

DESEMPENHO NÃO LINEAR GEOMÉTRICO DE PÓRTICOS METÁLICOS CONTRAVENTADOS SOB ACÇÕES VERTICAIS.

Manuel T. Braz César¹ e Rui Carneiro de Barros²

RESUMO

A necessidade da utilização de contraventamentos em estruturas porticadas tridimensionais obriga a uma selecção criteriosa, por parte do projectista, das dimensões e da localização dos elementos estruturais de forma a garantir melhoria do comportamento local e global, assim como uma economia do material estrutural utilizado. Numa primeira análise estudam-se pórticos planos contraventados e relaciona-se a variação de vários parâmetros (comprimentos, inércias e áreas) com o comportamento da estrutura face às acções verticais. Uma vez que as estruturas reais apresentam configurações tridimensionais, o passo seguinte consiste na determinação das relações existentes entre os pórticos que constituem a estrutura e o seu desempenho, em função dos sistemas de contraventamento adoptados. Para proceder a comparações recorreu-se à utilização de um software de cálculo automático (INST3D) baseado numa formulação exacta das matrizes de rigidez através das funções de estabilidade de Livesley e Chandler e que, através da equação matricial incremental de equilíbrio, permite obter os parâmetros críticos para as diversas configurações estudadas. Finalmente através de um estudo paramétrico, conclui-se qual a melhor solução a adoptar para cada estrutura analisada e apontam-se conclusões que melhor se adaptam ao pórtico (2D ou 3D) em estudo.

1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho pretende estudar a importância da utilização de sistemas de contraventamento na análise linear de 2ª ordem e concluir qual a melhor solução a utilizar para os casos em estudo de forma a otimizar a relação economia/eficiência estrutural. Para atingir o objectivo foram estudados pórticos de referência, para os quais se determinaram as cargas críticas. Após validar os resultados obtidos com o software de cálculo automático por comparação com resultados quer de cálculo manual quer disponíveis na bibliografia, foram alterados alguns parâmetros geométricos ligados à deformabilidade da estrutura para permitir concluir qual a importância relativa de cada parâmetro na análise efectuada. O recurso ao

¹ Assistente de 1º Triénio, Instituto Politécnico de Bragança, Departamento de Mecânica Aplicada, Bragança.

² Prof. Associado Agregado, FEUP – Faculdade Engª Univ Porto, Deptº de Engenharia Civil – G 305, Porto.

cálculo automático permitiu um estudo de maior amplitude na variação paramétrica e a obtenção dos resultados em quantidade suficiente para poder comparar os valores obtidos.

O estudo baseia-se na utilização das funções de estabilidade associadas aos elementos da matriz de rigidez de barras prismáticas, permitindo incluir o efeito do esforço axial na deformação da estrutura e conseqüentemente numa análise de segunda ordem. Os pórticos em estudo são rectangulares e de geometria regular e apresentam encastramentos na sua ligação ao exterior. Foi considerada indeformabilidade axial das barras e as cargas actuantes verticais aplicadas nos nós do pórtico. Como o programa de cálculo automático começa por tratar os pórticos no plano e determinar o parâmetro crítico, a metodologia seguida permite comparar os resultados obtidos e aferir o rigor do software. Considera-se a indeformabilidade dos planos que constituem as lajes ao nível de cada piso, sendo independentes os deslocamentos entre pisos. O software utilizado (INST3D) utiliza a formulação das funções de estabilidade propostas por Liversley e Chandler, determinando o parâmetro crítico para pórticos planos que depois de associados, através da compatibilização dos deslocamentos dos pórticos que pertencem simultaneamente a vários planos, permite obter o parâmetro crítico para o conjunto tridimensional.

Numa primeira análise os pórticos estudados foram analisados como deslocáveis (de nós móveis) e indeslocáveis (de nós fixos), sem contraventamento, determinando-se para cada caso o parâmetro crítico correspondente. Este facto permite a determinação dos limites nos quais será procurado o carregamento crítico uma vez que o limite superior fica definido pelo carregamento para o pórtico indeslocável (nós fixos) e o limite inferior determinado numa análise de pórtico deslocável (nós móveis), sendo o parâmetro crítico um valor situado numa condição intermédia entre os dois desempenhos. De seguida procedeu-se ao estudo dos pórticos com elementos de contraventamento, alterando a sua disposição, localização e propriedades da secção transversal. Após obter os parâmetros críticos para o pórtico de referencia, com e sem contraventamento, foram alterados parâmetros associados à geometria da estrutura (altura inter-pisos e vãos entre pilares) para melhor compreender o comportamento global da estrutura tridimensional.

2. MODELO DE CÁLCULO DA CARGA CRÍTICA DE PÓRTICOS 2D E 3D

A primeira abordagem na determinação do carga crítica foi usar um modelo bidimensional que permite calibrar o software desenvolvido (INST3D), utilizando para cada barra prismática dos pórticos a matriz de rigidez exacta de vigas-coluna com funções de estabilidade ϕ_j ($j = 1, 2, 3, 4$) consoante definida (Reis e Camotim¹ e Barros^{2,3}) por:

$$\begin{bmatrix} \frac{4EI}{L} \phi_3 & \frac{2EI}{L} \phi_4 & 0 & 0 & \frac{6EI}{L^2} \phi_2 & -\frac{6EI}{L^2} \phi_2 \\ \frac{2EI}{L} \phi_4 & \frac{4EI}{L} \phi_3 & 0 & 0 & \frac{6EI}{L^2} \phi_2 & -\frac{6EI}{L^2} \phi_2 \\ 0 & 0 & \frac{EA}{L} & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ \frac{6EI}{L^2} \phi_2 & \frac{6EI}{L^2} \phi_2 & 0 & 0 & \frac{12EI}{L^3} \phi_1 & -\frac{12EI}{L^3} \phi_1 \\ -\frac{6EI}{L^2} \phi_2 & -\frac{6EI}{L^2} \phi_2 & 0 & 0 & -\frac{12EI}{L^3} \phi_1 & \frac{12EI}{L^3} \phi_1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

A matriz anterior corresponde à numeração dos deslocamentos generalizados associada ao referencial local da Figura 1, e as funções de estabilidade ϕ_j ($j = 1, 2, 3, 4$) são relacionáveis com as funções de estabilidade originalmente desenvolvidas por Livesley e Chandler⁴.

