

Disposições regulamentares relativas ao dimensionamento de pilares de estruturas de betão armado

Code requirements for the design of r. c. columns.

Ana Bártolo^I

José N. da Camara^I

João Vinagre^{II}

Sumário

O dimensionamento dos pilares das estruturas de betão armado, em particular a forma de consideração dos efeitos de 2ª ordem, tem sido tema de alguma polémica a nível da investigação e da prática corrente.

Neste trabalho, e atendendo à entrada em vigor do Eurocódigo 2 e Código Modelo, apresenta-se uma análise crítica desta regulamentação comparando-se as respectivas disposições com as indicadas no REBAP neste domínio.

Discute-se como, de uma forma mais realista, se deveria proceder à quantificação dos efeitos de 2ª ordem e as situações em que a sua consideração poderia ser dispensada no dimensionamento. Os estudos em curso para uma melhor quantificação deste problema são apresentados.

Abstract

The design of r. c. columns, mainly the way how second order effects are considered has been a controversy subject both in research and in practical design.

In this work we present a critical analysis on the more recently published codes on this subject, and a comparative analysis with the portuguese code is done.

A discussion about a more realistic way to evaluate second order effects and about the establishment of those situations where such effects don't need to be taken into account is presented. The studies to be developed on the subject are presented.

^I Professor auxiliar no IST, Investigador do CMEST

^{II} Assistente no IST, Investigador do CMEST

1. INTRODUÇÃO

O Regulamento de Estruturas de Betão Armado Pré-Esforçado (REBAP) [1] indica uma metodologia para a quantificação dos efeitos de 2ª ordem nos pilares das estruturas de betão armado que tem sido alvo de alguma polémica tanto a nível da investigação como da prática corrente.

A análise das respectivas disposições já foi motivo de discussão nas jornadas sobre a aplicação da nova regulamentação de estruturas, onde foram levantadas algumas interrogações sobre o sentido físico das verificações regulamentares.

Neste momento, com a entrada em vigor do Eurocódigo 2, (EC2) [2], e da proposta do novo Código Modelo, (CM) [3], parece do maior interesse a análise comparativa do REBAP com estes novos códigos.

É realizada uma análise comparativa das disposições indicadas no EC2, CM e REBAP procurando-se clarificar a implementação prática ao projecto de estruturas de edifícios.

Com base nas disposições do REBAP é realizado um estudo paramétrico num pórtico tipo que permite avaliar a importância que os efeitos de segunda ordem têm nas quantidades de armadura para o dimensionamento dos pilares de uma estrutura.

Face à importância relativa destes efeitos na segurança dos pilares de um edifício é expressa a opinião de que a tendência da regulamentação está a tomar um sentido demasiado complexo.

Assim, deveria procurar encontrar-se uma forma mais realista tanto para a quantificação dos efeitos de segunda ordem nos pilares de um edifício como para a determinação das situações em que a sua consideração pode não ser tida em conta. Para atingir este objectivo apresenta-se a maneira como se virá a analisar este problema em trabalho de investigação a ser implementado em breve.

2. ANÁLISE CRÍTICA DAS DISPOSIÇÕES REGULAMENTARES

A metodologia dos diferentes códigos para a verificação da segurança de pilares de estruturas de betão armado engloba quatro aspectos fundamentais:

- Um primeiro aspecto tem a ver com a consideração dos efeitos das imperfeições geométricas associadas à execução dos pilares ou da avaliação incorrecta da posição da resultante das forças neles actuantes.
- Outro ponto muito importante diz respeito à classificação das estruturas em estruturas de nós fixos e nós móveis ou, de acordo com a legislação mais recente, em estruturas contraventadas e não contraventadas.

•Um terceiro aspecto, ligado à classificação das estruturas, tem a ver com o estabelecimento do designado limite de esbelteza inferior a partir do qual a quantificação dos efeitos de 2ª ordem é relevante.

•Finalmente, a definição da quantificação dos métodos simplificados existentes para o dimensionamento de pilares esbeltos é um tema que justifica ainda uma análise mais cuidada.

Estes aspectos serão tratados separadamente de seguida.

2.1. Imperfeições geométricas

A maneira de considerar o efeito das imperfeições geométricas resultantes duma deficiente execução dos pilares é apresentada no artigo 63º do REBAP. De acordo com este regulamento, aquele efeito só é considerado quando a verificação da segurança dos pilares à encurvadura não é dispensada sendo então quantificado sob a forma de uma excentricidade accidental, e_a , que toma o valor $l_0/300$ com um mínimo de 2 cm, sendo l_0 o comprimento de encurvadura do pilar em causa.

