERFEIÇÕES GEOMÉTRICAS E IMPERFEIÇÕES DE MATERIAL .. | 22 |
| 2.5.3 VERIFICAÇÃO DE BARRAS SUBMETIDAS A ESFORÇO COMBINADOS | 23 |
| 2.6 MÉTODO DA AMPLIFICAÇÃO DOS ESFORÇOS SOLICITANTES (MAES) | 24 |
| 2.6.1 APLICAÇÃO | 25 |

| | | |
|-----------|--|----|
| 3. | METODOLOGIA PARA DESENVOLVIMENTO DOS ESTUDOS DE CASO | |
| 3.1 | DEFINIÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DAS ESTRUTURAS SELECIONADAS..... | 30 |
| 3.2 | PROGRAMAS COMPUTACIONAIS UTILIZADOS NA ANÁLISE ESTRUTURAL | 33 |
| 3.3 | ESTRATÉGIAS PARA A ANÁLISE DE SEGUNDA ORDEM..... | 34 |
| 4. | ESTUDOS DE CASO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS | |
| 4.1. | CASO 1 - PILAR ISOLADO DE AÇO ENGASTADO NA BASE E LIVRE NO TOPO | 36 |
| | MODELO ESTRUTURAL | 37 |
| | AÇÕES ATUANTES | 37 |
| | COMBINAÇÕES DE AÇÕES | 38 |
| | ANÁLISE ESTRUTURAL | 38 |
| | VERIFICAÇÃO DA CAPACIDADE ÚLTIMA DO PILAR | 40 |
| 4.2. | CASO 2 – PÓRTICO RÍGIDO DE DOIS PAVIMENTOS | 41 |
| | MODELO ESTRUTURAL | 43 |
| | AÇÕES ATUANTES | 43 |
| | COMBINAÇÕES DE AÇÕES | 44 |
| | ANÁLISE ESTRUTURAL | 45 |
| | VERIFICAÇÃO DA CAPACIDADE ÚLTIMA DOS PILARES | 50 |
| 4.3. | CASO 3 - PÓRTICO NÃO-CONTRAVENTADO DE DOIS PAVIMENTOS | 52 |
| | MODELO ESTRUTURAL | 53 |
| | AÇÕES ATUANTES | 54 |
| | COMBINAÇÕES DE AÇÕES | 55 |
| | ANÁLISE ESTRUTURAL | 55 |
| | VERIFICAÇÃO DA CAPACIDADE ÚLTIMA DOS PILARES | 60 |
| 4.4. | CASO 4 - PÓRTICO CONTRAVENTADO DE DOIS PAVIMENTOS | 63 |
| | MODELO ESTRUTURAL | 63 |
| | AÇÕES ATUANTES | 64 |
| | COMBINAÇÕES DE AÇÕES | 65 |
| | ANÁLISE ESTRUTURAL | 65 |
| | VERIFICAÇÃO DA CAPACIDADE ÚLTIMA DOS PILARES | 68 |
| 4.5. | CASO 5 - PÓRTICO NÃO-CONTRAVENTADO DE QUATRO PAVIMENTOS | 70 |
| | MODELO ESTRUTURAL | 70 |
| | AÇÕES ATUANTES | 71 |
| | COMBINAÇÕES DE AÇÕES | 72 |
| | ANÁLISE ESTRUTURAL | 73 |
| | VERIFICAÇÃO DA CAPACIDADE ÚLTIMA DOS PILARES DO PAVIMENTO TÉRREO | 78 |

| | | |
|-----------|---|-----|
| 4.6. | CASO 6 - PÓRTICO CONTRAVENTADO DE QUATRO PAVIMENTOS ... | 81 |
| | MODELO ESTRUTURAL | 81 |
| | AÇÕES ATUANTE | 82 |
| | COMBINAÇÕES DE AÇÕES | 83 |
| | ANÁLISE ESTRUTURAL | 84 |
| | VERIFICAÇÃO DA CAPACIDADE ÚLTIMA DOS PILARES DO PAVIMENTO TÉRREO | 87 |
| 4.7. | CASO 7 - PÓRTICO RÍGIDO DE OITO PAVIMENTOS | 89 |
| | MODELO ESTRUTURAL | 89 |
| | AÇÕES ATUANTES | 91 |
| | COMBINAÇÕES DE AÇÕES | 93 |
| | ANÁLISE ESTRUTURAL | 94 |
| | VERIFICAÇÃO DA CAPACIDADE ÚLTIMA DOS PILARES DO PAVIMENTO TÉRREO | 100 |
| 4.8. | CASO 8 - PÓRTICO CONTRAVENTADO DE OITO PAVIMENTOS | 103 |
| | MODELO ESTRUTURAL | 103 |
| | AÇÕES ATUANTES | 105 |
| | COMBINAÇÕES DE AÇÕES | 107 |
| | ANÁLISE ESTRUTURAL | 108 |
| | VERIFICAÇÃO DA CAPACIDADE ÚLTIMA DOS PILARES DO PAVIMENTO TÉRREO | 112 |
| 4.9. | DISCUSSÃO DOS RESULTADOS | 113 |
| | | |
| 5. | CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES | |
| 5.1. | CONCLUSÕES GERAIS | 119 |
| 5.2. | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 122 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 123 |
| | | |
| | APÊNDICE A | |
| A.1. | CASO 1 – PILAR ENGASTADO | 128 |
| A.2. | CASO 2 – PÓRTICO RÍGIDO DE 2 PAVIMENTOS | 144 |
| A.3. | CASO 3 – PÓRTICO RÍGIDO DE 2 PAVIMENTOS | 182 |
| A.4. | CASO 4 – PÓRTICO CONTRAVENTADO DE 2 PAVIMENTOS | 219 |

RESUMO

PIRES FILHO, Carlos Augusto Bonifácio, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, março de 2011. **Avaliação da aplicação da análise de segunda ordem em pórticos de edifícios correntes em aço.** Orientador: José Luiz Rangel Paes. Coorientadores: Gustavo de Souza Veríssimo e Rita de Cássia Silva Sant'Anna Alvarenga.

Neste trabalho apresenta-se uma avaliação da aplicabilidade da análise de segunda ordem a estruturas de aço correntes. Aspectos relacionados à análise estrutural, à estabilidade estrutural e ao dimensionamento, são discutidos segundo as prescrições da ABNT NBR8800:1986 e da ABNT NBR8800:2008. A análise de primeira ordem e o método do coeficiente de flambagem (K) são avaliados e confrontados com a análise de segunda ordem e a consideração das imperfeições iniciais proposto pela ABNT NBR8800:2008. Os resultados das análises realizadas de acordo com as normas citadas anteriormente, obtidos com auxílio de um programa computacional, são comparados com os resultados obtidos por meio da aplicação do Método de Amplificação dos Esforços Solicitantes (MAES), previsto no Anexo D da ABNT NBR8800:2008. São apresentados oito estudos de caso com o intuito de comparar as respostas dos diferentes tipos de análise e comparar os resultados da verificação da capacidade última de elementos estruturais, segundo a metodologia proposta pela ABNT NBR8800:1986 e pela ABNT NBR8800:2008. Os resultados obtidos por meio do MAES foram muito próximos daqueles obtidos por meio da análise de segunda ordem aproximada (ASO), realizada com auxílio do programa computacional SAP 2000. Notou-se uma grande proximidade entre os resultados de esforços normal, cortante e momento fletor para os diferentes tipos de análise realizados (APO, ASO e ASO-MAES), confirmando a premissa de que em estruturas de pequena deslocabilidade a influência dos efeitos de segunda ordem não é relevante, ou seja, não há um aumento considerável dos esforços internos solicitantes. Com relação às verificações da capacidade última dos pilares, observou-se que a metodologia da ABNT NBR8800:2008 conduziu, sistematicamente, a um dimensionamento mais econômico. Por outro lado, a metodologia prevista na ABNT NBR8800:1986, que utiliza o conceito do comprimento efetivo de flambagem, mostrou-se sempre a favor da segurança.

ABSTRACT

PIRES FILHO, Carlos Augusto Bonifácio, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, March, 2011. **Assessment of the application of second order analysis to current steel building frames.** Adviser: José Luiz Rangel Paes. Co-advisers: Gustavo de Souza Veríssimo and Rita de Cássia Sant'Anna Alvarenga.

This work presents the assessment of the application of second-order analysis to current steel structures. Aspects related to the structural analysis, structural stability and design, are discussed according to the requirements of ABNT NBR8800:1986 and ABNT NBR8800:2008. The first-order analysis and the effective length approach are compared with the second-order analysis considering the initial imperfections proposed by ABNT NBR8800:2008. The results of the second-order analysis performed with a computer program are compared with the results obtained with the Notional Load Approach (MAES), regarded in the Annex D of ABNT NBR8800:2008. Eight case studies are presented in order to compare the responses of the different types of analysis carried out and to compare the results of the ultimate load-carrying capacity of structural members according to the methodology proposed by ABNT NBR8800:1986 and ABNT NBR8800:2008. It was found out that the results obtained with MAES were very close to those obtained with an approximated second-order analysis (ASO) performed with SAP2000. Moreover, it was noted a close proximity between the results of normal force, shear force and bending moment for the different types of analysis performed (AFO, ASO and ASO-MAES), confirming the hypothesis that to "non-sway" frames the influence of second-order effects is not relevant. Regarding the ultimate load-carrying capacity verification of columns, it was found that the ABNT NBR8800:2008 interaction equation led, systematically, to a more economical design. On the other hand, the ABNT NBR8800:1986 approach, using the effective length concept, was always conservative.

1

Introdução

Neste capítulo apresenta-se uma abordagem inicial a respeito da aplicabilidade da análise de segunda ordem em estruturas de aço. Faz-se discussão inicial sobre os tipos de análise estrutural e sobre as novas prescrições da ABNT NBR8800:2008. Definem-se os objetivos do trabalho e apresentam-se justificativas e uma avaliação sobre a relevância do tema. Por fim, apresenta-se a estrutura da Dissertação, com comentários sintéticos a respeito do conteúdo de cada capítulo.

1.1. Considerações preliminares

O cálculo de estruturas de aço envolve uma série de etapas, dentre as quais destacam-se a análise estrutural e o dimensionamento. Em estruturas de barras o objetivo da etapa de análise é obter os esforços solicitantes e os deslocamentos nos nós da estrutura, em função da geometria, dos materiais e dos carregamentos obtidos. Na etapa de dimensionamento os elementos estruturais componentes são verificados para os resultados obtidos na análise, tendo por base critérios de segurança estabelecidos em normas técnicas aplicáveis à situação específica considerada.

O que se denomina “análise estrutural” é um processo por meio do qual são obtidas as respostas da estrutura a um conjunto de ações, expressas usualmente em termos de esforços solicitantes e deslocamentos, decorrentes dos diferentes mecanismos de comportamento estrutural que são mobilizados para garantir as condições de equilíbrio de forças e compatibilidade dos deslocamentos. No contexto do projeto estrutural, o objetivo da análise é determinar os efeitos das ações nas estruturas, visando à verificação da segurança em relação a todas as situações críticas de desempenho, relativas tanto aos estados-limites últimos quanto aos estados-limites de serviço.

O comportamento de uma estrutura e a correspondente análise estrutural podem ser classificados em linear ou não-linear. Diz-se que uma estrutura tem comportamento linear quando o material tem comportamento elástico linear (linearidade física) e ocorre em regime de pequenos deslocamentos, onde a mudança de geometria pode ser desprezada e as condições de equilíbrio podem ser remetidas à posição indeformada (linearidade geométrica). Assim, um comportamento não-linear pode ter origem no comportamento físico do material ou geométrico da estrutura. Em problemas com não linearidade geométrica a influência da mudança de geometria deve ser considerada e os esforços solicitantes são obtidos da estrutura em sua posição deformada, sendo essa análise usualmente designada de análise de segunda ordem e os efeitos adicionais decorrentes da consideração da mudança de geometria, de efeitos de segunda ordem.

A análise não-linear geométrica para obtenção dos efeitos de segunda ordem deve ser usada sempre que os deslocamentos afetarem de forma considerável os esforços internos. Essa análise pode ter como base modelos (matemáticos) de comportamentos precisos, modelos aproximados ou a partir da majoração dos resultados obtidos da análise de primeira ordem.

A análise de segunda ordem é mais trabalhosa que a de primeira ordem e seu uso ainda é pouco comum para a maioria dos engenheiros no Brasil. Além de envolver uma quantidade de cálculos sensivelmente maior do que a análise de primeira ordem, geralmente demanda uma ferramenta computacional avançada para sua execução. Na análise aproximada de uma estrutura, os efeitos de segunda ordem mais importantes em relação aos esforços solicitantes são devidos aos esforços solicitantes de flexão, decorrentes da mudança da geometria em barras submetidas à esforços solicitantes de compressão e compatibilizados por efeitos globais ($P-\Delta$) e locais ($P-\delta$).

Em uma análise estrutural de primeira ordem, além de não serem computados os efeitos decorrentes dos deslocamentos sofridos pela estrutura, não são levados em consideração as imperfeições da estrutura real, decorrentes do processo de montagem e fabricação. Na ABNT NBR8800:1986, tais aspectos eram estimados na fase do dimensionamento por meio de procedimentos simplificados. Já na ABNT NBR8800:2008 os efeitos anteriores passam a ser considerados na etapa de análise da estrutura.

Historicamente, no Brasil e em diversos lugares do mundo, os projetos estruturais têm sido realizados considerando a análise simplificada de primeira ordem. Esse procedimento é adotado, em geral, principalmente em função das dificuldades de se fazer uma análise mais rigorosa, que invariavelmente demanda recursos computacionais mais elaborados. No entanto, diversos avanços recentes na área de engenharia estrutural e de computação justificam a adoção de um procedimento de análise mais rigoroso, que leve em conta os efeitos de segunda ordem.

Na última revisão da norma brasileira para o projeto de estruturas de aço de edifícios (ABNT NBR 8800:2008), foi introduzida a obrigatoriedade de se fazer uma análise de segunda ordem para determinação dos esforços solicitantes de cálculo nas estruturas. Em

princípio, entende-se que essa é uma tendência moderna e irreversível, que representa um novo estágio de conhecimento e de acesso a ferramentas computacionais adequadas. Porém, essa medida surpreende e cria dificuldades para a maioria dos engenheiros de estruturas brasileiros que, além de não estarem familiarizados com esse método de análise, muitas vezes nem sequer tiveram contato com estes conceitos durante os seus cursos de graduação.

Tendo em vista as dificuldades envolvidas na adoção do novo procedimento de análise exigido, a ABNT NBR 8800:2008 propõe um método simplificado que substitui a análise de segunda ordem, denominado “Método da Amplificação dos Esforços Solicitantes” (MAES). O MAES é um método adaptado, que simula de forma aceitável uma análise de segunda ordem. Porém, mesmo sendo simplificado, esse método gera algumas dúvidas relacionadas com a pouca prática em sua utilização.

Neste trabalho discute-se sobre a aplicabilidade da análise de segunda ordem e das novas prescrições de verificação da capacidade última de elementos estruturais de aço, segundo a ABNT NBR 8800:2008, com uma intenção mais ampla de difundir e contribuir com o entendimento e uso desses procedimentos nos projetos modernos de estruturas de aço.

1.2. Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é avaliar a aplicação da análise de segunda ordem a pórticos de edifícios correntes em aço, visando desenvolver uma visão crítica sobre o uso deste tipo de análise nas modernas normas de projeto e dimensionamento de estruturas de aço de edifícios.

Para alcançar o objetivo principal deste trabalho se estabelecem os seguintes objetivos específicos:

- realizar análises de segunda ordem em um conjunto de estruturas que representem casos correntes de estruturas de aço de edifícios de múltiplos andares;

- avaliar a influência dos efeitos de segunda ordem nos casos selecionados;
- avaliar a forma de aplicação do MAES às estruturas selecionadas e comparar as respostas das análises realizadas por este método com as obtidas por meio de análises aproximadas realizadas com auxílio de ferramenta computacional;
- comparar os resultados da verificação da capacidade última de elementos estruturais de acordo com a metodologia proposta pela ABNT NBR8800:1986 e pela ABNT NBR8800:2008, a fim de avaliar a existência ou não de uma tendência de comportamento.

1.3. Justificativa e relevância do tema

A ABNT NBR 8800:2008 tornou obrigatória a realização de uma análise de segunda ordem para o dimensionamento de estruturas de aço, o que difere substancialmente daquilo que era exigido pela ABNT NBR 8800:1986. Entretanto, pela falta de difusão mais generalizada dos conhecimentos relativos a esse método de análise, percebe-se uma dificuldade dos profissionais de engenharia em assimilar e utilizar a nova metodologia proposta.

A decisão adotada na ABNT NBR8800:2008 de exigir a realização de uma análise de segunda ordem reflete uma tendência observada no cenário internacional das normas técnicas aplicadas a estruturas de aço de edifícios.

A expectativa é de que essa nova metodologia de análise se incorpore efetivamente nos projetos de estruturas de edifícios de múltiplos andares em aço no Brasil. Nesse sentido, o presente trabalho vem ao encontro da atual necessidade de se estudar e avaliar a aplicabilidade dos procedimentos envolvidos na realização de uma análise estrutural considerando os efeitos de segunda ordem, contribuindo, assim, para a difusão desse conhecimento.

1.4. Estrutura da dissertação

No Capítulo 2 apresenta-se a fundamentação teórica para desenvolvimento do trabalho, enfocando alguns aspectos importantes sobre análise estrutural e dimensionamento de acordo com a ABNT NBR8800:1986 e a ABNT NBR8800:2008.

No Capítulo 3 descreve-se a metodologia de desenvolvimento dos estudos de caso. Apresentam-se os modelos adotados para cada caso e as considerações para análise estrutural e verificação da capacidade última dos elementos estruturais.

No Capítulo 4 apresentam-se os oito estudos de caso selecionados, analisados e verificados de acordo com as prescrições da ABNT NBR8800:1986 e da ABNT NBR8800:2008. No final de cada caso, apresentam-se gráficos comparativos dos resultados da análise e uma tabela com a comparação das verificações da capacidade última de alguns elementos estruturais de acordo com as normas supracitadas. No final desse capítulo apresenta-se uma avaliação crítica dos resultados obtidos por meio dos diferentes tipos de análise estrutural e metodologias de verificação da capacidade última para os casos estudados.

No Capítulo 5 apresentam-se as conclusões e impressões obtidas a partir dos estudos de caso mostrados no Capítulo 4. Por fim, são apontadas sugestões de temas para realização de trabalhos futuros.

No Apêndice A, apresentam-se quatro estudos de caso completos de análise estrutural e verificação da capacidade última de elementos estruturais de acordo com as prescrições da ABNT NBR8800:1986 e ABNT NBR8800:2008. Nos casos apresentados no Apêndice A estão incluídos os diagramas de esforços solicitantes para todas as análises realizadas.

2

Fundamentação Teórica

Neste capítulo apresenta-se a fundamentação teórica para o desenvolvimento do trabalho. São apresentados alguns aspectos ligados à análise estrutural, à verificação de estabilidade e à verificação da capacidade última dos elementos de pórticos submetidos a esforços combinados. Mostra-se neste capítulo uma síntese da abordagem feita a respeito dos temas supracitados pelas ABNT NBR8800:1986 e ABNT NBR8800:2008.

2.1 Considerações sobre a estabilidade estrutural

A avaliação de um elemento estrutural ou de uma estrutura deve envolver sempre a determinação de sua capacidade resistente e a verificação da estabilidade.

De acordo com o Structural Stability Research Council - SSRC (1976), os critérios para garantia da estabilidade de uma estrutura devem ser incorporados durante a etapa de análise ou de dimensionamento.

A avaliação da estabilidade de pórticos planos de aço pode ser feita segundo a teoria da estabilidade elástica ou a partir de uma análise estrutural de segunda ordem, na qual se considerem os efeitos adicionais de flexão decorrentes de imperfeições geométricas iniciais e da mudança da geometria.

De acordo com Ziemian (2010), os problemas de estabilidade em elementos submetidos a esforço normal de compressão podem ser divididos em duas categorias: A primeira corresponde a uma situação idealizada de força normal centrada, ausência de imperfeições geométricas e de esforços de flexão iniciais, cuja teoria do comportamento elástico conduz à bifurcação do equilíbrio. A segunda categoria, ao contrário, considera a ocorrência de esforços de flexão devido aos fatores acima mencionados e sendo, portanto, mais representativo do comportamento das estruturas reais.

Na análise de estabilidade elástica de uma situação ideal, em que um elemento reto é submetido apenas à força normal, à medida que se cresce o valor da força normal aplicada, ocorrem, de início, apenas deformações normais até que se atinja um determinado valor, chamada força crítica de flambagem ou de Euler. A partir desse ponto ocorrem duas possibilidades de equilíbrio e de configuração geométrica (Figura 2.1). A primeira corresponde à situação da geometria inicial reta, e equilíbrio instável, sujeito a variação brusca para uma posição fletida. A segunda corresponde à possibilidade de assumir uma posição fletida, com equilíbrio estável.

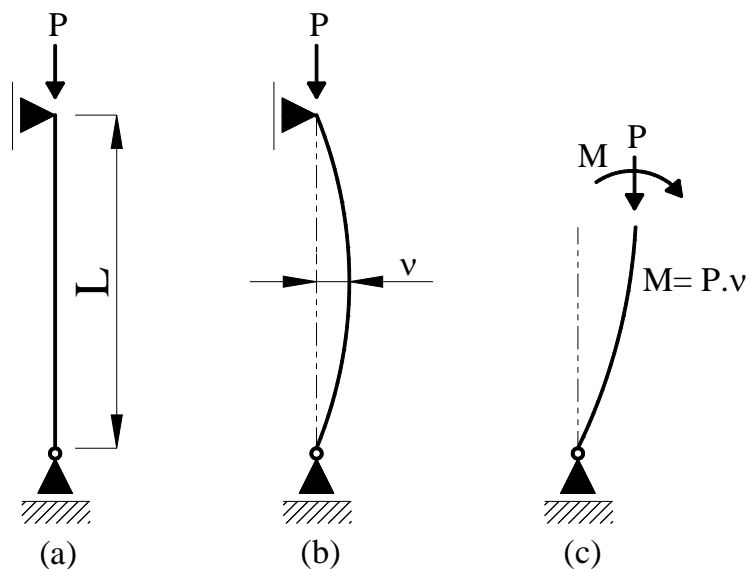


Figura 2.1. Comportamento de um pilar birrotulado.

A força crítica de flambagem ou de Euler, correspondente ao ponto de bifurcação do equilíbrio, pode ser obtida pela solução de uma equação diferencial (Equação 2.1), que descreve o comportamento (campo de deslocamentos transversais) em função dos esforços de flexão atuantes:

$$E I v'' = M \quad (2.1)$$

onde:

E é o módulo de elasticidade do material;

v é o deslocamento lateral;

I é o momento de inércia da seção;

M é o momento fletor atuante na seção.

As hipóteses básicas consideradas no modelo de análise de estabilidade elástica são: material elástico linear, elemento perfeitamente retilíneo sob força normal centrada. Considerando as extremidades rotuladas como representado na Figura 2.1a e a ocorrência de flambagem para um determinado valor da força normal, como representado na Figura 2.1b, obtém-se o momento (M) produzido pela força normal de compressão (P):

$$M = -P v \quad (2.2)$$

Substituindo a Equação 2.2 em 2.1, obtém-se:

$$E I v'' = -P v \quad (2.3)$$

A Equação 2.3 corresponde a uma equação diferencial linear homogênea de segunda ordem cuja solução geral é dada por:

$$v = C_1 \operatorname{sen} k x + C_2 \operatorname{cos} k x \quad (2.4)$$

onde:

$$k^2 = \frac{P}{EI} \quad (2.5)$$

Utilizando as condições de contorno consideradas na Figura 2.1a, onde $v = 0$ em $x = 0$, obtém-se $C_2 = 0$. Como $v = 0$ em $x = L$ e admitindo-se um valor de força, imediatamente antes da flambagem tem-se:

$$C_1 \operatorname{sen} k L = 0 \quad (2.6)$$

A equação 2.6 admite como solução:

$$k L = n \pi \quad (2.7)$$

Substituindo-se (2.5) em (2.7), resulta:

$$P = \frac{n^2 \pi^2 EI}{L^2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (2.8)$$

O menor valor de P é obtido para $n=1$ e a força crítica P_{cr} para as condições de contorno estabelecidas é dada por:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI_{\min}}{L^2} \quad (2.9)$$

onde:

P_{cr} é a força crítica imediatamente antes da flambagem;

E é o módulo de elasticidade do material;

I_{\min} é o momento de inércia mínimo da seção transversal;

L é o comprimento da barra.

O comportamento de uma barra axialmente solicitada em condições ideais é representado na Figura 2.2.

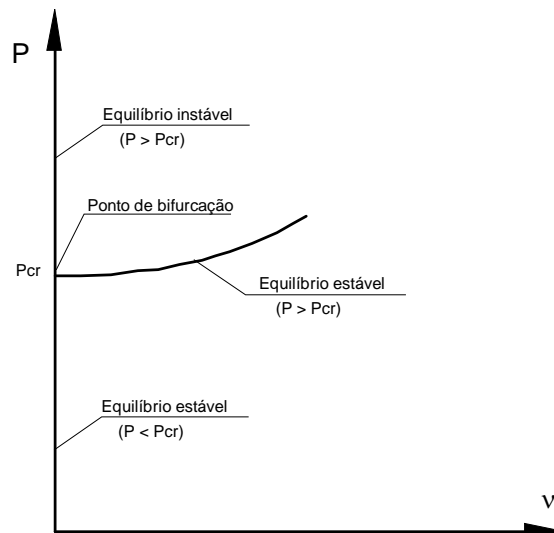


Figura 2.2. Comportamento de um pilar birrotulado ideal (Barros, 2010).

Para outras condições de contorno, o valor da força crítica de flambagem é:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI_{\min}}{(KL)^2}$$

onde KL é o comprimento efetivo de flambagem, sendo K o coeficiente de flambagem que define a distância entre pontos de inflexão (rotações nulas) e L o comprimento real do elemento.

Para um elemento ideal, seguindo a teoria da estabilidade elástica em regime de pequenos deslocamentos, a força crítica de flambagem elástica (P_{cr}) é plenamente definida. Atingir a força crítica de flambagem elástica é usualmente considerado um estado-limite por levar a esforços de segunda ordem significativos ou pela ocorrência de excessivos deslocamentos transversais.

A carga crítica de flambagem elástica de uma estrutura (P_{cr}) também pode ser determinada por meio de uma análise pelo Método dos Elementos Finitos (MEF). Neste caso, a solução do problema consiste em determinar o menor autovalor do sistema de equações, que corresponde à carga crítica de flambagem, ou seja, o ponto de bifurcação do equilíbrio.

O comportamento de um elemento ideal (sem imperfeições geométricas e de material) submetido a uma força axial de compressão é dado pelo segmento OAB mostrado na Figura 2.2.b. No entanto, nas estruturas reais, que possuem imperfeições geométricas e de material, o comportamento é diferente, como descrito pela curva C da Figura 2.3.b.

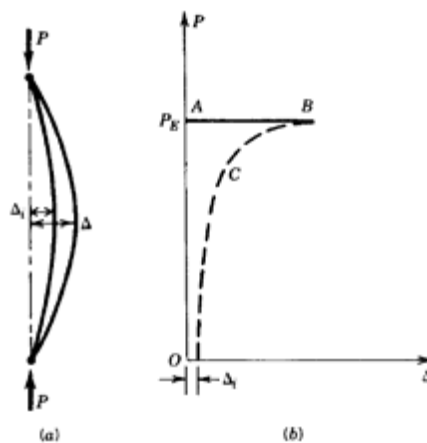


Figura 2.3. Comportamento de elemento ideal e real submetidos a uma força axial de compressão (Ziemian, 2010).

Para as estruturas reais, que apresentam imperfeições iniciais, realizando-se uma análise de segunda ordem é possível prever de maneira realista a carga de colapso, que se aproxima muito da carga crítica de flambagem elástica (Figura 2.3.b).

Em outras palavras, na avaliação de pórticos planos de aço, o problema da flambagem clássica pode ser substituído por um problema de flexo-compressão, considerando os efeitos de segunda ordem.

Alguns trabalhos recentes (Silva, 2004; Dória, 2007 e Barros, 2010) tratam da avaliação da estabilidade de pórticos planos de aço considerando os efeitos de segunda ordem, seguindo uma tendência moderna para o projeto desse tipo de estrutura.

2.2 Fatores que contribuem para a instabilidade de pórticos de aço

Os efeitos que influenciam a instabilidade de pórticos planos de aço decorrem de imperfeições geométricas e de material, provenientes do processo de fabricação, transporte e montagem da estrutura.

De acordo com o ASCE (1997) e Galambos (1998), os fatores que influenciam para a instabilidade de pórticos planos de aço são:

- efeito $P-\Delta$: efeito da força axial associada ao deslocamento transversal relativo entre as extremidades da barra, proveniente da rotação da corda (Figura 2.5);
- efeito $P-\delta$: efeito da força axial associada aos deslocamentos do eixo da barra em relação à corda (Figura 2.5);
- imperfeições iniciais geométricas;
- tensões residuais;
- plastificação ao longo do elemento;
- condições de vínculo dos elementos;
- rigidez das ligações e estruturas de contraventamento.

Os efeitos $P-\Delta$ e $P-\delta$ podem ser avaliados através de uma análise de segunda ordem ou por meio de expressões aproximadas que consideram a amplificação dos esforços solicitantes. De maneira simplificada, as imperfeições iniciais podem ser consideradas na forma de um deslocamento lateral da estrutura, enquanto as imperfeições de material podem ser consideradas a partir da redução da rigidez axial ou rigidez à flexão dos elementos.

2.3 Considerações sobre a análise estrutural

A análise estrutural é um processo que tem como função determinar os efeitos das ações nas estruturas. Tais efeitos são expressos usualmente em termos de esforços solicitantes e deslocamentos e são obtidos por meio de equações de equilíbrio e de compatibilidade de deslocamentos. Ao se iniciar um projeto estrutural, cabe ao projetista escolher, de acordo com as prescrições normativas, qual tipo de análise será utilizado para conhecer o comportamento da estrutura.

A análise pode ser classificada quanto aos materiais e quanto ao efeito dos deslocamentos. Na Figura 2.4 mostram-se curvas carga vs. deslocamento lateral, que representam resultados de diferentes tipos de análise estrutural. O comportamento da estrutura representado em cada curva da Figura 2.3 depende da consideração ou não da linearidade geométrica e de material.

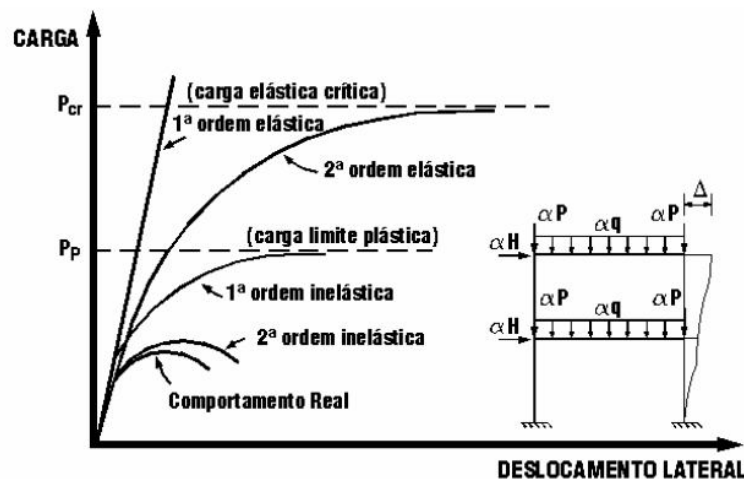


Figura 2.4. Tipos de análise (Silva, 2004).

2.3.1 Classificação da análise quanto aos materiais

A linearidade física do material refere-se à proporcionalidade entre tensões e deformações existente nos materiais que obedecem a lei de Hooke. O fato de se considerar ou não a linearidade física do material permite fazer a distinção entre análise elástica ou análise plástica.

2.3.2 Classificação da análise quanto aos deslocamentos (sob o ponto de vista geométrico)

Análise de primeira ordem

Neste tipo de análise o equilíbrio é verificado considerando a estrutura na sua posição original, ou seja, indeslocada. Trata-se de uma análise simplificada, mas amplamente adotada na avaliação de estruturas correntes.

Análise de segunda ordem

Neste tipo de análise o equilíbrio é verificado considerando-se a mudança da geometria da estrutura, ou seja, são computadas as influências dos deslocamentos sobre os esforços solicitantes.

Os efeitos de segunda ordem compreendem a amplificação dos esforços solicitantes e deslocamentos devido à presença de uma força axial associada a deslocamentos laterais, devido à curvatura da barra e rotação da corda, $P-\delta$ e $P-\Delta$, respectivamente, como mostrado na Figura 2.5. Ao se realizar uma análise de segunda ordem esses efeitos são considerados.

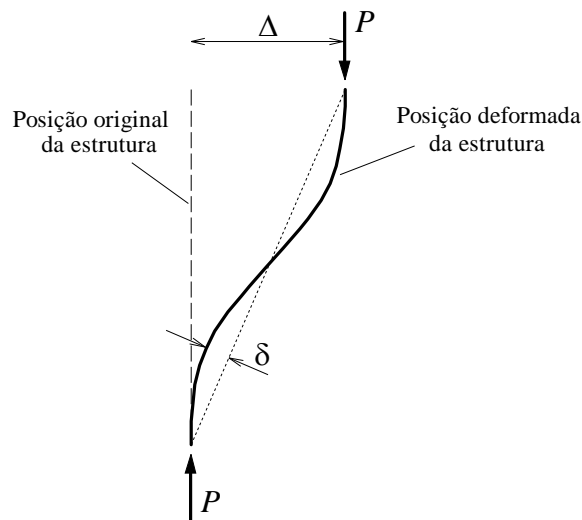


Figura 2.5. Efeitos globais ($P-\Delta$) e locais ($P-\delta$) (ASCE, 1997).

2.4 Considerações e prescrições da ABNT NBR8800:1986

A ABNT NBR8800:1986 permite ao projetista escolher entre fazer uma análise de primeira ordem ou uma análise de segunda ordem. Quando se faz uma análise de primeira ordem, o procedimento de dimensionamento incorpora determinados parâmetros que consideram simplificadamente aspectos do comportamento da estrutura que o método de análise não é capaz de computar, tal como os efeitos de segunda ordem a partir de uma amplificação dos efeitos de primeira ordem.

Além disso, quando uma análise de primeira ordem é adotada, para verificação da capacidade última resistente de um elemento estrutural é necessário calcular o valor do coeficiente de flambagem (K). Para o cálculo do coeficiente K , a ABNT NBR8800:1986 prevê a utilização do método do diagrama de alinhamento (G_A e G_B). Por fim, para verificação de barras submetidas a esforços combinados a ABNT NBR8800:1986 estabelece o atendimento de duas expressões, sendo uma para verificação da resistência e outra para verificação da estabilidade.

2.4.1 Classificação das estruturas

A NBR 8800:1986 classifica as estruturas apenas como contraventadas e não-contraventadas, ou seja, a classificação depende do sistema de contraventamento da estrutura, mas não estabelece um critério para definir a eficiência do sistema de contraventamento.

Uma estrutura é dita contraventada quando a estabilidade lateral é garantida por sistemas adequados de contraventamento. Quando esses sistemas de contraventamento possuem rigidez suficiente para resistir aos carregamentos laterais atuantes, os pórticos contraventados possuem comportamento próximo ao dos pórticos indeslocáveis.

Uma estrutura é dita não-contraventada quando a estabilidade lateral depende da rigidez à flexão de vigas e pilares rigidamente ligados entre si. Essas estruturas normalmente são classificadas como deslocáveis.

2.4.2 Verificação de barras submetidas a esforços combinados

O efeito da força normal e dos momentos fletores são avaliados pela ABNT NBR8800:1986 através das equações de interação dadas a seguir (Equações 2.2 e 2.3). As duas equações devem ser atendidas se a força normal for de compressão, e apenas a primeira, se a força normal for de tração.

Verificação da resistência:

$$\frac{N_d}{\phi N_n} + \frac{M_{dx}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{dy}}{\phi_b M_{ny}} \leq 1,0 \quad (2.2)$$

onde:

N_d é força normal de cálculo na barra;

M_{dx} e M_{dy} são momentos fletores de cálculo, na seção considerada, em torno dos eixos x e y, respectivamente;

ϕN_n para força normal de tração, ou $N_n = 0,9Q A_g F_y$, para força normal de compressão;

$\phi_b M_{nx}$ e $\phi_b M_{ny}$ são as resistências de cálculo aos momentos fletores em torno dos eixos x e y, respectivamente;

Verificação da estabilidade:

$$\frac{N_d}{\phi_c N_n} + \frac{C_{mx} M_{dx}}{\left(1 - \frac{N_d}{0,73 N_{ex}}\right) \phi_b M_{nx}} + \frac{C_{my} M_{dy}}{\left(1 - \frac{N_d}{0,73 N_{ey}}\right) \phi_b M_{ny}} \leq 1,0 \quad (2.3)$$

N_d é força normal de cálculo na barra (ambas as expressões supõem que N_d seja constante, ao longo da barra);

M_{dx} e M_{dy} são momentos fletores de cálculo, na seção considerada, em torno dos eixos x e y, respectivamente;

N_n é a força normal resistente de cálculo;

$\Phi_b M_{nx}$ e $\Phi_b M_{ny}$ são as resistências de cálculo aos momentos fletores em torno dos eixos x e y, respectivamente;

C_{mx} e C_{my} são coeficientes correspondentes à flexão em torno dos eixos, x e y, respectivamente;

$\Phi_c N_n$ é a resistência de cálculo à compressão;

N_{ex} e N_{ey} são as cargas de flambagem elástica por flexão em torno dos eixos x e y, respectivamente.

2.4.3 Coeficiente de flambagem (K)

A ABNT NBR8800:1986 apresenta para o cálculo do coeficiente de flambagem (K) o método do diagrama de alinhamento. Este procedimento, que é um dos mais difundidos, adota uma subestrutura que representa um pilar pertencente a um pórtico plano. Essa subestrutura é capaz de simular a contribuição da rigidez dos pilares superior e inferior, bem como das vigas conectadas aos nós do pilar considerado, como exemplificado na Figura 2.6.

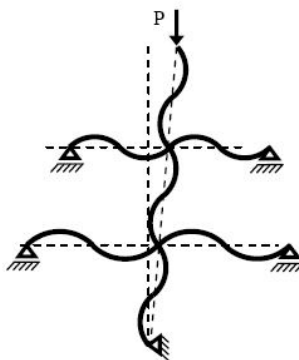


Figura 2.6. Modelo estrutural para o cálculo do coeficiente K em estruturas deslocáveis (AISC, 2005b).

A seguir apresentam-se algumas hipóteses admitidas na elaboração das equações a partir das quais derivam os diagramas de alinhamento:

- todos os pilares são contínuos;
- o material apresenta comportamento elástico;
- cada barra da estrutura tem seção transversal constante;
- nas estruturas indeslocáveis, as rotações nas extremidades opostas das vigas rigidamente conectadas são iguais em intensidade, produzindo curvatura simples;
- nas estruturas deslocáveis, as rotações nas extremidades opostas das vigas rigidamente conectadas são iguais em intensidade, produzindo curvatura reversa;
- todos os pilares atingem a força crítica simultaneamente;
- não ocorre força normal de compressão significativa nas vigas.

Sendo atendidas as prescrições anteriores, o coeficiente de flambagem (K) é determinado com auxílio dos diagramas apresentados na Figura 2.7, a partir dos valores de G_A e G_B de acordo com a Equação 2.4:

$$G = \frac{\sum \frac{I_c}{L_c}}{\sum \alpha \frac{I_g}{L_g}} \quad (2.4)$$

onde:

A e B referem-se às extremidades A e B da barra analisada;

I_c é o momento de inércia do pilar;

L_c é comprimento do pilar;

I_g é o momento de inércia de uma viga ligada rigidamente ao nó;

L_g é o vão de uma viga ligada rigidamente ao nó.

Para estruturas indeslocáveis, a rigidez I_g/L_g de uma viga poderá ser multiplicada pelos seguintes fatores (α):

- 1,5 quando a outra extremidade da viga for rotulada;
- 2,0 quando a outra extremidade da viga for impedida de girar (isto é, rigidamente ligada a um suporte relativamente rígido).

Para estruturas deslocáveis, multiplicar a rigidez I_g/L_g da viga pelo seguinte fator (α):

- 0,50 quando sua outra extremidade for rotulada;
- 0,67 quando sua outra extremidade for engastada.

Para extremidade de pilares apoiados em bases, porém, não rigidamente ligados a tais bases, G é teoricamente igual a ∞ , mas pode ser tomado igual a 10 nos casos práticos. Se a extremidade do pilar estiver rigidamente ligada a uma base dimensionada de modo adequado, G pode ser tomado igual a 1,0. Poderão ser usados valores inferiores a 1,0 desde que justificados por análise.

Determinados G_A e G_B para um segmento do pilar, o valor do coeficiente de flambagem K pode ser determinado traçando-se uma reta entre os pontos apropriados das escalas G_A e G_B , nos gráficos indicados na Figura 2.7, de acordo com a classificação da estrutura.

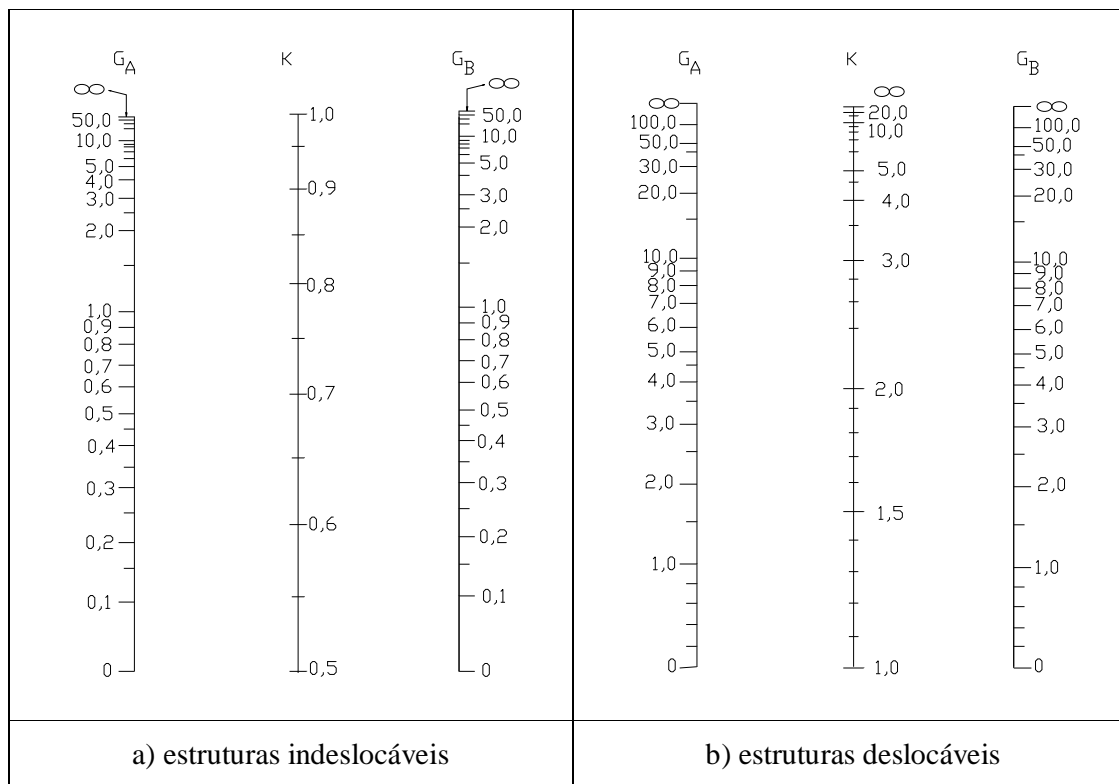


Figura 2.7. Diagramas de pontos alinhados (ABNT NBR8800:1986).

2.5 Considerações e prescrições da ABNT NBR8800:2008

A ABNT NBR8800:2008 requer que sempre seja realizada uma análise de segunda ordem. Essa análise pode ser avançada, aproximada ou adaptada a partir de uma análise de primeira ordem. Tal procedimento foi incorporado no escopo da norma, pois a avaliação da estabilidade proposta pela ABNT NBR8800:2008, considerando as imperfeições geométricas e de material, exige a realização de uma análise de segunda ordem.

A adoção de uma análise de segunda ordem rigorosa, com consideração das imperfeições geométricas, permite que o coeficiente de flambagem (K) seja sempre tomado igual a um.

2.5.1 Classificação das estruturas quanto à sensibilidade a deslocamentos laterais

A ABNT NBR8800:2008 prevê a classificação da estrutura quanto à sensibilidade a deslocamentos laterais. O parâmetro para essa classificação é a razão entre o deslocamento horizontal obtido numa análise de segunda ordem e o deslocamento obtido por uma análise de primeira ordem (u_2/u_1). A classificação pode também ser obtida, com precisão aceitável, pelo valor do coeficiente B_2 , calculado de acordo com o Anexo D da ABNT NBR8800:2008.

Quando essa razão u_2/u_1 é inferior a 1,10, diz-se que a estrutura é de pequena deslocabilidade. Para valores entre 1,10 e 1,40, classifica-se a estrutura como de média deslocabilidade. Finalmente, para valores acima de 1,40, a estrutura é de grande deslocabilidade.

A classificação é um passo importante que precede a análise, pois permite ao projetista ter uma primeira avaliação sobre a importância dos efeitos de segunda ordem sobre a estrutura e definir quais imperfeições iniciais devem ser consideradas, seguindo as prescrições da ABNT NBR8800:2008.

2.5.2 Imperfeições geométricas e imperfeições de material

Na análise estrutural, devem ser considerados os efeitos das imperfeições iniciais. Essas imperfeições podem ser geométricas ou de material.

Imperfeições Geométricas

As imperfeições geométricas devem ser inseridas na análise para considerar possíveis desaprumos oriundos da montagem da estrutura (global) e da falta de retilidade (local) dos elementos que compõem a estrutura, como mostrado na Figura 2.8.

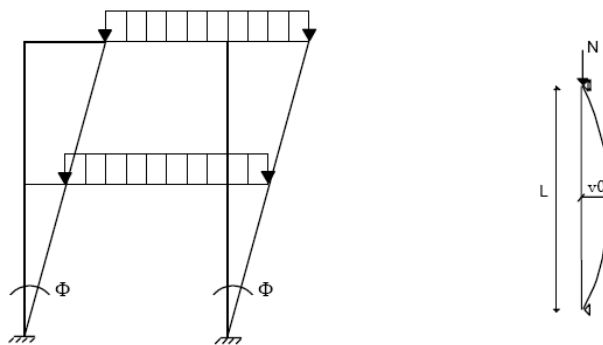


Figura 2.8. Imperfeições geométricas global e local.

Nas estruturas de pequena e média deslocabilidade, os efeitos das imperfeições geométricas iniciais podem ser entendidos como uma força horizontal mínima atuante na estrutura, não sendo necessário considerá-los nas combinações em que atuam ações variáveis devidas ao vento. Entretanto, as imperfeições devem ser consideradas nas combinações em que atuam apenas ações permanentes diretas e ações variáveis constituídas pelas cargas acidentais previstas para o uso da construção. Nas estruturas de grande deslocabilidade, os efeitos das imperfeições geométricas iniciais deverão ser adicionadas também às combinações de ações em que atuam ações variáveis devidas ao vento.

Imperfeições de material

As imperfeições de material devem ser consideradas na análise para inserir os efeitos das tensões residuais das barras que compõem a estrutura. Tal efeito pode gerar escoamentos localizados nos elementos. As imperfeições de material devem ser consideradas, dependendo da classificação da estrutura, como uma redução de 20% na rigidez à flexão (EI) ou na rigidez axial (EA) de todos os elementos da estrutura.

2.5.3 Verificação de barras submetidas a esforços combinados

No dimensionamento, as barras submetidas à combinação de esforços solicitantes devem ser verificadas simultaneamente, por meio de uma equação de interação, aos estados-limites

últimos causados por força axial e momento fletor e, isoladamente, aos estados-limites causados pela força cortante.

Estudos teóricos e experimentais mostram que todos os estados-limites possíveis de ocorrer em barras submetidas à combinação de esforços solicitantes ficam atendidos caso seja obedecida a limitação dada pelas equações de interação a seguir:

$$\text{-se } \frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} \geq 0,2 : \frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{Sd,x}}{M_{Rd,x}} + \frac{M_{Sd,y}}{M_{Rd,y}} \right) \leq 1,0 \quad (2.5)$$

$$\text{-se } \frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} < 0,2 : \frac{N_{Sd}}{2N_{Rd}} + \left(\frac{M_{Sd,x}}{M_{Rd,x}} + \frac{M_{Sd,y}}{M_{Rd,y}} \right) \leq 1,0 \quad (2.6)$$

onde:

N_{Sd} é a força axial solicitante de cálculo de tração ou de compressão;

N_{Rd} é a força axial resistente de cálculo de tração ou de compressão;

$M_{Sd,x}$ e $M_{Sd,y}$ são os momentos fletores solicitantes de cálculo, respectivamente em relação aos eixos x e y da seção transversal;

$M_{Rd,x}$ e $M_{Rd,y}$ são os momentos fletores resistentes de cálculo, respectivamente em relação aos eixos x e y da seção transversal.

2.6 Método da Amplificação dos Esforços Solicitantes (MAES)

Para a realização de uma análise estrutural de segunda ordem, a ABNT NBR8800:2008 possibilita ao projetista a realização de uma análise adaptada e propõe, para isso, no seu Anexo D o Método da Amplificação dos Esforços Solicitantes (MAES).

O MAES é um método de análise de segunda ordem adaptado, pois seus resultados são obtidos de uma análise de primeira ordem. Este método simula com precisão aceitável uma

análise de segunda ordem aproximada, levando em consideração os efeitos P- δ e P- Δ . Ao se usar o método, deve-se fazer atuar na estrutura a combinação apropriada de ações de cálculo, constituída por ações verticais e horizontais, quando existentes, considerando-se o efeito das imperfeições geométricas iniciais e das imperfeições iniciais de material.

2.6.1 Aplicação

Para aplicação do MAES, deve-se determinar em cada andar do modelo estrutural analisado o momento fletor solicitante de cálculo (M_{sd}) e a força axial solicitante de cálculo (N_{sd}), de acordo com as Equações 2.6 e 2.7.

$$M_{sd} = B_1 M_{nt} + B_2 M_{lt} \quad (2.6)$$

$$N_{sd} = N_{nt} + B_2 N_{lt} \quad (2.7)$$

onde:

M_{nt} e N_{nt} são, respectivamente, o momento fletor e a força axial solicitantes de cálculo, obtidos por análise elástica de primeira ordem, com os nós da estrutura impedidos de se deslocar horizontalmente (Estrutura “nt” - Figura 2.9).

M_{lt} e N_{lt} são, respectivamente, o momento fletor e a força axial solicitantes de cálculo, obtidos por análise elástica de primeira ordem, correspondente apenas ao efeito dos deslocamentos horizontais dos nós da estrutura (Estrutura “lt” - Figura 2.9).

B_1 e B_2 são coeficientes que têm o objetivo de considerar os efeitos locais (P- δ) e globais (P- Δ), respectivamente.

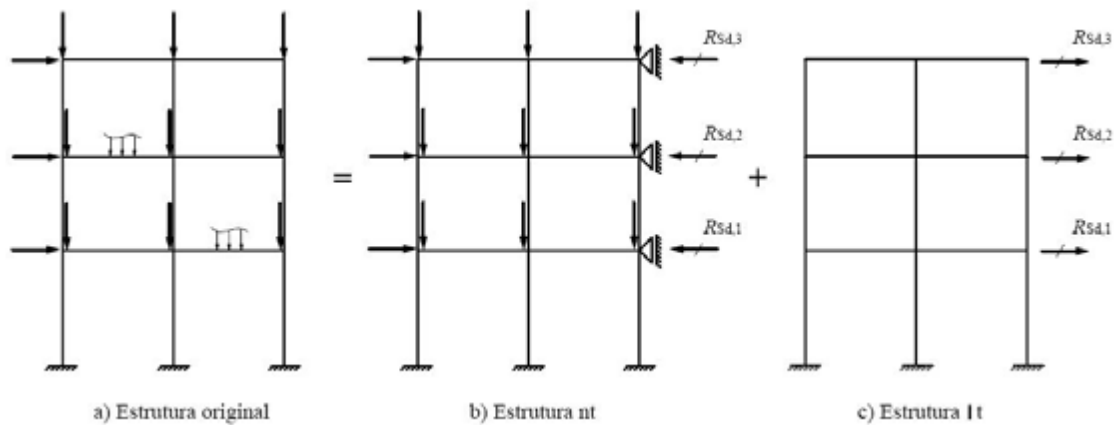


Figura 2.9. Modelo para análise (ABNT NBR8800:2008)

Os coeficientes B_1 e B_2 são calculados de acordo com as Equações 2.8 e 2.10.

$$B_1 = \frac{C_m}{1 - \frac{N_{sd1}}{N_e}} \geq 1,0 \quad (2.8)$$

onde:

N_e é a força axial que provoca a flambagem elástica por flexão da barra no plano de atuação do momento fletor, calculada com o comprimento real da barra, considerando, se for o caso, a imperfeição inicial de material;

N_{sd1} é a força axial de compressão solicitante de cálculo na barra considerada, em *análise de primeira ordem* $N_{sd1} = N_m + N_{lt}$.

C_m é um coeficiente igual a:

- Se não houver forças transversais entre as extremidades da barra no plano de flexão:

$$C_m = 0,60 - 0,40 \frac{M_1}{M_2} \quad (2.9)$$

sendo:

M_1/M_2 é a relação entre o menor e o maior dos momentos fletores solicitantes de cálculo na estrutura nt no plano de flexão, nas extremidades apoiadas da barra, tomada como positiva quando os momentos provocarem curvatura reversa e negativa quando provocarem curvatura simples ($M_1 = M_{nt1}$; $M_2 = M_{nt2}$).

- Se houver forças transversais entre as extremidades da barra no plano de flexão, o valor de C_m deve ser determinado por análise racional ou ser tomado conservadoramente igual a 1,0.

Se houver tração no pilar, deve-se considerar $B_1 = 1,0$.

O coeficiente B_2 prescrito no Anexo D da ABNT NBR8800:2008 é dado por:

$$B_2 = \frac{1}{1 - \frac{1}{R_s} \frac{\Delta_h}{H} \frac{\sum N_{SD}}{\sum H_{SD}}} \quad (2.10)$$

onde :

$\sum N_{SD}$ é a carga gravitacional total que atua no andar considerado;

R_s é um coeficiente de ajuste, igual a 0,85 nas estruturas onde as subestruturas de contraventamento são todas pórticos rígidos e igual a 1 para as outras estruturas;

Δh é o deslocamento horizontal relativo entre os níveis superior e inferior (deslocamento interpavimento em uma análise de primeira ordem);

$\sum H_{SD}$ é a força cortante no andar, produzida pelas forças horizontais de cálculo atuantes.

A força cortante solicitante de cálculo pode ser tomada igual à da análise elástica de primeira ordem, ou seja, igual à da estrutura original ou igual a:

$$V_{sd} = V_{nt} + V_{lt} \quad (2.11)$$

onde:

V_{nt} e V_{lt} são, respectivamente, as forças cortantes de cálculo na estrutura “nt” e na estrutura “lt”.

3

Metodologia para Desenvolvimento dos Estudos de Caso

Neste capítulo apresentam-se as características de algumas das estruturas de aço correntes, na forma de pórticos planos rígidos e contraventados, que compõem os estudos de caso deste trabalho. Definem-se também os tipos de análise estrutural que foram realizados em cada caso.


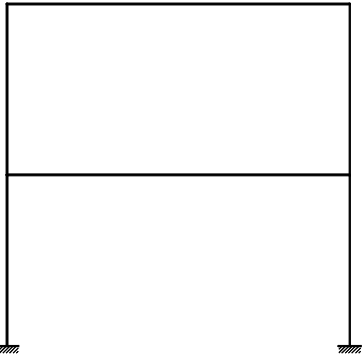
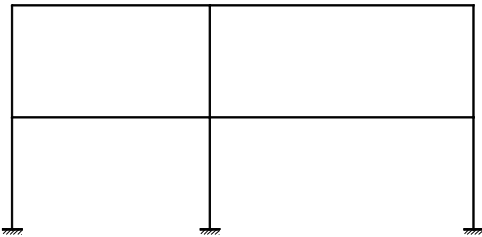
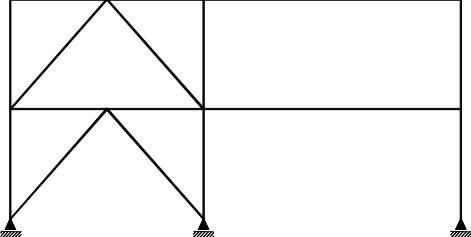
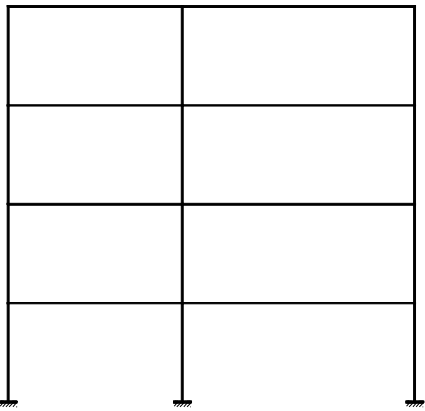
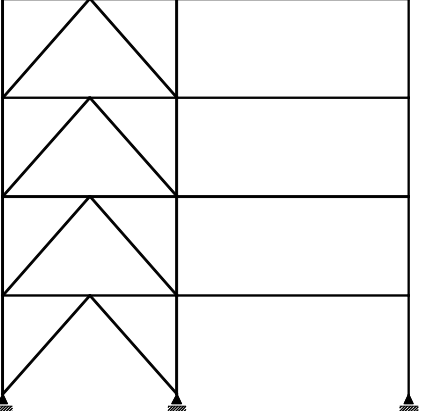
Discute-se ainda sobre os programas computacionais utilizados para análise e verificação da capacidade última dos elementos estruturais. Por último, apresentam-se algumas estratégias utilizadas na realização das análises de segunda ordem, com vistas à obtenção de resultados realistas.

3.1 Definição das características das estruturas selecionadas

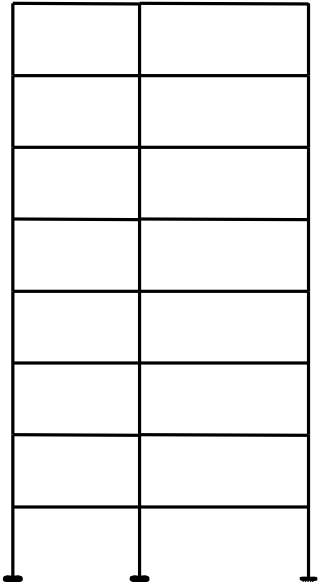
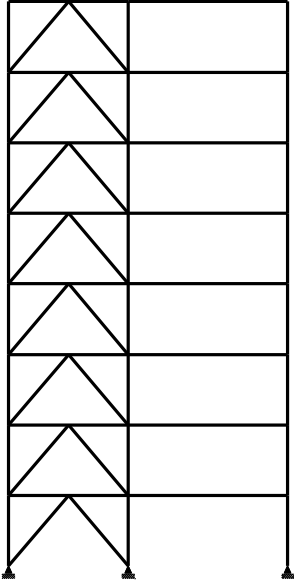
No Quadro 3.1 apresentam-se os esquemas estruturais dos pórticos planos compostos por perfis de aço selecionados para os estudos de caso deste trabalho. Para os pórticos rígidos, a estabilidade no plano da estrutura é garantida pela rigidez das ligações vigas-pilar, enquanto que para os pórticos contraventados, por um sistema de contraventamento em forma de Delta. Admite-se que a estabilidade fora do plano da estrutura seja garantida por outras subestruturas de contraventamento, que tornam os nós indeslocáveis, compondo a estrutura de um edifício de múltiplos andares em aço.

Com exceção dos casos 1 e 2, onde os perfis foram fixados, para os outros casos apresentados no Quadro 3.1 os perfis foram pré-dimensionados de acordo com a ABNT NBR8800:1986, com auxílio do programa computacional Desmet v4.0 Beta. Durante a etapa de pré-dimensionamento, os coeficientes de flambagem (K) dos pilares que compõem os pórticos rígidos foram calculados de acordo com o Método do Coeficiente de Flambagem utilizando-se o diagrama de alinhamento para estruturas deslocáveis (Figura 18 do Anexo I da ABNT NBR8800:1986). Para os pilares dos pórticos contraventados foram adotados valores de $K = 1,0$. Todas essas estruturas também foram verificadas nesta etapa para o estado-limite de serviço de deslocamento lateral excessivo, considerando-se um deslocamento horizontal máximo do topo dos pilares em relação à base de $H/400$, onde " H " é a altura total do pilar. No pré-dimensionamento foram utilizados perfis tipo I laminados da GERDAU-AÇOMINAS.

Quadro 3.1 - Casos selecionados para análise

| | |
|---|--|
|  |  |
| <p>Caso 1 - Pilar de aço engastado na base e livre no topo</p> | <p>Caso 2 - Pórtico rígido de dois pavimentos (adaptado de Simões, 2007)</p> |
|  |  |
| <p>Caso 3 - Pórtico rígido de dois pavimentos</p> | <p>Caso 4 - Pórtico contraventado de dois pavimentos</p> |
|  |  |
| <p>Caso 5 - Pórtico rígido de quatro pavimentos</p> | <p>Caso 6 - Pórtico contraventado de quatro pavimentos</p> |

Quadro 3.1 - Casos selecionados para análise (continuação)

| | |
|---|--|
|  |  |
| <p>Caso 7 - Pórtico rígido de oito pavimentos</p> | <p>Caso 8 - Pórtico contraventado de oito pavimentos</p> |

Para todas as estruturas apresentadas no Quadro 3.1 realizou-se uma análise de primeira ordem (APO), uma análise de segunda ordem aproximada (ASO) e uma análise elástica adaptada de segunda ordem, por meio do Método da Amplificação dos Esforços Solicitantes (MAES), previsto no Anexo D da ABNT NBR8800:2008 (ASO-MAES). Todas as análises estruturais foram realizadas com auxílio do programa computacional SAP 2000 (COMPUTER AND STRUCTURES INC., 2004).

Para implementação da ASO pelo MAES é de grande importância dispor de todos os diagramas de esforços solicitantes da estrutura, para todas as combinações de ações. Como a apresentação dos diagramas para todos os casos analisados envolve um grande volume de informação, optou-se por apresentar os esforços solicitantes somente nos trechos dos pilares situados no pavimento térreo das estruturas selecionadas, na forma de gráficos de barras. No Apêndice A apresentam-se quatro estudos completos (casos 1 a 4), com todos os diagramas de

esforços solicitantes e com a sequência de obtenção dos esforços de segunda ordem pelo MAES, sobretudo por prezar pelo efeito didático desta apresentação.

De posse dos resultados dos diferentes tipos de análise, foi realizada a verificação da capacidade última dos pilares selecionados, segundo a ABNT NBR8800:1986 e ABNT NBR8800:2008. Os esforços solicitantes obtidos na APO foram considerados na verificação segundo a metodologia da ABNT NBR8800:1986. Os coeficientes de flambagem (K) dos pilares que compõem os pórticos rígidos foram calculados de acordo com o Método do Coeficiente de Flambagem utilizando-se o diagrama de alinhamento para estruturas deslocáveis (Figura 18 do Anexo I da ABNT NBR8800:1986), enquanto que para os pilares dos pórticos contraventados foram adotados valores de $K = 1,0$. Os resultados da ASO e ASO-MAES foram considerados na verificação segundo a metodologia da ABNT NBR8800:2008, adotando-se sempre o valor de $K = 1,0$.

Para avaliação das respostas das estruturas selecionadas, fez-se uma comparação direta do valor dos esforços solicitantes para as três análises realizadas e dos resultados da interação dos efeitos combinados de força axial e momento fletor, segundo o procedimento previsto em cada norma considerada. Essas comparações são mostradas ao fim de cada estudo de caso, na forma de gráficos e tabelas. Para verificação da capacidade última dos pilares, utilizou-se o programa Desmet v4.0 Beta, desenvolvido no Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa.

3.2 Programas computacionais utilizados na análise estrutural

As análises estruturais de primeira ordem (APO) e de segunda ordem (ASO) foram realizadas com auxílio do programa computacional SAP 2000 (COMPUTER AND STRUCTURES INC., 2004), disponibilizado pelo Departamento de Engenharia de Estruturas da Universidade Federal de Minas Gerais. O SAP é um programa para análise estrutural amplamente utilizado no meio técnico, que possui um ambiente gráfico interativo e que permite fácil definição e avaliação das diferentes combinações de ações. Em ambas análises considerou-se o aço como material elástico linear.

O SAP 2000 realiza uma análise elástica não-linear aproximada considerando o efeito P-delta ($P-\Delta$) para pequenos deslocamentos e o efeito P-deltinha ($P-\delta$). O efeito P-deltinha ($P-\delta$) é considerado pelo SAP 2000, de maneira aproximada, utilizando um polinômio de interpolação de terceiro grau. Esse procedimento é considerado uma boa aproximação quando não se está próximo à carga de flambagem.

3.3 Estratégias para a análise de segunda ordem

Segundo o item 4.9.2.2 da ABNT NBR8800:2008, ASO deve ser usada sempre que os deslocamentos afetarem de forma significativa os esforços internos. Essa análise pode ter como base teorias geometricamente exatas, teorias aproximadas ou adaptações a resultados da teoria de primeira ordem.

A análise de segunda ordem realizada com auxílio do SAP 2000 (ASO), conforme a definição do item 4.9.7 da ABNT NBR8800:2008, se enquadra como análise aproximada de segunda ordem. Já a análise realizada pelo Método da Amplificação dos Esforços Solicitantes (MAES), denominada de ASO-MAES, é uma adaptação a resultados da teoria de primeira ordem.

Para atender às prescrições do item 4.9.7 da ABNT NBR8800:2008 as estruturas devem ser inicialmente classificadas quanto à sensibilidade a deslocamentos laterais. Em função da classificação da estrutura (pequena, média ou grande deslocabilidade), as imperfeições de material devem ser incluídas ou não na análise estrutural.

De acordo com os critérios da ABNT NBR8800:2008, no caso de estruturas de pequena e média deslocabilidade, as imperfeições geométricas devem ser consideradas, em cada andar, por meio de um deslocamento interpavimento de $h/333$, sendo " h " a altura do andar, ou por meio da aplicação, em cada andar, de uma força horizontal equivalente, denominada força nocional, igual a 0,3% das cargas gravitacionais de cálculo aplicadas em todos os pilares e outros elementos resistentes a cargas verticais, no andar considerado. Já as imperfeições de material, no caso de estruturas de média e grande deslocabilidade, devem ser consideradas reduzindo-se a rigidez à flexão e a rigidez axial das barras para 80% dos valores originais.

Para definição dos modelos utilizados nas análises estruturais realizadas com auxílio do SAP 2000, as barras da estrutura foram discretizadas em quatro elementos finitos, seguindo uma recomendação apresentada por Dória (2007). Essa subdivisão das barras, conforme apresentado na Figura 3.1, tem por objetivo dar maior precisão à consideração dos efeitos locais de segunda ordem ($P-\delta$) na análise.

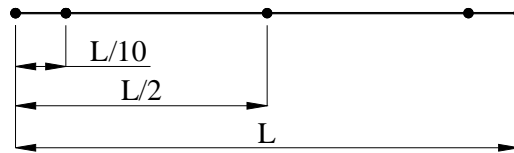


Figura 3.1 - Discretização dos elementos de barra.

4

Estudos de Caso e Discussão dos Resultados

Neste capítulo apresentam-se oito estudos de caso cujas análises foram realizadas com auxílio do SAP2000 (COMPUTER AND STRUCTURES INC., 2004) e do Método da Amplificação dos Esforços Solicitantes (MAES). Todos os casos tiveram a capacidade última de alguns pilares verificados por intermédio do programa Desmet v4.0 Beta.

Para cada caso apresenta-se a classificação quanto à sensibilidade a deslocamentos laterais. Apresentam-se também alguns gráficos com a sobreposição dos resultados dos trechos dos pilares situados no pavimento térreo da estrutura e uma tabela comparativa com a verificação da capacidade última dos pilares analisados, segundo a ABNT NBR8800:1986 e a ABNT NBR8800:2008.

4.1. Caso 1 - Pilar isolado de aço engastado na base e livre no topo

O caso 1 consiste em um pilar isolado de aço engastado na base e livre no topo, conforme se mostra na Figura 4.1. O pilar é submetido a uma ação de cálculo P_d aplicada no centro de gravidade do perfil. Admite-se que o pilar seja contido na direção do eixo x , fazendo com que a análise fique restrita apenas à direção do eixo y .

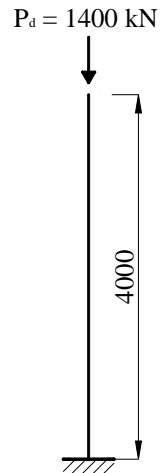


Figura 4.1. - Pilar engastado
(dimensões em milímetros e ações com valores de cálculo)

Dados:

- Perfil HP 250 x 62
- Aço ASTM A572 Grau 50
- Módulo de elasticidade - $E = 200.000 \text{ MPa}$

Neste caso busca-se avaliar a aplicação dos diferentes tipos de análise estrutural a uma situação típica de dimensionamento de um pilar submetido a uma força axial de compressão (P_d), que representa a sua força axial de compressão resistente de cálculo.

Para o pilar apresentado na Figura 4.1, inicialmente foi realizada a classificação da estrutura quanto à sensibilidade a deslocamentos laterais, seguida da análise de primeira ordem (APO) e da análise de segunda ordem (ASO). Para efeitos de comparação, realizou-se também uma

análise de segunda ordem por meio do Método da Ampliação dos Esforços Solicitantes (MAES), designada por ASO-MAES, previsto no Anexo D da ABNT NBR8800:2008.

Por fim, apresenta-se uma sobreposição dos resultados dos esforços para cada tipo de análise e uma avaliação da capacidade última do pilar segundo a ABNT NBR8800:1986 e ABNT NBR8800:2008.

Modelo estrutural

A Figura 4.2 apresenta o modelo estrutural do pilar engastado adotado para análise.

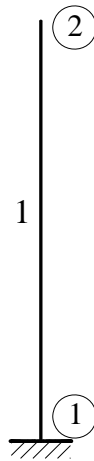


Figura 4.2. - Modelo estrutural do pilar engastado

Ações atuantes

P_d - Carga de cálculo atuante na estrutura.

A força horizontal equivalente (F_n) a ser aplicada sobre a estrutura (Figura 4.3), que representa as imperfeições geométricas, deve ser calculada conforme a seguinte expressão:

$$F_n = \frac{0,3}{100} \sum N_{SD} \quad (4.1)$$

onde:

$\sum N_{SD}$ é o somatório das forças gravitacionais de cálculo atuantes no pavimento.

$$F_{nl} = \frac{0,3}{100} (1400)$$

$$F_{nl} = 4,20 \text{ kN}$$

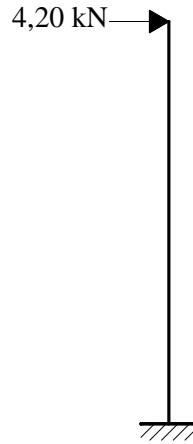


Figura 4.3. - Força horizontal equivalente (kN)

Combinações de ações

Para verificação da segurança em relação aos estados-limites últimos, foram consideradas as seguintes combinações últimas normais, em função do tipo de análise:

Combinação 01 (para a APO) : P_d

Combinação 01 (para a ASO e ASO-MAES) : $P_d + F_n$

Para fins de análise estrutural, as imperfeições geométricas só foram consideradas na combinação de ações para as análises de segunda ordem (ASO e ASO-MAES).

Análise estrutural

Classificação da estrutura quanto à sensibilidade a deslocamentos laterais

Segundo o item 4.9.4.5 da ABNT NBR 8800:2008 a classificação da estrutura deve ser obtida para as combinações últimas de ações em que os deslocamentos horizontais provenientes das

forças horizontais tenham os mesmos sentidos dos deslocamentos horizontais decorrentes das cargas gravitacionais.

A classificação quanto à sensibilidade a deslocamentos laterais pode ser realizada de forma aproximada em função do coeficiente B_2 (Tabela 4.1).

Tabela 4.1. - Valores do coeficiente B_2 para classificação da estrutura

| Combinação | R_s | Δh (mm) | H (mm) | N_{Sd} | H_{Sd} | B_2 |
|------------|-------|-----------------|----------|----------|----------|-------|
| 01 | 0,85 | 5,3063 | 4000 | 1400 | 4,20 | 2,08 |

O valor do coeficiente B_2 apresentado na Tabela 4.1 foi calculado sem levar em consideração as imperfeições de material.

Em função do valor do coeficiente B_2 (Tabela 4.1), a estrutura é classificada como de grande deslocabilidade.

Comparação dos resultados da APO e da ASO

Tendo em vista os diferentes tipos de análise realizados (APO, ASO e ASO-MAES), apresentam-se alguns gráficos com a sobreposição dos resultados dos esforços máximos no pilar.

Barra 1

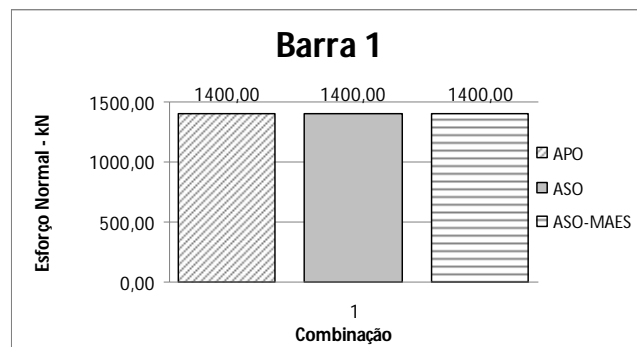


Figura 4.4. - Esforço normal máximo (kN) na barra 1 para a combinação 01 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos)

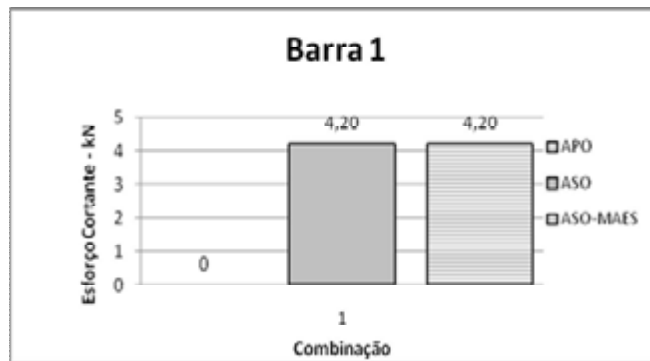


Figura 4.5. - Esforço cortante máximo (kN) na barra 1 para a combinação 01 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos)

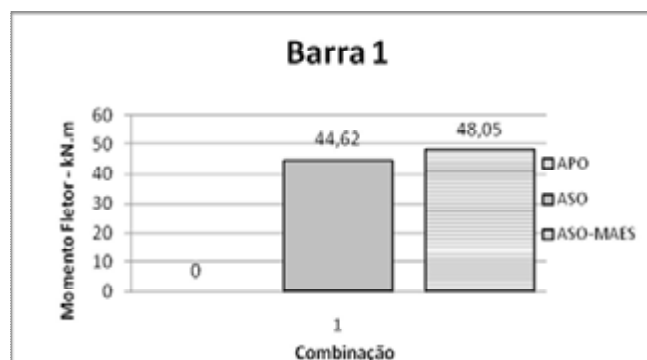


Figura 4.6. - Momento fletor máximo (kN.m) na barra 1 para a combinação 01 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos)

Verificação da capacidade última do pilar

Para a verificação da capacidade última do pilar, utilizou-se o programa Desmet 4.0. Para os resultados de esforços obtidos na APO fez-se a verificação da interação dos efeitos combinados de força axial e momento fletor de acordo com ABNT NBR8800:1986, enquanto que para os resultados obtidos na ASO e ASO-MAES fez-se a verificação de acordo com a ABNT NBR8800:2008.

No cálculo do pilar de acordo com a ABNT NBR8800:1986 utilizou-se o coeficiente de flambagem (K) equivalente à condição de um pilar isolado engastado em uma extremidade e livre na outra, $K = 2,1$, enquanto que para ABNT NBR8800:2008 toma-se sempre $K = 1,0$.

Os resultados da verificação da capacidade última do pilar são apresentados pela Tabela 4.2.

Tabela 4.2. - Verificação da capacidade última dos pilares do pavimento térreo

| Barra | Combinação | Tipo de análise | Esforços solicitantes | | Esforços Resistentes | | Interação |
|-------|------------|-----------------|-----------------------|-------------------|----------------------|-------------------|-----------|
| | | | N_{Sd} (kN) | $M_{x,Sd}$ (kN.m) | N_{Rd} (kN) | $M_{x,Rd}$ (kN.m) | |
| 1 | 01 | APO - SAP2000 | 1400,00 | 0,00 | 1400,98 | 224,47 | 1,000 |
| | | ASO - SAP2000 | 1400,00 | 44,62 | 2249,78 | 230,62 | 0,794 |
| | | ASO - MAES | 1400,00 | 48,05 | 2249,78 | 230,62 | 0,807 |

4.2. Caso 2 – Pórtico rígido de dois pavimentos

O caso 2 consiste em um pórtico plano rígido de dois pavimentos, conforme se mostra na Figura 4.7, adaptado a partir de um exemplo de aplicação apresentado por Simões (2007). Na mesma figura indicam-se também as forças gravitacionais concentradas (PP e PQ) e distribuídas (Pp e Pq), as ações devidas ao vento (W) e as dimensões da estrutura em milímetros (mm).

Admite-se que os pilares da estrutura são engastados na base e que existe continuidade completa com as vigas.

Na Figura 4.7, as letras minúsculas se referem a ações distribuídas e as letras maiúsculas a ações concentradas.

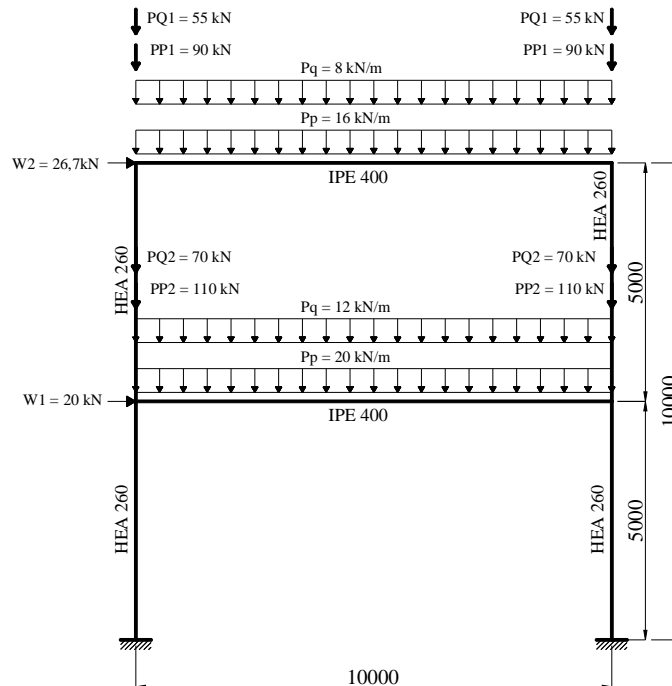


Figura 4.7. - Pórtico rígido de dois pavimentos
(dimensões em milímetros e ações com valores característicos)

Dados:

- Aço ASTM A572 Grau 50
- Módulo de elasticidade - $E = 200.000 \text{ MPa}$
- Perfis laminados de abas paralelas

Para o pórtico apresentado na Figura 4.7, inicialmente foi realizada a classificação da estrutura quanto à sensibilidade a deslocamentos laterais, seguida da análise de primeira ordem (APO) e da análise de segunda ordem (ASO). A APO e a ASO foram realizadas com auxílio do programa computacional SAP 2000. Para efeitos de comparação, realizou-se também uma análise de segunda ordem por meio do Método da Ampliação dos Esforços Solicitantes (MAES), designada por ASO-MAES, previsto no Anexo D da ABNT NBR8800:2008.

Por fim, apresenta-se uma sobreposição dos resultados dos esforços para cada tipo de análise dos pilares da estrutura e uma avaliação da capacidade última desses pilares, segundo a ABNT NBR8800:1986 e a ABNT NBR8800:2008.

Modelo estrutural

Na Figura 4.8 mostra-se o modelo estrutural adotado para análise.

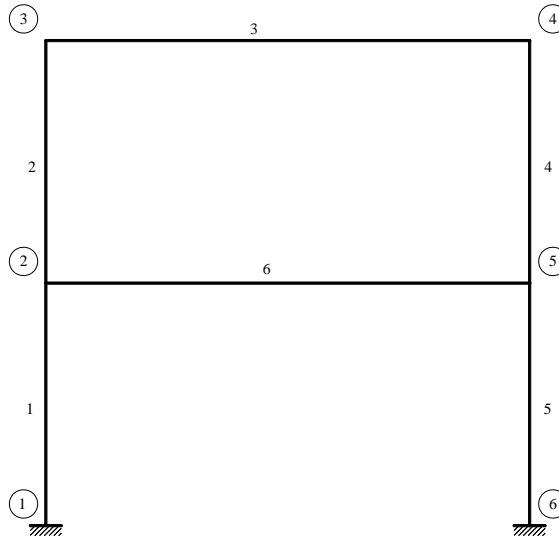


Figura 4.8. - Modelo estrutural do pórtico plano

Ações atuantes

- PP* – Peso próprio da estrutura
- PQ* – Sobrecarga
- Fn* – Força horizontal equivalente (Força nocional)
- W* – Vento

A força horizontal equivalente (F_n) a ser aplicada sobre a estrutura (Figura 4.9), que representa as imperfeições geométricas, deve ser calculada para cada pavimento da estrutura, conforme a seguinte expressão:

$$F_n = \frac{0,3}{100} \sum N_{sd} \quad (4.1)$$

onde:

$\sum N_{sd}$ é o somatório das cargas gravitacionais de cálculo atuantes no pavimento.

Como as forças gravitacionais nos dois pavimentos são diferentes, tem-se:

-Nível 1:

$$F_{n1} = \frac{0,3}{100} ((20 * 1,4 + 12 * 1,5) * 10 + (110 * 2) * 1,4 + (70 * 2) * 1,5)$$

$$F_{n1} = 2,94 \text{ kN}$$

-Nível 2:

$$F_{n2} = \frac{0,3}{100} ((16 * 1,4 + 8 * 1,5) * 10 + (90 * 2) * 1,4 + (55 * 2) * 1,5)$$

$$F_{n2} = 2,28 \text{ kN}$$

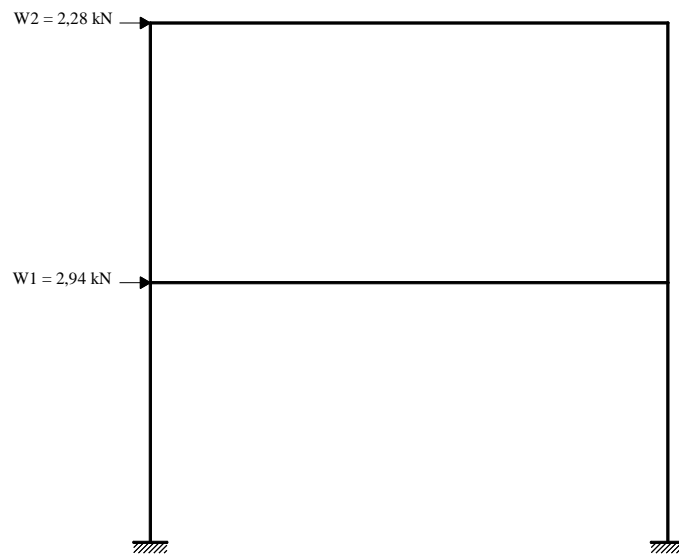


Figura 4.9. - Força horizontal equivalente em cada andar (kN)

Combinações de ações

Para verificação da segurança em relação aos estados-limites últimos, foram consideradas as seguintes combinações últimas normais:

Combinação 01: $1,4 PP + F_n + 1,5 PQ$

Combinação 02: $1,4 PP + 1,5 PQ + 1,4 * 0,6 W$

Combinação 03: $1,4 PP + 1,4 W + 1,5 * 0,5 PQ$

Nas combinações indicadas anteriormente, as imperfeições geométricas não foram consideradas em conjunto com as forças horizontais de mesmo sentido e de maior magnitude.

Análise estrutural

Classificação da estrutura quanto à sensibilidade a deslocamentos laterais

Segundo o item 4.9.4.5 da ABNT NBR 8800:2008 a classificação da estrutura deve ser obtida para as combinações últimas de ações em que os deslocamentos horizontais provenientes das forças horizontais tenham os mesmos sentidos dos deslocamentos horizontais decorrentes das cargas gravitacionais.

A classificação quanto à sensibilidade a deslocamentos laterais pode ser realizada em função da relação entre o deslocamento lateral do andar relativo à base obtido na análise de segunda ordem (u_2) e aquele obtido na análise de primeira ordem (u_1) (Tabela 4.3), em todos os seus andares e para todas as combinações de ações. De maneira aproximada, esta classificação também pode ser feita em função do coeficiente B_2 (Tabela 4.4).

Tabela 4.3. - Classificação da estrutura de acordo com os deslocamentos relativos

| Combinação | Nó | Deslocamento (mm) | | |
|------------|----|-------------------|---------|-----------|
| | | u_1 | u_2 | u_2/u_1 |
| 01 | 2 | 1,8497 | 2,1647 | 1,17 |
| | 3 | 3,7115 | 4,234 | 1,14 |
| 02 | 2 | 16,2315 | 18,9478 | 1,17 |
| | 3 | 31,5482 | 36,0856 | 1,14 |
| 03 | 2 | 27,1419 | 30,6296 | 1,13 |
| | 3 | 52,2611 | 58,1945 | 1,11 |

Nota: u_1 e u_2 representam os deslocamentos horizontais em análise de primeira e segunda ordem nos nós indicados, respectivamente.

