



Eurocódigo 8, EN 1998 em Tricalc Projecto de Estruturas para resistência aos Sismos - aspectos construtivos para estruturas de betão

Com a inclusão em Tricalc (versão 7.2) do Eurocódigo Sísmico: EN 1998 'Projecto de Estruturas para resistência aos Sismos', impõe-se uma análise dos principais critérios construtivos que esta norma exige para o caso de estruturas que se vão executar em zonas de acção sísmica relevante. Numa primeira análise rápida, podemos dizer que a citada norma, vem impor um alto grau de exigência.

Adaptação de Tricalc à Norma EN 1998

Como se comentou anteriormente a norma EN 1998 descreve os procedimentos e exigências a ter em consideração para a realização do dimensionamento de uma estrutura relativamente ao sismo nos 31 países membros da CEN (os 27 países que formam a União Europeia mais a Croácia e os 3 países que formam a EFTA). Em concreto na norma EN 1998-1 indicam-se as modificações que devemos ter em consideração na geometria de uma estrutura para que esta se adeque aos preceitos desta norma.

Tricalc considera de forma automática todas as prescrições que se citam no presente artigo e que abarcam temas desde os materiais a utilizar, posicionamento dos distintos elementos na geometria da estrutura, secções mínimas exigidas e critérios de armadura.

Seguidamente, detalham-se as características construtivas mais relevantes e os artigos onde são citados.

Tipos de Sismicidade (Art. 3.2.1)

O primeiro parâmetro que é necessário ter em conta e que influi nos distintos critérios construtivos a aplicar à estrutura é o Tipo de Sismicidade da zona em que se vai executar a obra. Este parâmetro dependerá da Aceleração Sísmica e do Factor de Solo (factor "S" que incrementa o valor da aceleração sísmica dependendo do tipo de solo sobre o qual se vai fundar a estrutura) conforme se exemplifica nas tabelas seguintes.

O zonamento sísmico para Portugal Continental, para o Arquipélago da Madeira e para o Arquipélago dos Açores é estabelecido, por Concelho, de acordo com a informação constante do Anexo NA.I, e ilustrado nas Figuras NA.I, NA.II e NA.III.

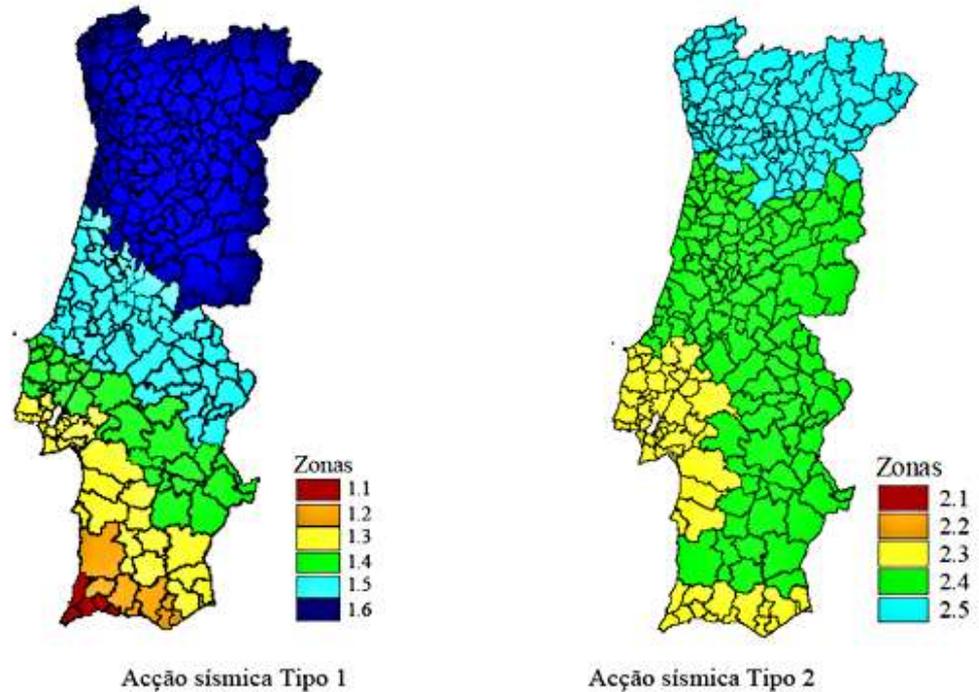


Figura NA.I – Zonamento sísmico em Portugal Continental

Quadro NA-3.2 – Valores dos parâmetros definidores do espectro de resposta elástico para a Acção sísmica Tipo 1