Para ter em conta os efeitos das imperfeições geométricas, quer o EC2 quer o CM, consideram a estrutura porticada numa posição já deformada (fig 1) com uma inclinação tal que:

$$\theta = 1/(100\sqrt{L}) \text{ rad} \quad \text{e} \quad \theta \leq 1/400 \quad \text{se os efeitos de 2ª ordem são irrelevantes}$$

$$\theta \leq 1/200 \quad \text{se o não forem.}$$

Efectivamente, esta forma de considerar os efeitos das imperfeições geométricas, independentemente de ser necessário considerar os efeitos de segunda ordem, é mais coerente pois estes são, de facto, aspectos distintos.

No caso de elementos isolados, a excentricidade é adicionada à excentricidade de primeira ordem de aplicação da carga axial na direcção mais desfavorável, de valor: $e_a = \theta l_0/2$.

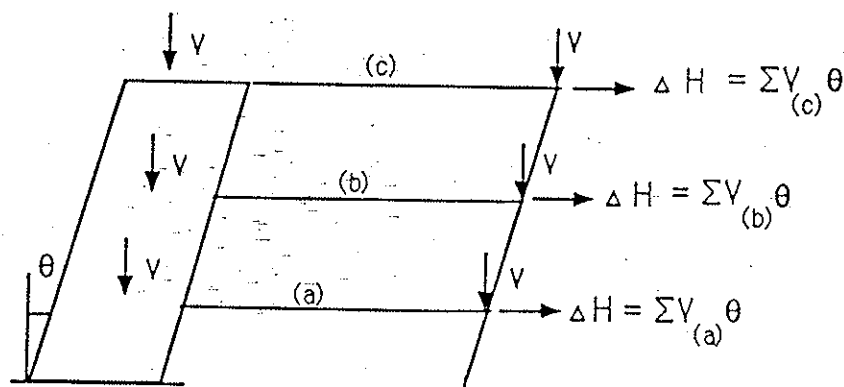


Fig. 1

2.2. Classificação das estruturas

Na verificação da segurança de um pilar de betão armado é fundamental, de acordo com o artigo 58º do REBAP, proceder previamente à classificação da estrutura a que o pilar pertence.

Nas figuras 2 e 3 apresentam-se organigramas representativos da metodologia a seguir pelo EC2 e CM, respectivamente, para definir o tipo de análise que é necessário realizar para o dimensionamento dos pilares.

Enquanto que segundo o REBAP uma estrutura é, em primeiro lugar, classificada de nós fixos ou de nós móveis, de acordo com a regulamentação europeia referida a estrutura deve ser previamente classificada em contraventada ou não contraventada e só depois verificada se é de nós fixos ou de nós móveis.

A classificação das estruturas como sendo de nós fixos, segundo o REBAP, resulta da verificação da seguinte condição:

$$h_{\text{tot}} \sqrt{\frac{\sum N}{\sum EI}} \leq \eta \quad (1) \quad \begin{array}{l} \eta = 0.2 + 0.1 n \quad \text{se } n \leq 4 \\ \eta = 0.6 \quad \text{se } n > 4 \end{array}$$

sendo: h_{tot} - altura total da estrutura acima do nível do terreno;

$\sum N$ - soma dos esforços normais ao nível da fundação não multiplicados pelos coeficientes γ_f para a combinação de acções em consideração;

$\sum EI$ - soma das rigidezes em fase não fendilhada dos elementos verticais na direcção considerada.

Esta expressão resulta da limitação dos efeitos de 2ª ordem para uma estrutura equivalente obtida como se indica no esquema da figura 4, resultante das seguintes simplificações:

- 1 - Rigidez nula das vigas;
- 2 - Pilar único com rigidez igual à soma das rigidezes de todos os elementos verticais e com uma carga vertical suposta uniformemente distribuída ao longo do pilar cuja resultante vale $\sum N$.

A estrutura é considerada de nós móveis se:

$$M_{2^{\text{a}} \text{ ordem}} = M_{1^{\text{a}} \text{ ordem}} \left[\frac{1}{1 - \left(1.75 \frac{\sum N}{(\sum N)_{\text{cr}}} \right)} \right] \geq 1.1$$

sendo, $(\sum N)_{\text{cr}}$ a carga crítica do modelo de consola com uma carga uniformemente distribuída em altura.