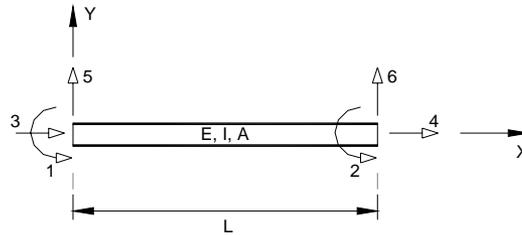


Fig. 1 – Deslocamentos no referencial local da barra prismática

Assim, a formulação utilizada no software desenvolvido (INST3D) é baseada na mesma matriz de rigidez exacta de vigas-coluna, agora escrita sob a forma:

$$\begin{bmatrix} \frac{sEI}{L} & \frac{scEI}{L} & 0 & 0 & \frac{s(1+c)EI}{L^2} & \frac{-s(1+c)EI}{L^2} \\ \frac{scEI}{L} & \frac{sEI}{L} & 0 & 0 & \frac{s(1+c)EI}{L^2} & \frac{-s(1+c)EI}{L^2} \\ 0 & 0 & \frac{EA}{L} & \frac{-EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-EA}{L} & \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ \frac{s(1+c)EI}{L^2} & \frac{s(1+c)EI}{L^2} & 0 & 0 & \frac{2s(1+c)EI}{mL^3} & \frac{-2s(1+c)EI}{mL^3} \\ \frac{-s(1+c)EI}{L^2} & \frac{-s(1+c)EI}{L^2} & 0 & 0 & \frac{-2s(1+c)EI}{mL^3} & \frac{2s(1+c)EI}{mL^3} \end{bmatrix} \quad (2)$$

em que para $\rho > 0$ (barras comprimidas):

$$\left. \begin{aligned} s &= \frac{(1 - 2\alpha \cdot \cot(2\alpha))\alpha}{\tan \alpha - \alpha} & m &= \frac{2s(1+c)}{2s(1+c) - \pi^2 \cdot \rho} \\ c &= \frac{2\alpha - \text{sen}(2\alpha)}{\text{sen}(2\alpha) - 2\alpha \cdot \cos(2\alpha)} & \rho &= \frac{P}{P_E}; P_E = \frac{\pi^2 EI_z}{L^2}; \alpha = \frac{\pi}{2} \sqrt{\rho} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

e para $\rho < 0$ (barras traccionadas) as equações adoptam a forma:

$$\left. \begin{aligned} s &= \frac{(1 - 2\gamma \cdot \coth(2\gamma))\gamma}{\tanh \gamma - \gamma} \\ c &= \frac{2\gamma - \text{senh}(2\gamma)}{\text{senh}(2\gamma) - 2\gamma \cdot \cosh(2\gamma)} & \gamma &= \frac{\pi}{2} \sqrt{-\rho} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

A função m introduzida por Merchant⁵ permite representar a diminuição de rigidez ao movimento transversal da barra prismática bi-encastada, como consequência da inclinação que ocorre entre o eixo da barra e a direcção das forças P responsáveis pela compressão axial.

A matriz de rigidez global de pórticos 2D é obtida por assemblagem e espalhamento criteriosos das matrizes de rigidez locais, e a posterior determinação do parâmetro crítico envolve também o conhecimento dos limites inferior (pórticos deslocáveis ou de nós móveis) e superior (pórticos indeslocáveis ou de nós fixos) entre os quais será procurado. Nos pórticos deslocáveis os deslocamentos laterais podem ocorrer por flexão dos pilares e neste caso torna-se importante o uso de elementos diagonais de contraventamento para impedir a perda de geometria (ou pode-se ainda recorrer ao compromisso entre as inércias das barras dos pórticos, limitando os deslocamentos horizontais) que devido à sua rigidez axial permita absorver os esforços de tracção e impedir o deslocamento do pórtico. As barras utilizadas no contraventamento diagonal são modeladas com rigidez à flexão nula e rigidez axial inferior à adoptada para os pilares e vigas, e a formulação matricial corresponde à adição da contribuição da rigidez axial das barras inclinadas nos andares com diagonais; só posteriormente se realiza a determinação do parâmetro crítico e do modo de encurvadura. No caso de pórticos parcialmente contraventados em alguns pisos, como não se sabe se o pórtico é deslocável ou indeslocável é necessário efectuar as duas verificações determinando os parâmetros críticos respectivos λ_{des} e λ_{indes} . Aplicando esta matriz de rigidez à formulação matricial que relaciona os esforços actuantes com as deformações resultantes obtém-se, por um processo incremental, o parâmetro crítico e o respectivo modo de encurvadura assim como a deformação imediatamente antes da perda de estabilidade.