Tipo de Terreno	S_{max}	T_B (s)	T_C (s)	T_D (s)
A	1,0	0,1	0,6	2,0
B	1,35	0,1	0,6	2,0
C	1,6	0,1	0,6	2,0
D	2,0	0,1	0,8	2,0
E	1,8	0,1	0,6	2,0

Quadro NA-3.3 – Valores dos parâmetros definidores do espectro de resposta elástico para a Acção sísmica Tipo 2

Tipo de Terreno	S_{max}	T_B (s)	T_C (s)	T_D (s)
A	1,0	0,1	0,25	2,0
B	1,35	0,1	0,25	2,0
C	1,6	0,1	0,25	2,0
D	2,0	0,1	0,3	2,0
E	1,8	0,1	0,25	2,0

Tipo de Sismicidade	Máximo α_E	Máximo α_{E-S}
Muy Baixa	0,04g	0,05g
Baixa	0,08g	1g
Alta	---	---

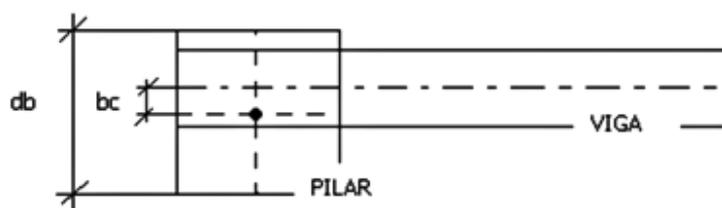
Ductilidade

Este é o parâmetro fundamental que define os aspectos construtivos que se devem modificar na obra para que esta trabalhe de forma correcta quando submetida aos esforços sísmicos. Consoante a Ductilidade definida na estrutura (dado que o Tricalc permite introduzir de forma simples nas suas opções para o cálculo do sismo), o eurocódigo obriga-nos a utilizar materiais, secções e armaduras diferentes. Estas condições serão mais exigentes consoante se pretenda um maior grau de ductilidade da estrutura, podendo ser classificado em três casos: DCL, DCM e DCH. Em compensação, quanto maior a ductilidade da estrutura, menores serão os esforços de cálculo procedentes do sismo.

Nos seguintes apartados descrevem-se os 3 graus de ductilidade.

- **Ductilidade Baixa: DCL (Art. 5.3.1).**- Para estruturas deste tipo, não se definem condições construtivas especiais. No entanto, só se permite o cálculo de estruturas tipo DCL para o caso de Baixa Sismicidade. Como foi referido anteriormente deve ser o utilizador a definir a ductilidade da estrutura pelo que, para evitar possíveis erros, o programa avisa de forma clara caso se tente aplicar este caso para zonas de Alta Sismicidade.
- **Ductilidade Média: DCM (Art. 5.4).**- Para que uma estrutura possa ser considerada como DCM deve cumprir uma série de requisitos referentes a Materiais, Vigas, Pilares e Paredes. Quando no Tricalc se selecciona este tipo de ductilidade, o programa aplica, de forma automática, as condições de armadura específicas que se referem a seguir e verifica, avisando se não se alcançam os mínimos, o resto dos parâmetros definidos pelo utilizador.
 - **Materiais (Art. 5.4.1.1).**- O tipo de betão utilizado deve ser, como mínimo, do tipo C16/20 e o aço nervurado, exceptuando os estribos, deve ser de classe B ou C.
 - **Excentricidades e apoios em Vigas e Pilares (Arts. 5.4.1.2.1 e 5.4.1.2.5).**- A excentricidade máxima (vista em planta) permitida bc será uma quarta parte da dimensão do pilar perpendicular à viga db (ver imagem seguinte).