Tabela 4.4. - Valores do coeficiente B_2 para classificação da estrutura

| Combinação | Nível | R_s | Δh (mm) | H (mm) | N_{Sd} | H_{Sd} | B_2 |
|------------|-------|-------|-----------------|----------|----------|----------|-------|
| 01 | 1 | 0,85 | 1,8497 | 5000 | 700 | 5,22 | 1,06 |
| | 2 | 0,85 | 1,8618 | 5000 | 550 | 2,28 | 1,12 |
| 02 | 1 | 0,85 | 16,2315 | 5000 | 700 | 39,22 | 1,07 |
| | 2 | 0,85 | 15,3167 | 5000 | 550 | 22,43 | 1,10 |
| 03 | 1 | 0,85 | 27,1419 | 5000 | 700 | 59,04 | 1,08 |
| | 2 | 0,85 | 25,1192 | 5000 | 550 | 37,38 | 1,10 |

Os valores do coeficiente B_2 apresentados na Tabela 4.4 foram calculados sem levar em consideração as imperfeições de material.

Em função dos valores das relações u_2/u_1 (Tabela 4.3) e dos coeficientes B_2 (Tabela 4.4), a estrutura é classificada como de média deslocabilidade.

Comparação dos resultados da APO e da ASO

Tendo em vista os diferentes tipos de análise realizados (APO, ASO e ASO-MAES), apresentam-se alguns gráficos com a sobreposição dos resultados dos esforços máximos dos pilares da estrutura.

Barra 1

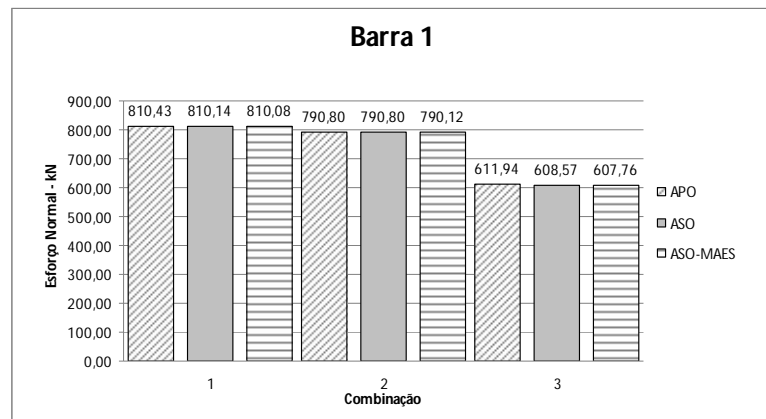


Figura 4.10. - Esforço normal máximo (kN) na barra 1 para as combinações 01,02 e 03 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos)

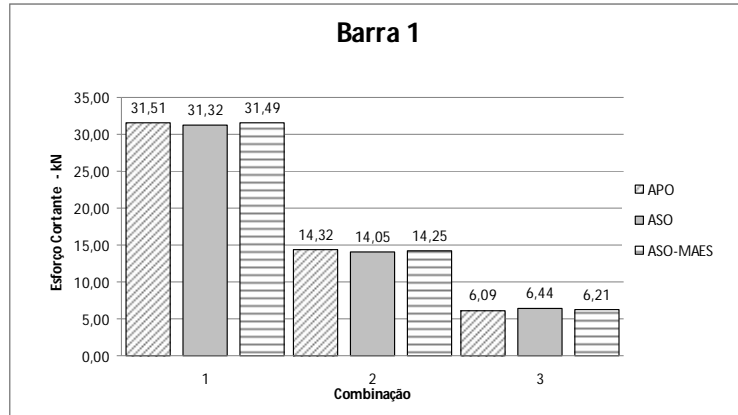


Figura 4.11. - Esforço cortante máximo (kN) na barra 1 para as combinações 01,02 e 03 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos)

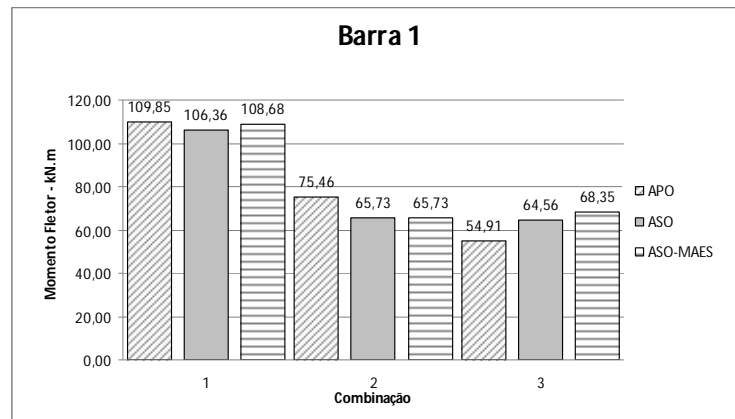


Figura 4.12. - Momento fletor máximo (kN.m) na barra 1 para as combinações 01,02 e 03 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos)

Barra 2

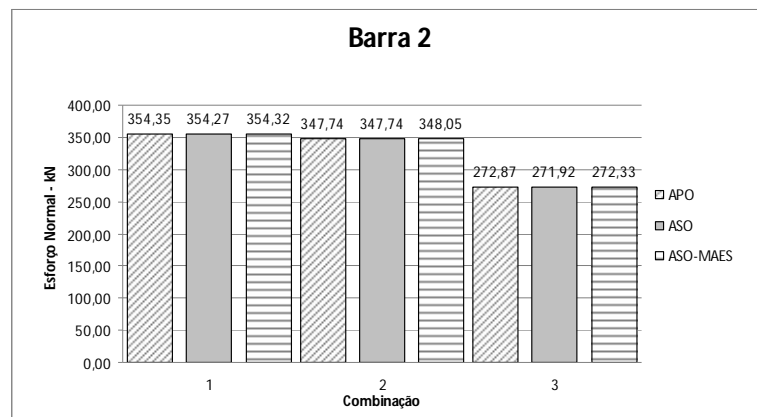


Figura 4.13. - Esforço normal máximo (kN) na barra 2 para as combinações 01,02 e 03 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos)

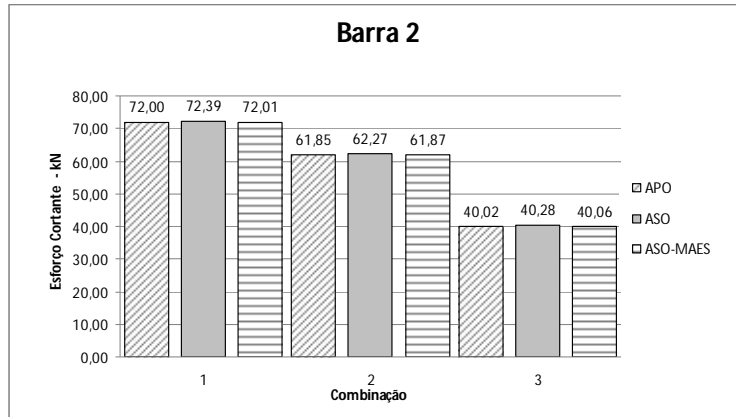


Figura 4.14. - Esforço cortante máximo (kN) na barra 2 para as combinações 01,02 e 03 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos)

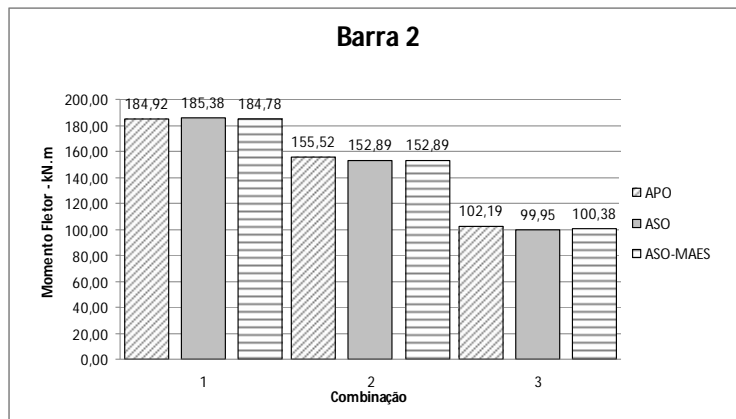


Figura 4.15. - Momento fletor máximo (kN.m) na barra 2 para as combinações 01,02 e 03 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos)

Barra 4

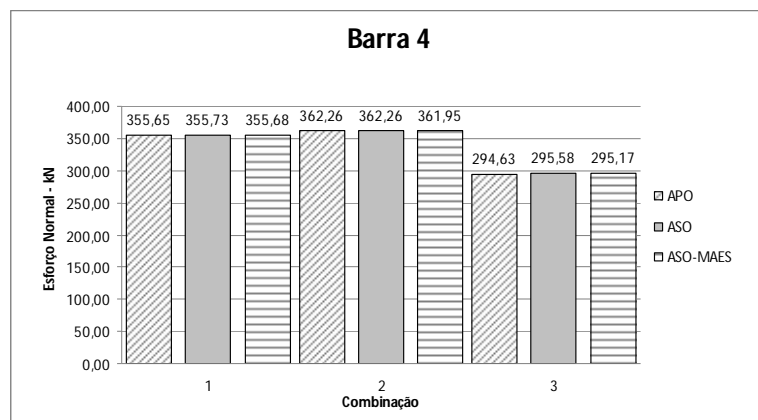


Figura 4.16. - Esforço normal máximo (kN) na barra 4 para as combinações 01,02 e 03 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos)

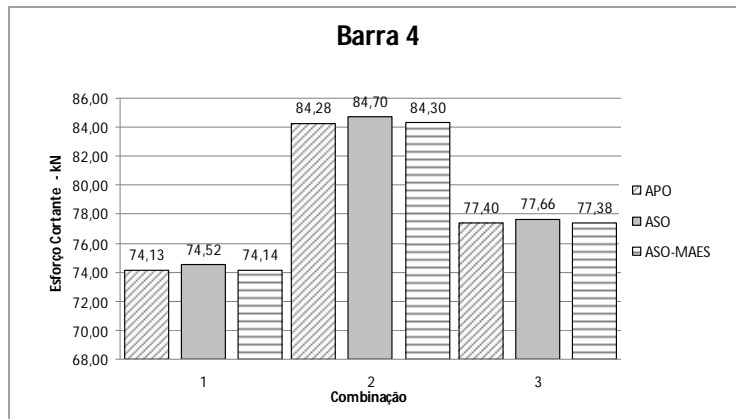


Figura 4.17. - Esforço cortante máximo (kN) na barra 4 para as combinações 01,02 e 03 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos)

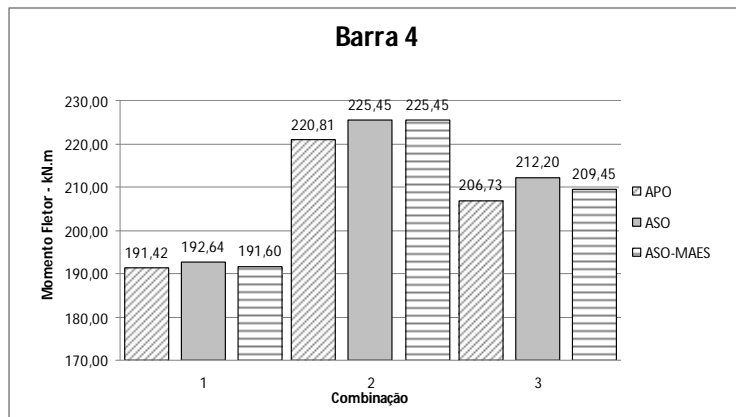


Figura 4.18. - Momento fletor máximo (kN.m) na barra 4 para as combinações 01,02 e 03 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos)

Barra 5

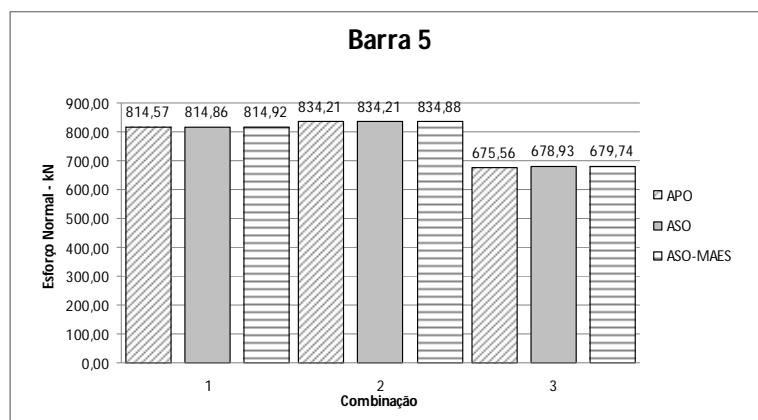


Figura 4.19. - Esforço normal máximo (kN) na barra 5 para as combinações 01,02 e 03 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos)

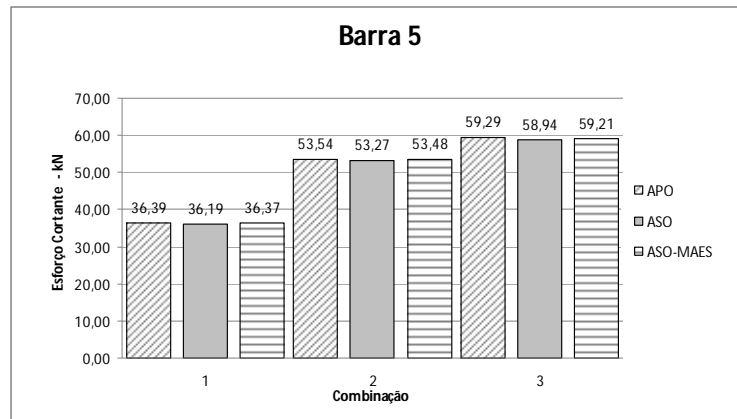


Figura 4.20. - Esforço cortante máximo (kN) na barra 5 para as combinações 01,02 e 03 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos)

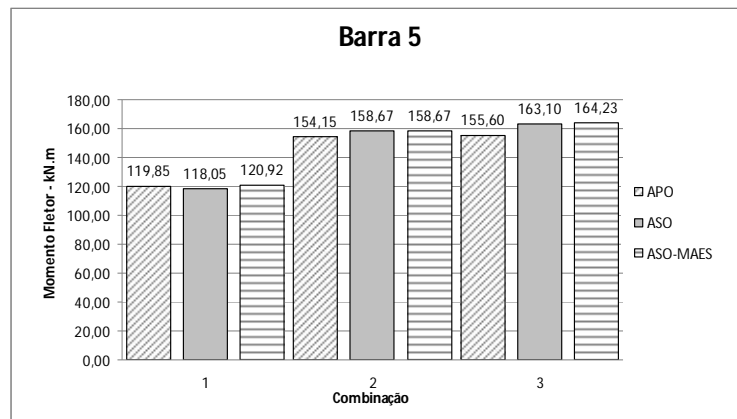


Figura 4.21. - Momento fletor máximo (kN.m) na barra 5 para as combinações 01,02 e 03 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos)

Verificação da capacidade última dos pilares

Para a verificação da capacidade última dos pilares utilizou-se o programa Desmet 4.0. Para os resultados de esforços obtidos na APO fez-se a verificação da interação dos efeitos combinados de força axial e momento fletor de acordo com ABNT NBR8800:1986, enquanto que para os resultados obtidos na ASO e ASO-MAES fez-se a verificação de acordo com a ABNT NBR8800:2008.

No cálculo dos pilares de acordo com a ABNT NBR8800:1986 foram utilizados os coeficientes de flambagem (K) indicados na Tabela 4.5, ao passo que para ABNT NBR8800:2008 tomou-se sempre $K = 1,0$.

Tabela 4.5. - Valores do coeficiente de flambagem (K) segundo ABNT NBR8800:1986

| Barra | I_c (cm ⁴) | L_c (cm) | I_g (cm ⁴) | L_g (cm) | α | G_A | G_B | K |
|-------|--------------------------|------------|--------------------------|------------|----------|-------|-------|------|
| 1 | 10450 | 500 | 23130 | 1000 | 0,67 | 1 | 2,70 | 1,51 |
| 2 | 10450 | 500 | 23130 | 1000 | 0,67 | 2,70 | 1,35 | 1,58 |
| 4 | 10450 | 500 | 23130 | 1000 | 0,67 | 2,70 | 1,35 | 1,58 |
| 5 | 10450 | 500 | 23130 | 1000 | 0,67 | 1 | 2,70 | 1,51 |

Os resultados da verificação da capacidade última dos pilares do pavimento térreo são mostrados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6. - Verificação da capacidade última dos pilares do pavimento térreo

| Barra | Combinação | Tipo de análise | Esforços solicitantes | | Esforços Resistentes | | Interação |
|-------|------------|-----------------|-----------------------|-------------------|----------------------|-------------------|-----------|
| | | | N_{Sd} (kN) | $M_{x,Sd}$ (kN.m) | N_{Rd} (kN) | $M_{x,Rd}$ (kN.m) | |
| 1 | 1 | APO - SAP2000 | 810,43 | 109,85 | 1769,68 | 276,21 | 0,880 |
| | | ASO - SAP2000 | 810,14 | 106,36 | 2240,07 | 280,18 | 0,699 |
| | | ASO - MAES | 810,08 | 108,68 | 2240,07 | 280,18 | 0,700 |
| 2 | 1 | APO - SAP2000 | 354,35 | 184,92 | 1702,16 | 276,21 | 0,900 |
| | | ASO - SAP2000 | 354,27 | 185,38 | 2240,07 | 280,18 | 0,741 |
| | | ASO - MAES | 354,32 | 184,78 | 2240,07 | 280,18 | 0,739 |
| 4 | 2 | APO - SAP2000 | 362,26 | 220,81 | 1702,16 | 276,21 | 1,040 |
| | | ASO - SAP2000 | 362,26 | 225,45 | 2240,07 | 280,18 | 0,886 |
| | | ASO - MAES | 361,95 | 225,45 | 2240,07 | 280,18 | 0,885 |
| 5 | 2 | APO - SAP2000 | 834,21 | 154,15 | 1769,68 | 276,21 | 1,100 |
| | | ASO - SAP2000 | 834,21 | 158,67 | 2240,07 | 280,18 | 0,876 |
| | | ASO - MAES | 834,88 | 158,67 | 2240,07 | 280,18 | 0,876 |

4.3. Caso 3 - Pórtico não-contraventado de dois pavimentos

O caso 3 consiste em um pórtico plano não-contraventado de dois pavimentos que compõe a estrutura de um edifício em aço, conforme se mostra na Figura 4.1. Na mesma figura indicam-se também as forças gravitacionais concentradas (PP e PQ) e distribuídas (Pp e Pq), as ações devidas ao vento (W) e as dimensões da estrutura em milímetros (mm).

Admite-se que os pilares da estrutura são engastados na base e que existe continuidade completa com as vigas.

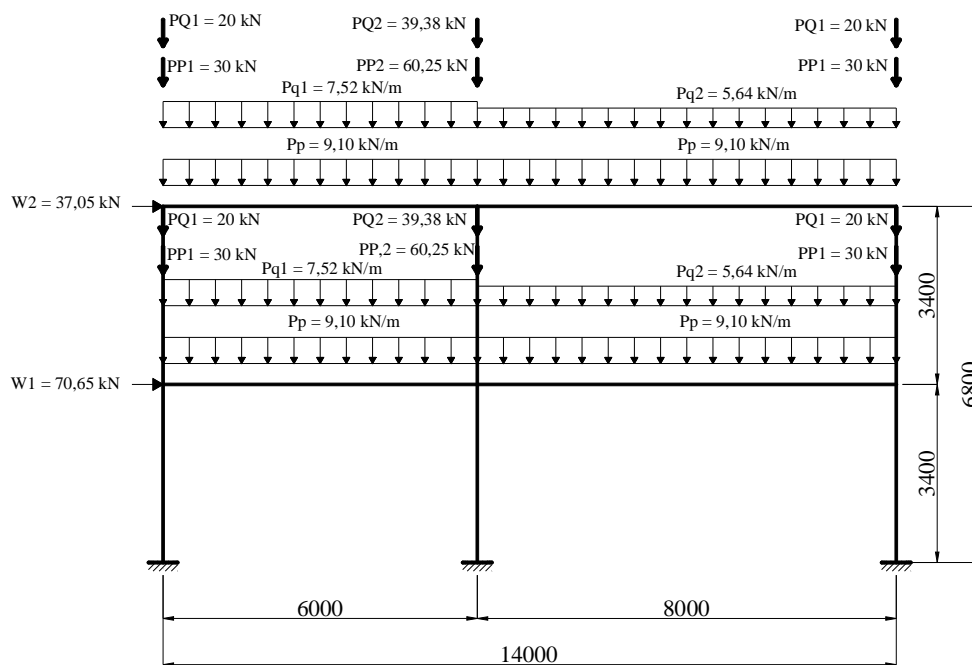


Figura 4.1. - Pórtico rígido de dois pavimentos
(dimensões em milímetros e ações com valores característicos)

Dados:

- Aço ASTM A572 Grau 50
- Módulo de elasticidade - $E = 200.000$ MPa
- Perfis laminados de abas paralelas da AÇOMINAS

Para o pórtico apresentado na Figura 4.1, inicialmente foi realizada a classificação da estrutura quanto à sensibilidade a deslocamentos laterais, seguida da análise de primeira

ordem (APO) e da análise de segunda ordem (ASO). A APO e a ASO foram realizadas com auxílio do programa computacional SAP 2000. Para efeitos de comparação, realizou-se também uma análise de segunda ordem por meio do Método da Ampliação dos Esforços Solicitantes (MAES), designada por ASO-MAES, previsto no Anexo D da ABNT NBR8800:2008.

Para efeito de comparação, apresenta-se uma sobreposição dos resultados dos esforços para cada tipo de análise nos trechos dos pilares situados no pavimento térreo da estrutura e uma avaliação da capacidade última desses pilares, segundo a ABNT NBR8800:1986 e ABNT NBR8800:2008.

Modelo estrutural

Na Figura 4.2 mostra-se o modelo estrutural adotado e na Figura 4.3 as seções utilizadas nas barras, definidas a partir de um pré-dimensionamento, que levou em conta o estado-limite de serviço de deslocamento lateral excessivo.

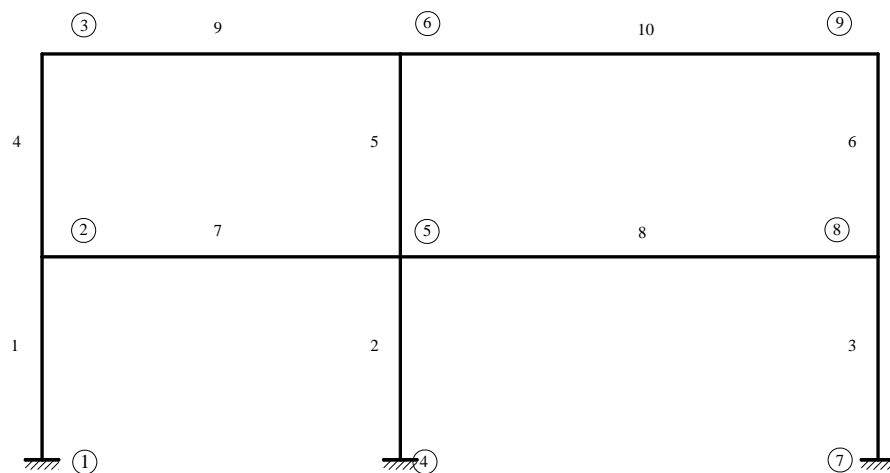


Figura 4.2. - Modelo estrutural do pórtico plano.

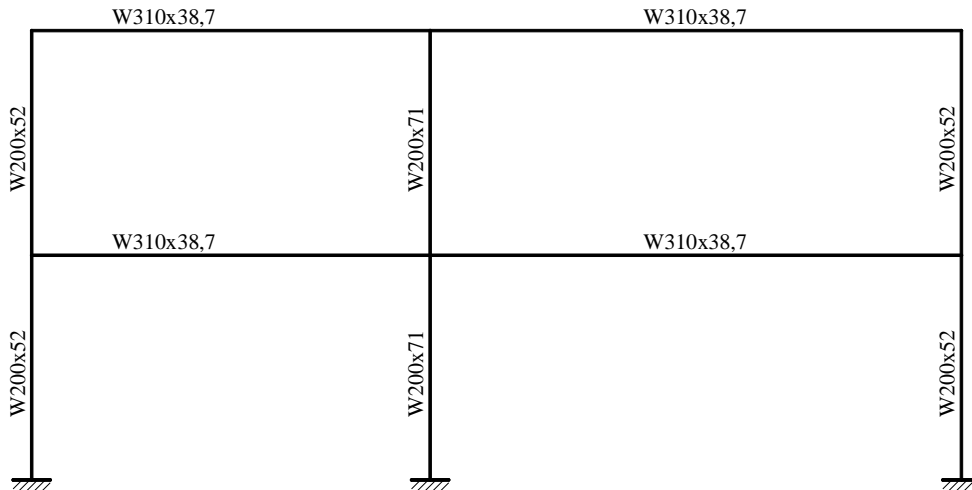


Figura 4.3. - Seções adotadas a partir de um pré-dimensionamento.

Ações atuantes

As ações atuantes na estrutura são:

- PP – Peso próprio da estrutura
- PQ – Sobrecarga
- F_n – Força horizontal equivalente (Força nocional)
- W – Vento

Na Figura 4.1, as letras minúsculas se referem a ações distribuídas e as letras maiúsculas a ações concentradas.

A força horizontal equivalente (F_n) a ser aplicada sobre a estrutura (Figura 4.4), que representa as imperfeições geométricas, deve ser calculada para cada pavimento da estrutura, conforme a seguinte expressão:

$$F_n = \frac{0,3}{100} \sum N_{sd} \quad (4.1)$$

onde:

$\sum N_{sd}$ é o somatório das cargas gravitacionais de cálculo atuantes no pavimento.

Como as forças gravitacionais nos dois pavimentos são idênticas, tem-se:

$$F_n = \frac{0,3}{100} ((30 + 30 + 60,25) * 1,4 + (20 + 20 + 39,38) * 1,5 + (9,10 * 14) * 1,4 + (7,52 * 6 + 5,64 * 8) * 1,5)$$

$$F_n = 1,80 \text{ kN}$$

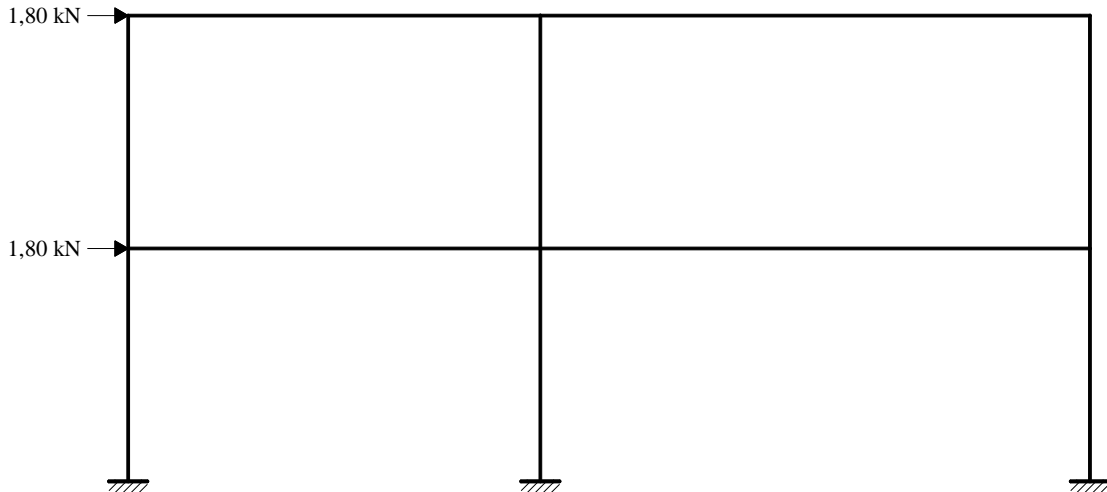


Figura 4.4. - Força horizontal equivalente em cada andar (kN)

Combinações de ações

Para verificação da segurança em relação aos estados-limites últimos, foram consideradas as seguintes combinações últimas normais:

Combinação 01: $1,4 PP + F_n + 1,5 PQ$

Combinação 02: $1,4 PP + 1,4 W + 1,5 * 0,5 PQ$

Combinação 03: $1,4 PP + 1,5 PQ + 1,4 * 0,6 W$

Nas combinações indicadas anteriormente, as imperfeições geométricas não foram consideradas em conjunto com forças horizontais de mesmo sentido e de maior magnitude.

Análise estrutural

Classificação da estrutura quanto à sensibilidade a deslocamentos laterais

Segundo o item 4.9.4.5 da ABNT NBR 8800:2008 a classificação da estrutura deve ser obtida para as combinações últimas de ações em que os deslocamentos horizontais provenientes das forças horizontais tenham os mesmos sentidos dos deslocamentos horizontais decorrentes das cargas gravitacionais.

A classificação quanto à sensibilidade a deslocamentos laterais pode ser realizada em função da relação entre o deslocamento lateral do andar relativo à base obtido na análise de segunda ordem (u_2) e aquele obtido na análise de primeira ordem (u_1) (Tabela 4.7), em todos os seus andares e para todas as combinações de ações. De maneira aproximada, esta classificação também pode ser feita em função do coeficiente B_2 (Tabela 4.8).

Tabela 4.7. - Deslocamentos laterais relativos à base para classificação da estrutura

| Combinação | Nó | Deslocamento (mm) | | |
|------------|----|-------------------|---------|-----------|
| | | u_1 | u_2 | u_2/u_1 |
| 01 | 2 | 0,0239 | 0,0239 | 1,00 |
| | 3 | 0,1439 | 0,1514 | 1,05 |
| 02 | 2 | 14,3460 | 14,8574 | 1,04 |
| | 3 | 24,3460 | 25,2865 | 1,04 |
| 03 | 2 | 8,3853 | 8,7654 | 1,05 |
| | 3 | 14,1290 | 14,8150 | 1,05 |

Nota: u_1 e u_2 representam os deslocamentos horizontais em análise de primeira e segunda ordem nos nós indicados, respectivamente.

Tabela 4.8. - Valores do coeficiente B_2 para classificação da estrutura

| Combinação | Nível | R_s | Δh (mm) | H (mm) | N_{sd} (kN) | H_{sd} (kN) | B_2 |
|------------|-------|-------|-----------------|----------|---------------|---------------|-------|
| 01 | 1 | 0,85 | 0,0239 | 3400 | 1202,28 | 3,6 | 1,00 |
| | 2 | 0,85 | 0,1200 | 3400 | 601,14 | 1,8 | 1,01 |
| 02 | 1 | 0,85 | 14,3500 | 3400 | 947,84 | 133,68 | 1,04 |
| | 2 | 0,85 | 10,0000 | 3400 | 473,92 | 32,97 | 1,05 |
| 03 | 1 | 0,85 | 8,3900 | 3400 | 1202,30 | 79,12 | 1,05 |
| | 2 | 0,85 | 5,7400 | 3400 | 601,15 | 22,22 | 1,06 |

Os valores do coeficiente B_2 apresentados na Tabela 4.8 foram calculados sem levar em consideração as imperfeições de material.

Em função dos valores das relações u_2/u_1 (Tabela 4.7) e dos coeficientes B_2 (Tabela 4.8), a estrutura é classificada como de pequena deslocabilidade.

Comparação dos resultados da APO e da ASO

Tendo em vista os diferentes tipos de análise realizados (APO, ASO e ASO-MAES), apresentam-se alguns gráficos com a sobreposição dos resultados dos esforços máximos nos trechos dos pilares situados no pavimento térreo da estrutura.

Barra 1

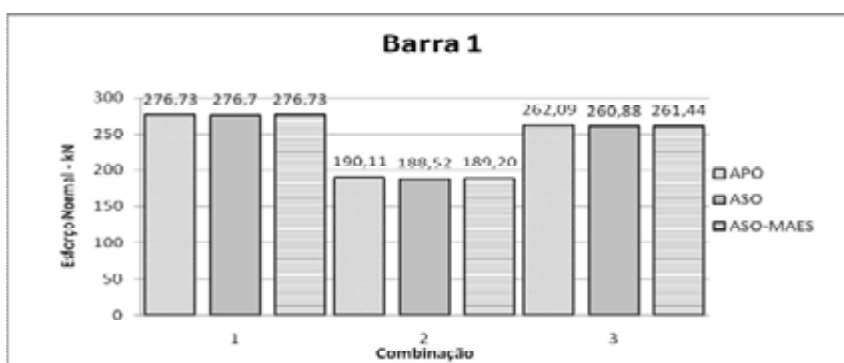


Figura 4.5. - Esforço normal máximo (kN) na barra 1 para as combinações 01,02 e 03 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos)

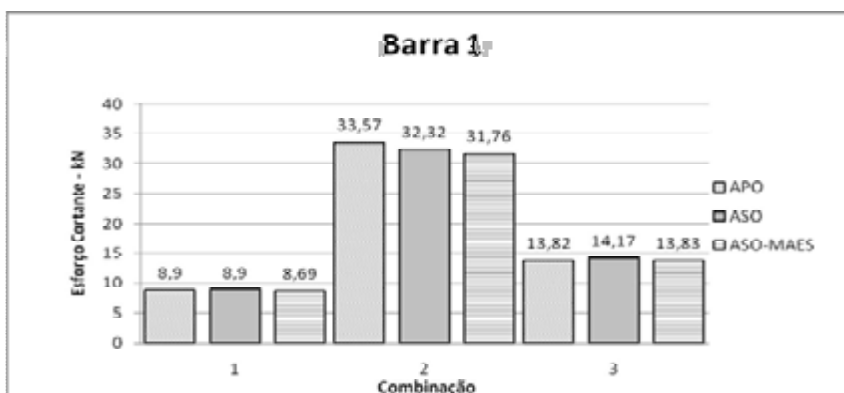


Figura 4.6. - Esforço cortante máximo (kN) na barra 1 para as combinações 01,02 e 03 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos)

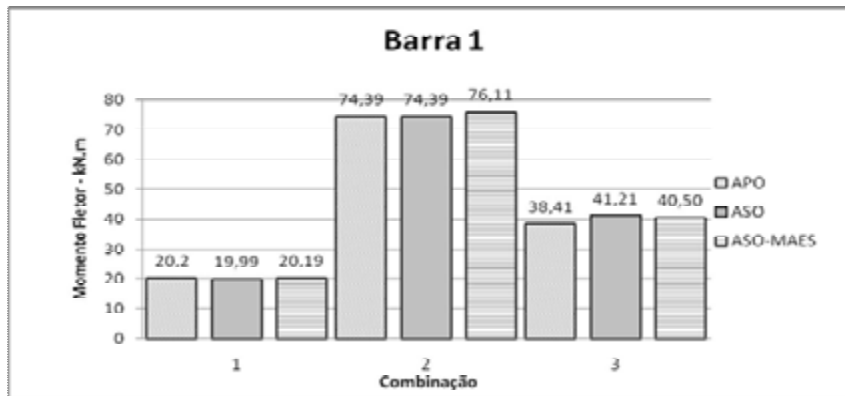


Figura 4.7. - Momento fletor máximo (kN.m) na barra 1 para as combinações 01,02 e 03 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos)

Barra 2

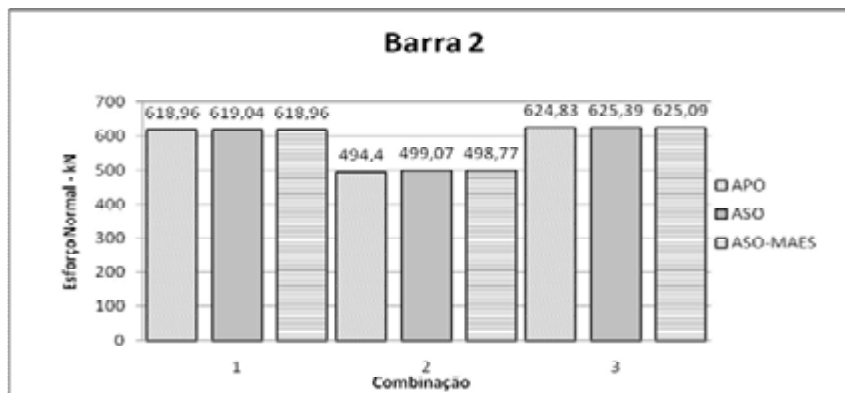


Figura 4.8. - Esforço normal máximo (kN) na barra 2 para as combinações 01,02 e 03 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos)

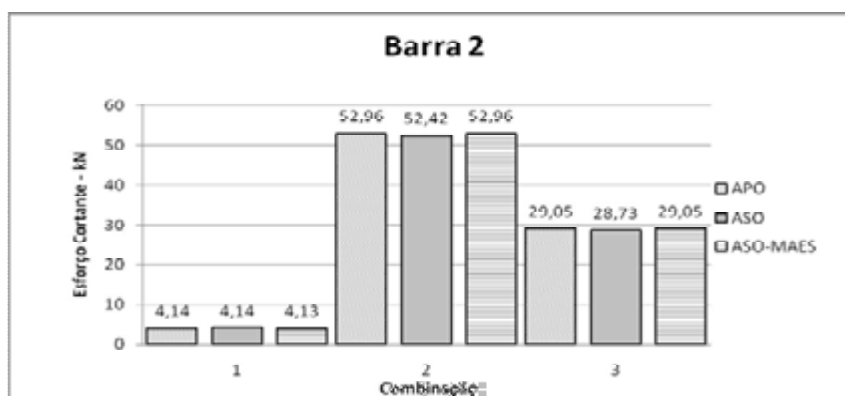


Figura 4.9. - Esforço cortante máximo (kN) na barra 2 para as combinações 01,02 e 03 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos)

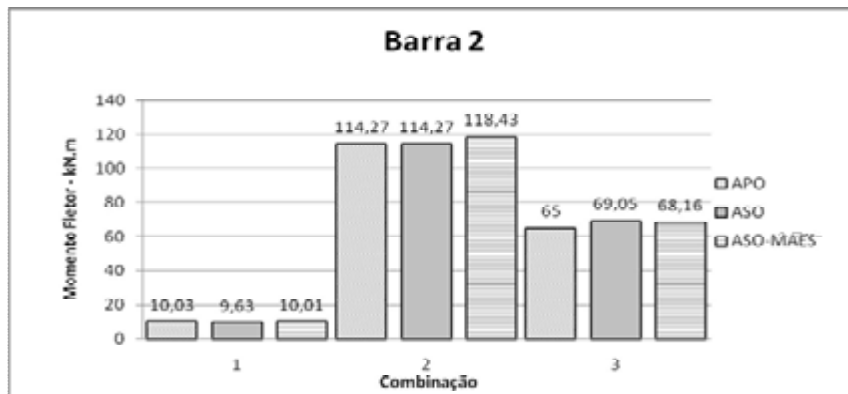


Figura 4.10. - Momento fletor máximo (kN.m) na barra 2 para as combinações 01,02 e 03 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos)

Barra 3

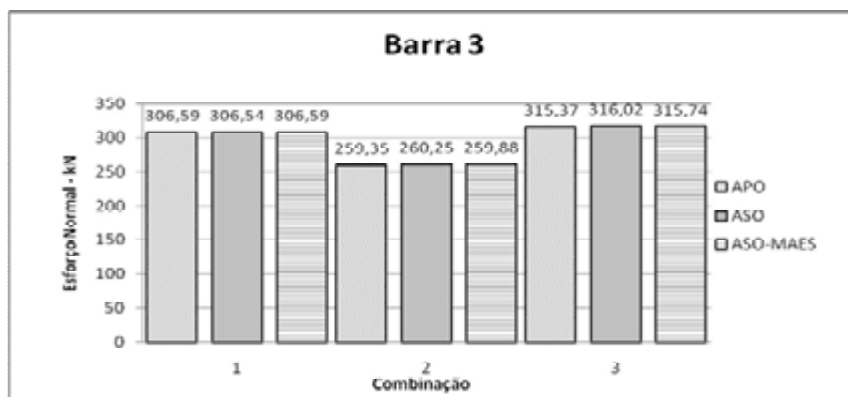


Figura 4.11. - Esforço normal máximo (kN) na barra 3 para as combinações 01,02 e 03 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos)

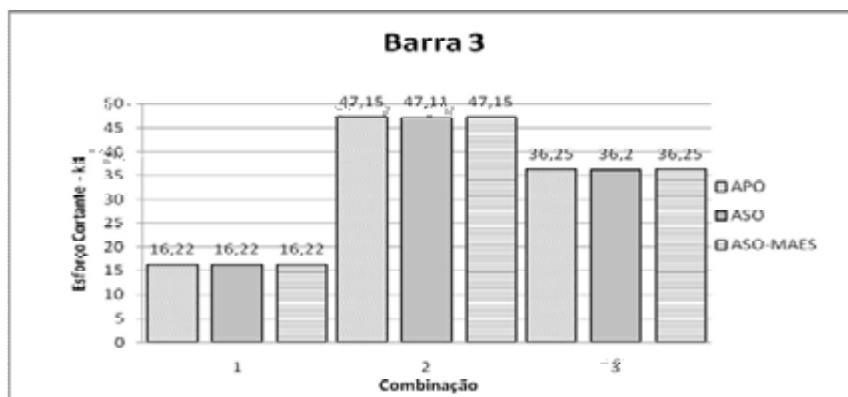


Figura 4.12. - Esforço cortante máximo (kN) na barra 2 para as combinações 01,02 e 03 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos)

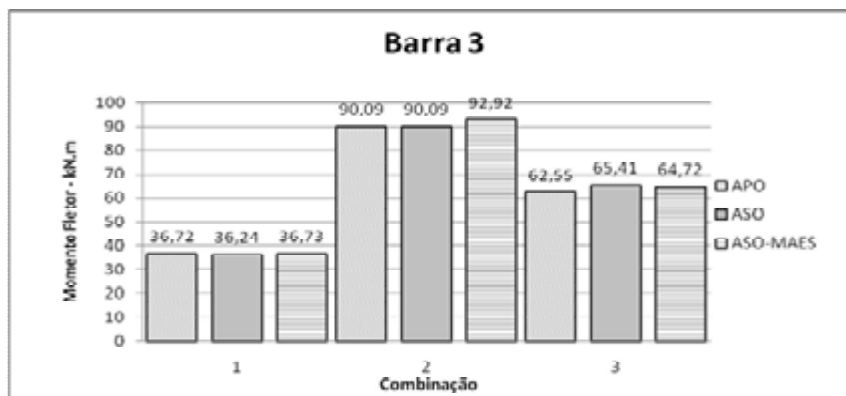


Figura 4.13. - Momento fletor máximo (kN.m) na barra 3 para as combinações 01,02 e 03 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos)

Verificação da capacidade última dos pilares do pavimento térreo

Para a verificação da capacidade última dos pilares do pavimento térreo utilizou-se o programa Desmet 4.0. Para os resultados de esforços obtidos na APO fez-se a verificação da interação dos efeitos combinados de força axial e momento fletor de acordo com ABNT NBR8800:1986, enquanto que para os resultados obtidos na ASO e ASO-MAES fez-se a verificação de acordo com a ABNT NBR8800:2008.

No cálculo dos pilares de acordo com a ABNT NBR8800:1986 foram utilizados os coeficientes de flambagem (K) indicados na Tabela 4.9, ao passo que para ABNT NBR8800:2008 tomou-se sempre $K = 1,0$.

Tabela 4.9. - Valores do coeficiente de flambagem (K) segundo ABNT NBR8800:1986

| Barra | I_c (cm ⁴) | L_c (cm) | I_g (cm ⁴) | L_g (cm) | α | G_A | G_B | K |
|-------|--------------------------|------------|--------------------------|------------|----------|-------|-------|------|
| 1 | 5298 | 340 | 8581 | 600 | 0,67 | 1 | 3,25 | 1,55 |
| 2 | 7660 | 340 | 8581 | 600 | 0,67 | 1 | 0,65 | 1,25 |
| | 7660 | 340 | 8581 | 800 | | | | |
| 3 | 5298 | 340 | 8581 | 800 | 0,67 | 1 | 4,34 | 1,68 |

Os resultados da verificação da capacidade última dos pilares do pavimento térreo são mostrados na Tabela 4.10.

Tabela 4.10. - Verificação da capacidade última dos pilares do pavimento térreo

| Barra | Combinação | Tipo de análise | Esforços solicitantes | | Esforços Resistentes | | Interação |
|-------|------------|-----------------|-----------------------|-------------------|----------------------|-------------------|-----------|
| | | | N_{Sd} (kN) | $M_{x,Sd}$ (kN.m) | N_{Rd} (kN) | $M_{x,Rd}$ (kN.m) | |
| 1 | 01 | APO - SAP2000 | 276,73 | 20,20 | 1300,64 | 164,99 | 0,350 |
| | | ASO - SAP2000 | 276,70 | 19,99 | 1540,4 | 179,57 | 0,201 |
| | | ASO - MAES | 276,73 | 20,19 | 1540,4 | 179,57 | 0,202 |
| 1 | 02 | APO - SAP2000 | 190,11 | 74,39 | 1300,64 | 164,99 | 0,630 |
| | | ASO - SAP2000 | 188,52 | 74,39 | 1540,4 | 179,57 | 0,475 |
| | | ASO - MAES | 189,20 | 76,11 | 1540,4 | 179,57 | 0,485 |
| 2 | 02 | APO - SAP2000 | 494,40 | 114,27 | 1799,63 | 236,63 | 0,800 |
| | | ASO - SAP2000 | 499,07 | 114,27 | 2123,54 | 251,91 | 0,638 |
| | | ASO - MAES | 498,77 | 118,43 | 2123,54 | 251,91 | 0,653 |
| 2 | 03 | APO - SAP2000 | 624,83 | 65,00 | 1799,63 | 236,63 | 0,650 |
| | | ASO - SAP2000 | 625,39 | 69,05 | 2123,54 | 251,91 | 0,538 |
| | | ASO - MAES | 625,09 | 68,16 | 2123,54 | 251,91 | 0,535 |
| 3 | 02 | APO - SAP2000 | 259,35 | 90,09 | 1300,64 | 164,99 | 0,810 |
| | | ASO - SAP2000 | 260,25 | 90,09 | 1540,4 | 179,57 | 0,586 |
| | | ASO - MAES | 259,88 | 92,92 | 1540,4 | 179,57 | 0,602 |
| 3 | 03 | APO - SAP2000 | 315,37 | 62,55 | 1300,64 | 164,99 | 0,680 |
| | | ASO - SAP2000 | 316,02 | 65,41 | 1540,4 | 179,57 | 0,529 |
| | | ASO - MAES | 315,74 | 64,72 | 1540,4 | 179,57 | 0,525 |

4.4. Caso 4 - Pórtico contraventado de dois pavimentos

O caso 4 consiste em um pórtico plano contraventado de dois pavimentos que compõe a estrutura de um edifício em aço, conforme se mostra na Figura 4.14. Na mesma figura indicam-se também as forças gravitacionais concentradas (PP e PQ) e distribuídas (Pp e Pq), as ações devidas ao vento (W) e as dimensões da estrutura em milímetros (mm).

Admite-se que os pilares da estrutura são rotulados na base e que não existe continuidade entre vigas, pilares e contraventamento (ligações rotuladas).

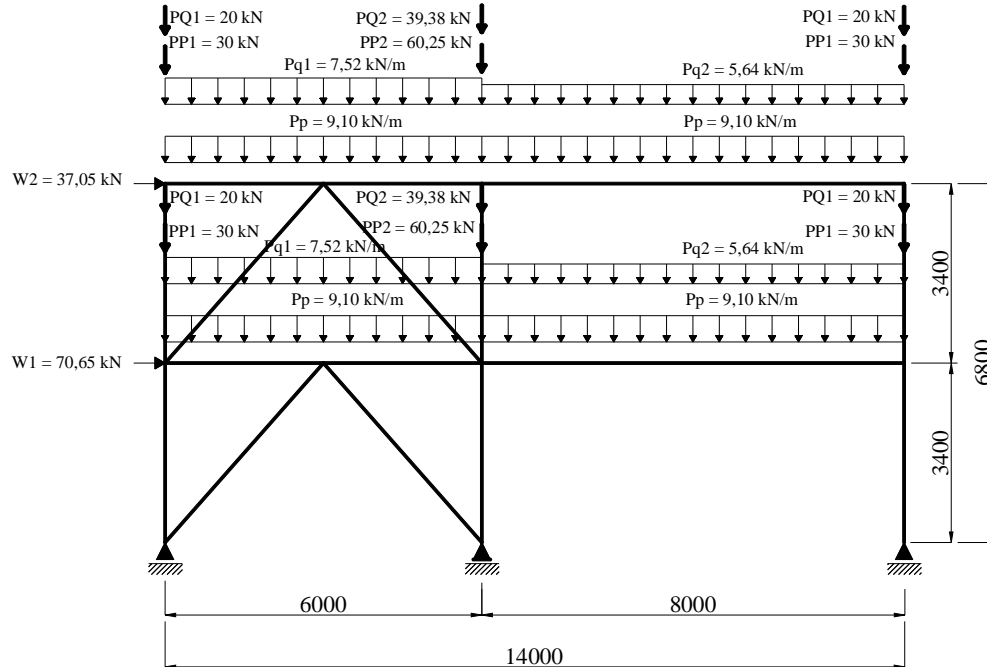


Figura 4.14. - Pórtico contraventado de dois pavimentos (dimensões em milímetros e ações com valores característicos)

Dados:

- Aço ASTM A572 Grau 50
- Módulo de elasticidade - $E = 200.000 \text{ MPa}$
- Perfis laminados de abas paralelas da GERDAU-AÇOMINAS

Para o pórtico apresentado na Figura 4.14, inicialmente foi realizada a classificação da estrutura quanto à sensibilidade a deslocamentos laterais, seguida da análise de primeira ordem (APO) e da análise de segunda ordem (ASO). A APO e a ASO foram realizadas com auxílio do programa computacional SAP 2000. Para efeitos de comparação, realizou-se também um análise de segunda ordem por meio do Método da Ampliação dos Esforços Solicitantes (MAES), designada por ASO-MAES, previsto no Anexo D da ABNT NBR8800:2008.

Para efeito de comparação, apresenta-se uma sobreposição dos resultados dos esforços para cada tipo de análise nos trechos dos pilares situados no pavimento térreo da estrutura e uma avaliação da capacidade última desses pilares, segundo a ABNT NBR8800:1986 e ABNT NBR8800:2008

Modelo estrutural

Na Figura 4.15 mostra-se o modelo estrutural adotado e na Figura 4.16 as seções utilizadas nas barras, definidas a partir de um pré-dimensionamento, que levou em conta o estado-limite de serviço de deslocamento lateral excessivo.

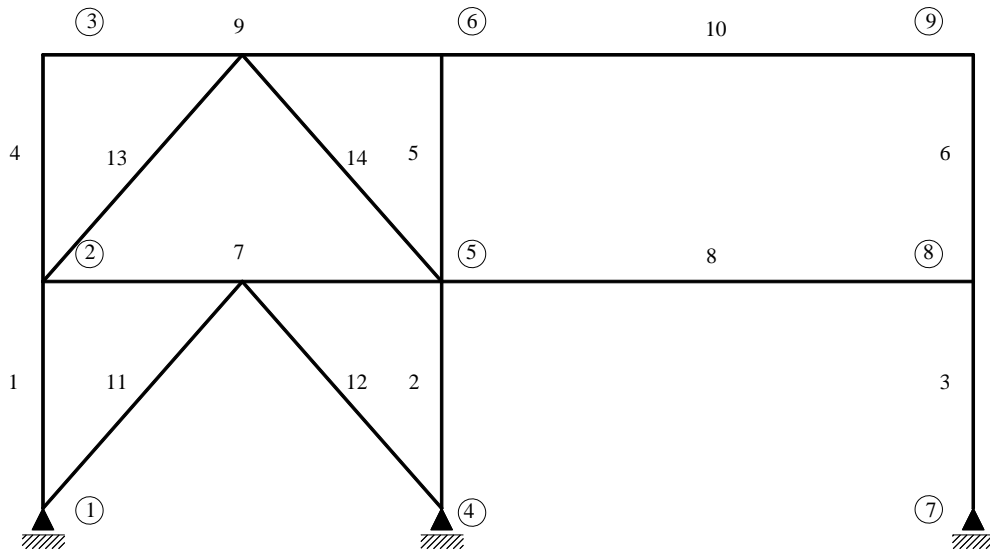


Figura 4.15. - Modelo estrutural do pórtico plano.

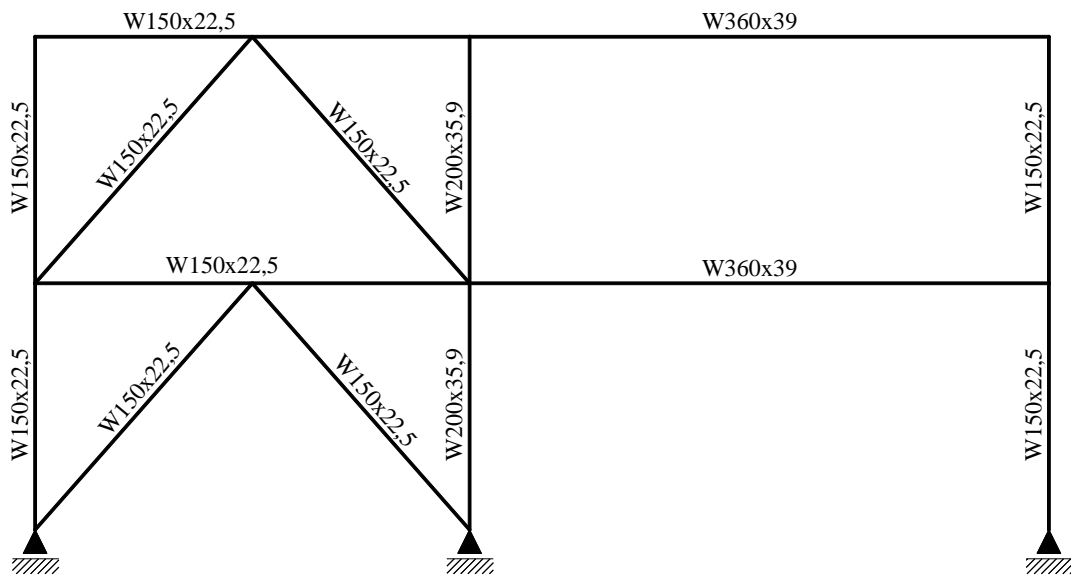


Figura 4.16. - Seções adotadas a partir de um pré-dimensionamento.

Ações atuantes

As ações atuantes na estrutura são:

PP – Peso próprio da estrutura

PQ – Sobrecarga

F_n – Força horizontal equivalente (Força nocional)

W – Vento

Na Figura 4.14, as letras minúsculas se referem a ações distribuídas e as letras maiúsculas a ações concentradas.

A força horizontal equivalente (F_n) a ser aplicada sobre a estrutura (Figura 4.17), que representa as imperfeições geométricas, deve ser calculada para cada pavimento da estrutura, conforme a seguinte expressão:

$$F_n = \frac{0,3}{100} \sum N_{sd} \quad (4.1)$$

onde:

$\sum N_{sd}$ é o somatório das cargas gravitacionais de cálculo atuantes no pavimento.

Como as forças gravitacionais nos dois pavimentos são idênticas, tem-se:

$$F_n = \frac{0,3}{100} ((30 + 30 + 60,25) * 1,4 + (20 + 20 + 39,38) * 1,5 + (9,10 * 14) * 1,4 + (7,52 * 6 + 5,64 * 8) * 1,5)$$
$$F_n = 1,80 \text{ kN}$$

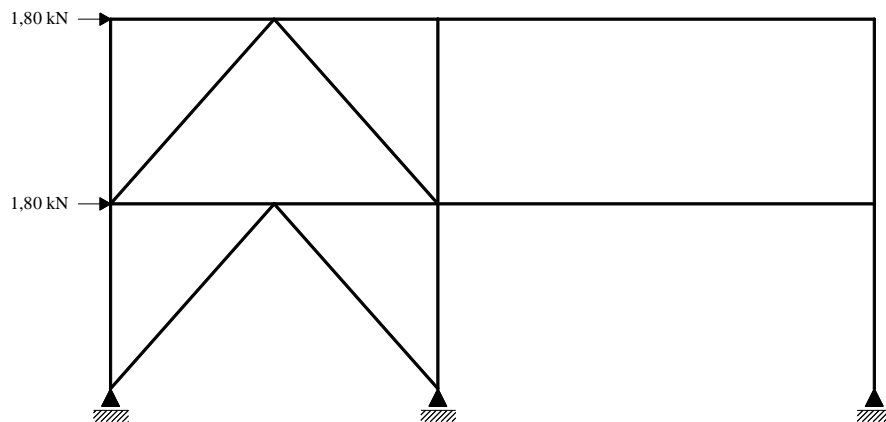


Figura 4.17. - Força horizontal equivalente em cada andar (kN)

Combinações de ações

Para verificação da segurança em relação aos estados-limites últimos, foram consideradas as seguintes combinações últimas normais:

Combinação 01: $1,4 PP + Fn + 1,5 PQ$

Combinação 02: $1,4 PP + 1,4 W + 1,5 * 0,5 PQ$

Combinação 03: $1,4 PP + 1,5 PQ + 1,4 * 0,6 W$

Nas combinações indicadas anteriormente, as imperfeições geométricas não foram consideradas em conjunto com forças horizontais de mesmo sentido e de maior magnitude.

Análise estrutural

Classificação da estrutura quanto à sensibilidade a deslocamentos laterais

Segundo o item 4.9.4.5 da ABNT NBR 8800:2008 a classificação da estrutura deve ser obtida para as combinações últimas de ações em que os deslocamentos horizontais provenientes das forças horizontais tenham os mesmos sentidos dos deslocamentos horizontais decorrentes das cargas gravitacionais.

A classificação quanto à sensibilidade a deslocamentos laterais pode ser realizada em função da relação entre o deslocamento lateral do andar relativo à base obtido na análise de segunda ordem (u_2) e aquele obtido na análise de primeira ordem (u_1) (Tabela 4.11), em todos os seus andares e para todas as combinações de ações. De maneira aproximada, esta classificação também pode ser feita em função do coeficiente B_2 (Tabela 4.12).

Tabela 4.11. - Deslocamentos laterais relativos à base para classificação da estrutura

| Combinação | Nó | Deslocamento (mm) | | |
|------------|----|-------------------|--------|-----------|
| | | u_1 | u_2 | u_2/u_1 |
| 01 | 2 | 0,1658 | 0,1655 | 1,00 |
| | 3 | 0,4205 | 0,4218 | 1,05 |
| 02 | 2 | 1,6654 | 1,6697 | 1,04 |
| | 3 | 2,4363 | 2,4423 | 1,04 |
| 03 | 2 | 0,8854 | 0,8888 | 1,05 |
| | 3 | 1,6409 | 1,6460 | 1,05 |

Nota: u_1 e u_2 representam os deslocamentos horizontais em análise de primeira e segunda ordem nos nós indicados, respectivamente.

Tabela 4.12. - Valores do coeficiente B_2 para classificação da estrutura

| Combinação | Nível | R_s | Δh | H (mm) | N_{sd} (kN) | H_{sd} (kN) | B_2 |
|------------|-------|-------|------------|----------|---------------|---------------|-------|
| 01 | 1 | 1 | 0,1658 | 3400,00 | 1202,28 | 3,60 | 1,02 |
| | 2 | 1 | 0,2547 | 3400,00 | 601,14 | 1,80 | 1,03 |
| 02 | 1 | 1 | 1,6654 | 3400,00 | 947,84 | 133,68 | 1,00 |
| | 2 | 1 | 0,7709 | 3400,00 | 473,92 | 32,97 | 1,00 |
| 03 | 1 | 1 | 0,8854 | 3400,00 | 1202,3 | 79,12 | 1,00 |
| | 2 | 1 | 0,7555 | 3400,00 | 601,15 | 22,22 | 1,01 |

Os valores do coeficiente B_2 apresentados na Tabela 4.8 foram calculados sem levar em consideração as imperfeições de material.

Em função dos valores das relações u_2/u_1 (Tabela 4.11) e dos coeficientes B_2 (Tabela 4.12), a estrutura é classificada como de pequena deslocabilidade.

Comparação dos resultados da APO e da ASO

Tendo em vista os diferentes tipos de análise realizados (APO, ASO e ASO-MAES), apresentam-se alguns gráficos com a sobreposição dos resultados dos esforços máximos nos trechos dos pilares situados no pavimento térreo da estrutura.

Barra 1

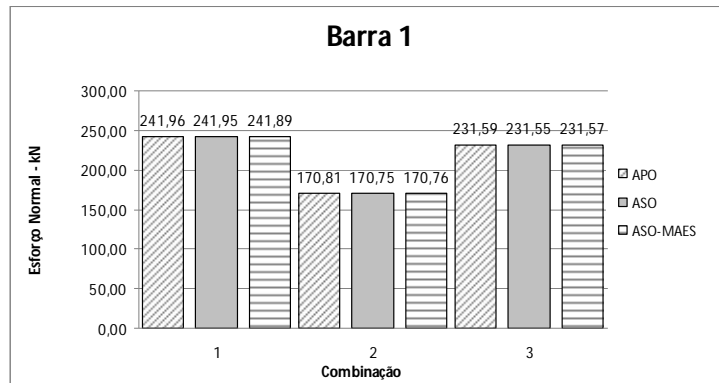


Figura 4.18. - Esforço normal máximo (kN) na barra 1 para as combinações 01,02 e 03 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos)

Barra 2

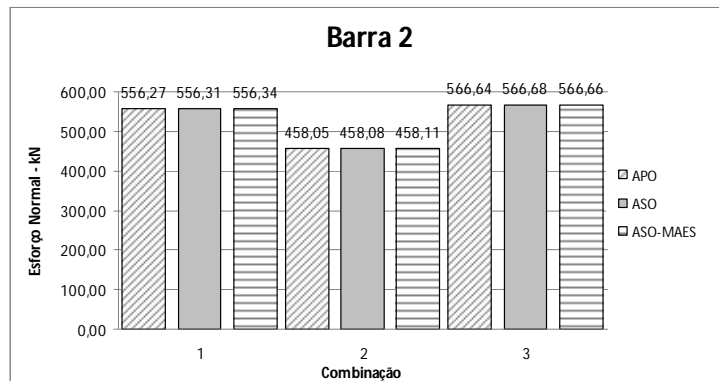


Figura 4.19. - Esforço normal máximo (kN) na barra 2 para as combinações 01,02 e 03 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos)

Barra 3

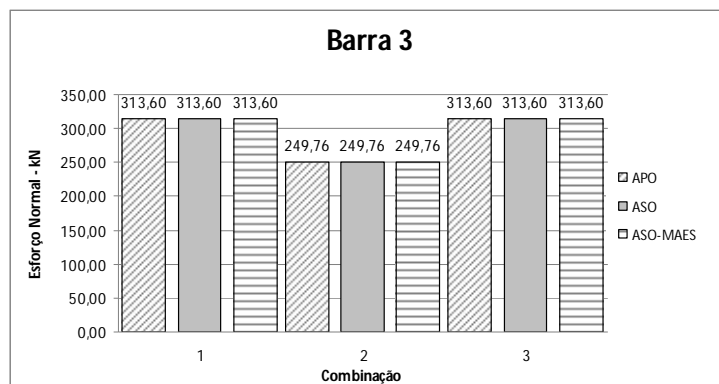


Figura 4.20. - Esforço normal máximo (kN) na barra 3 para as combinações 01,02 e 03 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos)

Verificação da capacidade última dos pilares do pavimento térreo

Para a verificação da capacidade última dos pilares do pavimento térreo utilizou-se o programa Desmet 4.0. Para os resultados de esforços obtidos na APO fez-se a verificação da interação dos efeitos combinados de força axial e momento fletor de acordo com ABNT NBR8800:1986, enquanto que para os resultados obtidos na ASO e ASO-MAES fez-se a verificação de acordo com a ABNT NBR8800:2008.

Para a verificação dos pilares de acordo com a ABNT NBR8800:2008 e ABNT NBR8800:1986, tomam-se sempre igual a um os valores dos coeficientes de flambagem (K).

Os resultados da verificação da capacidade última dos pilares do pavimento térreo são mostrados na Tabela 4.13.

Tabela 4.13. - Verificação da capacidade última dos pilares do pavimento térreo

| Barra | Combinação | Tipo de análise | Esforços solicitantes | | Esforços Resistentes | | Interação |
|-------|------------|-----------------|-----------------------|-------------------|----------------------|-------------------|-----------|
| | | | N_{Sd} (kN) | $M_{x,Sd}$ (kN.m) | N_{Rd} (kN) | $M_{x,Rd}$ (kN.m) | |
| 1 | 01 | APO - SAP2000 | 241,96 | 0,00 | 392,37 | - | 0,620 |
| | | ASO - SAP2000 | 241,95 | 0,00 | 487,30 | - | 0,497 |
| | | ASO - MAES | 241,89 | 0,00 | 487,30 | - | 0,496 |
| 2 | 03 | APO - SAP2000 | 566,64 | 0,00 | 772,65 | - | 0,730 |
| | | ASO - SAP2000 | 566,68 | 0,00 | 869,43 | - | 0,652 |
| | | ASO - MAES | 566,66 | 0,00 | 869,43 | - | 0,652 |
| 3 | 01 | APO - SAP2000 | 313,60 | 0,00 | 392,37 | - | 0,800 |
| | | ASO - SAP2000 | 313,60 | 0,00 | 487,30 | - | 0,644 |
| | | ASO - MAES | 313,60 | 0,00 | 487,30 | - | 0,644 |

4.5. Caso 5 - Pórtico não-contraventado de quatro pavimentos

O caso 5 consiste em um pórtico plano rígido de quatro pavimentos que compõe a estrutura de um edifício em aço, conforme se mostra na Figura 4.21. Na mesma figura indicam-se também as forças gravitacionais concentradas (PP e PQ) e distribuídas (Pp e Pq), as ações devidas ao vento (W) e as dimensões da estrutura em milímetros (mm).

Admite-se que os pilares da estrutura são engastados na base e que existe continuidade completa com as vigas.

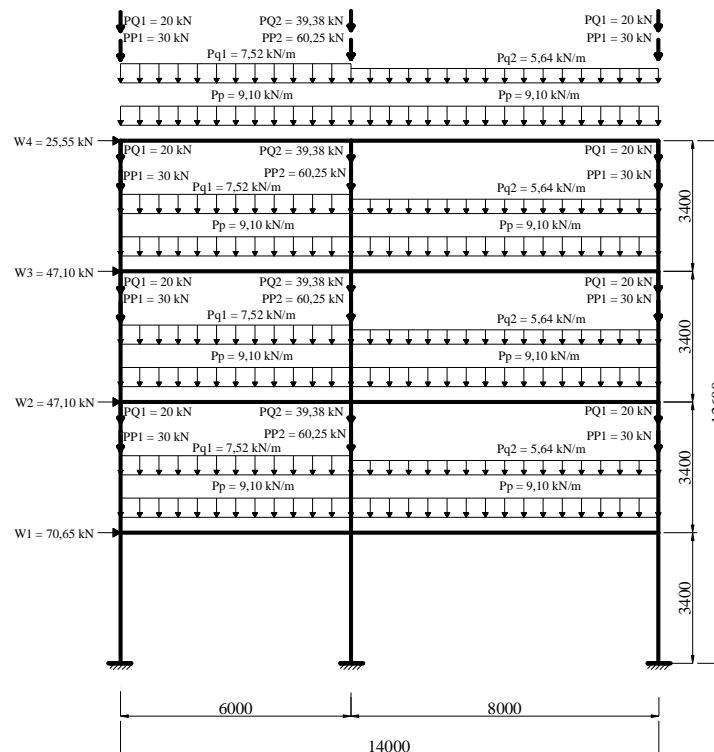


Figura 4.21. - Pórtico rígido de quatro pavimentos
(dimensões em milímetros e ações com valores característicos)

Dados:

- Aço ASTM A572 Grau 50
- Módulo de elasticidade - $E = 200.000$ MPa
- Perfis laminados de abas paralelas da AÇOMINAS

Para o pórtico apresentado na Figura 4.21, inicialmente foi realizada a classificação da estrutura quanto à sensibilidade a deslocamentos laterais, seguida da análise de primeira

ordem (APO) e da análise de segunda ordem (ASO). A APO e a ASO foram realizadas com auxílio do programa computacional SAP 2000. Para efeitos de comparação, realizou-se também um análise de segunda ordem por meio do Método da Ampliação dos Esforços Solicitantes (MAES), designada por ASO-MAES, previsto no Anexo D da ABNT NBR8800:2008.

Para efeito de comparação, apresenta-se uma sobreposição dos resultados dos esforços para cada tipo de análise nos trechos dos pilares situados no pavimento térreo da estrutura e uma avaliação da capacidade última desses pilares, segundo a ABNT NBR8800:1986 e ABNT NBR8800:2008.

Modelo estrutural

Na Figura 4.22 mostra-se o modelo estrutural adotado e na Figura 4.23 as seções utilizadas nas barras, definidas a partir de um pré-dimensionamento, que levou em conta o estado-limite de serviço de deslocamento lateral excessivo.

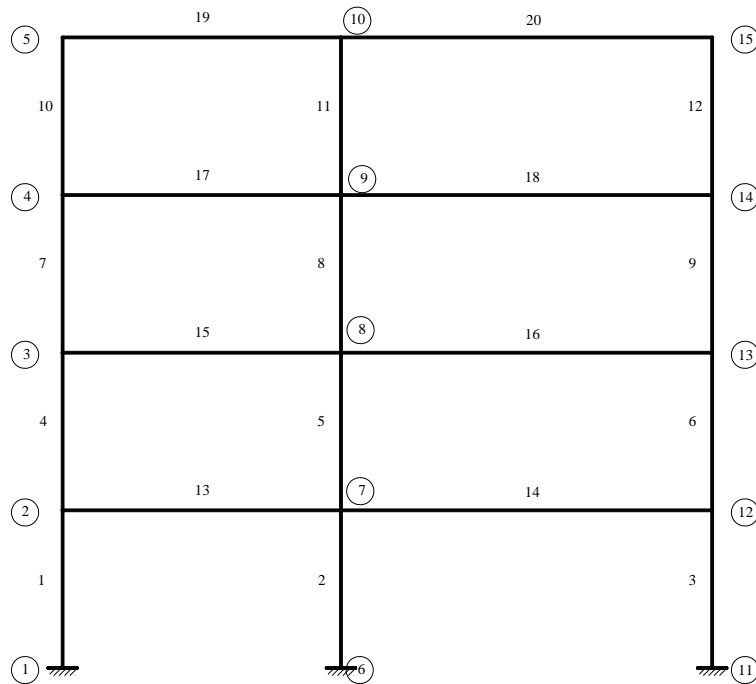


Figura 4.22. - Modelo estrutural do pórtico plano.

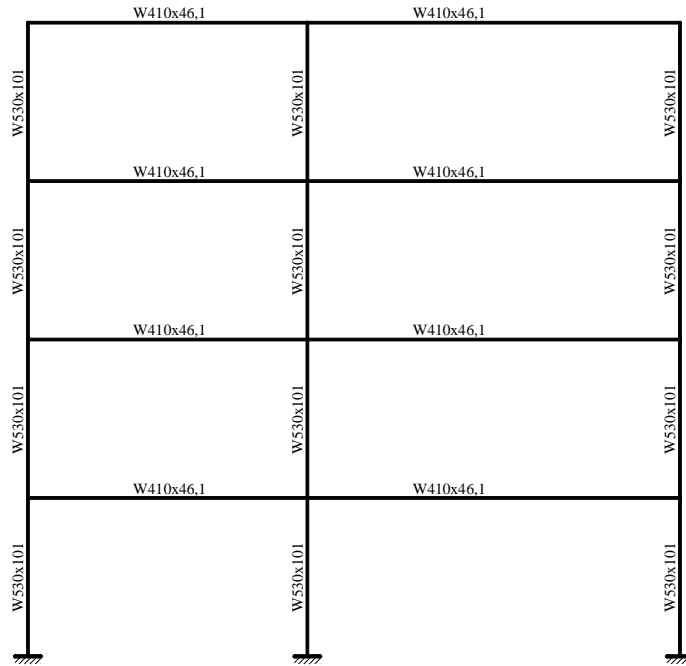


Figura 4.23. - Seções adotadas a partir de um pré-dimensionamento.

Ações atuantes

As ações atuantes na estrutura são:

PP – Peso próprio da estrutura

PQ – Sobrecarga

F_n – Força horizontal equivalente (Força nocional)

W – Vento

Na Figura 4.21, as letras minúsculas se referem a ações distribuídas e as letras maiúsculas a ações concentradas.

A força horizontal equivalente (F_n) a ser aplicada sobre a estrutura (Figura 4.4), que representa as imperfeições geométricas, deve ser calculada para cada pavimento da estrutura, conforme a seguinte expressão:

$$F_n = \frac{0,3}{100} \sum N_{sd} \quad (4.1)$$

onde:

$\sum N_{sd}$ é o somatório das cargas gravitacionais de cálculo atuantes no pavimento.

Como as forças gravitacionais nos dois pavimentos são idênticas, tem-se:

$$F_n = \frac{0,3}{100} ((30 + 30 + 60,25) * 1,4 + (20 + 20 + 39,38) * 1,5 + (9,10 * 14) * 1,4 + (7,52 * 6 + 5,64 * 8) * 1,5)$$

$$F_n = 1,80 \text{ kN}$$

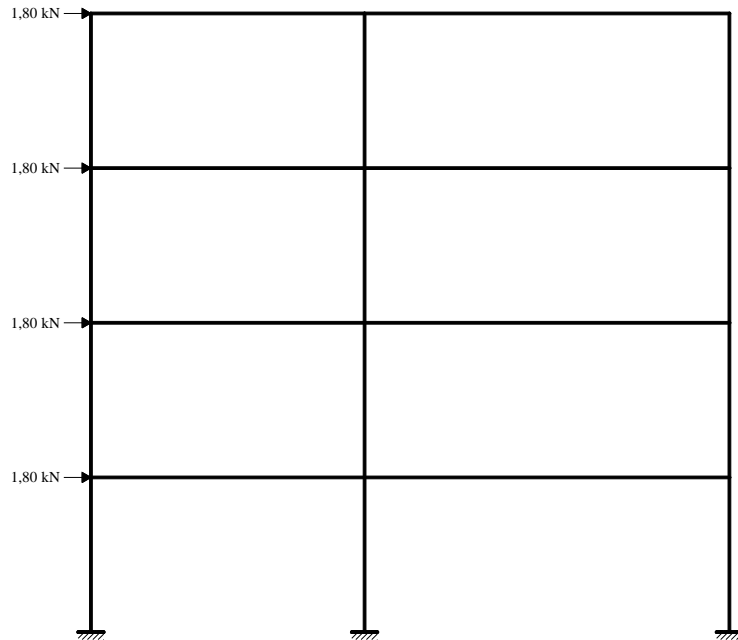


Figura 4.24. - Força horizontal equivalente em cada andar (kN)

Combinações de ações

Para verificação da segurança em relação aos estados-limites últimos, foram consideradas as seguintes combinações últimas normais:

Combinação 01: $1,4 PP + F_n + 1,5 PQ$

Combinação 02: $1,4 PP + 1,4 W + 1,5 * 0,5 PQ$

Combinação 03: $1,4 PP + 1,5 PQ + 1,4 * 0,6 W$

Nas combinações indicadas anteriormente, as imperfeições geométricas não foram consideradas em conjunto com forças horizontais de mesmo sentido e de maior magnitude.

Análise estrutural

Classificação da estrutura quanto à sensibilidade a deslocamentos laterais

Segundo o item 4.9.4.5 da ABNT NBR 8800:2008 a classificação da estrutura deve ser obtida para as combinações últimas de ações em que os deslocamentos horizontais provenientes das forças horizontais tenham os mesmos sentidos dos deslocamentos horizontais decorrentes das cargas gravitacionais.

A classificação quanto à sensibilidade a deslocamentos laterais pode ser realizada em função da relação entre o deslocamento lateral do andar relativo à base obtido na análise de segunda ordem (u_2) e aquele obtido na análise de primeira ordem (u_1) (Tabela 4.14), em todos os seus andares e para todas as combinações de ações. De maneira aproximada, esta classificação também pode ser feita em função do coeficiente B_2 (Tabela 4.15).

Tabela 4.14. - Deslocamentos laterais relativos à base para classificação da estrutura

| Combinação | Nó | Deslocamentos (mm) | | |
|------------|----|--------------------|---------|-----------|
| | | u_1 | u_2 | u_2/u_1 |
| 01 | 2 | 0,1938 | 0,2023 | 1,04 |
| | 3 | 0,6709 | 0,6962 | 1,04 |
| | 4 | 1,0083 | 1,0476 | 1,04 |
| | 5 | 1,5641 | 1,6131 | 1,03 |
| 02 | 2 | 9,2789 | 9,5215 | 1,03 |
| | 3 | 23,1595 | 23,8471 | 1,03 |
| | 4 | 34,4462 | 35,5035 | 1,03 |
| | 5 | 41,9376 | 43,2303 | 1,03 |
| 03 | 2 | 5,5363 | 5,7211 | 1,03 |
| | 3 | 13,8989 | 14,4229 | 1,04 |
| | 4 | 20,656 | 21,4608 | 1,04 |
| | 5 | 25,3087 | 26,2922 | 1,04 |

Nota: u_1 e u_2 representam os deslocamentos horizontais em análise de primeira e segunda ordem nos nós indicados, respectivamente.

Tabela 4.15. - Valores do coeficiente B_2 para classificação da estrutura

| Combinação | Nível | R_s | Δh (mm) | H (mm) | N_{sd} (kN) | H_{sd} (kN) | B_2 |
|------------|-------|-------|-----------------|----------|---------------|---------------|-------|
| 01 | 1 | 0,85 | 0,1938 | 3400 | 2404,56 | 7,2 | 1,02 |
| | 2 | 0,85 | 0,4771 | 3400 | 1803,42 | 5,4 | 1,06 |
| | 3 | 0,85 | 0,3374 | 3400 | 1202,27 | 3,6 | 1,04 |
| | 4 | 0,85 | 0,5558 | 3400 | 601,14 | 1,8 | 1,07 |
| 02 | 1 | 0,85 | 9,2789 | 3400 | 1895,72 | 233,59 | 1,03 |
| | 2 | 0,85 | 13,8806 | 3400 | 1421,79 | 167,65 | 1,04 |
| | 3 | 0,85 | 11,2867 | 3400 | 947,86 | 101,71 | 1,04 |
| | 4 | 0,85 | 7,4914 | 3400 | 473,93 | 35,77 | 1,04 |
| 03 | 1 | 0,85 | 5,5363 | 3400 | 2404,56 | 233,59 | 1,02 |
| | 2 | 0,85 | 8,3626 | 3400 | 1803,42 | 167,65 | 1,03 |
| | 3 | 0,85 | 6,7571 | 3400 | 1202,27 | 101,71 | 1,03 |
| | 4 | 0,85 | 4,6527 | 3400 | 601,14 | 35,77 | 1,03 |

Os valores do coeficiente B_2 apresentados na Tabela 4.15 foram calculados sem levar em consideração as imperfeições de material.

Em função dos valores das relações u_2/u_1 (Tabela 4.14) e dos coeficientes B_2 (Tabela 4.15), a estrutura é classificada como de pequena deslocabilidade.

Comparação dos resultados da APO e da ASO

Tendo em vista os diferentes tipos de análise realizados (APO, ASO e ASO-MAES), apresentam-se alguns gráficos com a sobreposição dos resultados dos esforços máximos nos trechos dos pilares situados no pavimento térreo da estrutura.

Barra 1

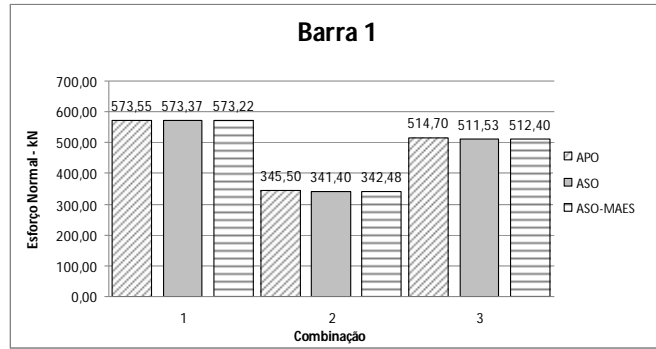


Figura 4.25. - Esforço normal máximo (kN) na barra 1 para as combinações 01,02 e 03 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos)

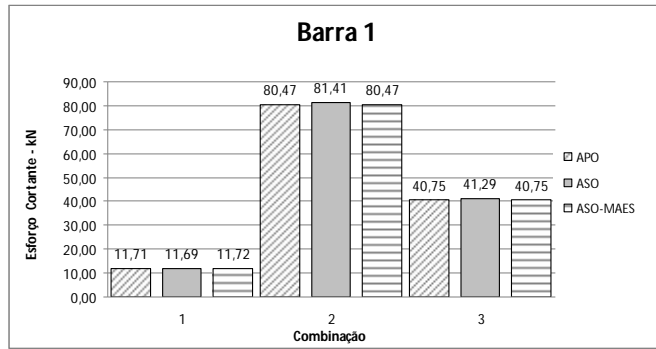


Figura 4.26. - Esforço cortante máximo (kN) na barra 1 para as combinações 01,02 e 03 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos)

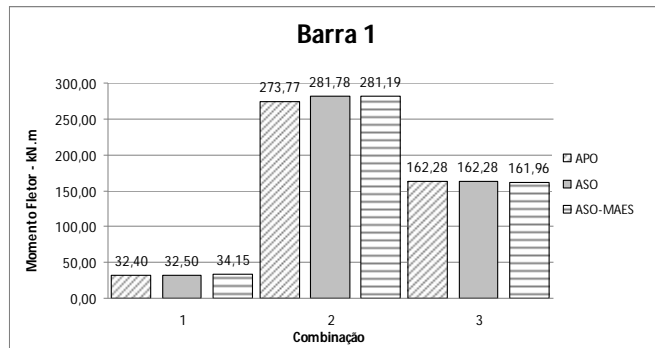


Figura 4.27. - Momento fletor máximo (kN.m) na barra 1 para as combinações 01,02 e 03 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos)

Barra 2

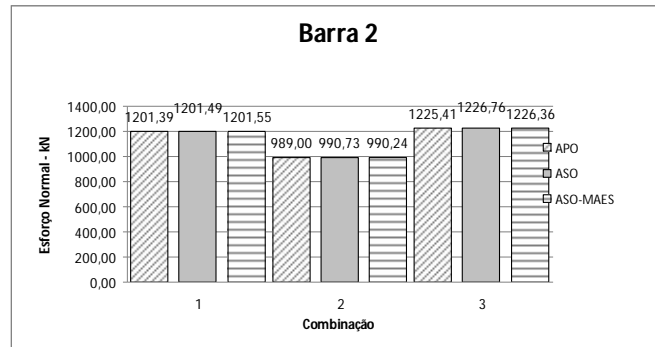


Figura 4.28. - Esforço normal máximo (kN) na barra 2 para as combinações 01,02 e 03 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos)

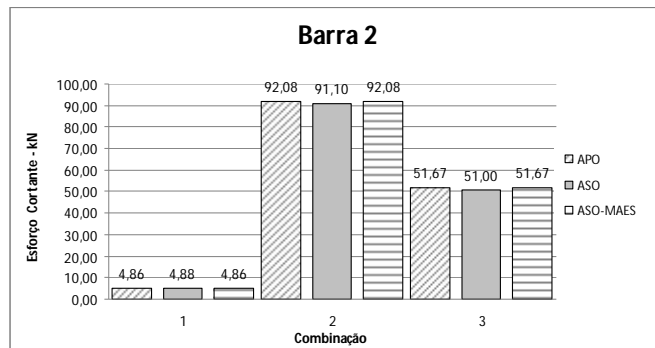


Figura 4.29. - Esforço cortante máximo (kN) na barra 2 para as combinações 01,02 e 03 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos)

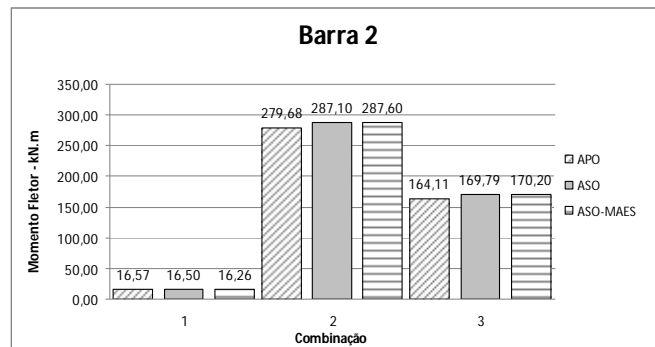


Figura 4.30. - Momento fletor máximo (kN.m) na barra 2 para as combinações 01,02 e 03 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos)

Barra 3

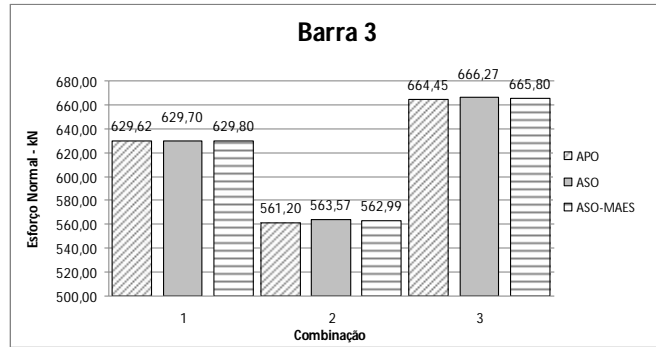


Figura 4.31. - Esforço normal máximo (kN) na barra 3 para as combinações 01,02 e 03 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos)

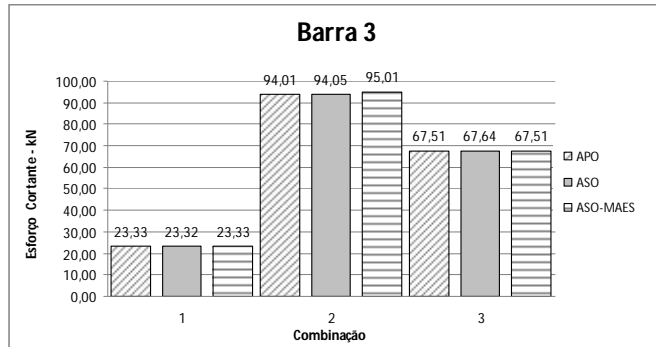


Figura 4.32. - Esforço cortante máximo (kN) na barra 2 para as combinações 01,02 e 03 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos)

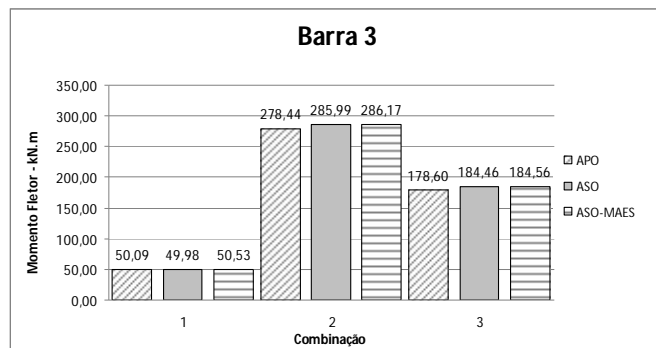


Figura 4.33. - Momento fletor máximo (kN.m) na barra 3 para as combinações 01,02 e 03 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos)

Verificação da capacidade última dos pilares do pavimento térreo

Para a verificação da capacidade última dos pilares do pavimento térreo utilizou-se o programa Desmet 4.0. Para os resultados de esforços obtidos na APO fez-se a verificação da interação dos efeitos combinados de força axial e momento fletor de acordo com ABNT NBR8800:1986, enquanto que para os resultados obtidos na ASO e ASO-MAES fez-se a verificação de acordo com a ABNT NBR8800:2008.