Na determinação do parâmetro crítico de instabilidade de pórticos tridimensionais podem-se usar as matrizes para pórticos bidimensionais considerando cada pórtico 2D como parte integrante (sub-estrutura) da estrutura 3D, ligados entre si pelas lajes com comportamento de diafragma rígido horizontal e associando esses pórticos através da compatibilização dos deslocamentos dos nós pertencentes a vários pórticos. A contribuição de cada painel é assegurada pela introdução das matrizes de rigidez de cada painel na matriz de rigidez do sistema. A posição de cada pórtico é introduzida com a adopção de um sistema de eixos e um vector de posição (vector de transformação). Assim, após obtenção da matriz de rigidez global do pórtico 3D, a determinação do parâmetro crítico da estrutura global que conduz ao colapso da estrutura 3D é realizada dentro dos limites impostos pelo funcionamento dos pórticos bidimensionais isolados (deslocáveis e indeslocáveis). Note-se que o parâmetro crítico determinado para os pórticos 2D isolados não será igual ao parâmetro crítico determinado para os pórticos 3D, pois a ligação entre os pórticos através das lajes impede que os pórticos percam a estabilidade independentemente dos pórticos adjacentes.

As estruturas que serão estudadas são supostas de nós rígidos, com ligações triplas ao exterior, o que consequentemente se traduz em sistemas altamente hiperestáticos. A utilização da formulação exacta da matriz de rigidez para análise não-linear geométrica (de 2ª ordem) de pórticos 3D (e 2D) permite obter a singularidade da matriz de rigidez, e portanto determinar com grande rigor a carga crítica de colapso da estrutura por instabilidade.

3. ESTUDO PARAMÉTRICO DA CARGA CRÍTICA DE PÓRTICOS PLANOS

Na formulação utilizada considera-se que os pórticos são rectangulares constituídos por barras prismáticas de secção constante com: Numero de pilares constante em cada piso; Pilares sempre na mesma prumada; Ligações rígidas em cada nó; Ligações triplas (encastramentos) ao exterior; Cargas verticais concentradas nos nós.

São determinados os parâmetros críticos de pórticos deslocáveis e indeslocáveis, associados a um estudo paramétrico da variabilidade com parâmetros da geometria global e com as características seccionais (área e inércia). Foram estudados 2 casos para permitir concluir como se comporta um pórtico plano com diferentes configurações de contraventa-

mento, sob cargas verticais simétricas com o mesmo valor em cada piso. O primeiro caso refere-se a um pórtico com 3 pisos e o segundo a um pórtico com 5 pisos, ambos sem e com contraventamentos múltiplos. Neste trabalho, e sem qualquer perda de generalidade, apresentam-se os resultados da análise do pórtico com 3 pisos, sem elementos de contraventamento e com 1, 2 e 3 barras diagonais (Fig. 2).

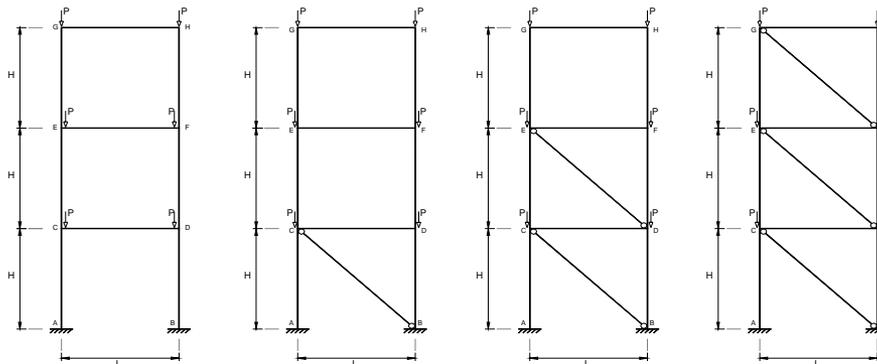


Fig. 2 - Pórtico plano de 3 pisos, sem contraventamento e com contraventamento múltiplo

Escolheu-se um perfil da série HEB (HE 200B), usual nos projectos de estruturas metálicas, quer para as vigas quer para os pilares de forma a minorar diversidades de interpretação de resultados. As diagonais utilizadas no modelo possuem uma rigidez à flexão nula e uma área de 10cm^2 , inferior à adoptada para os pilares e vigas. O aço utilizado possui um módulo de elasticidade de 210 GPa. Foram alterados realisticamente vários parâmetros relativos à geometria global do pórtico plano, nomeadamente o vão entre pilares (L) e a altura dos pisos (H). O parâmetro L varia entre 3m e 8m enquanto o parâmetro H varia entre 3m e 4m, com incrementos de 0.5m. Para cada caso paramétrico foi determinada a carga crítica para o pórtico como deslocável e indeslocável (Figuras 3, 4, 5 e 6).

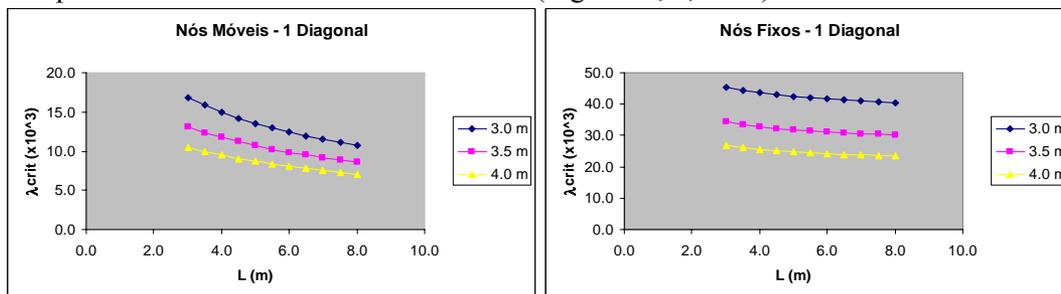


Fig. 3 – Parâmetro crítico do pórtico plano com 1 diagonal (piso 1) de contraventamento