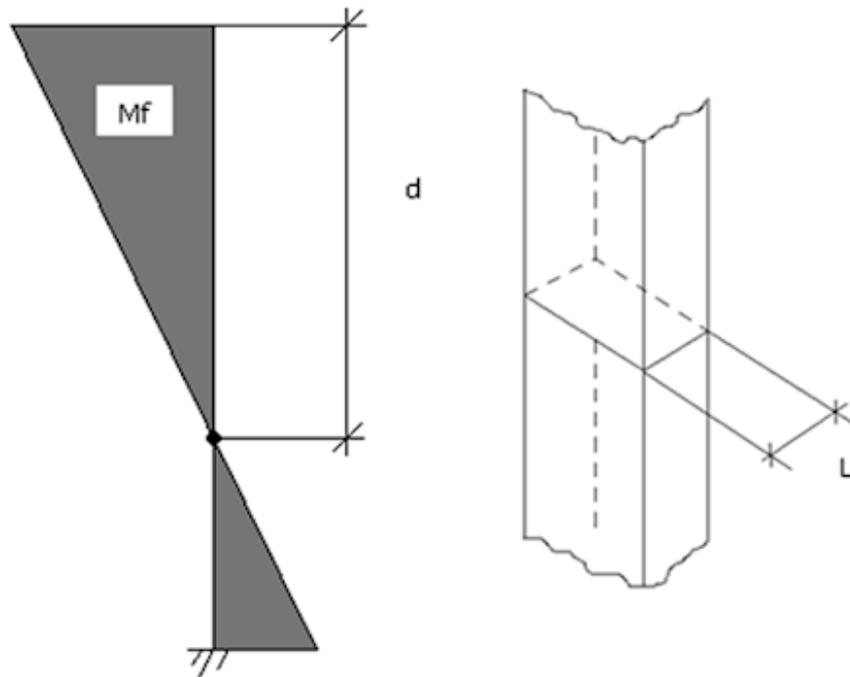
$$bc \leq db/4$$



Além disso, não se permitem excentricidades entre vigas e pilares apoiados. Se o programa detecta que se incumpe alguma das condições anteriores apresentará o correspondente aviso instando o utilizador a corrigir a configuração da estrutura.

- **Apoios de Paredes (Art. 5.4.1.2.5).**- Não se permitem paredes apoiadas sobre nenhum elemento, quer sejam vigas ou lajes. Se o programa detecta que não se cumpre este requisito avisa de forma a que a situação possa ser resolvida pelo utilizador.
- **Secções de Pilares (Art. 5.4.1.2.2).**- A dimensão mínima L que se permite num pilar virá imposta pela deformada do mesmo. Desta forma, a dimensão menor da secção de um pilar não poderá ser inferior a $1/10$ da distância máxima desde o Ponto de Inflexão do pilar (ponto em que a sua deformada muda de sinal) a qualquer dos dois extremos deste. Se analisarmos o gráfico de Momentos de um pilar pode-se calcular este ponto de inflexão como o ponto no qual estes assumem valor nulo. Assim, a limitação imposta seria a seguinte (ver imagem):

