

MODELAÇÃO DE LIGAÇÕES EM PÓRTICOS ASSOCIADA A ESTUDO PARAMÉTRICO DO COMPORTAMENTO NÃO-LINEAR GEOMÉTRICO DE PÓRTICOS METÁLICOS TRI-DIMENSIONAIS ASSIMÉTRICOS

Manuel Teixeira Braz César^{1*} e Rui Manuel Menezes Carneiro de Barros²

1: Departamento de Mecânica Aplicada
Escola Superior de Tecnologia e de Gestão
Instituto Politécnico de Bragança
5301-857

e-mail: brazcesar@ipb.pt web: <http://www.estig.ipb.pt>

2: Departamento de Engenharia Civil
Faculdade de Engenharia
Universidade do Porto
4200-465

e-mail: rcb@fe.up.pt web: <http://www.fe.up.pt>

Palavras-chave: Análise Não Linear Geométrica, Estabilidade de Pórticos Tridimensionais, Contraventamento de Edifícios

Resumo. *A modelação de problemas associados à análise não linear geométrica, usando uma abordagem matricial, pode ser feita recorrendo a modelos simplificados ou utilizando modelos mais complexos como o MEF. A escolha destas metodologias deve estar de acordo com o tipo de análise final pretendida: estabilidade global com ou sem a influencia dos fenómenos de instabilidade local, simulação de ligações semi-rígidas, introdução de elementos laminares flexíveis, etc., e ainda o rigor pretendido. Assim, é importante comparar os resultados obtidos com as várias modelações, identificar as limitações de cada modelo e entender a importância de cada singularidade em cada tipo de modelação.*

1. INTRODUÇÃO

Neste estudo pretende-se utilizar software com diferentes formulações estruturais para proceder à determinação do parâmetro crítico de estruturas reticuladas, assim como estudar a influência da variação de parâmetros geométricos no desempenho do sistema estrutural.

Para atingir este objectivo utilizaram-se programas de cálculo automático baseados na formulação exacta da matriz de rigidez total e na sua formulação aproximada, por simplificação da matriz de rigidez total exacta. No primeiro grupo, encontra-se o INST3D [1], que corresponde a um software desenvolvido pelos autores, e no segundo, com a formulação aproximada, encontram-se os pacotes comerciais SAP2000 [2], ANSYS [3] e LUSAS [4]. Em primeiro lugar é necessário validar os resultados obtidos pelo que se procedeu à sua calibração. Este processo envolve a determinação analítica do parâmetro crítico e respectivo modo de instabilidade. Após conhecer o valor exacto, introduzem-se os dados desses pórticos no software INST3D e precede-se à obtenção dos referidos parâmetros. De seguida, utiliza-se o software comercial SAP 2000, ANSYS e LUSAS repetindo o processo anteriormente descrito. Finalmente procede-se ao estudo paramétrico de algumas estruturas reticuladas.

2. CALIBRAÇÃO

2.1. Aspectos gerais

Para concretizar o processo de calibração estudaram-se pórticos constituídos por barras metálicas. Os pórticos de calibração foram modelados utilizando elementos de barra, considerando que as ligações entre as vigas e os pilares são rígidas.

As estruturas foram analisadas para duas configurações de mobilidade: nós fixos e nós móveis, determinando-se para cada caso o parâmetro crítico e o modo de instabilidade.

A modelação do sistema estrutural pode influenciar o resultado final sendo, portanto, necessário quantificar o erro cometido com a utilização de um modelo baseado em elementos de barra. Assim, os referidos pórticos 2D foram analisados através do MEF (software comercial) considerando que as barras são constituídas por elementos do tipo SHELL.

Realizou-se ainda um estudo sobre a influência da rigidez da ligação na análise de instabilidade, considerando três situações possíveis de união entre os elementos: articulada, semi-rígida e rígida.

Considere-se a numeração dos deslocamentos generalizados associada ao referencial local da Figura 1. Designem-se por ϕ_1 , ϕ_2 , ϕ_3 e ϕ_4 as funções de estabilidade associadas aos termos da matriz de rigidez de 2ª ordem [5].

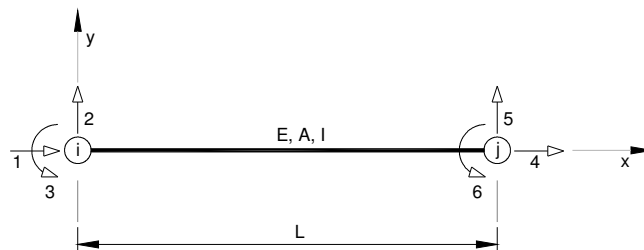


Figura 1. Elemento de barra 2D. Graus de liberdade.

De acordo com o algoritmo do programa INST3D utiliza-se o método dos 3GL/piso, recorrendo à formulação exacta de um elemento de barra 2D dada por

$$[K_{ij}]_{\text{exacta}} = \begin{pmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{L^3}\phi_1 & \frac{6EI}{L^2}\phi_2 & 0 & \frac{-12EI}{L^3}\phi_1 & \frac{6EI}{L^2}\phi_2 \\ 0 & \frac{6EI}{L^2}\phi_2 & \frac{4EI}{L}\phi_3 & 0 & \frac{-6EI}{L^2}\phi_2 & \frac{2EI}{L}\phi_4 \\ \frac{EA}{L} & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-12EI}{L^3}\phi_1 & \frac{-6EI}{L^2}\phi_2 & 0 & \frac{12EI}{L^3}\phi_1 & \frac{6EI}{L^2}\phi_2 \\ 0 & \frac{6EI}{L^2}\phi_2 & \frac{2EI}{L}\phi_4 & 0 & \frac{6EI}{L^2}\phi_2 & \frac{4EI}{L}\phi_3 \end{pmatrix} \quad (1)$$

O processo de obtenção do parâmetro crítico e do modo de instabilidade baseia-se no método de Jacobi.

Note-se que a utilização do software comercial, com o recurso ao MEF, permite aferir a capacidade de cálculo do INST3D e simultaneamente comparar as diferentes formulações (exacta e aproximada) implícitas em cada software.

2.2. Pórtico 2D – nós fixos e nós móveis

Neste primeiro caso, foram analisados dois pórticos com igual geometria mas com diferentes configurações de deformação, nós fixos e nós móveis, Figura 2.

Para iniciar o processo de calibração, determinou-se analiticamente o valor exacto do parâmetro crítico de cada pórtico, considerando-se contínuas as ligações viga-pilar (ligações rígidas).

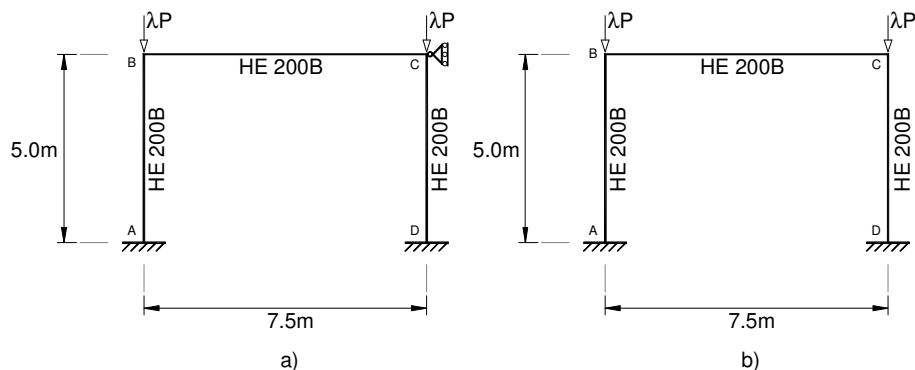


Figura 2. Pórticos 2D: a) nós fixos, b) nós móveis.

De seguida, procedeu-se à determinação dos parâmetros, utilizando a matriz de rigidez exacta total com a formulação apresentada na equação 1 (INST3D). Após conhecer o valor exacto, os pórticos foram introduzidos no software comercial, com formulações aproximadas, e determinado para diversas discretizações das barras, o valor do parâmetro crítico. Finalmente, são comparados os valores exacto e aproximado, para cada discretização.