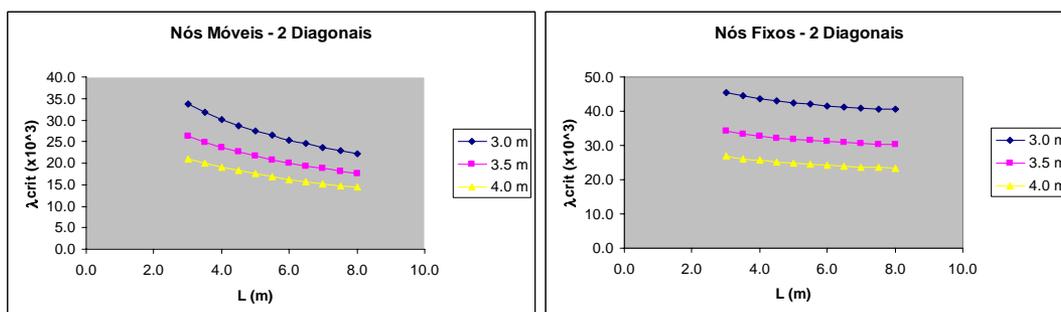


Fig. 4 – Parâmetro crítico do pórtico plano com 2 diagonais (pisos 1-2) de contraventamento

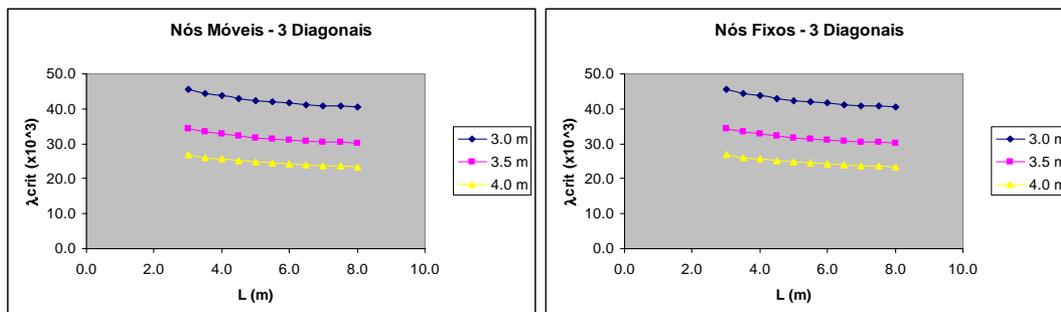


Fig. 5 – Parâmetro crítico do pórtico plano com 3 diagonais (pisos 1-2-3) de contraventamento

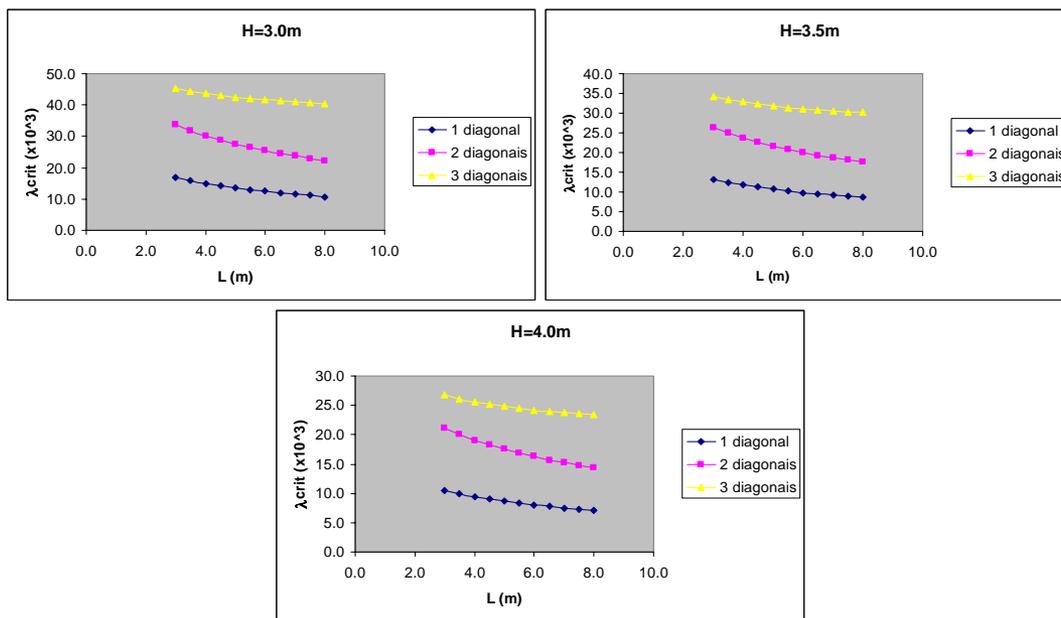


Fig. 6 – Parâmetros críticos do pórtico plano contraventado, com diferentes alturas entre pisos

Nestes gráficos é possível verificar que no caso de existirem 2 diagonais de contraventamento o comportamento da estrutura é diferente dos outros casos. Isto deve-se ao facto da estrutura contraventada com 2 diagonais apresentar um comportamento intermédio entre nós fixos e nós móveis o que provoca uma quebra na variação do parâmetro crítico de carga, à medida que aumenta o vão entre pilares. Assim para vãos pequenos a estrutura segue um padrão correspondente ao comportamento como pórtico indeslocável enquanto que para vãos maiores apresenta um comportamento de pórtico deslocável. Nos casos de 1 diagonal e 3 diagonais o comportamento é mais previsível apresentando padrões bem definidos de comportamento: nós móveis (1 diagonal); nós fixos (3 diagonais).