Classificação das estruturas de edifícios
e elementos estruturais segundo o
Eurocódigo 2

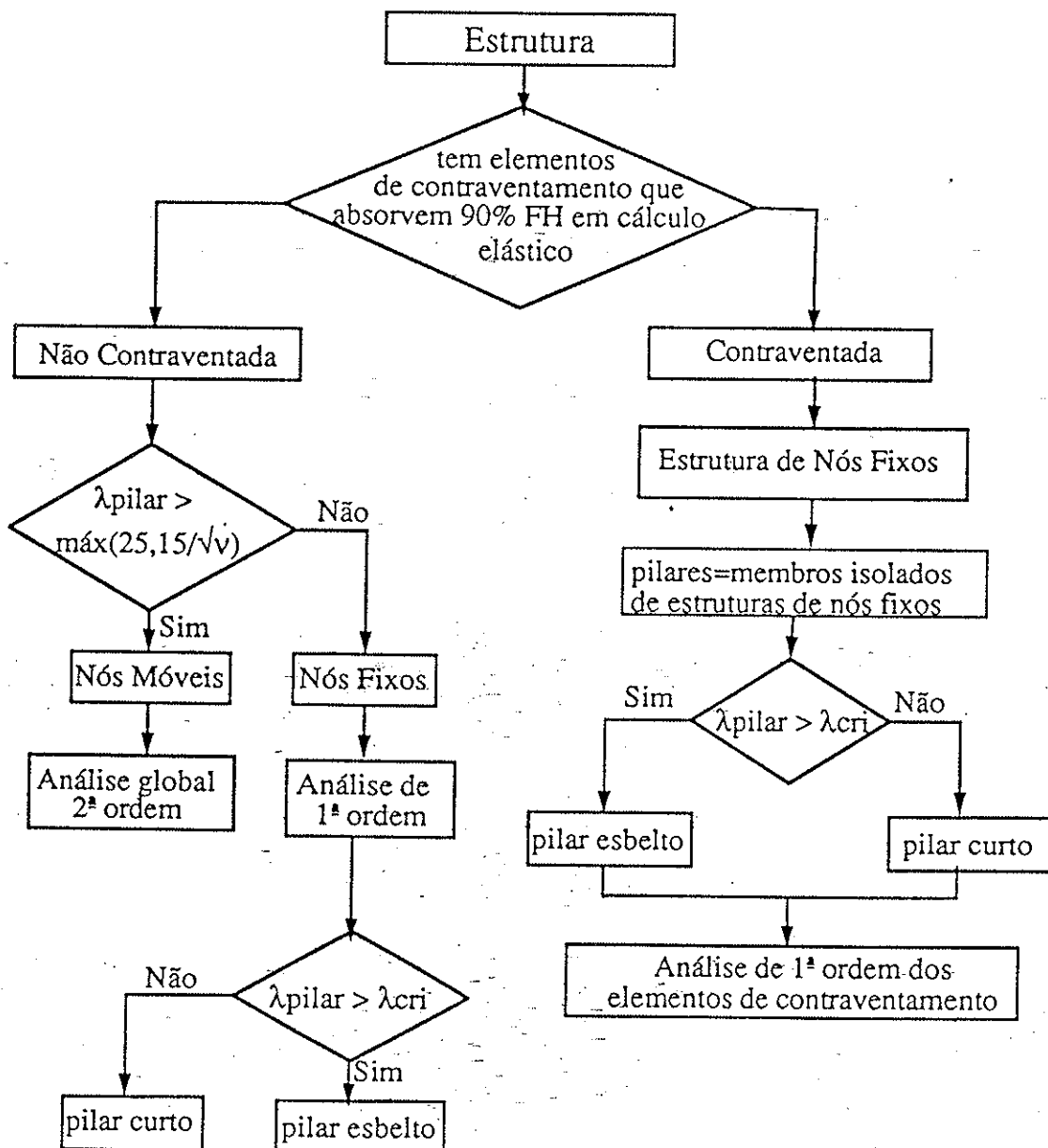


Fig. 2

Classificação das estruturas de edifícios e elementos estruturais de acordo com o Código Modelo