As cargas são verticais e aplicadas nos nós, considerando-se a instabilidade no plano XZ (2D) e a impossibilidade de encurvar na direcção perpendicular YZ. Utilizou-se o aço S235 com um módulo de elasticidade $E=200$ GPa, coeficiente de Poisson $\nu=0.3$ e massa específica $\rho=7.85$ Ton/m³.

O cálculo computacional do parâmetro crítico pelo INST3D permitiu determinar para este pórtico (nós fixos) $\lambda_{\text{fixos}}=10822.65$, valor muito próximo do analítico ($P_{\text{cr}}=10838.69$). Confirma-se a validade do INST3D, obtendo um erro relativo inferior a 0.15%.

Posteriormente, foi introduzido o pórtico no software comercial SAP 2000, ANSYS e LUSAS e procedeu-se à determinação do parâmetro crítico e respectivo modo de instabilidade, para várias discretizações dos elementos que constituem a estrutura, obtendo-se os resultados indicados no Quadro 1.

Modelo (# barra)	Nós Fixos ($\lambda_{\text{cr}}=10838.69$)						
	SAP 2000	LUSAS	ANSYS	INST3D	Erro relativo		
					Sap2k	Lusas	Anslys
1	1043895	29120	18224	10823	98.9%	62.8%	40.8%
2	12613	11650	11090	10823	14.2%	7.1%	2.4%
3	11677	11000	10902	10823	7.3%	1.6%	0.7%
4	10988	10880	10852	10823	1.5%	0.5%	0.3%
8	10258	10830	10828	10823	-5.5%	0.0%	0.0%
16	10072	10830	10826	10823	-7.5%	0.0%	0.0%
32	10026	10830	10826	10823	-7.9%	0.0%	0.0%

Quadro 1. Erros associados à discretização de barras – Pórtico de nos fixos.

Constata-se que o SAP 2000 é o software que apresenta maior erro relativo, sobretudo quando se utiliza um único elemento para definir os elementos estruturais. O restante software, ANSYS e LUSAS, apresenta também erros significativos sendo o ANSYS o que apresenta melhor desempenho numérico. Como seria de esperar, quando se aumenta a discretização vai-se obtendo um erro relativo menor.

Quando se estuda uma estrutura através do MEF, considera-se como correcta uma discretização de 3 elementos por barra, obtendo-se um erro relativo inferior a 3%. Do software comercial escolhido para a calibração, o SAP 2000 foi o único que, para uma discretização de 3 elementos por barra, não obteve um erro inferior a 3%, atingindo um valor inferior para uma divisão das barras em 4 elementos. Curiosamente, a convergência do valor obtido com este software aponta para um resultado inferior ao valor exacto, situação que não se verifica no restante software.

O ANSYS é o software que apresenta os melhores resultados, com um erro inferior a 1% para a referida discretização de 3 elementos. O LUSAS apresenta resultados muito próximos do ANSYS convergindo para o valor exacto com discretizações de 8 elementos por barra.

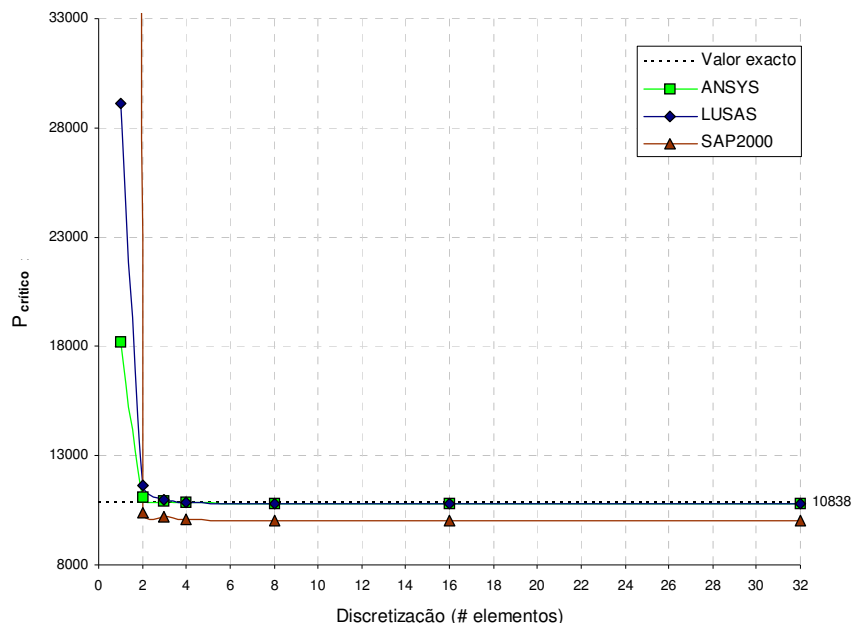


Gráfico 1. Parâmetro crítico em função da discretização para o pórtico 2D de nós fixos.

A evolução do valor do parâmetro crítico em cada software, relativamente ao valor exacto, para várias discretizações das barras pode ser observado no Gráfico 1. Verifica-se que a partir de uma discretização de 4 elementos por barra, os resultados são praticamente constantes, concluindo que o aumento da discretização (mais de 4 elementos por barra) não introduz um acréscimo significativo de rigor.

O seguinte caso corresponde ao estudo da instabilidade do pórtico de nós móveis.

Modelo (# barra)	Nós Móveis ($\lambda_{cr}=3009.22$)						
	SAP 2000	LUSAS	ANSYS	INST3D	Erro relativo		
					Sap2k	Lusas	Ansys
1	3315	3251	3034	3009	10.2%	7.4%	0.8%
2	2941	3027	3016	3009	-2.2%	0.6%	0.5%
3	2933	3013	3010	3009	-2.5%	0.1%	0.0%
4	2931	3010	3009	3009	-2.6%	0.0%	0.0%
8	2930	3009	3009	3009	-2.6%	0.0%	0.0%
16	2929	3009	3009	3009	-2.7%	0.0%	0.0%
32	2929	3009	3009	3009	-2.7%	0.0%	0.0%

Quadro 2. Erros associados à discretização de barras – Pórtico de nós móveis.

Utilizando o INST3D determinou-se o parâmetro crítico $\lambda_{\text{móveis}} = 3009.22$, concluindo que este software fornece resultados praticamente coincidentes com o valor exacto ($P_{\text{cr}} = 3012.04$), com erro relativo inferior a 0.09%.

Posteriormente, introduziu-se o pórtico no software comercial, discretizando as barras de forma idêntica ao caso anterior, tendo obtido os resultados apresentados no Quadro 2.

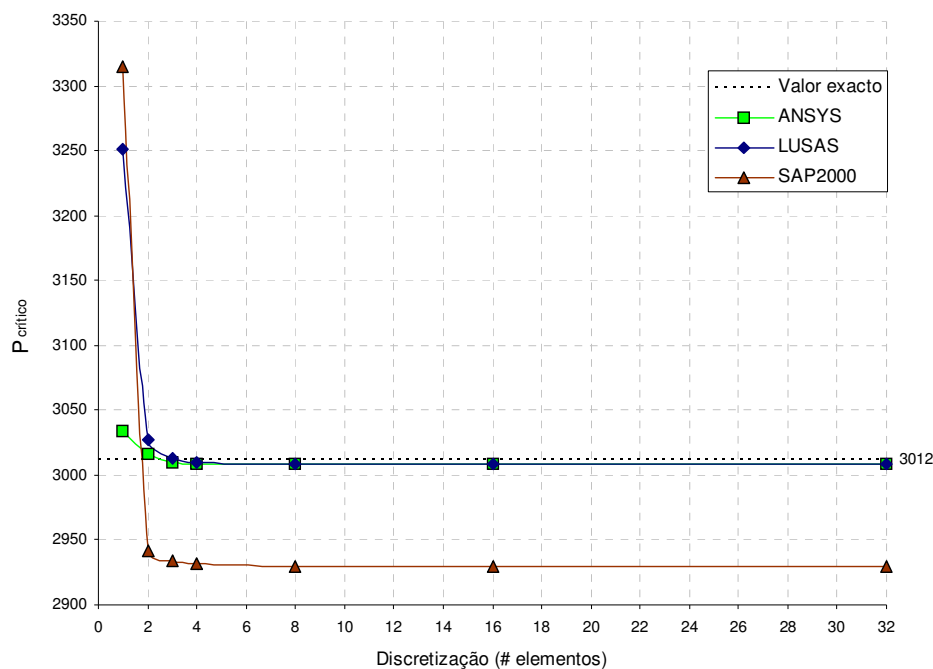


Gráfico 2. Parâmetro crítico em função da discretização para o pórtico 2D de nós móveis.