Foi ainda analisado um pórtico plano de 5 pisos, sucessivamente contraventado até aos 3º, 4º e 5º pisos. Verifica-se que no caso de existirem 3 diagonais, a estrutura pode apresentar dois comportamentos diferentes, de nós fixos e de nós móveis, enquanto que nos restantes casos (4-5 diagonais) o pórtico comporta-se como indeformável. Esta observação permite referir que, para a tipologia analisada, a mudança de comportamento se verifica pela introdução de elementos no 4º piso.

A carga crítica é mais baixa no caso de se contraventarem os três primeiros pisos, mas se a estrutura for pórtico indeslocável então é indiferente utilizar mais elementos de contraventamento nos pisos superiores porque os gráficos são coincidentes. Logo para esta tipologia o piso condicionante é o terceiro, e não a estrutura totalmente contraventada. No caso de pórticos de nós fixos o andamento é idêntico para cada parâmetro, apresentando curvas paralelas com tendência para se tornarem horizontais (parâmetro crítico constante com a variação do vão entre pilares). A diminuição de H produz um aumento da carga crítica aproximadamente proporcional ao longo da variação de L (curvas paralelas).

4. ESTUDO PARAMÉTRICO DA CARGA CRÍTICA DE PÓRTICOS TRIDIMENSIONAIS

Nesta formulação considera-se que os pórticos são rectangulares constituídos por barras prismáticas de secção constante com: Numero de pilares constante em cada piso; Pilares sempre na mesma prumada; Ligações rígidas em cada nó; Ligações triplas (encastramentos) ao exterior; Cargas verticais concentradas nos nós; Pilares comuns ortogonais.

Para facilitar a determinação dos parâmetros críticos de pórticos tridimensionais foram utilizados os pórticos planos já estudados, mas com uma associação tridimensional em que cada pórtico 3D resulta da associação (e repetição no espaço) dos pórticos 2D (Fig. 7). Além de ser possível alterar o número de elementos nos pórticos, também pode alterar-se a disposição dos elementos nos pórticos e a sua associação, através de combinações das configurações de contraventamento alterando a sua posição no espaço.

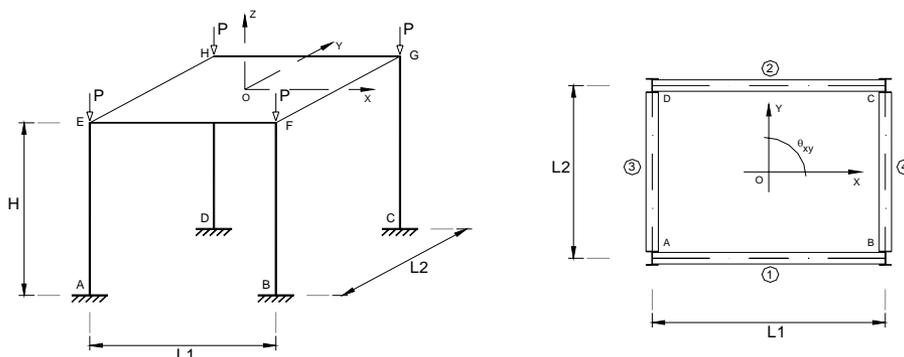


Fig. 7 - Pórtico 3D não-contraventado, composto de 4 pórticos 2D

Estudaram-se então pórticos tridimensionais de 3 e 5 pisos, embora neste trabalho só se comparem com mais pormenor os resultados dos de 3 pisos. O estudo inicia-se determinando as cargas críticas dos pórticos planos que compõem a estrutura tridimensional e que, devido à utilização de pórticos 2D já estudados, são já conhecidas. Os vãos L_1 e L_2 são neste exemplo considerados iguais e a sua variação paramétrica é também idêntica. As restantes características são mantidas nomeadamente a série de perfis utilizados assim como o módulo de elasticidade.

O primeiro pórtico 3D estudado é contraventado nos 4 planos sucessivamente nos 3 pisos (Fig. 8), apresentando-se na Fig. 9 alguns dos resultados paramétricos; o segundo pórtico 3D estudado é contraventado assimetricamente apenas em 3 planos sucessivamente nos 3 pisos (Fig. 10), apresentando-se na Fig. 11 alguns dos correspondentes resultados paramétricos. (O estudo também realizado de pórticos não-simétricos não é aqui apresentado).