$$L \geq d/10$$



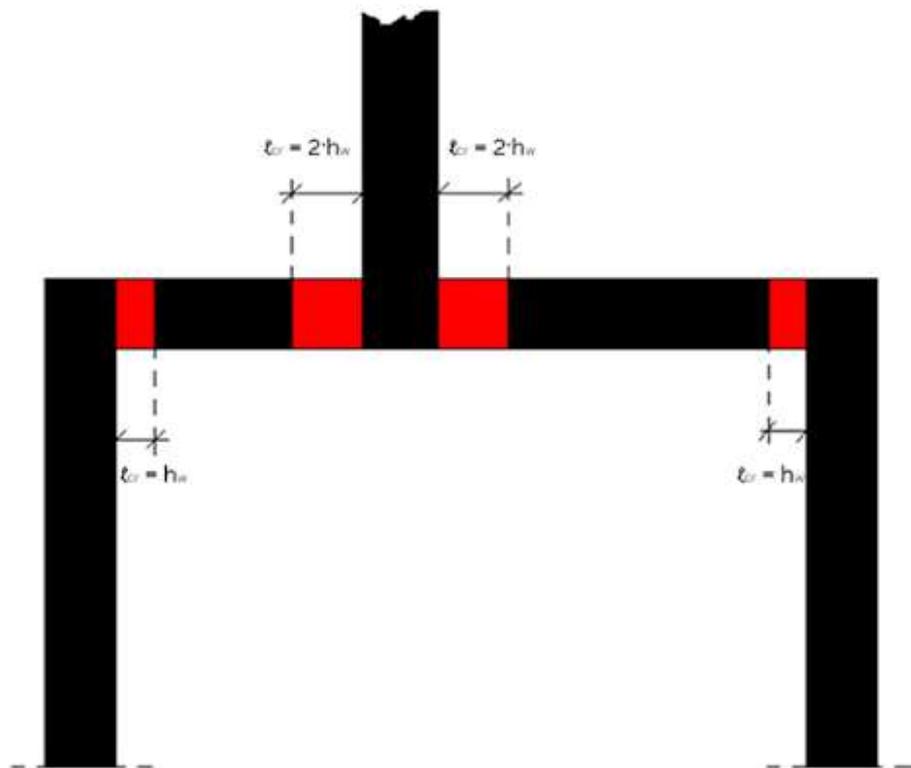
Caso as secções definidas pelo utilizador sejam inferiores ao limite anterior, o programa dar-nos-á o correspondente aviso, para que possamos corrigir os perfis que não cumprem estas condições.

- **Espessura de Paredes (Arts. 5.4.1.2.3 e 5.4.1.2.4).**- Tal como no caso anterior, também existem limitações geométricas para as paredes. Desta forma, impõe-se uma espessura mínima b_{wo} de 15cm incrementando-se consoante aumenta a altura livre da parede h_s . Esta situação pode-se resumir na seguinte equação:

$$b_{wo} \geq \max \{0,15m; h_s/20\}$$

Se o programa detecta que se incumpra esta prescrição mostra o correspondente erro de esbelteza.