Constata-se que o SAP 2000 é o software que apresenta erros mais significativos (por excesso e por defeito), correspondendo ao ANSYS o melhor desempenho na determinação do parâmetro crítico. O LUSAS apresenta resultados muito próximos dos obtidos com o ANSYS, com erro de valor reduzido para discretizações superiores a 3 elementos por barra. No Gráfico 2 observa-se a evolução do parâmetro crítico para as diversas discretizações das barras, relativamente ao valor exacto.

Comparativamente ao pórtico de nós fixos, verifica-se que no pórtico de nós móveis, o erro associado à utilização de um único elemento por barra é menos significativo, o que permite concluir que é necessário escolher cuidadosamente a discretização dos elementos para analisar estruturas de nós fixos.

A discretização excessiva é de evitar pois implica mais graus de liberdade em cada elemento e a resolução de um maior número de equações, aumentando o tempo de processamento e o consumo de recursos computacionais, situação que se torna mais gravosa quando a estrutura é constituída por um elevado número de barras.

2.3. Modelação 2D com elementos do tipo SHELL

A modelação estrutural assume um papel importante quando se utiliza este tipo de análise, em particular quando se pretende estudar a ocorrência de fenómenos locais de instabilidade ou quando se aborda o problema da rigidez nas zonas de ligação, ou seja nos nós. Neste último caso, é necessário recorrer a modelações tridimensionais para conseguir um perfeito conhecimento do funcionamento da ligação.

Para analisar a importância da forma da secção e dos respectivos fenómenos de instabilidade, no estudo da não linearidade geométrica, procedeu-se à modelação dos pórticos recorrendo a elementos de área (laminares) do tipo SHELL com formulação implícita de Thick plate, no software comercial SAP2000.

As características das barras são semelhantes às utilizadas na modelação com elementos lineares, sendo definida a geometria dos elementos a usar no MEF em função da espessura da alma e dos banzos do perfil HE 200B. Na Figura 3 está representada a discretização utilizada para modelar os elementos do tipo SHELL a partir da secção do perfil comercial.

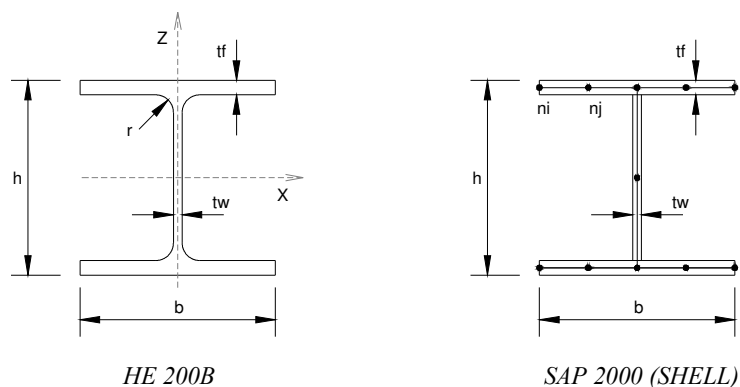


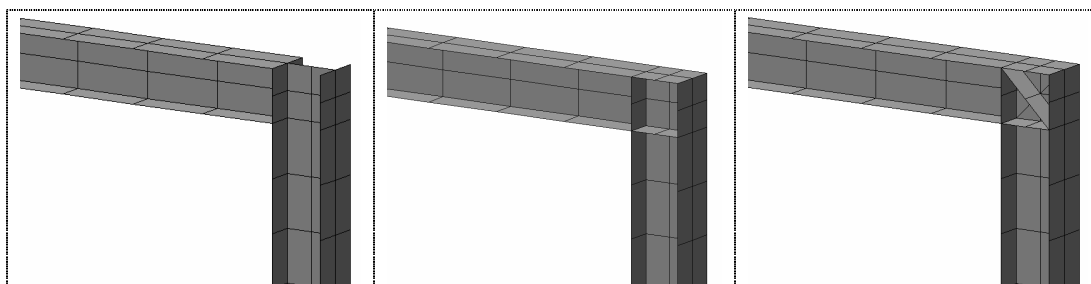
Figura 3. Perfil HE 200B e elemento equivalente SHELL.

A discretização dos elementos SHELL foi escolhida após ter efectuado várias subdivisões desses elementos, de forma a obter um resultado convergente. O pórtico base foi subdividido em 478 elementos e utilizada uma tolerância de $1.00e-7$, para determinação do parâmetro crítico. As características geométricas do pórtico ($L=5.0$ m; $H=7.5$ m) foram mantidas e o aço utilizado apresenta o mesmo módulo de elasticidade, $E=200$ GPa. Os pórticos foram estudados no seu plano, sem possibilidade de perda de estabilidade no plano perpendicular.

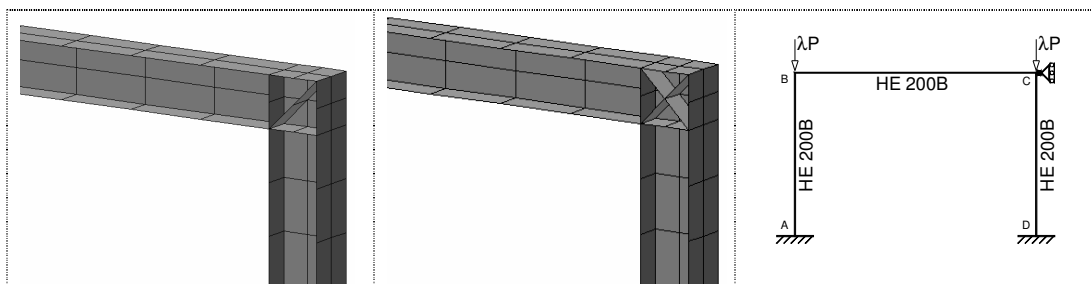
Nas modelações utilizadas, os elementos SHELL do pilar apresentam continuidade na união com os elementos SHELL da viga. Na realidade, é possível materializar este tipo de ligação em estruturas metálicas através da utilização de peças unidas por soldadura. Para garantir a continuidade, é comum introduzir elementos de reforço das ligações através de chapas metálicas adicionais, simuladas neste estudo com o recurso a elementos SHELL. Alterando as características das ligações, união viga-pilar, comprova-se que a rigidez destas zonas influenciam o desempenho da estrutura.

(i) Pórtico de nós fixos

Como seria de esperar, este modelo conduz a cargas críticas mais baixas. Este facto deve-se à introdução da forma do elemento na modelação, diminuindo a capacidade resistente do elemento devido à perda de geometria da secção.



Modo		λ_{cr}		λ_{cr}		λ_{cr}
1°	Tipo 1	7946.59	Tipo 2	8047.36	Tipo 3	8058.21
2°		9282.36		9593.41		9748.85
3°		19047.56		19141.58		19153.96
4°		19653.74		19943.41		19967.20
5°		30795.48		31180.44		31219.75
6°		31115.31		31308.65		31334.14



Modo		λ_{cr}		λ_{cr}		λ_{cr}
1°	Tipo 4	8041.06	Tipo 5	8050.26	Modelo de elementos de barras (contínuo)	10100.39
2°		9730.95		9798.92		11916.93
3°		19138.98		19149.08		24314.71
4°		19946.78		19962.90		25326.71
5°		31187.06		31218.64		43600.08
6°		31256.33		31319.35		44521.87