No cálculo dos pilares de acordo com a ABNT NBR8800:1986 foram utilizados os coeficientes de flambagem (K) indicados na Tabela 4.16, ao passo que para ABNT NBR8800:2008 tomou-se sempre $K = 1,0$.

Tabela 4.16. - Valores do coeficiente de flambagem (K) segundo ABNT NBR8800:1986

| Barra | I_c (cm ⁴) | L_c (cm) | I_g (cm ⁴) | L_g (cm) | α | G_A | G_B | K |
|-------|--------------------------|------------|--------------------------|------------|----------|-------|-------|------|
| 1 | 26755 | 340 | 8581 | 600 | 0,67 | 1 | 16,42 | 2,1 |
| 2 | 26755 | 340 | 8581 | 600 | 0,67 | 1 | 2,26 | 1,48 |
| | 26755 | 340 | 8581 | 800 | | | | |
| 3 | 26755 | 340 | 8581 | 800 | 0,67 | 1 | 21,90 | 2,15 |

Os resultados da verificação da capacidade última dos pilares do pavimento térreo são mostrados na Tabela 4.17.

Tabela 4.17. - Verificação da capacidade última dos pilares do pavimento térreo

| Barra | Combinação | Tipo de análise | Esforços solicitantes | | Esforços Resistentes | | Interação |
|-------|------------|-----------------|-----------------------|-------------------|----------------------|-------------------|-----------|
| | | | N_{Sd} (kN) | $M_{x,Sd}$ (kN.m) | N_{Rd} (kN) | $M_{x,Rd}$ (kN.m) | |
| 1 | 01 | APO - SAP2000 | 573,55 | 32,40 | 2738,32 | 496,73 | 0,280 |
| | | ASO - SAP2000 | 573,37 | 32,50 | 2906,84 | 526,94 | 0,160 |
| | | ASO - MAES | 573,22 | 34,15 | 2906,84 | 526,94 | 0,163 |
| 1 | 02 | APO - SAP2000 | 345,50 | 273,77 | 2738,32 | 496,73 | 0,700 |
| | | ASO - SAP2000 | 341,40 | 281,78 | 2906,84 | 526,94 | 0,593 |
| | | ASO - MAES | 342,48 | 281,19 | 2906,84 | 526,94 | 0,593 |
| 2 | 02 | APO - SAP2000 | 989,00 | 279,68 | 2738,32 | 496,73 | 0,960 |
| | | ASO - SAP2000 | 990,73 | 287,10 | 2906,84 | 526,94 | 0,825 |
| | | ASO - MAES | 990,24 | 287,60 | 2906,84 | 526,94 | 0,826 |
| 2 | 03 | APO - SAP2000 | 1225,41 | 164,11 | 2738,32 | 496,73 | 0,810 |
| | | ASO - SAP2000 | 1226,76 | 169,79 | 2906,84 | 526,94 | 0,708 |
| | | ASO - MAES | 1226,36 | 170,20 | 2906,84 | 526,94 | 0,709 |
| 3 | 02 | APO - SAP2000 | 561,20 | 278,44 | 2738,32 | 496,73 | 0,810 |
| | | ASO - SAP2000 | 563,57 | 285,99 | 2906,84 | 526,94 | 0,640 |
| | | ASO - MAES | 562,99 | 286,17 | 2906,84 | 526,94 | 0,640 |
| 3 | 03 | APO - SAP2000 | 664,45 | 178,60 | 2738,32 | 496,73 | 0,640 |
| | | ASO - SAP2000 | 666,27 | 184,46 | 2906,84 | 526,94 | 0,540 |
| | | ASO - MAES | 665,80 | 184,56 | 2906,84 | 526,94 | 0,540 |

4.6. Caso 6 - Pórtico contraventado de quatro pavimentos

O caso 6 consiste em um pórtico plano contraventado de quatro pavimentos que compõe a estrutura de um edifício em aço, conforme se mostra na Figura 4.34. Na mesma figura indicam-se também as forças gravitacionais concentradas (PP e PQ) e distribuídas (Pp e Pq), as ações devidas ao vento (W) e as dimensões da estrutura em milímetros (mm).

Admite-se que os pilares da estrutura são rotulados na base e que não existe continuidade entre vigas, pilares e contraventamento (ligações rotuladas).

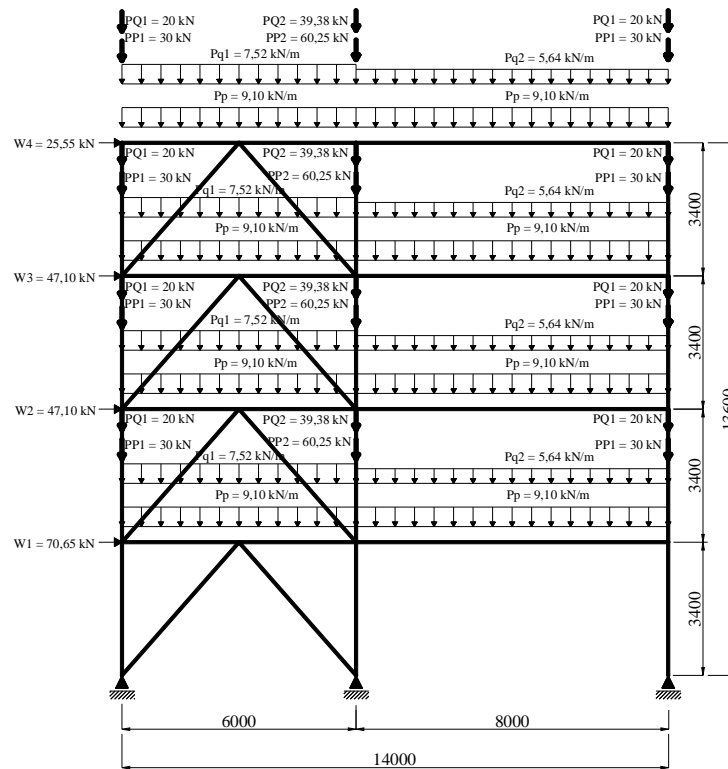


Figura 4.34. - Pórtico contraventado de quatro pavimentos (dimensões em milímetros e ações com valores característicos)

Dados:

- Aço ASTM A572 Grau 50
- Módulo de elasticidade - $E = 200.000 \text{ MPa}$
- Perfis laminados de abas paralelas da AÇOMINAS

Para o pórtico apresentado na Figura 4.34, inicialmente foi realizada a classificação da estrutura quanto à sensibilidade a deslocamentos laterais, seguida da análise de primeira

ordem (APO) e da análise de segunda ordem (ASO). A APO e a ASO foram realizadas com auxílio do programa computacional SAP 2000. Para efeitos de comparação, realizou-se também um análise de segunda ordem por meio do Método da Ampliação dos Esforços Solicitantes (MAES), designada por ASO-MAES, previsto no Anexo D da ABNT NBR8800:2008.

Para efeito de comparação, apresenta-se uma sobreposição dos resultados dos esforços para cada tipo de análise nos trechos dos pilares situados no pavimento térreo da estrutura e uma avaliação da capacidade última desses pilares, segundo a ABNT NBR8800:1986 e ABNT NBR8800:2008.

Modelo estrutural

Na Figura 4.35 mostra-se o modelo estrutural adotado e na Figura 4.36 as seções utilizadas nas barras, definidas a partir de um pré-dimensionamento, que levou em conta o estado-limite de serviço de deslocamento lateral excessivo.

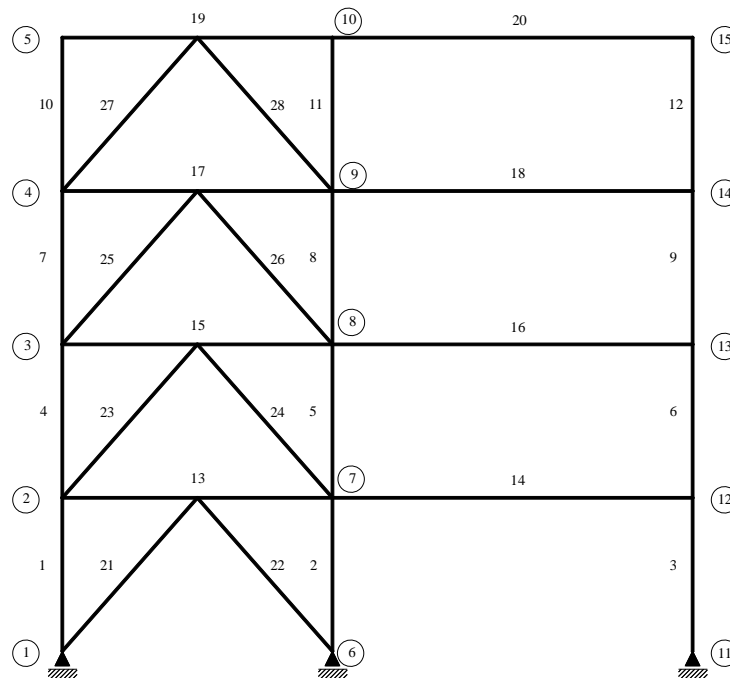


Figura 4.35. - Modelo estrutural do pórtico plano.

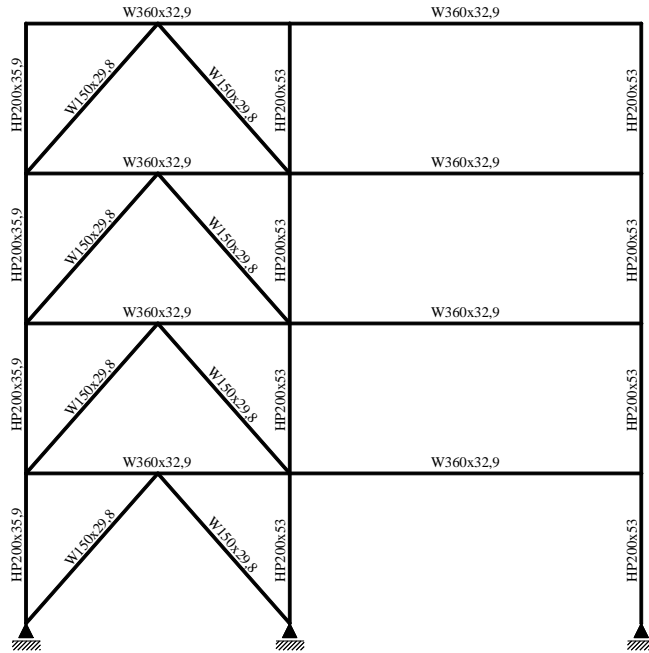


Figura 4.36. - Seções adotadas a partir de um pré-dimensionamento.

Ações atuantes

As ações atuantes na estrutura são:

PP – Peso próprio da estrutura

PQ – Sobrecarga

F_n – Força horizontal equivalente (Força nocional)

W – Vento

Na Figura 4.34, as letras minúsculas se referem a ações distribuídas e as letras maiúsculas a ações concentradas.

A força horizontal equivalente (*F_n*) a ser aplicada sobre a estrutura (Figura 4.37), que representa as imperfeições geométricas, deve ser calculada para cada pavimento da estrutura, conforme a seguinte expressão:

$$F_n = \frac{0,3}{100} \sum N_{sd} \quad (4.1)$$

onde:

$\sum N_{sd}$ é o somatório das cargas gravitacionais de cálculo atuantes no pavimento.

Como as forças gravitacionais nos quatro pavimentos são idênticas, tem-se:

$$F_n = \frac{0,3}{100} ((30 + 30 + 60,25) * 1,4 + (20 + 20 + 39,38) * 1,5 + (9,10 * 14) * 1,4 + (7,52 * 6 + 5,64 * 8) * 1,5)$$

$$F_n = 1,80 \text{ kN}$$

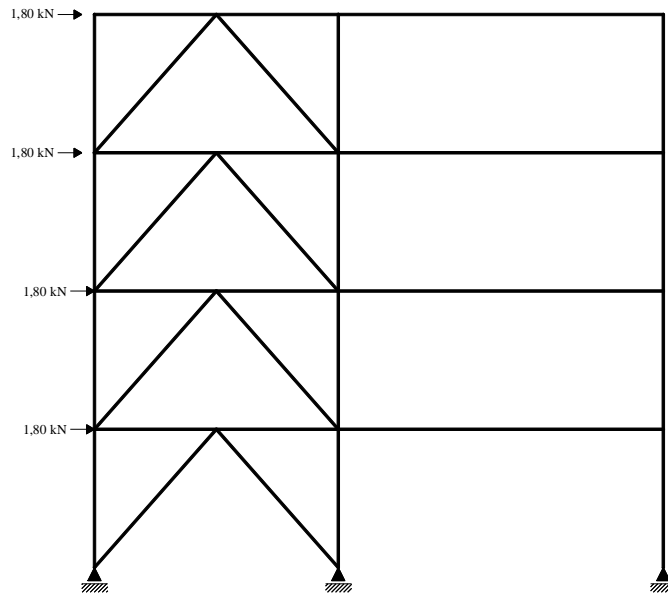


Figura 4.37. - Força horizontal equivalente em cada andar (kN)

Combinações de ações

Para verificação da segurança em relação aos estados-limites últimos, foram consideradas as seguintes combinações últimas normais:

Combinação 01: $1,4 PP + F_n + 1,5 PQ$

Combinação 02: $1,4 PP + 1,4 W + 1,5 * 0,5 PQ$

Combinação 03: $1,4 PP + 1,5 PQ + 1,4 * 0,6 W$

Nas combinações indicadas anteriormente, as imperfeições geométricas não foram consideradas em conjunto com forças horizontais de mesmo sentido e de maior magnitude.

Análise estrutural

Classificação da estrutura quanto à sensibilidade a deslocamentos laterais

Segundo o item 4.9.4.5 da ABNT NBR 8800:2008 a classificação da estrutura deve ser obtida para as combinações últimas de ações em que os deslocamentos horizontais provenientes das forças horizontais tenham os mesmos sentidos dos deslocamentos horizontais decorrentes das cargas gravitacionais.

A classificação quanto à sensibilidade a deslocamentos laterais pode ser realizada em função da relação entre o deslocamento lateral do andar relativo à base obtido na análise de segunda ordem (u_2) e aquele obtido na análise de primeira ordem (u_1) (Tabela 4.18), em todos os seus andares e para todas as combinações de ações. De maneira aproximada, esta classificação também pode ser feita em função do coeficiente B_2 (Tabela 4.19).

Tabela 4.18. - Deslocamentos laterais relativos à base para classificação da estrutura

| Combinação | Nó | Deslocamento (mm) | | |
|------------|----|-------------------|--------|-----------|
| | | u_1 | u_2 | u_2/u_1 |
| 01 | 2 | 0,0863 | 0,0856 | 1,00 |
| | 3 | 0,4963 | 0,5014 | 1,01 |
| | 4 | 1,4711 | 1,4819 | 1,01 |
| | 5 | 2,8472 | 2,8632 | 1,01 |
| 02 | 2 | 2,3914 | 2,4019 | 1,00 |
| | 3 | 4,8343 | 4,8576 | 1,00 |
| | 4 | 7,3601 | 7,3954 | 1,00 |
| | 5 | 9,6627 | 9,7075 | 1,00 |
| 03 | 2 | 1,3546 | 1,3629 | 1,01 |
| | 3 | 3,0857 | 3,1057 | 1,01 |
| | 4 | 5,0701 | 5,1018 | 1,01 |
| | 5 | 7,1363 | 7,1776 | 1,01 |

Nota: u_1 e u_2 representam os deslocamentos horizontais em análise de primeira e segunda ordem nos nós indicados, respectivamente.

Tabela 4.19. - Valores do coeficiente B_2 para classificação da estrutura

| Combinação | Nível | R_s | Δh (mm) | H (mm) | N_{sd} (kN) | H_{sd} (kN) | B_2 |
|------------|-------|-------|-----------------|----------|---------------|---------------|-------|
| 01 | 1 | 1 | 0,0863 | 3400 | 2404,56 | 7,2 | 1,01 |
| | 2 | 1 | 0,4100 | 3400 | 1803,42 | 5,4 | 1,04 |
| | 3 | 1 | 0,9748 | 3400 | 1202,27 | 3,6 | 1,11 |
| | 4 | 1 | 1,3761 | 3400 | 601,14 | 1,8 | 1,16 |
| 02 | 1 | 1 | 2,3914 | 3400 | 1895,72 | 233,59 | 1,01 |
| | 2 | 1 | 2,4429 | 3400 | 1421,79 | 167,65 | 1,01 |
| | 3 | 1 | 2,5258 | 3400 | 947,86 | 101,71 | 1,01 |
| | 4 | 1 | 2,3026 | 3400 | 473,93 | 35,77 | 1,01 |
| 03 | 1 | 1 | 1,3546 | 3400 | 2404,56 | 192,906 | 1,00 |
| | 2 | 1 | 1,7311 | 3400 | 1803,42 | 126,966 | 1,01 |
| | 3 | 1 | 1,9844 | 3400 | 1202,27 | 61,026 | 1,01 |
| | 4 | 1 | 2,0662 | 3400 | 601,14 | 21,462 | 1,02 |

Os valores do coeficiente B_2 apresentados na Tabela 4.12 foram calculados sem levar em consideração as imperfeições de material.

Em função dos valores das relações u_2/u_1 (Tabela 4.11) e dos coeficientes B_2 (Tabela 4.12), a estrutura é classificada como de média deslocabilidade.

Comparação dos resultados da APO e da ASO

Tendo em vista os diferentes tipos de análise realizados (APO, ASO e ASO-MAES), apresentam-se alguns gráficos com a sobreposição dos resultados dos esforços máximos nos trechos dos pilares situados no pavimento térreo da estrutura.

Barra 1

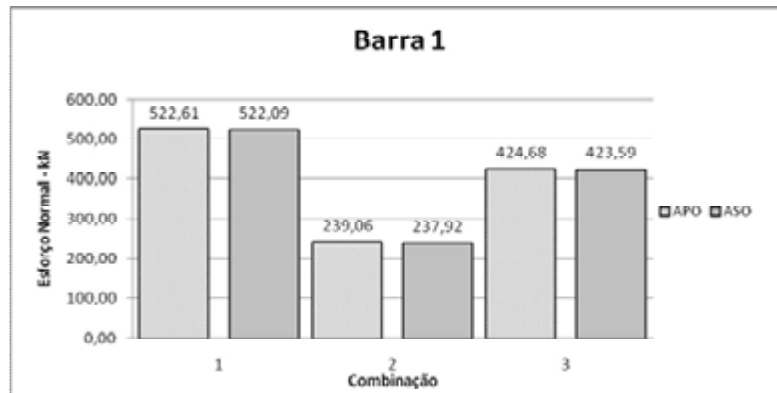


Figura 4.38. - Esfuerzo normal máximo (kN) na barra 1 para as combinações 01,02 e 03 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos)

Barra 2

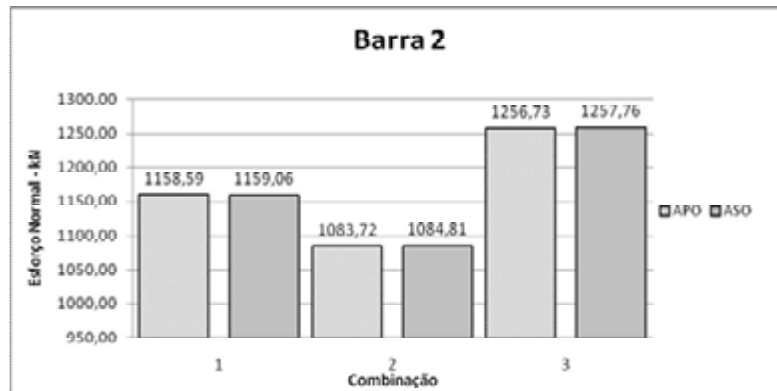


Figura 4.39. - Esfuerzo normal máximo (kN) na barra 2 para as combinações 01,02 e 03 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos)

Barra 3

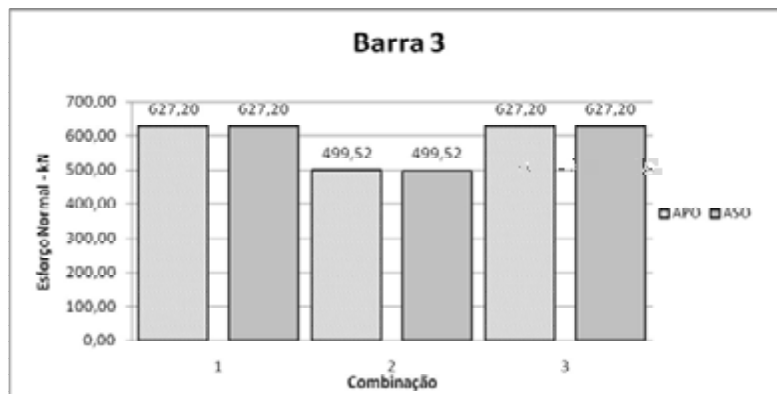


Figura 4.40. - Esfuerzo normal máximo (kN) na barra 3 para as combinações 01,02 e 03 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos)

Verificação da capacidade última dos pilares do pavimento térreo

Para a verificação da capacidade última dos pilares do pavimento térreo utilizou-se o programa Desmet 4.0. Para os resultados de esforços obtidos na APO fez-se a verificação da interação dos efeitos combinados de força axial e momento fletor de acordo com ABNT NBR8800:1986, enquanto que para os resultados obtidos na ASO e ASO-MAES fez-se a verificação de acordo com a ABNT NBR8800:2008.

Para a verificação dos pilares de acordo com a ABNT NBR8800:2008 e ABNT NBR8800:1986, tomam-se sempre igual a um os valores dos coeficientes de flambagem (K).

Os resultados da verificação da capacidade última dos pilares do pavimento térreo são mostrados na Tabela 4.20.

Tabela 4.20. - Verificação da capacidade última dos pilares do pavimento térreo

| Barra | Combinação | Tipo de análise | Esforços solicitantes | | Esforços Resistentes | | Interação |
|-------|------------|-----------------|-----------------------|-------------------|----------------------|-------------------|-----------|
| | | | N_{sd} (kN) | $M_{x,sd}$ (kN.m) | N_{Rd} (kN) | $M_{x,Rd}$ (kN.m) | |
| 1 | 01 | APO - SAP2000 | 522,61 | 0,00 | 772,65 | - | 0,680 |
| | | ASO - SAP2000 | 522,09 | 0,00 | 869,43 | - | 0,600 |
| 2 | 03 | APO - SAP2000 | 1256,73 | 0,00 | 1280,52 | - | 0,980 |
| | | ASO - SAP2000 | 1257,76 | 0,00 | 1513,78 | - | 0,831 |
| 3 | 01 | APO - SAP2000 | 627,20 | 0,00 | 772,65 | - | 0,810 |
| | | ASO - SAP2000 | 627,20 | 0,00 | 869,43 | - | 0,721 |

4.7. Caso 7 - Pórtico rígido de oito pavimentos

O caso 7 consiste em um pórtico plano rígido de oito pavimentos que compõe a estrutura de um edifício em aço, conforme se mostra na Figura 4.41. Na mesma figura indicam-se também as forças gravitacionais concentradas (PP e PQ) e distribuídas (Pp e Pq), as ações devidas ao vento (W) e as dimensões da estrutura em milímetros (mm).

Admite-se que os pilares da estrutura são engastados na base e que existe continuidade completa com as vigas.

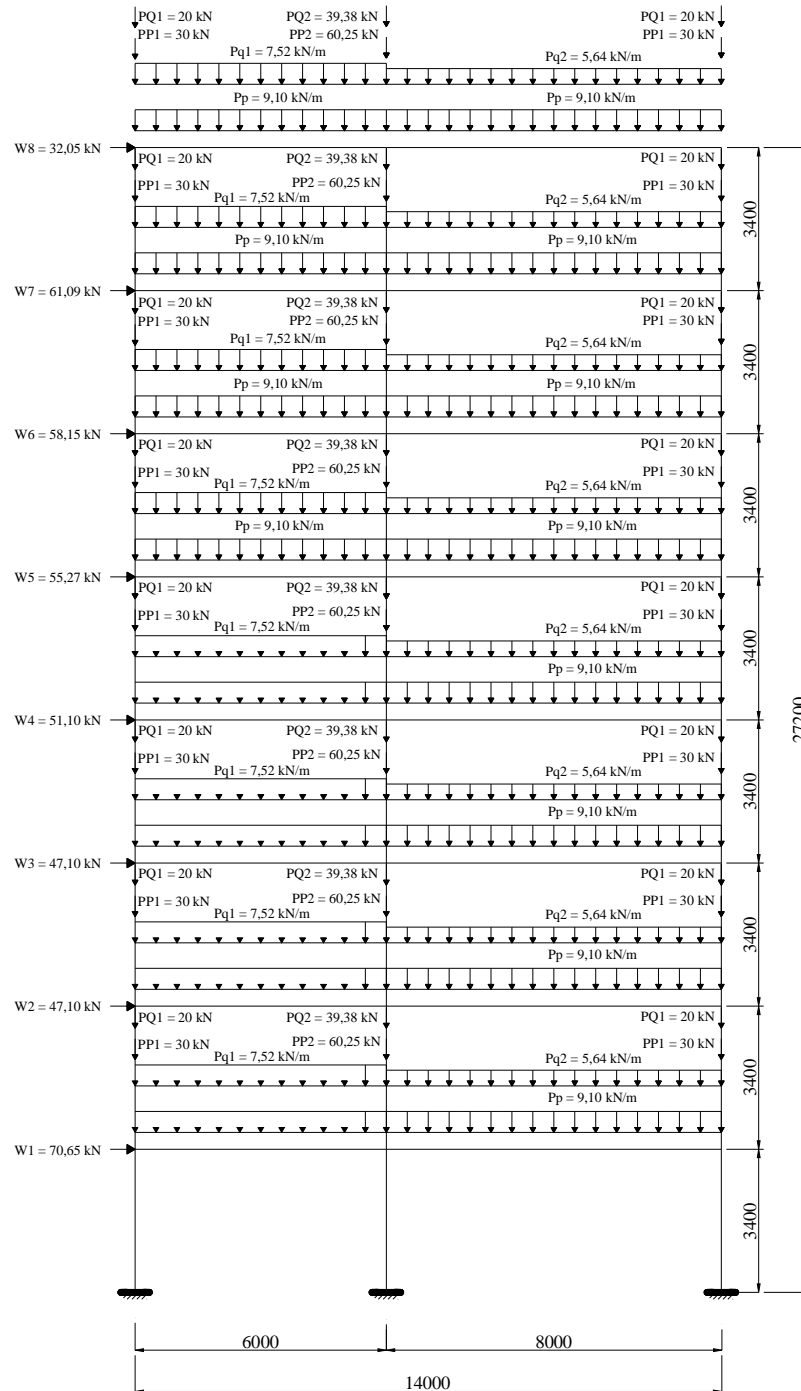


Figura 4.41. - Pórtico rígido de oito pavimentos (dimensões em milímetros e ações com valores característicos)

Dados:

- Aço ASTM A572 Grau 50
- Módulo de elasticidade - $E = 200.000 \text{ MPa}$
- Perfis laminados de abas paralelas da AÇOMINAS

Para o pórtico apresentado na Figura 4.41, inicialmente foi realizada a classificação da estrutura quanto à sensibilidade a deslocamentos laterais, seguida da análise de primeira ordem (APO) e da análise de segunda ordem (ASO). A APO e a ASO foram realizadas com auxílio do programa computacional SAP 2000. Para efeitos de comparação, realizou-se também um análise de segunda ordem por meio do Método da Ampliação dos Esforços Solicitantes (MAES), designada por ASO-MAES, previsto no Anexo D da ABNT NBR8800:2008.

Para efeito de comparação, apresenta-se uma sobreposição dos resultados dos esforços para cada tipo de análise nos trechos dos pilares situados no pavimento térreo da estrutura e uma avaliação da capacidade última desses pilares, segundo a ABNT NBR8800:1986 e ABNT NBR8800:2008.

Modelo estrutural

Na Figura 4.42 mostra-se o modelo estrutural adotado e na Figura 4.43 as seções utilizadas nas barras, definidas a partir de um pré-dimensionamento, que levou em conta o estado-limite de serviço de deslocamento lateral excessivo.

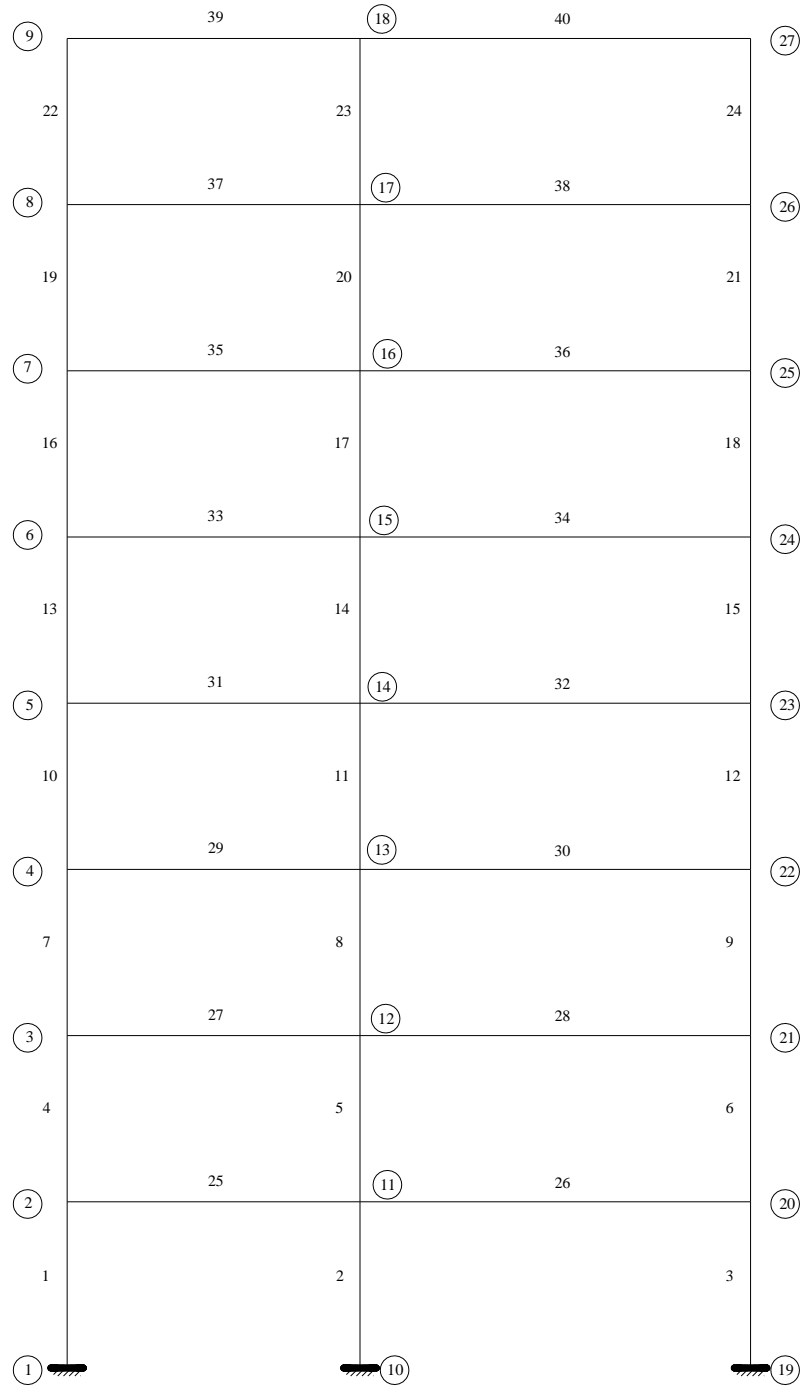


Figura 4.42. - Modelo estrutural do pórtico plano.

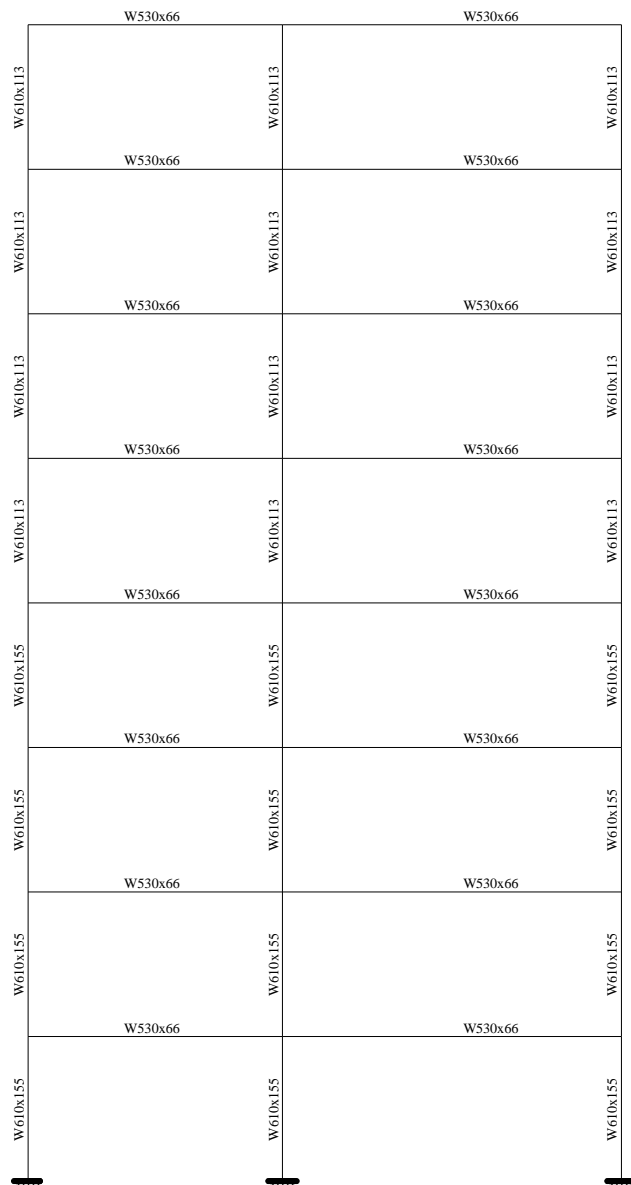


Figura 4.43. - Seções adotadas a partir de um pré-dimensionamento.

Ações atuantes

As ações atuantes na estrutura são:

PP – Peso próprio da estrutura

PQ – Sobrecarga

F_n – Força horizontal equivalente (Força nocional)

W – Vento

Na Figura 4.41, as letras minúsculas se referem a ações distribuídas e as letras maiúsculas a ações concentradas.

A força horizontal equivalente (F_n) a ser aplicada sobre a estrutura (Figura 4.44), que representa as imperfeições geométricas, deve ser calculada para cada pavimento da estrutura, conforme a seguinte expressão:

$$F_n = \frac{0,3}{100} \sum N_{sd} \quad (4.1)$$

onde:

$\sum N_{sd}$ é o somatório das cargas gravitacionais de cálculo atuantes no pavimento.

Como as forças gravitacionais nos dois pavimentos são idênticas, tem-se:

$$F_n = \frac{0,3}{100} ((30 + 30 + 60,25) * 1,4 + (20 + 20 + 39,38) * 1,5 + (9,10 * 14) * 1,4 + (7,52 * 6 + 5,64 * 8) * 1,5)$$
$$F_n = 1,80 \text{ kN}$$

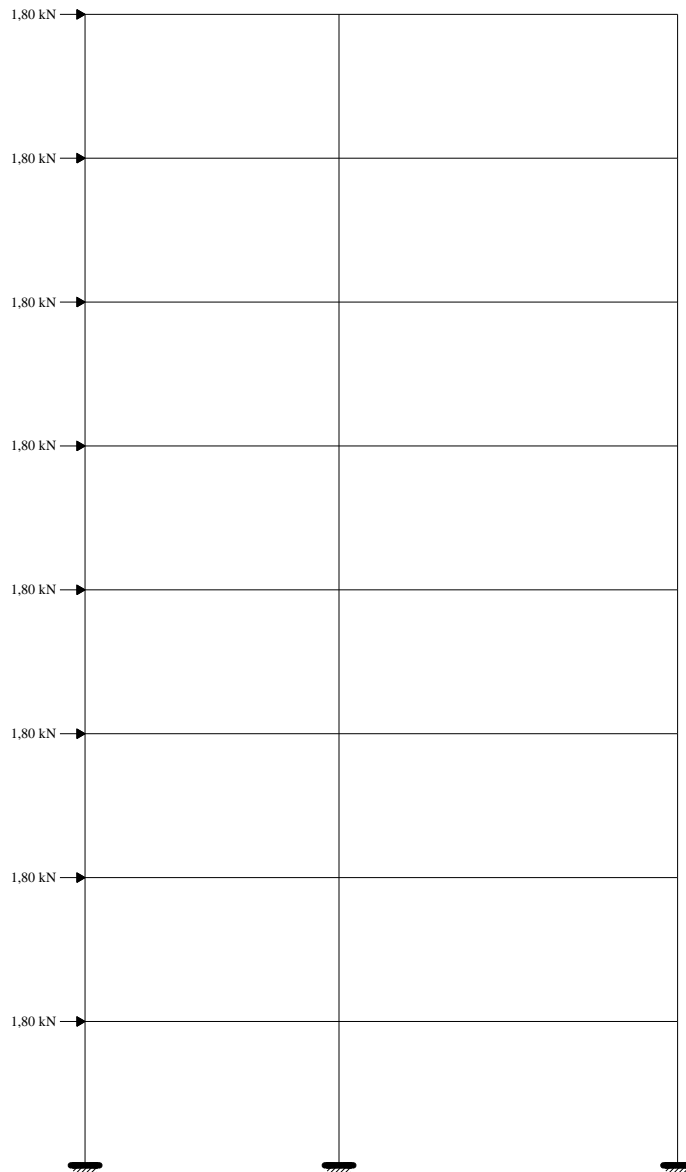


Figura 4.44. - Força horizontal equivalente em cada andar (kN)

Combinações de ações

Para verificação da segurança em relação aos estados-limites últimos, foram consideradas as seguintes combinações últimas normais:

Combinação 01: $1,4 PP + Fn + 1,5 PQ$

Combinação 02: $1,4 PP + 1,4 W + 1,5 * 0,5 PQ$

Combinação 03: $1,4 PP + 1,5 PQ + 1,4 * 0,6 W$

Nas combinações indicadas anteriormente, as imperfeições geométricas não foram consideradas em conjunto com forças horizontais de mesmo sentido e de maior magnitude.

Análise estrutural

Classificação da estrutura quanto à sensibilidade a deslocamentos laterais

Segundo o item 4.9.4.5 da ABNT NBR 8800:2008 a classificação da estrutura deve ser obtida para as combinações últimas de ações em que os deslocamentos horizontais provenientes das forças horizontais tenham os mesmos sentidos dos deslocamentos horizontais decorrentes das cargas gravitacionais.

A classificação quanto à sensibilidade a deslocamentos laterais pode ser realizada em função da relação entre o deslocamento lateral do andar relativo à base obtido na análise de segunda ordem (u_2) e aquele obtido na análise de primeira ordem (u_1) (Tabela 4.21), em todos os seus andares e para todas as combinações de ações. De maneira aproximada, esta classificação também pode ser feita em função do coeficiente B_2 (Tabela 4.22).

Tabela 4.21. - Deslocamentos laterais relativos à base para classificação da estrutura

| Combinação | Nó | Deslocamentos (mm) | | |
|------------|----|--------------------|----------|-----------|
| | | u_1 | u_2 | u_2/u_1 |
| 01 | 2 | 0,2701 | 0,2838 | 1,00 |
| | 3 | 0,9239 | 0,9698 | 1,05 |
| | 4 | 1,6731 | 1,7578 | 1,05 |
| | 5 | 2,4639 | 2,5865 | 1,05 |
| | 6 | 3,2608 | 3,4162 | 1,05 |
| | 7 | 4,0205 | 4,2014 | 1,04 |
| | 8 | 4,6807 | 4,8791 | 1,04 |
| | 9 | 5,5323 | 5,7420 | 1,04 |
| 02 | 2 | 11,8162 | 12,2055 | 1,03 |
| | 3 | 32,8446 | 34,0791 | 1,04 |
| | 4 | 55,1759 | 57,3506 | 1,04 |
| | 5 | 75,8452 | 78,8517 | 1,04 |
| | 6 | 93,4997 | 97,1488 | 1,04 |
| | 7 | 107,1482 | 111,2228 | 1,04 |
| | 8 | 116,5775 | 120,9043 | 1,04 |
| | 9 | 122,5714 | 127,0427 | 1,04 |
| 03 | 2 | 7,0867 | 7,3853 | 1,04 |
| | 3 | 19,7848 | 20,7370 | 1,05 |
| | 4 | 33,2976 | 34,9770 | 1,05 |
| | 5 | 45,8561 | 48,1798 | 1,05 |
| | 6 | 56,6449 | 59,4674 | 1,05 |
| | 7 | 65,0564 | 68,2105 | 1,05 |
| | 8 | 70,9305 | 74,2818 | 1,05 |
| | 9 | 74,8865 | 78,3514 | 1,05 |

Nota: u_1 e u_2 representam os deslocamentos horizontais em análise de primeira e segunda ordem nos nós indicados, respectivamente.

Tabela 4.22. - Valores do coeficiente B_2 para classificação da estrutura

| Combinação | Nível | R_s | Δh (mm) | H (mm) | N_{sd} (kN) | H_{sd} (kN) | B_2 |
|------------|-------|-------|-----------------|----------|---------------|---------------|-------|
| 01 | 1 | 0,85 | 0,2701 | 3400 | 4809,12 | 14,4 | 1,03 |
| | 2 | 0,85 | 0,6538 | 3400 | 4207,98 | 12,6 | 1,08 |
| | 3 | 0,85 | 0,7492 | 3400 | 3606,84 | 10,8 | 1,09 |
| | 4 | 0,85 | 0,7908 | 3400 | 3005,7 | 9 | 1,10 |
| | 5 | 0,85 | 0,7969 | 3400 | 2404,56 | 7,2 | 1,10 |
| | 6 | 0,85 | 0,7597 | 3400 | 1803,42 | 5,4 | 1,10 |
| | 7 | 0,85 | 0,6602 | 3400 | 1202,27 | 3,6 | 1,08 |
| | 8 | 0,85 | 0,8516 | 3400 | 601,14 | 1,8 | 1,11 |
| 02 | 1 | 0,85 | 11,8162 | 3400 | 3791,44 | 591,514 | 1,03 |
| | 2 | 0,85 | 21,0284 | 3400 | 3317,51 | 492,604 | 1,05 |
| | 3 | 0,85 | 22,3313 | 3400 | 2843,58 | 426,664 | 1,05 |
| | 4 | 0,85 | 20,6693 | 3400 | 2369,65 | 360,724 | 1,05 |
| | 5 | 0,85 | 17,6545 | 3400 | 1895,72 | 289,184 | 1,04 |
| | 6 | 0,85 | 13,6485 | 3400 | 1421,79 | 211,806 | 1,03 |
| | 7 | 0,85 | 9,4293 | 3400 | 947,86 | 130,396 | 1,02 |
| | 8 | 0,85 | 5,9939 | 3400 | 473,93 | 44,87 | 1,02 |
| 03 | 1 | 0,85 | 7,0867 | 3400 | 4809,12 | 354,908 | 1,03 |
| | 2 | 0,85 | 12,6981 | 3400 | 4207,98 | 295,562 | 1,07 |
| | 3 | 0,85 | 13,5128 | 3400 | 3606,84 | 255,998 | 1,07 |
| | 4 | 0,85 | 12,5585 | 3400 | 3005,7 | 216,434 | 1,06 |
| | 5 | 0,85 | 10,7888 | 3400 | 2404,56 | 173,51 | 1,05 |
| | 6 | 0,85 | 8,4115 | 3400 | 1803,42 | 127,084 | 1,04 |
| | 7 | 0,85 | 5,8741 | 3400 | 1202,27 | 78,2376 | 1,03 |
| | 8 | 0,85 | 3,9560 | 3400 | 601,14 | 26,922 | 1,03 |

Os valores do coeficiente B_2 apresentados na Tabela 4.22 foram calculados sem levar em consideração as imperfeições de material.

Em função dos valores das relações u_2/u_1 (Tabela 4.21) e dos coeficientes B_2 (Tabela 4.22), a estrutura é classificada como de média deslocabilidade.

Comparação dos resultados da APO e da ASO

Tendo em vista os diferentes tipos de análise realizados (APO, ASO e ASO-MAES), apresentam-se alguns gráficos com a sobreposição dos resultados dos esforços máximos nos trechos dos pilares situados no pavimento térreo da estrutura.

Barra 1

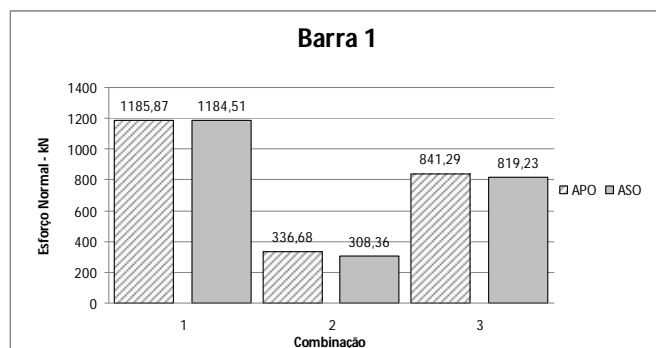


Figura 4.45. - Esforço normal máximo (kN) na barra 1 para as combinações 01,02 e 03 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos)

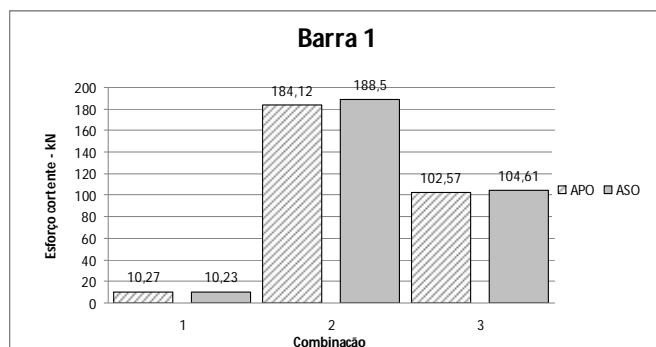


Figura 4.46. - Esforço cortante máximo (kN) na barra 1 para as combinações 01,02 e 03 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos)

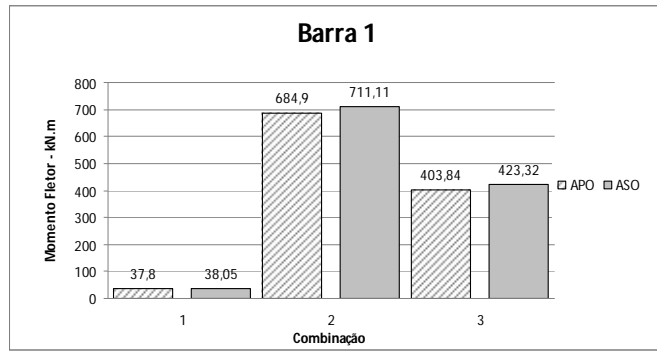


Figura 4.47. - Momento fletor máximo (kN.m) na barra 1 para as combinações 01,02 e 03 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos)

Barra 2

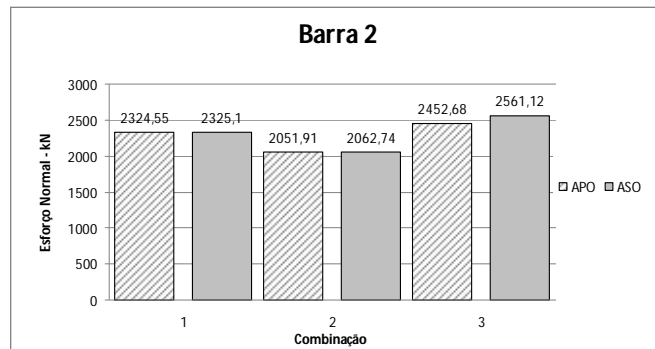


Figura 4.48. - Esforço normal máximo (kN) na barra 2 para as combinações 01,02 e 03 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos)

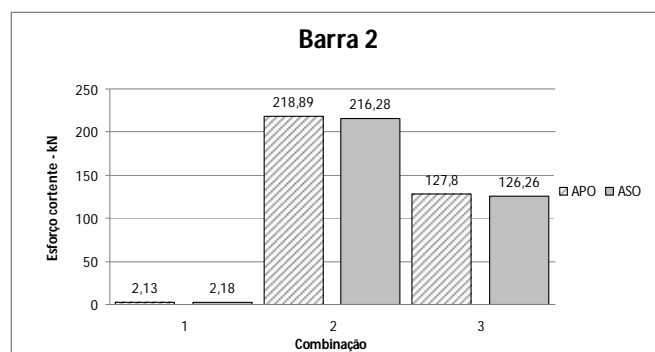


Figura 4.49. - Esforço cortante máximo (kN) na barra 2 para as combinações 01,02 e 03 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos)

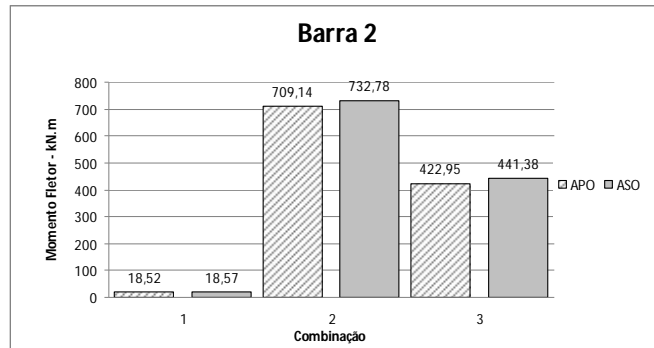


Figura 4.50. - Momento fletor máximo (kN.m) na barra 2 para as combinações 01,02 e 03 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos)

Barra 3

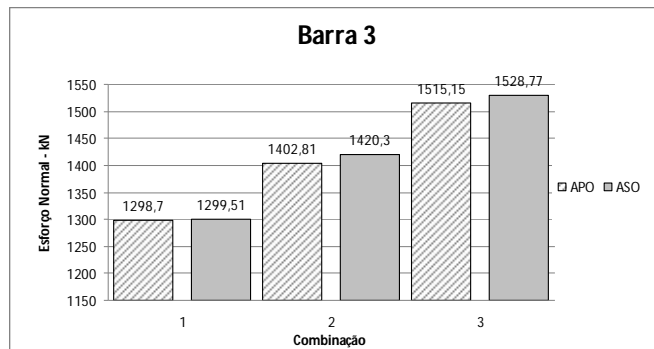


Figura 4.51. - Esforço normal máximo (kN) na barra 3 para as combinações 01,02 e 03 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos)

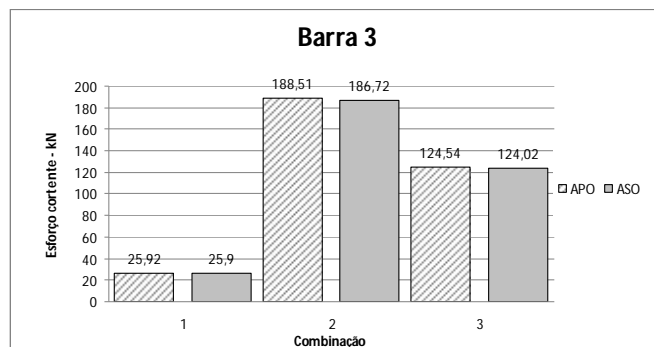


Figura 4.52. - Esforço cortante máximo (kN) na barra 2 para as combinações 01,02 e 03 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos)

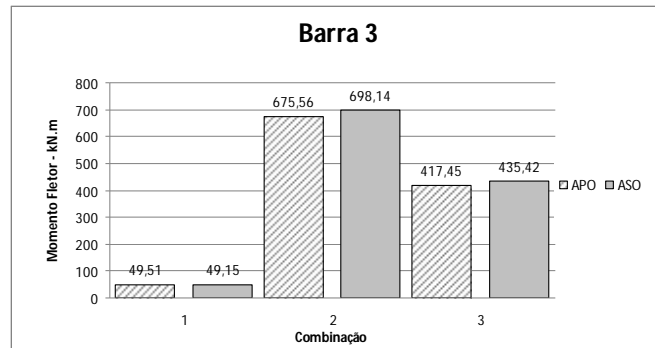


Figura 4.53. - Momento fletor máximo (kN.m) na barra 3 para as combinações 01,02 e 03 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos)

Verificação da capacidade última dos pilares do pavimento térreo

Para a verificação da capacidade última dos pilares do pavimento térreo utilizou-se o programa Desmet 4.0. Para os resultados de esforços obtidos na APO fez-se a verificação da interação dos efeitos combinados de força axial e momento fletor de acordo com ABNT NBR8800:1986, enquanto que para os resultados obtidos na ASO e ASO-MAES fez-se a verificação de acordo com a ABNT NBR8800:2008.

!No cálculo dos pilares de acordo com a ABNT NBR8800:1986 foram utilizados os coeficientes de flambagem (K) indicados na Tabela 4.23, ao passo que para ABNT NBR8800:2008 tomou-se sempre $K = 1,0$.

Tabela 4.23. - Valores do coeficiente de flambagem (K) segundo ABNT NBR8800:1986

| Barra | I_c (cm ⁴) | L_c (cm) | I_g (cm ⁴) | L_g (cm) | α | G_A | G_B | K |
|-------|--------------------------|------------|--------------------------|------------|----------|-------|-------|------|
| 1 | 129583 | 340 | 34971 | 600 | 0,67 | 1 | 19,52 | 2 |
| 2 | 129583 | 340 | 34971 | 600 | 0,67 | 1 | 2,69 | 1,51 |
| | 129583 | 340 | 34971 | 800 | | | | |
| 3 | 129583 | 340 | 34971 | 800 | 0,67 | 1 | 26,03 | 2,1 |

Os resultados da verificação da capacidade última dos pilares do pavimento térreo são mostrados na Tabela 4.24.

Tabela 4.24. - Verificação da capacidade última dos pilares do pavimento térreo

| Barra | Combinação | Tipo de análise | Esforços solicitantes | | Esforços Resistentes | | Interação |
|-------|------------|-----------------|-----------------------|-------------------|----------------------|-------------------|-----------|
| | | | N_{Sd} (kN) | $M_{x,Sd}$ (kN.m) | N_{Rd} (kN) | $M_{x,Rd}$ (kN.m) | |
| 1 | 01 | APO - SAP2000 | 1185,87 | 37,80 | 4985,72 | 1450,14 | 0,280 |
| | | ASO - SAP2000 | 1184,51 | 38,05 | 5167,08 | 1489,49 | 0,252 |
| 1 | 02 | APO - SAP2000 | 336,68 | 684,90 | 4985,72 | 1450,14 | 0,550 |
| | | ASO - SAP2000 | 308,36 | 711,11 | 5167,08 | 1489,49 | 0,507 |
| 2 | 03 | APO - SAP2000 | 2452,68 | 422,95 | 4985,72 | 1450,14 | 0,820 |
| | | ASO - SAP2000 | 2561,12 | 441,38 | 5167,08 | 1489,49 | 0,759 |
| 2 | 02 | APO - SAP2000 | 2051,91 | 709,14 | 4985,72 | 1450,14 | 0,940 |
| | | ASO - SAP2000 | 2062,74 | 732,78 | 5167,08 | 1489,49 | 0,837 |
| 3 | 03 | APO - SAP2000 | 1515,15 | 417,45 | 4985,72 | 1450,14 | 0,620 |
| | | ASO - SAP2000 | 1528,77 | 435,42 | 5167,08 | 1489,49 | 0,556 |
| 3 | 02 | APO - SAP2000 | 1402,81 | 675,56 | 4985,72 | 1450,14 | 0,780 |
| | | ASO - SAP2000 | 1420,3 | 698,14 | 5167,08 | 1489,49 | 0,692 |

4.8. Caso 8 - Pórtico contraventado de oito pavimentos

O caso 8 consiste em um pórtico plano contraventado de oito pavimentos que compõe a estrutura de um edifício em aço, conforme se mostra na Figura 4.54. Na mesma figura indicam-se também as forças gravitacionais concentradas (PP e PQ) e distribuídas (Pp e Pq), as ações devidas ao vento (W) e as dimensões da estrutura em milímetros (mm).

Admite-se que os pilares da estrutura são rotulados na base e que não existe continuidade entre vigas, pilares e contraventamento (ligações rotuladas).

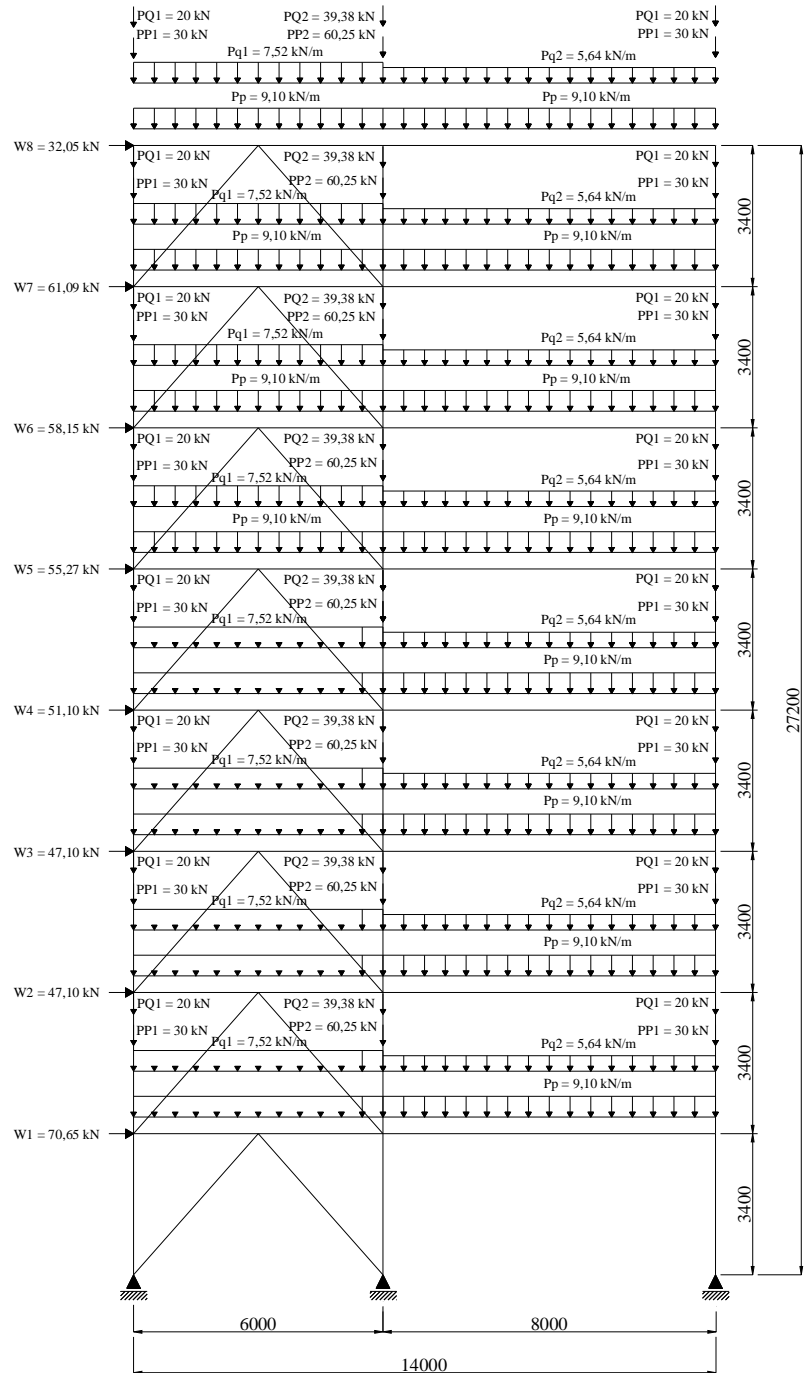


Figura 4.54. - Pórtico contraventado de oito pavimentos (dimensões em milímetros e ações com valores característicos)

Dados:

- Aço ASTM A572 Grau 50
- Módulo de elasticidade - $E = 200.000 \text{ MPa}$
- Perfis laminados de abas paralelas da AÇOMINAS

Para o pórtico apresentado na Figura 4.54, inicialmente foi realizada a classificação da estrutura quanto à sensibilidade a deslocamentos laterais, seguida da análise de primeira ordem (APO) e da análise de segunda ordem (ASO). A APO e a ASO foram realizadas com auxílio do programa computacional SAP 2000. Para efeitos de comparação, realizou-se também um análise de segunda ordem por meio do Método da Ampliação dos Esforços Solicitantes (MAES), designada por ASO-MAES, previsto no Anexo D da ABNT NBR8800:2008.

Para efeito de comparação, apresenta-se uma sobreposição dos resultados dos esforços para cada tipo de análise nos trechos dos pilares situados no pavimento térreo da estrutura e uma avaliação da capacidade última desses pilares, segundo a ABNT NBR8800:1986 e ABNT NBR8800:2008.

Modelo estrutural

Na Figura 4.55 mostra-se o modelo estrutural adotado e na Figura 4.56 as seções utilizadas nas barras, definidas a partir de um pré-dimensionamento, que levou em conta o estado-limite de serviço de deslocamento lateral excessivo.

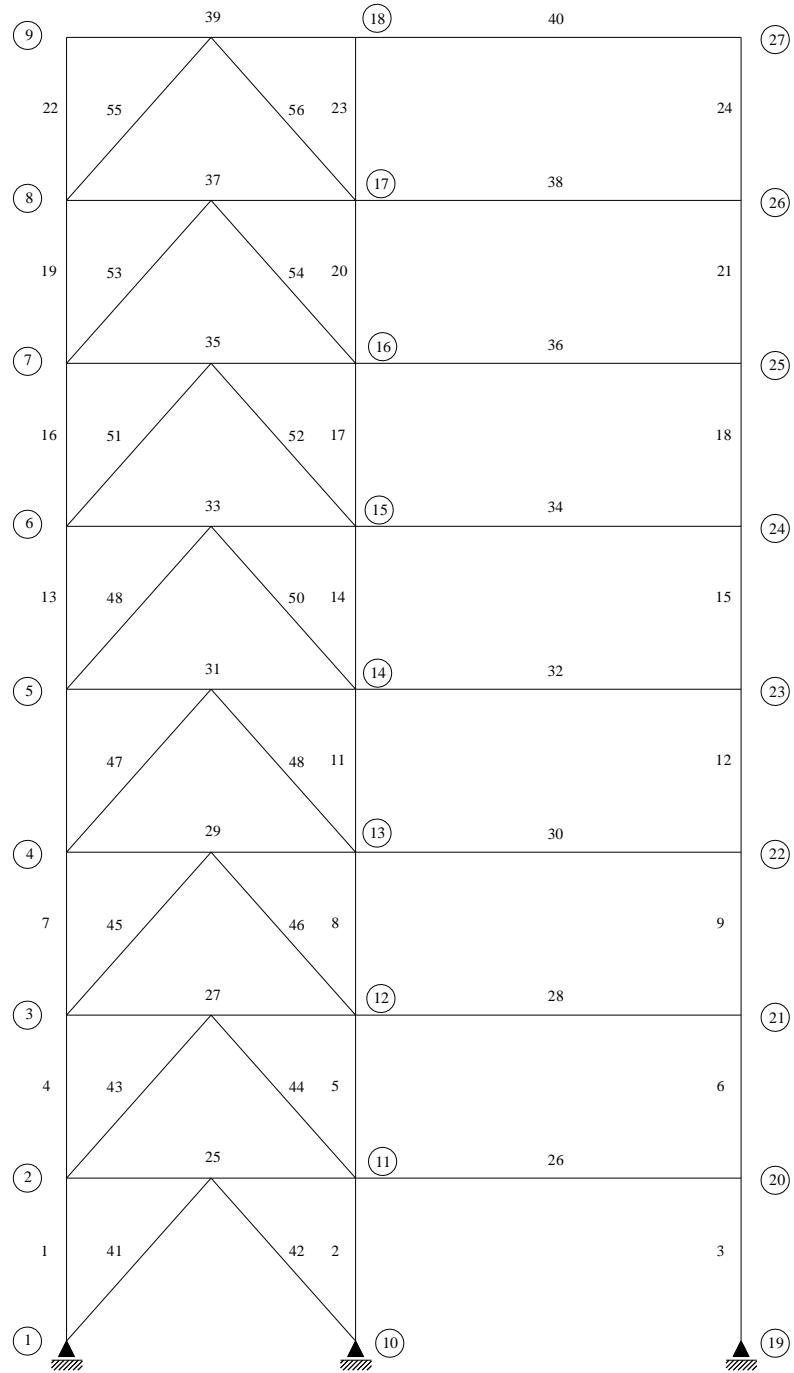


Figura 4.55. - Modelo estrutural do pórtico plano.

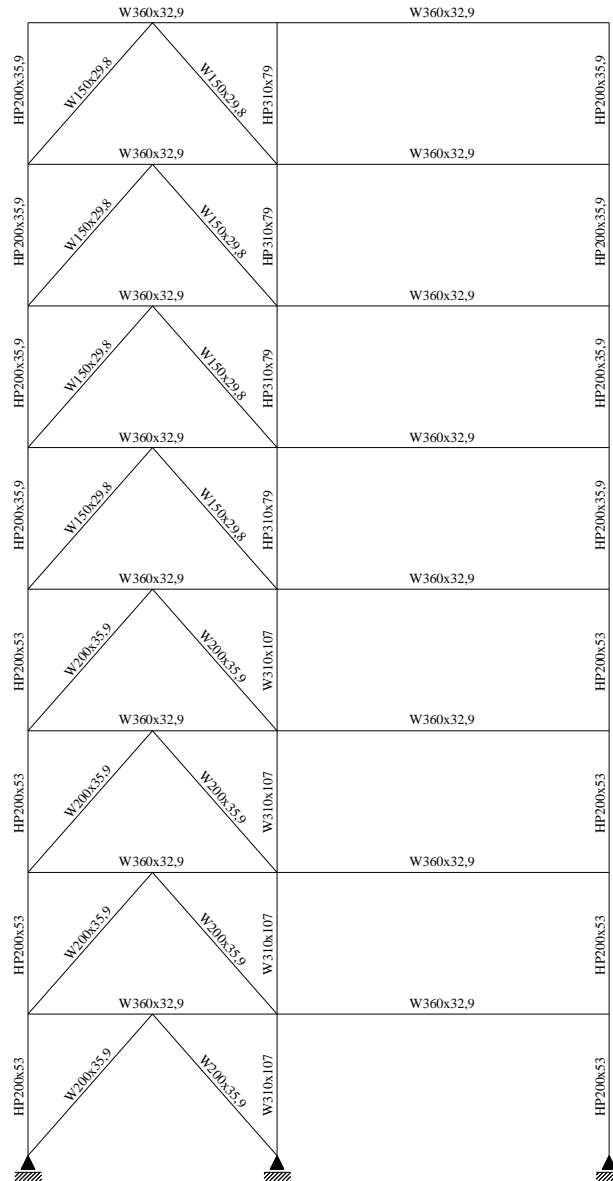


Figura 4.56. - Seções adotadas a partir de um pré-dimensionamento.

Ações atuantes

As ações atuantes na estrutura são:

PP – Peso próprio da estrutura

PQ – Sobrecarga

F_n – Força horizontal equivalente (Força nocional)

W – Vento

Na Figura 4.54, as letras minúsculas se referem a ações distribuídas e as letras maiúsculas a ações concentradas.

A força horizontal equivalente (F_n) a ser aplicada sobre a estrutura (Figura 4.57), que representa as imperfeições geométricas, deve ser calculada para cada pavimento da estrutura, conforme a seguinte expressão:

$$F_n = \frac{0,3}{100} \sum N_{sd} \quad (4.1)$$

onde:

$\sum N_{sd}$ é o somatório das cargas gravitacionais de cálculo atuantes no pavimento.

Como as forças gravitacionais nos oito pavimentos são idênticas, tem-se:

$$F_n = \frac{0,3}{100} ((30 + 30 + 60,25) * 1,4 + (20 + 20 + 39,38) * 1,5 + (9,10 * 14) * 1,4 + (7,52 * 6 + 5,64 * 8) * 1,5)$$
$$F_n = 1,80 \text{ kN}$$

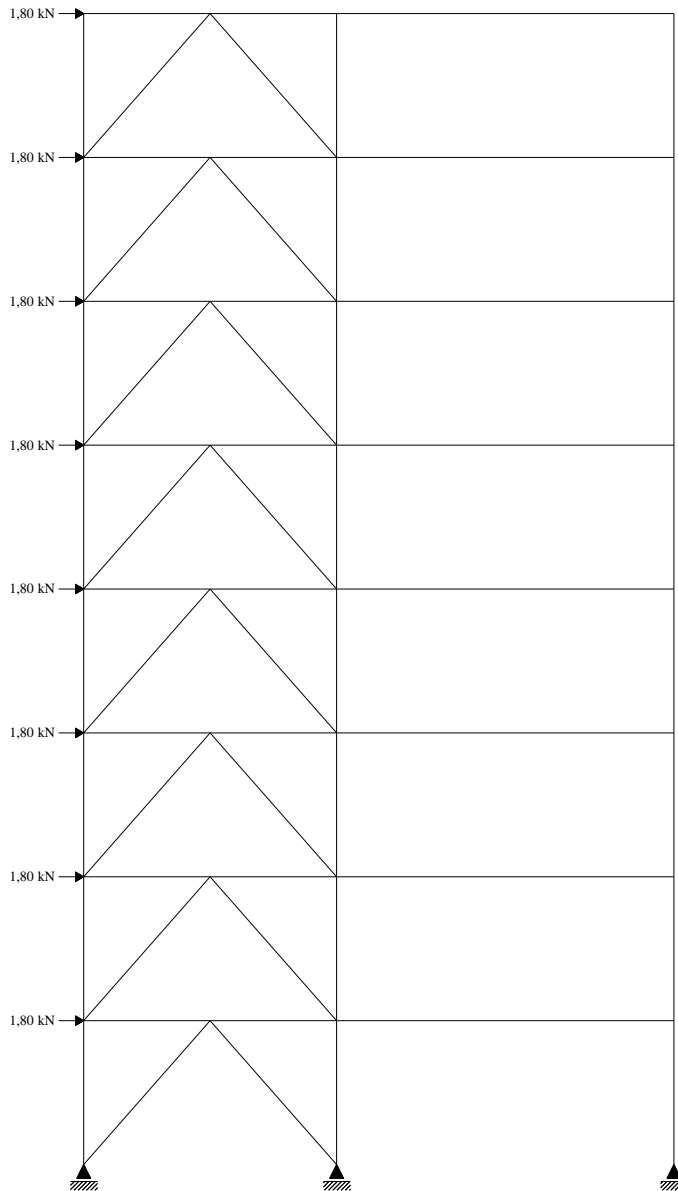


Figura 4.57. - Força horizontal equivalente em cada andar (kN)

Combinações de ações

Para verificação da segurança em relação aos estados-limites últimos, foram consideradas as seguintes combinações últimas normais:

Combinação 01: $1,4 PP + Fn + 1,5 PQ$

Combinação 02: $1,4 PP + 1,4 W + 1,5 * 0,5 PQ$

Combinação 03: $1,4 PP + 1,5 PQ + 1,4 * 0,6 W$

Nas combinações indicadas anteriormente, as imperfeições geométricas não foram consideradas em conjunto com forças horizontais de mesmo sentido e de maior magnitude.

Análise estrutural

Classificação da estrutura quanto à sensibilidade a deslocamentos laterais

Segundo o item 4.9.4.5 da ABNT NBR 8800:2008 a classificação da estrutura deve ser obtida para as combinações últimas de ações em que os deslocamentos horizontais provenientes das forças horizontais tenham os mesmos sentidos dos deslocamentos horizontais decorrentes das cargas gravitacionais.

A classificação quanto à sensibilidade a deslocamentos laterais pode ser realizada em função da relação entre o deslocamento lateral do andar relativo à base obtido na análise de segunda ordem (u_2) e aquele obtido na análise de primeira ordem (u_1) (Tabela 4.25), em todos os seus andares e para todas as combinações de ações. De maneira aproximada, esta classificação também pode ser feita em função do coeficiente B_2 (Tabela 4.26).

Tabela 4.25. - Deslocamentos laterais relativos à base para classificação da estrutura

| Combinação | Nó | Deslocamento (mm) | | |
|------------|----|-------------------|---------|-----------|
| | | u_1 | u_2 | u_2/u_1 |
| 01 | 2 | 0,0483 | 0,0468 | 1,00 |
| | 3 | 0,2096 | 0,2166 | 1,03 |
| | 4 | 0,5975 | 0,6124 | 1,02 |
| | 5 | 1,0885 | 1,1133 | 1,02 |
| | 6 | 1,6774 | 1,7138 | 1,02 |
| | 7 | 2,2708 | 2,3189 | 1,02 |
| | 8 | 2,8717 | 2,9312 | 1,02 |
| | 9 | 3,6275 | 3,6977 | 1,02 |
| 02 | 2 | 4,5869 | 4,6268 | 1,01 |
| | 3 | 10,752 | 10,8749 | 1,01 |
| | 4 | 18,3435 | 18,583 | 1,01 |
| | 5 | 26,7898 | 27,1663 | 1,01 |
| | 6 | 35,9073 | 36,4363 | 1,01 |
| | 7 | 45,0503 | 45,7356 | 1,02 |
| | 8 | 53,8155 | 54,6524 | 1,02 |
| | 9 | 61,9761 | 62,9559 | 1,02 |
| 03 | 2 | 2,6683 | 2,6985 | 1,01 |
| | 3 | 6,4158 | 6,5089 | 1,01 |
| | 4 | 11,0629 | 11,2442 | 1,02 |
| | 5 | 16,2602 | 16,545 | 1,02 |
| | 6 | 21,8179 | 22,2978 | 1,02 |
| | 7 | 27,5444 | 28,0615 | 1,02 |
| | 8 | 32,9661 | 33,5965 | 1,02 |
| | 9 | 38,1115 | 38,8483 | 1,02 |

Nota: u_1 e u_2 representam os deslocamentos horizontais em análise de primeira e segunda ordem nos nós indicados, respectivamente.

Tabela 4.26. - Valores do coeficiente B_2 para classificação da estrutura

| Combinação | Nível | R_s | Δh (mm) | H (mm) | N_{Sd} (kN) | H_{Sd} (kN) | B_2 |
|------------|-------|-------|-----------------|----------|---------------|---------------|-------|
| 01 | 1 | 0,85 | 0,0483 | 3400 | 4809,12 | 14,4 | 1,00 |
| | 2 | 0,85 | 0,1613 | 3400 | 4207,98 | 12,6 | 1,02 |
| | 3 | 0,85 | 0,3879 | 3400 | 3606,84 | 10,8 | 1,04 |
| | 4 | 0,85 | 0,4910 | 3400 | 3005,7 | 9 | 1,05 |
| | 5 | 0,85 | 0,5889 | 3400 | 2404,56 | 7,2 | 1,06 |
| | 6 | 0,85 | 0,5934 | 3400 | 1803,42 | 5,4 | 1,06 |
| | 7 | 0,85 | 0,6009 | 3400 | 1202,27 | 3,6 | 1,06 |
| | 8 | 0,85 | 0,7558 | 3400 | 601,14 | 1,8 | 1,08 |
| 02 | 1 | 0,85 | 4,5869 | 3400 | 3791,44 | 591,514 | 1,01 |
| | 2 | 0,85 | 6,1651 | 3400 | 3317,51 | 492,604 | 1,01 |
| | 3 | 0,85 | 7,5915 | 3400 | 2843,58 | 426,664 | 1,02 |
| | 4 | 0,85 | 8,4463 | 3400 | 2369,65 | 360,724 | 1,02 |
| | 5 | 0,85 | 9,1175 | 3400 | 1895,72 | 289,184 | 1,02 |
| | 6 | 0,85 | 9,1430 | 3400 | 1421,79 | 211,806 | 1,02 |
| | 7 | 0,85 | 8,7652 | 3400 | 947,86 | 130,396 | 1,02 |
| | 8 | 0,85 | 8,1606 | 3400 | 473,93 | 44,87 | 1,03 |
| 03 | 1 | 0,85 | 2,6683 | 3400 | 4809,12 | 354,908 | 1,01 |
| | 2 | 0,85 | 3,7475 | 3400 | 4207,98 | 295,562 | 1,02 |
| | 3 | 0,85 | 4,6471 | 3400 | 3606,84 | 255,998 | 1,02 |
| | 4 | 0,85 | 5,1973 | 3400 | 3005,7 | 216,434 | 1,02 |
| | 5 | 0,85 | 5,5577 | 3400 | 2404,56 | 173,51 | 1,02 |
| | 6 | 0,85 | 5,7265 | 3400 | 1803,42 | 127,084 | 1,02 |
| | 7 | 0,85 | 5,4217 | 3400 | 1202,27 | 78,2376 | 1,03 |
| | 8 | 0,85 | 5,1454 | 3400 | 601,14 | 26,922 | 1,03 |

Os valores do coeficiente B_2 apresentados na Tabela 4.26 foram calculados sem levar em consideração as imperfeições de material.

Em função dos valores das relações u_2/u_1 (Tabela 4.25) e dos coeficientes B_2 (Tabela 4.26), a estrutura é classificada como de pequena deslocabilidade.

Comparação dos resultados da APO e da ASO

Tendo em vista os diferentes tipos de análise realizados (APO, ASO e ASO-MAES), apresentam-se alguns gráficos com a sobreposição dos resultados dos esforços máximos nos trechos dos pilares situados no pavimento térreo da estrutura.

Barra 1

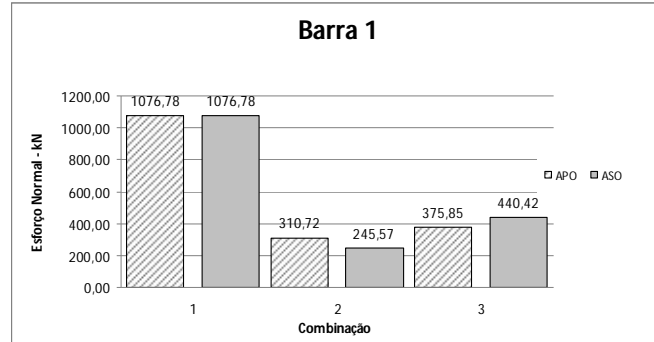


Figura 4.58. - Esforço normal máximo (kN) na barra 1 para as combinações 01,02 e 03 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos)

Barra 2

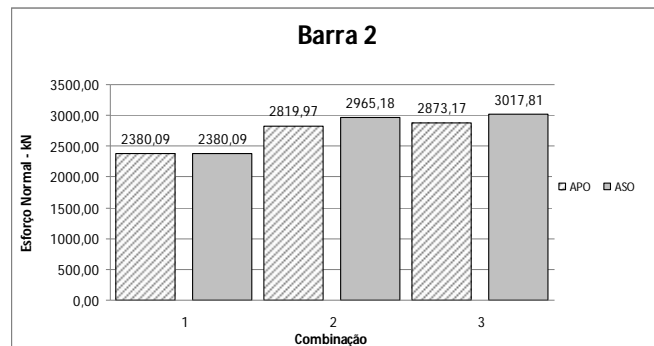


Figura 4.59. - Esforço normal máximo (kN) na barra 2 para as combinações 01,02 e 03 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos)

Barra 3

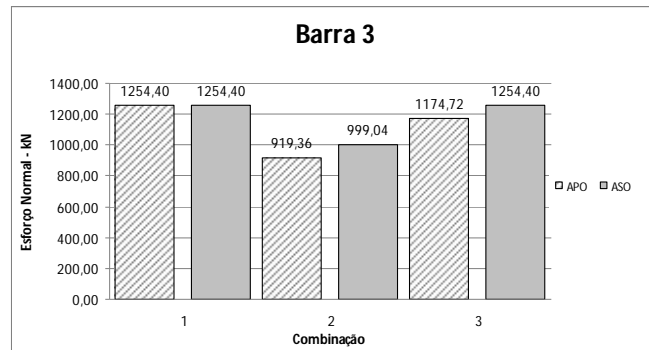


Figura 4.60. - Esforço normal máximo (kN) na barra 3 para as combinações 01,02 e 03 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos)

Verificação da capacidade última dos pilares do pavimento térreo

Para a verificação da capacidade última dos pilares do pavimento térreo utilizou-se o programa Desmet 4.0. Para os resultados de esforços obtidos na APO fez-se a verificação da interação dos efeitos combinados de força axial e momento fletor de acordo com ABNT NBR8800:1986, enquanto que para os resultados obtidos na ASO e ASO-MAES fez-se a verificação de acordo com a ABNT NBR8800:2008.

Para a verificação dos pilares de acordo com a ABNT NBR8800:2008 e ABNT NBR8800:1986, tomam-se sempre igual a um os valores dos coeficientes de flambagem (K).

Os resultados da verificação da capacidade última dos pilares do pavimento térreo são mostrados na Tabela 4.27.

Tabela 4.27. - Verificação da capacidade última dos pilares do pavimento térreo

| Barra | Combinação | Tipo de análise | Esforços solicitantes | | Esforços Resistentes | | Interação |
|-------|------------|-----------------|-----------------------|-------------------|----------------------|-------------------|-----------|
| | | | N_{Sd} (kN) | $M_{x,Sd}$ (kN.m) | N_{Rd} (kN) | $M_{x,Rd}$ (kN.m) | |
| 1 | 01 | APO - SAP2000 | 1076,78 | 0,00 | 1280,52 | - | 0,840 |
| | | ASO - SAP2000 | 1076,78 | 0,00 | 1527,26 | - | 0,705 |
| 2 | 03 | APO - SAP2000 | 2873,17 | 0,00 | 3310,92 | - | 0,910 |
| | | ASO - SAP2000 | 3017,81 | 0,00 | 3725,38 | - | 0,810 |
| 3 | 01 | APO - SAP2000 | 1254,40 | 0,00 | 1280,52 | - | 0,980 |
| | | ASO - SAP2000 | 1254,40 | 0,00 | 1527,26 | - | 0,821 |

4.9. Discussão dos resultados

Tendo por base os estudos de caso anteriores, apresenta-se a seguir uma avaliação crítica dos resultados obtidos por meio dos diferentes tipos de análise estrutural e metodologias de verificação da capacidade última.

O caso 1 consiste em um pilar isolado de aço engastado na base e livre no topo submetido a uma ação de cálculo P_d (Figura 4.1), de mesma magnitude de sua força axial de compressão resistente de cálculo ($N_{c,Rd}$).

Em função do resultado de cálculo do coeficiente B_2 , apresentado na Tabela 4.1, a estrutura foi classificada como de grande deslocabilidade, fazendo-se necessária a consideração das imperfeições de material na análise de segunda ordem. Por se tratar de uma estrutura atípica, composta por um único elemento de barra e classificada como de grande deslocabilidade, é possível observar uma grande diferença entre os resultados da APO e da ASO, com o surgimento de um esforço de momento fletor na ASO (Figura 4.6), em função da consideração das imperfeições geométricas e de material e do procedimento de análise .

De acordo com os resultados da verificação da capacidade última apresentados na Tabela 4.2, pode-se observar que a metodologia da ABNT NBR8800:2008 conduziu a um valor de interação menor do que o obtido por meio da metodologia prescrita pela

ABNT NBR8800:1986. No entanto a diferença entre os valores de interação não deve ser interpretada como uma tendência de comportamento, por se tratar de uma estrutura atípica e de grande deslocabilidade.

Portanto, o caso 1 foi incluído neste trabalho devido ao caráter didático que o mesmo possui para aplicação do Método da Amplificação dos Esforços Solicitantes (MAES), como pode ser visto no Apêndice A.1.

Para os casos 2 a 8 pode-se observar que a comparação entre os resultados dos diferentes tipos de análise e a comparação das verificações da capacidade última dos pilares seguem uma mesma tendência. Por este motivo, as considerações feitas a seguir se aplicam a todos esses casos.

Ao realizar a classificação das estruturas, pode-se observar que há uma diferença entre os valores dos deslocamentos relativos (u_2/u_1) e os coeficientes B_2 para um mesmo andar, apesar da ABNT NBR8800:2008 permitir a utilização de ambos os métodos para classificação da estrutura quanto à sensibilidade a deslocamentos laterais.