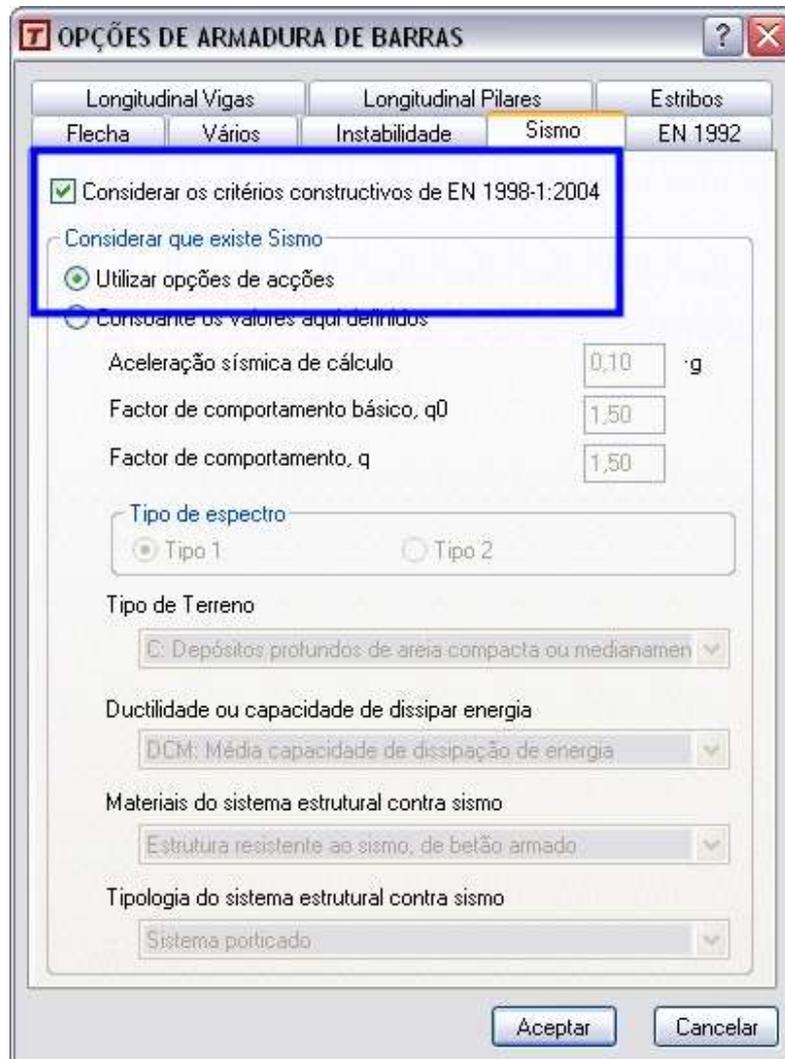
- **Armadura de Vigas (Art. 5.4.3.1.2).**- Definem-se Secções Críticas nas vigas nas zonas junto aos pilares. Estas secções críticas possuem um comprimento l_{cr} igual ao dobro da altura da viga h_w para ambos os lados dos pilares apoiados na mesma. No caso de pilares que são apoio de vigas este comprimento será de uma altura (ver imagem seguinte).



Nestas regiões críticas deve incrementar-se a armadura seguindo os seguintes critérios:

- Na face comprimida deve adicionar-se à armadura de compressão necessária nas combinações sísmicas, 1/2 da armadura de tracção da face oposta
- Quantia de Tracção: $\rho' + 0,0018 \cdot f_{cd} / (\mu \varphi \cdot \epsilon_{sy,d} \cdot f_{yd}) \geq \rho \geq 0,5 \cdot f_{ctm} / f_{yk}$
- Diâmetro: $dbw \geq 6 \text{ mm}$
- Separação: $s = \min \{ h_w / 4; 24 \cdot dbw; 225 \text{ mm}; 8 \cdot dbL \}$
- O primeiro estribo será colocada a uma distância máxima de 50 mm da face do pilar

De forma absolutamente simples, basta ao utilizador indicar em Tricalc que se tenham em consideração os critérios construtivos do sismo, para que o programa calcule as secções críticas e a sua armadura de acordo com as condições anteriores de forma automática.