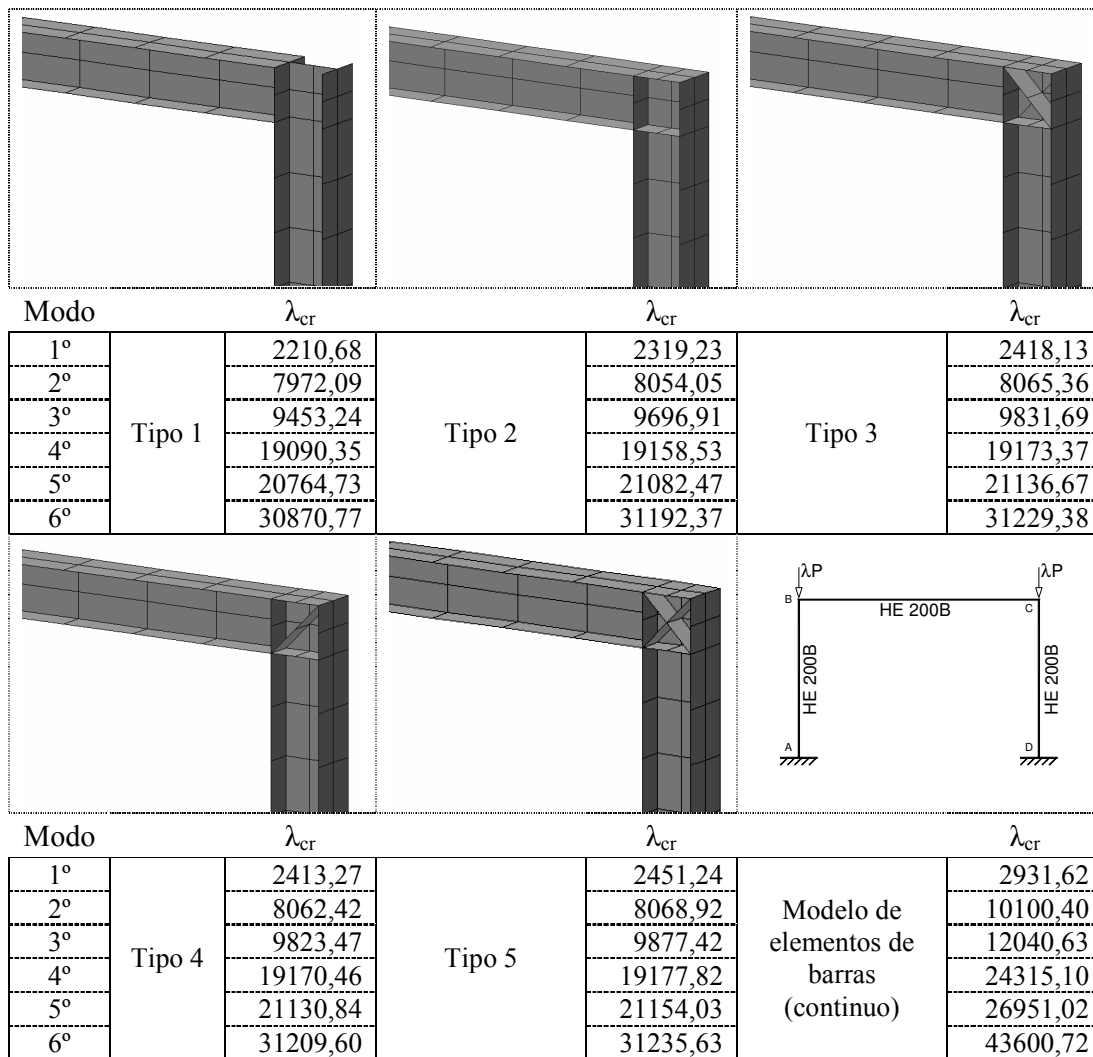
Quadro 3. Parâmetros de carga para o pórtico SHELL de nós fixos.

Os resultados da análise com elementos do tipo SHELL conduzem a valores inferiores de λ_{cr} , o que seria de esperar considerando a possibilidade de alteração da geometria espacial das secções da viga e dos pilares.

O erro máximo cometido relativamente ao modelo de elementos de barra para o 1º modo de encurvadura, corresponde a 21.32%, o que indica que alguns cuidados devem ser tomados na determinação do parâmetro crítico quando se utiliza uma modelação baseada em elementos de barra com continuidade nodal.

(ii) Pórtico de nós móveis

O mesmo estudo foi elaborado para o pórtico de nós móveis, sendo as configurações dos reforços idênticas às utilizadas no pórtico de nós fixos.



Quadro 4. Parâmetros de carga para o pórtico SHELL de nós móveis.

No Quadro 4, são apresentados os resultados obtidos na determinação do parâmetro crítico, para cada configuração.

Verifica-se que os resultados da análise com elementos do tipo SHELL conduzem a valores inferiores de λ_{cr} , obtendo-se neste caso, um erro máximo para o 1º modo de encurvadura de 24.59%, valor superior ao caso do pórtico de nós fixos, pelo que fica evidenciada a necessidade de estudar convenientemente a estrutura, sobretudo quando se utiliza um modelo simplificado.

Para um determinada configuração de ligação, o parâmetro crítico apresenta valores superiores num determinado modo de encurvadura, quando comparados com outra configuração. Esta variação do valor do parâmetro crítico está associada ao tipo de deformação do pórtico e conseqüente à maior ou menor mobilização da rigidez dos nós (contribuição para o modo de instabilidade).

Quando se aumenta a rigidez dos nós, os resultados obtidos para o pórtico modelado com elementos de área do tipo SHELL (Thick plate) tendem para os resultados da análise efectuada com elementos de barra, pelo que se conclui que é necessário estudar adequadamente a rigidez nodal a aplicar no modelo de barras, alterando as ligações através da introdução de molas de rigidez com características equivalentes à ligação real.

2.4. Pórticos 2D com ligações semi-rígidas

No caso anterior, introduziu-se o problema da rigidez nas ligações entre as barras, nomeadamente a ligação viga-pilar. De forma simplificada, este problema pode ser analisado num modelo de elementos de barra através da utilização de três tipos de condições de fronteira na ligação entre as barras: contínuas, rotuladas e com molas de rotação. A ligação com molas, corresponde a situação intermédia em que a ligação apresenta uma rigidez parcial, com capacidade de rotação definida pela rigidez da mola.

Este modelo é o que mais se aproxima da realidade, tendo como principal dificuldade para a sua aplicação a calibração da rigidez das molas que simulam as ligações.

Na Figura 4, estão representados os pórticos de calibração com a adição de molas de translação para simular o comportamento flexível das ligações.

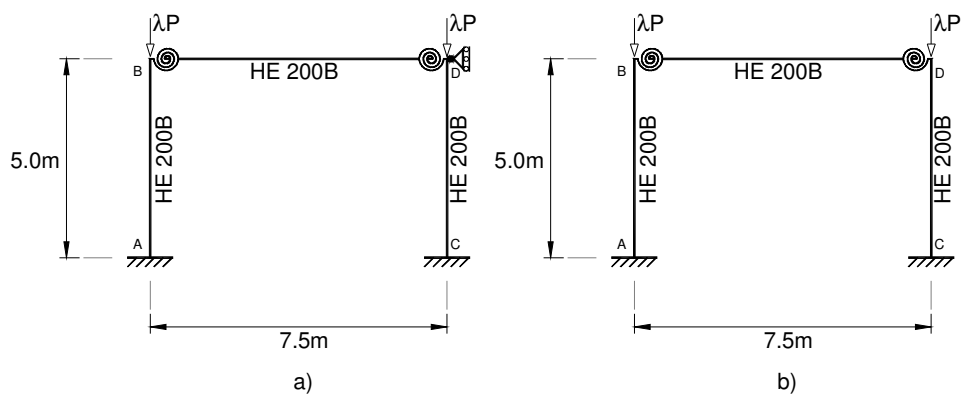


Figura 4. Pórticos 2D com ligações semi-rígidas, a) nós fixos, b) nós móveis.

Estes pórticos foram modelados no SAP2000 considerando como válida uma discretização de 4 elementos por barra. Procedeu-se à introdução de molas nas ligações viga-pilar, fazendo variar o valor da rigidez desde 0.0, ligação rotulada, até $1.0e10$ que corresponde à ligação contínua, ou seja, uma modelação sem molas.

(i) Pórtico de nós fixos

Numa primeira análise foram determinados, para diversas discretizações, os parâmetros de carga para os seis primeiros modos de instabilidade, considerando que o pórtico apresenta ligações contínuas entre a viga e o pilar (situação equivalente ao Caso 1).