Realizando-se a classificação em função da relação entre deslocamentos de segunda (u_2) e primeira ordem (u_1), mesmo estando diante de valores absolutos de deslocamentos laterais (u_2 e u_1) pequenos, pode-se obter uma relação suficientemente grande, que leve a estrutura a ser classificada como de grande deslocabilidade. Neste caso, um valor elevado da relação (u_2/u_1) não representa, necessariamente, que exista uma influência relevante dos efeitos de segunda ordem.

Nos casos em que a análise de segunda ordem é feita pelo MAES, é natural se utilizar do valor do coeficiente B_2 para classificação da estrutura, pois não há sentido em se fazer uma análise de segunda ordem para calcular a relação (u_2/u_1). Por outro lado se a análise de segunda ordem for realizada com auxílio de um programa computacional, não há necessidade do cálculo do coeficiente B_2 , ao mesmo tempo que existe facilidade para realizar uma APO, o que torna natural fazer a classificação em função da relação (u_2/u_1).

Para os casos 2 a 8 foram realizados diferentes tipos de análise (APO, ASO e ASO-MAES) e foram produzidos gráficos comparativos com a sobreposição dos resultados dos esforços máximos de alguns pilares da estrutura. Em todos os casos analisados pode-se notar uma grande proximidade entre os resultados de esforços normal, cortante e momento fletor para os diferentes tipos de análise, constatando-se pequenas variações em relação aos esforços de primeira ordem.

A proximidade entre os esforços de primeira e segunda ordem nos casos analisados pode ser explicada devido ao fato dessas estruturas serem de pequena e média deslocabilidade, para as quais a influência dos efeitos de segunda ordem não se mostrou relevante.

Para as verificações da capacidade última dos pilares em função dos resultados dos diferentes tipos de análise, segundo a ABNT NBR8800:1986 e a ABNT NBR8800:2008, pode-se observar nas tabelas produzidas ao final de cada caso que a verificação pela metodologia da ABNT NBR8800:2008 conduziu a um dimensionamento mais econômico do que o da ABNT NBR8800:1986, sistematicamente. Essa diferença é percebida tanto nos casos de pórticos rígidos, onde o coeficiente de flambagem (K) é distinto para as verificações segundo a ABNT NBR8800:1986 e segundo a ABNT NBR8800:2008, quanto nos casos de pórticos contraventados, onde o $K = 1,0$ para todos os tipos de verificação.

Na Figura 4.61 faz-se uma representação conjunta dos resultados obtidos em todos os casos estudados, por meio da qual é possível observar o resultado da interação obtida em todos os pilares analisados, considerando a APO e a ASO. Nesta mesma figura apresentam-se também as curvas-limite das equações de interação segundo a ABNT NBR8800:1986 e a ABNT NBR8800:2008.

De acordo com a Figura 4.61 pode-se observar que os resultados das interações se situam abaixo das curvas-limite definidas pelas normas de 1986 e de 2008, com exceção das verificações segundo a ABNT NBR8800:1986 para as barras 4 e 5 do caso 2, para as quais foram mantidos os perfis indicados no exemplo de aplicação apresentado por Simões (2007). Para todos os outros casos, fica evidenciada uma folga no dimensionamento dos pilares, já que os perfis foram pré-dimensionados em função do critério de estado-limite último e de

estado-limite de serviço de deslocamento lateral excessivo prescritos pela ABNT NBR8800:1986, foram adotadas bitolas comerciais disponíveis no mercado e os perfis de um mesmo pórtico foram padronizados por questões construtivas.

Por meio da Figura 4.61 evidencia-se ainda que os resultados das interações segundo a ABNT NBR8800:1986, utilizando esforços obtidos na APO, são sistematicamente mais altos que os obtidos segundo a ABNT NBR8800:2008, utilizando esforços obtidos na ASO. Ou seja, de acordo com os casos estudados, a norma de 2008 levou sempre à obtenção de resultados mais econômicos do que a norma de 1986.

É importante ainda destacar que, de acordo com a Figura 4.61, não foi observado nenhum caso em que a verificação segundo a norma de 2008, feita utilizando esforços da ASO, tenha levado a uma interação mais alta do que a obtida pela norma de 1986. Levando-se em conta que os resultados de uma análise de segunda ordem são mais realistas do que os de primeira ordem, pode-se dizer que o procedimento prescrito pela norma de 1986 é conservador, mas não pode ser considerado inseguro para as estruturas estudadas, que representam boa parte das estruturas de aço correntes.

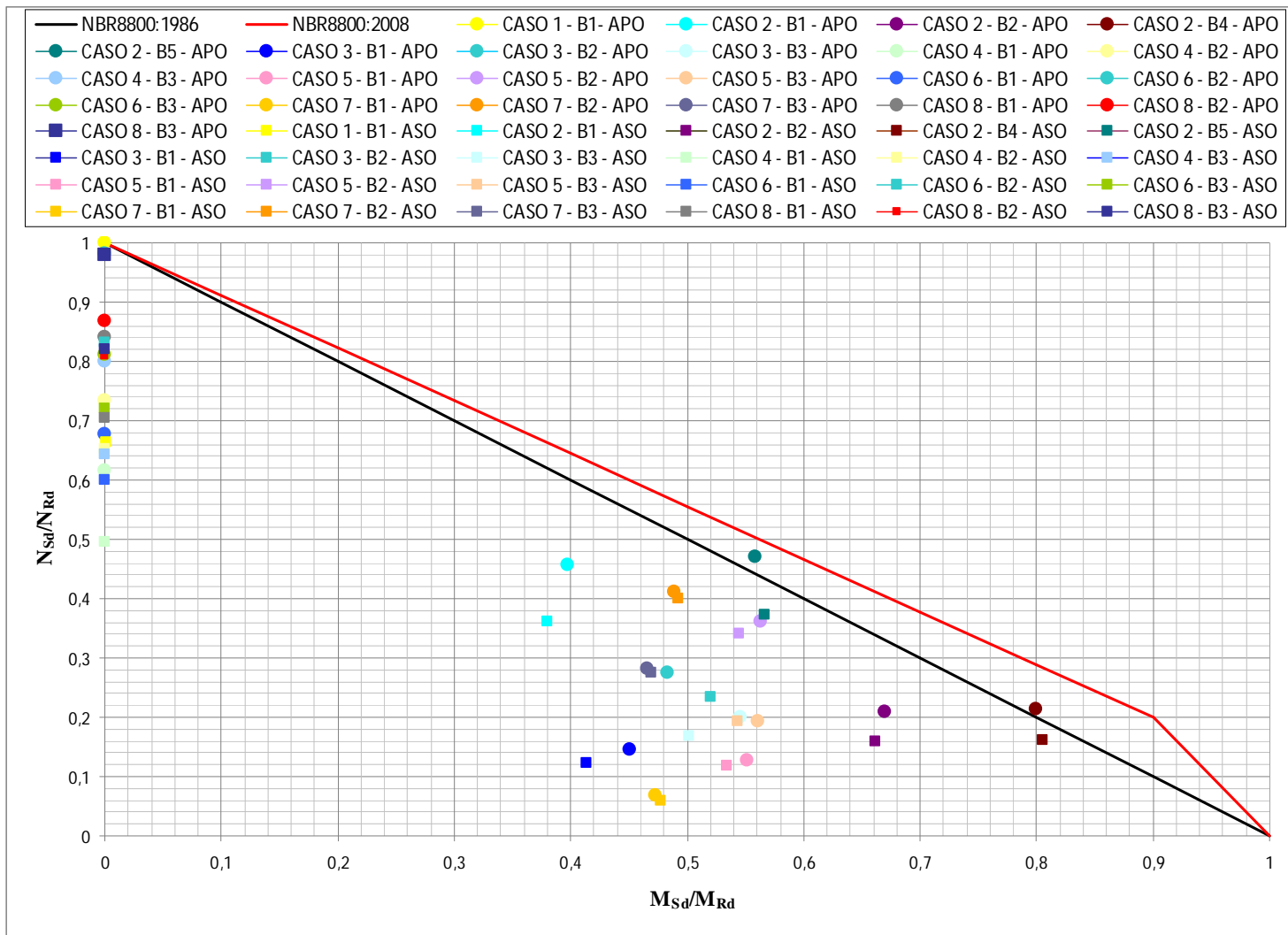


Figura 4.61. – Verificação da interação para as barras analisadas nos casos de 1 a 8.

5

Conclusões e Recomendações

Neste capítulo apresentam-se as conclusões formuladas com base nos resultados e comportamentos observados nos estudos de caso apresentados. Apresentam-se também sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

5.1. Conclusões Gerais

Com relação à classificação das estruturas quanto à sensibilidade a deslocamentos laterais, apresentou-se uma comparação entre o procedimento que considera os deslocamentos relativos (u_2/u_1) e aquele que se baseia no cálculo do coeficiente B_2 . Observou-se que há uma variação entre os resultados desses dois procedimentos previstos na ABNT NBR8800:2008. A classificação de uma estrutura em função da relação entre deslocamentos de segunda (u_2) e de primeira ordem (u_1) de valores absolutos pequenos pode levar a uma estrutura de grande deslocabilidade, sem que se produzam efetivamente efeitos de segunda ordem relevantes.

Depois de uma ampla discussão ao longo do desenvolvimento deste trabalho, pode-se afirmar que estruturas de grande deslocabilidade ($(u_2/u_1) > 1,4$ ou $B_2 > 1,4$) devem ser evitadas, visto que os efeitos de segunda ordem passam a ser de grande importância. Nas estruturas de aço correntes, notou-se que esta situação praticamente já não ocorre ao se atender a condição de deslocamento lateral máximo para o estado-limite de serviço, porque a rigidez necessária para que a estrutura atenda ao deslocamento limite, geralmente é suficiente para caracterizá-la como de pequena ou média deslocabilidade.

Os resultados obtidos por meio do Método da Amplificação dos Esforços Solicitantes (MAES), previsto no Anexo D da ABNT NBR8800:2008, foram muito próximos daqueles obtidos por meio da análise de segunda ordem aproximada (ASO), realizada com auxílio do programa computacional SAP 2000. Isto confirma a validade do MAES, que se propõe como uma análise elástica adaptada de segunda ordem, levando em conta os efeitos global P- Δ e local P- δ . Além de bons resultados, o MAES também possui um caráter didático quanto à aplicação de uma análise de segunda ordem.

No entanto, nota-se que o MAES requer uma grande quantidade de trabalho manual, com grande dispêndio de tempo e possibilidades de erro. Para aplicação do MAES é necessário realizar três análises de primeira ordem (APO, “nt” e “lt”), para cada combinação de ações, de forma a se obter os esforços finais em cada elemento da estrutura. Existe ainda uma

dificuldade adicional na aplicação do MAES, pois os esforços máximos nas estruturas “nt” e “lt” quase nunca ocorrem numa mesma seção do elemento, dificultando assim a obtenção dos esforços máximos de segunda ordem atuantes no mesmo. Tendo em vista a atual disponibilidade de programas computacionais para análise de segunda ordem e a facilidade de operação dos mesmos, torna-se difícil encontrar justificativas para aplicar o MAES na análise de estruturas com grande quantidade de elementos, o que é comum nas estruturas correntes de edifícios de múltiplos andares em aço.

Nos estudos de caso realizados percebeu-se uma grande proximidade entre os resultados de esforços normal, cortante e momento fletor para os diferentes tipos de análise realizados (APO, ASO e ASO-MAES). Isto confirma a idéia de que em estruturas de pequena deslocabilidade a influência dos efeitos de segunda ordem não é relevante, ou seja, não há variação significativa dos esforços internos solicitantes.

Segundo o Anexo H da ABNT NBR8800:1986, para estruturas nas quais tenham sido incluídos os efeitos de segunda ordem na determinação dos esforços solicitantes (efeitos P- Δ), o coeficiente de flambagem (K) deve ser determinado em função dos graus de impedimento à rotação impostos ao pilar em suas extremidades. O valor do coeficiente K para cada trecho de pilares contínuos entre andares deve ser igual ou inferior a 1,0, como acontece para estruturas indeslocáveis. Isto explica o fato da ABNT NBR8800:2008 exigir a realização de uma ASO e adotar um coeficiente $K = 1,0$ para a verificação da capacidade última de elementos comprimidos, pois ao se fazer este tipo de análise os esforços solicitantes são obtidos para a estrutura em sua configuração deformada final, ou seja, em uma posição indeslocável.

Ao longo da realização do presente trabalho notou-se que existem algumas dificuldades para melhor compreensão das prescrições da ABNT NBR8800:2008, o que poderia ser motivo de uma reanálise em futuras revisões. Da forma como se apresenta no texto da norma, os critérios para consideração das imperfeições geométricas, quer seja por meio de um deslocamento interpavimento ou por meio de forças nocionais, se mesclam com as recomendações para realização de uma análise de segunda ordem, dando a impressão de que a análise depende das imperfeições, o que não corresponde à realidade. Além disso, a informação de que as forças nocionais podem ser entendidas como carregamento lateral

mínimo, não deixa claro se é ou não obrigatório considerá-las em conjunto com forças horizontais com o mesmo sentido e maior magnitude. Em função das prescrições do item 4.9.7.2 para estruturas de grande deslocabilidade é que pode-se interpretar, por exclusão, que não é obrigatório considerar as imperfeições geométricas em conjunto com ações horizontais de maior magnitude no caso de estruturas de pequena e média deslocabilidade, o que realça o sentido dado ao conceito de carregamento lateral mínimo.

A respeito das verificações da capacidade última dos pilares em função dos resultados dos diferentes tipos de análise, segundo a ABNT NBR8800:1986 e a ABNT NBR8800:2008, observou-se que a metodologia da ABNT NBR8800:2008 conduziu, sistematicamente, a um dimensionamento mais econômico. Por outro lado, a metodologia prevista na ABNT NBR8800:1986, que utiliza o conceito do comprimento efetivo de flambagem, mostrou-se sempre a favor da segurança.

Em função do estudo realizado, considerando-se estruturas de pequena e média deslocabilidade, existem evidências de que o uso de uma APO e do Método do Coeficiente de Flambagem (utilizando diagramas de alinhamento), conforme previsto na ABNT NBR8800:1986, está a favor da segurança. No entanto, considerando-se que o uso de uma ASO e das imperfeições iniciais sempre representará de maneira mais realista o comportamento de uma estrutura, é natural que se estimule o uso deste tipo de análise e da equação de interação da ABNT NBR 8800:2008, além de ser um procedimento mais econômico.

Portanto, o estudo realizado leva a crer que, mesmo havendo algumas limitações para aplicação em alguns casos e não sendo tão realista, o Método do Coeficiente de Flambagem, que foi difundido ao longo de muitos anos e permite uma avaliação expedita, continua sendo válido para o dimensionamento de estruturas de pequena e média deslocabilidade. Por outro lado, é importante dispor de um método moderno e mais realista para o dimensionamento de estruturas de aço, conforme proposto na ABNT NBR 8800:2008, cujo uso deve ser estimulado.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

Tendo em vista o estudo realizado, apresentam-se algumas sugestões que podem ser consideradas em trabalhos futuros:

- avaliar a aplicação do MAES para estruturas de diferentes formas geométricas, como galpões com barras inclinadas e galpões em arco;
- realizar uma análise avançada para modelos de estruturas correntes e comparar os resultados com análises aproximadas realizadas por meio de programas computacionais disponíveis no mercado;

Referências Bibliográficas

ABNT NBR 8800:1986. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Projeto e Execução de Estruturas de Aço de Edifícios – Procedimento**, Rio de Janeiro.

ABNT NBR 8800:2008. Associação Brasileira de Norma Técnicas. **Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios – Procedimento**, Rio de Janeiro.

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS – ASCE. **Effective Length and Notional Load Approaches for Assessing Frame Stability: implications for American steel design**. By the Task Committee on Effective Length. New York, 1997.

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION – AISC. **ANSI/AISC 360-05. Specification for Structural Steel Buildings**. AISC. Chicago, 2005.

BARROS, A. **Um Estudo da Estabilidade de Pórticos Considerando o Fator do Comprimento Efetivo e as Forças Nocionais**. Dissertação de Mestrado. 139 p. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

COMPUTER AND STRUCTURES INC. **SAP 2000 Static and Dynamic Finite Element Analysis of Structures**. University Ave, Berkley, USA, 2004.

DÓRIA, A.S. (2007). **Análise da Estabilidade de Pórticos Planos de Aço com Base no Conceito de Forças Horizontais Fictícias**. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

EN 1993-1-1: 2005 Eurocode 3: **Design of Steel Structures, Part 1.1: General Rules and Rules for Buildings**. European Committee for Standardization.

FAKURY, Ricardo Hallal (2008). **Dimensionamento Básico de Estruturas de Aço**. Versão 1, Papelaria Oficial, Belo Horizonte (Apostila).

FAKURY, Ricardo Hallal, SILVA, Ana Lydia Reis de Castro (2008). **Dimensionamento Básico de Elementos de Estruturas de Aço**. Versão 2, Papelaria Oficial, Belo Horizonte (Apostila).

GALAMBOS, T.V. **Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures**. John Wiley & Sons, 1998.

QUEIROZ, Gílson. **Elementos das estruturas de aço**. Belo Horizonte, 1988.

SILVA, R.G.L. (2004) **Avaliação dos Efeitos de Segunda Ordem em Edifícios de Aço Utilizando Métodos Aproximados e Análise Rigorosa**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia da UFMG, p. 140.

SIMÕES, Rui A. D. (2005). **Manual de dimensionamento de estruturas metálicas: Eurocódigo 3: projecto de estruturas metálicas, parte 1-1: regras gerais e regras para edifícios** / Rui A. D. Simões - Coimbra: CMM - Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista, XXIII, 204 p.: il. - (Construção Metálica e Mista / ed. António Ressano Garcia Lamas)


ZIEMIAN, Ronald D. **Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures**. John Wiley & Sons, 2010.

Apêndice **A**

Estudos de caso completos

Neste Apêndice apresentam-se quatro casos de análise de estruturas de aço correntes, que ilustram a sequência de passos adotados para obtenção dos resultados apresentados no Capítulo 4 deste trabalho.

Para cada caso apresenta-se a classificação quanto à sensibilidade a deslocamentos laterais e os diagramas de esforços solicitantes obtidos para análise de primeira ordem (APO) e para a análise de segunda ordem (ASO e ASO-MAES). Apresentam-se também alguns gráficos com a sobreposição dos resultados dos trechos dos pilares situados no pavimento térreo da estrutura e uma tabela comparativa com a verificação da capacidade última dos pilares analisados, segundo a ABNT NBR8800:1986 e ABNT NBR8800:2008.

| | | | | | | | |
|--|--|--|-----------------|-------------|------------|-----|----------|
|  UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | Título | | Página | | 128 | | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | | Revisão | | A | | |
| | | | Controle | Responsável | Data | | |
| | Referência | | A.1 - Caso 1 | | Preparado | CAP | 08/02/11 |
| | | | Pilar Engastado | | Verificado | CAP | |
| | | | | | Aprovado | | |

A.1 Caso 1 – Pilar Engastado

Verificar a capacidade última do pilar de aço engastado indicado na Figura A.1.1.

Determinar os esforços de cálculo de acordo com uma análise de primeira ordem (APO) e com uma análise de segunda ordem (ASO). Para a ASO, desenvolver a análise com auxílio de um programa computacional e por meio do Método de Amplificação dos Esforços Solicitantes (MAES), apresentado no Anexo D da ABNT NBR8800:2008.

Admite-se que o pilar seja contido na direção da menor inércia (x), fazendo com que a análise fique restrita apenas na direção do eixo de maior inércia (y).

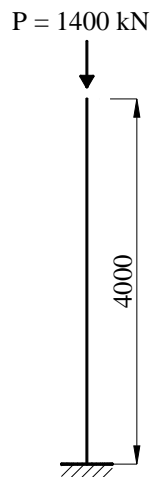



Figura A.1.1 – Pilar engastado

(dimensões em milímetros e ações com valores de cálculo)

Dados:

- Perfil HP 250 x 62
- Aço ASTM A572 Grau 50;
- Módulo de elasticidade - $E = 200.000 \text{ MPa}$;

| | | | | | |
|--|--|------------|------------|-------------|------|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | Página | 129 | | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | | |
| | | Referência | Controlado | Responsável | Data |
| | A.1 - Caso 1 Pilar Engastado | Preparado | CAP | 08/02/11 | |
| | | Verificado | CAP | | |
| | Aprovado | | | | |

A.1.1 Modelo estrutural

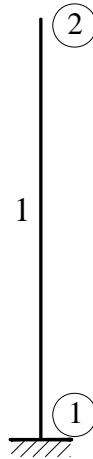


Figura A.1.2 - Modelo estrutural do pilar engastado

A.1.2 Ações atuantes

P - Carga de cálculo atuante na estrutura

A força horizontal equivalente (F_n), que representa as imperfeições geométricas, deve ser calculada para cada pavimento da estrutura, conforme a seguinte expressão:

$$F_n = \frac{0,3}{100} \sum N_{sd} \quad (\text{A.1.1})$$

onde:


$\sum N_{sd}$ é o somatório das cargas gravitacionais de cálculo atuantes no pavimento.

Como as forças gravitacionais nos dois pavimentos são diferentes, tem-se:

-Nível 1:

$$F_{n1} = \frac{0,3}{100} (1400)$$

$$F_{n1} = 4,20 \text{ kN}$$

| | | | | | | | |
|--|---|--|-----------------|-------------|------------|-----|----------|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | | Página | | 130 | | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | | Revisão | | A | | |
| | | | Controle | Responsável | Data | | |
| | Referência | | A.1 - Caso 1 | | Preparado | CAP | 08/02/11 |
| | | | Pilar Engastado | | Verificado | CAP | |
| | | | | | Aprovado | | |

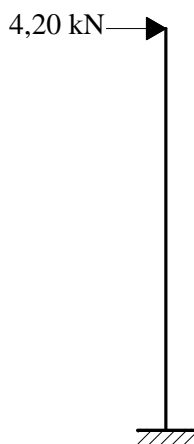


Figura A.1.3 - Força horizontal equivalente em cada andar (kN)

A.1.3 Combinações de ações

Combinações últimas normais:

$$F_d = \sum_{i=1}^m (\gamma_{gi} F_{Gi,k}) + \gamma_{q1} F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n (\gamma_{qj} \psi_{0j} F_{Qj,k}) \quad (\text{A.1.2})$$


Combinação 01 (para a APO) : P_d

Combinação 01 (para a ASO e ASO-MAES) : $P_d + F_n$

Para fins de análise estrutural, as imperfeições geométricas só foram consideradas na combinação de ações para as análises de segunda ordem (ASO e ASO-MAES).

A.1.4 Classificação da estrutura quanto à sensibilidade a deslocamentos laterais

Segundo o item 4.9.4.5 da NBR 8800:2008 (ABNT, 2008) a classificação da estrutura deve ser obtida para as combinações últimas de ações em que os deslocamentos

| | | | | | |
|--|--|------------|------------|-------------|------|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | Página | 131 | | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | | |
| | | Referência | Controlado | Responsável | Data |
| | A.1 - Caso 1 Pilar Engastado | Preparado | CAP | 08/02/11 | |
| | | Verificado | CAP | | |
| | | Aprovado | | | |

horizontais provenientes das forças horizontais tenham os mesmos sentidos dos deslocamentos horizontais decorrentes das cargas gravitacionais.

a) Classificação de acordo com o coeficiente B_2

O coeficiente B_2 prescrito no Anexo D da ABNT NBR8800:2008 é dado por:

$$B_2 = \frac{1}{1 - \frac{1}{R_s} \frac{\Delta_h}{H} \frac{\sum N_{SD}}{\sum H_{SD}}} \quad (\text{A.1.3})$$

Onde :

$\sum N_{SD}$ é a carga gravitacional total que atua no andar considerado;

R_s é um coeficiente de ajuste, igual a 0,85 nas estruturas onde as subestruturas de contraventamento são todas pórticos rígidos e igual a 1 para as outras estruturas;

Δ_h é o deslocamento horizontal relativo entre os níveis superior e inferior (deslocamento interpavimento em uma análise de primeira ordem);


$\sum H_{SD}$ é a força cortante no andar, produzida pelas forças horizontais de cálculo atuantes.

Na Tabela A.1.1 apresenta-se o valor do coeficiente B_2 para classificação da estrutura quanto à sensibilidade a deslocamentos laterais.

Tabela A.1.1 - Valores do coeficiente B_2 para classificação da estrutura

| Combinação | R_s | Δh (mm) | H(mm) | N_{SD} | H_{SD} | B_2 |
|------------|-------|-----------------|-------|----------|----------|-------|
| 01 | 0,85 | 5,3063 | 4000 | 1400 | 4,20 | 2,08 |

O valor do coeficiente B_2 apresentado na Tabela A.1.1 foi calculado sem levar em consideração as imperfeições de material.

| | | | | | | | |
|--|--|--|-----------------|-------------|------------|-----|----------|
|  UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | Título | | Página | | 132 | | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | | Revisão | | A | | |
| | | | Controle | Responsável | Data | | |
| | Referência | | A.1 - Caso 1 | | Preparado | CAP | 08/02/11 |
| | | | Pilar Engastado | | Verificado | CAP | |
| | | | | | Aprovado | | |

b) Classificação da estrutura

De acordo com o valor do coeficiente B_2 apresentado na Tabela A.1.1, a estrutura é classificada como de grande deslocabilidade.

A.1.5 Análise de primeira ordem (APO)

A seguir apresentam-se os diagramas de esforços solicitantes para uma análise de primeira ordem (APO). Esta análise foi realizada com auxílio do programa SAP2000.

a) Diagrama de Esforço Normal (DEN)

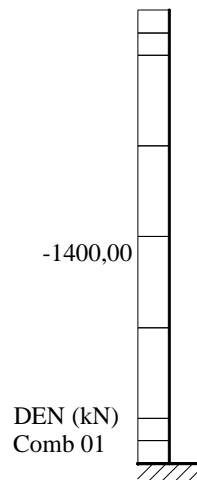



Figura A.1.4 - Diagrama de Esforço Normal (DEN) - Combinação 01

| | | | | | | |
|--|--|------------|-------------|----------|--|--|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | Página | | 133 | | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | | A | | |
| | | Referência | Responsável | Data | | |
| | A.1 - Caso 1 Pilar Engastado | Preparado | CAP | 08/02/11 | | |
| | | Verificado | CAP | | | |
| | | Aprovado | | | | |

b) Diagrama de Esforço Cortante (DEC)

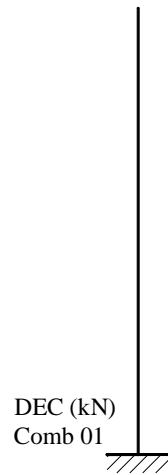


Figura A.1.5 - Diagrama de Esforço Cortante (DEC) - Combinação 01

c) Diagrama de momento Fletor (DMF)

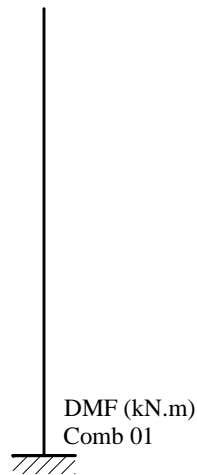



Figura A.1.6 –Diagrama de Momento Fletor (DMF) - Combinação 01

| | | | | | |
|--|---|------------|------------|-------------|------|
|  UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | Título | Página | 134 | | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | | |
| | | Referência | Controlado | Responsável | Data |
| | A.1 - Caso 1 Pilar Engastado | Preparado | CAP | 08/02/11 | |
| | | Verificado | CAP | | |
| | Aprovado | | | | |

A.1.6 Análise de segunda ordem (ASO)

A.1.6.1 Análise de segunda ordem de acordo com o MAES

Na Figura A.1.7 apresentam-se as estruturas “nt” e “lt” de acordo com o Anexo D da ABNT NBR8800:2008.

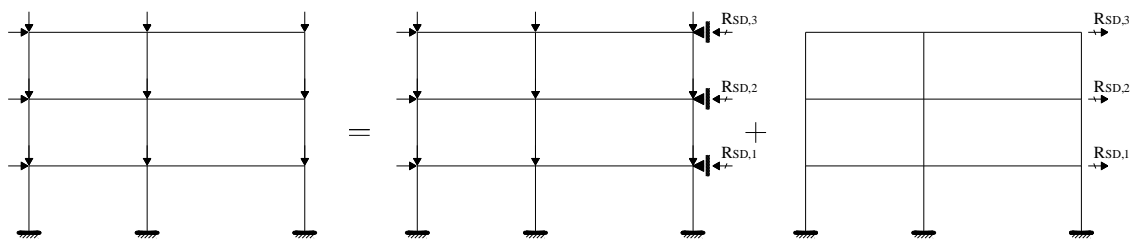


Figura A.1.7 – Modelo para análise - estrutura “nt” e “lt”

As estruturas “nt” e “lt” são analisadas em análise de primeira ordem. A seguir são apresentados os diagramas de esforços solicitantes para os dois casos, que foram modelados no SAP2000.

A.1.6.1.1 Esforços solicitantes na estrutura “nt”

a) Diagrama de Esforço Normal (DEN)

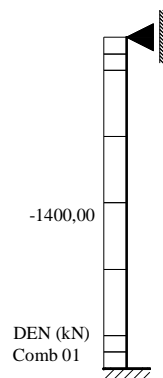



Figura A.1.8 - Diagrama de Esforço Normal (DEN) - “nt” - Combinação 01

| | | | | | | | |
|--|---|----------|------------|------|-------------|----------|--|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | | Página | | 135 | | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | | Revisão | | A | | |
| | Referência | | Controlado | | Responsável | | |
| | A.1 - Caso 1 | | Preparado | | CAP | | |
| | Pilar Engastado | | Verificado | | CAP | | |
| | | Aprovado | | Data | | 08/02/11 | |

b) Diagrama de Esforço Cortante (DEC)



Figura A.1.9 - Diagrama de Esforço Cortante (DEC) - “nt” - Combinação 01

c) Diagramas de Momento Fletor (DMF)

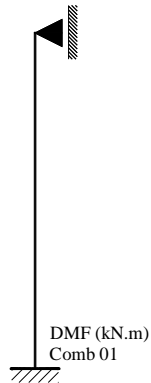


Figura A.1.10 - Diagrama de Momento Fletor (DMF) - “nt” - Combinação 01

A.1.6.1.2 Esforços solicitantes na estrutura “It”

No nó 2 da estrutura “It” aplica-se a reação do apoio lateral da estrutura “nt” de acordo com a Tabela A.1.3.


| | | | | | | | |
|--|--|--|-----------------|-------------|------------|-----|----------|
|  UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | Título | | Página | | 136 | | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | | Revisão | | A | | |
| | | | Controle | Responsável | Data | | |
| | Referência | | A.1 - Caso 1 | | Preparado | CAP | 08/02/11 |
| | | | Pilar Engastado | | Verificado | CAP | |
| | | | Aprovado | | | | |

Tabela A.1.2 - Reações nodais (R_{Sd})

| Nó | R_{Sd1} (kN) |
|----|----------------|
| 2 | 4,20 |

a) Diagrama de Esforço Normal (DEN)



Figura A.1.11 - Diagrama de Esforço Normal (DEN) - “lt” - Combinação 01

b) Diagrama de Esforço Cortante (DEC)

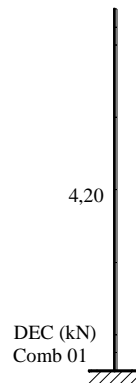

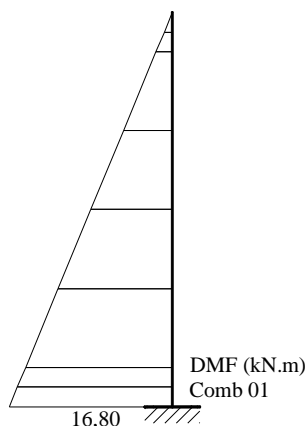


Figura A.1.12 - Diagrama de Esforço Cortante (DEC) - “lt” - Combinação 01

| | | | | | | |
|--|---|---------------------------------|------------|-------------|----------|--|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | | Página | 137 | | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | | Revisão | A | | |
| | Referência | A.1 - Caso 1 Pilar Engastado | Controle | Responsável | Data | |
| | | | Preparado | CAP | 08/02/11 | |
| | | | Verificado | CAP | | |
| | | | Aprovado | | | |

c) Diagrama de Momento Fletor (DMF)



A.1.13 - Diagrama de Momento Fletor (DMF) - “lt” - Combinação 01

A.1.6.1.3 Cálculo dos coeficientes B_1 e B_2

A Tabela A.1.4 mostra o valor do coeficiente B_1 para a estrutura.


Tabela A.1.3 - Valor do coeficiente B_1 para a estrutura

| Barra | I_x (cm ⁴) | L_x (cm) | K_x | N_{ex} (kN) | N_{Sd1} (kN) | C_m | B_1 |
|-------|--------------------------|------------|-------|---------------|----------------|--------|-------|
| 1 | 8728,43 | 400 | 1 | 10757,35 | 1400 | 1,0000 | 1,15 |

Como a estrutura foi classificada como de grande deslocabilidade se faz necessário um novo cálculo do coeficiente B_2 . Na Tabela A.1.5 apresenta-se o valor do coeficiente B_2 , calculado considerando a influência das imperfeições de material.

Tabela A.1.4 - Valor do coeficiente B_2 para classificação da estrutura

| Combinação | R_s | Δh (mm) | H(mm) | N_{Sd} | H_{Sd} | B_2 |
|------------|-------|-----------------|-------|----------|----------|-------|
| 01 | 0,85 | 6,6328 | 4000 | 460 | 1,38 | 2,86 |

| | | | | | | | |
|--|--|--|-----------------|-------------|------------|-----|----------|
|  UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | Título | | Página | | 138 | | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | | Revisão | | A | | |
| | | | Controle | Responsável | Data | | |
| | Referência | | A.1 - Caso 1 | | Preparado | CAP | 08/02/11 |
| | | | Pilar Engastado | | Verificado | CAP | |
| | | | | | Aprovado | | |

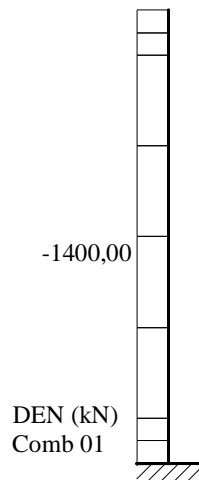
A.1.6.1.4 Esforços solicitantes

De acordo com o método da amplificação dos esforços solicitantes (MAES) em cada andar o momento fletor (M_{SD}) e a força axial (N_{SD}) solicitantes de cálculo devem ser determinados por:


$$M_{SD} = B_1 M_{nt} + B_2 M_{lt} \quad (\text{A.1.4})$$

$$N_{SD} = N_{nt} + B_2 N_{lt} \quad (\text{A.1.5})$$

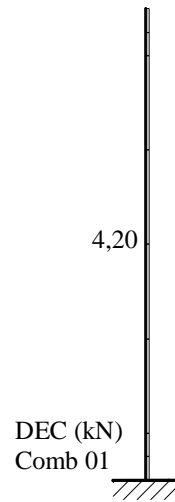
a) Diagrama de Esforço Normal (DEN)



A.1.14 - Diagrama de Esforço Normal (DEN) - “MAES” - Combinação 01

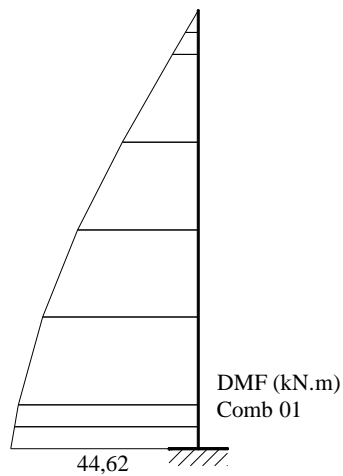
| | | | | | |
|--|--|------------|------------|-------------|------|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | Página | 139 | | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | | |
| | | Referência | Controlado | Responsável | Data |
| | A.1 - Caso 1 Pilar Engastado | Preparado | CAP | 08/02/11 | |
| | | Verificado | CAP | | |
| | Aprovado | | | | |

b) Diagrama de Esforço Cortante (DEC)




A.1.15 - Diagrama de Esforço Cortante (DEC) - “MAES” - Combinação 01

c) Diagrama de Momento Fletor (DMF)



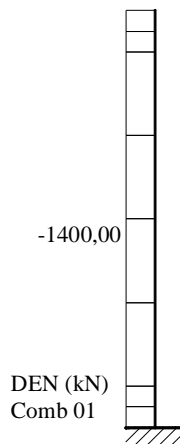
A.1.16 - Diagrama de Momento Fletor (DMF) - “MAES” - Combinação 01

| | | | | | |
|--|--|------------|--------------|------------|-------------|
|  UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | Título | Página | | 140 | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | | A | |
| | | Referência | A.1 - Caso 1 | Controlado | Responsável |
| | Pilar Engastado | Preparado | CAP | 08/02/11 | |
| | | Verificado | CAP | | |
| | | Aprovado | | | |

A.1.6.2 Análise de segunda ordem com auxílio do programa SAP2000

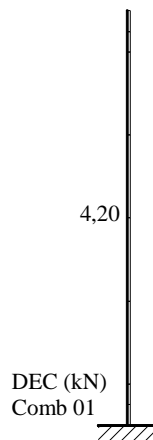
A seguir apresentam-se os diagramas de esforços solicitantes para uma análise de segunda ordem (ASO). Esta análise foi realizada com auxílio do programa SAP2000.

a) Diagramas de Esforço Normal (DEN)




A.1.17 - Diagrama de Esforço Normal (DEN) - Combinação 01

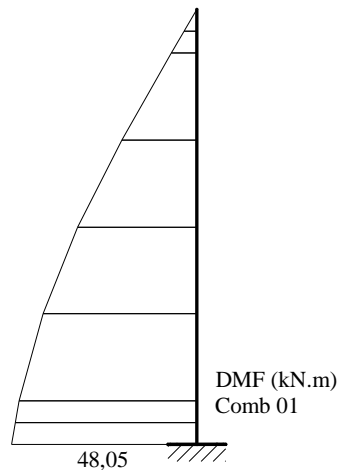
b) Diagramas de Esforço Cortante (DEC)



A.1.18 - Diagrama de Esforço Cortante (DEC) - Combinação 01

| | | | | |
|--|--|-------------|--------------|--|
|  UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | Título | | Página | |
| | Apêndice A - Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | | 141 | |
| | | | Revisão | |
| | Referência | | A | |
| | | | A.1 - Caso 1 | |
| Pilar Engastado | | | | |
| Aprovado | | Responsável | Data | |
| | | CAP | 08/02/11 | |
| | | CAP | | |

c) Diagramas de Momento Fletor (DMF)



A.1.19 - Diagrama de Momento Fletor (DMF) - Combinação 01

A.1.7 Comparação dos resultados da APO e da ASO

Tendo em vista os diferentes tipos de análise realizados (itens A.1.5 e A.1.6) apresentam-se alguns gráficos com a sobreposição dos resultados dos esforços máximos no pilar.

a) Barra 1

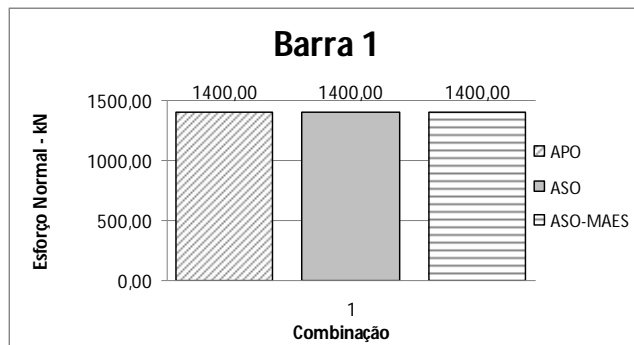



Figura A.1.20 - Esforço normal máximo (kN) na barra 1 para a combinação 01 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos)

| | | | | | |
|--|--|------------|-------------|----------|--|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | Página | 142 | | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | | |
| | | Referência | Responsável | Data | |
| | A.1 - Caso 1 Pilar Engastado | Preparado | CAP | 08/02/11 | |
| | | Verificado | CAP | | |
| | Aprovado | | | | |

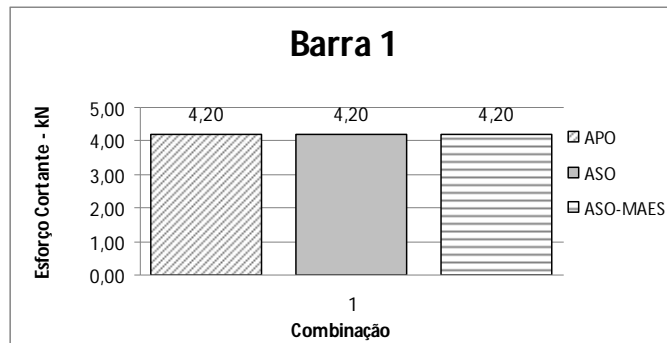


Figura A.1.21 -Esforço cortante máximo (kN) na barra 1 para a combinação 01 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos)

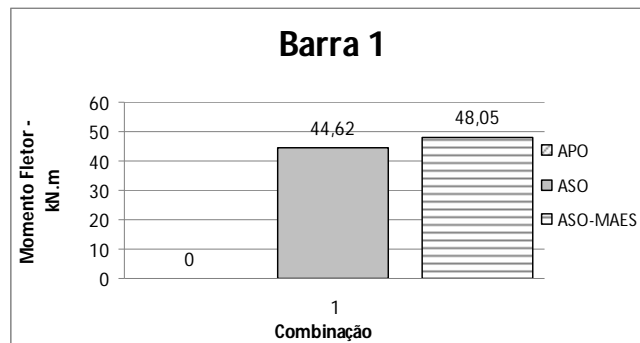



Figura A.1.22 - Momento fletor máximo (kN.m) na barra 1 para a combinação 01 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos)

A.1.8 Verificação da capacidade última do pilar

Para a verificação da capacidade última do pilar, utilizou-se o programa Desmet 4.0. Para a APO fez-se a verificação de acordo com ABNT NBR8800:1986 enquanto que para a ASO fez-se a verificação de acordo com a ABNT NBR8800:2008.


Para a verificação do pilar de acordo com a ABNT NBR8800:1986 utiliza-se o coeficiente de flambagem (K) com o valor de $K = 2,1$ ao passo que para ABNT NBR8800:2008 toma-se sempre $K = 1,0$.

| | | | | | | | |
|--|---|--|-----------------|--|-------------|------|----------|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | | Página | | 143 | | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | | Revisão | | A | | |
| | | | Controle | | Responsável | Data | |
| | Referência | | A.1 - Caso 1 | | Preparado | CAP | 08/02/11 |
| | | | Pilar Engastado | | Verificado | CAP | |
| | | | | | Aprovado | | |

Na Tabela A.1.6 apresentam-se os resultados da verificação da capacidade última do pilar.

Tabela A.1.5 – Verificação da capacidade última do pilar

| Barra | Combinação | Tipo de análise | Esforços solicitantes | | Esforços Resistentes | | Interação |
|-------|------------|-----------------|-----------------------|-------------------|----------------------|-------------------|-----------|
| | | | N_{Sd} (kN) | $M_{x,Sd}$ (kN.m) | N_{Rd} (kN) | $M_{x,Rd}$ (kN.m) | |
| 1 | 1 | APO - SAP2000 | 1400,00 | 0,00 | 1400,98 | 224,47 | 1,000 |
| | | ASO - SAP2000 | 1400,00 | 44,62 | 2249,78 | 230,62 | 0,794 |
| | | ASO - MAES | 1400,00 | 48,05 | 2249,78 | 230,62 | 0,807 |

| | | | | | |
|--|--|------------|--------------|------------|-------------|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | Página | 144 | | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | | |
| | | Referência | A.2 - Caso 2 | Controlado | Responsável |
| | Pórtico Rígido de Dois Pavimentos | Preparado | CAP | Data | |
| | | Verificado | CAP | 08/02/11 | |
| | | Aprovado | | | |

A.2 Caso 2 - Pórtico Rígido de Dois Pavimentos

O presente estudo é adaptado de um exemplo de aplicação apresentado por Simões (2007).

Verificar a capacidade última dos pilares do pórtico plano de aço indicado na Figura A.2.1.

Determinar os esforços de cálculo na estrutura de acordo com uma análise de primeira ordem (APO) e com uma análise de segunda ordem (ASO). Para a ASO, desenvolver a análise com auxílio de um programa computacional e por meio do Método de Amplificação dos Esforços Solicitantes (MAES), apresentado no Anexo D da ABNT NBR8800:2008.

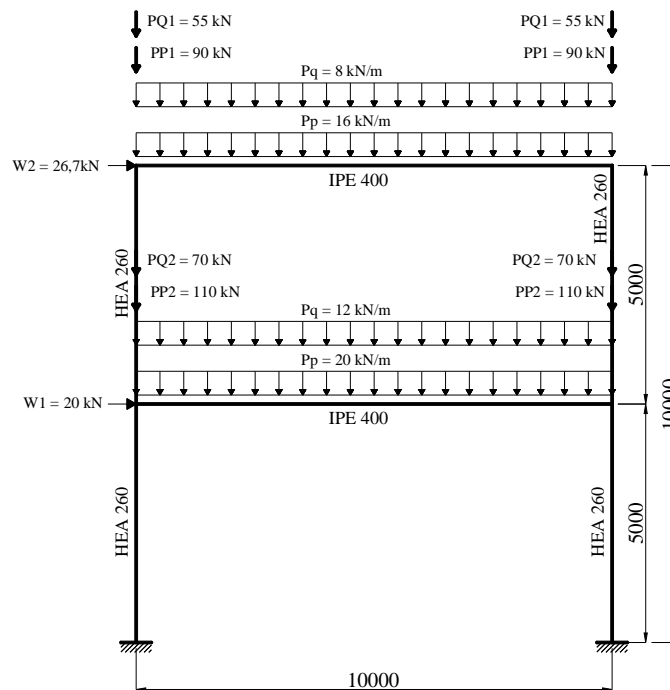



Figura A.2.1 - Pórtico rígido de dois pavimentos
(dimensões em milímetros e ações com valores característicos)

| | | | | | |
|--|--|------------|------------|-------------|------|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | Página | 145 | | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | | |
| | | Referência | Controlado | Responsável | Data |
| | A.2 - Caso 2 Pórtico Rígido de Dois Pavimentos | Preparado | CAP | 08/02/11 | |
| | | Verificado | CAP | | |
| | | Aprovado | | | |

Dados:

- Aço ASTM A572 Grau 50;
- Módulo de elasticidade - $E = 200.000 \text{ MPa}$;
- Perfis laminados de abas paralelas.

A.2.1 Modelo estrutural

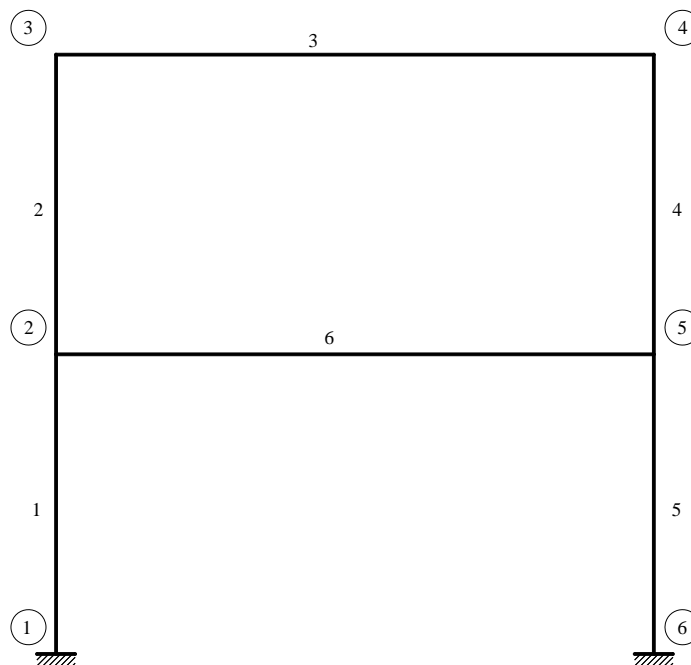



Figura A.2.2 - Modelo estrutural do pórtico plano

A.2.2 Ações atuantes

- PP – Peso próprio da estrutura
- PQ – Sobrecarga
- Fn – Força horizontal equivalente (Força nocional)
- W – Vento

| | | | | | |
|--|--|------------|------------|-------------|------|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | Página | 146 | | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | | |
| | | Referência | Controlado | Responsável | Data |
| | A.2 - Caso 2 Pórtico Rígido de Dois Pavimentos | Preparado | CAP | 08/02/11 | |
| | | Verificado | CAP | | |
| | | Aprovado | | | |

Na Figura A.2.1, as letras minúsculas se referem a ações distribuídas e as letras maiúsculas a ações concentradas.

A força horizontal equivalente (F_n), que representa as imperfeições geométricas, deve ser calculada para cada pavimento da estrutura, conforme a seguinte expressão:

$$F_n = \frac{0,3}{100} \sum N_{sd} \quad (\text{A.2.1})$$

onde:

$\sum N_{sd}$ é o somatório das cargas gravitacionais de cálculo atuantes no pavimento.

Como as forças gravitacionais nos dois pavimentos são diferentes, tem-se:

-Nível 1:


$$F_{n1} = \frac{0,3}{100} ((20 * 1,4 + 12 * 1,5) * 10 + (110 * 2) * 1,4 + (70 * 2) * 1,5)$$

$$F_{n1} = 2,94 kN$$

-Nível 2:

$$F_{n2} = \frac{0,3}{100} ((16 * 1,4 + 8 * 1,5) * 10 + (90 * 2) * 1,4 + (55 * 2) * 1,5)$$

$$F_{n2} = 2,28 kN$$

| | | | | |
|--|--|----------|-------------|----------|
|  UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | Título | | Página | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | | 147 | |
| | | | Revisão | |
| | Referência A.2 - Caso 2 Pórtico Rígido de Dois Pavimentos | | A | |
| | | | Responsável | Data |
| | | | CAP | 08/02/11 |
| CAP | | | | |
| | | Aprovado | | |

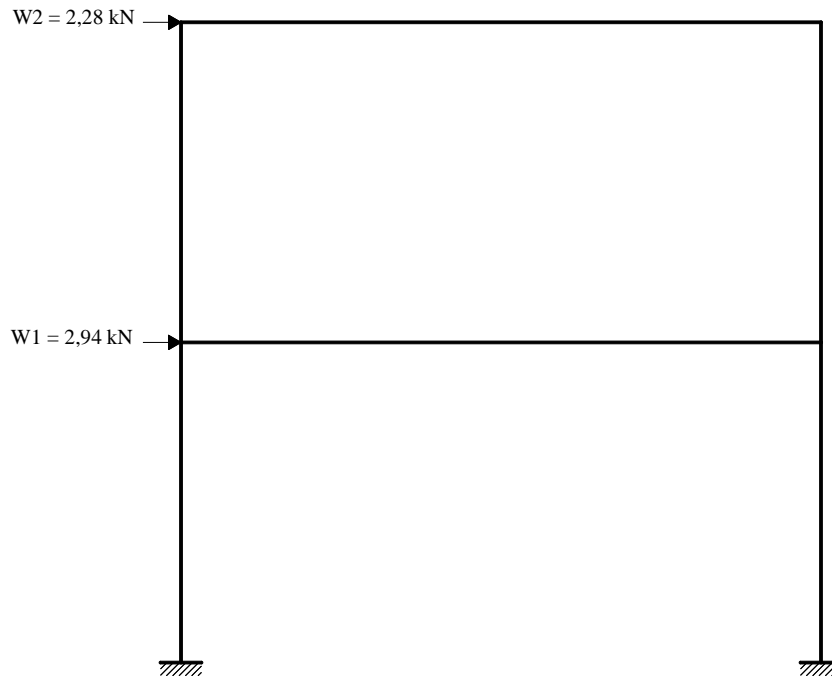


Figura A.2.3 - Força horizontal equivalente em cada andar (kN)

A.2.3 Combinações de ações

Combinações últimas normais:


$$F_d = \sum_{i=1}^m (\gamma_{gi} F_{Gi,k}) + \gamma_{q1} F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n (\gamma_{qj} \psi_{0j} F_{Qj,k}) \quad (\text{A.2.2})$$

Combinação 01: 1,4 PP + Fn + 1,5 PQ

Combinação 02: 1,4 PP + 1,5 PQ + 1,4 * 0,6 W

Combinação 03: 1,4 PP + 1,4 W + 1,5* 0,5 PQ

Obs: As imperfeições geométricas não foram consideradas em conjunto com forças horizontais de mesmo sentido e de maior magnitude.

| | | | | |
|--|--|------------|-------------|----------|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | Página | 148 | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | |
| | | Controle | Responsável | Data |
| | Referência A.2 - Caso 2 Pórtico Rígido de Dois Pavimentos | Preparado | CAP | 08/02/11 |
| | | Verificado | CAP | |
| | | Aprovado | | |

A.2.4 Classificação da estrutura quanto à sensibilidade a deslocamentos laterais

Segundo o item 4.9.4.5 da NBR 8800:2008 (ABNT, 2008) a classificação da estrutura deve ser obtida para as combinações últimas de ações em que os deslocamentos horizontais provenientes das forças horizontais tenham os mesmos sentidos dos deslocamentos horizontais decorrentes das cargas gravitacionais.


a) Classificação de acordo com os deslocamentos relativos

Na tabela A.2.1 apresenta-se a classificação da estrutura de acordo com os deslocamentos relativos.

Tabela A.2.1 - Classificação da estrutura de acordo com os deslocamentos relativos

| Combinação | Nó | Deslocamento (mm) | | |
|------------|----|-------------------|---------|-----------|
| | | u_1 | u_2 | u_2/u_1 |
| 1 | 2 | 1,8497 | 2,1647 | 1,17 |
| | 3 | 3,7115 | 4,234 | 1,14 |
| 2 | 2 | 16,2315 | 18,9478 | 1,17 |
| | 3 | 31,5482 | 36,0856 | 1,14 |
| 3 | 2 | 27,1419 | 30,6296 | 1,13 |
| | 3 | 52,2611 | 58,1945 | 1,11 |

De acordo com as relações entre deslocamentos (u_2/u_1) apresentados na Tabela A.2.1, a estrutura é classificada como de média deslocabilidade.

| | | | | |
|--|--|------------|-------------|----------|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | Página | 149 | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | |
| | | Referência | Responsável | Data |
| | A.2 - Caso 2 Pórtico Rígido de Dois Pavimentos | Preparado | CAP | 08/02/11 |
| | | Verificado | CAP | |
| | | Aprovado | | |

b) Classificação de acordo com o coeficiente B_2

O coeficiente B_2 prescrito no Anexo D da ABNT NBR8800:2008 é dado por:

$$B_2 = \frac{1}{1 - \frac{1}{R_s} \frac{\Delta_h}{H} \frac{\sum N_{SD}}{\sum H_{SD}}} \quad (\text{A.2.3})$$

Onde :

$\sum N_{SD}$ é a carga gravitacional total que atua no andar considerado;

R_s é um coeficiente de ajuste, igual a 0,85 nas estruturas onde as subestruturas de contraventamento são todas pórticos rígidos e igual a 1 para as outras estruturas;


Δ_h é o deslocamento horizontal relativo entre os níveis superior e inferior (deslocamento interpavimento em uma análise de primeira ordem);

$\sum H_{SD}$ é a força cortante no andar, produzida pelas forças horizontais de cálculo atuantes.

Na Tabela A.2.2 apresentam-se os valores do coeficiente B_2 em cada nível, para classificação da estrutura quanto à sensibilidade a deslocamentos laterais

Tabela A.2.2 - Valores do coeficiente B_2 para classificação da estrutura

| Combinação | Nível | R_s | Δh (mm) | H (mm) | N_{Sd} (kN) | H_{Sd} (kN) | B_2 |
|------------|-------|-------|-----------------|----------|---------------|---------------|-------|
| 01 | 1 | 0,85 | 1,8497 | 5000 | 700 | 5,22 | 1,06 |
| | 2 | 0,85 | 1,8618 | 5000 | 550 | 2,28 | 1,12 |
| 02 | 1 | 0,85 | 16,2315 | 5000 | 700 | 39,22 | 1,07 |
| | 2 | 0,85 | 15,3167 | 5000 | 550 | 22,43 | 1,10 |
| 03 | 1 | 0,85 | 27,1419 | 5000 | 700 | 59,04 | 1,08 |
| | 2 | 0,85 | 25,1192 | 5000 | 550 | 37,38 | 1,10 |

| | | | | | |
|--|------------|---|-------------|----------|----------|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | Página | 150 | | |
| | | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | |
| | Referência | A.2 - Caso 2 Pórtico Rígido de Dois Pavimentos | Responsável | Data | |
| | | | Preparado | CAP | 08/02/11 |
| | | | Verificado | CAP | |
| | | | Aprovado | | |

Os valores do coeficiente B_2 apresentados na Tabela A.2.2 foram calculados sem levar em consideração as imperfeições de material. Em função desses valores a estrutura é classificada como de média deslocabilidade.

c) Classificação da estrutura

De acordo com as duas formas distintas de classificação cujos resultados são apresentados nas Tabelas A.2.1 e A.2.2, a estrutura é classificada como de média deslocabilidade.

A.2.5 Análise de primeira ordem (APO)

A seguir apresentam-se os diagramas de esforços solicitantes para uma análise de primeira ordem (APO). Esta análise foi realizada com auxílio do programa SAP2000.

a) Diagramas de Esforço Normal (DEN)

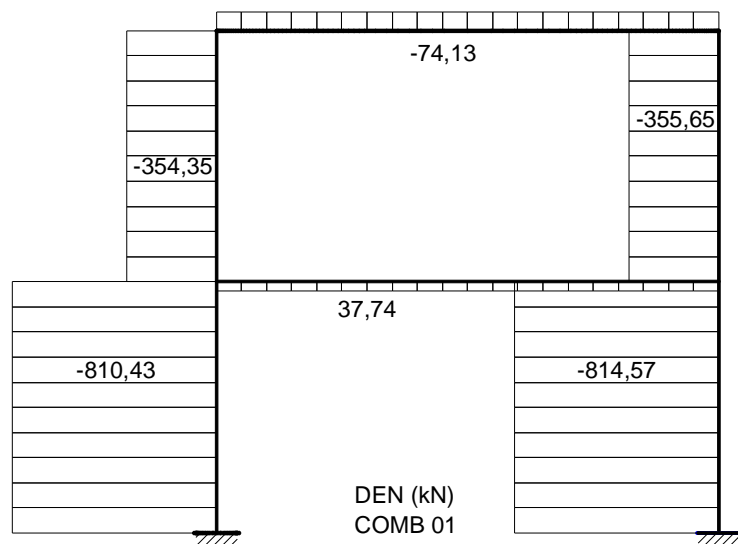



Figura A.2.4 - Diagrama de Esforço Normal (DEN) - Combinação 01

| | | | | | |
|--|--|------------|-------------|----------|--|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | Página | 151 | | |
| | Apêndice A - Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | | |
| | | Referência | Responsável | Data | |
| | A.2 - Caso 2 Pórtico Rígido de Dois Pavimentos | Preparado | CAP | 08/02/11 | |
| | | Verificado | CAP | | |
| | | Aprovado | | | |

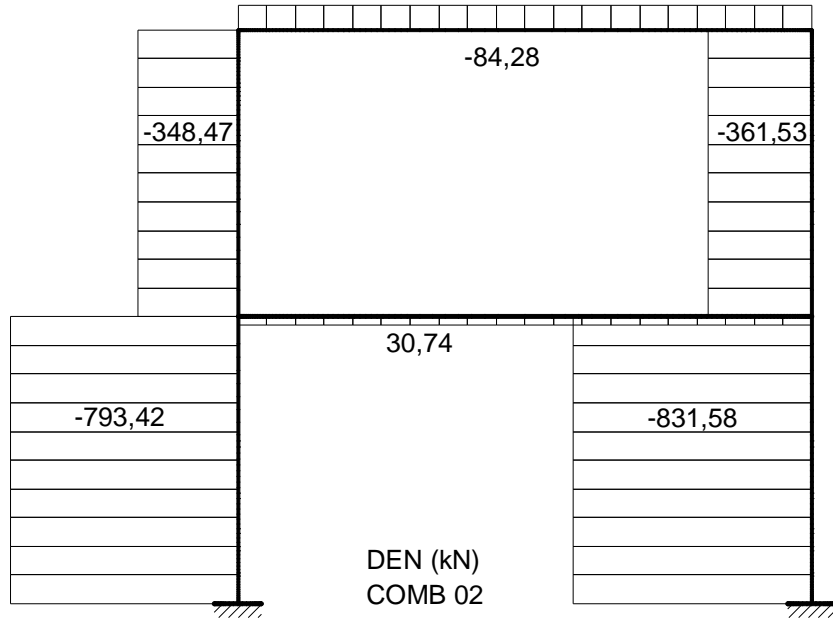


Figura A.2.5 - Diagrama de Esforço Normal (DEN) - Combinação 02

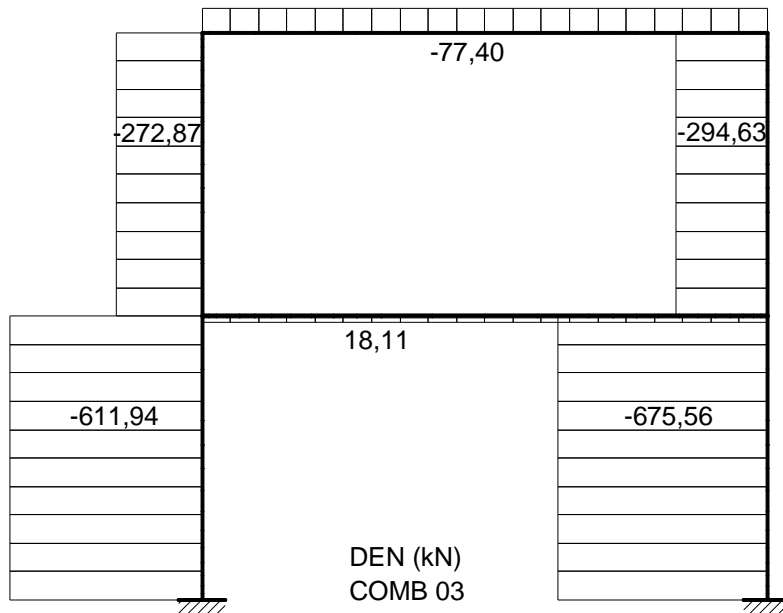



Figura A.2.6 - Diagrama de Esforço Normal (DEN) - Combinação 03

| | | | | | |
|--|--|------------|--------------|-------------|------|
|  UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | Título | Página | 152 | | |
| | Apêndice A - Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | | |
| | | Referência | A.2 - Caso 2 | Responsável | Data |
| | Pórtico Rígido de Dois Pavimentos | Preparado | CAP | 08/02/11 | |
| | | Verificado | CAP | | |
| Aprovado | | | | | |

b) Diagramas de Esforço Cortante (DEC)

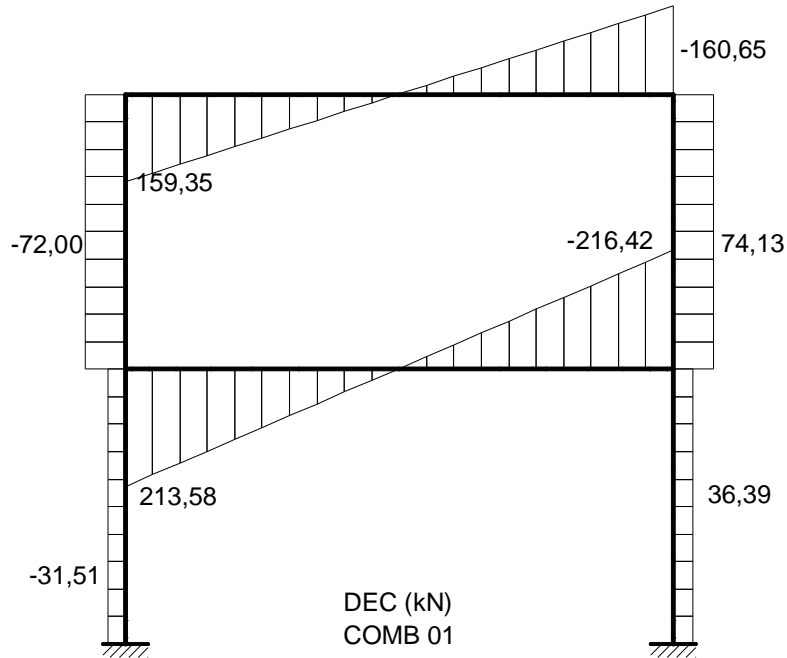


Figura A.2.7 - Diagrama de Esforço Cortante (DEC) - Combinação 01

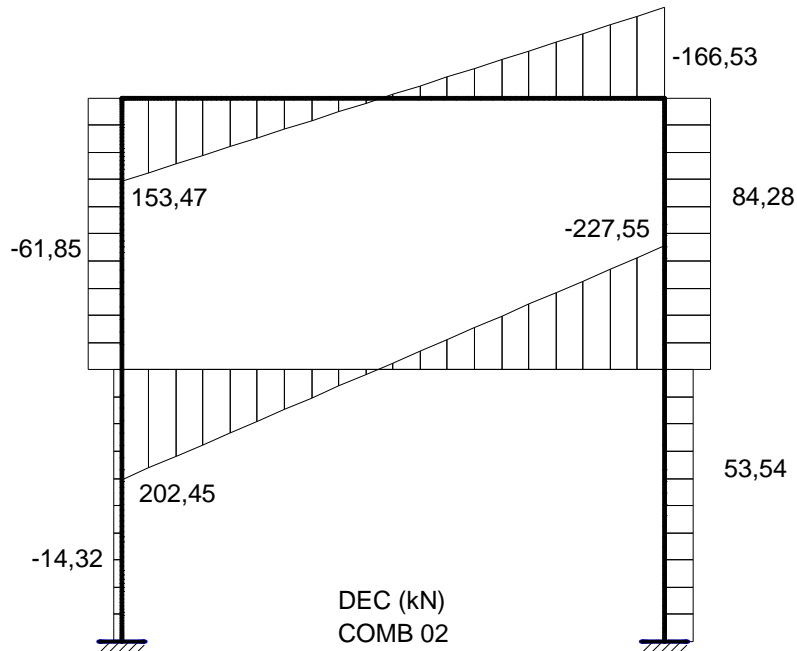



Figura A.2.8 - Diagrama de Esforço Cortante (DEC) - Combinação 02

| | | | | | |
|--|--|------------|--------------|-------------|------|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | Página | 153 | | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | | |
| | | Referência | A.2 - Caso 2 | Responsável | Data |
| | Pórtico Rígido de Dois Pavimentos | Preparado | CAP | 08/02/11 | |
| | | Verificado | CAP | | |
| Aprovado | | | | | |

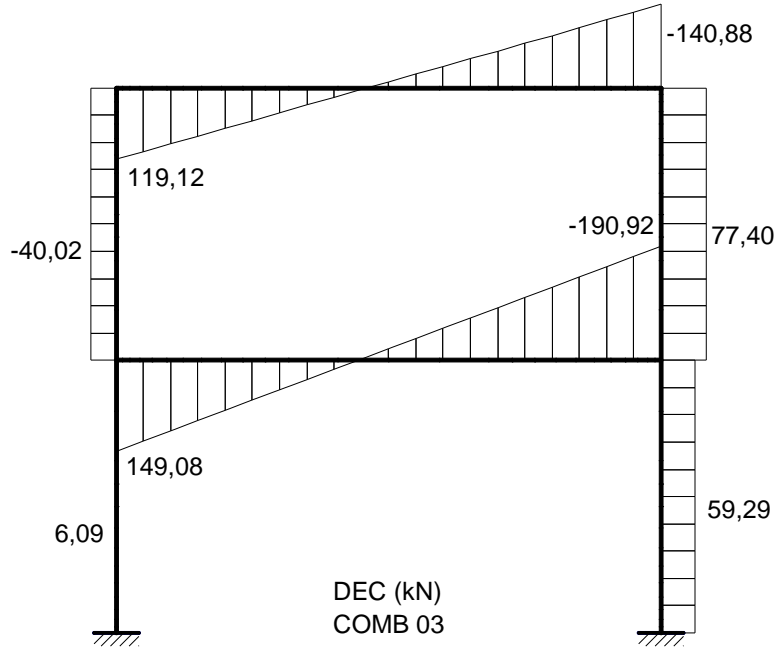


Figura A.2.9 –Diagrama de Esforço Cortante (DEC) - Combinação 03

c) Diagramas de momento Fletor (DMF)

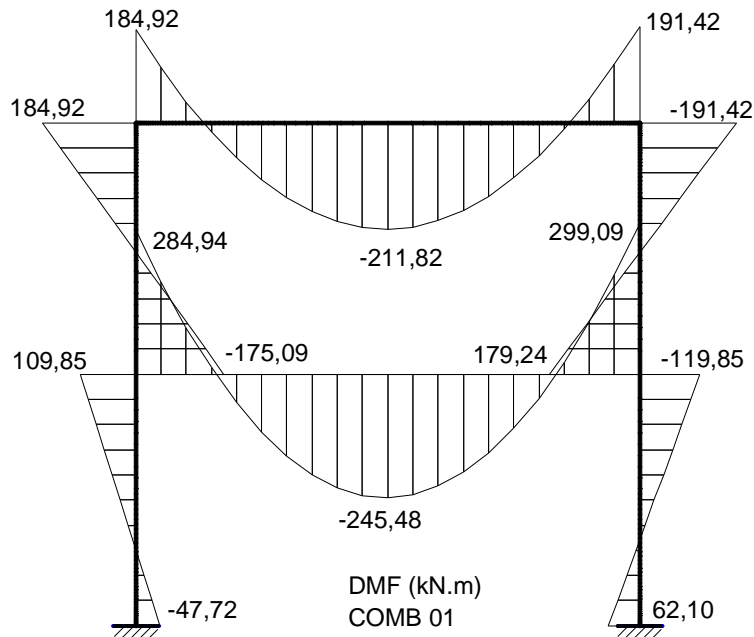



Figura A.2.10 –Diagrama de Momento Fletor (DMF) - Combinação 01

| | | | | | |
|--|--|------------|--------------|-------------|------|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | Página | 154 | | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | | |
| | | Referência | A.2 - Caso 2 | Responsável | Data |
| | Pórtico Rígido de Dois Pavimentos | Preparado | CAP | 08/02/11 | |
| | | Verificado | CAP | | |
| | | Aprovado | | | |

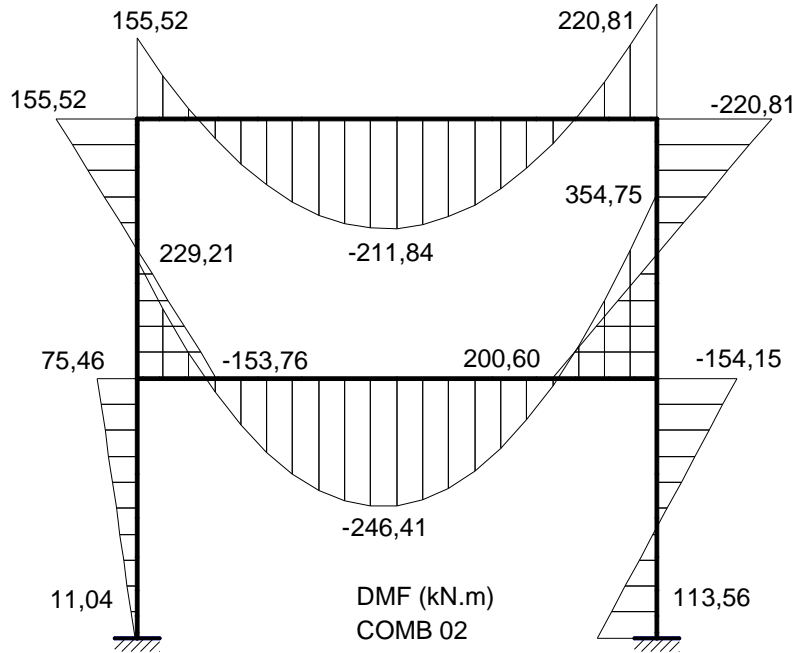


Figura A.2.11 –Diagrama de Momento Fletor (DMF) - Combinação 02

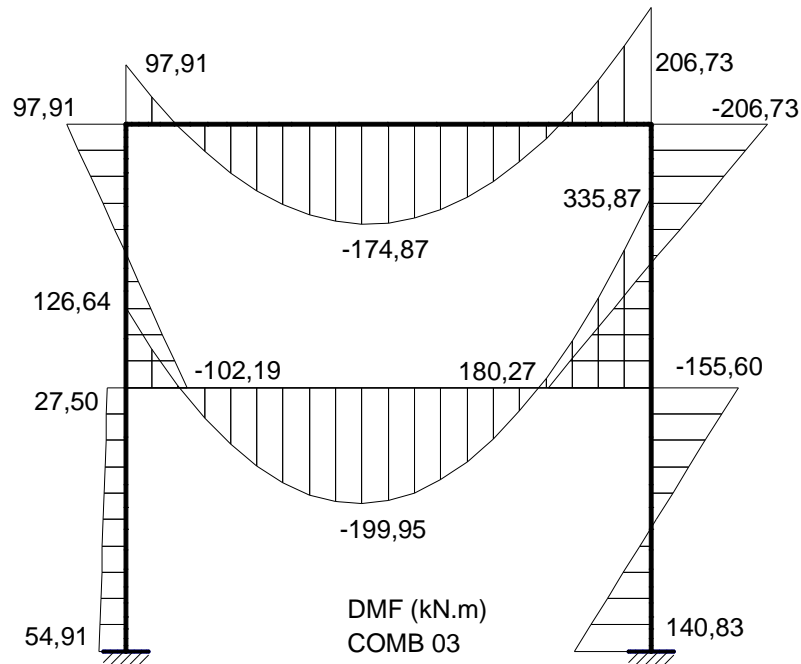



Figura A.2.12 –Diagrama de Momento Fletor (DMF) - Combinação 03

| | | | | | |
|--|--|------------|-------------|----------|--|
|  UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | Título | Página | 155 | | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | | |
| | | Referência | Responsável | Data | |
| | A.2 - Caso 2 Pórtico Rígido de Dois Pavimentos | Preparado | CAP | 08/02/11 | |
| | | Verificado | CAP | | |
| Aprovado | | | | | |

A.2.6 Análise de segunda ordem (ASO)

A.2.6.1 Análise de segunda ordem de acordo com o MAES

Na Figura A.4.14 apresentam-se as estruturas “nt” e “lt” de acordo com o Anexo D da ABNT NBR8800:2008.

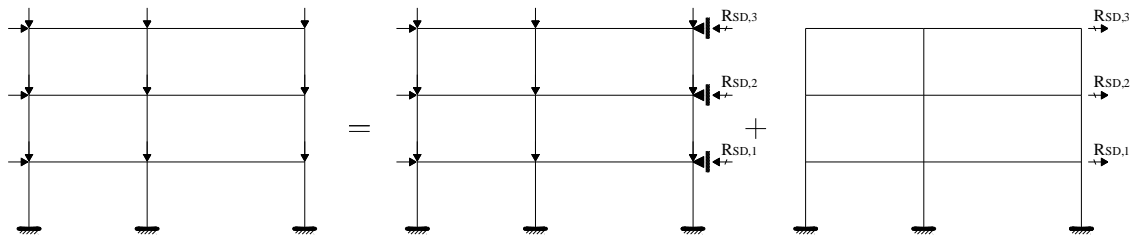


Figura A.2.13 – Modelo para análise - estrutura “nt” e “lt”

As estruturas “nt” e “lt” são analisadas em análise de primeira ordem. A seguir são apresentados os diagramas de esforços solicitantes para os dois casos, que foram modelados no SAP2000.

A.2.6.1.1 Esforços solicitantes na estrutura “nt”

a) Diagramas de Esforço Normal (DEN)

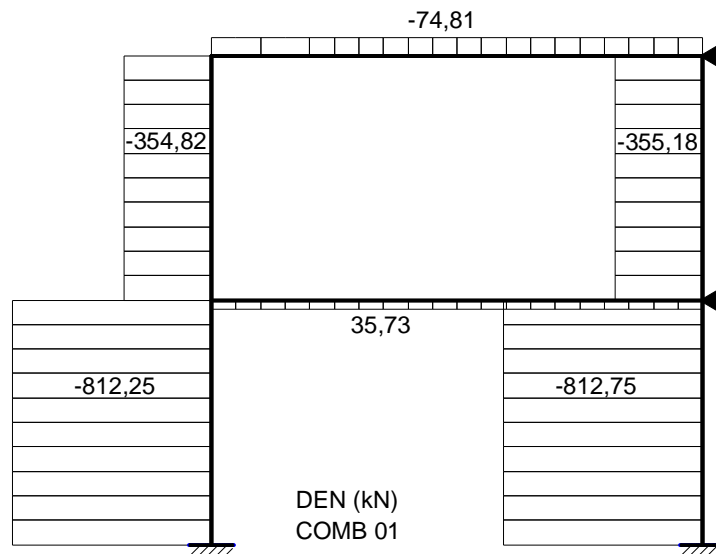



Figura A.2.14 - Diagrama de Esforço Normal (DEN) - “nt” - Combinação 01

| | | | | | |
|--|--|------------|--------------|-------------|------|
|  UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | Título | Página | 156 | | |
| | Apêndice A - Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | | |
| | | Referência | A.2 - Caso 2 | Responsável | Data |
| | Pórtico Rígido de Dois Pavimentos | Preparado | CAP | 08/02/11 | |
| | | Verificado | CAP | | |
| | Aprovado | | | | |

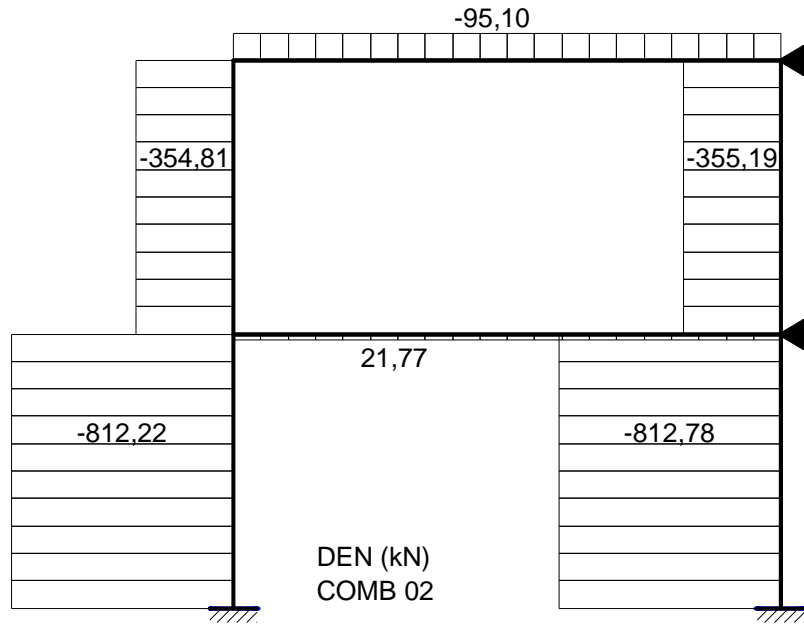


Figura A.2.15 - Diagrama de Esforço Normal (DEN) - “nt” - Combinação 02

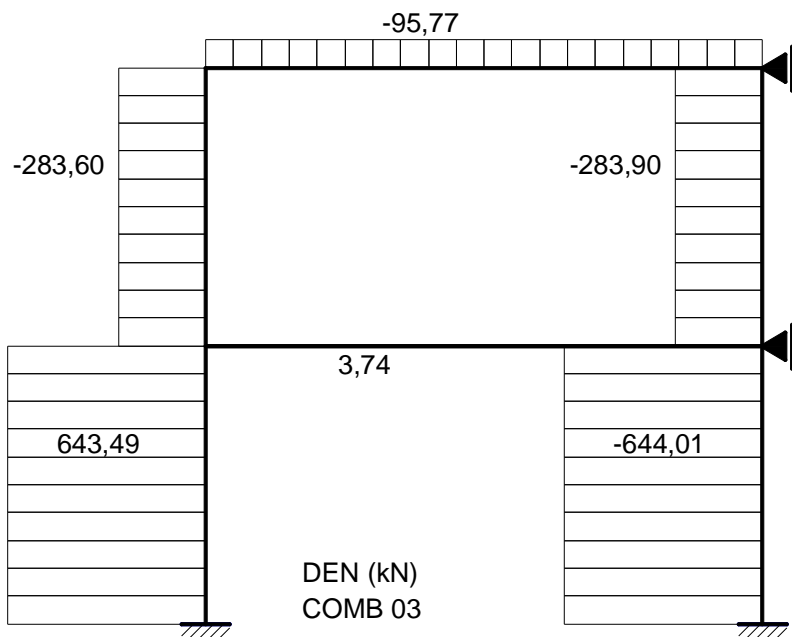



Figura A.2.16 - Diagrama de Esforço Normal (DEN) - “nt” - Combinação 03

| | | | | | |
|--|--|------------|-------------|----------|--|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | Página | 157 | | |
| | Apêndice A - Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | | |
| | | Referência | Responsável | Data | |
| | A.2 - Caso 2 Pórtico Rígido de Dois Pavimentos | Preparado | CAP | 08/02/11 | |
| | | Verificado | CAP | | |
| Aprovado | | | | | |

b) Diagramas de Esforço Cortante (DEC)

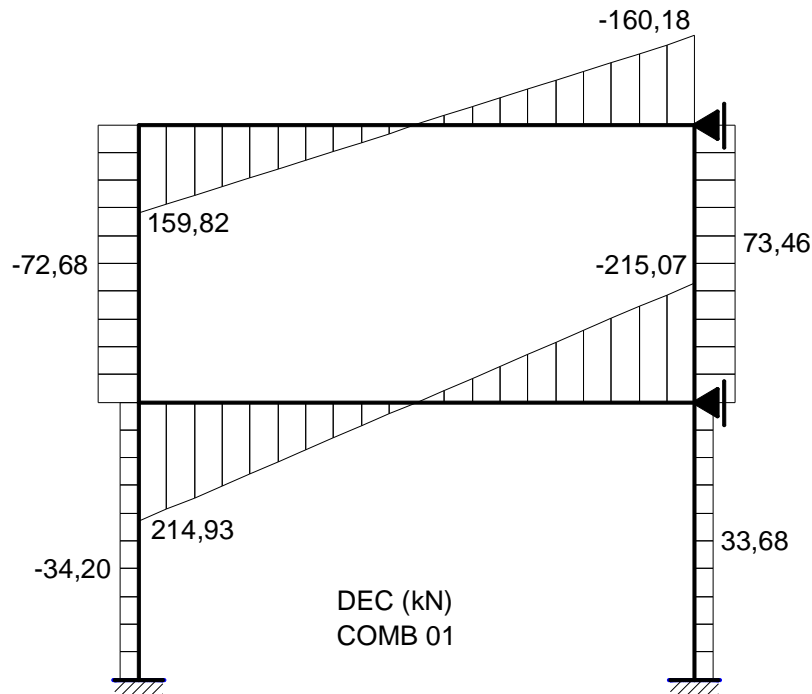


Figura A.2.17 - Diagrama de Esforço Cortante (DEC) - “nt” - Combinação 01

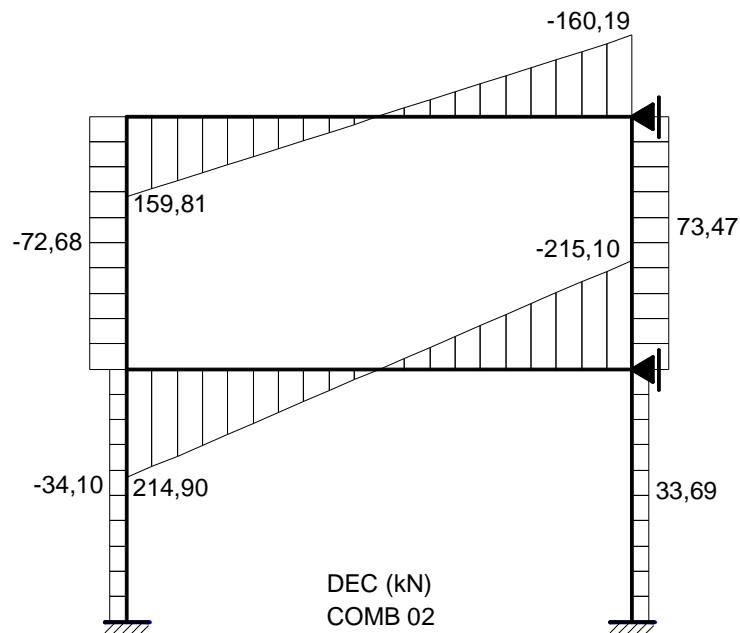



Figura A.2.18 - Diagrama de Esforço Cortante (DEC) - “nt” - Combinação 02

| | | | | | |
|--|--|------------|--------------|-------------|------|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | Página | 158 | | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | | |
| | | Referência | A.2 - Caso 2 | Responsável | Data |
| | Pórtico Rígido de Dois Pavimentos | Preparado | CAP | 08/02/11 | |
| | | Verificado | CAP | | |
| | Aprovado | | | | |

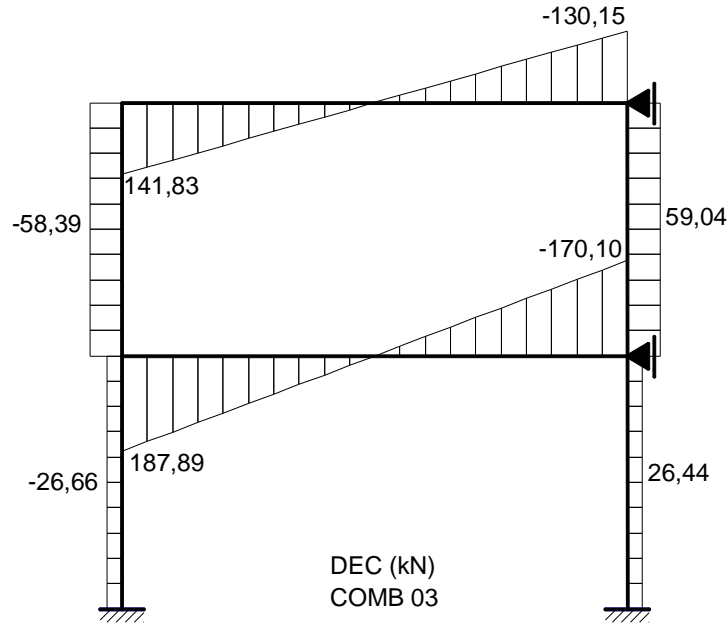


Figura A.2.19 - Diagrama de Esforço Cortante (DEC) - “nt” - Combinação 03

c) Diagramas de Momento Fletor (DMF)

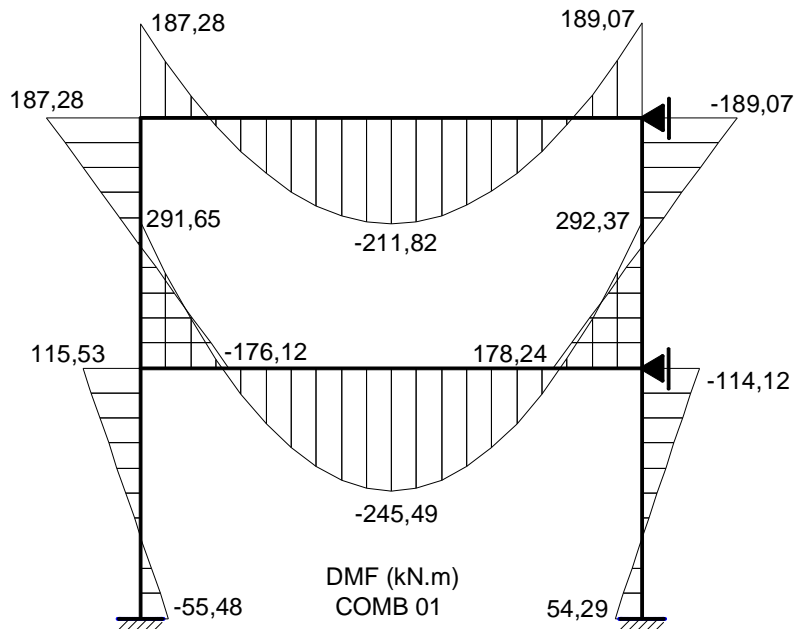



Figura A.2.20 - Diagrama de Momento Fletor (DMF) - “nt” - Combinação 01

| | | | | | |
|--|--|------------|--------------|-------------|------|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | Página | 159 | | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | | |
| | | Referência | A.2 - Caso 2 | Responsável | Data |
| | Pórtico Rígido de Dois Pavimentos | Preparado | CAP | 08/02/11 | |
| | | Verificado | CAP | | |
| | Aprovado | | | | |

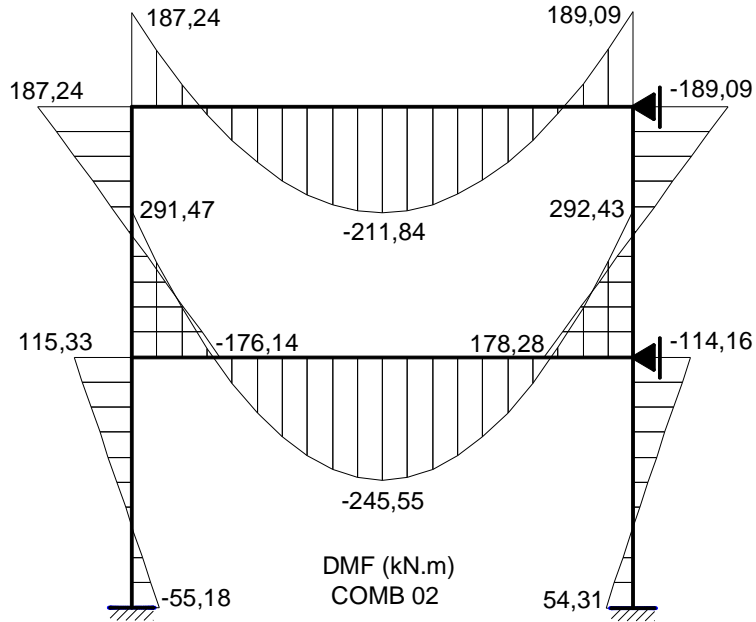


Figura A.2.21 - Diagrama de Momento Fletor (DMF) - “nt” - Combinação 02

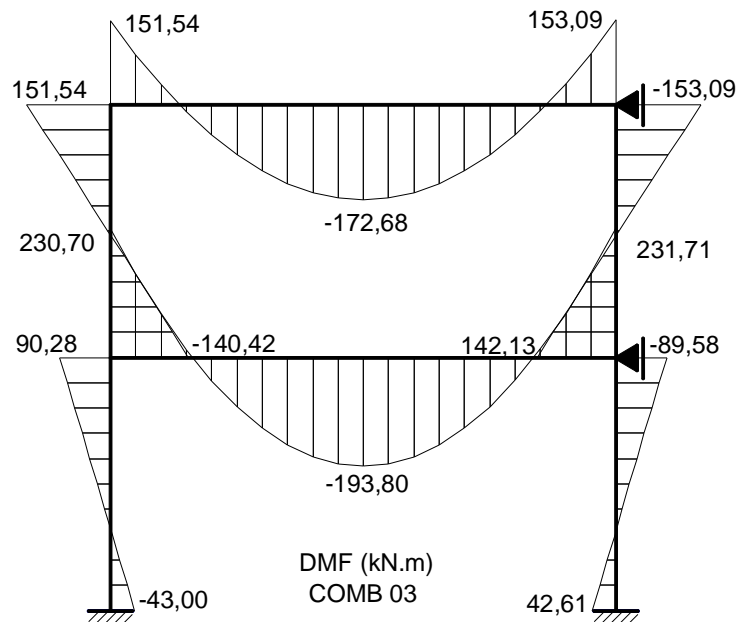



Figura A.2.22 - Diagrama de Momento Fletor (DMF) - “nt” - Combinação 03

| | | | | |
|--|--|------------|-------------|----------|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | Página | 160 | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | |
| | | Referência | Responsável | Data |
| | A.2 - Caso 2 Pórtico Rígido de Dois Pavimentos | Preparado | CAP | 08/02/11 |
| | | Verificado | CAP | |
| | | Aprovado | | |

A.2.6.1.2 Esforços solicitantes na estrutura “It”

Nos nós 4 e 5 da estrutura “It” aplicam-se as reações dos apoios laterais da estrutura “nt” de acordo com a Tabela A.2.3.