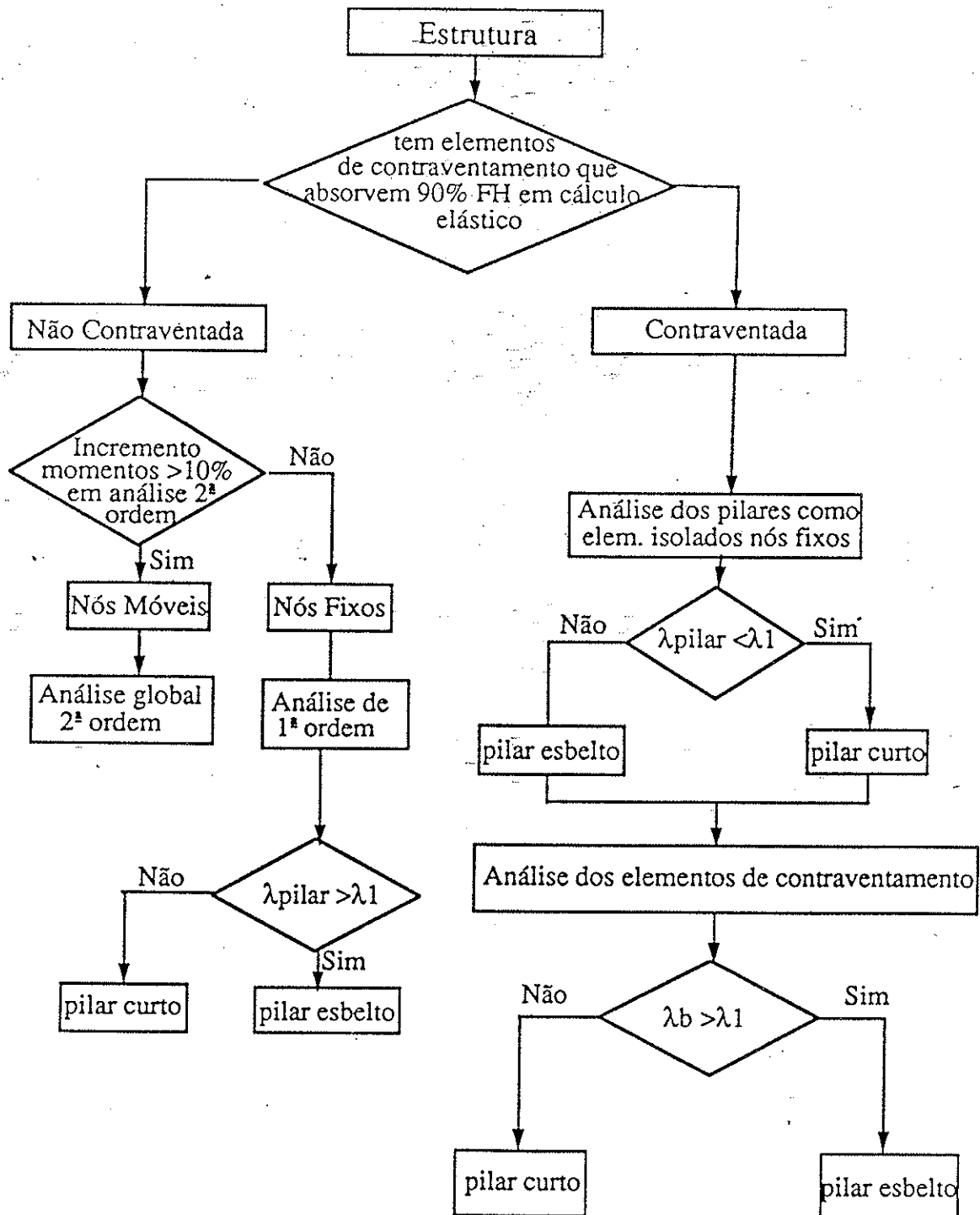


Fig. 3

Embora aquele modelo possa fazer sentido no caso de estruturas altas, não é razoável para estruturas com dimensões consideráveis em planta (como por exemplo o pórtico da fig.4).

A classificação de contraventada ou não contraventada, adoptada tanto no EC2 como no CM, depende da existência de elementos de contraventamento (paredes) que, em cálculo elástico, absorvam uma força de corte, ao nível da fundação, da ordem de 90% da soma de todas as forças horizontais actuantes. Esta condição, apesar de ser considerada para um cálculo elástico (sem redistribuição), implica que uma parte significativa dos edifícios correntes seja classificada como não contraventada, o que não parece ser razoável.