Modo	Discretização – # elementos por barra						
	1	2	3	4	8	16	32
1º	18347.35	10408.73	10184.58	10100.39	10032.21	10017.78	10014.35
2º	27455.56	12192.52	12036.15	11916.93	11815.15	11793.13	11787.88
3º	933285.30	35459.41	25022.30	24314.71	23446.21	23250.05	23202.96
4º	---	39321.50	25805.53	25326.71	24435.60	24224.52	24173.52
5º	---	104942.05	64077.00	43600.08	40801.41	39836.47	39602.25
6º	---	120871.95	68928,41	44521.87	42188.33	41172.63	40923.70

Quadro 5. Pórtico de nós fixos (sem molas) – Parâmetros de carga (λ).

Neste quadro salienta-se a divisão da barra em 3 elementos, que corresponde à discretização associada à obtenção de erros inferiores a 3% em relação ao valor exacto de λ .

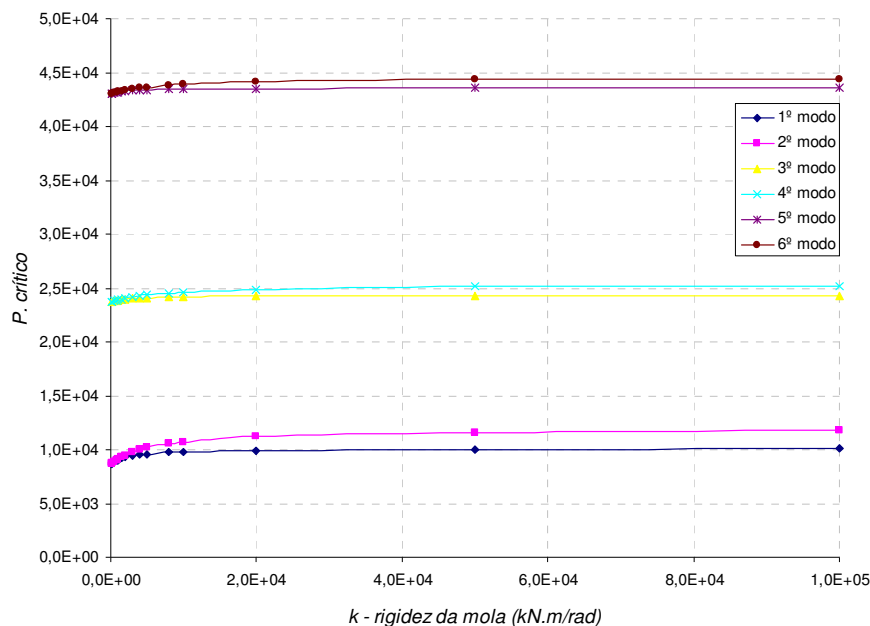
Modo	Rigidez da mola (kN.m/rad)						
	0.0	k= 1.0e0	k= 1.0e2	k= 1.0e4	k= 1.0e6	k=1.0e10	∞
1º	8631.41	8631.98	8686.61	9800,51	10096.64	10100,39	10100.39
2º	8638.65	8639.21	8693.79	10730,13	11898.71	11916,93	11916.93
3º	23692.98	23693.19	23713.43	24177,16	24312.95	24314,71	24314.71
4º	23713.70	23713.91	23734.34	24628,24	25314.72	25326,71	25326.71
5º	43005.57	43005.77	43025.24	43472,66	43598.46	43600,08	43600.08
6º	43051.88	43052.08	43071.28	43887,84	44510.98	44521,86	44521.87

Quadro 6. Pórtico de nós fixos (#4 por barra) – λ_{cr} em função da rigidez da mola.

Na Quadro 6, apresentam-se os valores dos parâmetros de carga, em função da rigidez da mola, para os seis primeiros modos de instabilidade. No Gráfico 3 pode-se observar a variação dos parâmetros de carga em função da rigidez, para cada modo de instabilidade.

Analisando este gráfico constata-se que existe uma componente inicial não linear para valores reduzidos da rigidez, apresentando um valor praticamente constante para valores mais elevados.

Neste caso, o erro médio cometido pela avaliação incorrecta da rigidez na ligação viga-pilar situa-se nos 10% (excluindo a situação rotulada).


 Gráfico 3. Variação de λ (k) para cada modo de instabilidade (nós fixos).

(ii) Pórtico de nós móveis

O procedimento é idêntico ao do caso anterior, determinando em primeiro lugar os parâmetros críticos para diversas discretizações das barras e de seguida determinaram-se os mesmos parâmetros de carga considerando rigidez nodal variável, Quadro 7.

Modo	Rigidez da mola (kN.m/rad)						
	0.0	$k= 1.0\text{e}0$	$k= 1.0\text{e}2$	$k= 1.0\text{e}4$	$k= 1.0\text{e}6$	$k=1.0\text{e}10$	∞
1º	1115,43	1115,83	1154,02	2376,82	2923,86	2931,62	2931,62
2º	8635,04	8635,61	8689,63	9800,52	10096,65	10100,40	10100,40
3º	9516,55	9516,90	9551,41	11024,66	12024,31	12040,63	12040,63
4º	23703,45	23703,66	23723,78	24177,71	24313,33	24315,10	24315,10
5º	24617,62	24617,91	24646,44	25929,22	26933,32	26951,02	26951,02
6º	43029,17	43029,37	43048,49	43473,88	43599,10	43600,72	43600,72

 Quadro 7. Pórtico de nós móveis (#4 por barra) - λ_{cr} em função da rigidez da mola.

Neste pórtico, obteve-se um erro médio, relativamente à modelação com continuidade nodal, que pode chegar aos 60%, o que indica a necessidade de estudar convenientemente o tipo de ligação usada.

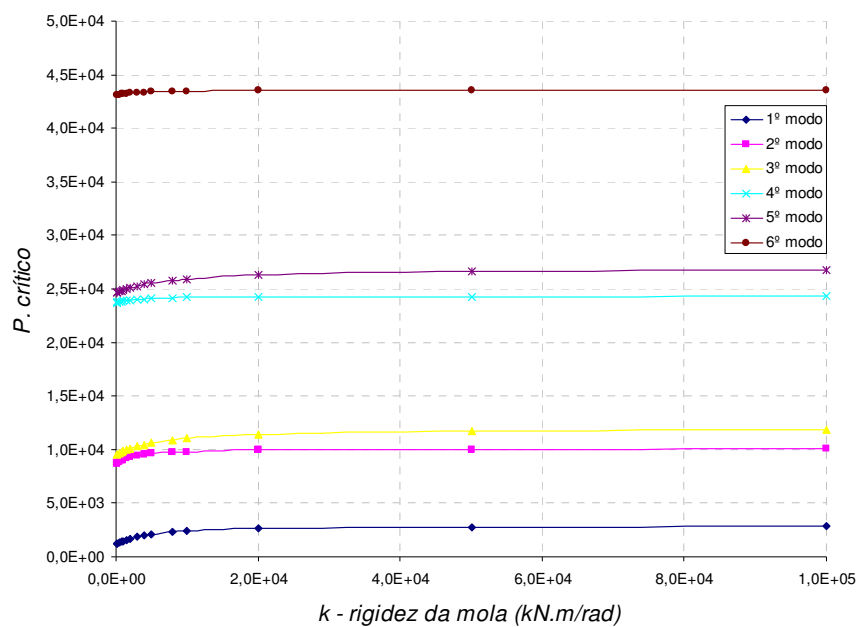


Gráfico 4. Variação de λ_{cr} (k) para cada modo de encurvadura (nós móveis).

3. ESTUDO PARAMÉTRICO

Após calibrar o software foram elaborados vários estudos paramétricos. Uma das estruturas analisadas corresponde a um pórtico 3D de 5 pisos com assimetria em planta.

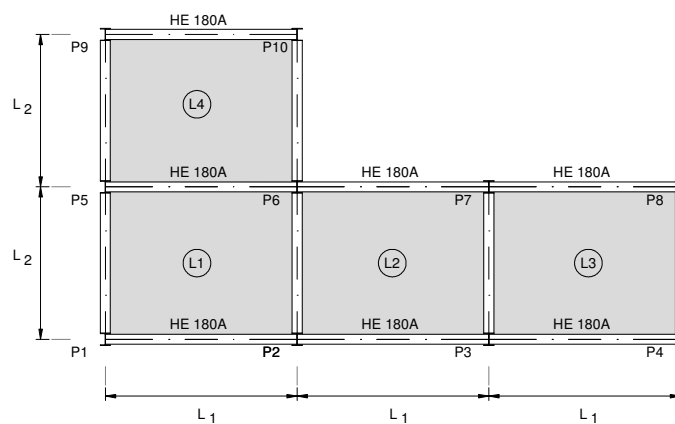


Figura 5. Pórtico 3D com assimetria em planta. Designação das lajes.