Tabela A.2.3 - Reações nodais (R_{SD}) (kN)

| Nó | R_{Sd1} | R_{Sd2} | R_{Sd3} |
|----|-----------|-----------|-----------|
| 4 | 1,35 | 21,63 | 36,67 |
| 5 | 4,05 | 18,01 | 28,97 |

a) Diagramas de Esforço Normal (DEN)

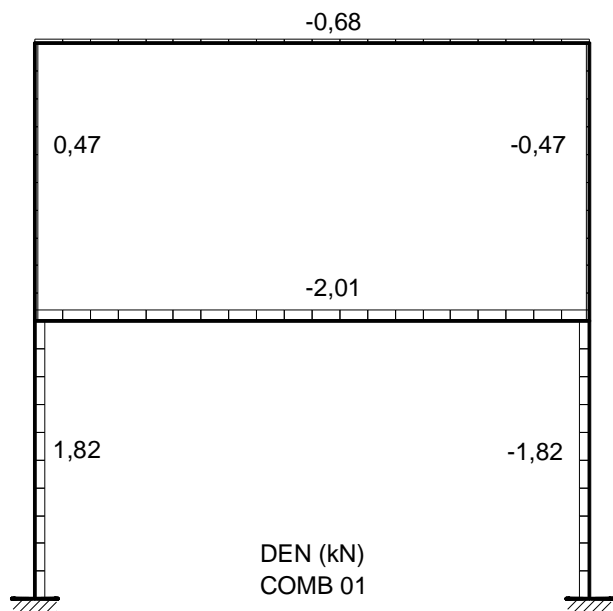



Figura A.2.23 - Diagrama de Esforço Normal (DEN) - “It” - Combinação 01

| | | | | | |
|--|--|------------|--------------|-------------|------|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | Página | 161 | | |
| | Apêndice A - Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | | |
| | | Referência | A.2 - Caso 2 | Responsável | Data |
| | Pórtico Rígido de Dois Pavimentos | Preparado | CAP | 08/02/11 | |
| | | Verificado | CAP | | |
| | | Aprovado | | | |

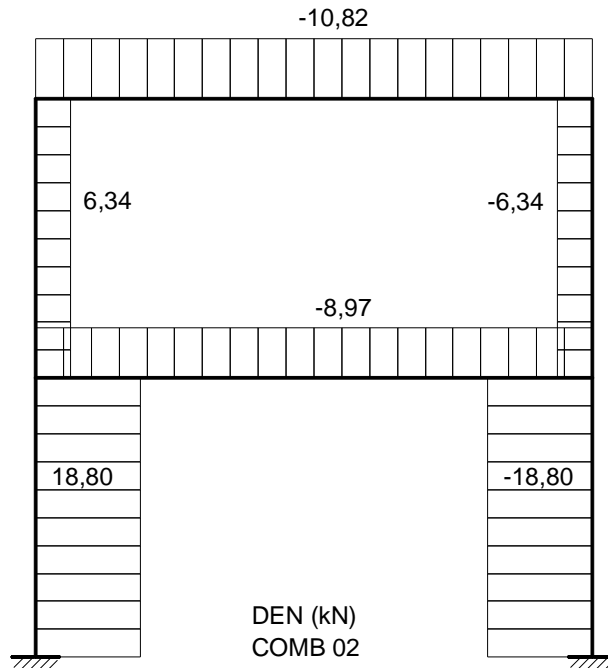


Figura A.2.24 - Diagrama de Esforço Normal (DEN) - “It” - Combinação 02

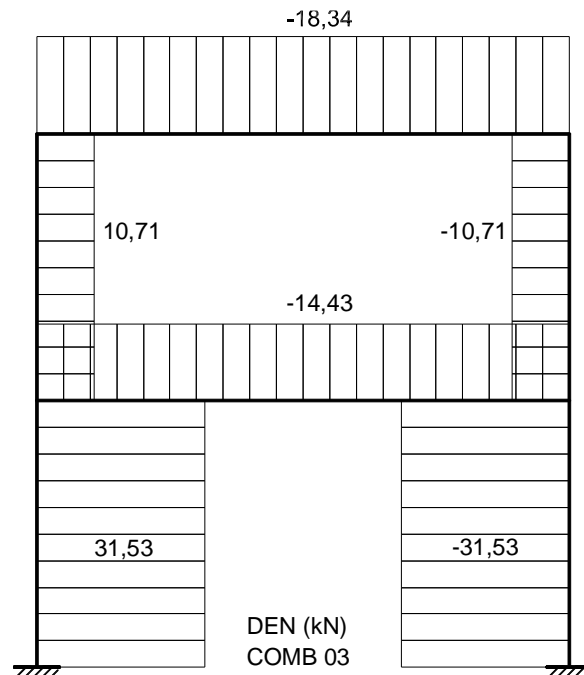



Figura A.2.25 - Diagrama de Esforço Normal (DEN) - “It” - Combinação 03

| | | | | | |
|--|--|------------|--------------|------------|-------------|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | Página | | 162 | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | | |
| | | Referência | A.2 - Caso 2 | Controlado | Responsável |
| | Pórtico Rígido de Dois Pavimentos | Preparado | CAP | 08/02/11 | |
| | | Verificado | CAP | | |
| Aprovado | | | | | |

b) Diagramas de Esforço Cortante (DEC)

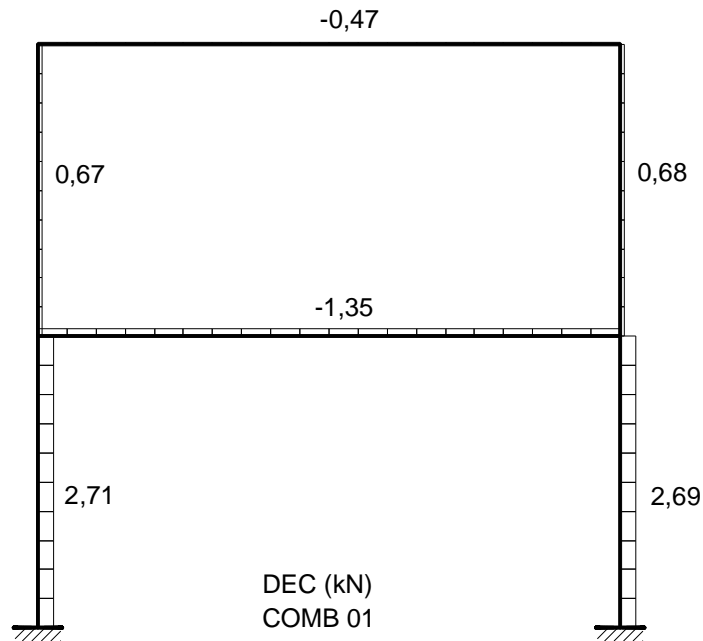


Figura A.2.26 - Diagrama de Esforço Cortante (DEC) - “It” - Combinação 01

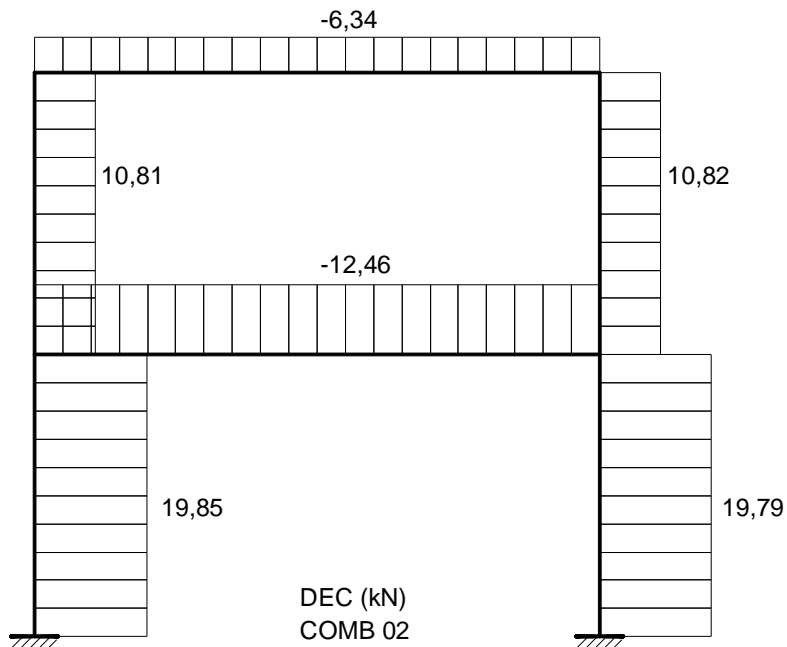



Figura A.2.27 - Diagrama de Esforço Cortante (DEC) - “It” - Combinação 02

| | | | | | |
|--|--|------------|--------------|-------------|------|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | Página | 163 | | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | | |
| | | Referência | A.2 - Caso 2 | Responsável | Data |
| | Pórtico Rígido de Dois Pavimentos | Preparado | CAP | 08/02/11 | |
| | | Verificado | CAP | | |
| | Aprovado | | | | |

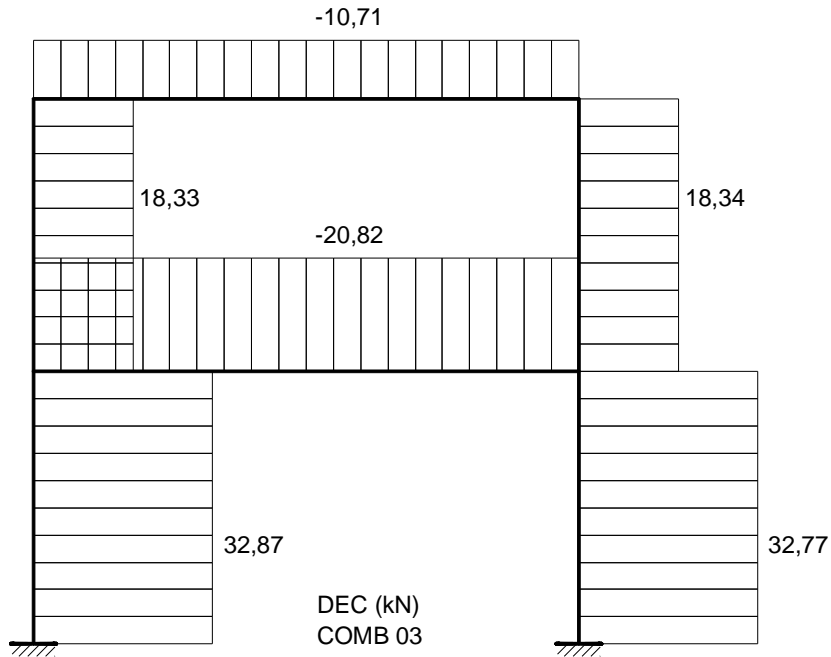
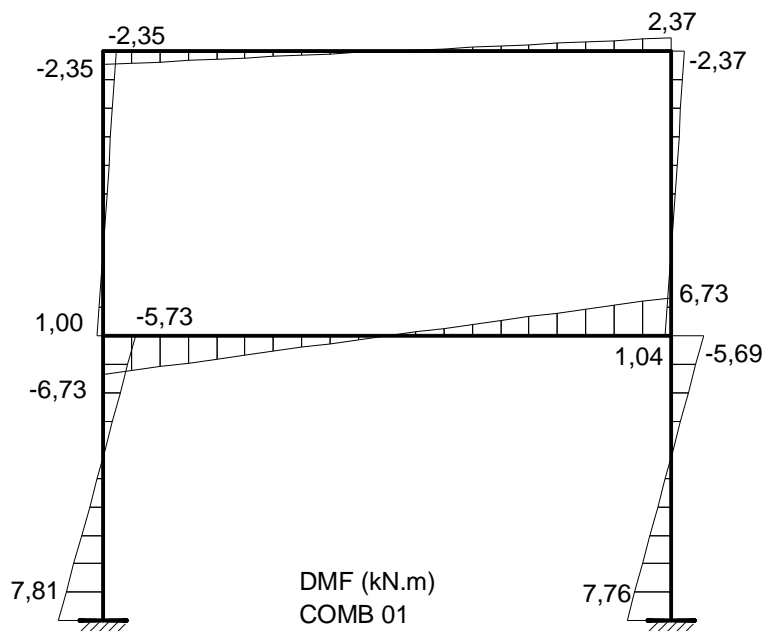



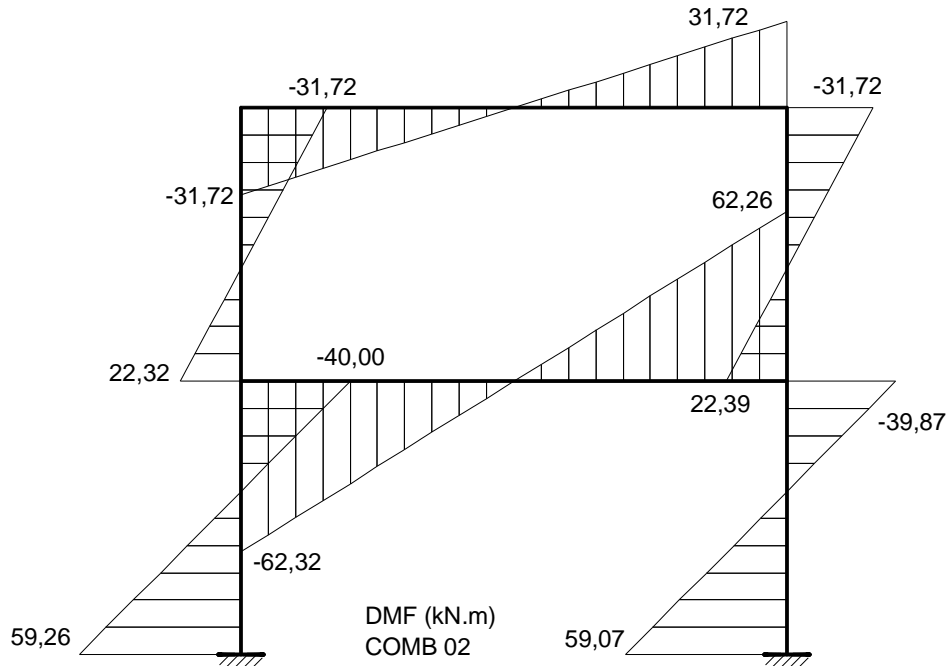
Figura A.2.28 - Diagrama de Esforço Cortante (DEC) - “It” - Combinação 03

c) Diagramas de Momento Fletor (DMF)

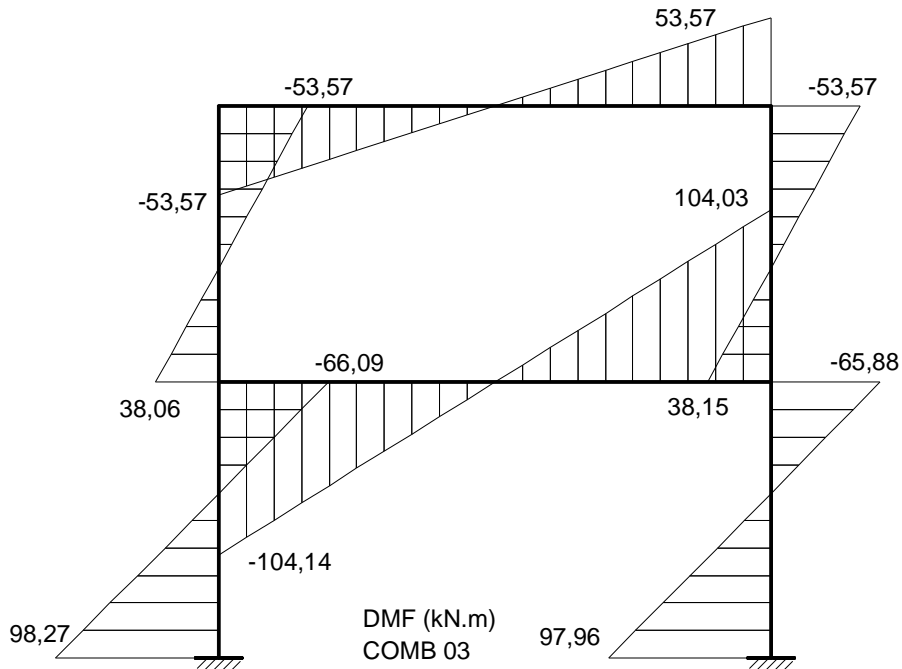


A.2.29 - Diagrama de Momento Fletor (DMF) - “It” - Combinação 01


| | | | | | |
|--|------------|--|------------|-------------|----------|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | Página | 164 | | |
| | | Apêndice A - Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | |
| | Referência | A.2 - Caso 2 | Controlado | Responsável | Data |
| | | Pórtico Rígido de Dois Pavimentos | Preparado | CAP | 08/02/11 |
| | | | Verificado | CAP | |
| | | Aprovado | | | |



A.2.30 - Diagrama de Momento Fletor (DMF) - "It" - Combinação 02



A.2.31 - Diagrama de Momento Fletor (DMF) - "It" - Combinação 03

| | | | | |
|--|--|------------|-------------|----------|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | Página | 165 | |
| | Apêndice A - Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | |
| | | Referência | Responsável | Data |
| | A.2 - Caso 2 Pórtico Rígido de Dois Pavimentos | Preparado | CAP | 08/02/11 |
| | | Verificado | CAP | |
| | | Aprovado | | |

A.2.6.1.3 Cálculo dos coeficientes B_1 e B_2

Nas Tabelas A.2.4, A.2.5 e A.2.6 mostram-se os valores dos coeficientes B_1 para cada barra da estrutura nas diferentes combinações de ações.

Tabela A.2.4 - Coeficiente B_1 - Combinação 01

| Barra | I_x (cm ⁴) | L_x (cm) | K_x | N_{ex} | N_{Ss1} | C_m | B_1 |
|-------|--------------------------|------------|-------|----------|-----------|--------|-------|
| 1 | 10450 | 500 | 1 | 8654,76 | 810,43 | 0,3065 | 1,00 |
| 2 | 10450 | 500 | 1 | 8654,76 | 354,34 | 0,4300 | 1,00 |
| 3 | 23130 | 1000 | 1 | 4789,10 | 74,13 | 1,0000 | 1,02 |
| 4 | 10450 | 500 | 1 | 8654,76 | 355,65 | 0,4245 | 1,00 |
| 5 | 10450 | 500 | 1 | 8654,76 | 814,56 | 0,3067 | 1,00 |
| 6 | 23130 | 1000 | 1 | 4789,10 | 37,74 | 1,0000 | 1,01 |


Tabela A.2.5 - Coeficiente B_1 - Combinação 02

| Barra | I_x (cm ⁴) | L_x (cm) | K_x | N_{ex} | N_{Sd1} | C_m | B_1 |
|-------|--------------------------|------------|-------|----------|-----------|--------|-------|
| 1 | 10450 | 500 | 1 | 8654,76 | 793,41 | 0,3300 | 1,00 |
| 2 | 10450 | 500 | 1 | 8654,76 | 348,47 | 0,3185 | 1,00 |
| 3 | 23130 | 1000 | 1 | 4789,10 | 84,28 | 1,0000 | 1,02 |
| 4 | 10450 | 500 | 1 | 8654,76 | 361,53 | 0,3177 | 1,00 |
| 5 | 10450 | 500 | 1 | 8654,76 | 831,58 | 0,3300 | 1,00 |
| 6 | 23130 | 1000 | 1 | 4789,10 | 30,745 | 1,0000 | 1,01 |

Tabela A.2.6 - Coeficiente B_1 - Combinação 03

| Barra | I_x (cm ⁴) | L_x (cm) | K_x | N_{ex} | N_{Sd1} | C_m | B_1 |
|-------|--------------------------|------------|-------|----------|-----------|--------|-------|
| 1 | 10450 | 500 | 1 | 8654,76 | 611,95 | 0,3310 | 1,00 |
| 2 | 10450 | 500 | 1 | 8654,76 | 272,88 | 0,3159 | 1,00 |
| 3 | 23130 | 1000 | 1 | 4789,10 | 77,43 | 1,0000 | 1,02 |
| 4 | 10450 | 500 | 1 | 8654,76 | 294,61 | 0,3151 | 1,00 |
| 5 | 10450 | 500 | 1 | 8654,76 | 675,54 | 0,3310 | 1,00 |
| 6 | 23130 | 1000 | 1 | 4789,10 | 18,17 | 1,0000 | 1,00 |

Como a estrutura foi classificada como de média deslocabilidade se faz necessário um novo cálculo dos coeficientes B_2 para cada nível. Na Tabela A.2.7 apresentam-se os

| | | | | |
|--|--|------------|-------------|----------|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | Página | 166 | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | |
| | | Referência | Responsável | Data |
| | A.2 - Caso 2 Pórtico Rígido de Dois Pavimentos | Preparado | CAP | 08/02/11 |
| | | Verificado | CAP | |
| | | Aprovado | | |

valores do coeficiente B_2 em cada nível, calculados considerando a influência das imperfeições de material.

Tabela A.2.7 - Valores do coeficiente B_2 para análise

| Combinação | Nível | R_s | Δh (mm) | H(mm) | N_{sd} | H_{sd} | B_2 |
|------------|-------|-------|-----------------|-------|----------|----------|-------|
| 01 | 1 | 0,85 | 2,3121 | 5000 | 700 | 5,22 | 1,19 |
| | 2 | 0,85 | 2,3272 | 5000 | 550 | 2,28 | 1,07 |
| 02 | 1 | 0,85 | 20,2893 | 5000 | 700 | 39,22 | 1,18 |
| | 2 | 0,85 | 19,0334 | 5000 | 550 | 22,43 | 1,07 |
| 03 | 1 | 0,85 | 33,9273 | 5000 | 700 | 59,04 | 1,13 |
| | 2 | 0,85 | 31,3991 | 5000 | 550 | 37,38 | 1,05 |

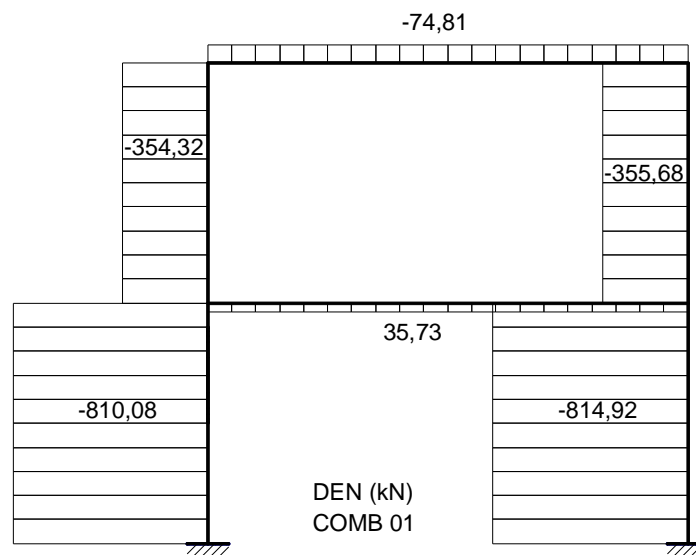
A.2.6.1.4 Esforços solicitantes

De acordo com o método da amplificação dos esforços solicitantes (MAES) em cada andar o momento fletor (M_{sd}) e a força axial (N_{sd}) solicitantes de cálculo devem ser determinados por:


$$M_{sd} = B_1 M_{nt} + B_2 M_{lt} \quad (A.2.4)$$

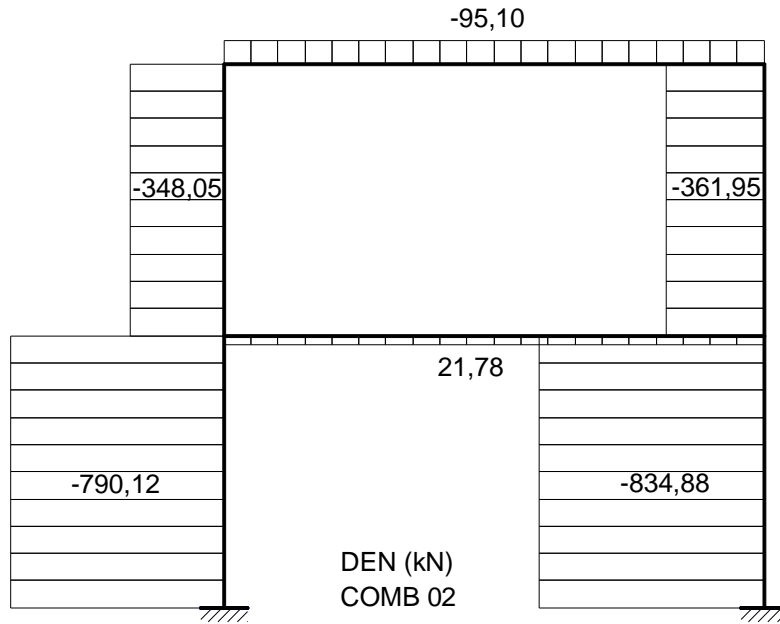
$$N_{sd} = N_{nt} + B_2 N_{lt} \quad (A.2.5)$$

a) Diagramas de Esforço Normal (DEN)

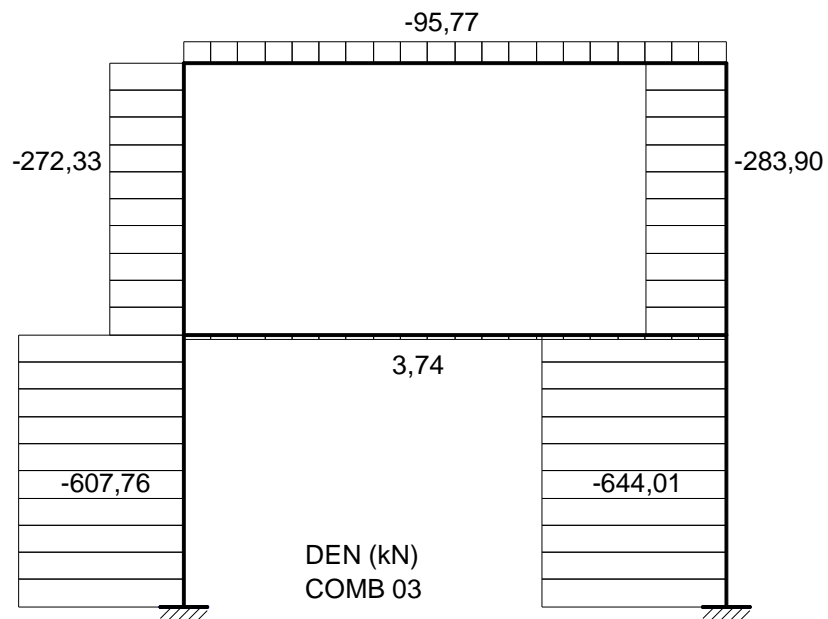


A.2.32 - Diagrama de Esforço Normal (DEN) - “MAES” - Combinação 01


| | | | | | |
|--|--|------------|-------------|----------|--|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | Página | 167 | | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | | |
| | | Referência | Responsável | Data | |
| | A.2 - Caso 2 Pórtico Rígido de Dois Pavimentos | Preparado | CAP | 08/02/11 | |
| | | Verificado | CAP | | |
| | | Aprovado | | | |



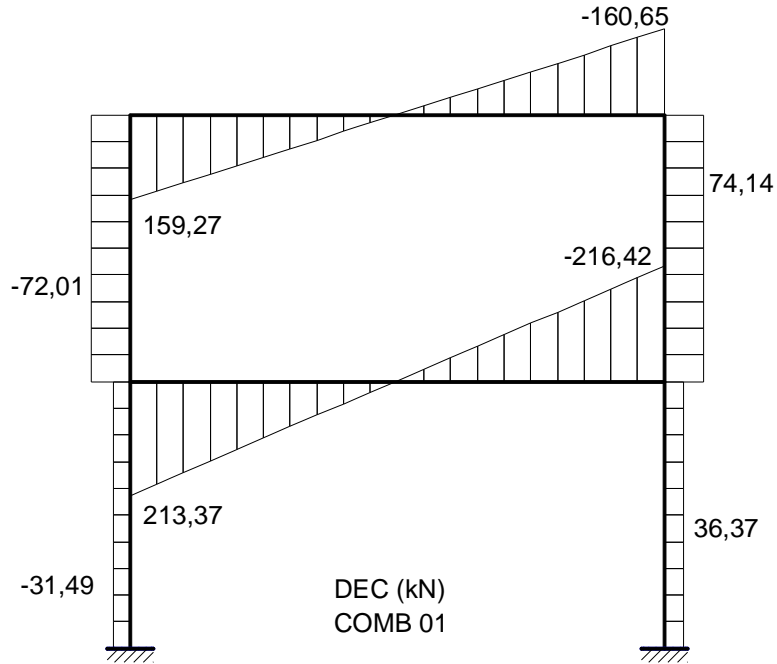
A.2.33 - Diagrama de Esforço Normal (DEN) - “MAES” - Combinação 02



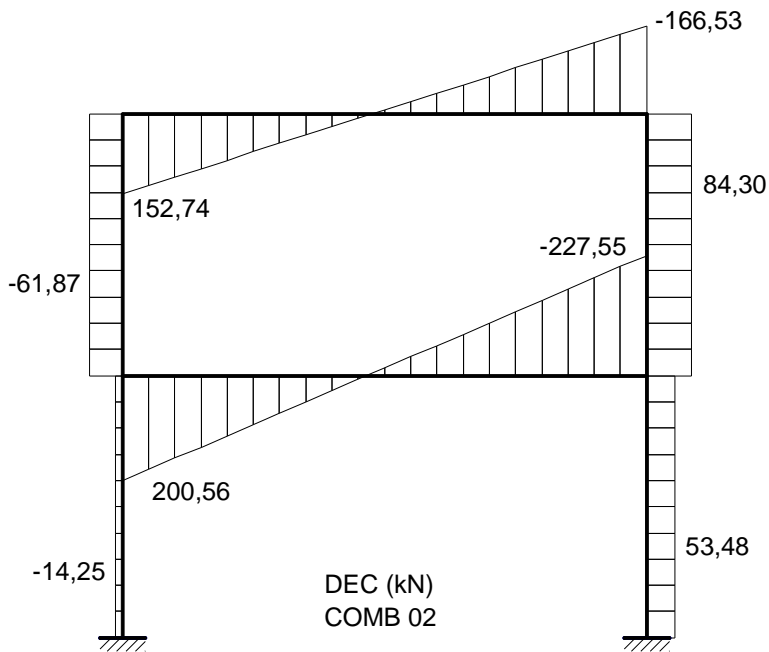
A.2.34 - Diagrama de Esforço Normal (DEN) - “MAES” - Combinação 03

| | | | | | |
|--|---|--------------|------------|-------------|----------|
|  UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | Título | Página | 168 | | |
| | Apêndice A - Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | | |
| | Referência | A.2 - Caso 2 | Controlado | Responsável | Data |
| | Pórtico Rígido de Dois Pavimentos | | Preparado | CAP | 08/02/11 |
| | | | Verificado | CAP | |
| | | Aprovado | | | |


b) Diagrama de Esforço Cortante (DEC)

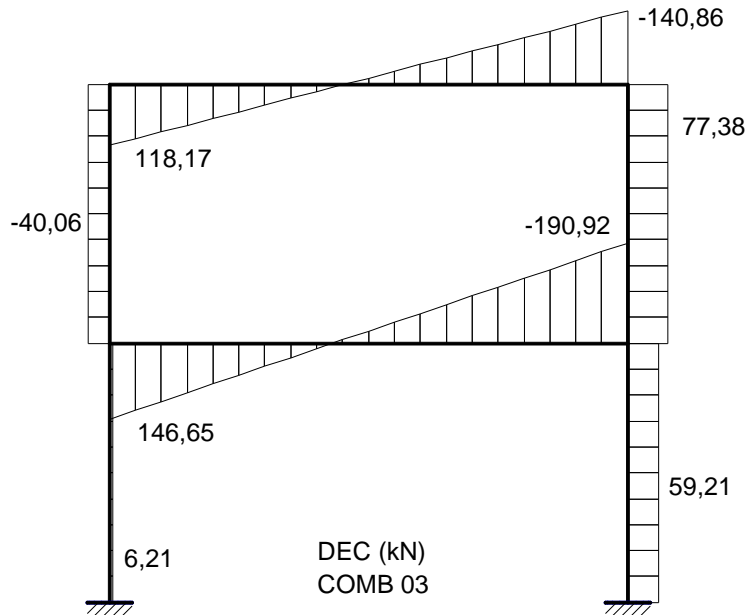


A.2.35 - Diagrama de Esforço Cortante (DEC) - "MAES" - Combinação 01



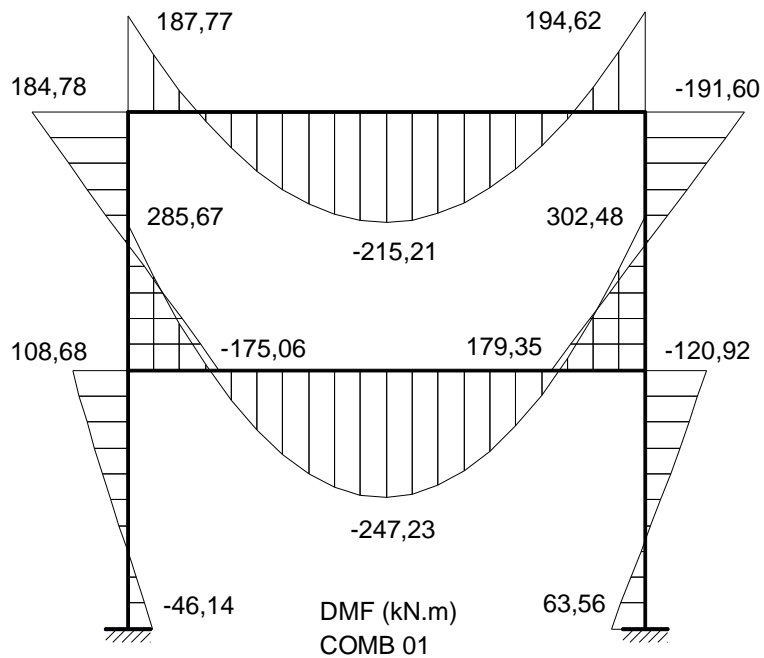
A.2.36 - Diagrama de Esforço Cortante (DEC) - "MAES" - Combinação 02

| | | | | | |
|--|---|------------|--------------|-------------|------|
|  UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | Título | Página | 169 | | |
| | Apêndice A - Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | | |
| | | Referência | A.2 - Caso 2 | Responsável | Data |
| | Pórtico Rígido de Dois Pavimentos | Preparado | CAP | 08/02/11 | |
| | | Verificado | CAP | | |
| | Aprovado | | | | |




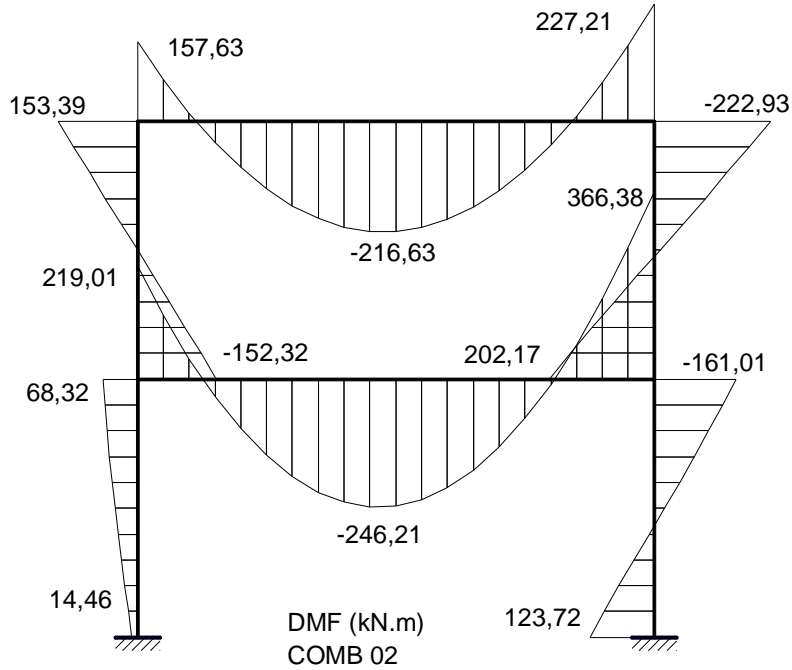
A.2.37 - Diagrama de Esforço Cortante (DEC) - “MAES” - Combinação 03

c) Diagrama de Momento Fletor (DMF)

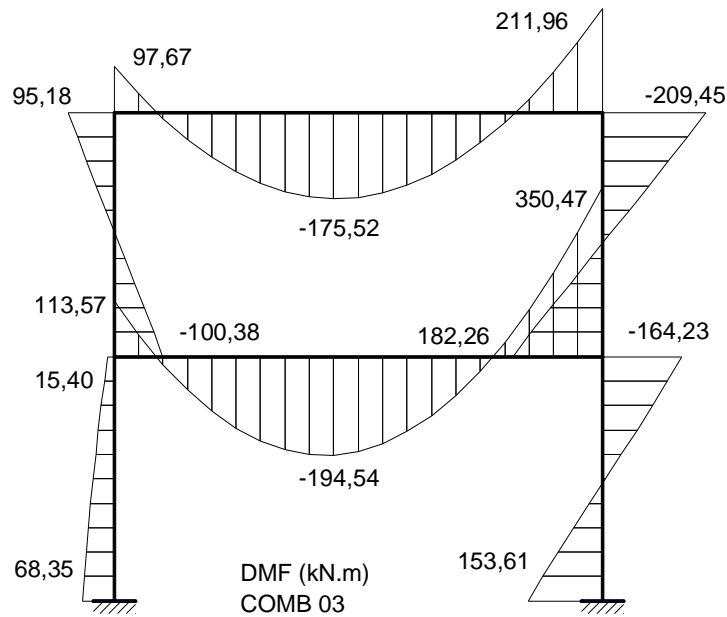


A.2.38 - Diagrama de Momento Fletor (DMF) - “MAES” - Combinação 01


| | | | | | |
|--|---|--------------|------------|-------------|------|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | Página | 170 | | |
| | Apêndice A - Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | | |
| | Referência | A.2 - Caso 2 | Controlado | Responsável | Data |
| | Pórtico Rígido de Dois Pavimentos | Preparado | CAP | 08/02/11 | |
| | | Verificado | CAP | | |
| | Aprovado | | | | |



A.2.39 - Diagrama de Momento Fletor (DMF) - "MAES" - Combinação 02



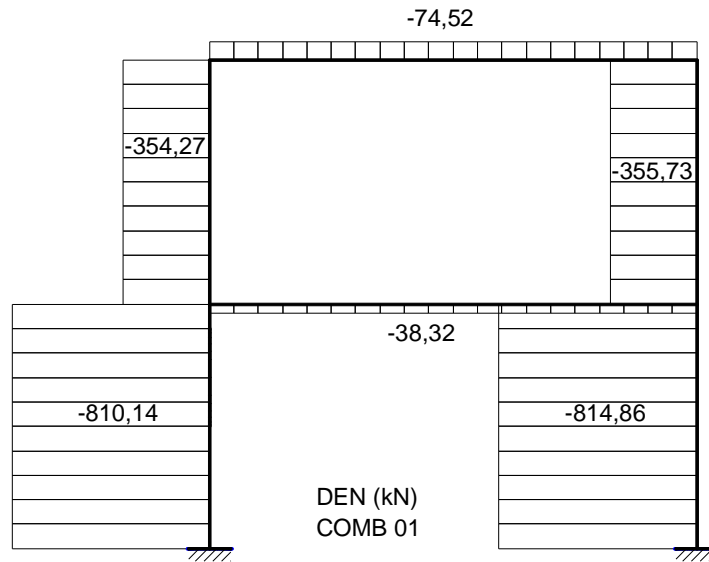
A.2.40 - Diagrama de Momento Fletor (DMF) - "MAES" - Combinação 01

| | | | | | |
|--|---|------------|-------------|----------|--|
|  UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | Título | Página | 171 | | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | | |
| | | Referência | Responsável | Data | |
| | A.2 - Caso 2 Pórtico Rígido de Dois Pavimentos | Preparado | CAP | 08/02/11 | |
| | | Verificado | CAP | | |
| | | Aprovado | | | |

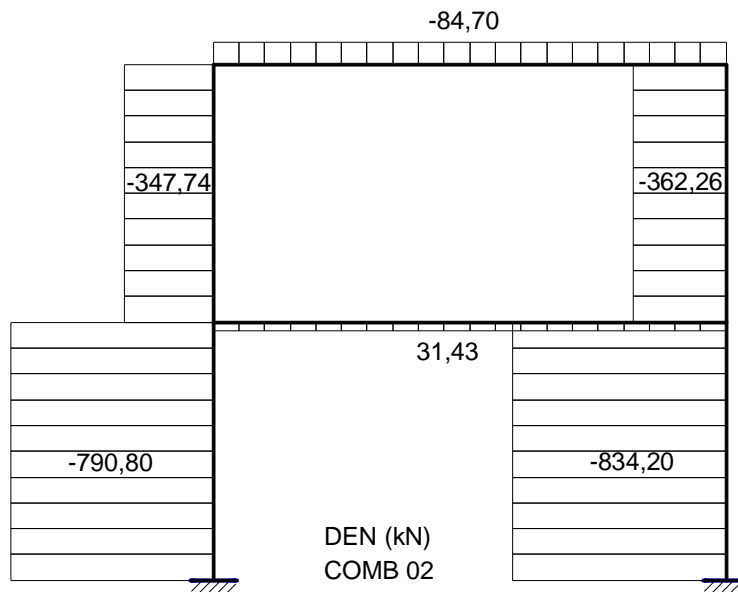
A.2.6.2 Análise de segunda ordem com auxílio do programa SAP2000

A seguir apresentam-se os diagramas de esforços solicitantes para uma análise de segunda ordem (ASO). Esta análise foi realizada com auxílio do programa SAP2000.


a) Diagramas de Esforço Normal (DEN)

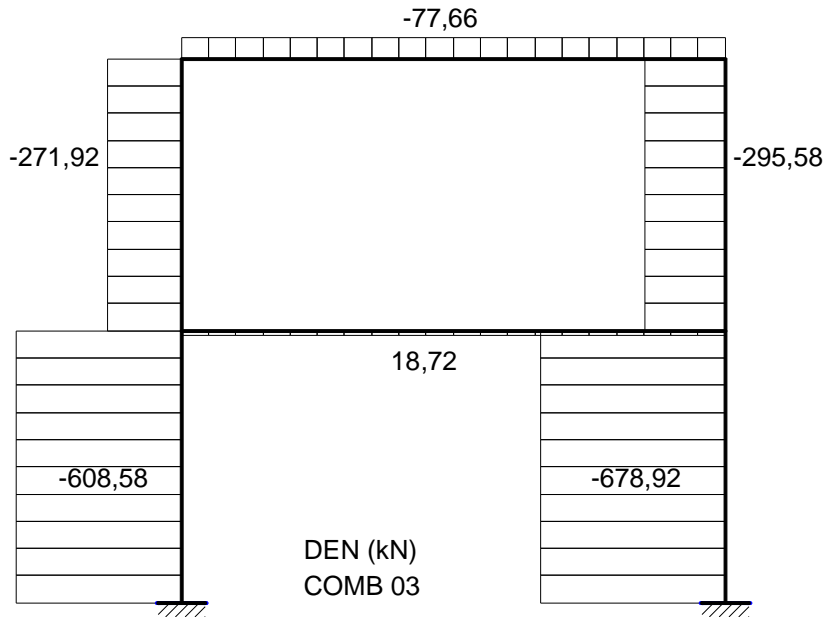


A.2.41 - Diagrama de Esforço Normal (DEN) - Combinação 01



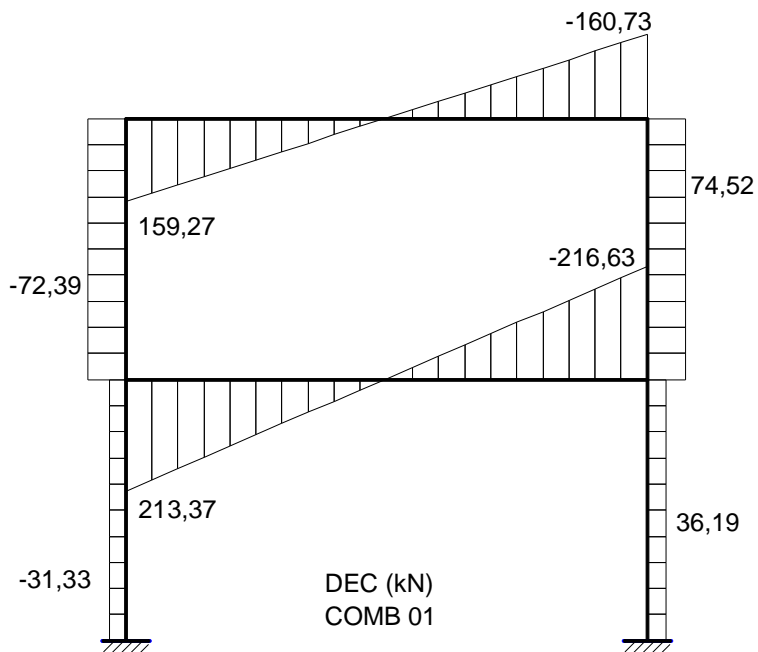
A.2.42 - Diagrama de Esforço Normal (DEN) - Combinação 02

| | | | | | |
|--|--|------------|-------------|----------|--|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | Página | 172 | | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | | |
| | | Referência | Responsável | Data | |
| | A.2 - Caso 2 Pórtico Rígido de Dois Pavimentos | Preparado | CAP | 08/02/11 | |
| | | Verificado | CAP | | |
| | Aprovado | | | | |




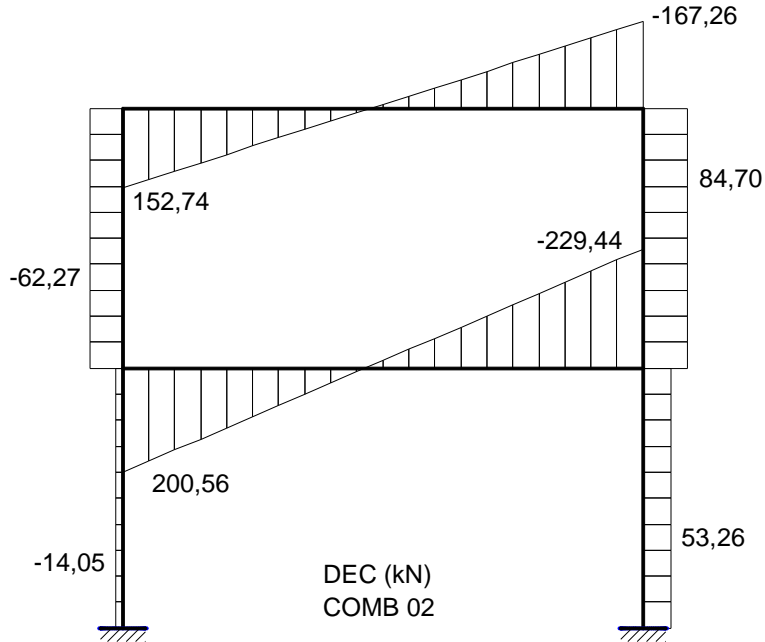
A.2.43 - Diagrama de Esforço Normal (DEN) - Combinação 03

b) Diagramas de Esforço Cortante (DEC)

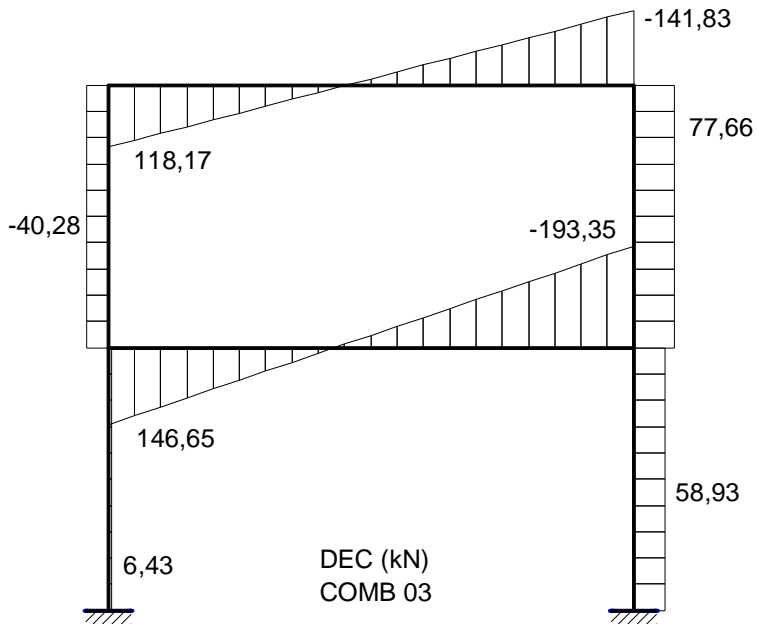


A.2.44 - Diagrama de Esforço Cortante (DEC) - Combinação 01


| | | | | | |
|--|--|------------|--------------|-------------|------|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | Página | 173 | | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | | |
| | | Referência | A.2 - Caso 2 | Responsável | Data |
| | Pórtico Rígido de Dois Pavimentos | Preparado | CAP | 08/02/11 | |
| | | Verificado | CAP | | |
| Aprovado | | | | | |



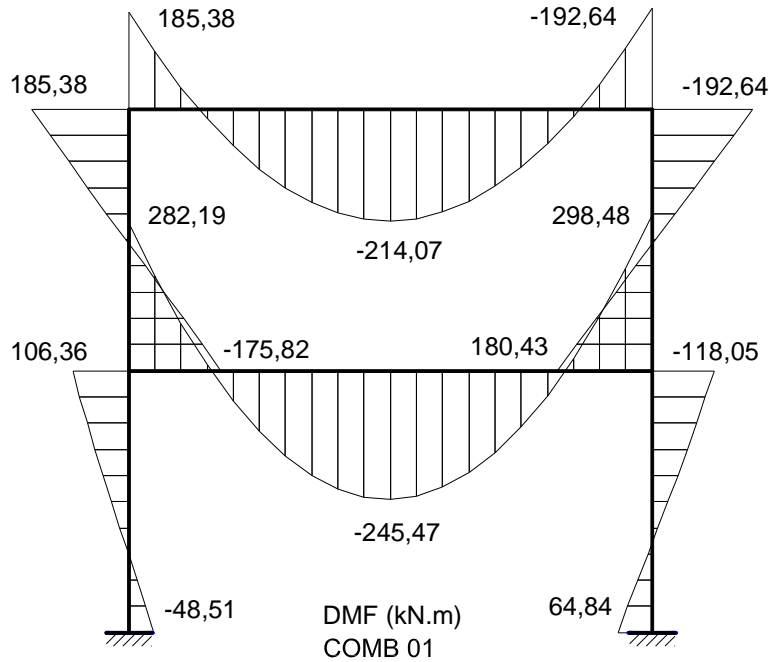
A.2.45 - Diagrama de Esforço Cortante (DEC) - Combinação 02



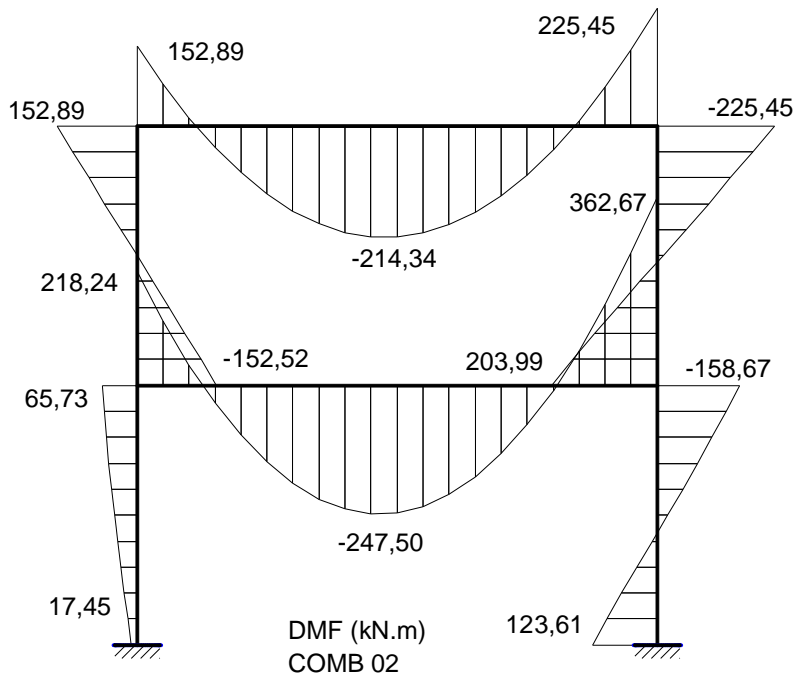
A.2.46 - Diagrama de Esforço Cortante (DEC) - Combinação 03

| | | | | | |
|--|--|------------|--------------|------------|-------------|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | Página | 174 | | |
| | Apêndice A - Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | | |
| | | Referência | A.2 - Caso 2 | Controlado | Responsável |
| | Pórtico Rígido de Dois Pavimentos | Preparado | CAP | Data | |
| | | Verificado | CAP | 08/02/11 | |
| Aprovado | | | | | |


c) Diagramas de Momento Fletor (DMF)

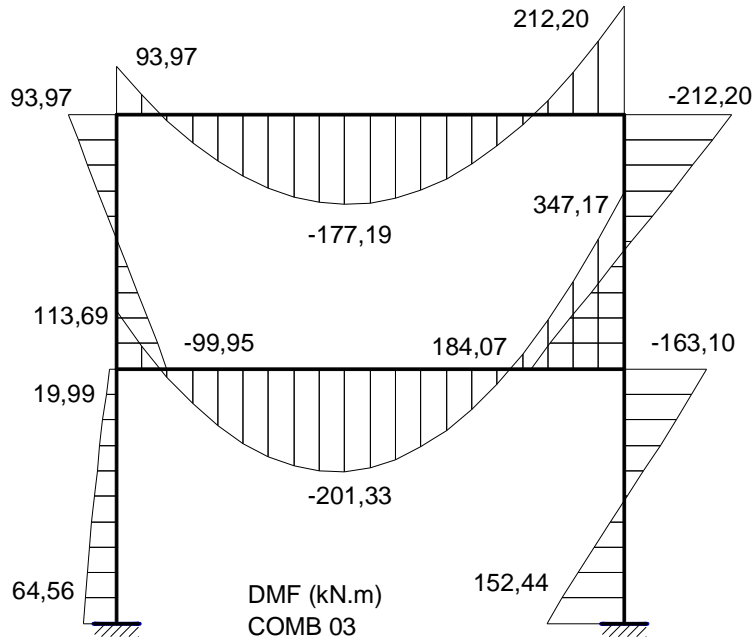


A.2.47 - Diagrama de Momento Fletor (DMF) - Combinação 01



A.2.48 - Diagrama de Momento Fletor (DMF) - Combinação 02


| | | | | | |
|--|--|------------|--------------|-------------|------|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | Página | 175 | | |
| | Apêndice A - Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | | |
| | | Referência | A.2 - Caso 2 | Responsável | Data |
| | Pórtico Rígido de Dois Pavimentos | Preparado | CAP | 08/02/11 | |
| | | Verificado | CAP | | |
| | | Aprovado | | | |



A.2.49 - Diagrama de Momento Fletor (DMF) - Combinação 03

A.2.7 Comparação dos resultados da APO e da ASO

Tendo em vista os diferentes tipos de análise realizados (itens A.2.5 e A.2.6) apresentam-se alguns gráficos com a sobreposição dos resultados dos esforços máximos nos trechos dos pilares da estrutura.

| | | | | | |
|--|--|------------|--------------|-------------|------|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | Página | 176 | | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | | |
| | | Referência | A.2 - Caso 2 | Responsável | Data |
| | Pórtico Rígido de Dois Pavimentos | Preparado | CAP | 08/02/11 | |
| | | Verificado | CAP | | |
| | | Aprovado | | | |

a) **Barra 1**

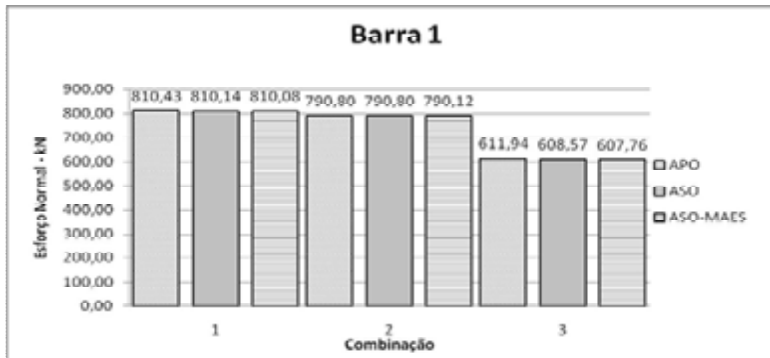


Figura A.2.50 - Esforço normal máximo (kN) na barra 1 para as combinações 01,02 e 03 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos)

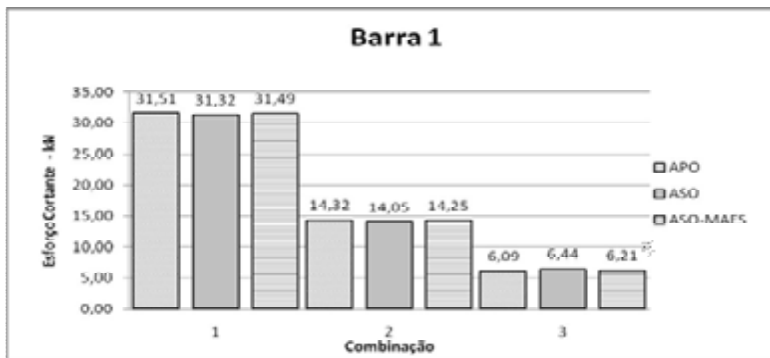


Figura A.2.51 - Esforço cortante máximo (kN) na barra 1 para as combinações 01,02 e 03 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos)

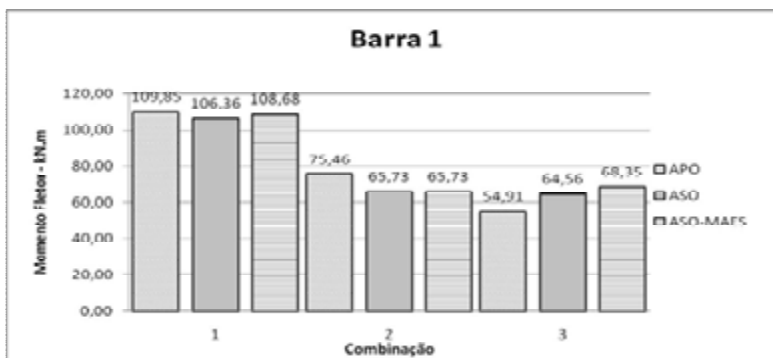



Figura A.2.52 - Momento fletor máximo (kN.m) na barra 1 para as combinações 01,02 e 03 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos)

| | | | | | |
|--|--|------------|-------------|----------|--|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | Página | 177 | | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | | |
| | | Referência | Responsável | Data | |
| | A.2 - Caso 2 Pórtico Rígido de Dois Pavimentos | Preparado | CAP | 08/02/11 | |
| | | Verificado | CAP | | |
| | | Aprovado | | | |

b) Barra 2

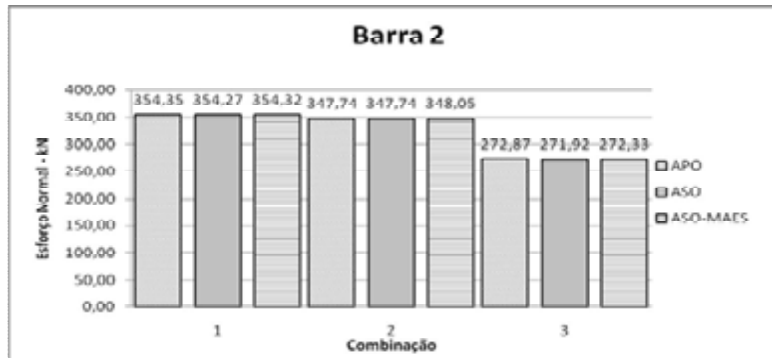


Figura A.2.53 - Esforço normal máximo (kN) na barra 2 para as combinações 01,02 e 03 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos)

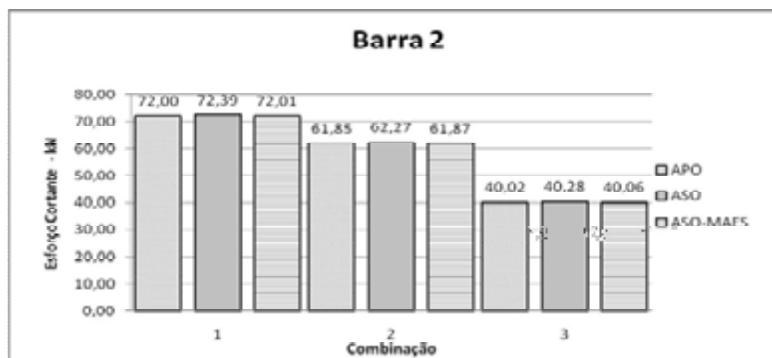



Figura A.2.54 - Esforço cortante máximo (kN) na barra 2 para as combinações 01,02 e 03 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos)

| | | | | |
|--|---|------------|-------------|----------|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | Página | 178 | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | |
| | | Referência | Responsável | Data |
| | A.2 - Caso 2 Pórtico Rígido de Dois Pavimentos | Preparado | CAP | 08/02/11 |
| | | Verificado | CAP | |
| | | Aprovado | | |

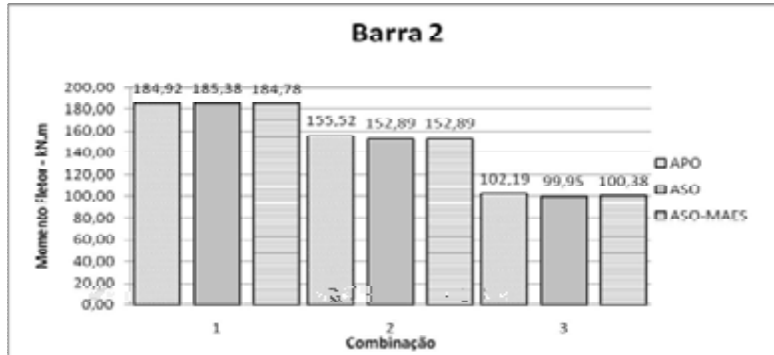


Figura A.2.55 - Momento fletor máximo (kN.m) na barra 2 para as combinações 01,02 e 03 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos)

c) Barra 4

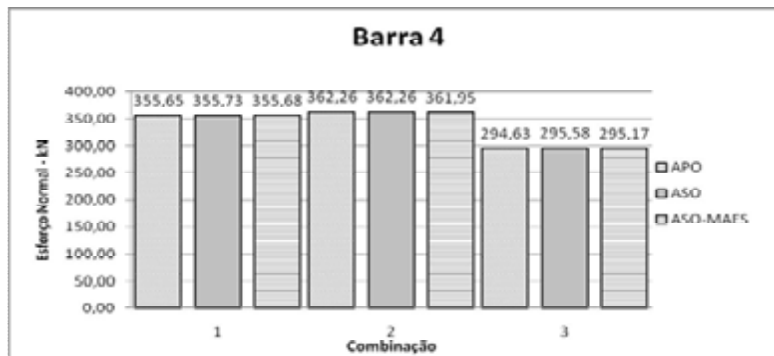


Figura A.2.56 - Esforço normal máximo (kN) na barra 4 para as combinações 1,2 e 3 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos)

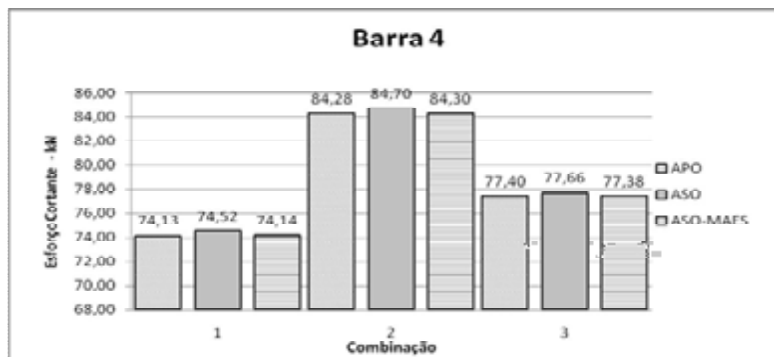



Figura A.2.57 - Esforço cortante máximo (kN) na barra 4 para as combinações 1,2 e 3 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos).

| | | | | | |
|--|--|------------|--------------|-------------|------|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | Página | 179 | | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | | |
| | | Referência | A.2 - Caso 2 | Responsável | Data |
| | Pórtico Rígido de Dois Pavimentos | Preparado | CAP | 08/02/11 | |
| | | Verificado | CAP | | |
| | | Aprovado | | | |

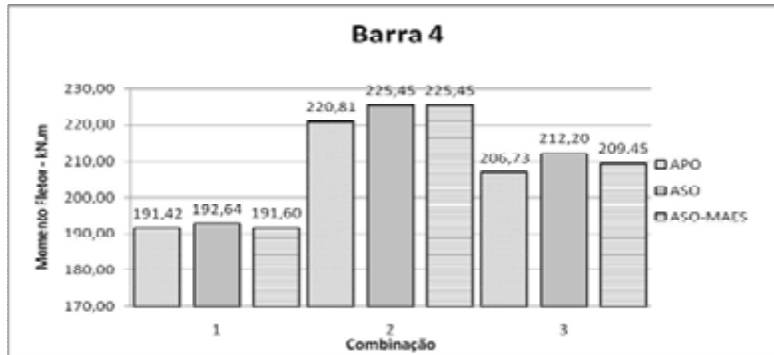


Figura A.2.58 - Momento fletor máximo (kN.m) na barra 4 para as combinações 1,2 e 3 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos)

d) Barra 5

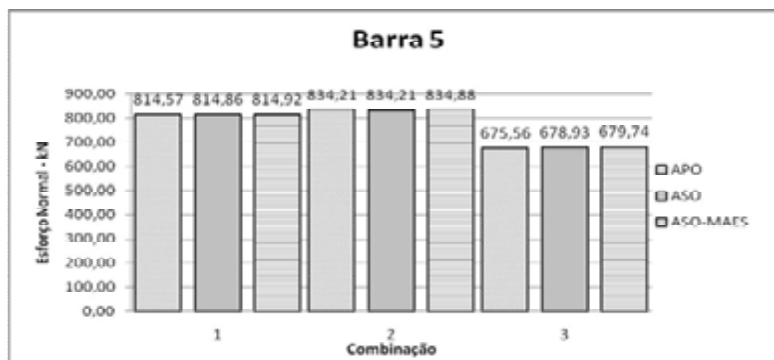


Figura A.2.59 - Esforço normal máximo (kN) na barra 5 para as combinações 1,2 e 3 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos)

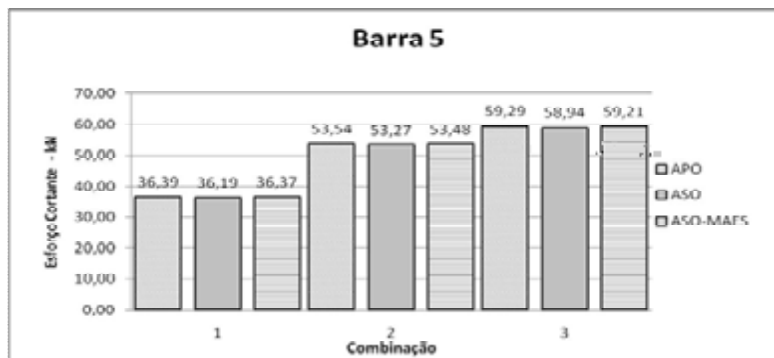



Figura A.2.60 - Esforço cortante máximo (kN) na barra 5 para as combinações 1,2 e 3 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos)

| | | | | |
|--|---|------------|-------------|----------|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | Página | 180 | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | |
| | | Referência | Responsável | Data |
| | A.2 - Caso 2 Pórtico Rígido de Dois Pavimentos | Preparado | CAP | 08/02/11 |
| | | Verificado | CAP | |
| | | Aprovado | | |

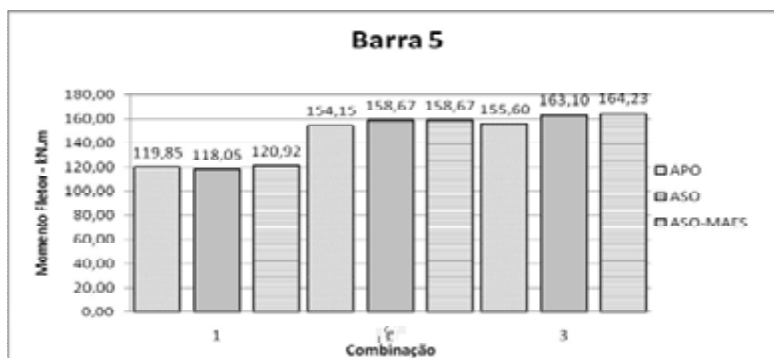


Figura A.2.61 - Momento fletor máximo (kN.m) na barra 5 para as combinações 1,2 e 3 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos)

A.2.8 Verificação da capacidade última dos pilares do pavimento térreo

Para a verificação da capacidade última dos pilares da estrutura, utilizou-se o programa Desmet 4.0. Para a APO fez-se a verificação de acordo com ABNT NBR8800:1986 enquanto que para a ASO fez-se a verificação de acordo com a ABNT NBR8800:2008.

Para a verificação dos pilares de acordo com a ABNT NBR8800:1986 utilizam-se os coeficientes de flambagem (K) indicados na Tabela A.2.8, ao passo que para ABNT NBR8800:2008 toma-se sempre $K = 1,0$.

Tabela A.2.8 – Valores do coeficiente de flambagem (K) segundo ABNT NBR8800:1986

| Barra | I_c (cm ⁴) | L_c (cm) | I_g (cm ⁴) | L_g (cm) | α | G_A | G_B | K |
|-------|--------------------------|------------|--------------------------|------------|----------|-------|-------|------|
| 1 | 10450 | 500 | 23130 | 1000 | 0,67 | 1 | 2,70 | 1,51 |
| 2 | 10450 | 500 | 23130 | 1000 | 0,67 | 2,70 | 1,35 | 1,58 |
| 4 | 10450 | 500 | 23130 | 1000 | 0,67 | 2,70 | 1,35 | 1,58 |
| 5 | 10450 | 500 | 23130 | 1000 | 0,67 | 1 | 2,70 | 1,51 |

Na Tabela A.2.9 apresentam-se os resultados da verificação da capacidade última dos pilares do pavimento térreo.



| | | | | | |
|--|--|--|------------|-------------|----------|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | | Página | 181 | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | | Revisão | A | |
| | Referência | | Controlado | Responsável | Data |
| | A.2 - Caso 2 | | Preparado | CAP | 08/02/11 |
| | Pórtico Rígido de Dois Pavimentos | | Verificado | CAP | |
| | | | Aprovado | | |

Tabela A.2.9 – Verificação da capacidade última dos pilares do pavimento térreo

| Barra | Combinação | Tipo de análise | Esforços solicitantes | | Esforços Resistentes | | Interação |
|-------|------------|-----------------|-----------------------|-------------------|----------------------|-------------------|-----------|
| | | | N_{Sd} (kN) | $M_{x,Sd}$ (kN.m) | N_{Rd} (kN) | $M_{x,Rd}$ (kN.m) | |
| 1 | 1 | APO - SAP2000 | 810,43 | 109,85 | 1769,68 | 276,21 | 0,880 |
| | | ASO - SAP2000 | 810,14 | 106,36 | 2240,07 | 280,18 | 0,699 |
| | | ASO - MAES | 810,08 | 108,68 | 2240,07 | 280,18 | 0,700 |
| 2 | 1 | APO - SAP2000 | 354,35 | 184,92 | 1702,16 | 276,21 | 0,900 |
| | | ASO - SAP2000 | 354,27 | 185,38 | 2240,07 | 280,18 | 0,741 |
| | | ASO - MAES | 354,32 | 184,78 | 2240,07 | 280,18 | 0,739 |
| 4 | 2 | APO - SAP2000 | 362,26 | 220,81 | 1702,16 | 276,21 | 1,040 |
| | | ASO - SAP2000 | 362,26 | 225,45 | 2240,07 | 280,18 | 0,886 |
| | | ASO - MAES | 361,95 | 225,45 | 2240,07 | 280,18 | 0,885 |
| 5 | 2 | APO - SAP2000 | 834,21 | 154,15 | 1769,68 | 276,21 | 1,100 |
| | | ASO - SAP2000 | 834,21 | 158,67 | 2240,07 | 280,18 | 0,876 |
| | | ASO - MAES | 834,88 | 158,67 | 2240,07 | 280,18 | 0,876 |

| | | | | | |
|--|---|------------|-------------|----------|--|
|  UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | Título | Página | 182 | | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | | |
| | | Referência | Responsável | Data | |
| | A.3 - Caso 3 Pórtico Rígido de Dois Pavimentos | Preparado | CAP | 06/02/11 | |
| | | Verificado | CAP | | |
| Aprovado | | | | | |

A.3 Estudo 3 - Pórtico Rígido de Dois Pavimentos

Verificar a capacidade última dos pilares situados no pavimento térreo do pórtico plano de aço indicado na Figura A.3.1.

Determinar os esforços de cálculo na estrutura de acordo com uma análise de primeira ordem (APO) e com uma análise de segunda ordem (ASO). Para a ASO, desenvolver a análise com auxílio de um programa computacional e por meio do Método de Amplificação dos Esforços Solicitantes (MAES), apresentado no Anexo D da ABNT NBR8800:2008.

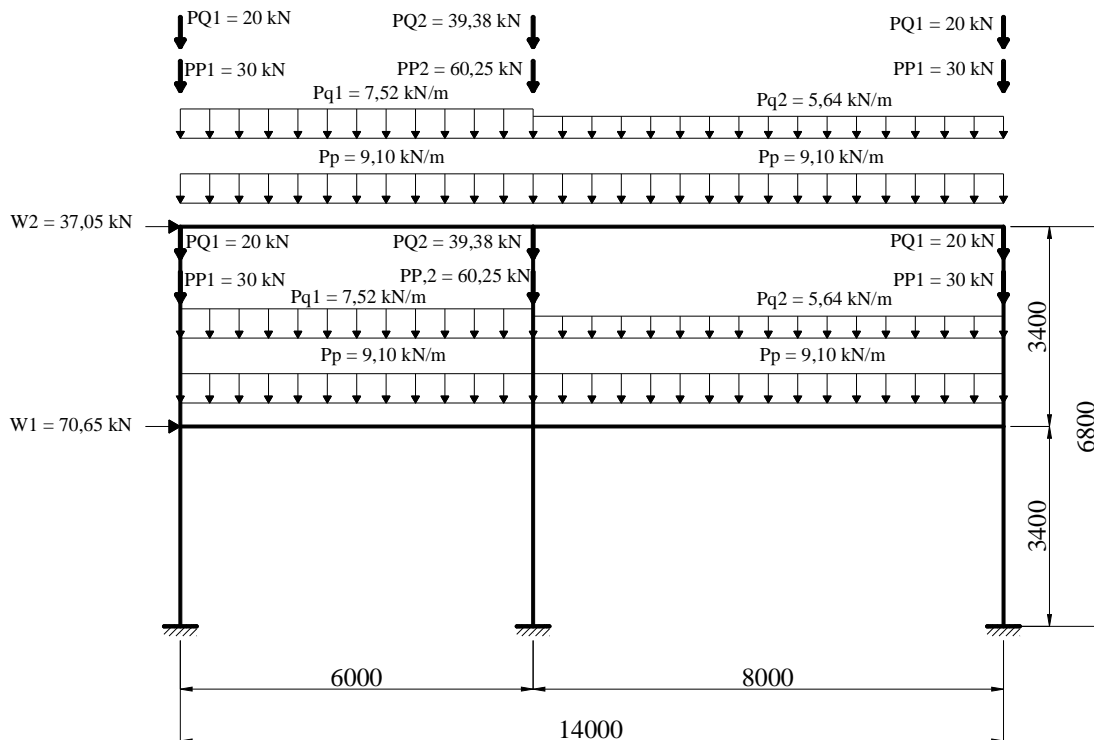



Figura A.3.1 - Pórtico rígido de dois pavimentos
(dimensões em milímetros e ações com valores característicos)

Dados:

- Aço ASTM A572 Grau 50;

| | | | | | |
|--|---|-----------------------------------|-------------|------|----------|
|  UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | Título | Página | 183 | | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | | |
| | | Controle | Responsável | Data | |
| | Referência | A.3 - Caso 3 | Preparado | CAP | 06/02/11 |
| | | Pórtico Rígido de Dois Pavimentos | Verificado | CAP | |
| Aprovado | | | | | |

- Módulo de elasticidade - $E = 200.000 \text{ MPa}$;

- Perfis laminados de abas paralelas da GERDAU-AÇOMINAS.

A.3.1 Modelo estrutural

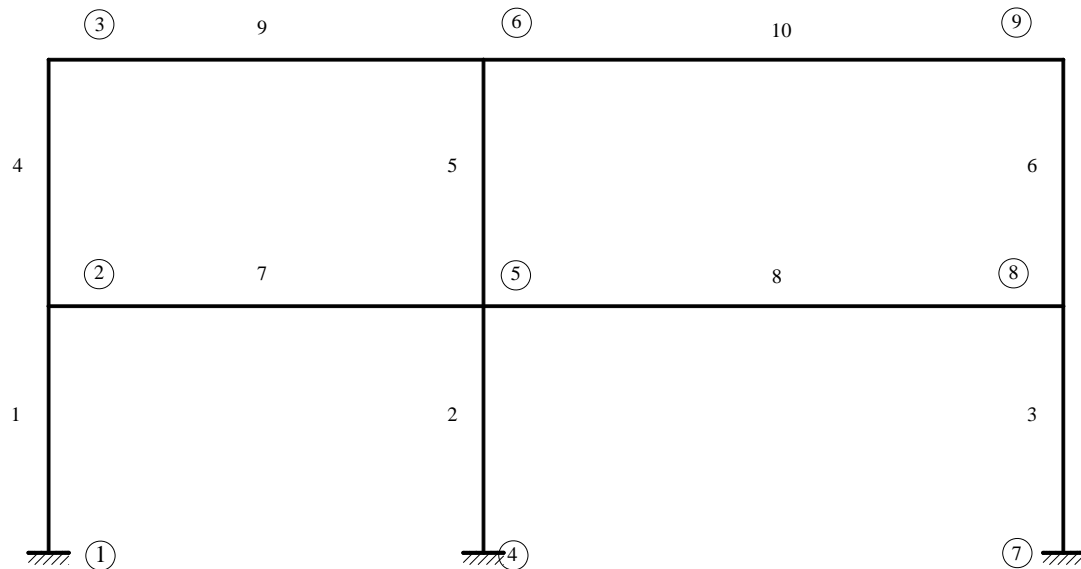


Figura A.3.2 - Modelo estrutural do pórtico plano

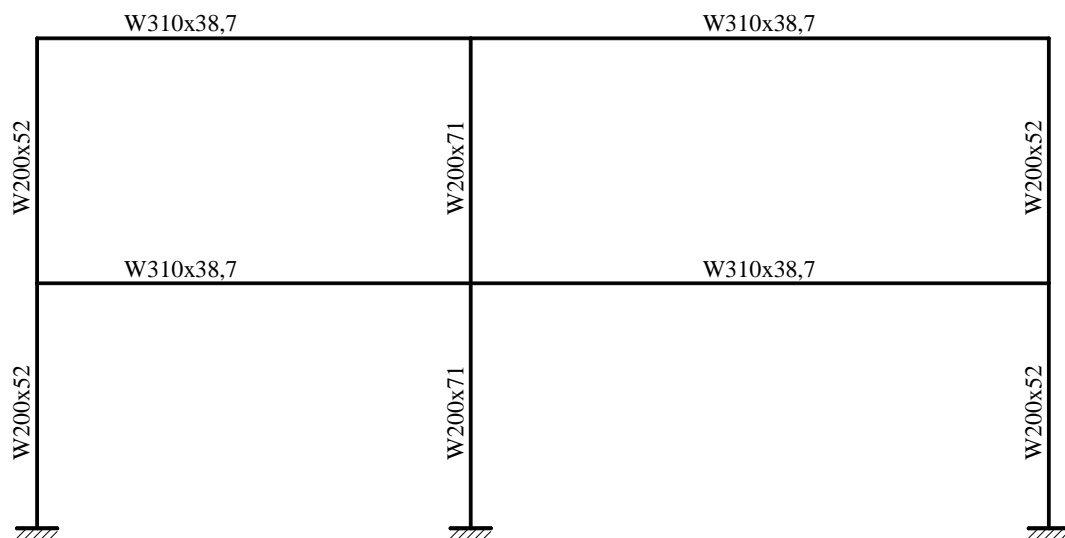



Figura A.3.3 – Seções adotadas a partir de um pré-dimensionamento

| | | | | | |
|--|--|-----------------------------------|-------------|------|----------|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | Página | 184 | | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | | |
| | | Controle | Responsável | Data | |
| | Referência | A.3 - Caso 3 | Preparado | CAP | 06/02/11 |
| | | Pórtico Rígido de Dois Pavimentos | Verificado | CAP | |
| Aprovado | | | | | |

A.3.2 Ações atuantes

- PP – Peso próprio da estrutura
- PQ – Sobrecarga
- F_n – Força horizontal equivalente (Força nocional)
- W – Vento

Na Figura A.3.1, as letras minúsculas se referem a ações distribuídas e as letras maiúsculas a ações concentradas.