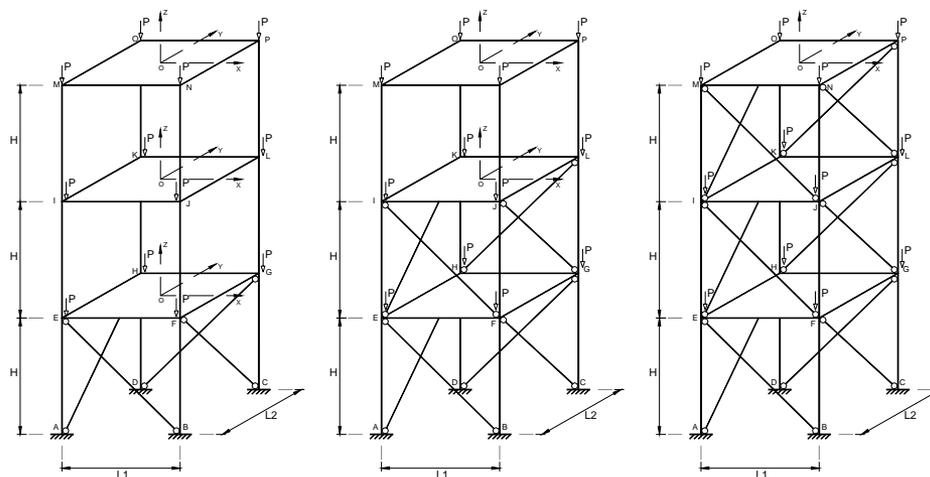


Fig. 8 - Pórtico 3D contraventado em altura (pisos: 1; 1-2; 1-2-3) em 4 planos

Como se pode observar nos gráficos da Figura 9 comparando-os com os gráficos obtidos para o pórtico 2D (Fig. 3-6), o comportamento do pórtico 3D corresponde ao menor valor do comportamento dos pórticos isolados 2D. Este facto está associado aos limites onde está localizado o parâmetro crítico e também ao facto da estrutura apresentar dupla simetria. Se a disposição dos contraventamentos não fosse simétrica existiriam parcelas de rigidez dos pórticos adjacentes que impediriam a deformabilidade da estrutura, o que se traduziria num valor intermédio do parâmetro crítico situado entre os já referidos limites, ou seja a estrutura não apresentaria um comportamento de nós móveis ou fixos mas sim um comportamento intermédio. Os pórticos usados na composição 3D são idênticos (4 pórticos de igual geometria) pelo que o comportamento parcial (2D) corresponde ao comportamento global (3D); assim, se a estrutura bidimensional é condicionada pela mobilidade inferior (nós móveis) então o pórtico tridimensional também será limitado do mesmo modo. Note-se que a simetria assume um papel importante, quer na compreensão do comportamento estrutural quer na previsão do modelo de colapso pois todos os pórticos têm a mesma importância e contribuem da mesma forma para assegurar a estabilidade estrutural. Então também o raciocínio utilizado para a eficácia/desempenho da colocação dos elementos de contraventamento é equivalente para os dois casos (2D e 3D), nomeadamente no desenvolvimento da carga crítica com a variação dos parâmetros L (vão entre pilares) e H (altura dos pisos).

Verifica-se o mesmo tipo de variação para o caso de existirem elementos de contraventamento no primeiro piso e para o caso de estarem os dois primeiros pisos contraventados. Com a utilização de contraventamentos na totalidade dos pisos o gráfico apresenta-se mais linear com fraca variação da carga crítica com o aumento do vão entre pilares sendo mais notória a diminuição da carga crítica com o aumento da altura entre pisos.

A variação da carga crítica com o vão, para distintas alturas entre pisos, é fortemente dependente das configurações de contraventamento adoptadas. No caso em que a estrutura se encontra contraventada nos dois primeiros pisos a diminuição do parâmetro crítico é mais acentuada à medida que se aumenta o vão entre pilares. Pode ainda observar-se que ao associar os pórticos 2D numa configuração tridimensional o comportamento para o caso de estarem dois pisos contraventados (com 4 planos de contraventamento) é igual ao comportamento que ocorria para pórticos planos de nós móveis; portanto no caso 3D os pórticos apresentam um comportamento de nós móveis, enquanto que na configuração 2D apresentam comportamentos diferenciados para nós fixos e nós móveis.