Na Figura 5, está representada a planta do edifício, com a indicação da numeração dos pórticos 2D que compõem a estrutura tridimensional, Figura 6.

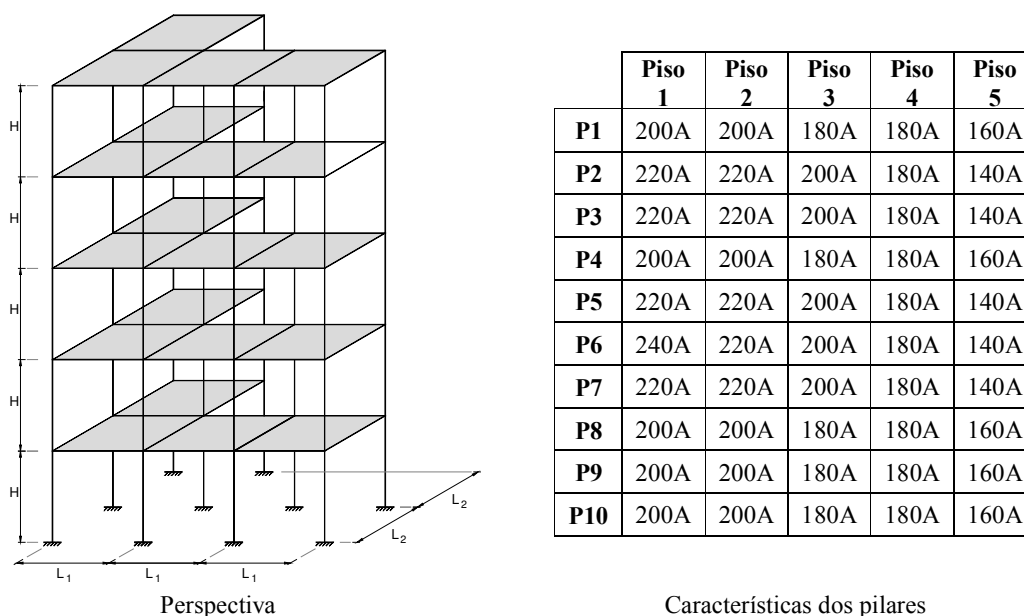


Figura 6. Pórtico 3D com assimetria em planta.

Realizou-se uma análise paramétrica fundamentada na alteração do comprimento dos elementos [6][7] e na definição da geometria espacial da estrutura, mais concretamente:

- (i) Altura inter-pisos, H , e vão entre pilares, L ;
- (ii) Número de pisos da laje $L3$ (variando L e H);

3.1. Variação de L e H

Foram consideradas duas situações de carga nos pilares, Figura 7:

- Caso 1: Cargas unitárias;
- Caso 2: Cargas proporcionais à área de influência dos pilares.

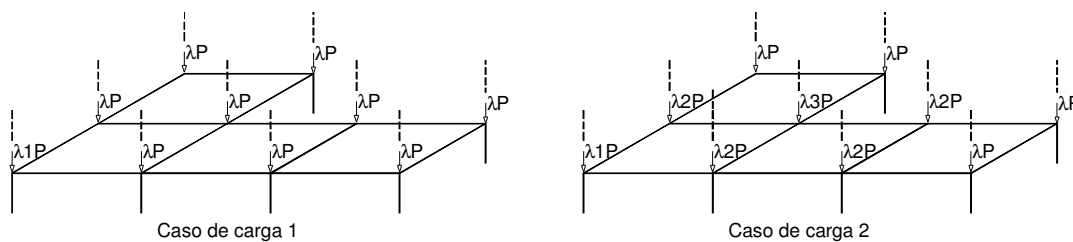


Figura 7. Distribuição das cargas nos pilares.

A estrutura foi contraventada utilizando diagonais com rigidez à flexão nula e uma área de 11cm², inferior à adoptada para os pilares e vigas, e correspondente a perfis metálicos da série UPN (UPN80). A localização das diagonais foi estudada, de forma a maximizar o efeito de contraventamento, adoptando o esquema apresentado na variação paramétrica.

a) Pórtico não contraventado

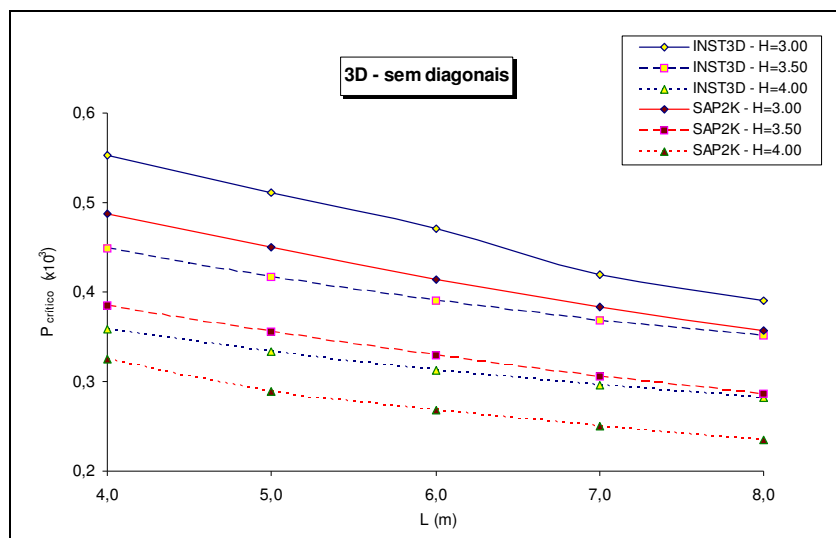
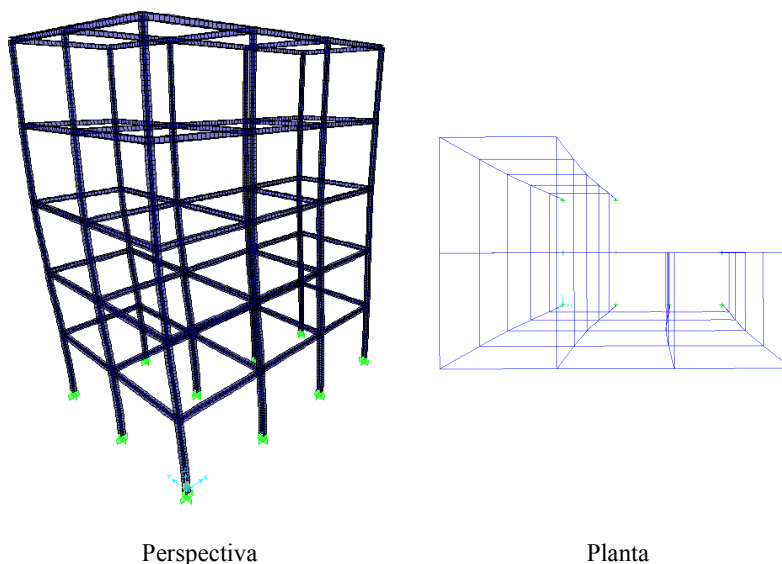


Gráfico 5. Variação paramétrica (3D) sem contraventamento.