A força horizontal equivalente (F_n), que representa as imperfeições geométricas, deve ser calculada para cada pavimento da estrutura, conforme a seguinte expressão:

$$F_n = \frac{0,3}{100} \sum N_{sd} \quad (\text{A.3.1})$$

onde:

$\sum N_{sd}$ é o somatório das cargas gravitacionais de cálculo atuantes no pavimento.

Como as forças gravitacionais nos dois pavimentos são idênticas, tem-se:

| | | | | | |
|--|--|------------|------------|-------------|------|
|  UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | Título | Página | 185 | | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | | |
| | | Referência | Controlado | Responsável | Data |
| | A.3 - Caso 3 Pórtico Rígido de Dois Pavimentos | Preparado | CAP | 06/02/11 | |
| | | Verificado | CAP | | |
| Aprovado | | | | | |

$$F_n = \frac{0,3}{100} ((30 + 30 + 60,25) * 1,4 + (20 + 20 + 39,38) + 1,5 + (9,10 * 14) * 1,4 + (7,52 * 6 + 5,64 * 8) * 1,5)$$

$$F_n = 1,80 \text{ kN}$$

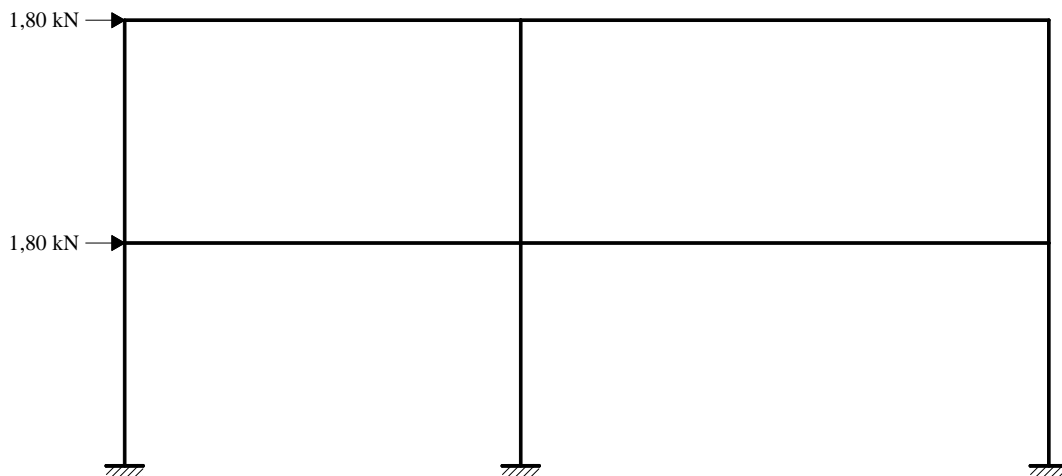


Figura A.3.4 - Força horizontal equivalente em cada andar (kN)

A.3.3 Combinações de ações

Combinações últimas normais:


$$F_d = \sum_{i=1}^m (\gamma_{gi} F_{Gi,k}) + \gamma_{q1} F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n (\gamma_{qj} \psi_{0j} F_{Qj,k}) \quad (\text{A.3.2})$$

Combinação 01: 1,4 PP + Fn + 1,5 PQ

Combinação 02: 1,4 PP + 1,4 W + 1,5 * 0,5 PQ

Combinação 03: 1,4 PP + 1,5 PQ + 1,4 * 0,6 W

Obs: As imperfeições geométricas não foram consideradas em conjunto com forças horizontais de mesmo sentido e de maior magnitude.

| | | | | |
|--|--|------------|-------------|----------|
|  UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | Título | Página | 186 | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | |
| | | Controle | Responsável | Data |
| | Referência A.3 - Caso 3 Pórtico Rígido de Dois Pavimentos | Preparado | CAP | 06/02/11 |
| | | Verificado | CAP | |
| Aprovado | | | | |

A.3.4 Classificação da estrutura quanto à sensibilidade a deslocamentos laterais

Segundo o item 4.9.4.5 da ABNT NBR 8800:2008 a classificação da estrutura deve ser obtida para as combinações últimas de ações em que os deslocamentos horizontais provenientes das forças horizontais tenham os mesmos sentidos dos deslocamentos horizontais decorrentes das cargas gravitacionais.

a) Classificação de acordo com os deslocamentos relativos


Na tabela A.3.1 apresenta-se a classificação da estrutura de acordo com os deslocamentos relativos.

Tabela A.3.1 - Classificação da estrutura de acordo com os deslocamentos relativos

| Combinação | Nó | Deslocamento (mm) | | |
|------------|----|-------------------|---------|-----------|
| | | u_1 | u_2 | u_2/u_1 |
| 01 | 2 | 0,0239 | 0,0239 | 1,00 |
| | 3 | 0,1439 | 0,1514 | 1,05 |
| 02 | 2 | 14,3460 | 14,8574 | 1,04 |
| | 3 | 24,3460 | 25,2865 | 1,04 |
| 03 | 2 | 8,3853 | 8,7654 | 1,05 |
| | 3 | 14,1290 | 14,8150 | 1,05 |

Nota: u_1 e u_2 representam os deslocamentos horizontais em análise de primeira e segunda ordem nos nós indicados, respectivamente.

De acordo com as relações entre deslocamentos (u_2/u_1) apresentados na Tabela A.3.1, a estrutura é classificada como de pequena deslocabilidade.

| | | | | |
|--|--|------------|-------------|----------|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | Página | 187 | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | |
| | | Controle | Responsável | Data |
| | Referência A.3 - Caso 3 Pórtico Rígido de Dois Pavimentos | Preparado | CAP | 06/02/11 |
| | | Verificado | CAP | |
| Aprovado | | | | |

b) Classificação de acordo com o coeficiente B_2

O coeficiente B_2 prescrito no Anexo D da ABNT NBR8800:2008 é dado por:

$$B_2 = \frac{1}{1 - \frac{1}{R_s} \frac{\Delta_h}{H} \sum N_{SD}} \quad (\text{A.3.3})$$

Onde :

$\sum N_{sd}$ é a carga gravitacional total que atua no andar considerado;

R_s é um coeficiente de ajuste, igual a 0,85 nas estruturas onde as subestruturas de contraventamento são todas pórticos rígidos e igual a 1 para as outras estruturas;

Δh é o deslocamento horizontal relativo entre os níveis superior e inferior (deslocamento interpavimento em uma análise de primeira ordem);


$\sum H_{sd}$ é a força cortante no andar, produzida pelas forças horizontais de cálculo atuantes.

Na Tabela A.3.4 apresentam-se os valores do coeficiente B_2 em cada nível, para classificação da estrutura quanto à sensibilidade a deslocamentos laterais.

Tabela A.3.2 - Valores do coeficiente B_2 para classificação da estrutura

| Combinação | Nível | R_s | Δh (mm) | H(mm) | N_{sd} | H_{sd} | B_2 |
|------------|-------|-------|-----------------|-------|----------|----------|-------|
| 01 | 1 | 0,85 | 0,0239 | 3400 | 1202,28 | 3,6 | 1,00 |
| | 2 | 0,85 | 0,12 | 3400 | 601,14 | 1,8 | 1,01 |
| 02 | 1 | 0,85 | 14,35 | 3400 | 947,84 | 133,68 | 1,04 |
| | 2 | 0,85 | 10 | 3400 | 473,92 | 32,97 | 1,05 |
| 03 | 1 | 0,85 | 8,39 | 3400 | 1202,30 | 79,12 | 1,05 |
| | 2 | 0,85 | 5,74 | 3400 | 601,15 | 22,22 | 1,06 |

Os valores do coeficiente B_2 apresentados na Tabela A.3.2 foram calculados sem levar em consideração as imperfeições de material. Em função desses valores a estrutura é classificada como de pequena deslocabilidade.

| | | | | | |
|--|--|-----------------------------------|-------------|------|----------|
|  UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | Título | Página | 188 | | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | | |
| | | Controle | Responsável | Data | |
| | Referência | A.3 - Caso 3 | Preparado | CAP | 06/02/11 |
| | | Pórtico Rígido de Dois Pavimentos | Verificado | CAP | |
| Aprovado | | | | | |

c) Classificação da estrutura

De acordo com as duas formas distintas de classificação cujos resultados são apresentados nas Tabelas A.3.1 e A.3.2, a estrutura é classificada como de pequena deslocabilidade.

A.3.5 Análise de primeira ordem (APO)

A seguir apresentam-se os diagramas de esforços solicitantes para uma análise de primeira ordem (APO). Esta análise foi realizada com auxílio do programa SAP2000.

a) Diagramas de Esforço Normal (DEN)

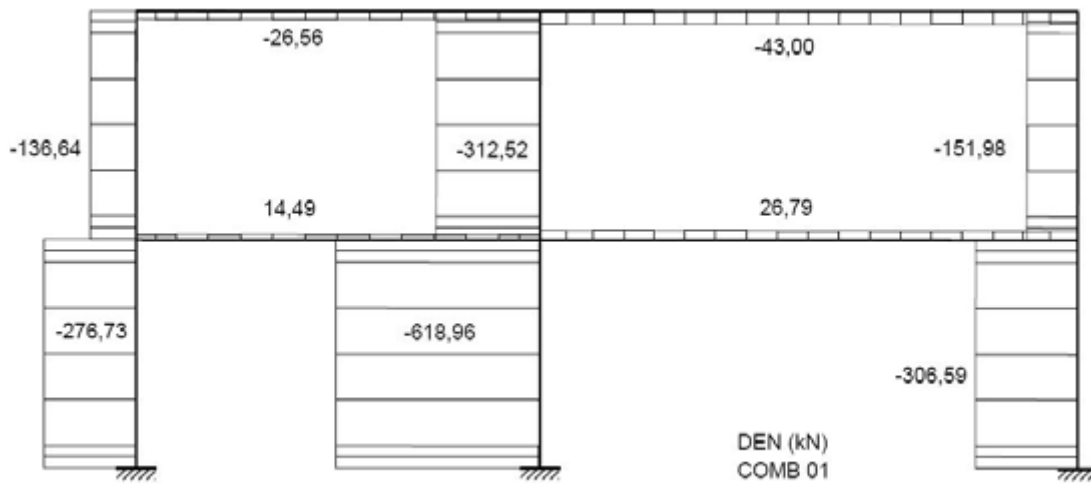



Figura A.3.5 - Diagrama de Esforço Normal (DEN) - Combinação 01

| | | | | | |
|--|--|------------|-------------|----------|--|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | Página | 189 | | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | | |
| | | Referência | Responsável | Data | |
| | A.3 - Caso 3 Pórtico Rígido de Dois Pavimentos | Preparado | CAP | 06/02/11 | |
| | | Verificado | CAP | | |
| Aprovado | | | | | |

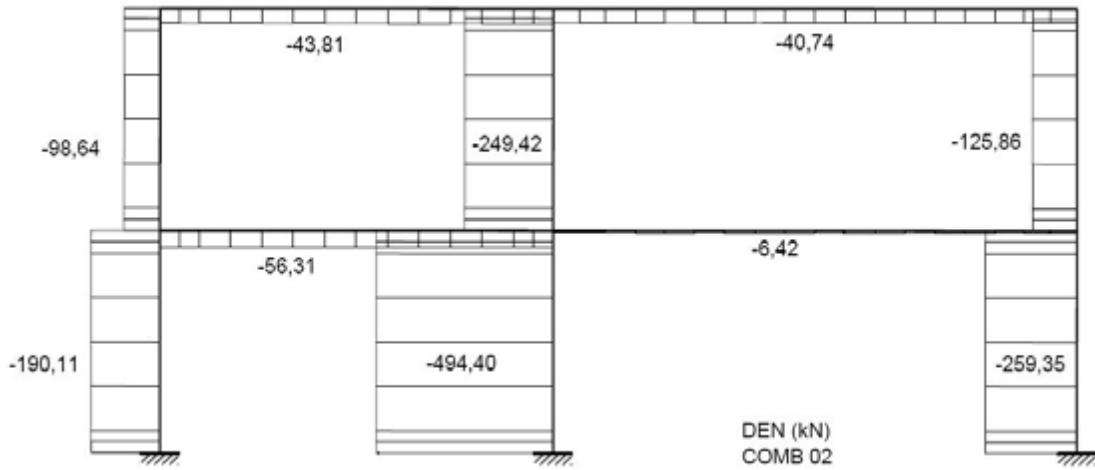


Figura A.3.6 - Diagrama de Esforço Normal (DEN) - Combinação 02

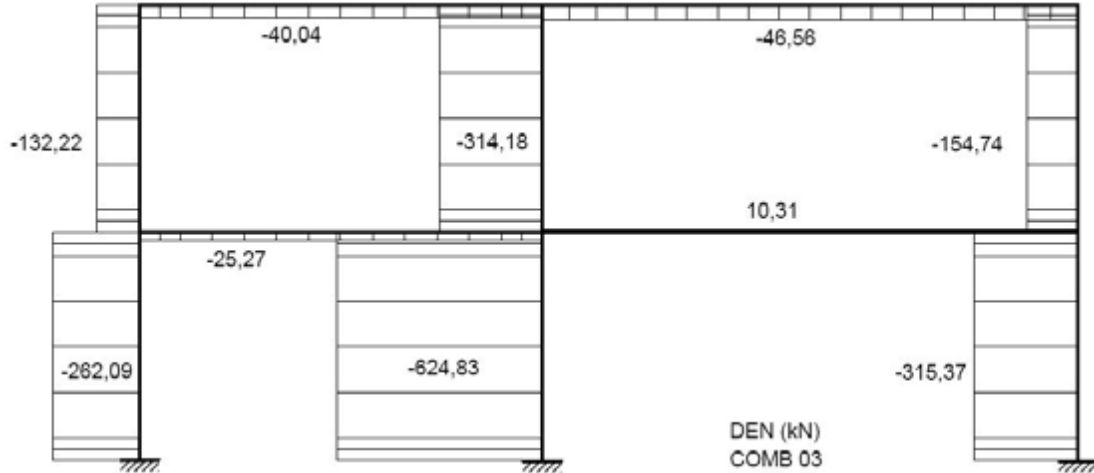



Figura A.3.7 - Diagrama de Esforço Normal (DEN) - Combinação 03

| | | | | | |
|--|---|------------|-------------|----------|--|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | Página | 190 | | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | | |
| | | Referência | Responsável | Data | |
| | A.3 - Caso 3 Pórtico Rígido de Dois Pavimentos | Preparado | CAP | 06/02/11 | |
| | | Verificado | CAP | | |
| Aprovado | | | | | |

b) Diagramas de Esforço Cortante (DEC)

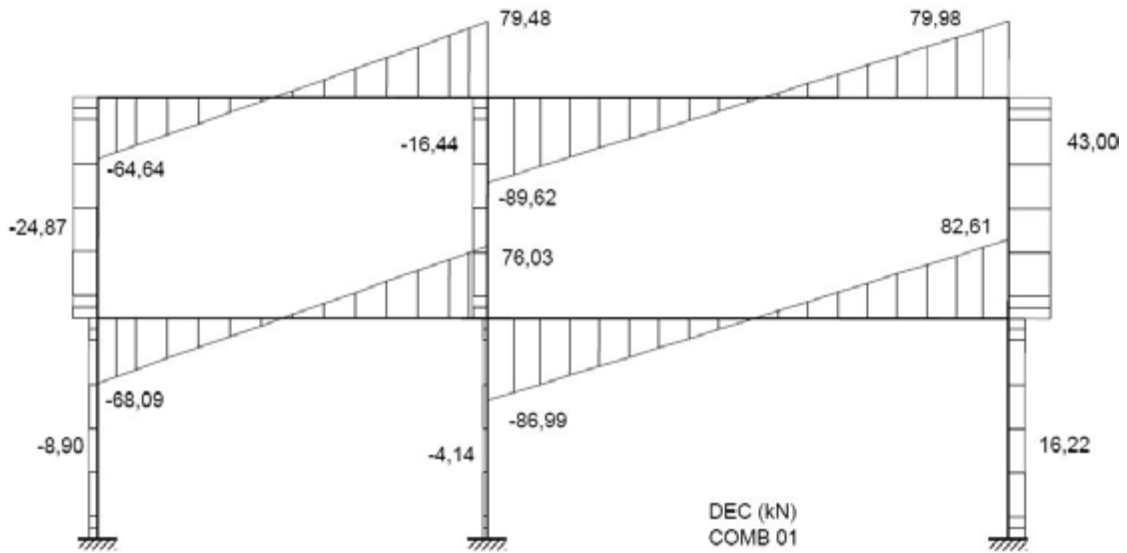


Figura A.3.8 - Diagrama de Esforço Cortante (DEC) - Combinação 01

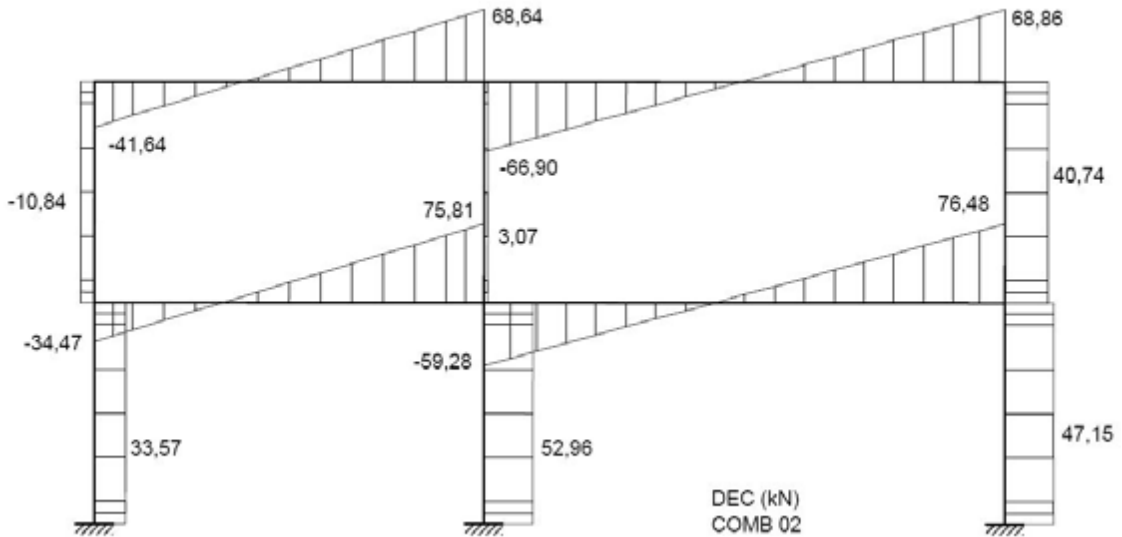



Figura A.3.9 - Diagrama de Esforço Cortante (DEC) - Combinação 02

| | | | | | |
|--|---|------------|-------------|----------|--|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | Página | 191 | | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | | |
| | | Referência | Responsável | Data | |
| | A.3 - Caso 3 Pórtico Rígido de Dois Pavimentos | Preparado | CAP | 06/02/11 | |
| | | Verificado | CAP | | |
| Aprovado | | | | | |

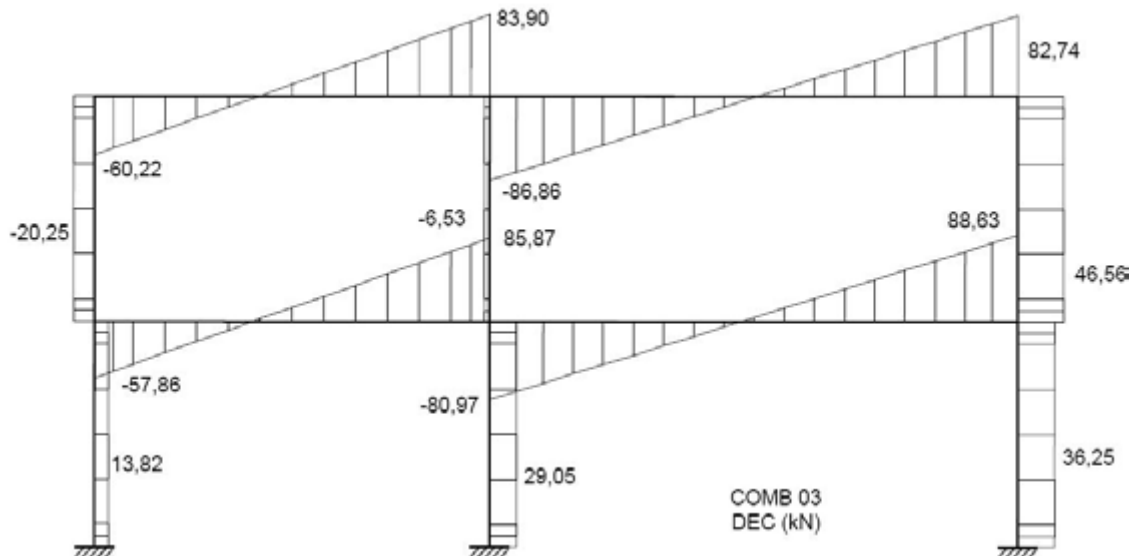


Figura A.3.10 –Diagrama de Esforço Cortante (DEC) - Combinação 03

c) Diagramas de momento Fletor (DMF)

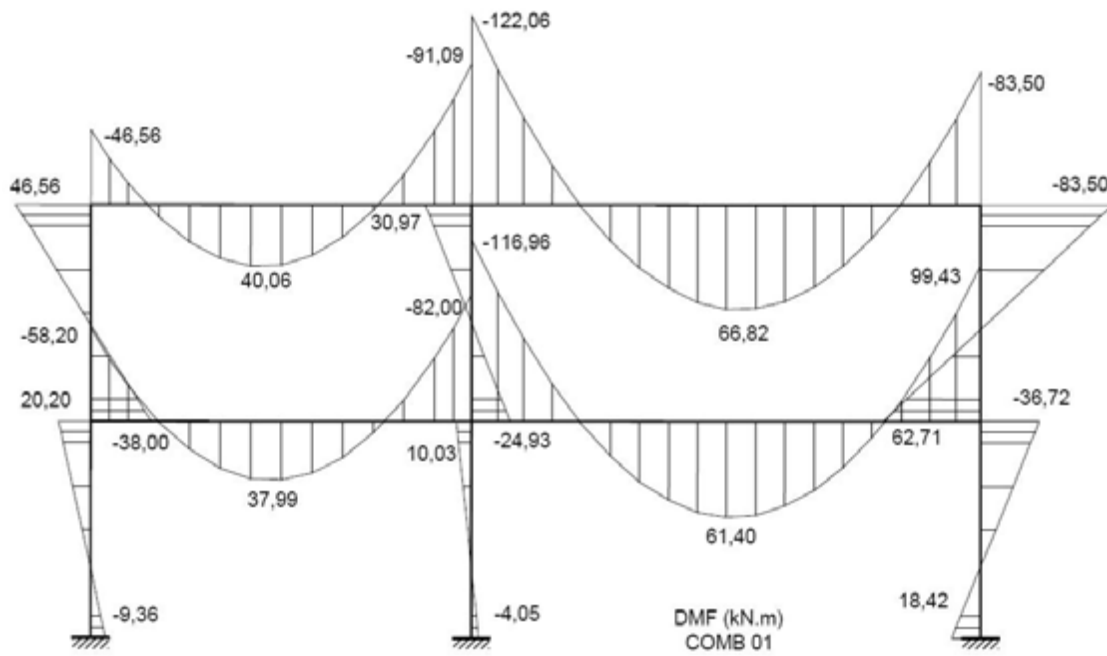



Figura A.3.11 –Diagrama de Momento Fletor (DMF) - Combinação 01

| | | | | | |
|--|---|-----------------------------------|-------------|------|----------|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | Página | 192 | | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | | |
| | | Controle | Responsável | Data | |
| | Referência | A.3 - Caso 3 | Preparado | CAP | 06/02/11 |
| | | Pórtico Rígido de Dois Pavimentos | Verificado | CAP | |
| Aprovado | | | | | |

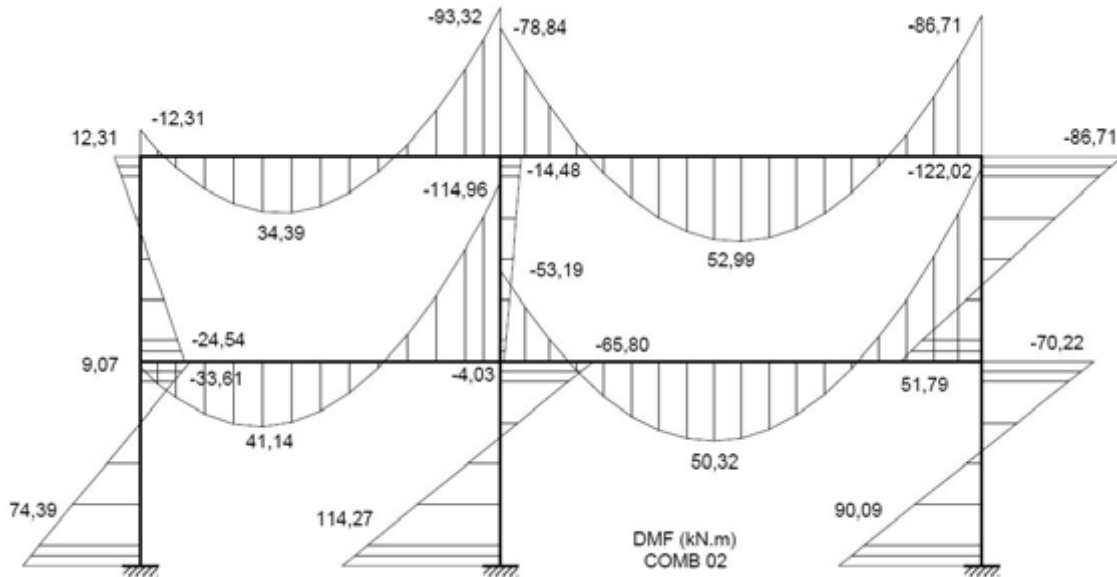


Figura A.3.12 –Diagrama de Momento Fletor (DMF) - Combinação 02

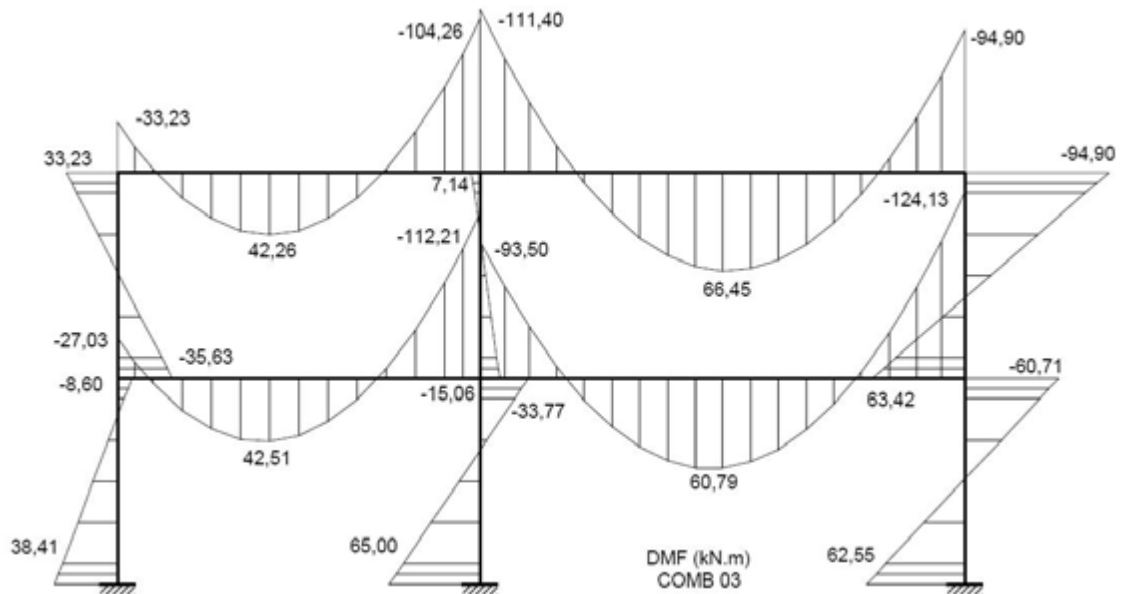



Figura A.3.13 –Diagrama de Momento Fletor (DMF) - Combinação 03

| | | | | | |
|--|---|------------|------------|-------------|------|
|  UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | Título | Página | 193 | | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | | |
| | | Referência | Controlado | Responsável | Data |
| | A.3 - Caso 3 Pórtico Rígido de Dois Pavimentos | Preparado | CAP | 06/02/11 | |
| | | Verificado | CAP | | |
| Aprovado | | | | | |

A.3.6 Análise de segunda ordem (ASO)

A.3.6.1 Análise de segunda ordem de acordo com o MAES

Na Figura A.3.14 apresentam-se as estruturas “nt” e “lt” de acordo com o Anexo D da ABNT NBR8800:2008.

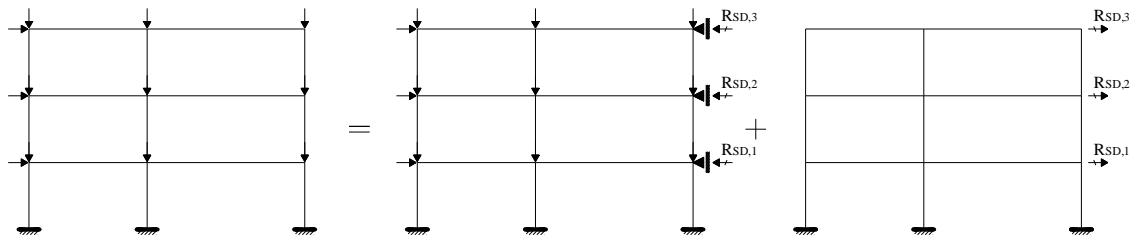


Figura A.3.14 – Modelo para análise - estrutura “nt” e “lt”

As estruturas “nt” e “lt” são analisadas em análise de primeira ordem. A seguir são apresentados os diagramas de esforços solicitantes para os dois casos, que foram modelados no SAP2000.

A.3.6.1.1 Esforços solicitantes na estrutura “nt”

a) Diagramas de Esforço Normal (DEN)

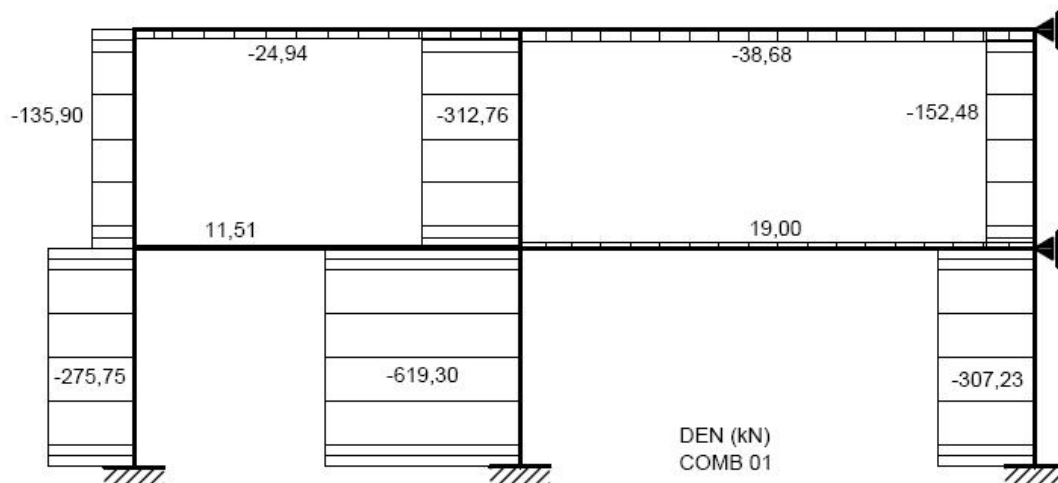



Figura A.3.15 - Diagrama de Esforço Normal (DEN) - “nt” - Combinação 01

| | | | | |
|--|--|------------|-------------|----------|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | Página | 194 | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | |
| | | Referência | Responsável | Data |
| | A.3 - Caso 3 Pórtico Rígido de Dois Pavimentos | Preparado | CAP | 06/02/11 |
| | | Verificado | CAP | |
| | | Aprovado | | |

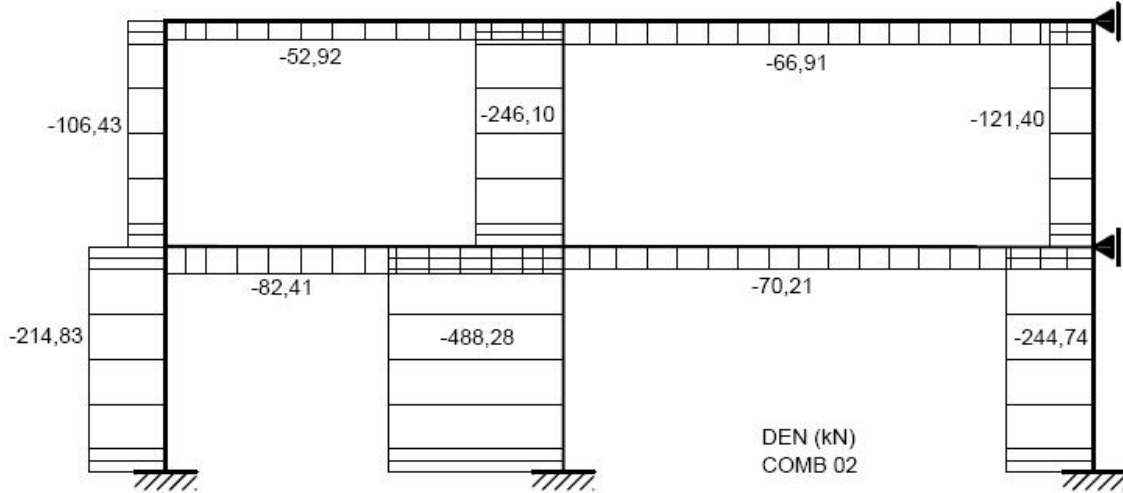


Figura A.3.16 - Diagrama de Esforço Normal (DEN) - “nt” - Combinação 02

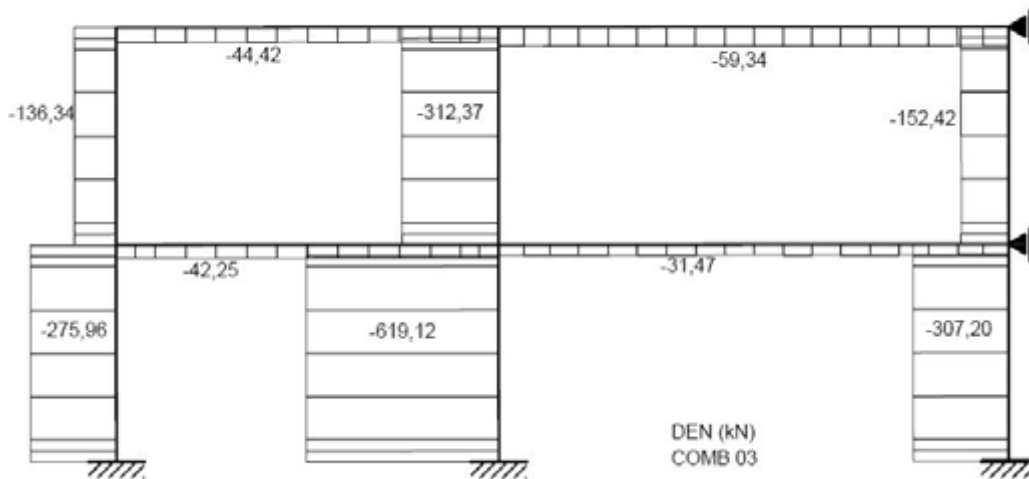



Figura A.3.17 - Diagrama de Esforço Normal (DEN) - “nt” - Combinação 03

| | | | | | |
|--|---|------------|-------------|----------|--|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | Página | 195 | | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | | |
| | | Referência | Responsável | Data | |
| | A.3 - Caso 3 Pórtico Rígido de Dois Pavimentos | Preparado | CAP | 06/02/11 | |
| | | Verificado | CAP | | |
| | | Aprovado | | | |

b) Diagramas de Esforço Cortante (DEC)

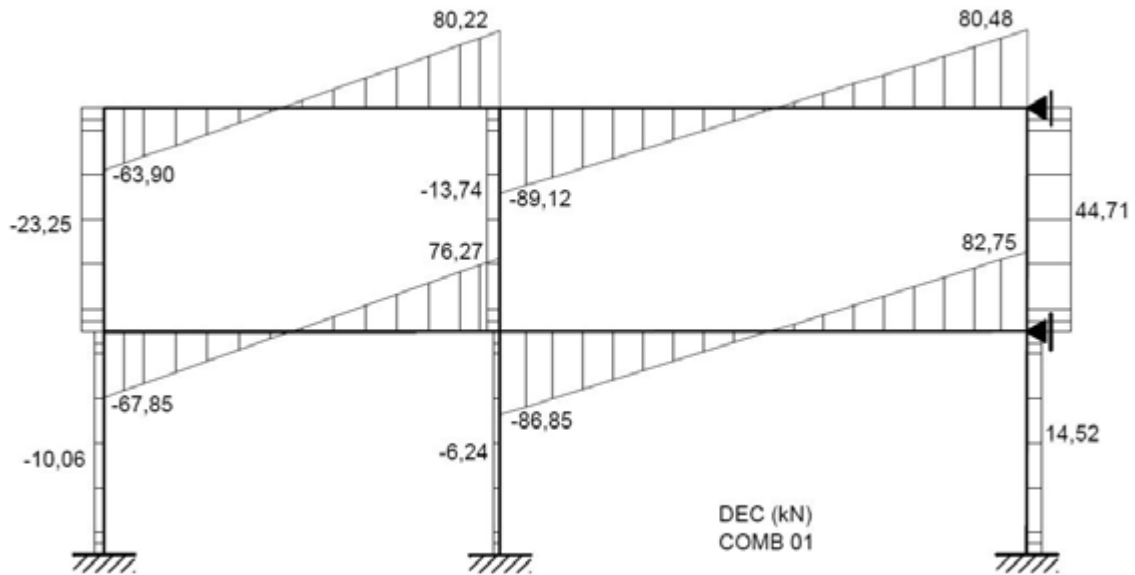


Figura A.3.18 - Diagrama de Esforço Cortante (DEC) - “nt” - Combinação 01

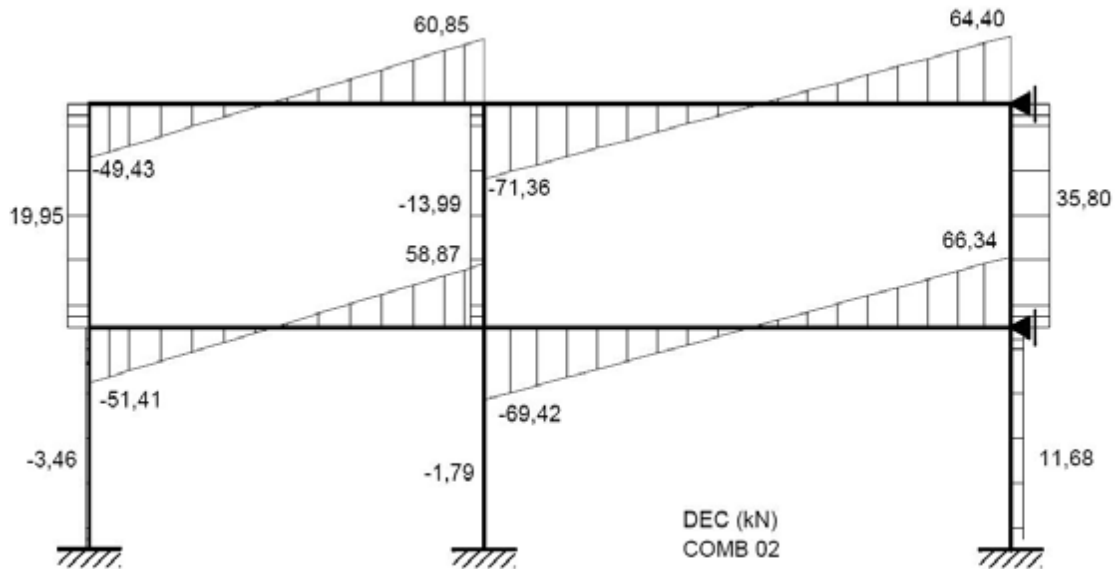



Figura A.3.19 - Diagrama de Esforço Cortante (DEC) - “nt” - Combinação 02

| | | | | | |
|--|---|------------|-------------|----------|--|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | Página | 196 | | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | | |
| | | Referência | Responsável | Data | |
| | A.3 - Caso 3 Pórtico Rígido de Dois Pavimentos | Preparado | CAP | 06/02/11 | |
| | | Verificado | CAP | | |
| Aprovado | | | | | |

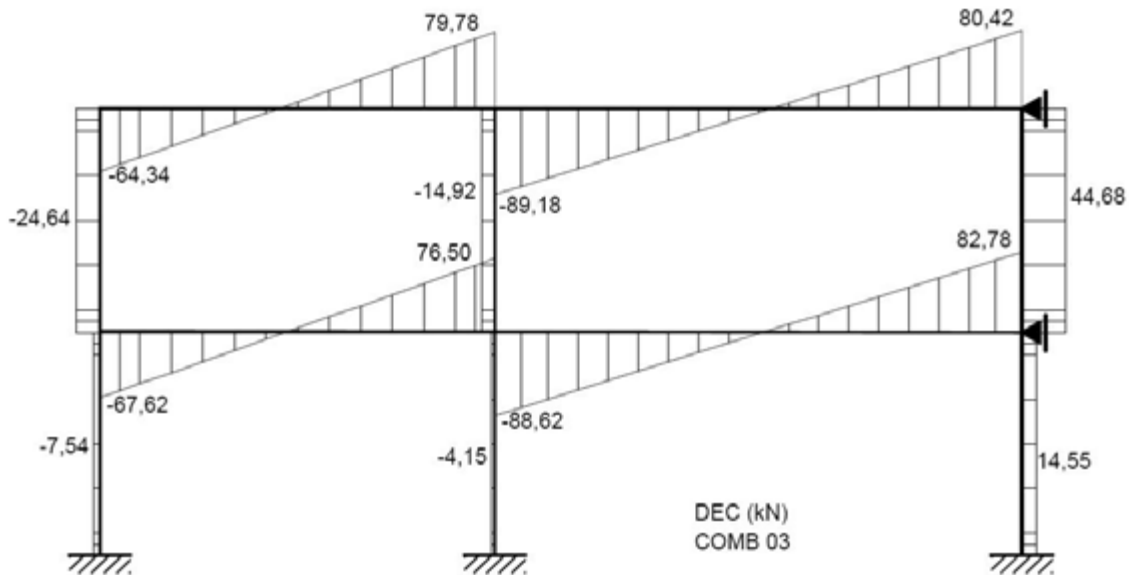


Figura A.3.20 - Diagrama de Esforço Cortante (DEC) - “nt” - Combinação 03

c) Diagramas de Momento Fletor (DMF)

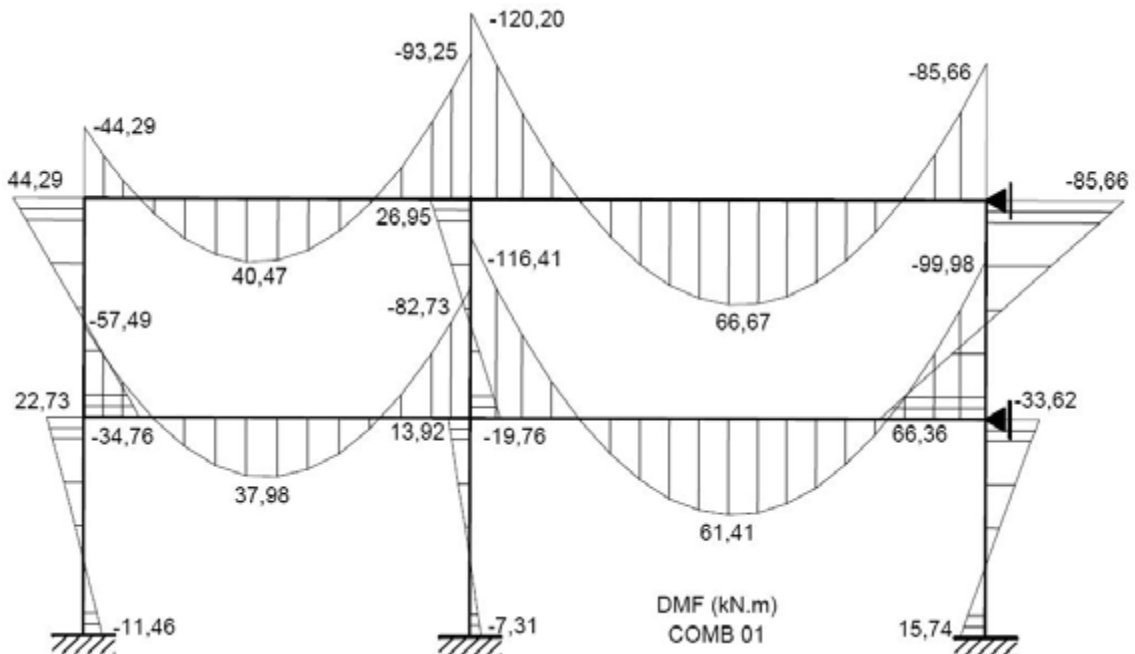



Figura A.3.21 - Diagrama de Momento Fletor (DMF) - “nt” - Combinação 01

| | | | | |
|--|---|------------|-------------|----------|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | Página | 197 | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | |
| | Referência | Controlado | Responsável | Data |
| | A.3 - Caso 3 | Preparado | CAP | 06/02/11 |
| | Pórtico Rígido de Dois Pavimentos | Verificado | CAP | |
| | Aprovado | | | |

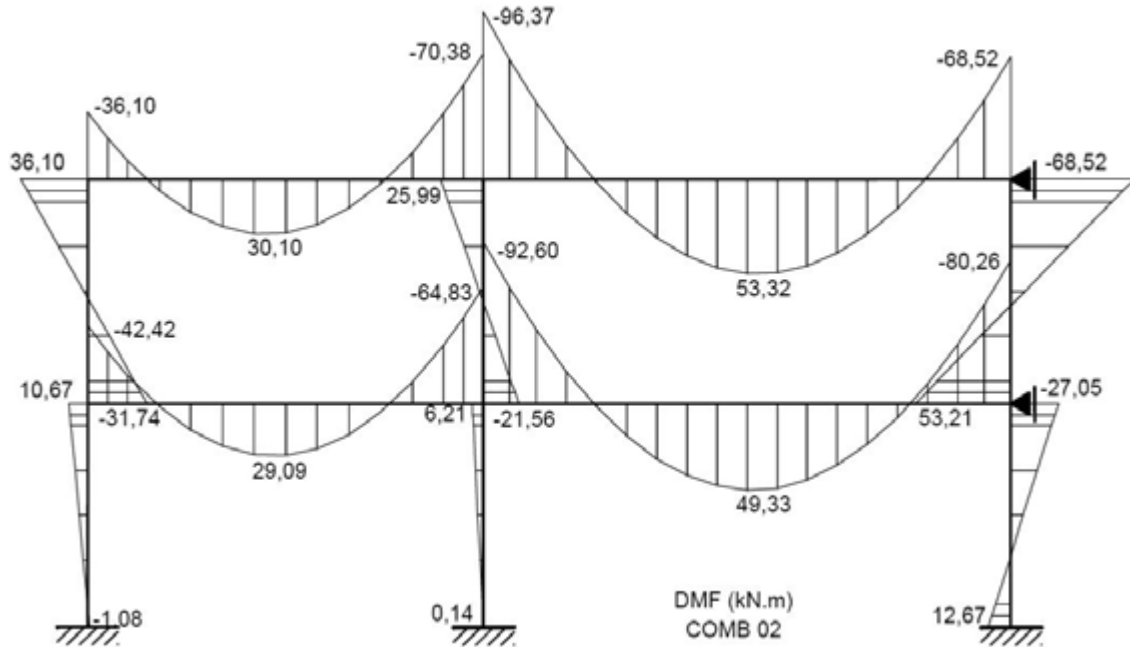


Figura A.3.22 - Diagrama de Momento Fletor (DMF) - “nt” - Combinação 02

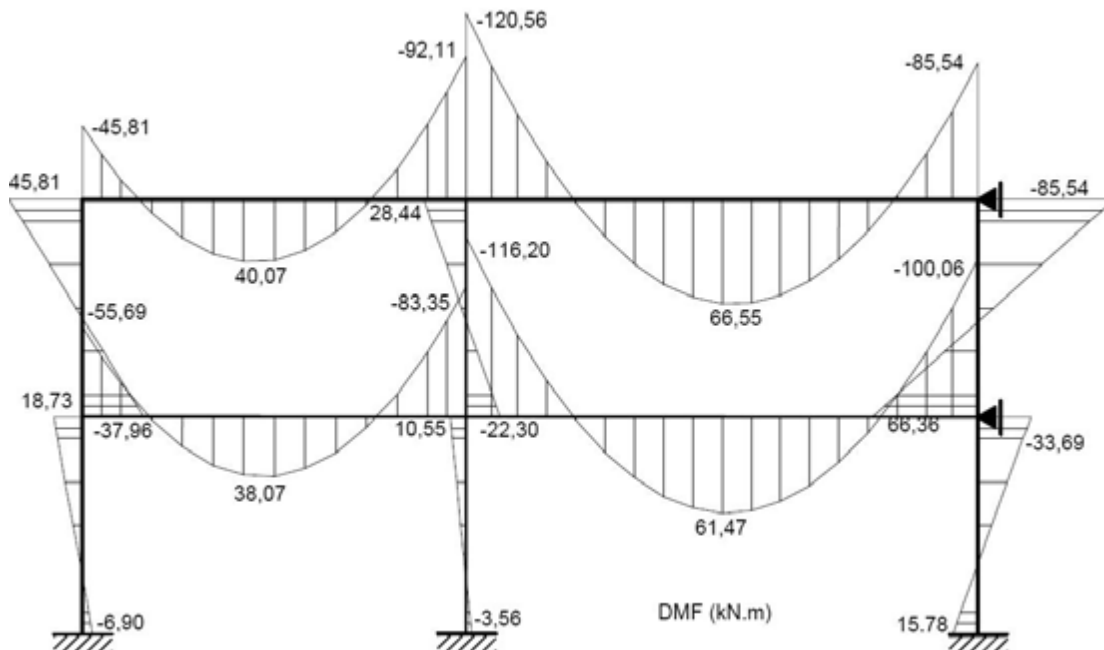



Figura A.3.23 - Diagrama de Momento Fletor (DMF) - “nt” - Combinação 03

| | | | | |
|--|--|------------|-------------|----------|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | Página | 198 | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | |
| | | Controle | Responsável | Data |
| | Referência A.3 - Caso 3 Pórtico Rígido de Dois Pavimentos | Preparado | CAP | 06/02/11 |
| | | Verificado | CAP | |
| Aprovado | | | | |

A.3.6.1.2 Esforços solicitantes na estrutura “It”

Nos nós 8 e 9 da estrutura “It” aplicam-se as reações dos apoios laterais da estrutura “nt” de acordo com a Tabela A.3.4.

Tabela A.3.3 - Reações nodais (R_{Sd}) (kN)

| Nó | R_{Sd1} | R_{Sd2} | R_{Sd3} |
|----|-----------|-----------|-----------|
| 8 | 11,2 | 94,33 | 61,6 |
| 9 | -6,03 | 31,11 | 14,67 |

a) Diagramas de Esforço Normal (DEN)

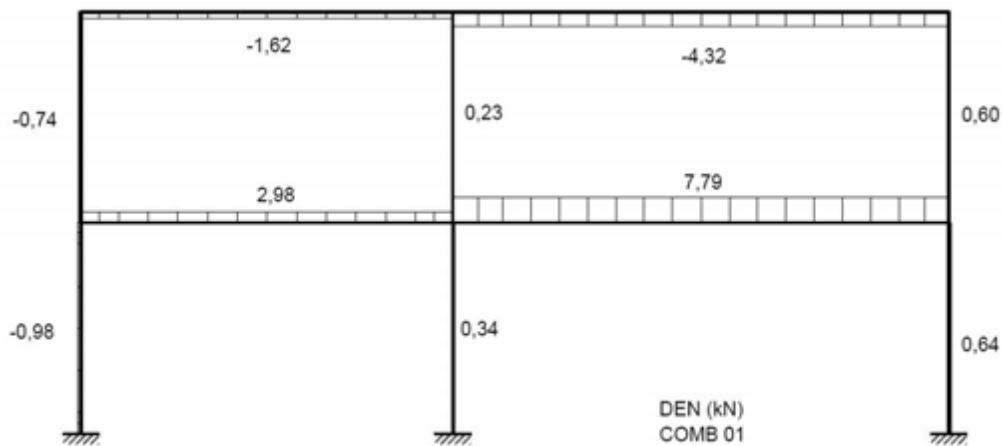



Figura A.3.24 - Diagrama de Esforço Normal (DEN) - “It” - Combinação 01

| | | | | | |
|--|---|-----------------------------------|-------------|------|----------|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | Página | 199 | | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | | |
| | | Controle | Responsável | Data | |
| | Referência | A.3 - Caso 3 | Preparado | CAP | 06/02/11 |
| | | Pórtico Rígido de Dois Pavimentos | Verificado | CAP | |
| Aprovado | | | | | |

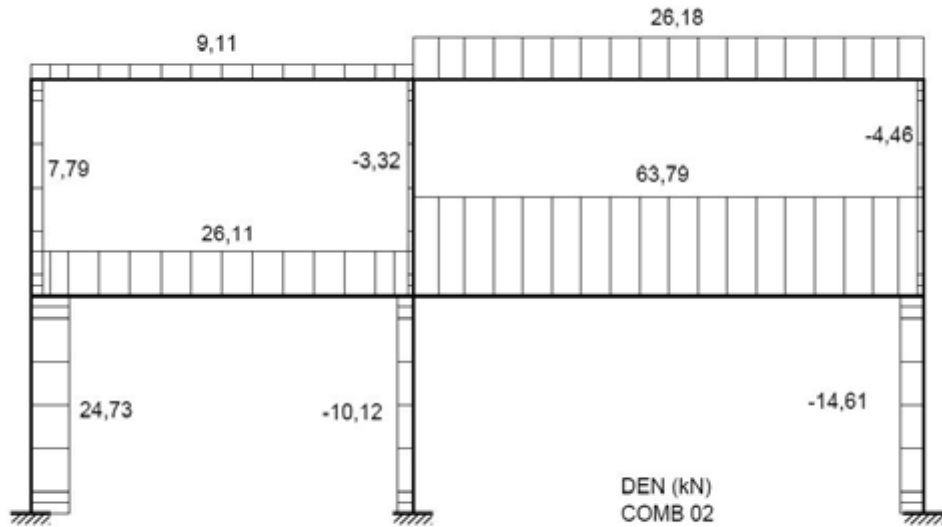


Figura A.3.25 - Diagrama de Esforço Normal (DEN) - "It" - Combinação 02

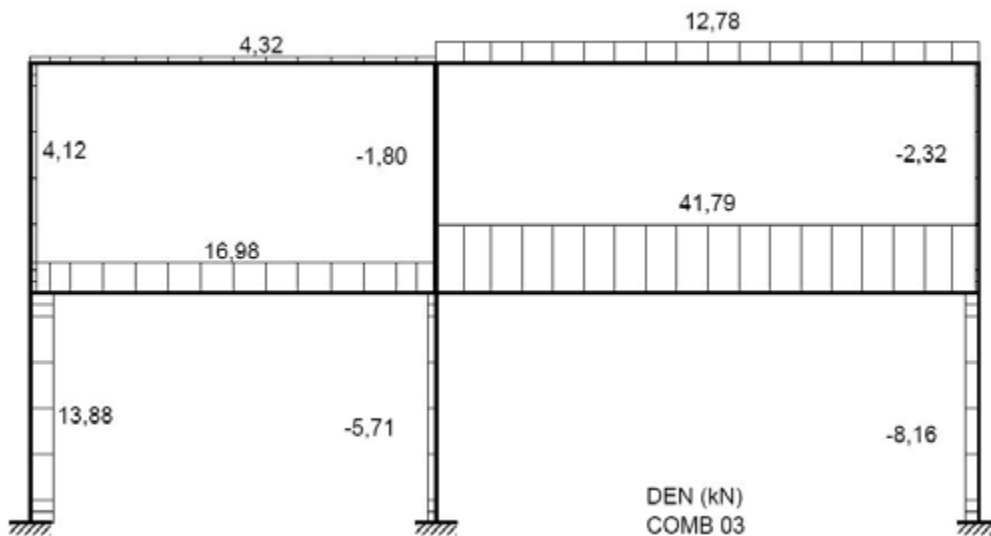



Figura A.3.26 - Diagrama de Esforço Normal (DEN) - "It" - Combinação 03

| | | | | | |
|--|---|------------|-------------|----------|--|
|  UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | Título | Página | 200 | | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | | |
| | | Referência | Responsável | Data | |
| | A.3 - Caso 3 Pórtico Rígido de Dois Pavimentos | Preparado | CAP | 06/02/11 | |
| | | Verificado | CAP | | |
| Aprovado | | | | | |

b) Diagramas de Esforço Cortante (DEC)

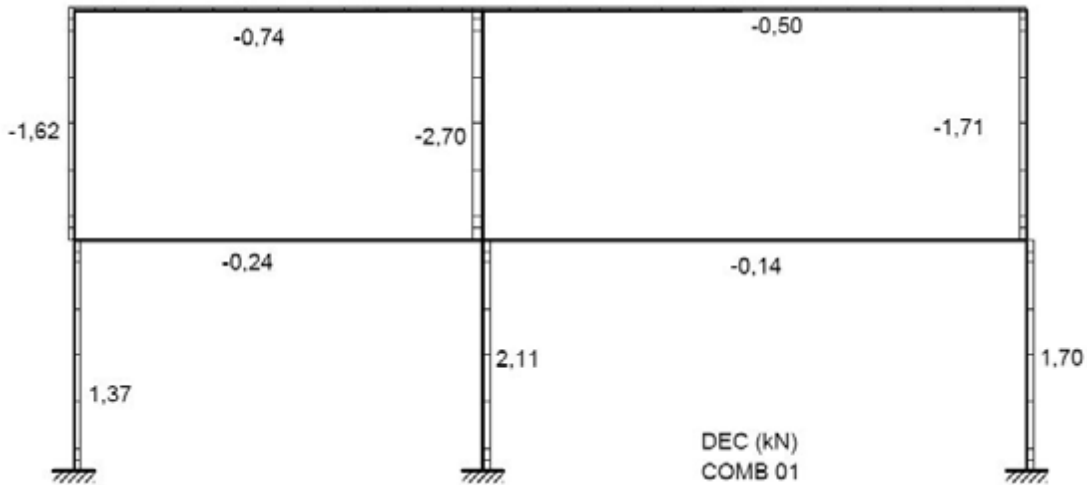


Figura A.3.27 - Diagrama de Esforço Cortante (DEC) - "It" - Combinação 01

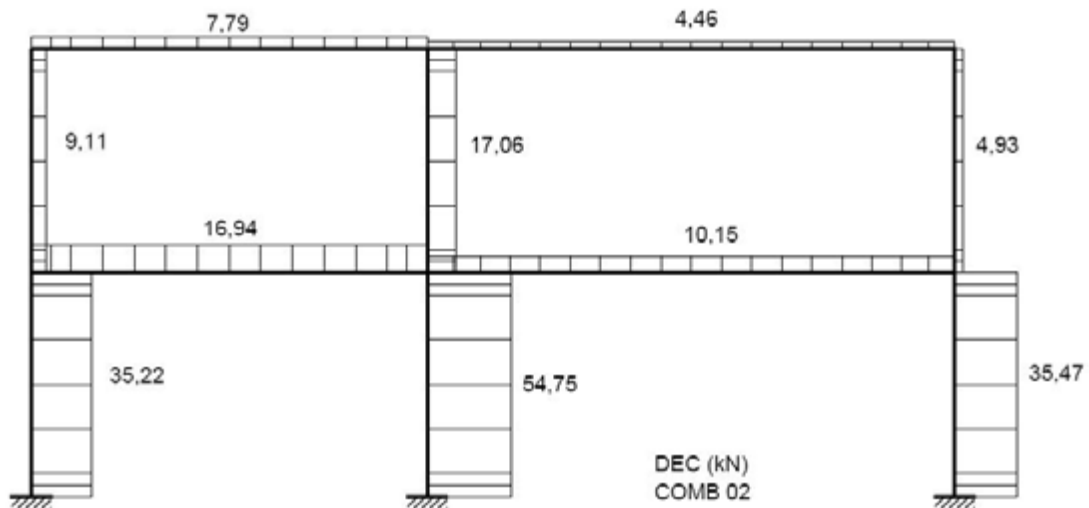



Figura A.3.28 - Diagrama de Esforço Cortante (DEC) - "It" - Combinação 02

| | | | | | |
|--|---|-----------------------------------|-------------|------|----------|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | Página | 201 | | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | | |
| | | Controle | Responsável | Data | |
| | Referência | A.3 - Caso 3 | Preparado | CAP | 06/02/11 |
| | | Pórtico Rígido de Dois Pavimentos | Verificado | CAP | |
| Aprovado | | | | | |

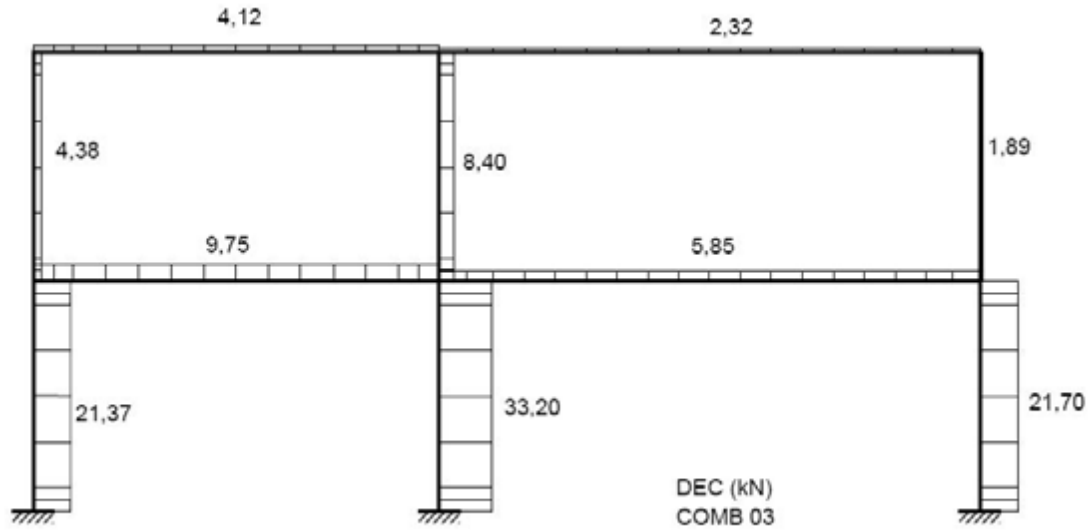
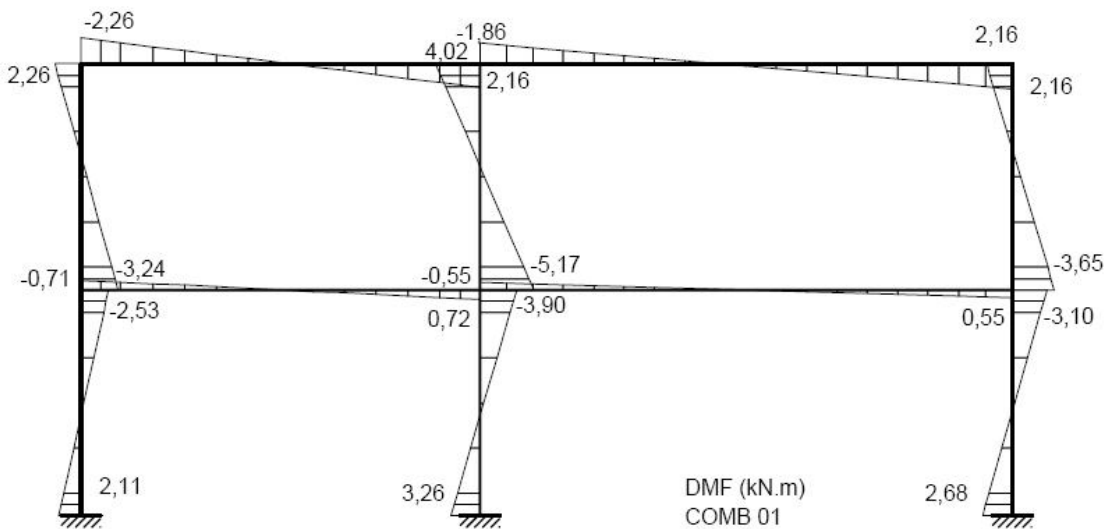



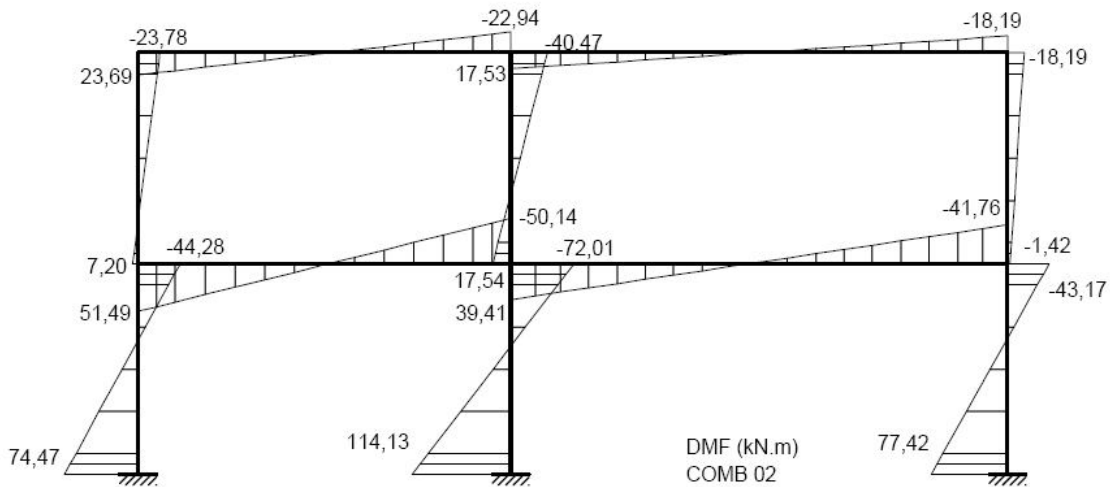
Figura A.3.29 - Diagrama de Esforço Cortante (DEC) - "It" - Combinação 03

c) Diagramas de Momento Fletor (DMF)

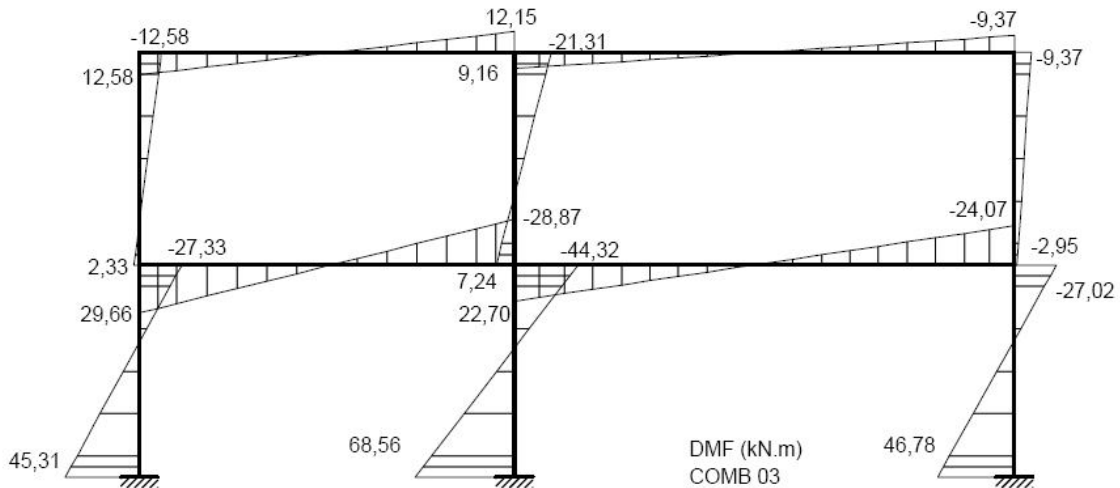


A.3.30 - Diagrama de Momento Fletor (DMF) - "It" - Combinação 01

| | | | | |
|--|---|------------|-------------|----------|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | Página | 202 | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | |
| | Referência | Controlado | Responsável | Data |
| | A.3 - Caso 3 | Preparado | CAP | 06/02/11 |
| | Pórtico Rígido de Dois Pavimentos | Verificado | CAP | |
| | Aprovado | | | |



A.3.31 - Diagrama de Momento Fletor (DMF) - “It” - Combinação 02



A.3.32 - Diagrama de Momento Fletor (DMF) - “It” - Combinação 03

A.3.6.1.3 Cálculo dos coeficientes B_1 e B_2

Nas Tabelas A.3.4, A.3.5 e A.3.6 mostram-se os valores dos coeficientes B_1 para cada barra da estrutura nas diferentes combinações de ações.


| | | | | |
|--|--|------------|-------------|----------|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | Página | 203 | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | |
| | | Controle | Responsável | Data |
| | Referência A.3 - Caso 3 Pórtico Rígido de Dois Pavimentos | Preparado | CAP | 06/02/11 |
| | | Verificado | CAP | |
| | | Aprovado | | |

Tabela A.3.4 - Coeficiente B_1 - Combinação 01


| Barra | I_x (cm ⁴) | L_x (cm) | K_x | N_{ex} | N_{SD1} | C_m | B_1 |
|-------|--------------------------|------------|-------|----------|-----------|--------|-------|
| 1 | 7660 | 340 | 1 | 13066,53 | 276,73 | 0,3983 | 1,00 |
| 2 | 5298 | 340 | 1 | 9037,40 | 618,96 | 0,3899 | 1,00 |
| 3 | 7660 | 340 | 1 | 13066,53 | 306,59 | 0,4127 | 1,00 |
| 4 | 7660 | 340 | 1 | 13066,53 | 136,64 | 0,2861 | 1,00 |
| 5 | 5298 | 340 | 1 | 9037,40 | 312,53 | 0,3067 | 1,00 |
| 6 | 7660 | 340 | 1 | 13066,53 | 151,88 | 0,2901 | 1,00 |
| 7 | 8581 | 600 | 1 | 4700,29 | 14,49 | 1,0000 | 1,00 |
| 8 | 8581 | 800 | 1 | 2643,91 | 26,79 | 1,0000 | 1,01 |
| 9 | 8581 | 600 | 1 | 4700,29 | 26,56 | 1,0000 | 1,01 |
| 10 | 8581 | 800 | 1 | 2643,91 | 43 | 1,0000 | 1,02 |

Tabela A.3.5 - Coeficiente B_1 - Combinação 02

| Barra | I_x (cm ⁴) | L_x (cm) | K_x | N_{ex} | N_{SD1} | C_m | B_1 |
|-------|--------------------------|------------|-------|----------|-----------|--------|-------|
| 1 | 7660 | 340 | 1 | 13066,53 | 190,1 | 0,5595 | 1,00 |
| 2 | 5298 | 340 | 1 | 9037,40 | 498,4 | 0,6090 | 1,00 |
| 3 | 7660 | 340 | 1 | 13066,53 | 259,35 | 0,4126 | 1,00 |
| 4 | 7660 | 340 | 1 | 13066,53 | 98,64 | 0,1818 | 1,00 |
| 5 | 5298 | 340 | 1 | 9037,40 | 249,42 | 0,2682 | 1,00 |
| 6 | 7660 | 340 | 1 | 13066,53 | 125,86 | 0,2894 | 1,00 |
| 7 | 8581 | 600 | 1 | 4700,29 | 56,3 | 1,0000 | 1,01 |
| 8 | 8581 | 800 | 1 | 2643,91 | 6,42 | 1,0000 | 1,00 |
| 9 | 8581 | 600 | 1 | 4700,29 | 43,81 | 1,0000 | 1,01 |
| 10 | 8581 | 800 | 1 | 2643,91 | 40,73 | 1,0000 | 1,02 |

Tabela A.3.6 - Coeficiente B_1 - Combinação 03

| Barra | I_x (cm ⁴) | L_x (cm) | K_x | N_{ex} | N_{SD1} | C_m | B_1 |
|-------|--------------------------|------------|-------|----------|-----------|--------|-------|
| 1 | 7660 | 340 | 1 | 13066,53 | 262,08 | 0,4526 | 1,00 |
| 2 | 5298 | 340 | 1 | 9037,40 | 624,83 | 0,4650 | 1,00 |
| 3 | 7660 | 340 | 1 | 13066,53 | 315,36 | 0,4126 | 1,00 |
| 4 | 7660 | 340 | 1 | 13066,53 | 132,22 | 0,2685 | 1,00 |
| 5 | 5298 | 340 | 1 | 9037,40 | 314,17 | 0,2864 | 1,00 |
| 6 | 7660 | 340 | 1 | 13066,53 | 154,74 | 0,2897 | 1,00 |
| 7 | 8581 | 600 | 1 | 4700,29 | 25,27 | 1,0000 | 1,01 |
| 8 | 8581 | 800 | 1 | 2643,91 | 10,32 | 1,0000 | 1,00 |
| 9 | 8581 | 600 | 1 | 4700,29 | 40,1 | 1,0000 | 1,01 |
| 10 | 8581 | 800 | 1 | 2643,91 | 46,56 | 1,0000 | 1,02 |

| | | | | | |
|--|--|-----------------------------------|-------------|------|----------|
|  UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | Título | Página | 204 | | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | | |
| | | Controle | Responsável | Data | |
| | Referência | A.3 - Caso 3 | Preparado | CAP | 06/02/11 |
| | | Pórtico Rígido de Dois Pavimentos | Verificado | CAP | |
| Aprovado | | | | | |

Como a estrutura foi classificada como de pequena deslocabilidade não se faz necessário um novo cálculo dos coeficientes B_2 para cada nível, sendo mantidos os valores apresentados na Tabela A.3.2.