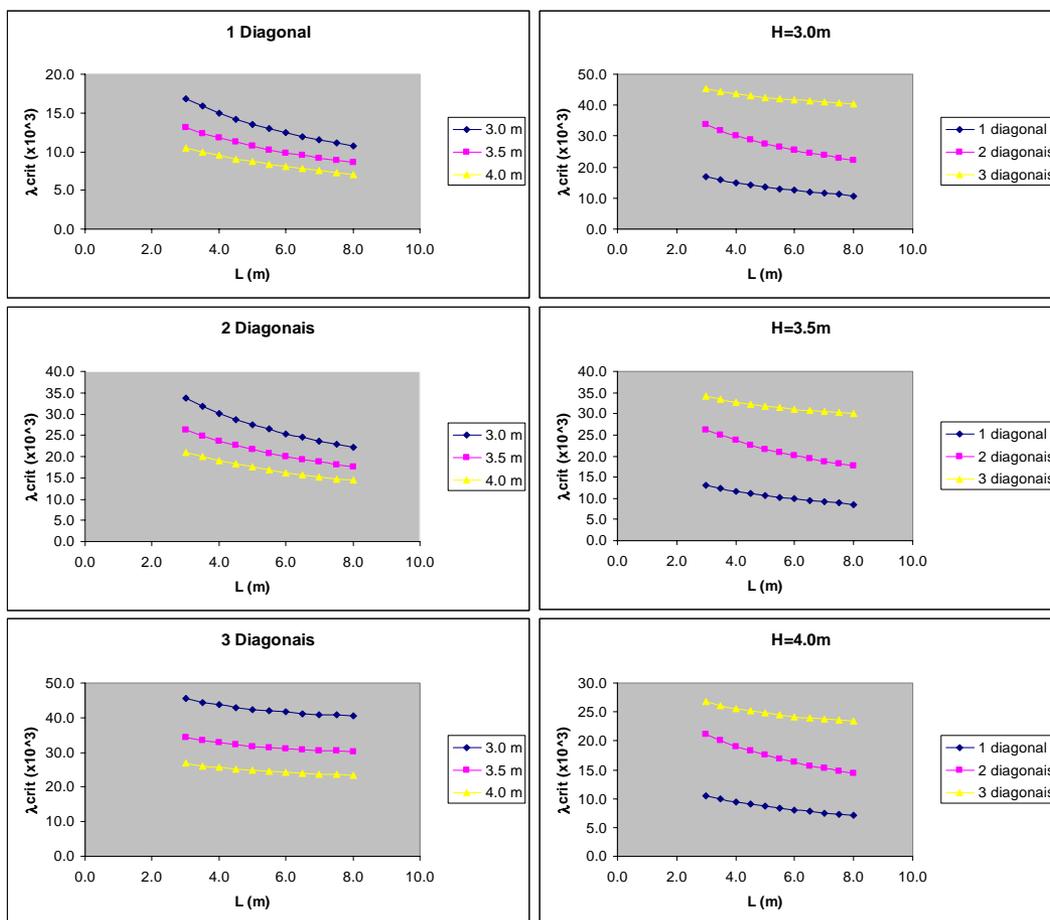


Fig. 9 – Parâmetro crítico para as diversas variações paramétricas do pórtico tridimensional contraventado segundo 4 planos

Na Figura 10 é introduzido um esquema de contraventamento em altura não-simétrico no pórtico 3D, através do reforço com diagonais em 3 dos 4 planos laterais da estrutura, mas mantendo a geometria de cada pórtico 2D (e igual à do exemplo anterior e do caso 2D).

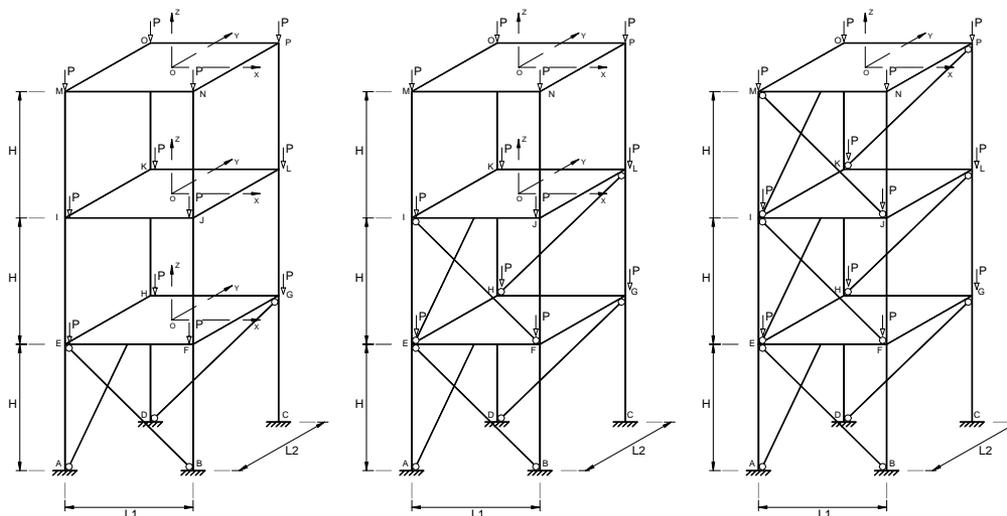


Fig. 10 - Pórtico 3D contraventado em altura (pisos: 1; 1-2; 1-2-3) em 3 planos

O parâmetro crítico deverá corresponder a um valor intermédio situado entre o valor mínimo do parâmetro obtido para os pórticos 2D (equivalente à menor carga crítica do pórtico de nós móveis ou seja do pórtico não contraventado) e um valor máximo correspondente ao maior valor do parâmetro crítico para os pórticos contraventados. A carga crítica obtida computacionalmente está de facto compreendida entre estes dois limites.

Embora não tenha sido apresentada no presente trabalho uma análise para uma estrutura com 2 pórticos adjacentes contraventados, pode referir-se que o valor do parâmetro obtido seria o menor valor do parâmetro para os pórticos não contraventados. Tal facto realça a importância da carga crítica do pórtico não contraventado, pois o comportamento e a capacidade resistente são por ele controlados.