Perspectiva

Planta

Figura 8. Variação paramétrica (3D) sem contraventamento.

b) Pórtico contraventado (Caso 1: cargas unitárias)

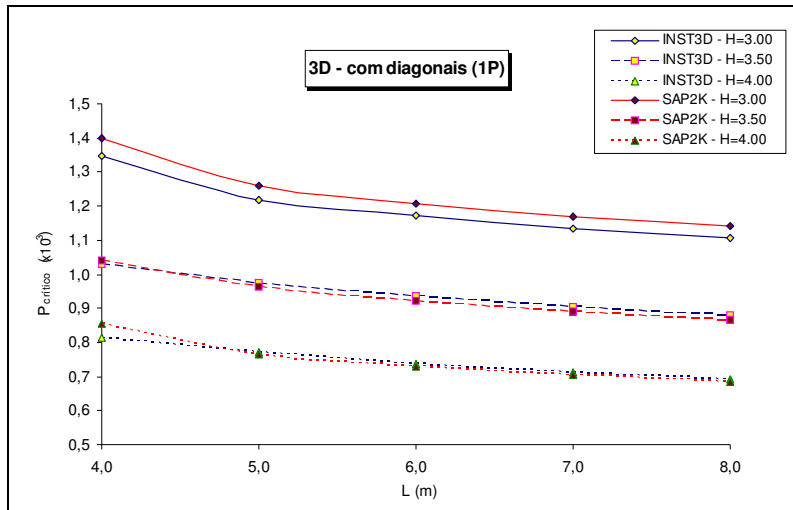


Gráfico 6. Variação paramétrica (3D) com contraventamento (cargas λP).

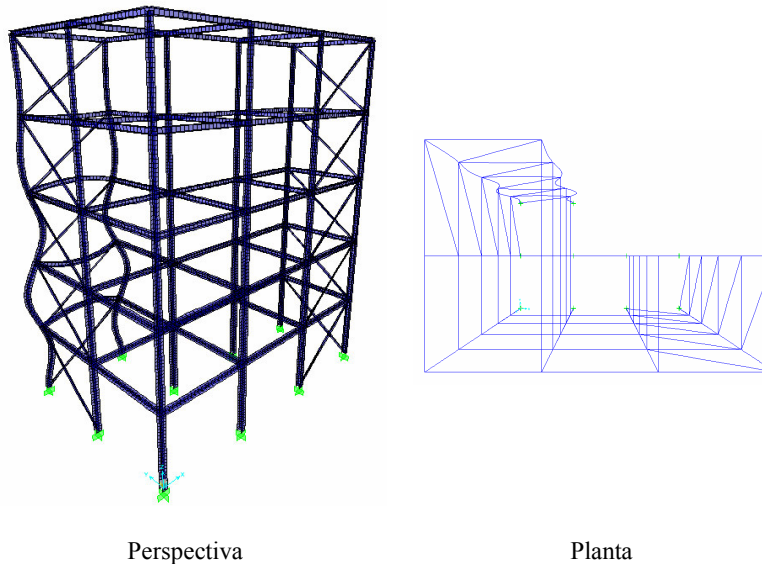


Figura 9. Variação paramétrica (3D) com contraventamento (cargas λP).

No pórtico não contraventado, a deformação ocorre no sentido da menor inércia, com translação das lajes (nós móveis). Nos pórticos contraventados, não há translação nem rotação das lajes, indicando um comportamento idêntico ao de uma estrutura de nós fixos e à medida que aumenta o vão (L) e a altura (H) diminui a capacidade resistente.

c) Pórtico contraventado (Caso 2: cargas em função da área de influência)

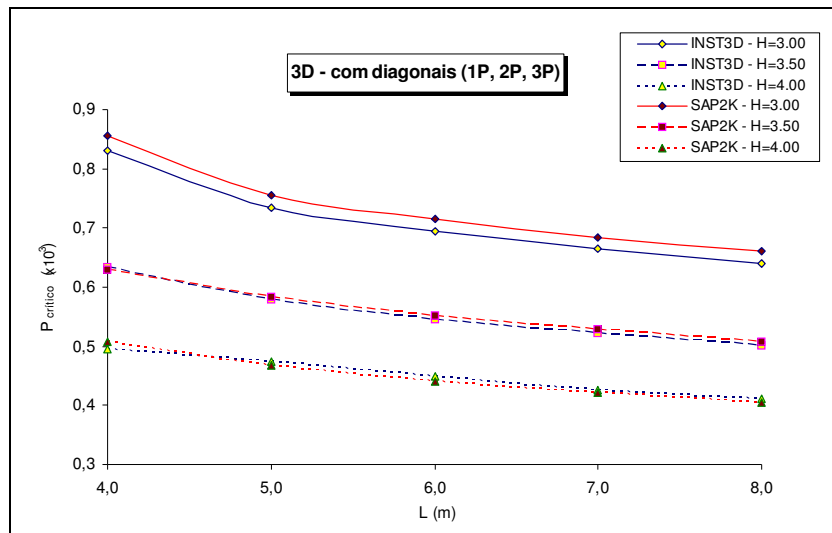


Gráfico 7. Variação paramétrica (3D) com contraventamento (cargas λP , $\lambda 2P$, $\lambda 3P$).

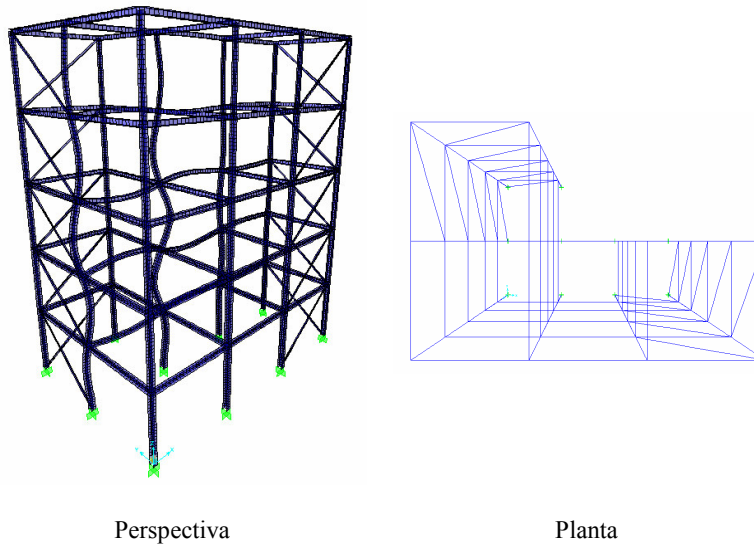


Figura 10. Variação paramétrica (3D) com contraventamento (cargas λP , $\lambda 2P$, $\lambda 3P$).

Os valores obtidos para o SAP 2000 e para o INST3D coincidem no caso do pórtico (nós fixos). Quando se analisa uma estrutura de nós móveis, aparecem erros de 10% entre a utilização do SAP 2000 e o INST3D, sugerindo alguma atenção na modelação deste tipo de estruturas.

Quando a carga é unitária, o pórtico 2D que condiciona a resposta da estrutura é o que apresenta menor carga crítica quando trabalha isolado (3). No caso de carga 2 (em função das áreas), o pórtico que condiciona o desempenho da estrutura é o 2º, que corresponde ao pórtico que recebe maior carga axial total, apresentando maior capacidade resistente na direcção da menor inércia.

3.2. Número de pisos da laje L3 (com variação de L e H)

De seguida, estudou-se a alteração do número de pisos da laje L3, Figura 11, variando a distância entre pilares (L) e a altura entre pisos (H) para o caso de carga 2.

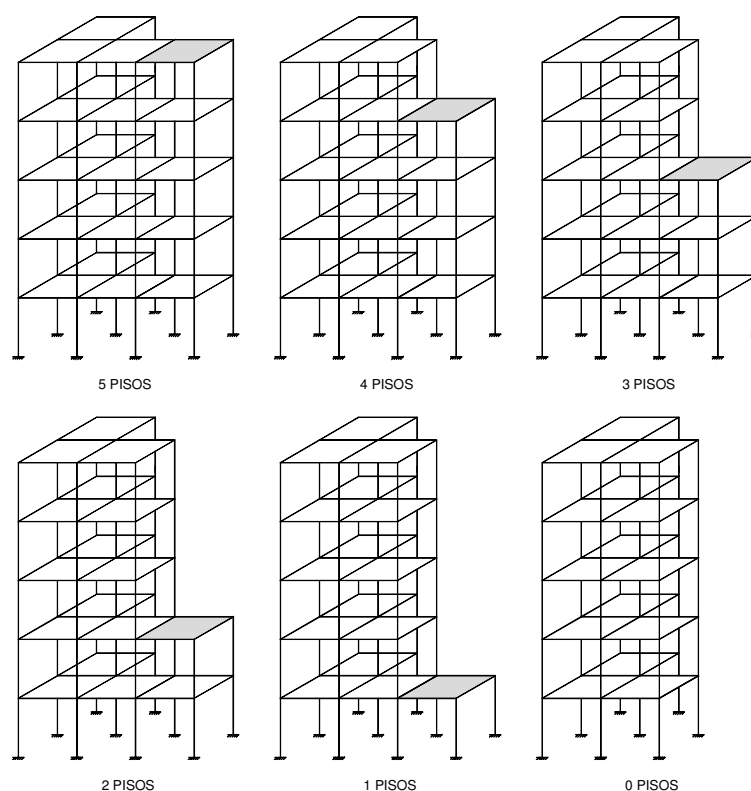


Figura 11. L3 – Variação paramétrica sem contraventamento.