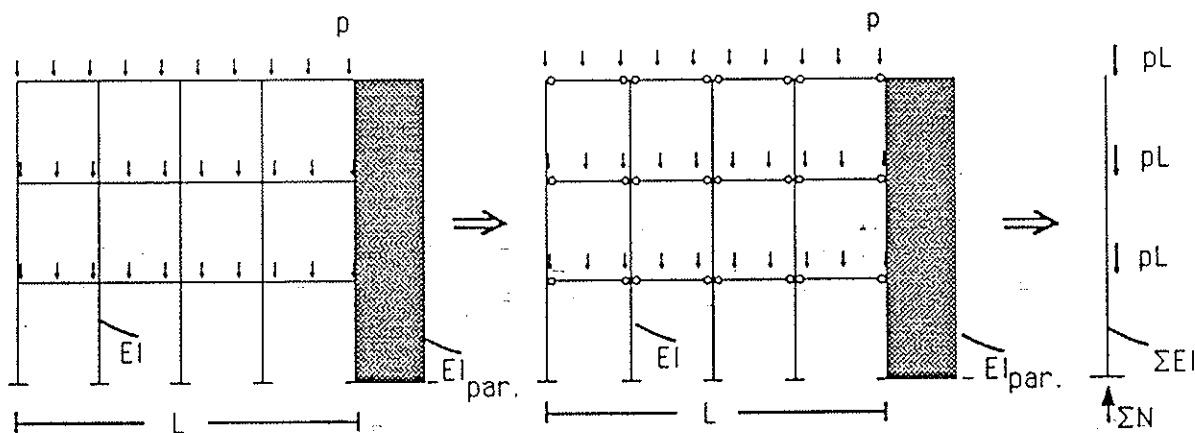


Fig. 4

De acordo com o EC2 (ver fig. 2):

1. Uma estrutura contraventada será sempre classificada de nós fixos. As paredes de contraventamento serão, em princípio, dimensionadas com esforços de 1ª ordem e os pilares como elementos isolados (com ou sem efeitos de 2ª ordem).

2. Uma estrutura não contraventada, porque não tem paredes de contraventamento ou porque não são suficientemente rígidas, pode ser classificada de nós fixos ou de nós móveis.

Se não tem paredes será classificada de nós fixos quando, para um dado piso, a esbelteza dos pilares com esforço axial superior a 70% do esforço axial médio desse piso é inferior ao maior dos seguintes valores: 25 ou $15/\sqrt{v_u}$, sendo v_u o valor do esforço axial reduzido de cada pilar. Se tem paredes será de nós fixos se se cumpre a condição (1) do REBAP acima referida. Em ambos os casos tanto o dimensionamento dos pilares como das paredes é feito de forma idêntica aos das estruturas contraventadas.

Caso contrário será de nós móveis e deverá ser analisada de forma global em teoria de 2ª ordem. Esta análise poderá eventualmente ser simplificada para pórticos regulares com uma esbelteza média, por piso, inferior ao maior dos seguintes valores: 50 ou $20/\sqrt{v_u}$.

Segundo o CM (ver fig. 3):

1. Numa estrutura contraventada, os pilares são dimensionados como elementos isolados de nós fixos, esbeltos ou não. As paredes de contraventamento são calculadas considerando ou não os efeitos de 2ª ordem em função do valor da esbelteza, λ_b , tal que:

$$\lambda_b = \left(\frac{h_{\text{tot}} \sqrt{\frac{\sum N}{\sum E_{\text{cm}} I_c}}}{0.01\beta \sqrt{v_{\text{sd}}}} \right) \quad \text{com} \quad \beta = 1.8 - 1.44(n + 0.8)$$

sendo v_{sd} o valor do esforço axial reduzido actuante.

2. Uma estrutura não contraventada pode ser classificada de nós fixos ou de nós móveis. Se for classificada como de nós fixos o dimensionamento dos elementos verticais deverá ser feito como elementos isolados.

Da análise pormenorizada que se fez dos procedimentos exigidos nestas normas pode concluir-se que estes são demasiado complexos. De qualquer forma, enquanto que no EC2 a formulação apresentada é de interpretação simples, no CM o processo de classificação é de difícil compreensão.

2.3. Limites de Esbelteza

Em relação à avaliação dos efeitos de segunda ordem no dimensionamento dos pilares considerados isoladamente é definido, em geral, um limite de esbelteza inferior abaixo do qual para os pilares pode ser dispensada a verificação à encurvadura.

Assim, no REBAP, uma vez classificada a estrutura, a verificação da segurança dos pilares é realizada tendo em conta ou não os efeitos de 2ª ordem em função da sua esbelteza λ .