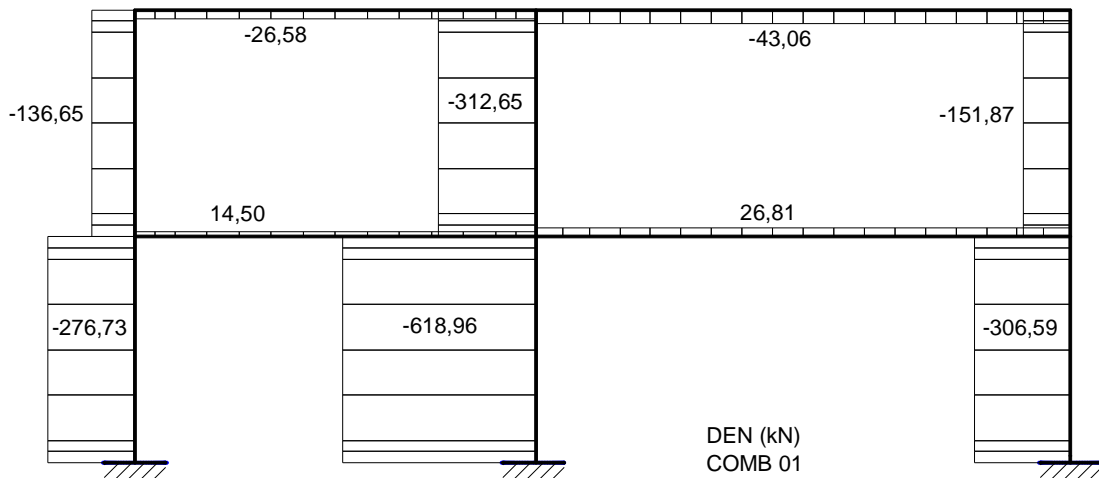
A.3.6.1.4 Esforços solicitantes

De acordo com o método da amplificação dos esforços solicitantes (MAES) em cada andar o momento fletor (M_{sd}) e a força axial (N_{sd}) solicitantes de cálculo devem ser determinados por:


$$M_{sd} = B_1 M_{nt} + B_2 M_{lt} \quad (\text{A.3.3})$$

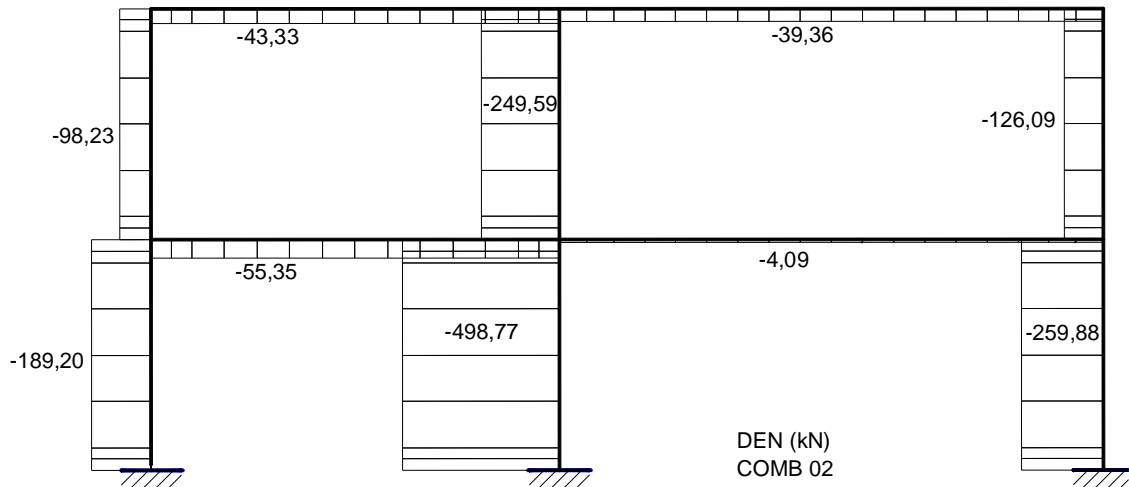
$$N_{sd} = N_{nt} + B_2 N_{lt} \quad (\text{A.3.4})$$

a) Diagramas de Esforço Normal (DEN)

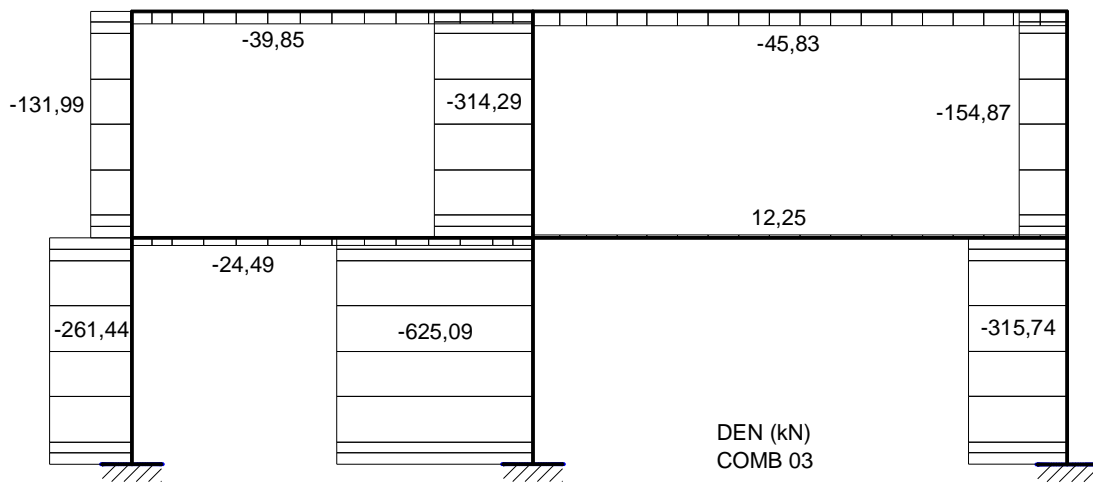


A.3.33 - Diagrama de Esforço Normal (DEN) - “MAES” - Combinação 01


| | | | | |
|--|--|------------|-------------|----------|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | Página | 205 | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | |
| | | Referência | Responsável | Data |
| | A.3 - Caso 3 Pórtico Rígido de Dois Pavimentos | Preparado | CAP | 06/02/11 |
| | | Verificado | CAP | |
| | | Aprovado | | |



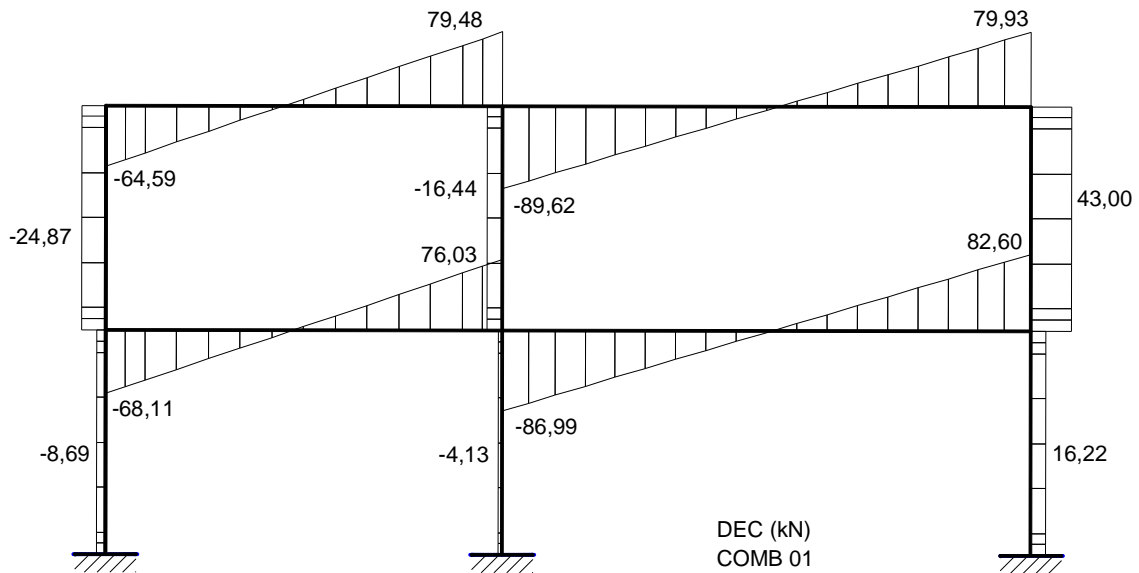
A.3.34 - Diagrama de Esforço Normal (DEN) - “MAES” - Combinação 02



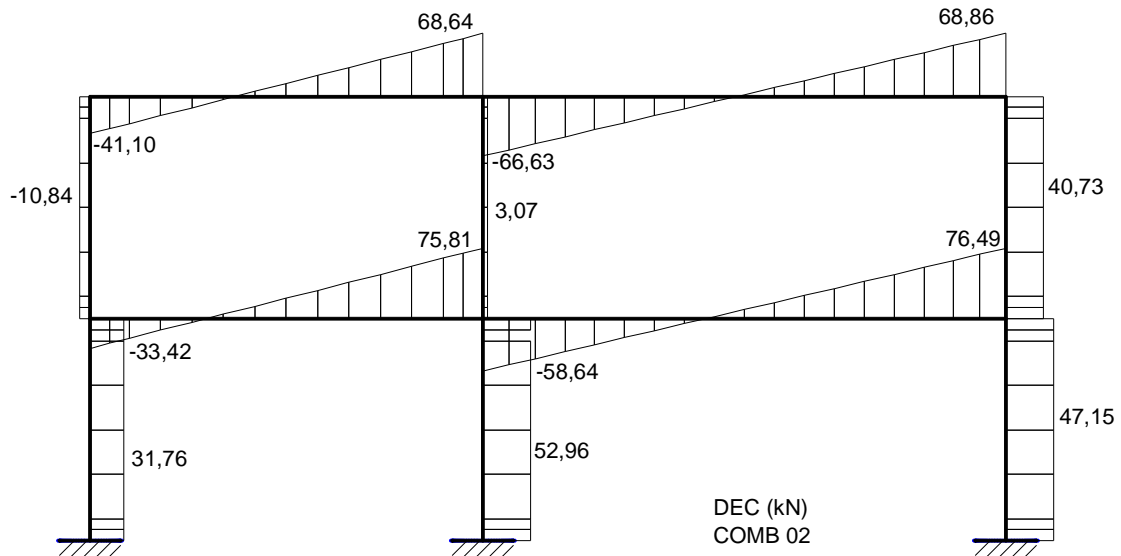
A.3.35 - Diagrama de Esforço Normal (DEN) - “MAES” - Combinação 03

| | | | | |
|--|--|------------|-------------|----------|
|  UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | Título | Página | 206 | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | |
| | Referência | Controlado | Responsável | Data |
| | A.3 - Caso 3 | Preparado | CAP | 06/02/11 |
| | Pórtico Rígido de Dois Pavimentos | Verificado | CAP | |
| | Aprovado | | | |


b) Diagrama de Esforço Cortante (DEC)

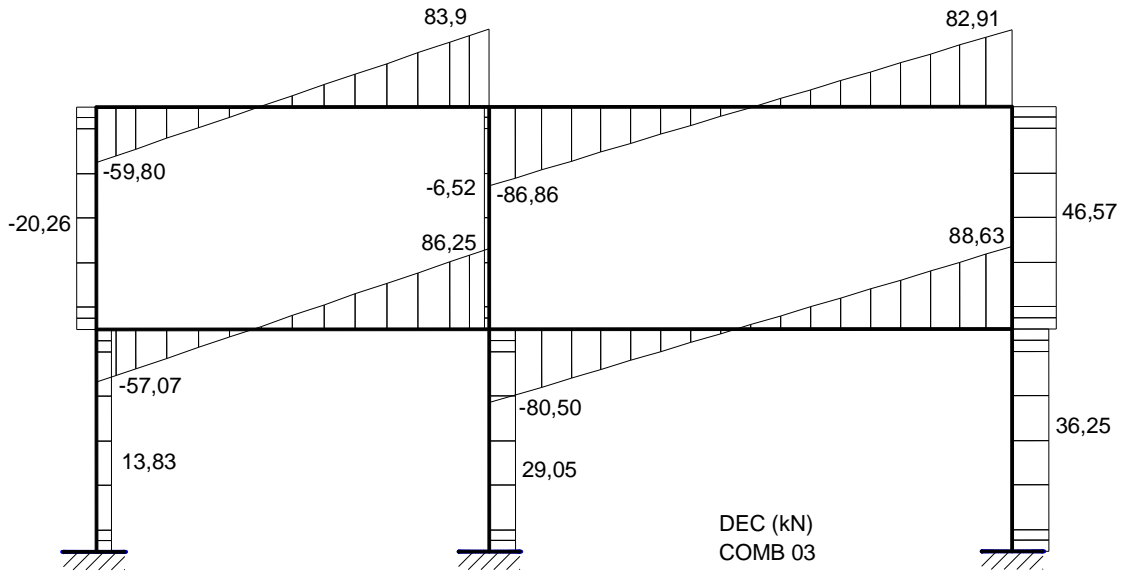


A.3.36 - Diagrama de Esforço Cortante (DEC) - “MAES” - Combinação 01



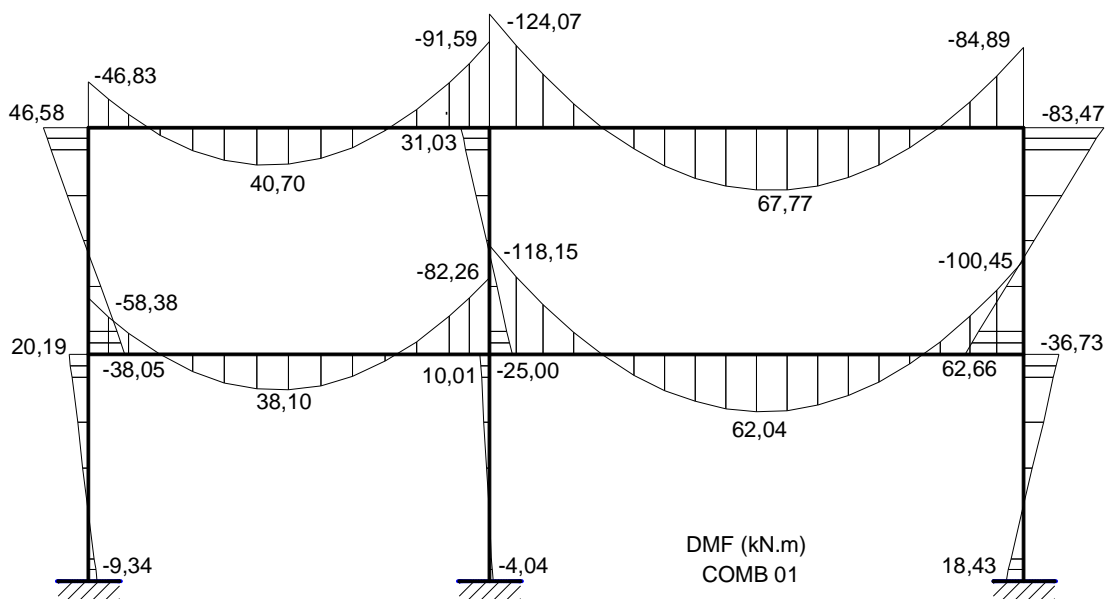
A.3.37 - Diagrama de Esforço Cortante (DEC) - “MAES” - Combinação 02

| | | | | |
|--|---|------------|-------------|----------|
|  UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | Título | Página | 207 | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | |
| | Referência | Controlado | Responsável | Data |
| | A.3 - Caso 3 | Preparado | CAP | 06/02/11 |
| | Pórtico Rígido de Dois Pavimentos | Verificado | CAP | |
| | Aprovado | | | |




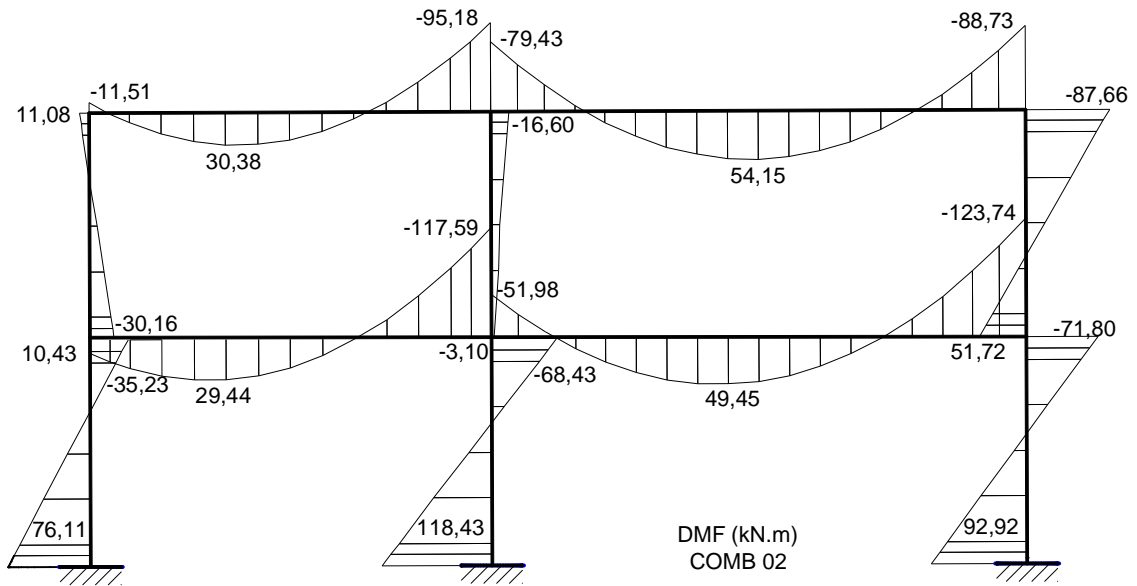
A.3.38 - Diagrama de Esforço Cortante (DEC) - “MAES” - Combinação 03

c) Diagrama de Momento Fletor (DMF)

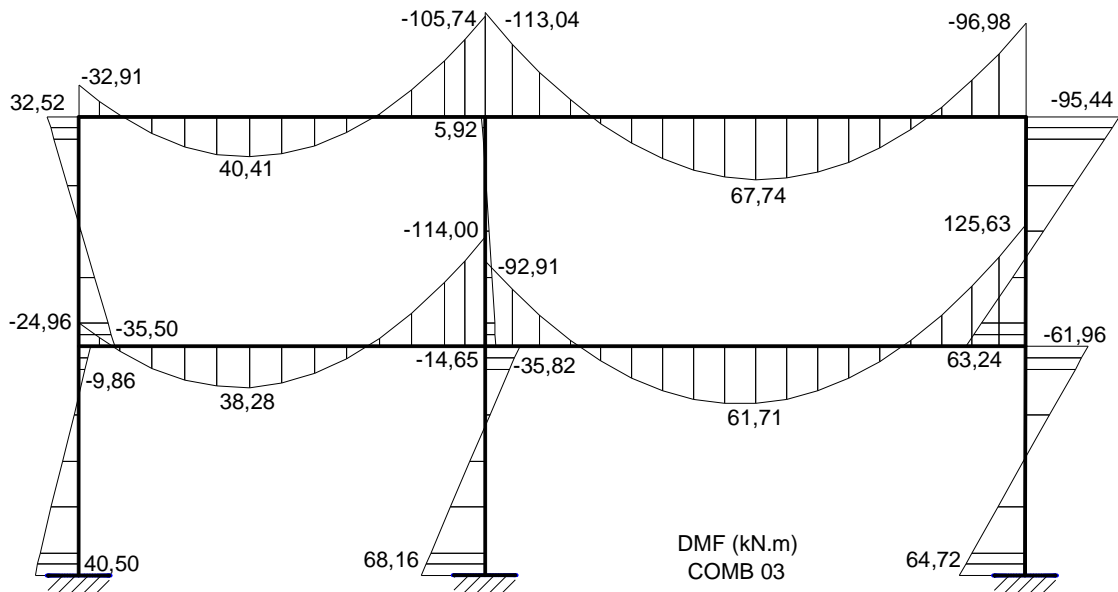


A.3.39 - Diagrama de Momento Fletor (DMF) - “MAES” - Combinação 01


| | | | | | |
|--|--|------------|--------------|-------------|------|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | Página | 208 | | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | | |
| | | Referência | A.3 - Caso 3 | Responsável | Data |
| | Pórtico Rígido de Dois Pavimentos | Preparado | CAP | 06/02/11 | |
| | | Verificado | CAP | | |
| | | Aprovado | | | |



A.3.40 - Diagrama de Momento Fletor (DMF) - “MAES” - Combinação 02



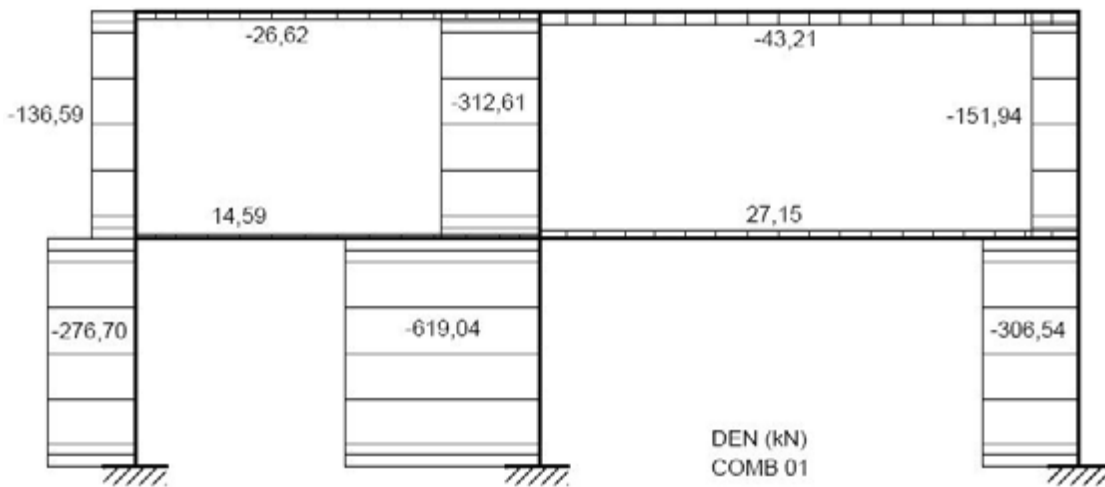
A.3.41 - Diagrama de Momento Fletor (DMF) - “MAES” - Combinação 01

| | | | | | |
|--|---|-----------------------------------|-------------|------|----------|
|  UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | Título | Página | 209 | | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | | |
| | | Controle | Responsável | Data | |
| | Referência | A.3 - Caso 3 | Preparado | CAP | 06/02/11 |
| | | Pórtico Rígido de Dois Pavimentos | Verificado | CAP | |
| Aprovado | | | | | |

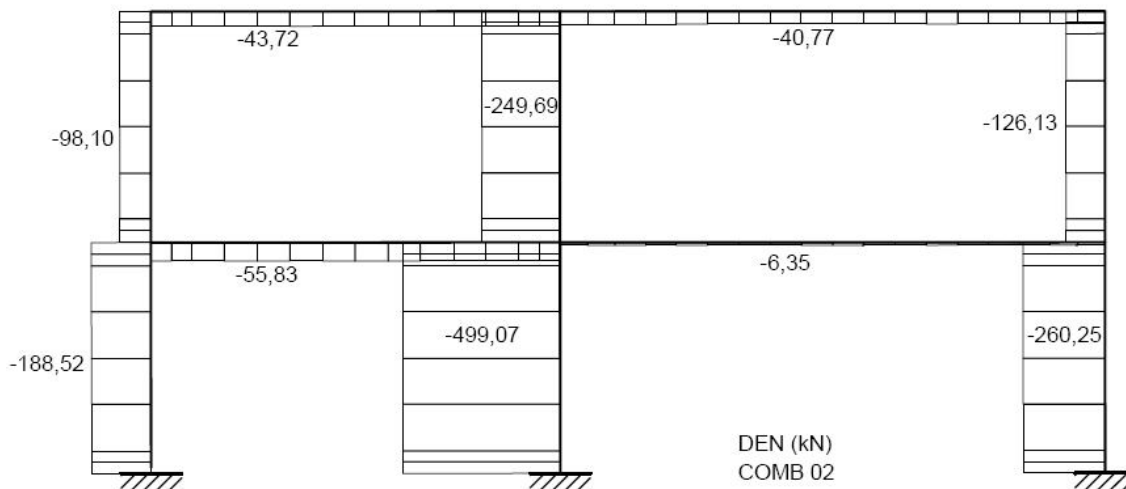
A.3.6.2 Análise de segunda ordem com auxílio do programa SAP2000

A seguir apresentam-se os diagramas de esforços solicitantes para uma análise de segunda ordem (ASO). Esta análise foi realizada com auxílio do programa SAP2000.


a) Diagramas de Esforço Normal (DEN)

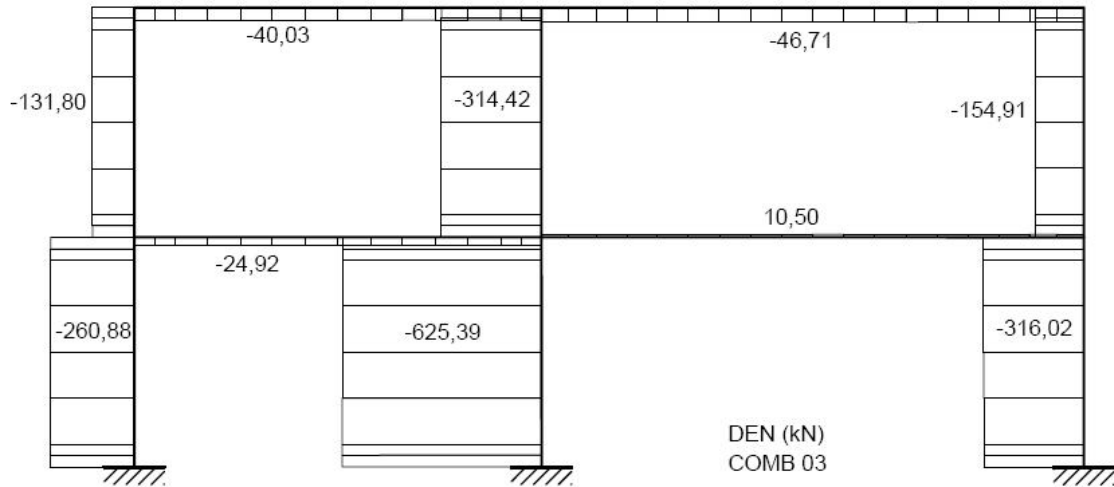


A.3.42 - Diagrama de Esforço Normal (DEN) - Combinação 01



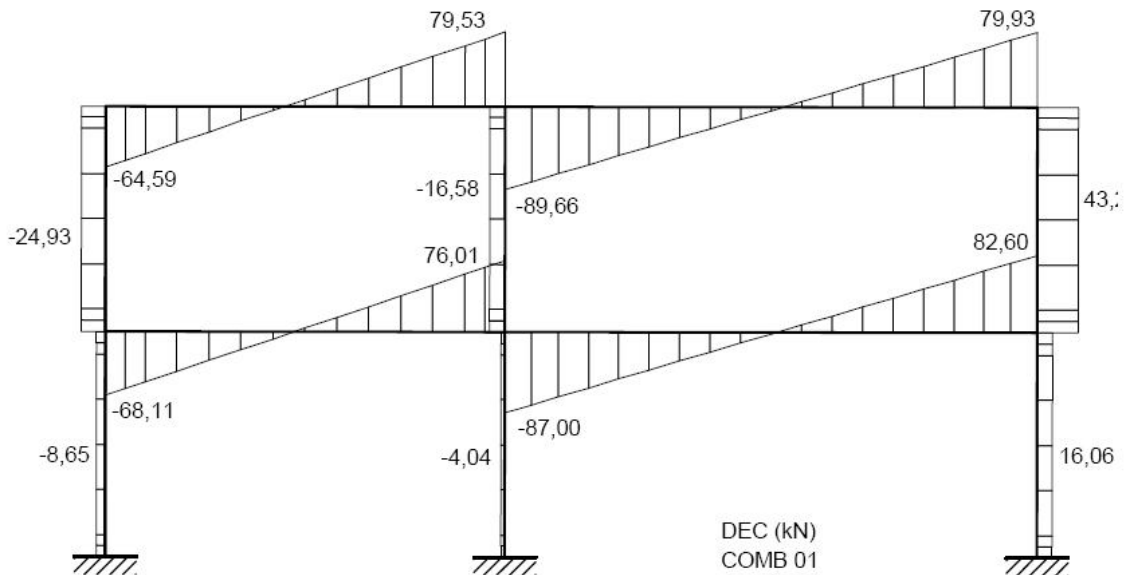
A.3.43 - Diagrama de Esforço Normal (DEN) - Combinação 02

| | | | | | |
|--|--|-----------------------------------|-------------|------|----------|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | Página | 210 | | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | | |
| | | Controle | Responsável | Data | |
| | Referência | A.3 - Caso 3 | Preparado | CAP | 06/02/11 |
| | | Pórtico Rígido de Dois Pavimentos | Verificado | CAP | |
| Aprovado | | | | | |




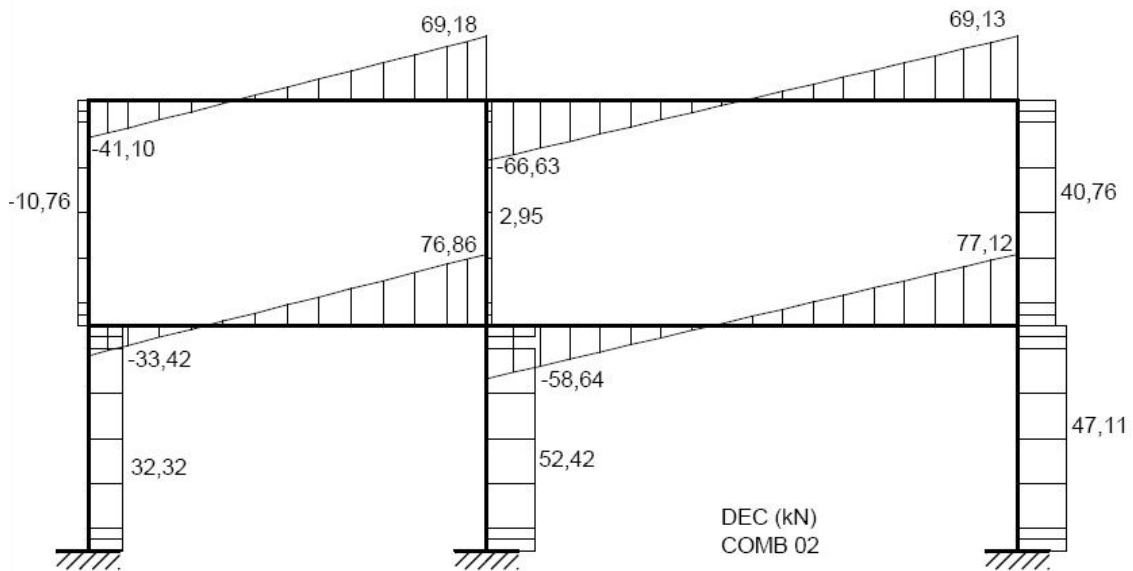
A.3.44 - Diagrama de Esforço Normal (DEN) - Combinação 03

b) Diagramas de Esforço Cortante (DEC)

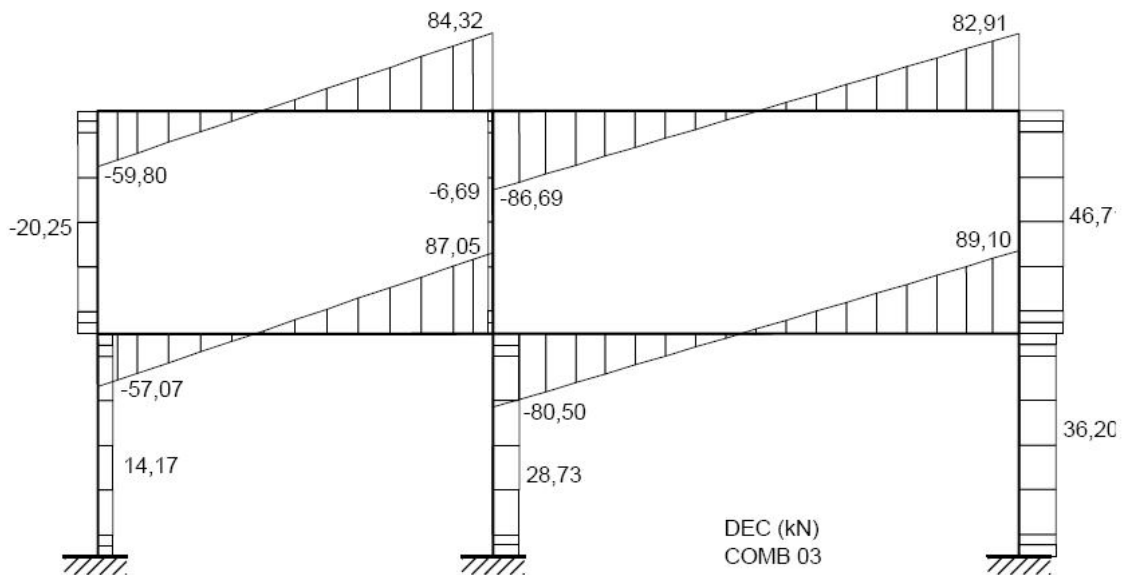


A.3.45 - Diagrama de Esforço Cortante (DEC) - Combinação 01


| | | | | | |
|--|--|------------|-------------|----------|--|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | Página | 211 | | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | | |
| | | Referência | Responsável | Data | |
| | A.3 - Caso 3 | Preparado | CAP | 06/02/11 | |
| | Pórtico Rígido de Dois Pavimentos | Verificado | CAP | | |
| | Aprovado | | | | |



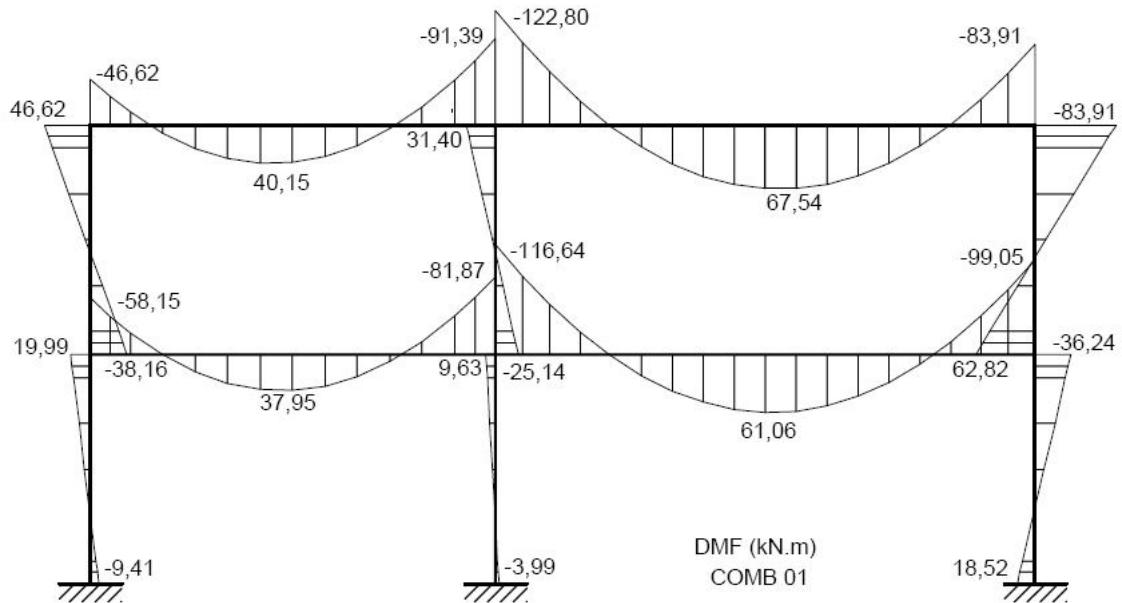
A.3.46 - Diagrama de Esforço Cortante (DEC) - Combinação 02



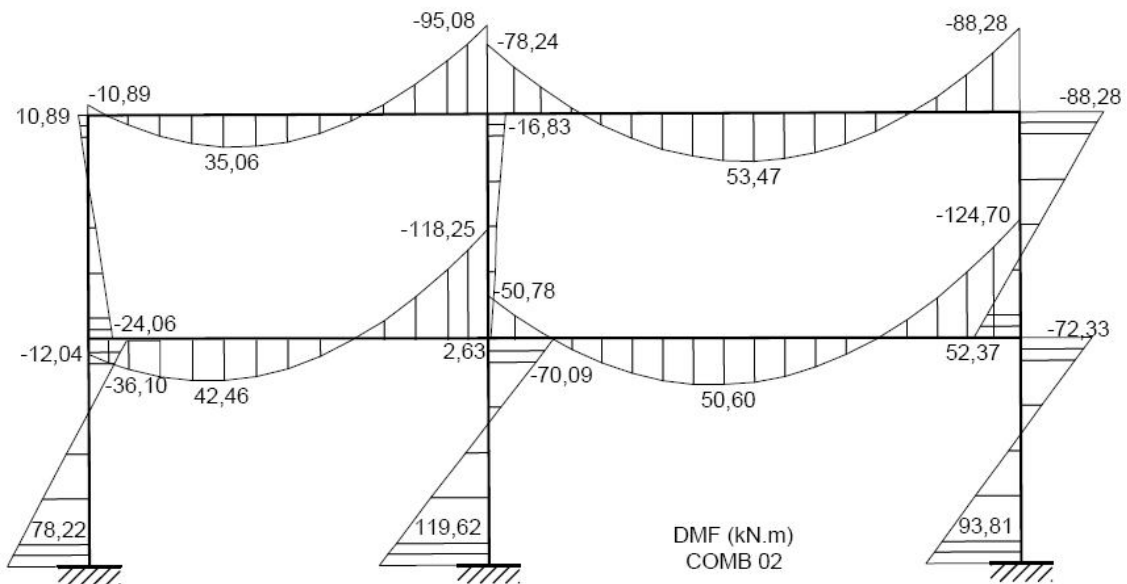
A.3.47 - Diagrama de Esforço Cortante (DEC) - Combinação 03

| | | | | |
|--|---|------------|-------------|----------|
|  UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | Título | Página | 212 | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | |
| | | Controle | Responsável | Data |
| | Referência A.3 - Caso 3 Pórtico Rígido de Dois Pavimentos | Preparado | CAP | 06/02/11 |
| | | Verificado | CAP | |
| Aprovado | | | | |


c) Diagramas de Momento Fletor (DMF)

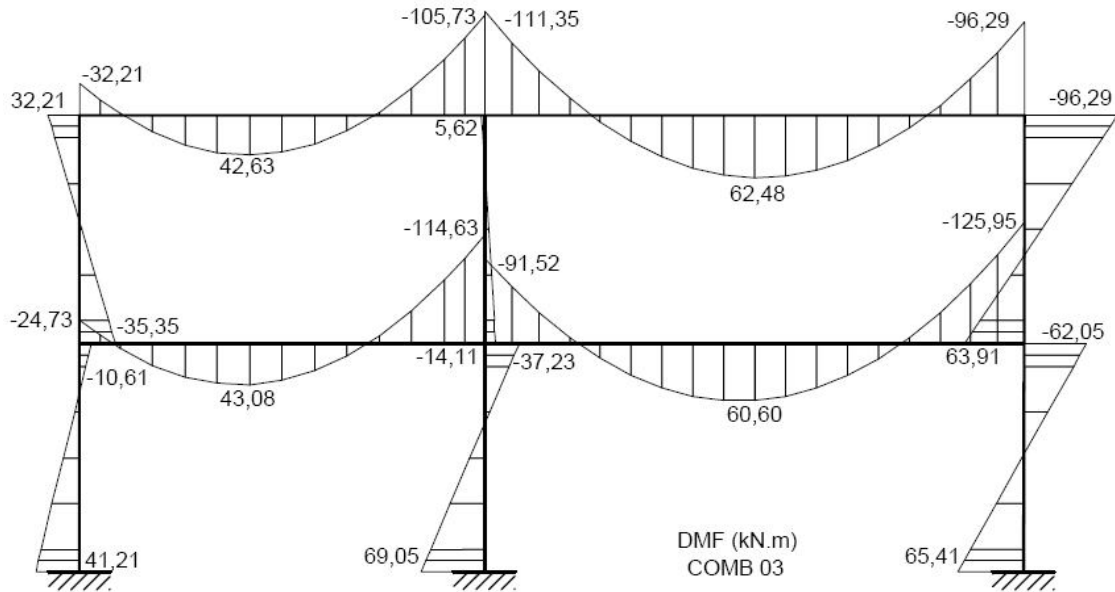


A.3.48 - Diagrama de Momento Fletor (DMF) - Combinação 01



A.3.49 - Diagrama de Momento Fletor (DMF) - Combinação 02


| | | | | |
|--|---|------------|-------------|----------|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | Página | 213 | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | |
| | | Referência | Responsável | Data |
| | A.3 - Caso 3 Pórtico Rígido de Dois Pavimentos | Preparado | CAP | 06/02/11 |
| | | Verificado | CAP | |
| | | Aprovado | | |



A.3.50 - Diagrama de Momento Fletor (DMF) - Combinação 03

A.3.7 Comparação dos resultados da APO e da ASO

Tendo em vista os diferentes tipos de análise realizados (itens A.3.5 e A.3.6) apresentam-se alguns gráficos com a sobreposição dos resultados dos esforços máximos nos trechos dos pilares situados no pavimento térreo da estrutura.

| | | | | |
|--|---|------------|-------------|----------|
|  UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | Título | Página | 214 | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | |
| | | Referência | Responsável | Data |
| | A.3 - Caso 3 Pórtico Rígido de Dois Pavimentos | Preparado | CAP | 06/02/11 |
| | | Verificado | CAP | |
| Aprovado | | | | |

a) **Barra 1**

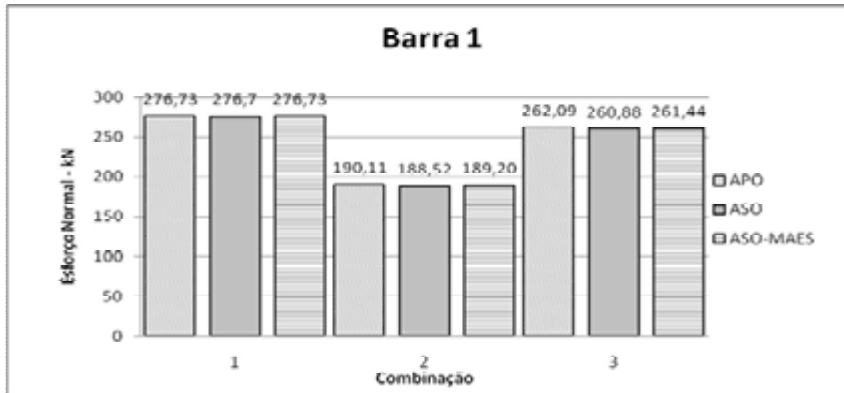


Figura A.3.51 - Esforço normal máximo (kN) na barra 1 para as combinações 01,02 e 03 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos)

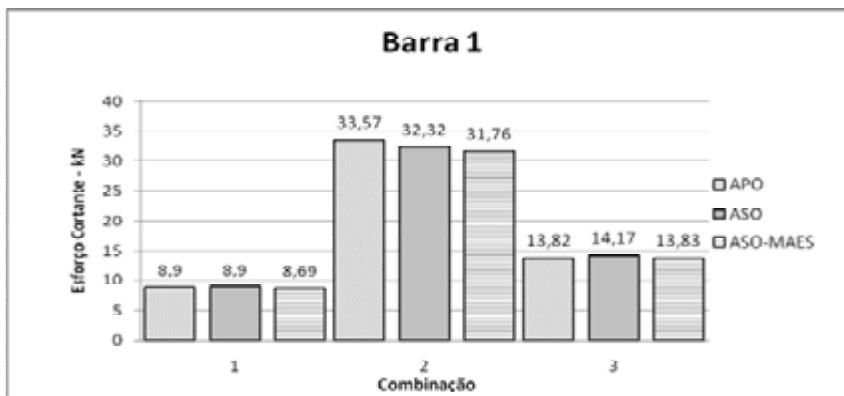


Figura A.3.52 - Esforço cortante máximo (kN) na barra 1 para as combinações 01,02 e 03 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos)

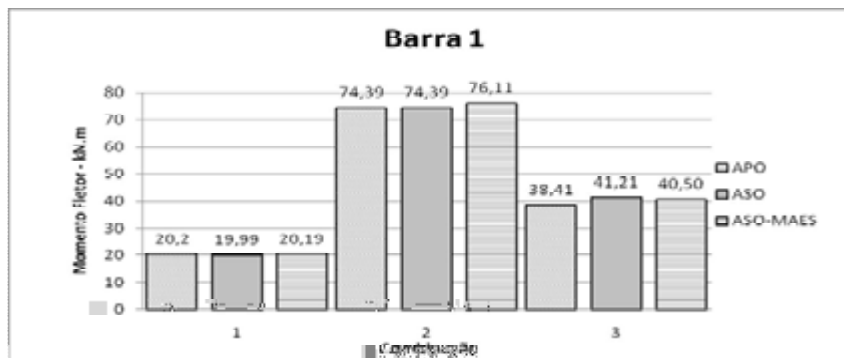



Figura A.3.53 - Momento fletor máximo (kN.m) na barra 1 para as combinações 01,02 e 03 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos)

| | | | | | |
|--|---|------------|-------------|----------|--|
|  UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | Título | Página | 215 | | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | | |
| | | Referência | Responsável | Data | |
| | A.3 - Caso 3 Pórtico Rígido de Dois Pavimentos | Preparado | CAP | 06/02/11 | |
| | | Verificado | CAP | | |
| Aprovado | | | | | |

b) Barra 2

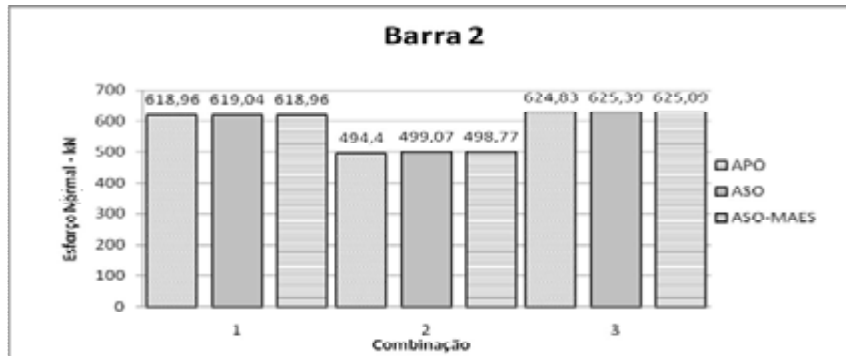


Figura A.3.54 - Esforço normal máximo (kN) na barra 2 para as combinações 01,02 e 03 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos)

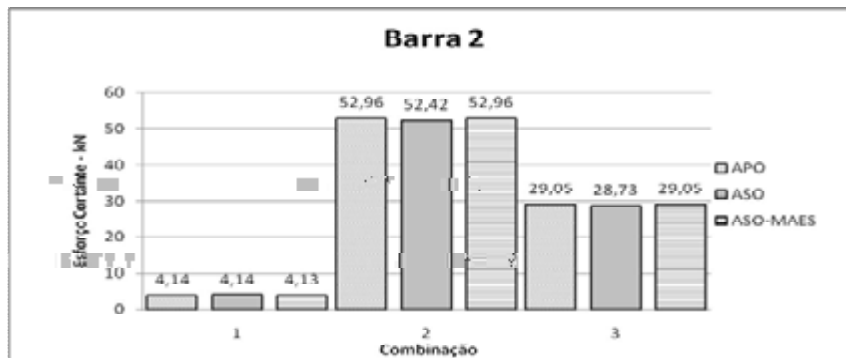


Figura A.3.55 - Esforço cortante máximo (kN) na barra 2 para as combinações 01,02 e 03 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos)

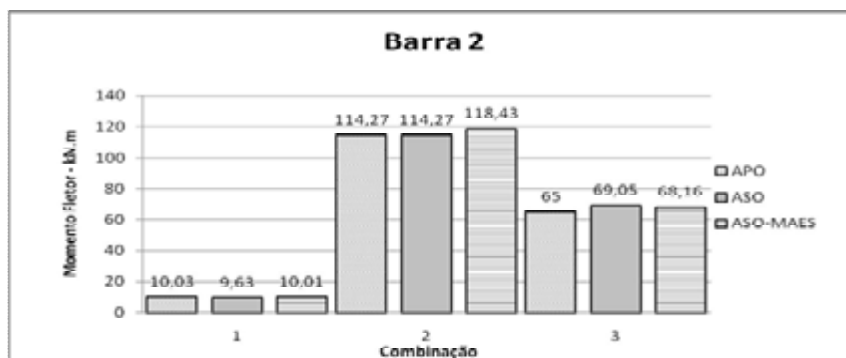



Figura A.3.56 - Momento fletor máximo (kN.m) na barra 2 para as combinações 01,02 e 03 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos)

| | | | | | |
|--|---|------------|--------------|-------------|------|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | Página | 216 | | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | | |
| | | Referência | A.3 - Caso 3 | Responsável | Data |
| | Pórtico Rígido de Dois Pavimentos | Preparado | CAP | 06/02/11 | |
| | | Verificado | CAP | | |
| | | Aprovado | | | |

c) Barra 3

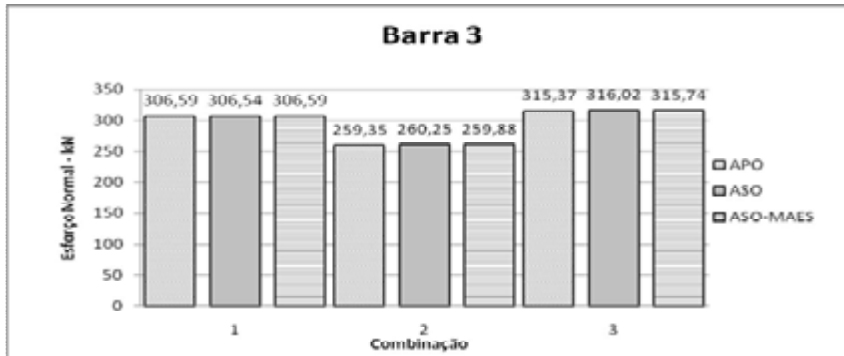


Figura A.3.57 - Esforço normal máximo (kN) na barra 3 para as combinações 1,2 e 3 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos)

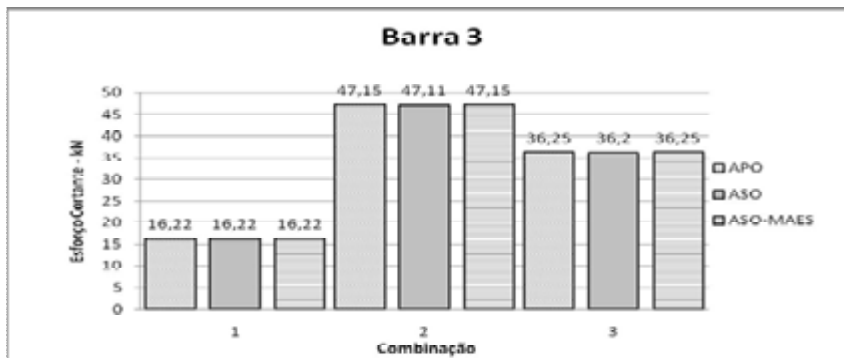


Figura A.3.58 - Esforço cortante máximo (kN) na barra 2 para as combinações 1,2 e 3 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos)

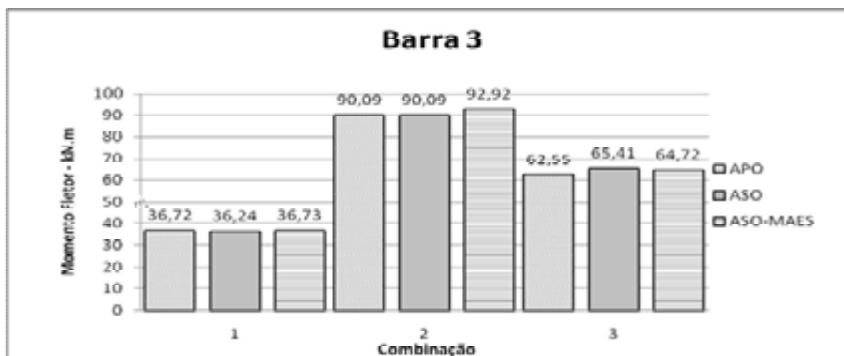



Figura A.3.59 - Momento fletor máximo (kN.m) na barra 3 para as combinações 1,2 e 3 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos)

| | | | | |
|---|--|------------|-------------|----------|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | Página | 217 | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | |
| | | Controle | Responsável | Data |
| | Referência A.3 - Caso 3 Pórtico Rígido de Dois Pavimentos | Preparado | CAP | 06/02/11 |
| | | Verificado | CAP | |
| | | Aprovado | | |

A.3.8 Verificação da capacidade última dos pilares do pavimento térreo

Para a verificação da capacidade última dos pilares do pavimento térreo, utilizou-se o programa Desmet 4.0. Para a APO fez-se a verificação de acordo com ABNT NBR8800:1986 enquanto que para a ASO fez-se a verificação de acordo com a ABNT NBR8800:2008.

Para a verificação dos pilares de acordo com a ABNT NBR8800:1986 utilizam-se os coeficientes de flambagem (K) indicados na Tabela A.3.7, ao passo que para ABNT NBR8800:2008 toma-se sempre $K = 1,0$.

Tabela A.3.7 – Valores do coeficiente de flambagem (K) segundo ABNT NBR8800:1986

| Barra | I_c (cm ⁴) | L_c (cm) | I_g (cm ⁴) | L_g (cm) | α | G_A | G_B | K |
|-------|--------------------------|------------|--------------------------|------------|----------|-------|-------|------|
| 1 | 5298 | 340 | 8581 | 600 | 0,67 | 1 | 3,25 | 1,55 |
| 2 | 7660 | 340 | 8581 | 600 | 0,67 | 1 | 0,65 | 1,25 |
| | 7660 | 340 | 8581 | 800 | | | | |
| 3 | 5298 | 340 | 8581 | 800 | 0,67 | 1 | 4,34 | 1,68 |

Na Tabela A.3.8 apresentam-se os resultados da verificação da capacidade última dos pilares do pavimento térreo.



| | | | | | |
|--|---|----------|------------|-------------|----------|
|  UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | Título | | Página | 218 | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | | Revisão | A | |
| | Referência | | Controle | Responsável | Data |
| | A.3 - Caso 3 | | Preparado | CAP | 06/02/11 |
| | Pórtico Rígido de Dois Pavimentos | | Verificado | CAP | |
| | | Aprovado | | | |

Tabela A.3.8 – Verificação da capacidade última dos pilares do pavimento térreo

| Barra | Combinação | Tipo de análise | Esforços solicitantes | | Esforços Resistentes | | Interação |
|-------|------------|-----------------|-----------------------|-------------------|----------------------|-------------------|-----------|
| | | | N_{Sd} (kN) | $M_{x,Sd}$ (kN.m) | N_{Rd} (kN) | $M_{x,Rd}$ (kN.m) | |
| 1 | 01 | APO - SAP2000 | 276,73 | 20,20 | 1300,64 | 164,99 | 0,350 |
| | | ASO - SAP2000 | 276,70 | 19,99 | 1540,4 | 179,57 | 0,201 |
| | | ASO - MAES | 276,73 | 20,19 | 1540,4 | 179,57 | 0,202 |
| 1 | 02 | APO - SAP2000 | 190,11 | 74,39 | 1300,64 | 164,99 | 0,630 |
| | | ASO - SAP2000 | 188,52 | 74,39 | 1540,4 | 179,57 | 0,475 |
| | | ASO - MAES | 189,20 | 76,11 | 1540,4 | 179,57 | 0,485 |
| 2 | 02 | APO - SAP2000 | 494,40 | 114,27 | 1799,63 | 236,63 | 0,800 |
| | | ASO - SAP2000 | 499,07 | 114,27 | 2123,54 | 251,91 | 0,638 |
| | | ASO - MAES | 498,77 | 118,43 | 2123,54 | 251,91 | 0,653 |
| 2 | 03 | APO - SAP2000 | 624,83 | 65,00 | 1799,63 | 236,63 | 0,650 |
| | | ASO - SAP2000 | 625,39 | 69,05 | 2123,54 | 251,91 | 0,538 |
| | | ASO - MAES | 625,09 | 68,16 | 2123,54 | 251,91 | 0,535 |
| 3 | 02 | APO - SAP2000 | 259,35 | 90,09 | 1300,64 | 164,99 | 0,810 |
| | | ASO - SAP2000 | 260,25 | 90,09 | 1540,4 | 179,57 | 0,586 |
| | | ASO - MAES | 259,88 | 92,92 | 1540,4 | 179,57 | 0,602 |
| 3 | 03 | APO - SAP2000 | 315,37 | 62,55 | 1300,64 | 164,99 | 0,680 |
| | | ASO - SAP2000 | 316,02 | 65,41 | 1540,4 | 179,57 | 0,529 |
| | | ASO - MAES | 315,74 | 64,72 | 1540,4 | 179,57 | 0,525 |

| | | | | | |
|--|---|------------|--------------|------------|-------------|
|  UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | Título | Página | 219 | | |
| | Apêndice A - Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | | |
| | | Referência | A.4 - Caso 4 | Controlado | Responsável |
| | Pórtico contraventado de dois pavimentos | Preparado | CAP | 07/02/11 | |
| | | Verificado | CAP | | |
| | | Aprovado | | | |

A.4 Caso 4 - Pórtico Contraventado de Dois Pavimentos

Verificar a capacidade última dos pilares situados no pavimento térreo do pórtico plano de aço indicado na Figura A.4.1.

Determinar os esforços de cálculo na estrutura de acordo com uma análise de primeira ordem (APO) e com uma análise de segunda ordem (ASO). Para a ASO, desenvolver a análise com auxílio de um programa computacional e por meio do Método de Amplificação dos Esforços Solicitantes (MAES), apresentado no Anexo D da ABNT NBR8800:2008.

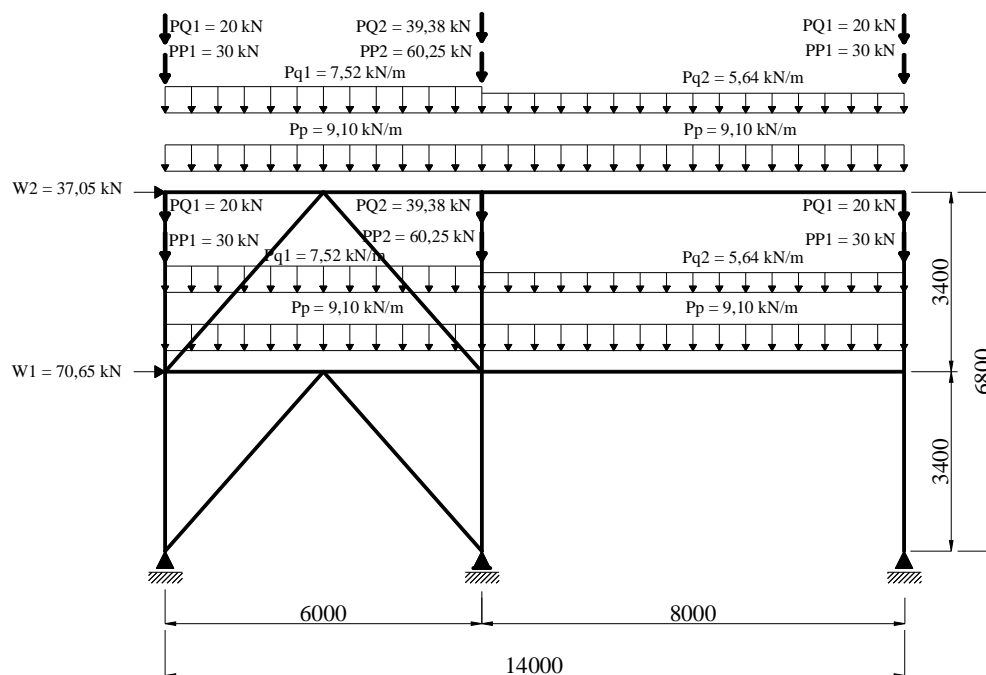



Figura A.4.1 - Pórtico contraventado de dois pavimentos
(dimensões em milímetros e ações com valores característicos)

Dados:

- Aço ASTM A572 Grau 50;
- Módulo de elasticidade - $E = 200.000 \text{ MPa}$;
- Perfis laminados de abas paralelas da AÇOMINAS.

| | | | | | |
|--|---|------------|--------------|------------|-------------|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | Página | 220 | | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | | |
| | | Referência | A.4 – Caso 4 | Controlado | Responsável |
| | Pórtico contraventado de dois pavimentos | Preparado | CAP | 07/02/11 | |
| | | Verificado | CAP | | |
| Aprovado | | | | | |

A.4.1 Modelo estrutural

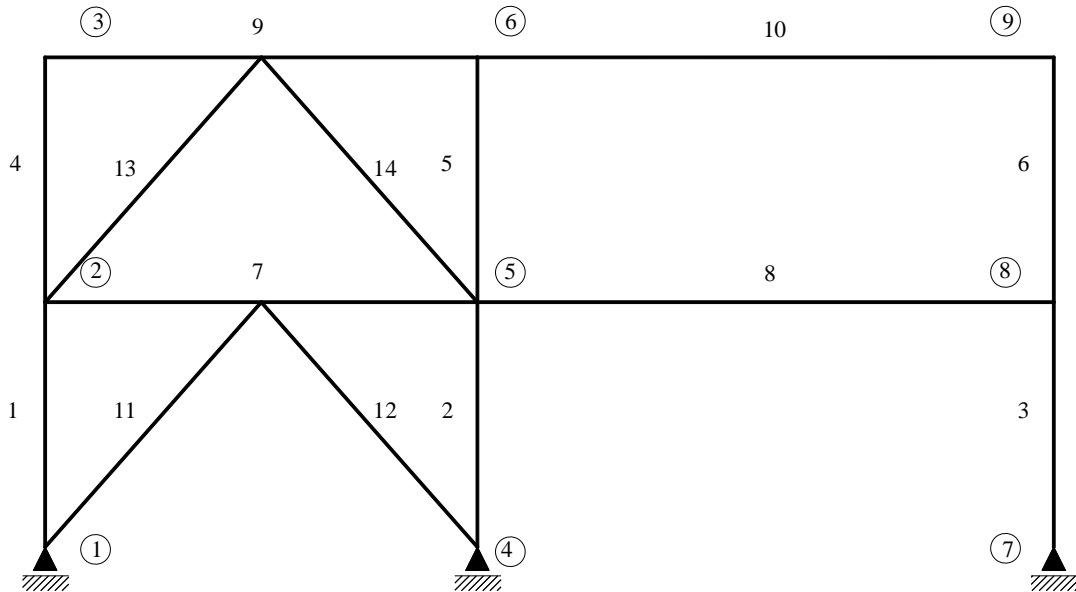


Figura A.4.2 - Modelo estrutural do pórtico plano

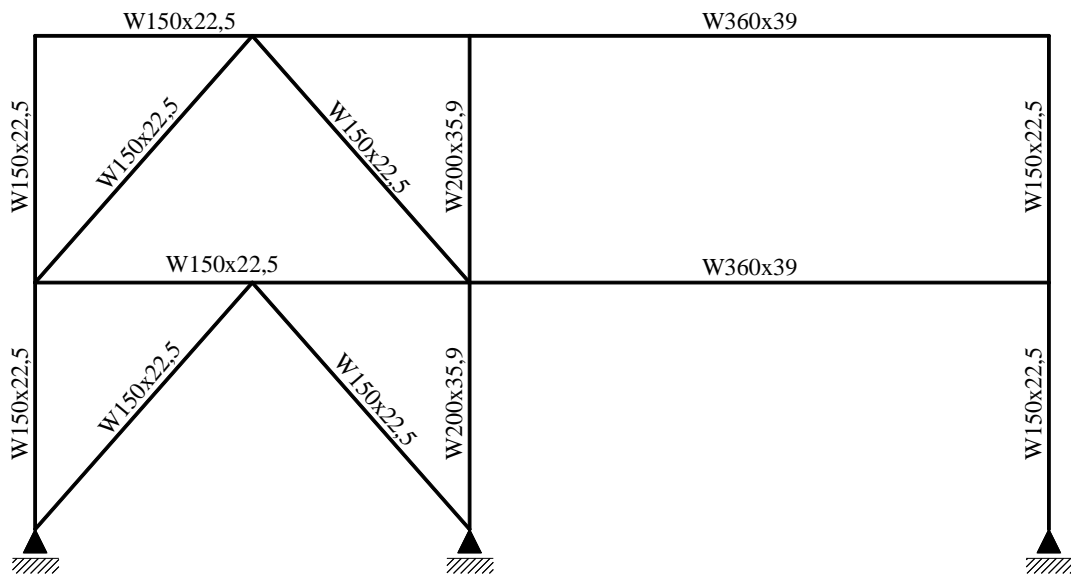



Figura A.4.3 – Seções adotadas a partir de um pré-dimensionamento

| | | | | |
|--|---|------------|-------------|----------|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | Página | 221 | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | |
| | | Controle | Responsável | Data |
| | Referência A.4 – Caso 4 Pórtico contraventado de dois pavimentos | Preparado | CAP | 07/02/11 |
| | | Verificado | CAP | |
| Aprovado | | | | |

A.4.2 Ações atuantes

- PP – Peso próprio da estrutura
PQ – Sobrecarga
Fn – Força horizontal equivalente (Força nocional)
W – Vento

Na Figura A.4.1, as letras minúsculas se referem a ações distribuídas e as letras maiúsculas a ações concentradas.

A força horizontal equivalente (F_n), que representa as imperfeições geométricas, deve ser calculada para cada pavimento da estrutura, conforme a seguinte expressão:

$$F_n = \frac{0,3}{100} \sum N_{SD} \quad (\text{A.4.1})$$


onde:

$\sum N_{sd}$ é o somatório das cargas gravitacionais de cálculo atuantes no pavimento.

Como as forças gravitacionais nos dois pavimentos são idênticas, tem-se:

$$F_n = \frac{0,3}{100} ((30 + 30 + 60,25) * 1,4 + (20 + 20 + 39,38) + 1,5 + (9,10 * 14) * 1,4 + (7,52 * 6 + 5,64 * 8) * 1,5)$$

$$F_n = 1,80 \text{ kN}$$

| | | | | |
|--|--|------------|-------------|----------|
|  UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | Título | Página | 222 | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | |
| | | Controle | Responsável | Data |
| | Referência A.4 – Caso 4 Pórtico contraventado de dois pavimentos | Preparado | CAP | 07/02/11 |
| | | Verificado | CAP | |
| Aprovado | | | | |

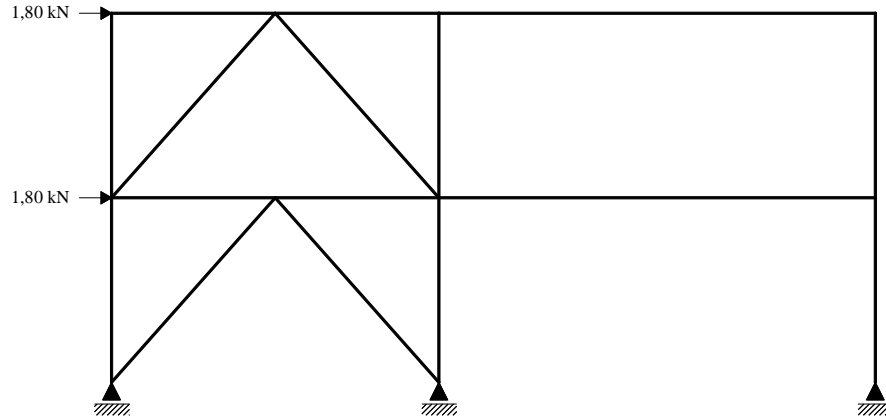


Figura A.4.4 - Força horizontal equivalente em cada andar (kN)

A.4.3 Combinações de ações

Combinações últimas normais:

$$F_d = \sum_{i=1}^m (\gamma_{gi} F_{Gi,k}) + \gamma_{q1} F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n (\gamma_{qj} \psi_{0j} F_{Qj,k}) \quad (\text{A.4.2})$$

Combinação 01: 1,4 PP + Fn + 1,5 PQ


Combinação 02: 1,4 PP + 1,4 W + 1,5* 0,5 PQ

Combinação 03: 1,4 PP + 1,5 PQ + 1,4 * 0,6 W

Obs: As imperfeições geométricas não foram consideradas em conjunto com forças horizontais de mesmo sentido e de maior magnitude.

A.4.4 Classificação da estrutura quanto à sensibilidade a deslocamentos laterais

Segundo o item 4.9.4.5 da NBR 8800:2008 (ABNT, 2008) a classificação da estrutura deve ser obtida para as combinações últimas de ações em que os deslocamentos horizontais provenientes das forças horizontais tenham os mesmos sentidos dos deslocamentos horizontais decorrentes das cargas gravitacionais.

| | | | | |
|--|---|------------|-------------|----------|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | Página | 223 | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | |
| | | Controle | Responsável | Data |
| | Referência A.4 – Caso 4 Pórtico contraventado de dois pavimentos | Preparado | CAP | 07/02/11 |
| | | Verificado | CAP | |
| | | Aprovado | | |

a) Classificação de acordo com os deslocamentos relativos

Na tabela A.4.1 apresenta-se a classificação da estrutura de acordo com os deslocamentos relativos.

Tabela A.4.1 - Classificação da estrutura de acordo com os deslocamentos relativos

| Nó | Combinação | Deslocamentos (mm) | | |
|----|------------|--------------------|--------|-----------|
| | | u_1 | u_2 | u_2/u_1 |
| 2 | 01 | 0,1658 | 0,1655 | 1,00 |
| 3 | | 0,4205 | 0,4218 | 1,05 |
| 2 | 02 | 1,6654 | 1,6697 | 1,04 |
| 3 | | 2,4363 | 2,4423 | 1,04 |
| 2 | 03 | 0,8854 | 0,8888 | 1,05 |
| 3 | | 1,6409 | 1,6460 | 1,05 |

Nota: u_1 e u_2 representam os deslocamentos horizontais em análise de primeira e segunda ordem nos nós indicados, respectivamente.

De acordo com as relações entre deslocamentos (u_2/u_1) apresentados na Tabela A.3.1, a estrutura é classificada como de pequena deslocabilidade.

b) Classificação de acordo com o coeficiente B_2

O coeficiente B_2 prescrito no Anexo D da ABNT NBR8800:2008 é dado por:


$$B_2 = \frac{1}{1 - \frac{1}{R_s} \frac{\Delta_h}{H} \frac{\sum N_{SD}}{\sum H_{SD}}} \quad (\text{A.4.3})$$

onde :

$\sum N_{SD}$ é a carga gravitacional total que atua no andar considerado;

R_s é um coeficiente de ajuste, igual a 0,85 nas estruturas onde as subestruturas de contraventamento são todas pórticos rígidos e igual a 1 para as outras estruturas;

Δ_h é o deslocamento horizontal relativo entre os níveis superior e inferior (deslocamento interpavimento em uma análise de primeira ordem);

| | | | | |
|--|---|------------|-------------|----------|
|  UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | Título | Página | 224 | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | |
| | | Controle | Responsável | Data |
| | Referência A.4 – Caso 4 Pórtico contraventado de dois pavimentos | Preparado | CAP | 07/02/11 |
| | | Verificado | CAP | |
| | | Aprovado | | |

$\sum H_{SD}$ é a força cortante no andar, produzida pelas forças horizontais de cálculo atuantes.

Na Tabela A.4.2 apresentam-se os valores do coeficiente B_2 em cada nível, para classificação da estrutura quanto à sensibilidade a deslocamentos laterais.

Tabela A.4.2 - Valores do coeficiente B_2 para classificação da estrutura

| Combinação | Nível | R_s | Δh | $H(\text{mm})$ | $N_{Sd} (\text{kN})$ | $H_{Sd} (\text{kN})$ | B_2 |
|------------|-------|-------|------------|----------------|----------------------|----------------------|-------|
| 01 | 1 | 1 | 0,1658 | 3400,00 | 1202,28 | 3,60 | 1,02 |
| | 2 | 1 | 0,2547 | 3400,00 | 601,14 | 1,80 | 1,03 |
| 02 | 1 | 1 | 1,6654 | 3400,00 | 947,84 | 133,68 | 1,00 |
| | 2 | 1 | 0,7709 | 3400,00 | 473,92 | 32,97 | 1,00 |
| 03 | 1 | 1 | 0,8854 | 3400,00 | 1202,3 | 79,12 | 1,00 |
| | 2 | 1 | 0,7555 | 3400,00 | 601,15 | 22,22 | 1,01 |


Os valores do coeficiente B_2 apresentados na Tabela A.4.2 foram calculados sem levar em consideração as imperfeições de material. Em função desses valores a estrutura é classificada como de pequena deslocabilidade.

c) Classificação da estrutura

De acordo com as duas formas distintas de classificação, cujos resultados são apresentados nas Tabelas A.4.1 e A.4.2, a estrutura é classificada como de pequena deslocabilidade.

A.4.5 Análise de primeira ordem (APO)

A seguir apresentam-se os diagramas de esforços solicitantes para uma análise de primeira ordem (APO). Esta análise foi realizada com auxílio do programa SAP2000.

| | | | | | |
|--|---|------------|--------------|------------|-------------|
|  UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | Título | Página | 225 | | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | | |
| | | Referência | A.4 – Caso 4 | Controlado | Responsável |
| | Pórtico contraventado de dois pavimentos | Preparado | CAP | 07/02/11 | |
| | | Verificado | CAP | | |
| | | Aprovado | | | |

a) Diagramas de Esforço Normal (DEN)

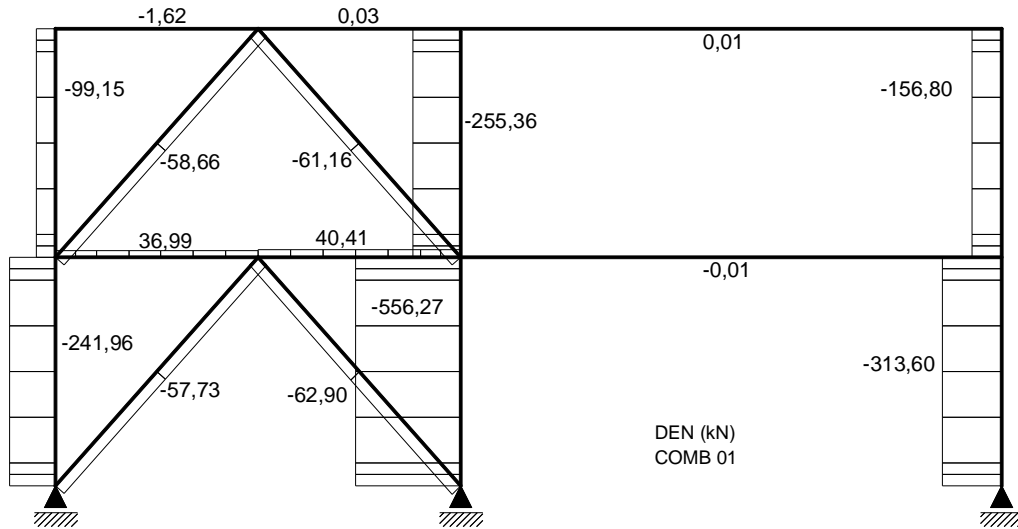


Figura A.4.5 - Diagrama de Esforço Normal (DEN) - Combinação 01

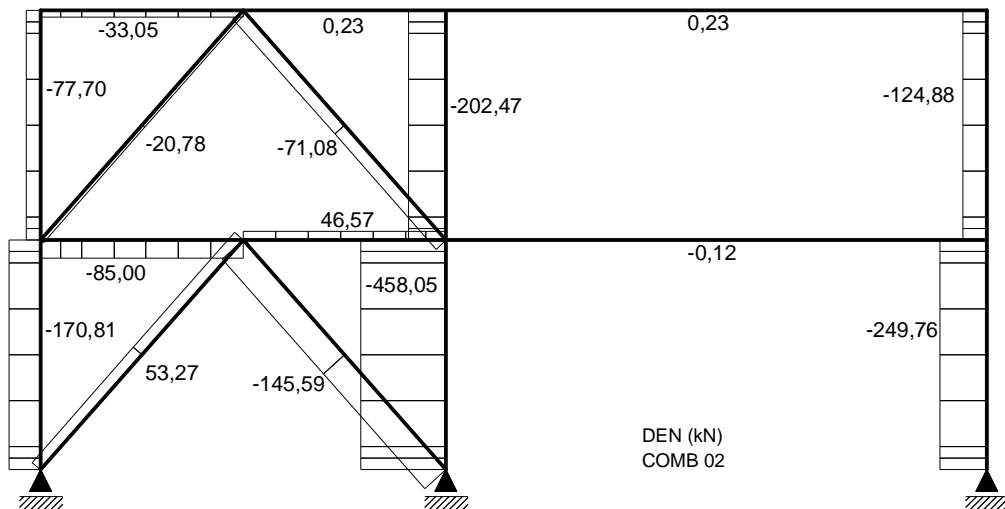



Figura A.4.6 - Diagrama de Esforço Normal (DEN) - Combinação 02

| | | | | | |
|--|---|------------|--------------|------------|-------------|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | Página | 226 | | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | | |
| | | Referência | A.4 – Caso 4 | Controlado | Responsável |
| | Pórtico contraventado de dois pavimentos | Preparado | CAP | 07/02/11 | |
| | | Verificado | CAP | | |
| | | Aprovado | | | |

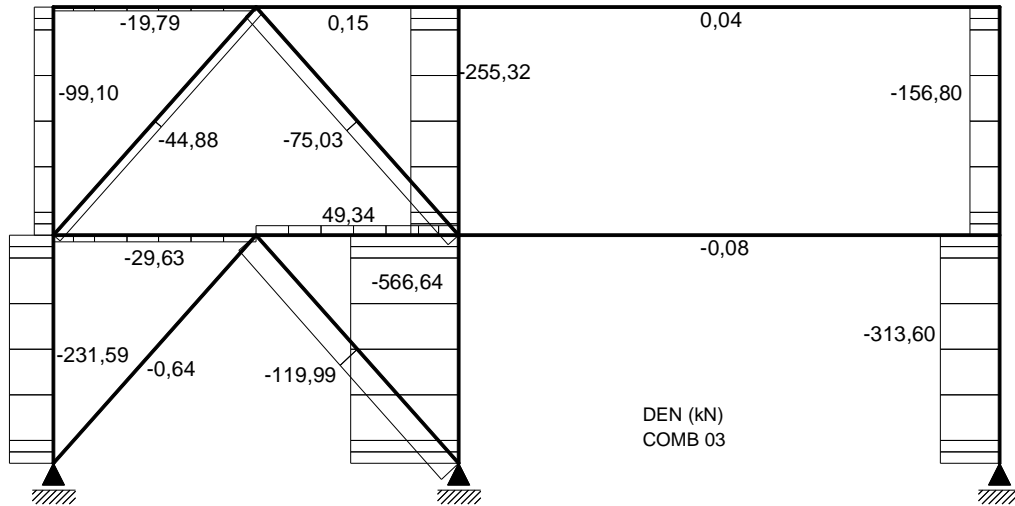


Figura A.4.7 - Diagrama de Esforço Normal (DEN) - Combinação 03

b) Diagramas de Esforço Cortante (DEC)

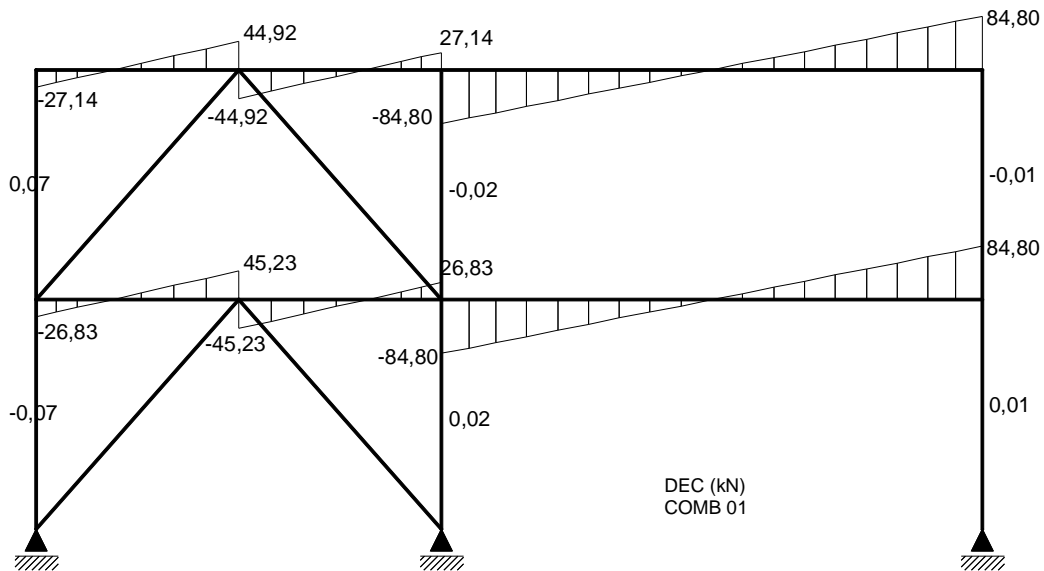



Figura A.4.8 - Diagrama de Esforço Cortante (DEC) - Combinação 01

| | | | | | |
|--|---|------------|--------------|-------------|------|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | Página | 227 | | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | | |
| | | Referência | A.4 – Caso 4 | Responsável | Data |
| | Pórtico contraventado de dois pavimentos | Preparado | CAP | 07/02/11 | |
| | | Verificado | CAP | | |
| Aprovado | | | | | |

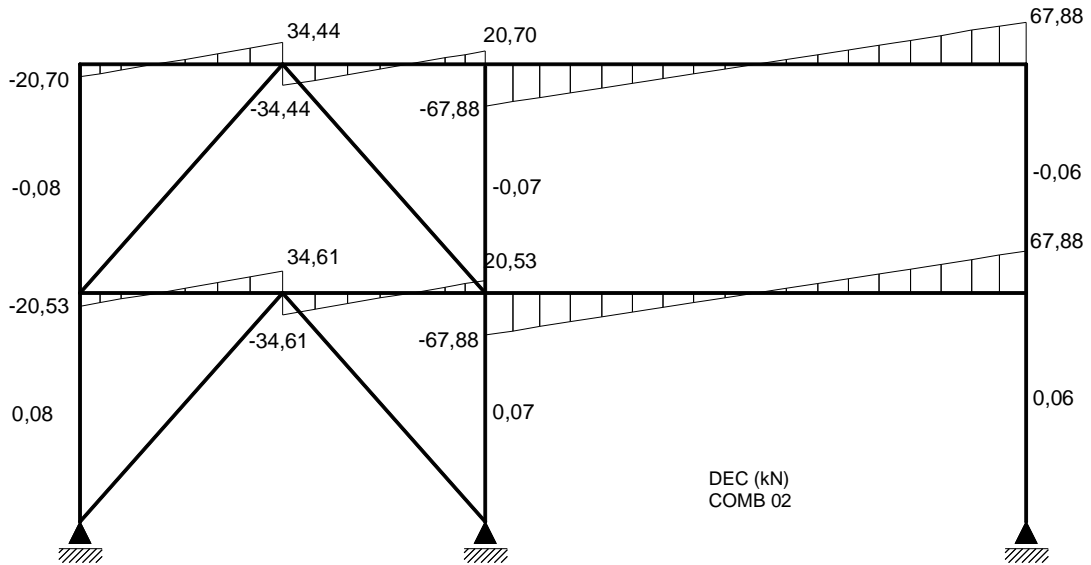


Figura A.4.9 - Diagrama de Esforço Cortante (DEC) - Combinação 02

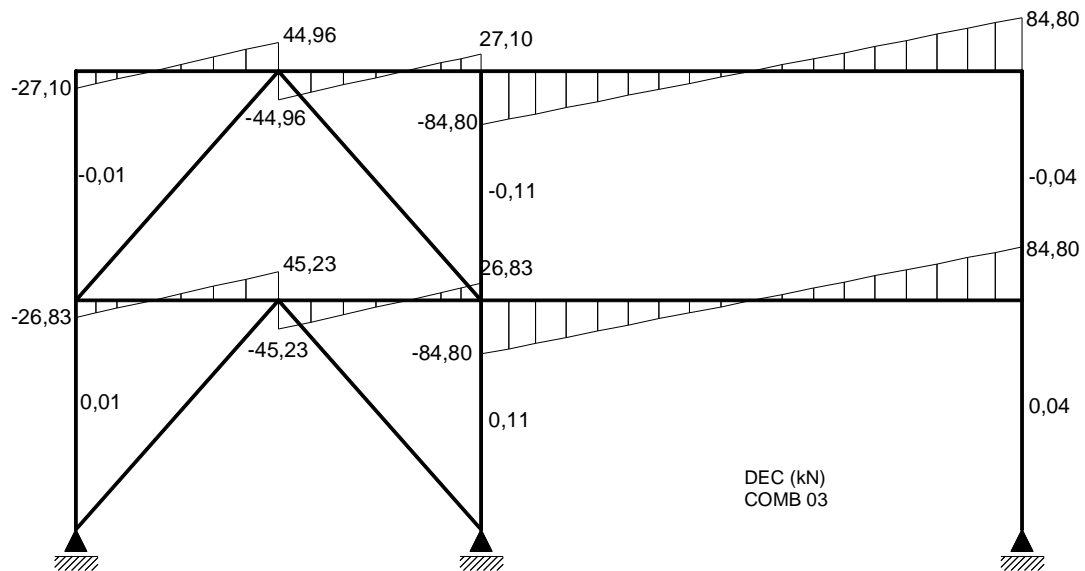



Figura A.4.10 –Diagrama de Esforço Cortante (DEC) - Combinação 03

| | | | | | |
|--|--|------------|------------|-------------|------|
|  UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | Título | Página | 229 | | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | | |
| | | Referência | Controlado | Responsável | Data |
| | A.4 – Caso 4 Pórtico contraventado de dois pavimentos | Preparado | CAP | 07/02/11 | |
| | | Verificado | CAP | | |
| Aprovado | | | | | |

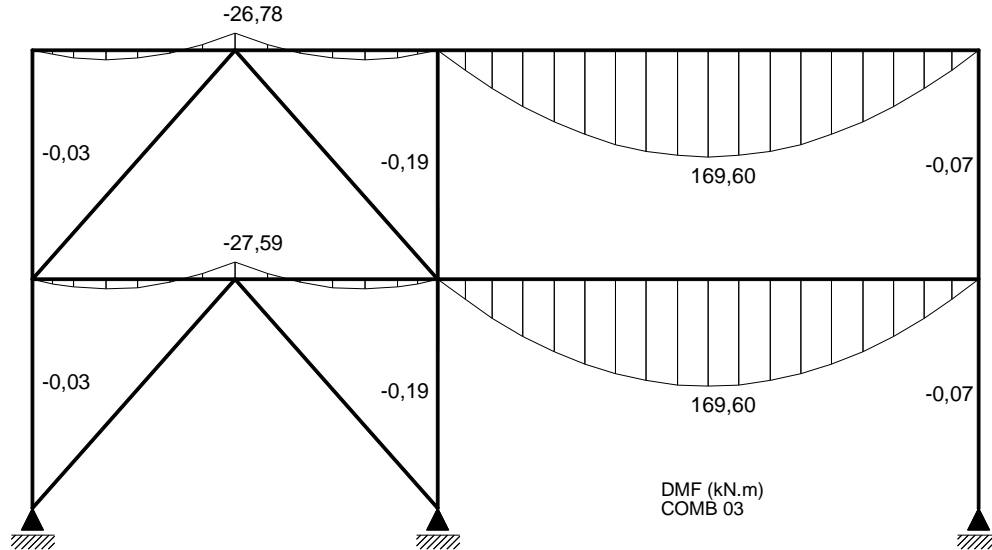


Figura A.4.13 –Diagrama de Momento Fletor (DMF) - Combinação 03

A.4.6 Análise de segunda ordem (ASO)

A.4.6.1 Análise de segunda ordem de acordo com o MAES.

Na Figura A.4.14 apresenta-se as estruturas “nt” e “lt” de acordo com o Anexo D da ABNT NBR8800:2008.

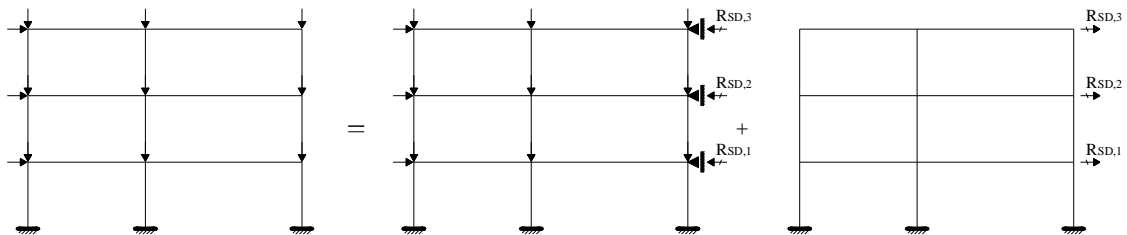



Figura A.4.14 - Modelo para análise - estrutura “nt” e “lt”

| | | | | |
|--|--|------------|-------------|----------|
|  UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | Título | Página | 230 | |
| | Apêndice A - Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | |
| | | Referência | Responsável | Data |
| | A.4 - Caso 4 Pórtico contraventado de dois pavimentos | Preparado | CAP | 07/02/11 |
| | | Verificado | CAP | |
| | | Aprovado | | |

As estruturas “nt” e “lt” são analisadas em análise de primeira ordem. A seguir são apresentados os diagramas de esforços solicitantes para os dois casos, que foram modelados no SAP2000.