Os resultados foram graficados e da sua análise conclui-se que o número de pisos da laje L3 altera a resposta da estrutura, influenciando a capacidade resistente da mesma.

Verifica-se que o valor do parâmetro crítico aumenta com o número de pisos da laje L3, até atingir o valor máximo quando existem 2 pisos de L3, obtendo-se praticamente o mesmo valor com a adição de mais um piso. Quando o pórtico tem mais de 3 pisos da laje L3, e à medida que se aumenta o número de pisos, observa-se uma perda da capacidade resistente.

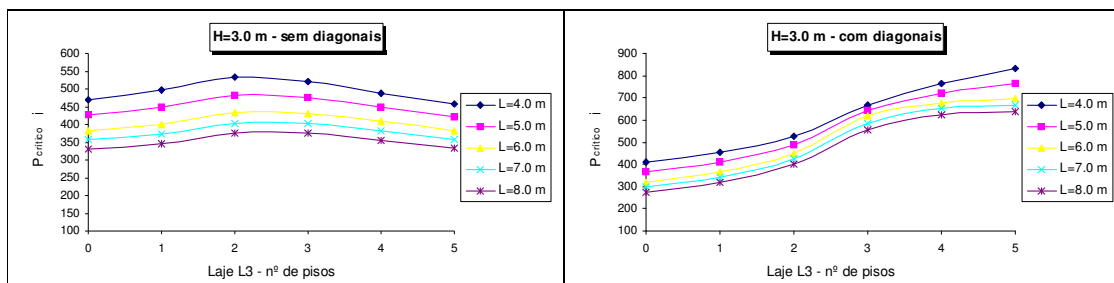


Gráfico 8. L3 – Variação paramétrica (nº pisos, H=3.0).

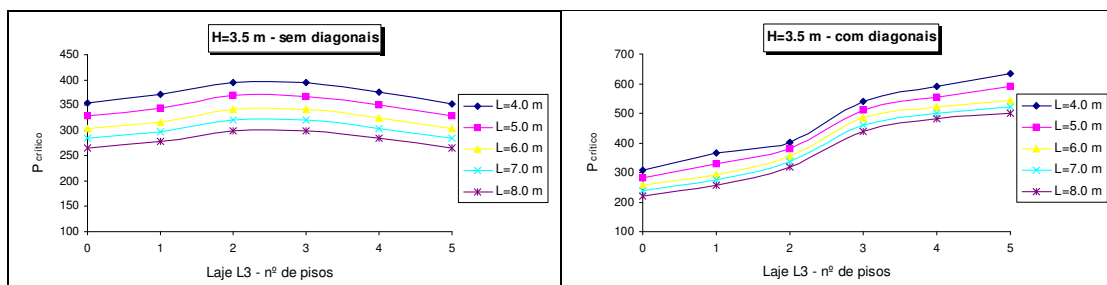


Gráfico 9. L3 – Variação paramétrica (nº pisos, H=3.5).

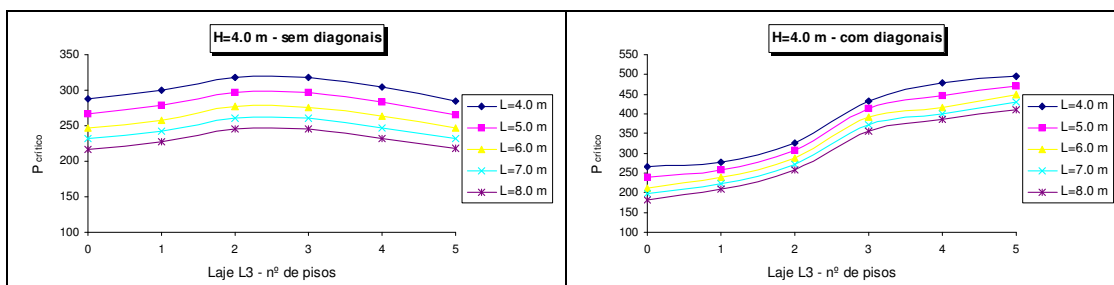


Gráfico 10. L3 – Variação paramétrica (nº pisos, H=4.0).

Como o pórtico não possui elementos de contraventamento, a perda de estabilidade ocorre por deformação no sentido da menor inércia, com translação das lajes, ou seja, como um pórtico de nós móveis. A introdução dos pisos L3 induz um efeito estabilizador ao aumentar a rigidez no sentido da menor inércia dos pilares, garantindo, desta forma, um aumento de capacidade resistente.

4. CONCLUSÕES

Aferiu-se o rigor do software INST3D, verificando que os resultados obtidos coincidem com os valores analíticos, validando a sua utilização para elaborar análises de instabilidade de pórticos. Relativamente ao software comercial, na avaliação do parâmetro crítico, verificou-se que os resultados obtidos com o SAP 2000, LUSAS e ANSYS, apresentam erros devido à formulação aproximada utilizada pelos programas. Como forma de diminuir o erro aumentou-se o grau de discretização dos elementos obtendo-se resultados “exactos” para discretizações bastante elevadas.

A utilização de modelos com molas de rigidez à flexão, para simular ligações semi-rígidas, deve ser ponderada para situações em que a rigidez influencia o comportamento estrutural (rigidez reduzida), sobretudo em estruturas de nós móveis.

O comportamento da estrutura 3D deve ser comandado pelo pórtico 2D que apresenta maior capacidade resistente. Neste caso, a estrutura deve apresentar um comportamento de nós fixos; O aumento do número de lajes, pode não implicar um aumento da capacidade resistente da estrutura.

Se o pórtico apresentar partes sobrelevadas, a geometria destas subestruturas pode condicionar a capacidade resistente do conjunto, justificando uma análise criteriosa dessa geometria. A definição geométrica da parte sobrelevada é mais condicionante para o desempenho da estrutura, quando não existem elementos de contraventamento;

REFERÊNCIAS

- [1] INST3D, *Manual de utilização do programa INST3D para a instabilidade de pórticos rectangulares tridimensionais sob acções verticais*, Departamento de Engenharia Civil, FEUP, Porto, Portugal, (2003).
- [2] SAP 2000, *Software Verification*, Computers and Structures Inc., Berkeley, California, (2003).
- [3] ANSYS, *ANSYS Release 8.0 Documentation*, ANSYS inc., Canonsburg – PA, USA, (2003).
- [4] LUSAS, *Powerful FE Technology for Specialist Applications : (Theory Manual 1 , Theory Manual 2 , Verification Manual)*, Version 13, United Kingdom, (2004).
- [5] A.J. Reis e D. Camotim, *Estabilidade Estrutural*, McGraw-Hill de Portugal, (2001).
- [6] M.B. Cesar, e R.C. Barros, *Modelos de Comportamento Não Linear Geométrico de Pórticos Assimétricos Tridimensionais*, C. Soares, A. Batista, G. Bugada, M. Casteleiro, J. Goicolea, J. Martins, C. Pina, H. Rodrigues, *Congresso de Métodos Computacionais em Engenharia, 2004*, APMTAC, Lisboa, Portugal, (2004), pp 189.
- [7] M.B. Cesar, e R.C. Barros, *Non-Linear Carrying Capacity of Asymmetric Three-Dimensional Braced Steel Frames*, B. Topping and C. Mota Soares, *Proceedings of The Seventh International Conference on Computational Structures Technology*, Civil-Comp Press, Lisbon, Portugal, (2004), Paper 145, pp. 325-326.