Os elementos verticais serão considerados não esbeltos se se cumprirem as seguintes condições:

- 1) $\lambda \leq 50 - 15 M_{\text{sd},b} / M_{\text{sd},a}$ se a estrutura é de nós fixos
- 2) $\lambda \leq 35$ se a estrutura é de nós móveis
- 3) $M_{\text{sd}} / N_{\text{sd}} \geq 3.5 h$ se $\lambda \leq 70$
- 4) $M_{\text{sd}} / N_{\text{sd}} \geq 3.5 h \lambda / 70$ se $\lambda > 70$

De acordo com o EC2 e o CM a definição de elemento esbelto ou não esbelto é feita considerando não só o valor da sua esbelteza mas também do esforço axial actuante.

Assim, no EC2, um elemento isolado é considerado esbelto se a sua esbelteza λ verificar a seguinte condição:

$$\lambda \geq \max \left(25, \frac{15}{\sqrt{v}} \right)$$

Se o elemento pertence a uma estrutura classificada de nós fixos, será esbelto se se verificar a condição:

$$\lambda \geq \lambda_{\text{crit}} = 25.0 \left(2 - \frac{e_{01}}{e_{02}} \right)$$

sendo e_{01} e e_{02} as excentricidades de 1ª ordem ($e_0 = (M_{sd})_{1^\text{ª ordem}} / N_{sd}$) nas extremidades dos pilares.

De acordo com o CM os elementos verticais serão considerados esbeltos se o valor da sua esbelteza for superior ao valor da esbelteza limite, λ_1 , que toma diferentes valores dependendo da classificação das estruturas:

	<u>Nós Fixos</u>	<u>Nós Móveis</u>
Se $v_{sd} \leq 0.39$	$\lambda_1 = 7.5 (2 - e_{01}/e_{02}) / \sqrt{v_{sd}}$	$\lambda_1 = 7.5 / \sqrt{v_{sd}}$
Se $v_{sd} > 0.39$	$\lambda_1 = 12 (2 - e_{01}/e_{02})$	$\lambda_1 = 12$

Na figura 5 representam-se estes valores limites para os diferentes regulamentos nos casos de pilares isolados ou pertencendo a estruturas de nós móveis (fig. 5.a) e de pilares inseridos em estruturas de nós fixos (fig. 5b).

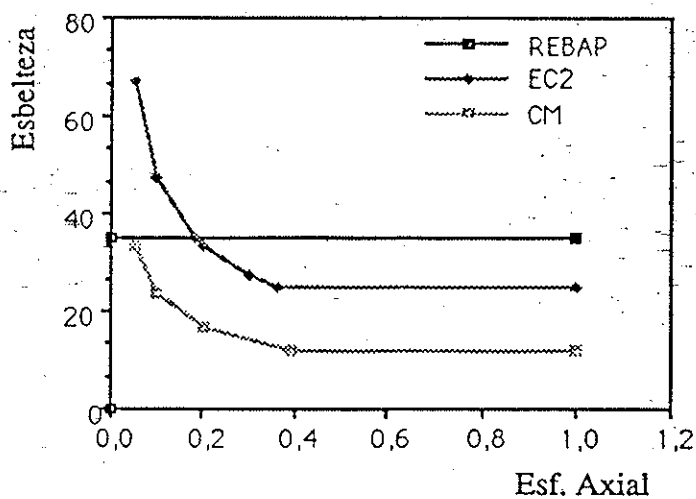


Fig. 5.a

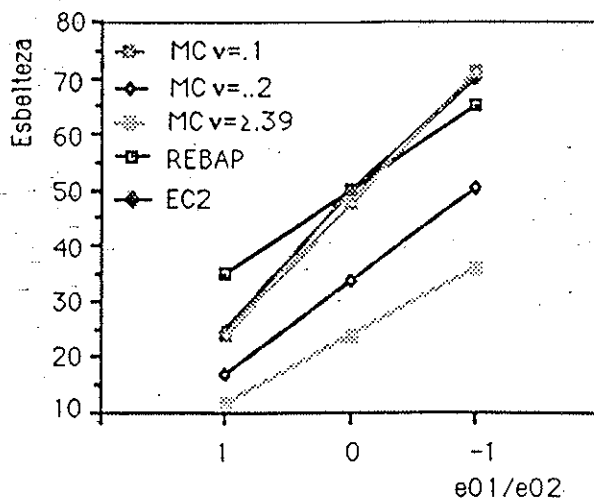


Fig. 5.b

Desta análise pode concluir-se que:

- o valor do limite de esbelteza, que no REBAP é um parâmetro só ligado à geometria da peça, vem afectado tanto no EC2 como no CM do valor do esforço axial, o que tem mais sentido físico.
- a nova regulamentação, em particular o CM, definem valores limites da esbelteza mais baixos que os valores do REBAP o que parece ser demasiado desfavorável.