A.4.6.2 Esforços solicitantes na estrutura “nt”

a) Diagramas de Esforço Normal (DEN)

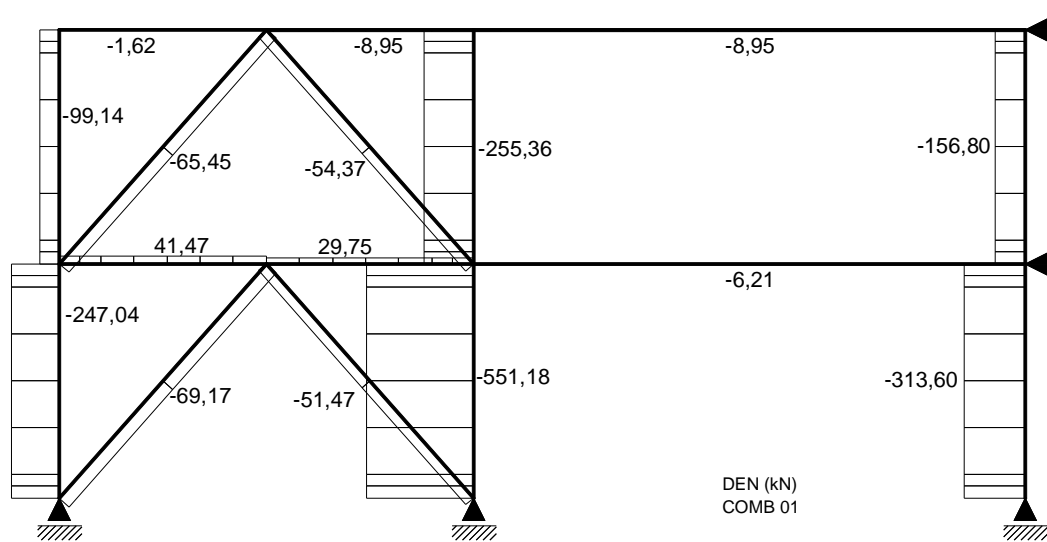


Figura A.4.15 - Diagrama de Esforço Normal (DEN) - “nt” - Combinação 01

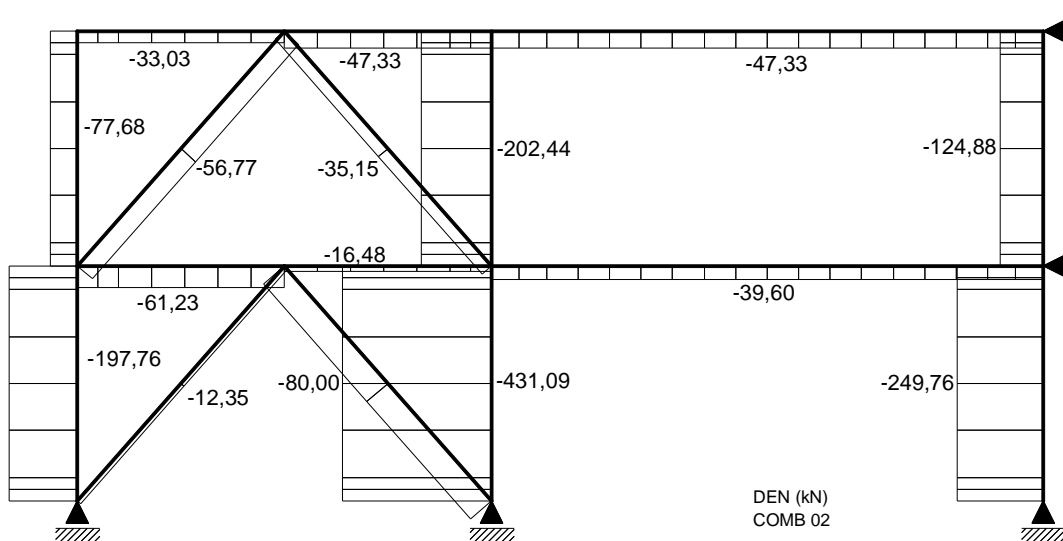



Figura A.4.16 - Diagrama de Esforço Normal (DEN) - “nt” - Combinação 02

| | | | | | |
|--|---|------------|--------------|------------|-------------|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | Página | 231 | | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | | |
| | | Referência | A.4 – Caso 4 | Controlado | Responsável |
| | Pórtico contraventado de dois pavimentos | Preparado | CAP | 07/02/11 | |
| | | Verificado | CAP | | |
| Aprovado | | | | | |

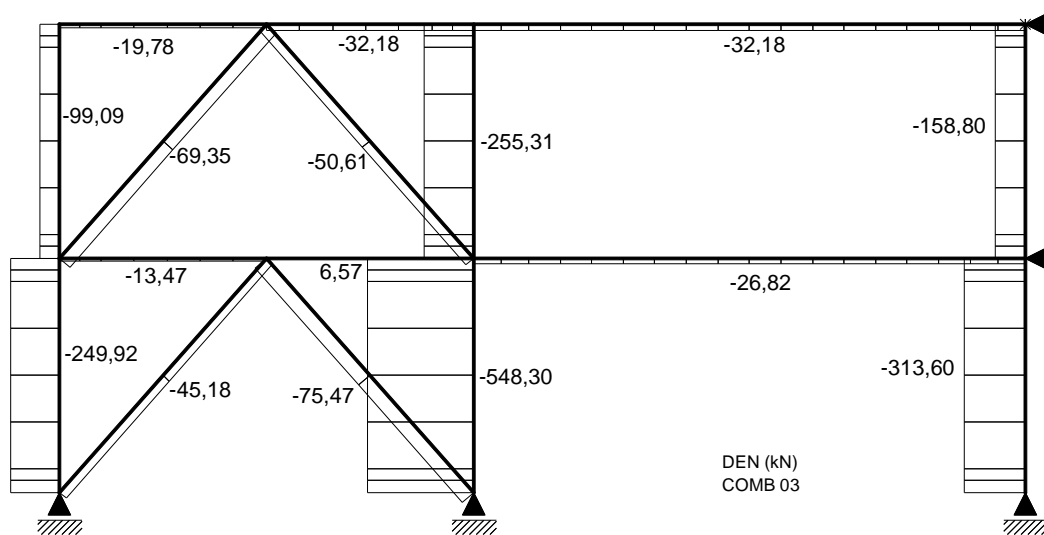


Figura A.4.17 - Diagrama de Esforço Normal (DEN) - “nt” - Combinação 03

b) Diagramas de Esforço Cortante (DEC)

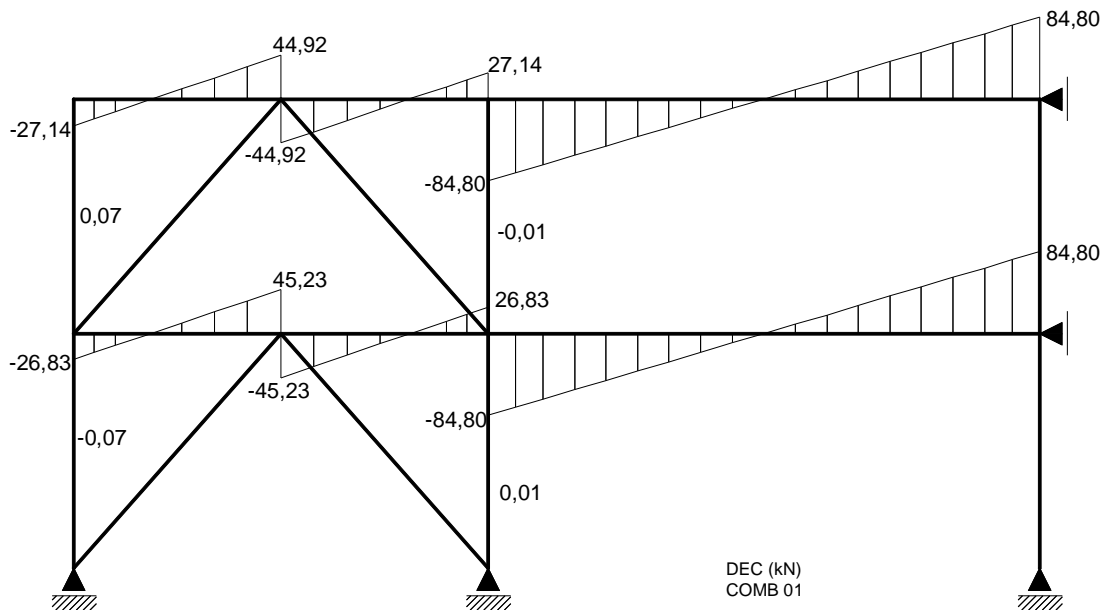



Figura A.4.18 - Diagrama de Esforço Cortante (DEC) - “nt” - Combinação 01

| | | | | | |
|--|---|------------|--------------|------------|-------------|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | Página | 232 | | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | | |
| | | Referência | A.4 – Caso 4 | Controlado | Responsável |
| | Pórtico contraventado de dois pavimentos | Preparado | CAP | 07/02/11 | |
| | | Verificado | CAP | | |
| | | Aprovado | | | |

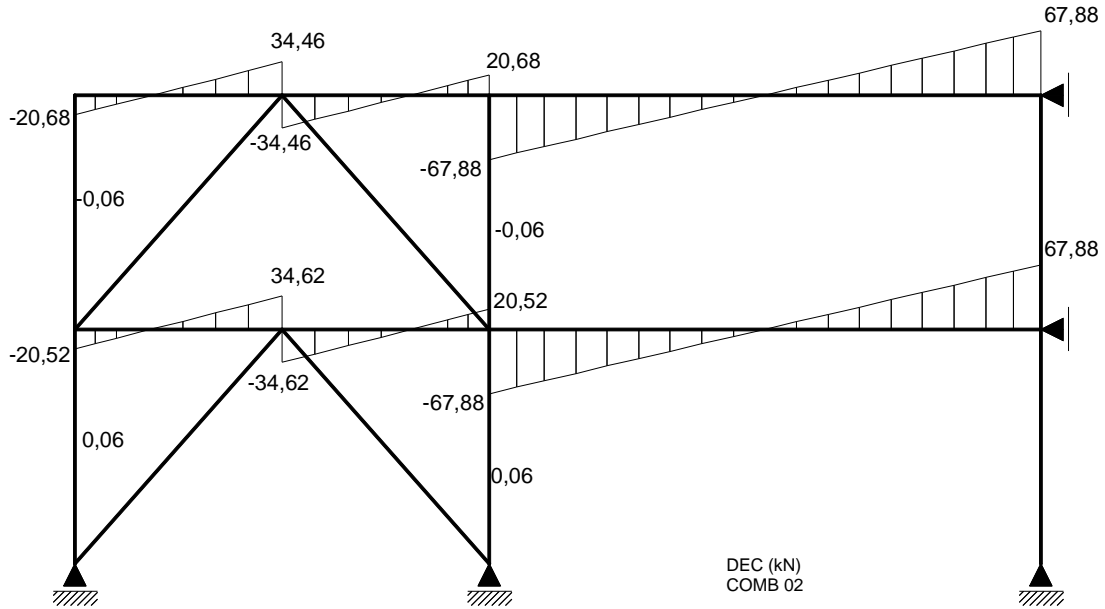


Figura A.4.19 - Diagrama de Esforço Cortante (DEC) - “nt” - Combinação 02

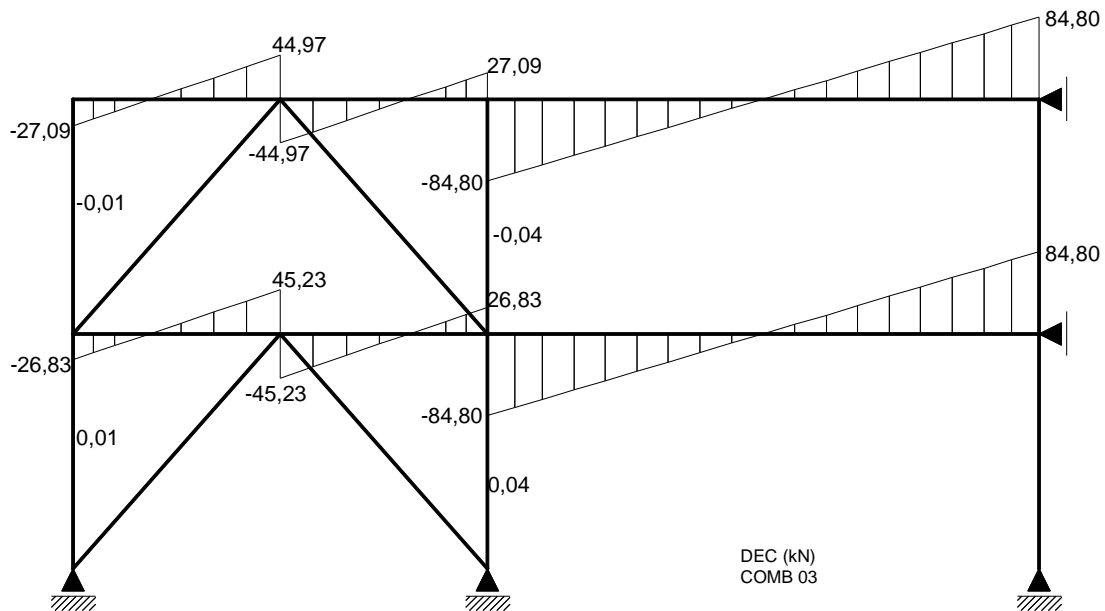



Figura A.4.20 - Diagrama de Esforço Cortante (DEC) - “nt” - Combinação 03

| | | | | |
|--|--|------------|-------------|----------|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | Página | 233 | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | |
| | | Controle | Responsável | Data |
| | Referência A.4 – Caso 4 Pórtico contraventado de dois pavimentos | Preparado | CAP | 07/02/11 |
| | | Verificado | CAP | |
| Aprovado | | | | |

c) Diagramas de Momento Fletor (DMF)

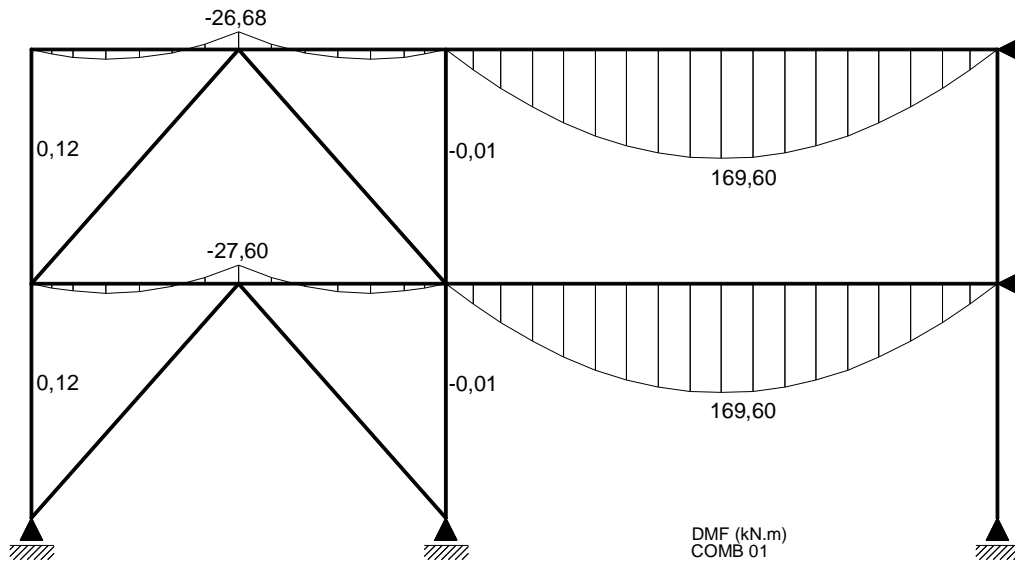


Figura A.4.21 - Diagrama de Momento Fletor (DMF) - “nt” - Combinação 01

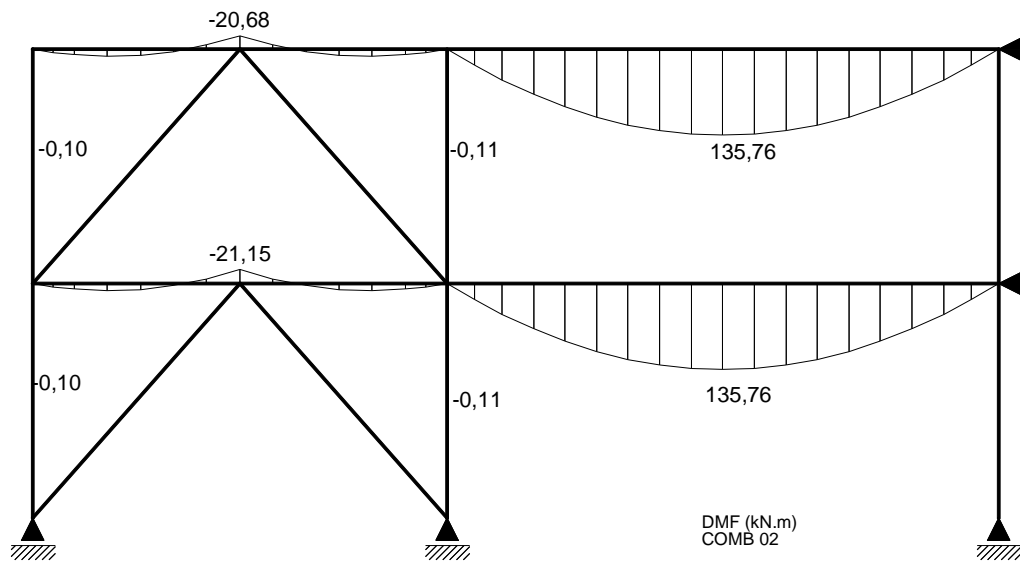



Figura A.4.22 - Diagrama de Momento Fletor (DMF) - “nt” - Combinação 02

| | | | | |
|--|--|------------|-------------|----------|
|  UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | Título | Página | 234 | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | |
| | | Controle | Responsável | Data |
| | Referência A.4 – Caso 4 Pórtico contraventado de dois pavimentos | Preparado | CAP | 07/02/11 |
| | | Verificado | CAP | |
| Aprovado | | | | |

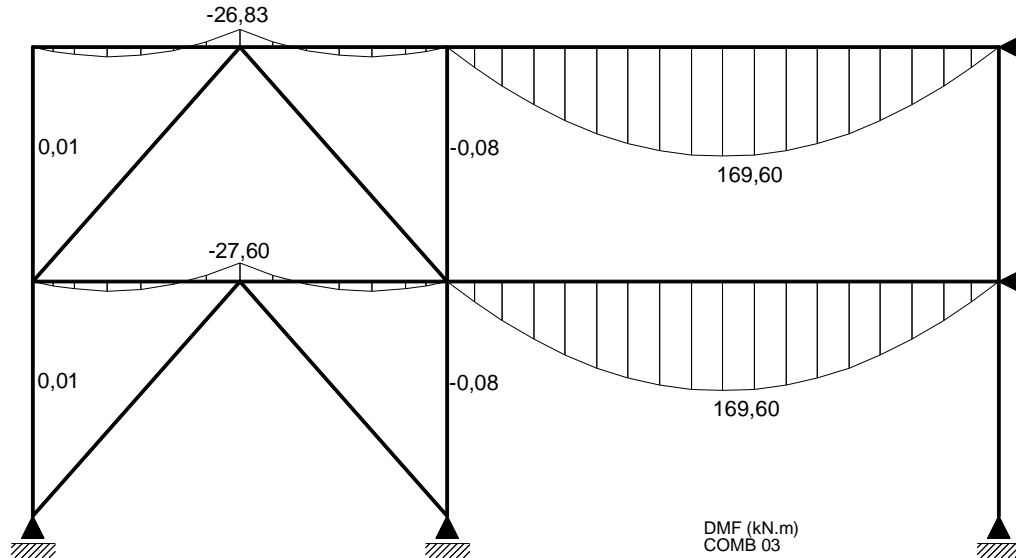



Figura A.4.23 - Diagrama de Momento Fletor (DMF) - “nt” - Combinação 03

A.4.6.3 Esforços solicitantes na estrutura “It”

Nos nós 8 e 9 da estrutura “It” aplicam-se as reações dos apoios laterais da estrutura “nt” de acordo com a Tabela A.4.4.

Tabela A.4.3 - Reações nodais (R_{Sd}) (kN)

| Nó | R_{Sd1} | R_{Sd2} | R_{Sd3} |
|----|-----------|-----------|-----------|
| 8 | 6,21 | 39,60 | 26,82 |
| 9 | 8,95 | 47,40 | 32,22 |

| | | | | | |
|--|---|------------|--------------|------------|-------------|
|  UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | Título | Página | 235 | | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | | |
| | | Referência | A.4 – Caso 4 | Controlado | Responsável |
| | Pórtico contraventado de dois pavimentos | Preparado | CAP | 07/02/11 | |
| | | Verificado | CAP | | |
| Aprovado | | | | | |

a) Diagramas de Esforço Normal (DEN)

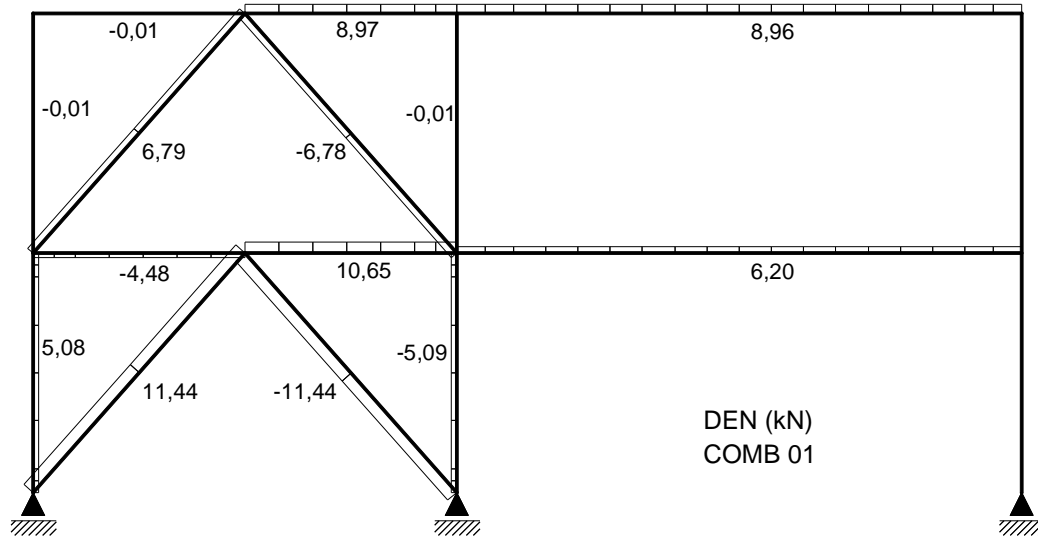


Figura A.4.24 - Diagrama de Esforço Normal (DEN) - “It” - Combinação 01

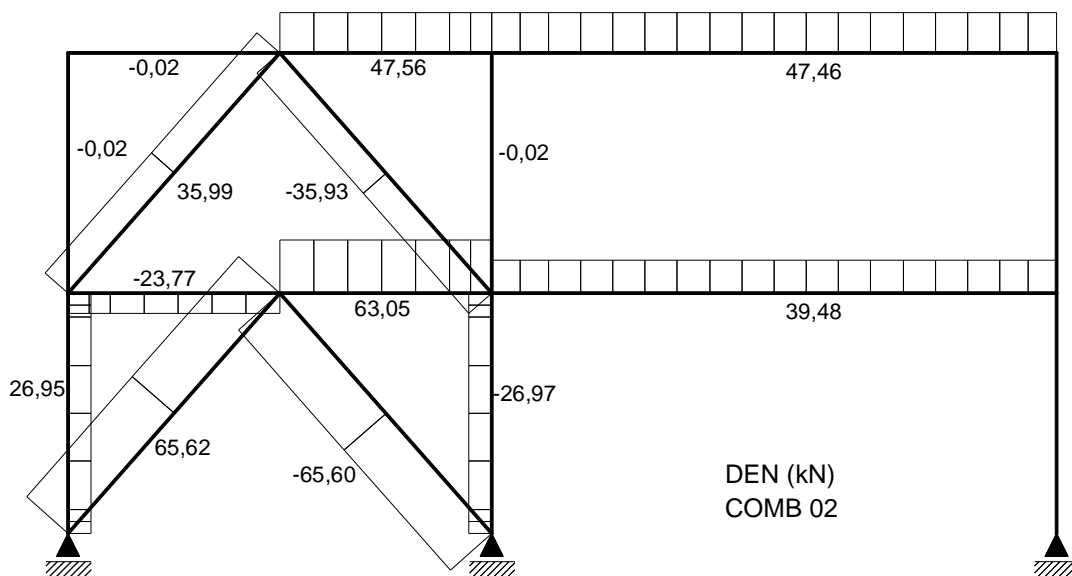



Figura A.4.25 - Diagrama de Esforço Normal (DEN) - “It” - Combinação 02

| | | | | |
|--|--|------------|-------------|----------|
|  UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | Título | Página | 236 | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | |
| | | Referência | Responsável | Data |
| | A.4 – Caso 4 Pórtico contraventado de dois pavimentos | Preparado | CAP | 07/02/11 |
| | | Verificado | CAP | |
| Aprovado | | | | |

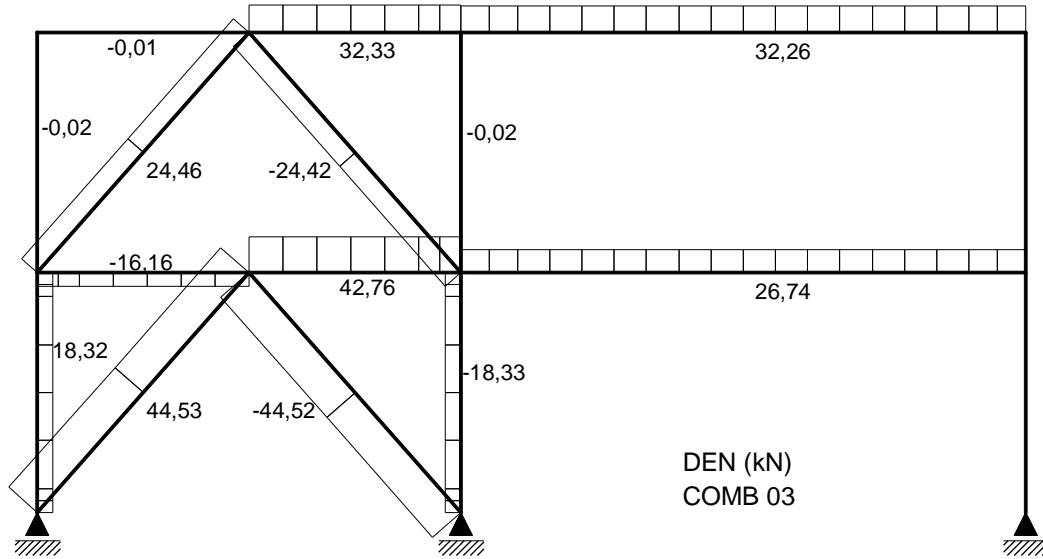


Figura A.4.26 - Diagrama de Esforço Normal (DEN) - "It" - Combinação 03

b) Diagramas de Esforço Cortante (DEC)

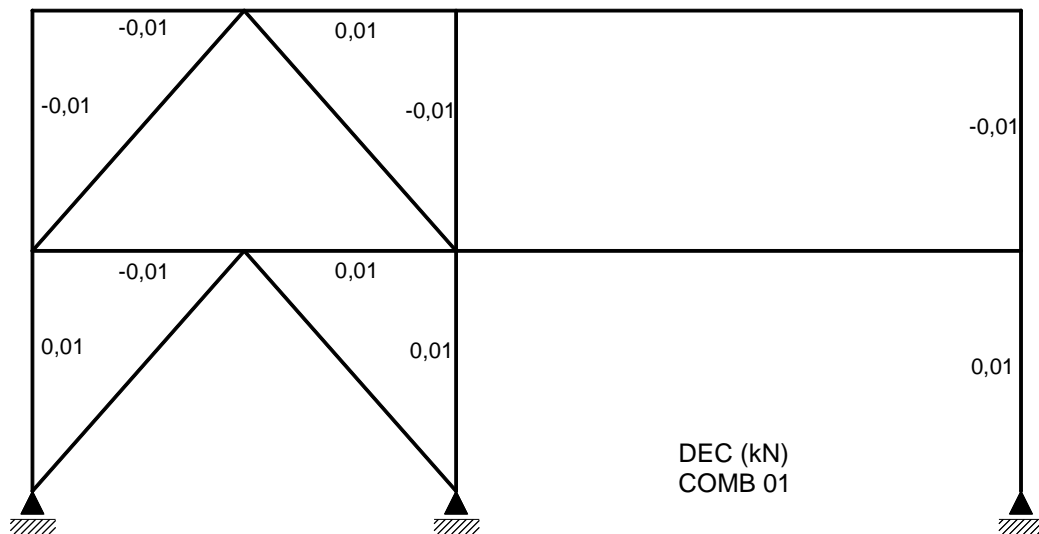



Figura A.4.27 - Diagrama de Esforço Cortante (DEC) - "It" - Combinação 01

| | | | | | |
|--|---|--|-------------|------|----------|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | Página | 237 | | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | | |
| | | Controle | Responsável | Data | |
| | Referência | A.4 – Caso 4 | Preparado | CAP | 07/02/11 |
| | | Pórtico contraventado de dois pavimentos | Verificado | CAP | |
| | | | Aprovado | | |

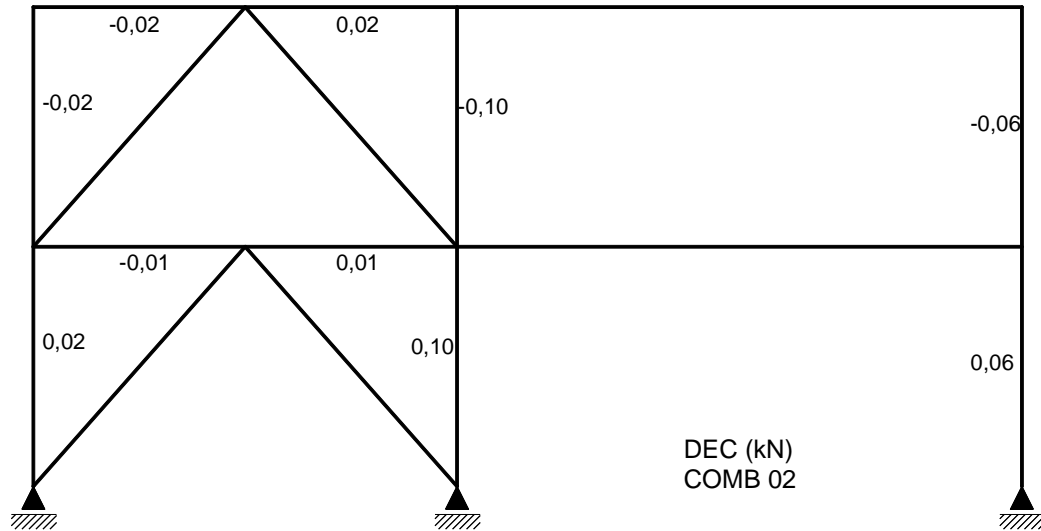


Figura A.4.28 - Diagrama de Esforço Cortante (DEC) - “It” - Combinação 02

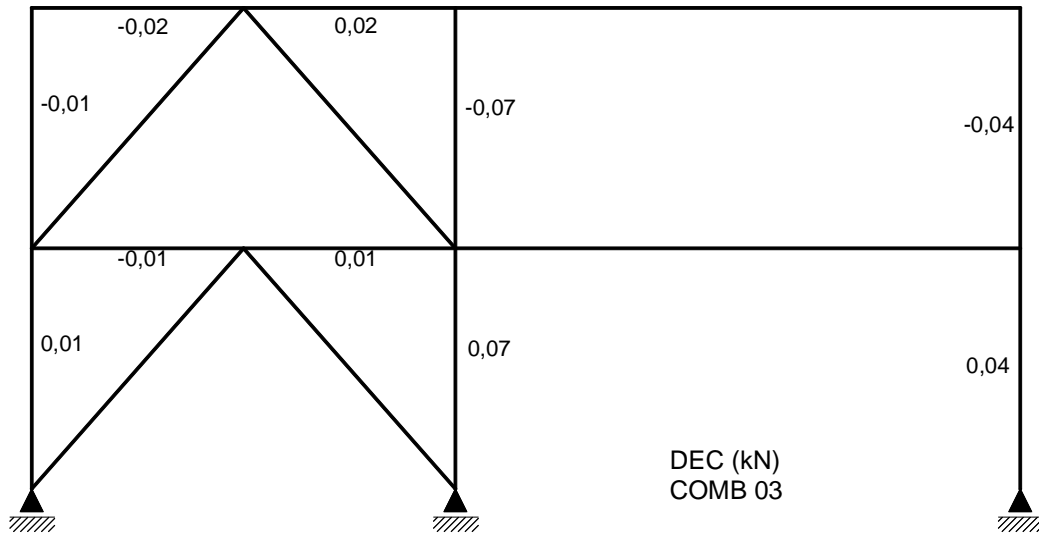

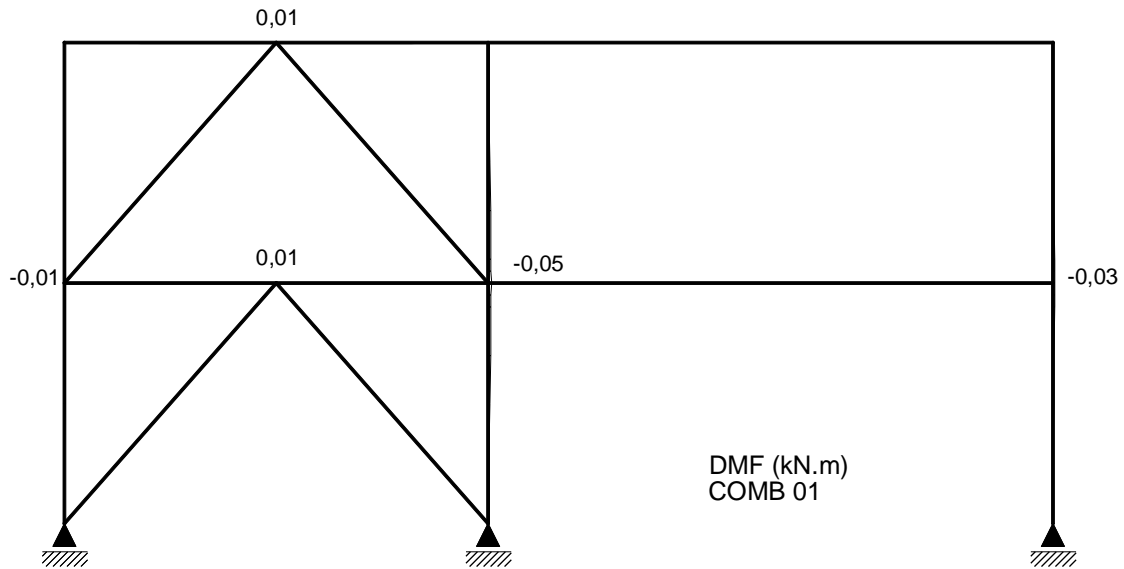


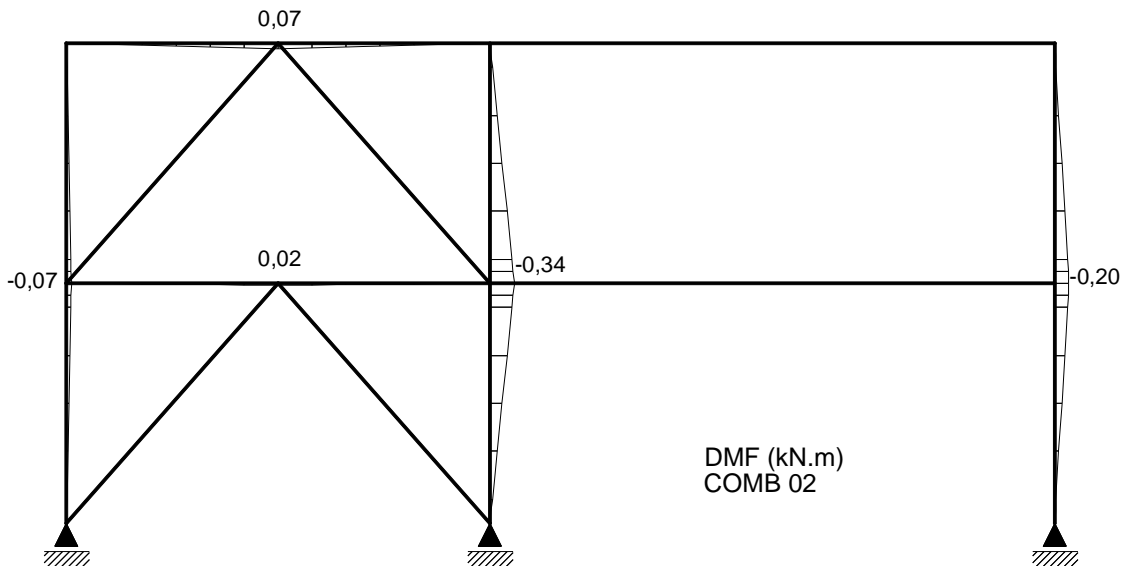
Figura A.4.29 - Diagrama de Esforço Cortante (DEC) - “It” - Combinação 03

| | | | | |
|--|--|------------|-------------|----------|
|  UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | Título | Página | 238 | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | |
| | | Controle | Responsável | Data |
| | Referência A.4 – Caso 4 Pórtico contraventado de dois pavimentos | Preparado | CAP | 07/02/11 |
| | | Verificado | CAP | |
| Aprovado | | | | |


c) Diagramas de Momento Fletor (DMF)

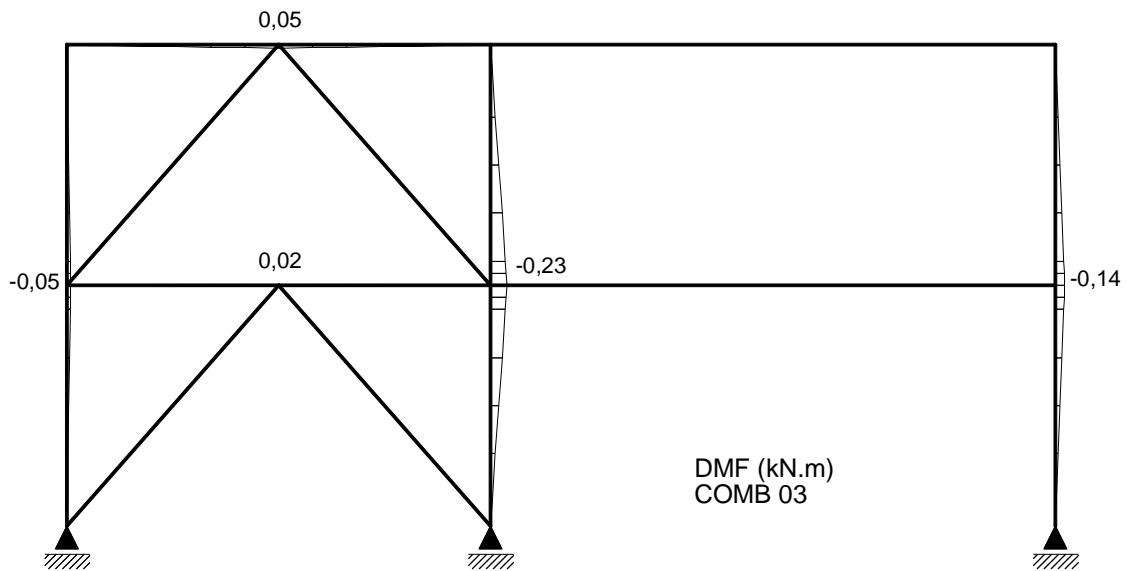


A.4.30 - Diagrama de Momento Fletor (DMF) - “It” - Combinação 01



A.4.31 - Diagrama de Momento Fletor (DMF) - “It” - Combinação 02

| | | | | |
|--|--|------------|-------------|----------|
|  UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | Título | Página | 239 | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | |
| | | Controle | Responsável | Data |
| | Referência A.4 – Caso 4 Pórtico contraventado de dois pavimentos | Preparado | CAP | 07/02/11 |
| | | Verificado | CAP | |
| | | Aprovado | | |



A.4.32 - Diagrama de Momento Fletor (DMF) - “It” - Combinação 03

A.4.6.4 Cálculo dos coeficientes B_1 e B_2

Nas Tabelas A.4.4, A.4.5 e A.4.6 mostram-se os valores dos coeficientes B_1 para cada barra da estrutura nas diferentes combinações de ações.

Tabela A.4.4 - Coeficiente B_1 - Combinação 01

| Barra | I_x (cm ⁴) | L_x (cm) | K_x | N_{ex} | N_{sd1} | C_m | B_1 |
|-------|--------------------------|------------|-------|----------|-----------|--------|-------|
| 1 | 1229 | 340 | 1 | 2096,44 | 241,96 | 1,0000 | 1,13 |
| 2 | 3437 | 340 | 1 | 5862,88 | 556,27 | 1,0000 | 1,10 |
| 3 | 1229 | 340 | 1 | 2096,44 | 313,6 | 1,0000 | 1,18 |
| 4 | 1229 | 340 | 1 | 2096,44 | 99,15 | 1,0000 | 1,05 |
| 5 | 3437 | 340 | 1 | 5862,88 | 255,37 | 1,0000 | 1,05 |
| 6 | 1229 | 340 | 1 | 2096,44 | 156,8 | 1,0000 | 1,08 |
| 7 | 1229 | 600 | 1 | 673,19 | 36,99 | 1,0000 | 1,06 |
| 8 | 10331 | 800 | 1 | 3183,11 | 1,99 | 1,0000 | 1,00 |
| 9 | 1229 | 600 | 1 | 673,19 | 1,81 | 1,0000 | 1,00 |
| 10 | 10331 | 800 | 1 | 3183,11 | 0,01 | 1,0000 | 1,00 |


| | | | | |
|--|---|------------|-------------|----------|
|  UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | Título | Página | 240 | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | |
| | | Controle | Responsável | Data |
| | Referência A.4 – Caso 4 Pórtico contraventado de dois pavimentos | Preparado | CAP | 07/02/11 |
| | | Verificado | CAP | |
| Aprovado | | | | |


Tabela A.4.5 - Coeficiente B_1 - Combinação 02

| Barra | I_x (cm ⁴) | L_x (cm) | K_x | N_{ex} | N_{Ss1} | C_m | B_1 |
|-------|--------------------------|------------|-------|----------|-----------|--------|-------|
| 1 | 3437 | 340 | 1 | 5862,88 | 170,81 | 1,0000 | 1,03 |
| 2 | 1229 | 340 | 1 | 2096,44 | 458,06 | 1,0000 | 1,28 |
| 3 | 3437 | 340 | 1 | 5862,88 | 249,76 | 1,0000 | 1,04 |
| 4 | 3437 | 340 | 1 | 5862,88 | 77,7 | 1,0000 | 1,01 |
| 5 | 1229 | 340 | 1 | 2096,44 | 202,46 | 1,0000 | 1,11 |
| 6 | 3437 | 340 | 1 | 5862,88 | 124,88 | 1,0000 | 1,02 |
| 7 | 1229 | 600 | 1 | 673,19 | 85 | 1,0000 | 1,14 |
| 8 | 1229 | 800 | 1 | 378,67 | 0,12 | 1,0000 | 1,00 |
| 9 | 1229 | 600 | 1 | 673,19 | 33,08 | 1,0000 | 1,05 |
| 10 | 1229 | 800 | 1 | 378,67 | 0,13 | 1,0000 | 1,00 |

Tabela A.4.6 - Coeficiente B_1 - Combinação 03

| Barra | I_x (cm ⁴) | L_x (cm) | K_x | N_{ex} | N_{SD1} | C_m | B_1 |
|-------|--------------------------|------------|-------|----------|-----------|--------|-------|
| 1 | 3437 | 340 | 1 | 5862,88 | 231,6 | 1,0000 | 1,04 |
| 2 | 1229 | 340 | 1 | 2096,44 | 566,63 | 1,0000 | 1,37 |
| 3 | 3437 | 340 | 1 | 5862,88 | 313,6 | 1,0000 | 1,06 |
| 4 | 3437 | 340 | 1 | 5862,88 | 99,11 | 1,0000 | 1,02 |
| 5 | 1229 | 340 | 1 | 2096,44 | 255,33 | 1,0000 | 1,14 |
| 6 | 3437 | 340 | 1 | 5862,88 | 158,8 | 1,0000 | 1,03 |
| 7 | 1229 | 600 | 1 | 673,19 | 29,63 | 1,0000 | 1,05 |
| 8 | 1229 | 800 | 1 | 378,67 | 0,08 | 1,0000 | 1,00 |
| 9 | 1229 | 600 | 1 | 673,19 | 19,79 | 1,0000 | 1,03 |
| 10 | 1229 | 800 | 1 | 378,67 | 0,08 | 1,0000 | 1,00 |

Como a estrutura foi classificada como de pequena deslocabilidade não se faz necessário um novo cálculo dos coeficientes B_2 para cada nível, sendo mantidos os valores apresentados na Tabela A.4.2.

| | | | | | |
|--|---|------------|--------------|------------|-------------|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | Página | 241 | | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | | |
| | | Referência | A.4 – Caso 4 | Controlado | Responsável |
| | Pórtico contraventado de dois pavimentos | Preparado | CAP | 07/02/11 | |
| | | Verificado | CAP | | |
| | | Aprovado | | | |

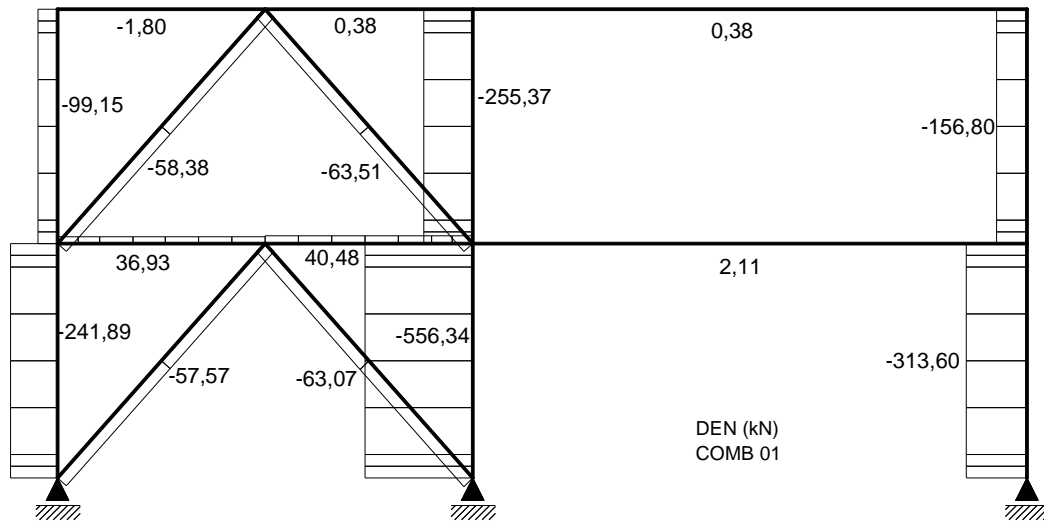
A.4.6.5 Esforços solicitantes

De acordo com o método da amplificação dos esforços solicitantes (MAES), em cada andar o momento fletor (M_{SD}) e a força axial (N_{SD}) solicitantes de cálculo, devem ser determinados por:


$$M_{SD} = B_1 M_{mt} + B_2 M_{lt} \quad (\text{A.4.4})$$

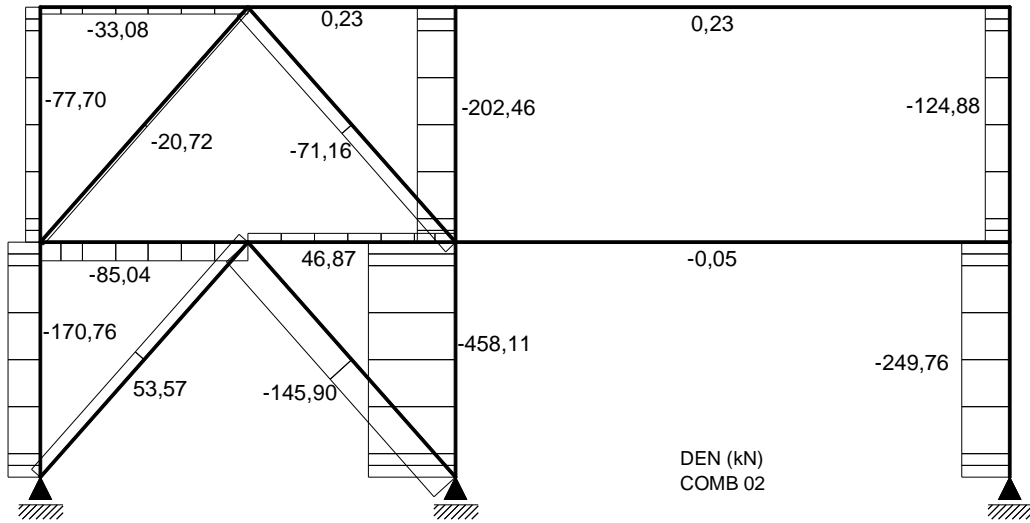
$$N_{SD} = N_{mt} + B_2 N_{lt} \quad (\text{A.4.5})$$

a) Diagramas de Esforço Normal (DEN)

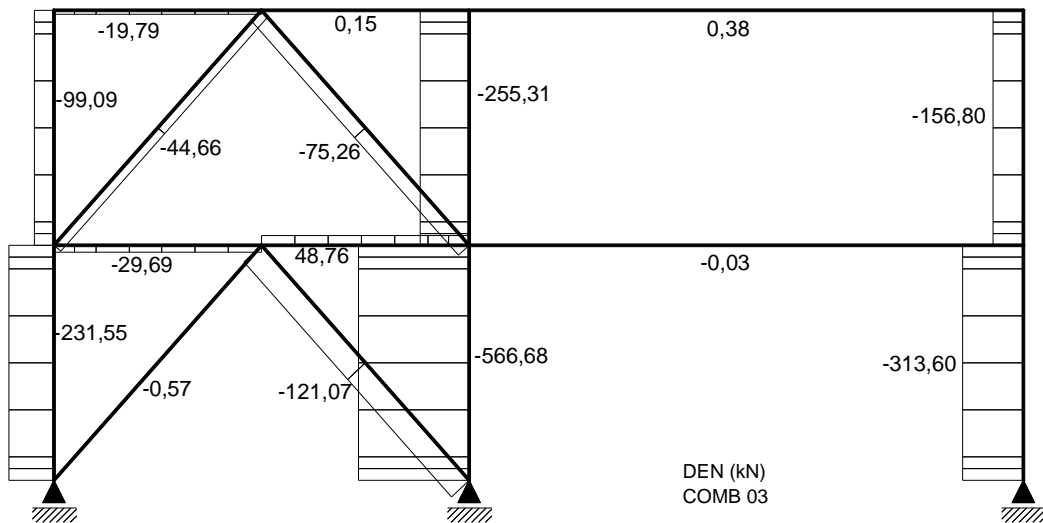


A.4.33 - Diagrama de Esforço Normal (DEN) - “MAES” - Combinação 01


| | | | | | |
|--|---|------------|--------------|-------------|------|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | Página | 242 | | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | | |
| | | Referência | A.4 – Caso 4 | Responsável | Data |
| | Pórtico contraventado de dois pavimentos | Preparado | CAP | 07/02/11 | |
| | | Verificado | CAP | | |
| | | Aprovado | | | |



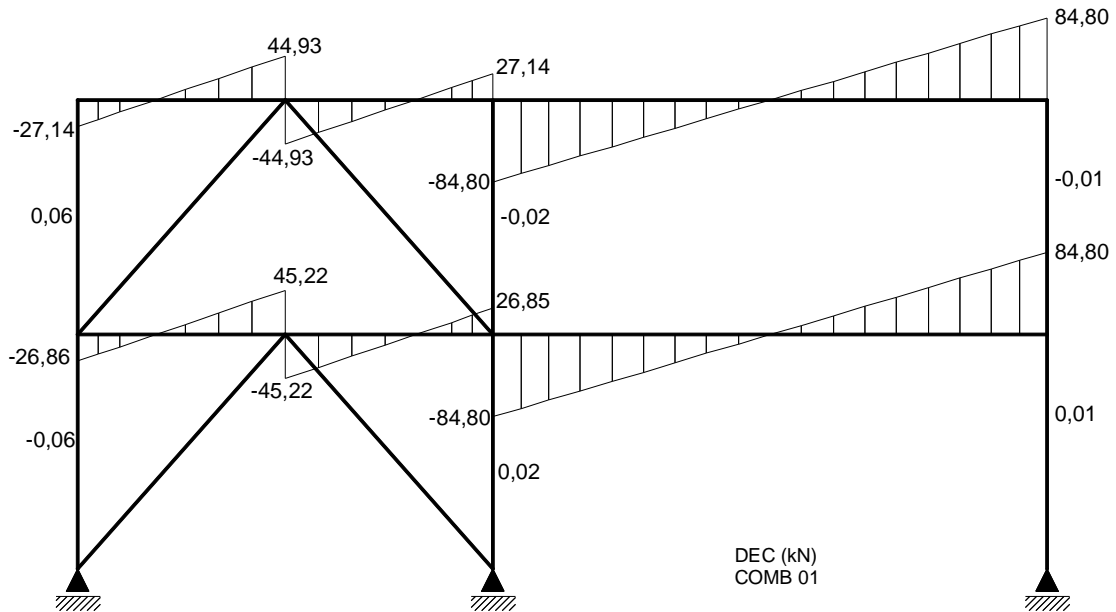
A.4.34 - Diagrama de Esforço Normal (DEN) - “MAES” - Combinação 02



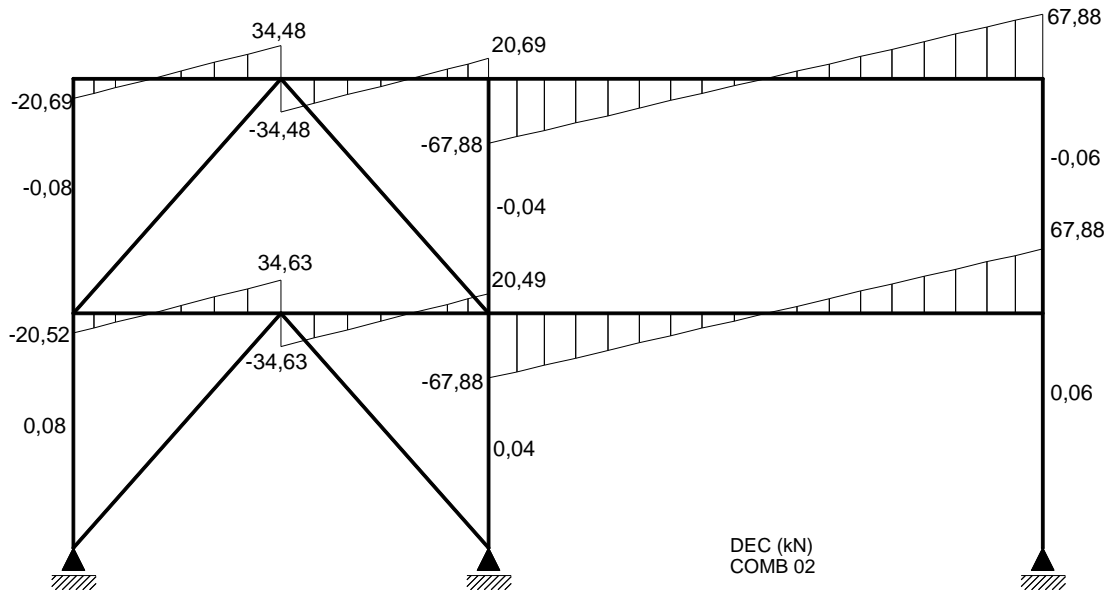
A.4.35 - Diagrama de Esforço Normal (DEN) - “MAES” - Combinação 03

| | | | | | |
|--|---|------------|--------------|-------------|------|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | Página | 243 | | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | | |
| | | Referência | A.4 – Caso 4 | Responsável | Data |
| | Pórtico contraventado de dois pavimentos | Preparado | CAP | 07/02/11 | |
| | | Verificado | CAP | | |
| Aprovado | | | | | |


b) Diagrama de Esforço Cortante (DEC)

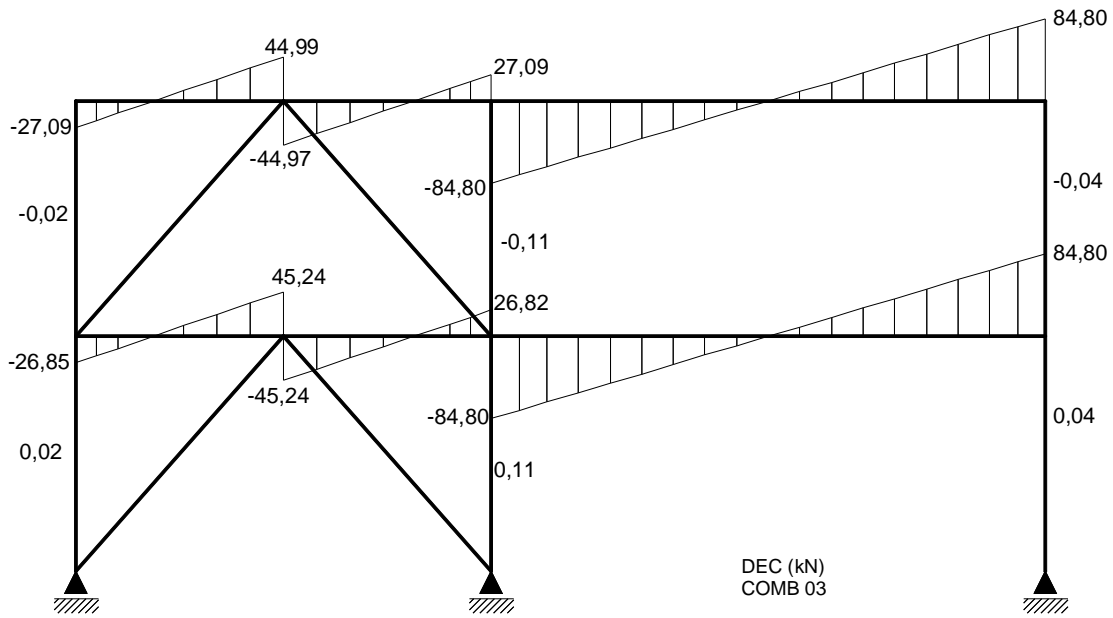


A.4.36 - Diagrama de Esforço Cortante (DEC) - “MAES” - Combinação 01



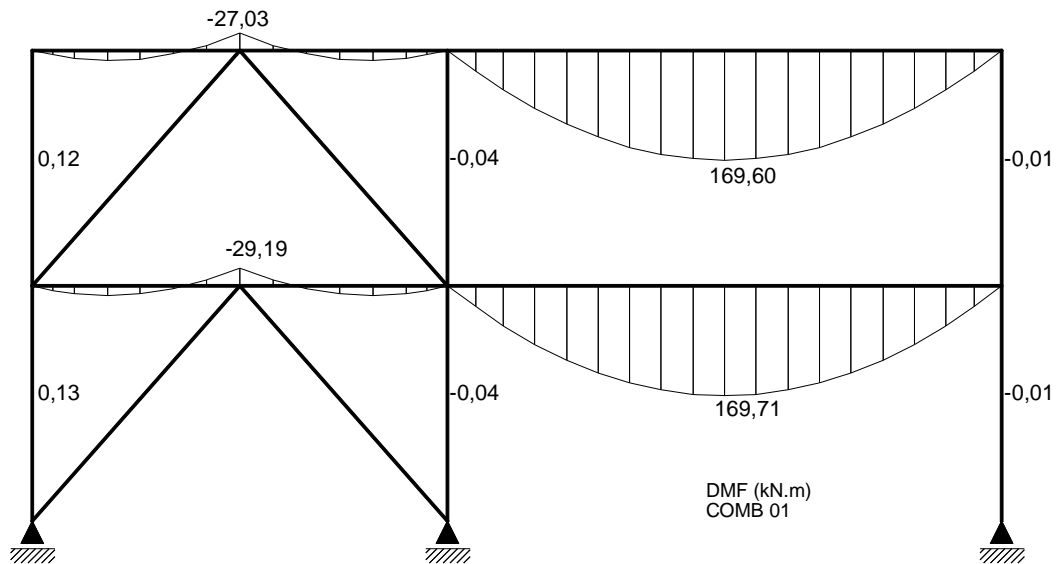
A.4.37 - Diagrama de Esforço Cortante (DEC) - “MAES” - Combinação 02

| | | | | | |
|--|--|------------|------------|-------------|------|
|  UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | Título | Página | 244 | | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | | |
| | | Referência | Controlado | Responsável | Data |
| | A.4 – Caso 4 Pórtico contraventado de dois pavimentos | Preparado | CAP | 07/02/11 | |
| | | Verificado | CAP | | |
| Aprovado | | | | | |




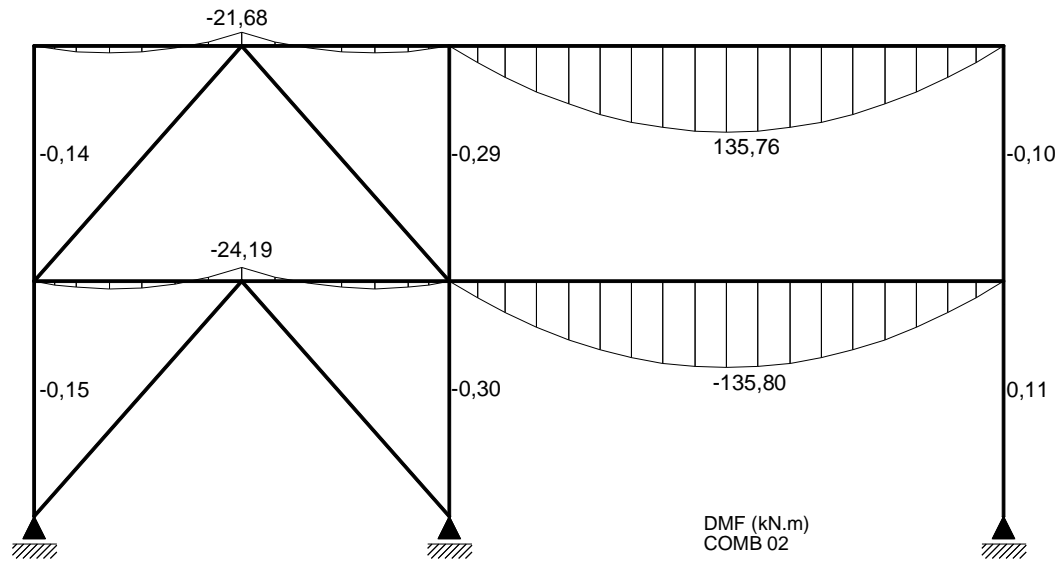
A.4.38 - Diagrama de Esforço Cortante (DEC) - “MAES” - Combinação 03

c) Diagrama de Momento Fletor (DMF)

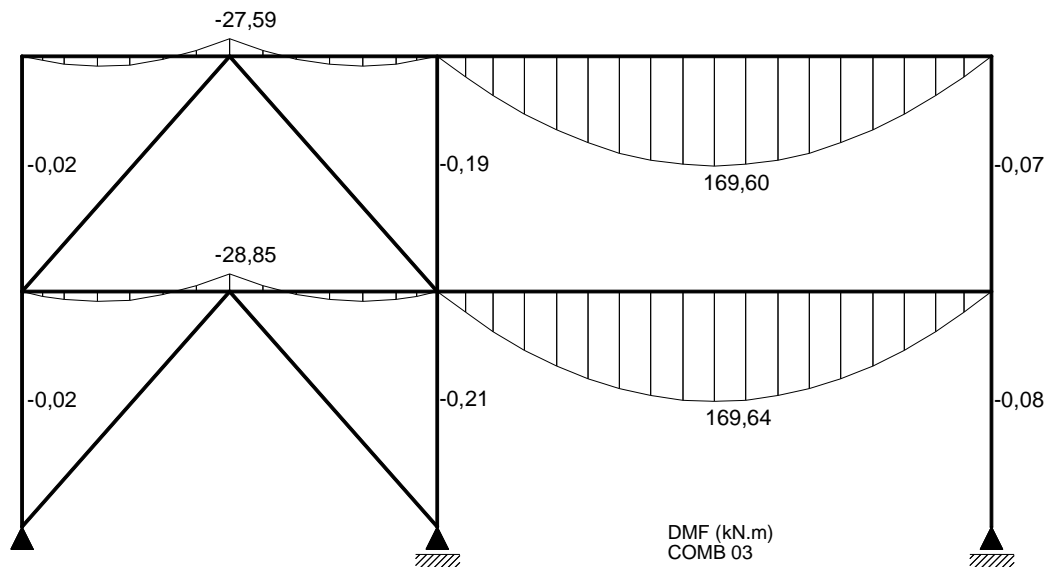


A.4.39 - Diagrama de Momento Fletor (DMF) - “MAES” - Combinação 01


| | | | | | |
|--|--|------------|------------|-------------|------|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | Página | 245 | | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | | |
| | | Referência | Controlado | Responsável | Data |
| | A.4 – Caso 4 Pórtico contraventado de dois pavimentos | Preparado | CAP | 07/02/11 | |
| | | Verificado | CAP | | |
| Aprovado | | | | | |



A.4.40 - Diagrama de Momento Fletor (DMF) - “MAES” - Combinação 02



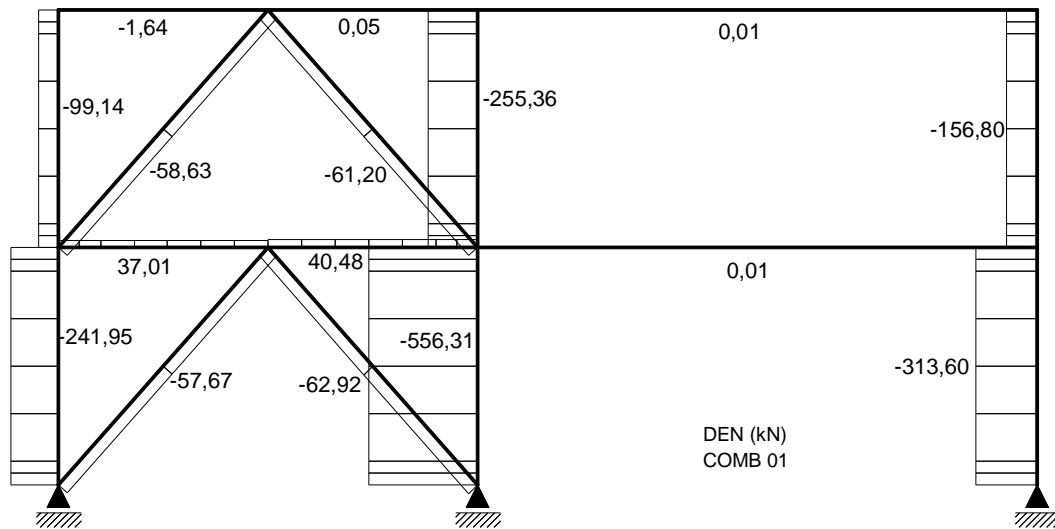
A.4.41 - Diagrama de Momento Fletor (DMF) - “MAES” - Combinação 01

| | | | | |
|--|--|------------|-------------|----------|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | Página | 246 | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | |
| | | Referência | Responsável | Data |
| | A.4 – Caso 4 Pórtico contraventado de dois pavimentos | Preparado | CAP | 07/02/11 |
| | | Verificado | CAP | |
| | | Aprovado | | |

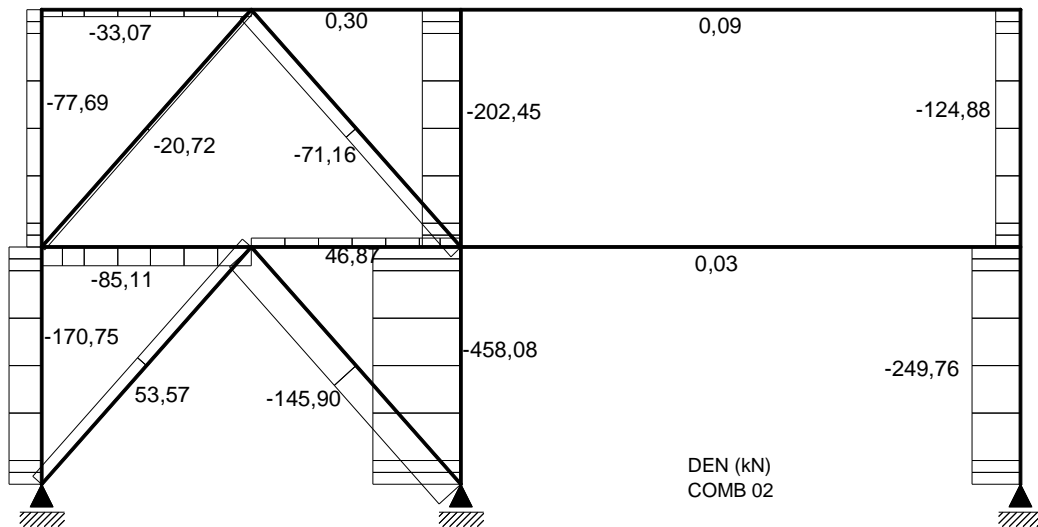
A.4.6.6 Análise de segunda ordem com auxílio do programa SAP2000

A seguir apresentam-se os diagramas de esforços solicitantes para uma análise de segunda ordem (ASO). Esta análise foi realizada com auxílio do programa SAP2000.


a) Diagramas de Esforço Normal (DEN)

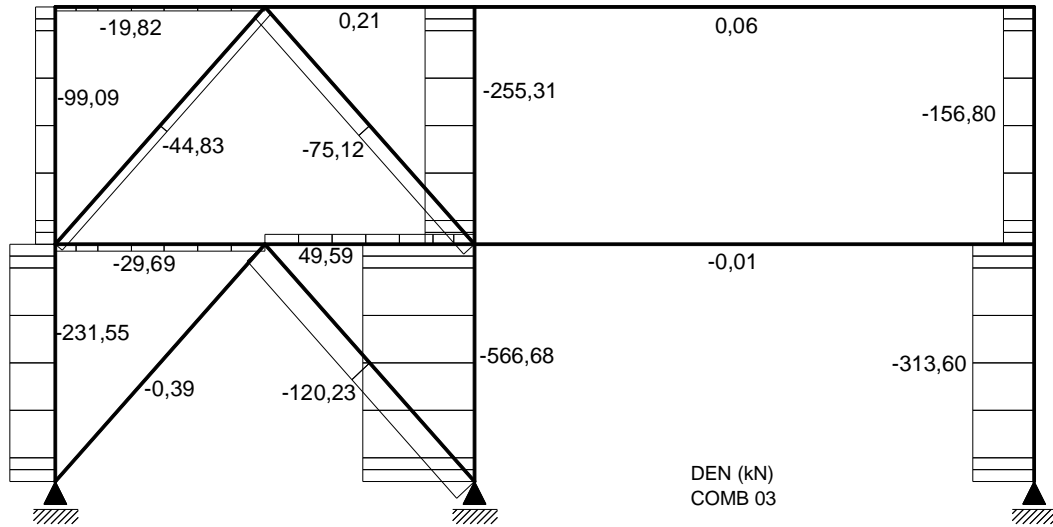


A.4.42 - Diagrama de Esforço Normal (DEN) - Combinação 01



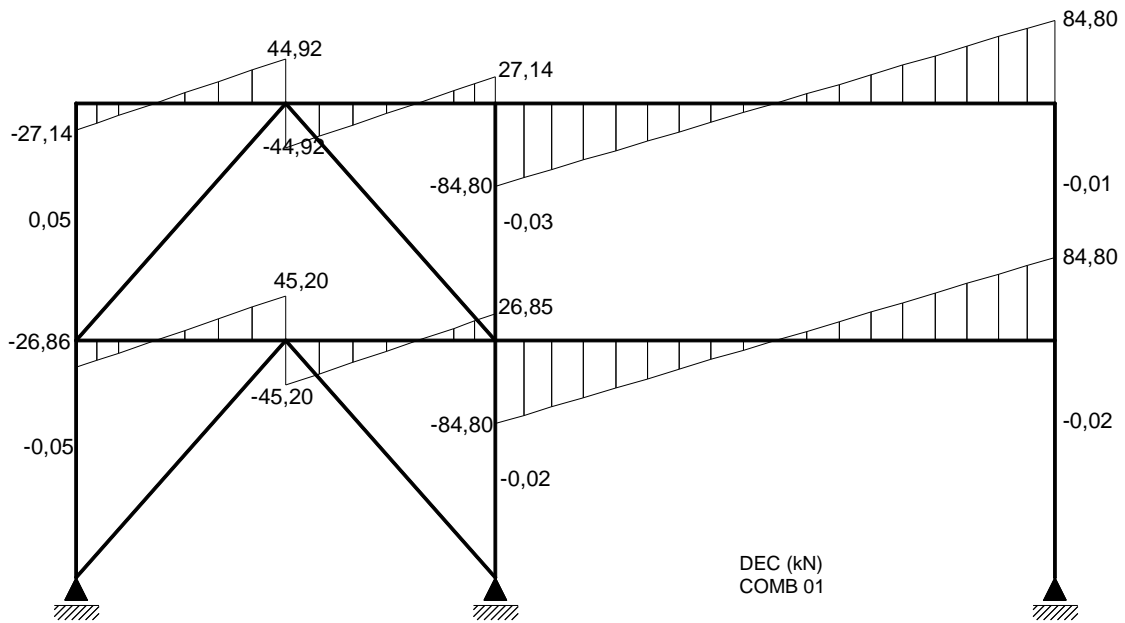
A.4.43 - Diagrama de Esforço Normal (DEN) - Combinação 02

| | | | | | |
|--|---|------------|--------------|-------------|------|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | Página | 247 | | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | | |
| | | Referência | A.4 – Caso 4 | Responsável | Data |
| | Pórtico contraventado de dois pavimentos | Preparado | CAP | 07/02/11 | |
| | | Verificado | CAP | | |
| | | Aprovado | | | |




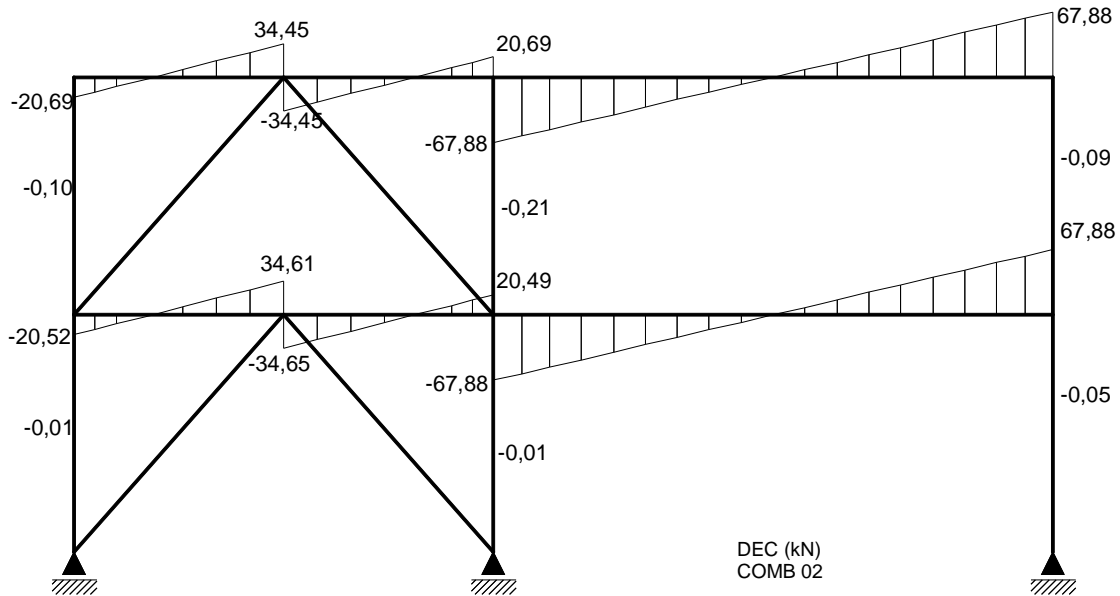
A.4.44 - Diagrama de Esforço Normal (DEN) - Combinação 03

b) Diagramas de Esforço Cortante (DEC)

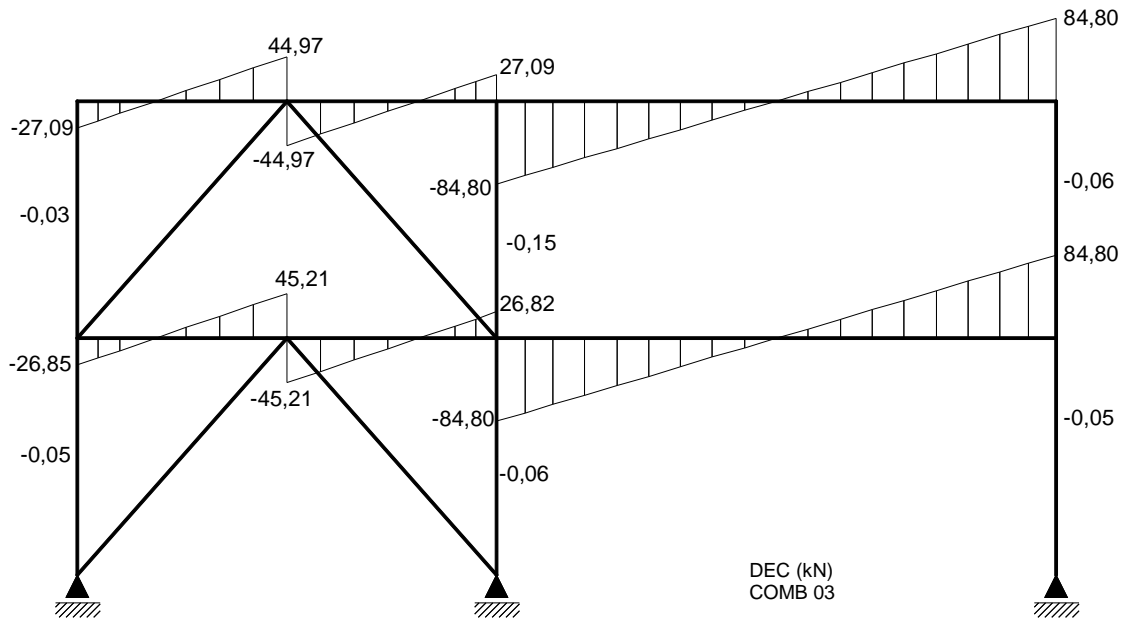


A.4.45 - Diagrama de Esforço Cortante (DEC) - Combinação 01


| | | | | | |
|--|---|------------|--------------|------------|-------------|
|  UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | Título | Página | 248 | | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | | |
| | | Referência | A.4 – Caso 4 | Controlado | Responsável |
| | Pórtico contraventado de dois pavimentos | Preparado | CAP | 07/02/11 | |
| | | Verificado | CAP | | |
| Aprovado | | | | | |



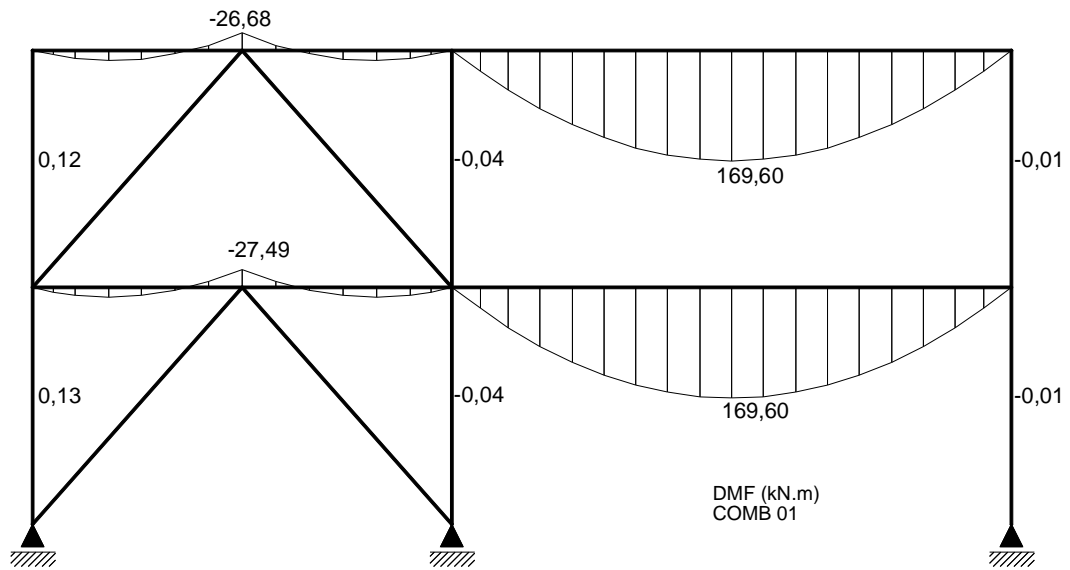
A.4.46 - Diagrama de Esforço Cortante (DEC) - Combinação 02



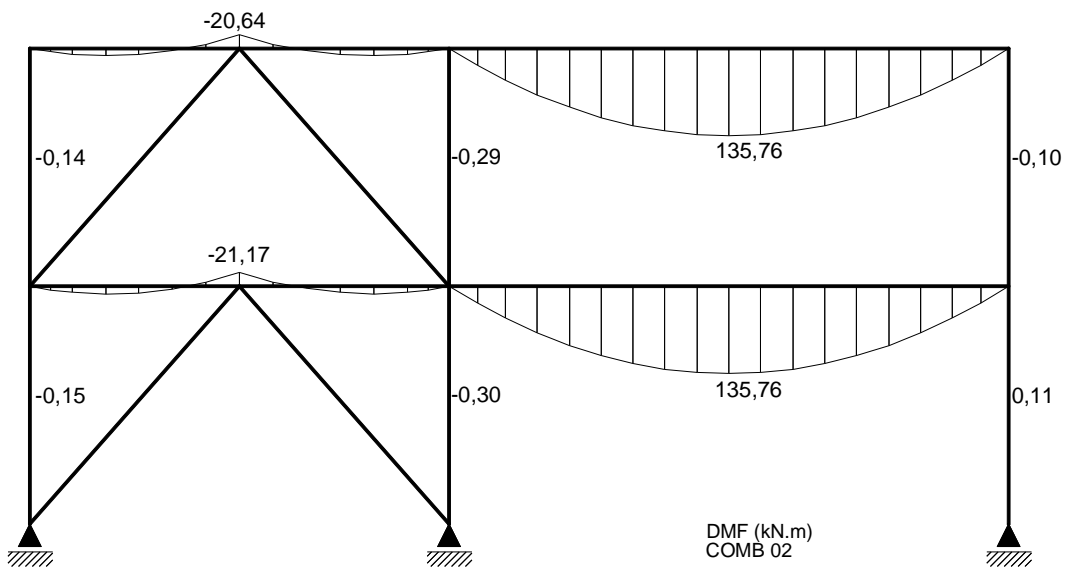
A.4.47 - Diagrama de Esforço Cortante (DEC) - Combinação 03

| | | | | | |
|--|---|--|-------------|------|----------|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | Página | 249 | | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | | |
| | | Controle | Responsável | Data | |
| | Referência | A.4 – Caso 4 Pórtico contraventado de dois pavimentos | Preparado | CAP | 07/02/11 |
| | | | Verificado | CAP | |
| Aprovado | | | | | |


c) Diagramas de Momento Fletor (DMF)

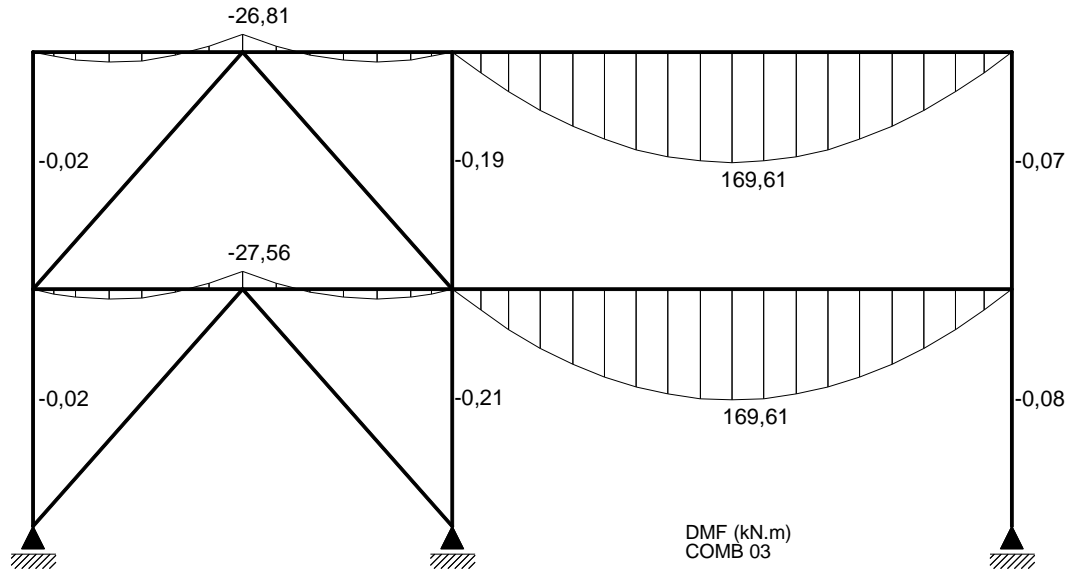


A.4.48 - Diagrama de Momento Fletor (DMF) - Combinação 01



A.4.49 - Diagrama de Momento Fletor (DMF) - Combinação 02

| | | | | | |
|--|--|------------|------------|-------------|------|
|  UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | Título | Página | 250 | | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | | |
| | | Referência | Controlado | Responsável | Data |
| | A.4 – Caso 4 Pórtico contraventado de dois pavimentos | Preparado | CAP | 07/02/11 | |
| | | Verificado | CAP | | |
| | | Aprovado | | | |



A.4.50 - Diagrama de Momento Fletor (DMF) - Combinação 03

A.4.7 Comparação dos resultados da APO e da ASO

Tendo em vista os diferentes tipos de análise realizados (itens A.4.5 e A.4.6) apresentam-se alguns gráficos com a sobreposição dos resultados dos esforços máximos nos trechos dos pilares situados no pavimento térreo da estrutura.

a) Barra 1

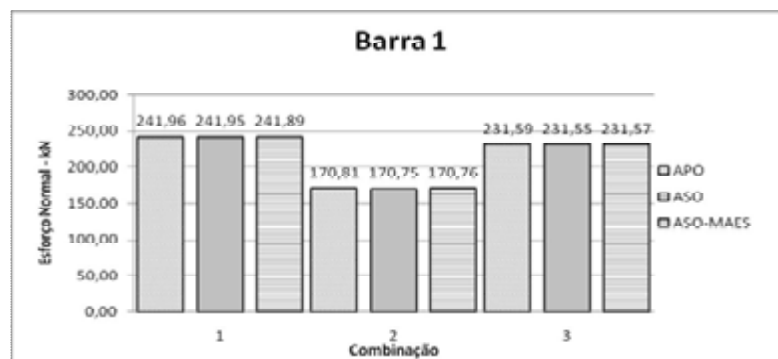



Figura A.4.51 - Esforço normal máximo (kN) na barra 1 para as combinações 01,02 e 03 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos)

| | | | | | |
|--|---|------------|--------------|------------|-------------|
|  UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | Título | Página | | 251 | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | | |
| | | Referência | A.4 – Caso 4 | Controlado | Responsável |
| | Pórtico contraventado de dois pavimentos | Preparado | CAP | 07/02/11 | |
| | | Verificado | CAP | | |
| | | Aprovado | | | |

b) Barra 2

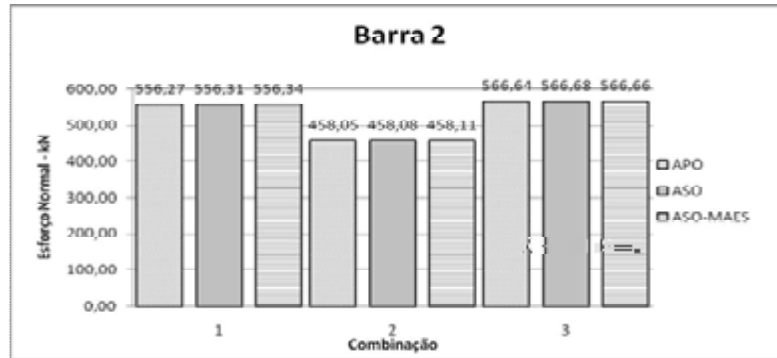


Figura A.4.52 - Esforço normal máximo (kN) na barra 2 para as combinações 01,02 e 03 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos)

c) Barra 3

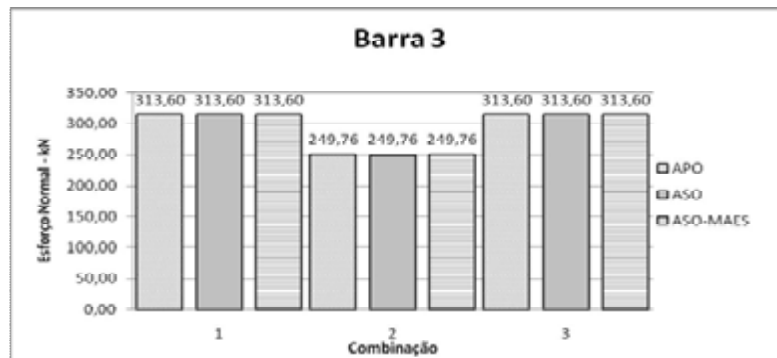



Figura A.4.53 - Esforço normal máximo (kN) na barra 3 para as combinações 1,2 e 3 de acordo com os diferentes tipos de análise (valores absolutos)

A.4.8 Verificação da capacidade última dos pilares do pavimento térreo

Para a verificação da capacidade última dos pilares do pavimento térreo, utilizou-se o programa Desmet 4.0. Para a APO fez-se a verificação de acordo com ABNT NBR8800:1986 enquanto que para a ASO fez-se a verificação de acordo com a ABNT NBR8800:2008.

Para a verificação dos pilares de acordo com a ABNT NBR8800:2008 e ABNT NBR8800:1986, tomam-se sempre igual a um os valores dos coeficientes de flambagem (K) .

| | | | | |
|--|--|------------|-------------|----------|
|  <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil</p> | Título | Página | 252 | |
| | Apêndice A – Estudo de Caso de Análise de Segunda Ordem | Revisão | A | |
| | | Controle | Responsável | Data |
| | Referência A.4 – Caso 4 Pórtico contraentado de dois pavimentos | Preparado | CAP | 07/02/11 |
| | | Verificado | CAP | |
| Aprovado | | | | |

Na Tabela A.4.7 apresentam-se os resultados da verificação da capacidade última dos pilares do pavimento térreo.

Tabela A.4.7 - Verificação da capacidade última dos pilares do pavimento térreo

| Barra | Combinação | Tipo de análise | Esforços solicitantes | | Esforços Resistentes | | Iteração |
|-------|------------|-----------------|-----------------------|-------------------|----------------------|-------------------|----------|
| | | | N_{SD} (kN) | $M_{x,SD}$ (kN.m) | N_{RD} (kN) | $M_{x,RD}$ (kN.m) | |
| 1 | 01 | APO - SAP2000 | 241,96 | 0,00 | 392,37 | - | 0,620 |
| | | ASO - SAP2000 | 241,95 | 0,00 | 487,30 | - | 0,497 |
| | | ASO - MAES | 241,89 | 0,00 | 487,30 | - | 0,496 |
| 2 | 03 | APO - SAP2000 | 566,64 | 0,00 | 772,65 | - | 0,730 |
| | | ASO - SAP2000 | 566,68 | 0,00 | 869,43 | - | 0,652 |
| | | ASO - MAES | 566,66 | 0,00 | 869,43 | - | 0,652 |
| 3 | 01 | APO - SAP2000 | 313,60 | 0,00 | 392,37 | - | 0,800 |
| | | ASO - SAP2000 | 313,60 | 0,00 | 487,30 | - | 0,644 |
| | | ASO - MAES | 313,60 | 0,00 | 487,30 | - | 0,644 |