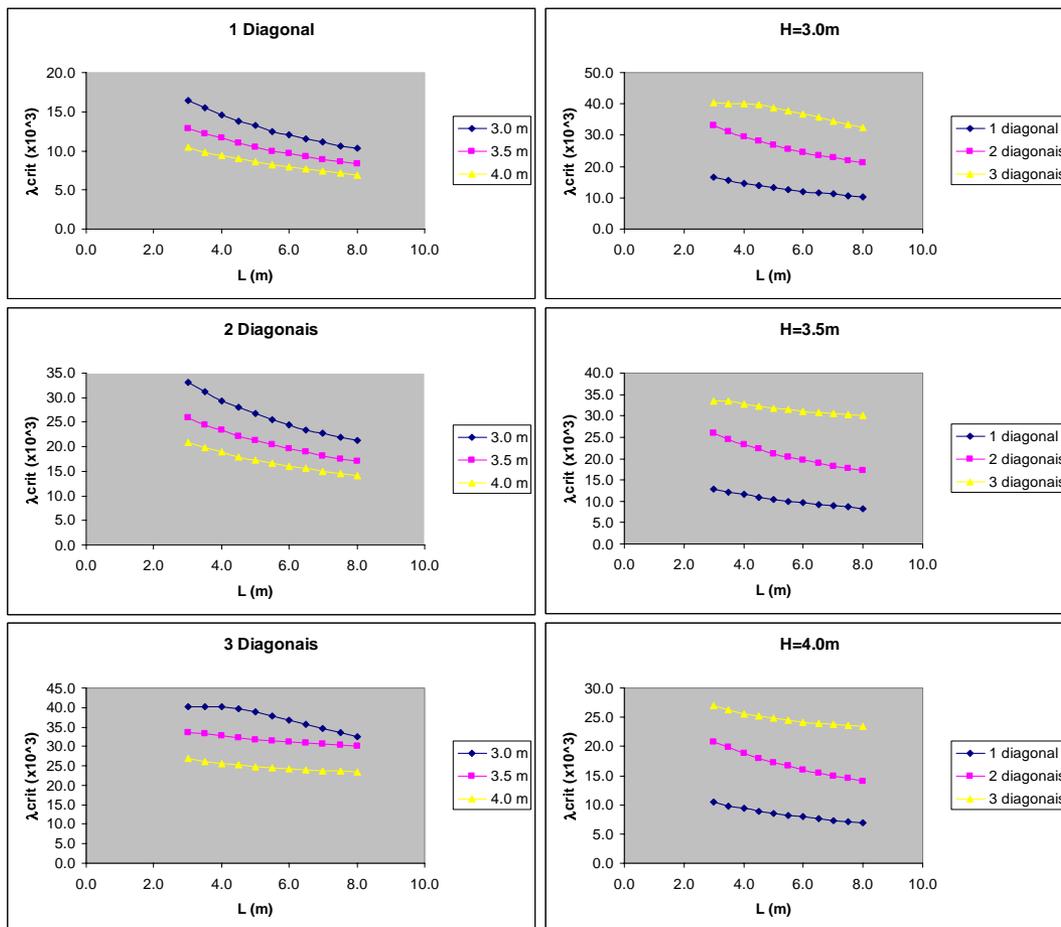


Fig. 11 – Parâmetro crítico para as diversas variações paramétricas do pórtico tridimensional contraventado segundo 3 planos

Para os dois primeiros casos (um piso e dois pisos contraventados) de pórticos tridimensionais contraventados segundo 3 planos, o comportamento é aproximadamente igual ao do exemplo anterior o que sugere que o contraventamento de todos os pórticos ou só de três deles é indiferente para a determinação do parâmetro crítico, para as características seccionais utilizadas. Também para vãos mais elevados há uma tendência para os parâmetros obtidos, nos casos de $H=3.0\text{m}$ e $H=3.5\text{m}$, se aproximarem de um valor comum. De referir que à medida que se diminui o número de pórticos contraventados o comportamento deixa de ser previsível e que o comportamento da estrutura começa a ser ditado pela configuração que introduz menor valor do parâmetro crítico (nós móveis), como seria de esperar.

Embora por limitação de espaço não sejam apresentados resultados relativos à deformação da estrutura, o seu desempenho é distinto nos diferentes casos estudados. O seguinte padrão geral foi observado: nos casos simétricos deformações simétricas, e nos casos assimétricos maiores deformações nos pórticos com menos elementos de contraventamento.

5. CONCLUSÕES

A utilização de elementos de contraventamento influencia o comportamento estrutural assim como a capacidade resistente em termos de carga última de instabilidade. Da utilização racional destes elementos depende o nível de desempenho dos esquemas estruturais utilizados.

Para os casos em estudo não é necessário utilizar elementos de contraventamento na totalidade dos pisos, desde que se escolha uma relação de inércias em cada nó de forma a ocorrerem efeitos estabilizadores ao nível do piso ao qual pertencem, e também introduzindo elementos de contraventamento em locais apropriados que, em conjunto com os elementos resistentes, garantam o bom funcionamento em serviço da estrutura. Esta constatação torna-se mais óbvia para pórticos com maior número de pisos, uma vez que estes pórticos estão mais dependentes da sua configuração para assegurar a estabilidade global. No caso das estruturas tridimensionais o efeito dos elementos de contraventamento é ainda mais significativo, e a determinação de configurações melhoradas é baseada em combinações da posição geométrica e propriedades seccionais desses elementos estruturais.

O recurso a uma análise de segunda ordem permite verificar a funcionalidade do esquema de contraventamento adoptado e optimizá-lo na perspectiva eficiência *versus* custo.

6. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado no âmbito do projecto de investigação com numeração provisória POCTI-41999/ECM/P/2000 intitulado Projecto Económico de Pórticos em Aço (em re-apreciação) ainda não aprovado, e submetido pelo segundo autor à FCT em 2001.

O primeiro autor também agradece ao segundo autor a disponibilidade e o conhecimento partilhado sem o qual não seria possível a conclusão do presente trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] Reis, A.J. e Camotim, D., “Estabilidade Estrutural”, McGraw-Hill de Portugal, 2001.
- [2] Barros, R.C., “Apontamentos sobre Instabilidade de Estruturas”, Conjunto de trabalhos impressos e manuscritos de apoio ao Mestrado em Estruturas de Eng^a Civil, Secção de Estruturas, Departamento de Eng^a Civil, F.E.U.P., Porto, 1999-2002.
- [3] Barros, R.C. e Oliveira, S., “Análise Elástica de 2^a Ordem de Pórticos Planos em Calculadora Programável”, 3^o Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia: Engenharia e Inovação para o Desenvolvimento, Ed: J. Silva Gomes, C. Félix Afonso, C. Conceição António e A. Santos Matos, ISBN 972-9025-62-2, Volume I, Tema C - Materiais e Estruturas, pp. 435-446, Maputo, Moçambique, 2003.
- [4] Livesley, R.K. and Chandler, D.B., “Stability Functions for Structural Frameworks”, Manchester University Press, Manchester, UK, 1956.
- [5] Horne, M.R. and Merchant, W., “The Stability of Frames”, Pergamon Press, UK, 1965.