2.4. Excentricidades de 2ª ordem

Nas situações em que a esbelteza é superior aos limites definidos anteriormente, a avaliação da excentricidade de 2ª ordem de cada pilar do edifício considerado isoladamente é baseada no pressuposto que se verifica a instabilização do pilar. Assim, quer de acordo com a regulamentação portuguesa quer com a nova regulamentação europeia, as expressões de cálculo são baseadas na expressão:

$$e_2 = \left(\frac{1}{r_y} \right) \cdot \left(\frac{l_0^2}{10} \right)_{II}$$

em que a deformação central do pilar é calculada admitindo a cedência da armadura ($M_y, 1/r_y$), (ver fig.6) e se considera que todo o pilar está no Estado II (fendilhado sem participação do betão traccionado).

Ora, da hipótese de que a rotura se verifica por instabilidade do pilar considerado isoladamente (de facto encontra-se numa estrutura altamente hiperstática) e das outras hipóteses relativas à deformação do pilar resulta uma avaliação, em nosso entender, discutível face ao problema em causa, onde não são conhecidas situações práticas de instabilidade de pilares de edifícios.

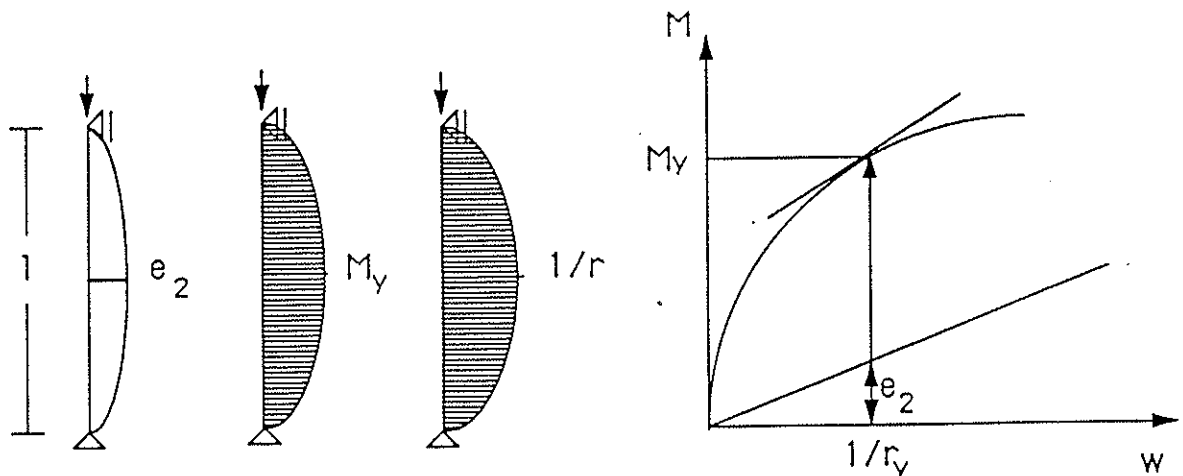


Fig. 6

3. Importância relativa dos efeitos de 2ª ordem de acordo com o REBAP

Com base num processo automatizado de dimensionamento de pilares baseado nas regras de cálculo do REBAP, recentemente desenvolvido no CMEST, fez-se um estudo paramétrico da importância relativa da consideração dos efeitos de 2ª ordem no dimensionamento dos pilares de edifícios.

A partir de pórticos tipo (ver fig. 7.a) e para pilares com diferentes níveis de esforço axial foram calculadas as armaduras considerando ou não os efeitos de 2ª ordem (mantendo a excentricidade acidental, e_a) nas hipóteses do pórtico pertencer a uma estrutura de nós fixos ou de nós móveis. Foi possível confirmar os seguintes aspectos:

- para pilares correntes pertencentes a estruturas classificadas como de nós fixos, o dimensionamento é condicionado pelos esforços de primeira ordem.

- para pilares correntes pertencentes a estruturas classificadas como de nós móveis, verifica-se que aqueles efeitos aumentam, em média, 10 a 15% as quantidades de armadura de flexão. Verifica-se assim que a consideração dos efeitos de 2ª ordem dependem da estrutura ser ou não classificada de nós fixos (como vimos no parágrafo 2.2 esta divisão é muito pouco fiável) e, nos casos em que é classificada de nós móveis, estes efeitos, apesar de serem avaliados bastante desfavoravelmente na hipótese de pilar isolado (ver análise do parágrafo 2.4), são de importância relativa moderada a pequena.

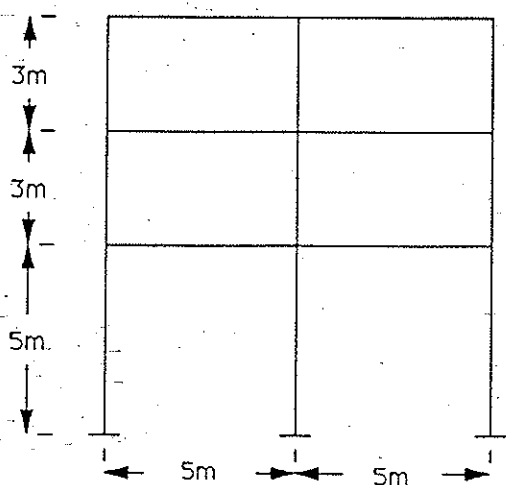


Fig.7.a

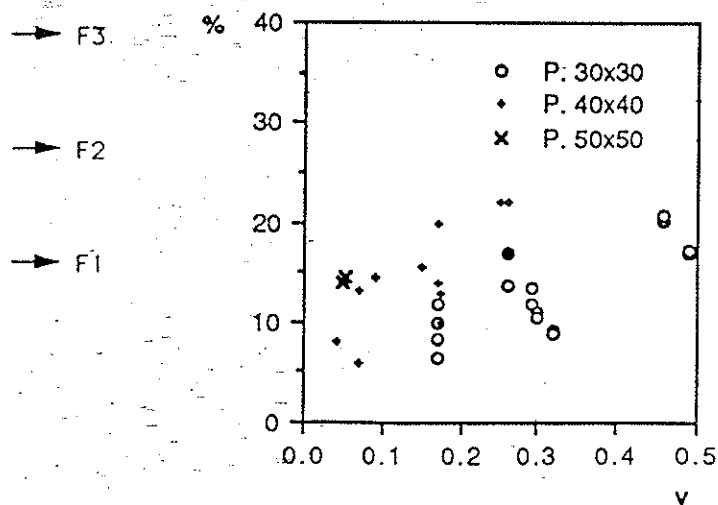


Fig. 7.b

4. Comentário final

Em termos gerais, é nosso entender, que os procedimentos actuais para a avaliação dos efeitos de segunda ordem na verificação da segurança das estruturas, e em particular dos edifícios, são demasiado complexos (note-se as dificuldades sentidas na prática da aplicação correcta do REBAP e os organigramas das figuras 2 e 3 referentes ao CM e EC2), face às hipóteses discutíveis adoptadas (refira-se, por exemplo, a classificação em estruturas de nós fixos ou móveis no REBAP e mesmo em estruturas contraventadas ou não no CM e EC2) e face à importância destes efeitos na segurança global dos pilares (ver resultados do estudo paramétrico do parágrafo 3).

Parece-nos assim importante desenvolver um trabalho de investigação que permita definir, de uma forma mais simples e mais ligada à realidade estrutural de um edifício, em que casos se justifica considerar os efeitos geometricamente não lineares, e no caso dessa necessidade um procedimento claro da sua quantificação.

Para contabilizar o comportamento global da estrutura, os efeitos de 2ª ordem devem ser tidos em conta quando, para a estrutura no seu conjunto, a não consideração do comportamento não linear (físico e geométrico) corresponda a baixar o nível de segurança em mais de, aproximadamente, 10%. Esta disposição, que tem sido adoptada para cada pilar isolado, deve ser generalizada para as estruturas tirando partido da sua hiperstaticidade e capacidade de redistribuição de esforços para que, a partir de um estudo alargado, se possa contribuir para a melhoria das presentes disposições regulamentares.

5. Referências bibliográficas

- [1] Regulamento de Estruturas de Betão Armado Pré-esforçado. Lisboa 1986.
- [2] Eurocode N° 2. Design of Concrete Structures. Final Draft . December 1988.
- [3] Bulletin d'Information N°196. CEB-FIP Model Code 1990. First Draft. Mars 1990.