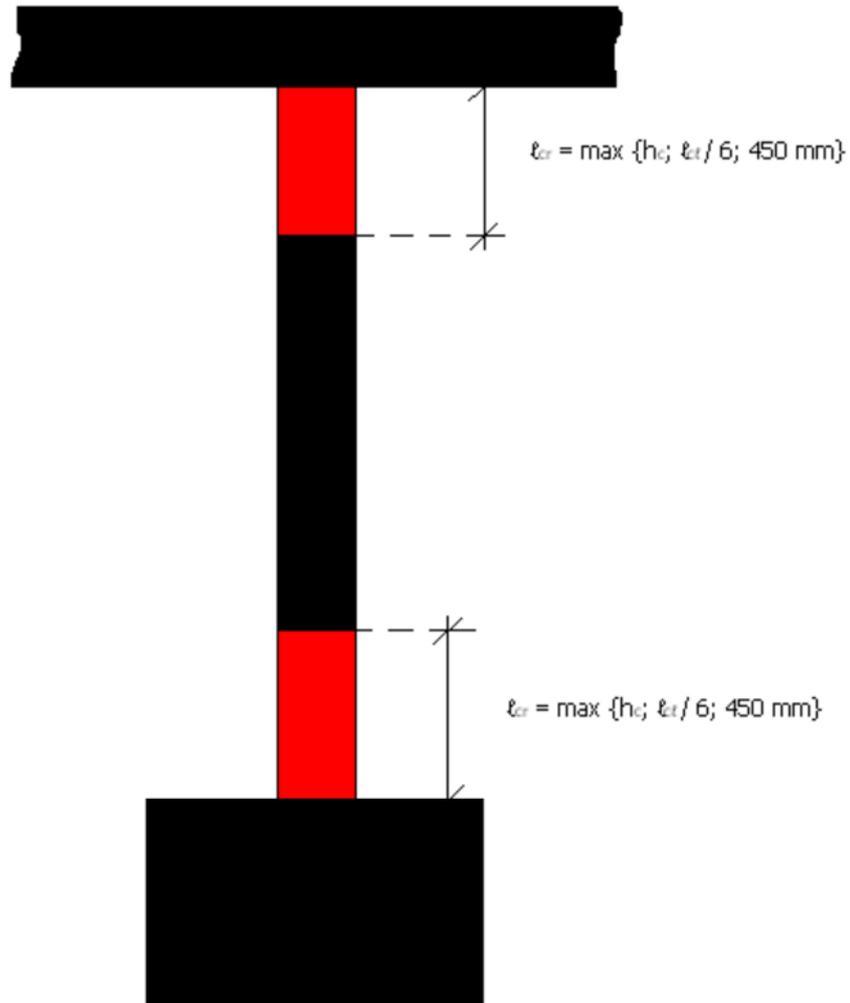
- **Armadura para Pilares (Art. 5.4.3.2.2).**- Definem-se limites para a quantia longitudinal para toda a altura do pilar através da seguinte equação:

$$0,01 \leq \rho_l \leq 0,04$$

Além disso devem existir sempre, pelo menos três varões por face do pilar no caso destes serem rectangulares (um total de, no mínimo, oito varões na secção).

Por outro lado, neste caso, o comprimento das Secções Críticas l_{cr} ficam situadas no início e no final do pilar e toma valores que vão desde 45cm até à totalidade do comprimento do pilar.

$$l_{cr} = \max \{h_c; l_c / 6; 450 \text{ mm}\}$$



A armadura de estribos deve cumprir, nestas regiões, os limites de Quantia Mecânica Volumétrica Mínima:

$$\alpha \cdot \omega_{wd} \geq 30 \cdot \mu \varphi \cdot v_d \cdot \epsilon_{sy,d} \cdot b_c / b_0 - 0,035$$

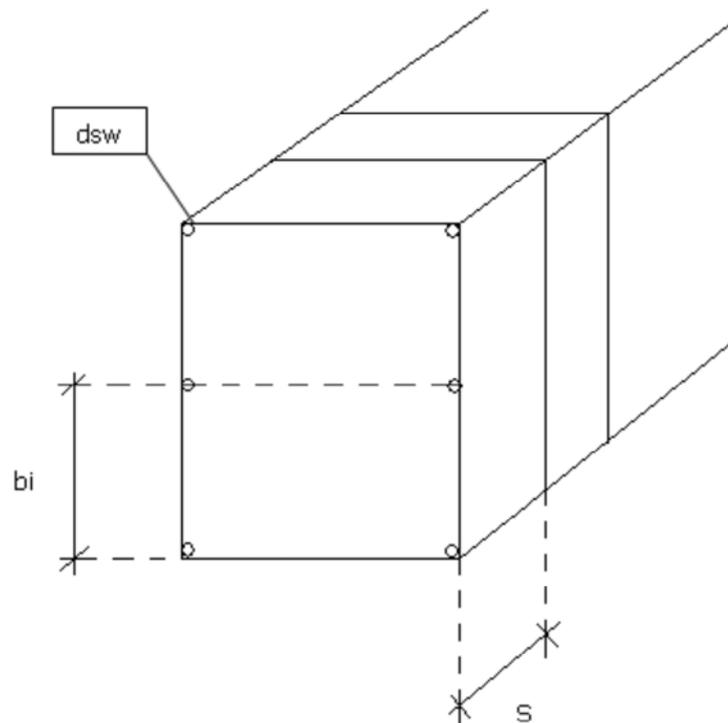
Além desses limites, na região crítica da base a Quantia Mecânica de estribos deve ser:

$$\omega_{wd} \geq 0,08$$

Finalmente, com a finalidade de evitar a Encurvadura do pilar a distância entre estribos S e a distância entre ramos longitudinais b_i devem cumprir, respectivamente, o seguinte:

$$s \leq \min \{b_0 / 2; 175 \text{ mm}; 8 \cdot db_L\} \quad (5.18)$$

$$b_i \leq 200 \text{ mm}$$



De forma absolutamente simples, basta ao utilizador indicar em Tricalc que se tenham em consideração os critérios construtivos do sismo, para que o programa calcule as secções críticas e a sua armadura de acordo com as condições anteriores de forma automática.

- **Ductilidade Alta: DCH (Art. 5.5.1.1).**- Da mesma forma que sucedia com o caso de DCM, para que uma estrutura possa ser considerada como DCH deve cumprir uma série de requisitos no que refere a Materiais, Vigas, Pilares e Paredes. Quando, no Tricalc, se selecciona este tipo de ductilidade, o programa aplica, de forma automática, as condições de armadura específicas que se apresentam de seguida e verifica, avisando caso não se alcancem os valores mínimos, os restantes parâmetros definidos pelo utilizador.

Neste caso, como é lógico, os requisitos exigidos pelo eurocódigo são mais restritivos que no caso da ductilidade média.

- **Materiais (Art. 5.5.1.1).**- O tipo de betão utilizado deve ser, como mínimo, do tipo C20/25, enquanto que o aço nervurado, exceptuando os estribos, deve ser de classe C.

- **Excentricidades e apoios de Vigas e Pilares (Arts. 5.5.1.2.1 e 5.5.1.2.4).**- Além das condições exigidas para DCM, deve-se verificar que a largura da viga b_w está contida entre os seguintes valores:

$$\text{mín } \{bc + hw; 2 \cdot bc\} \geq b_w \geq \text{máx } \{200\text{mm}; hw / 3.5\}$$

Caso o programa detecte que não se cumpre alguma das condições anteriores apresenta o correspondente aviso instando o utilizador a que corrija a configuração da estrutura.

- **Apoios de Paredes (Art. 5.5.1.2.4).**- Devem-se verificar as condições impostas para DCM.
- **Secções de Pilares (Art. 5.5.1.2.2).**- Além das condições exigidas para DCM, deve-se verificar que a dimensão do pilar seja, pelo menos, 25cm.

$$L \geq 25\text{cm}$$

Caso o programa detecte que não se cumpre alguma das condições anteriores apresenta o correspondente aviso instando o utilizador a que corrija a configuração da estrutura.

- **Espessura de Paredes (Arts. 5.5.1.2.3 e 5.5.1.2.4).**- Da mesma forma que o ponto anterior, também existem limitações geométricas para as paredes. Desta forma, impõe-se uma espessura mínima b_{wo} de 15cm incrementando-se conforme aumenta a altura livre da parede h_s . Esta situação pode resumir-se na seguinte equação:

$$b_{wo} \geq \max \{0,15\text{m}; h_s/20\}$$

Caso o programa detecte que não se cumpre com esta prescrição apresenta o correspondente erro

de esbelteza.

- **Armadura de Vigas (Art. 5.5.3.1.3).**- Neste caso mantêm-se as exigências impostas para o caso de DCM porém modifica-se a separação mínima dos estribo para:

$$\text{Separação: } s = \text{mín} \{hw / 4; 24 \cdot dbw; 175 \text{ mm}; 6 \cdot dbL\}$$

De forma absolutamente simples, basta ao utilizador indicar em Tricalc que se tenham em consideração os critérios construtivos do sismo, para que o programa calcule as secções críticas e a sua armadura de acordo com as condições anteriores de forma automática.

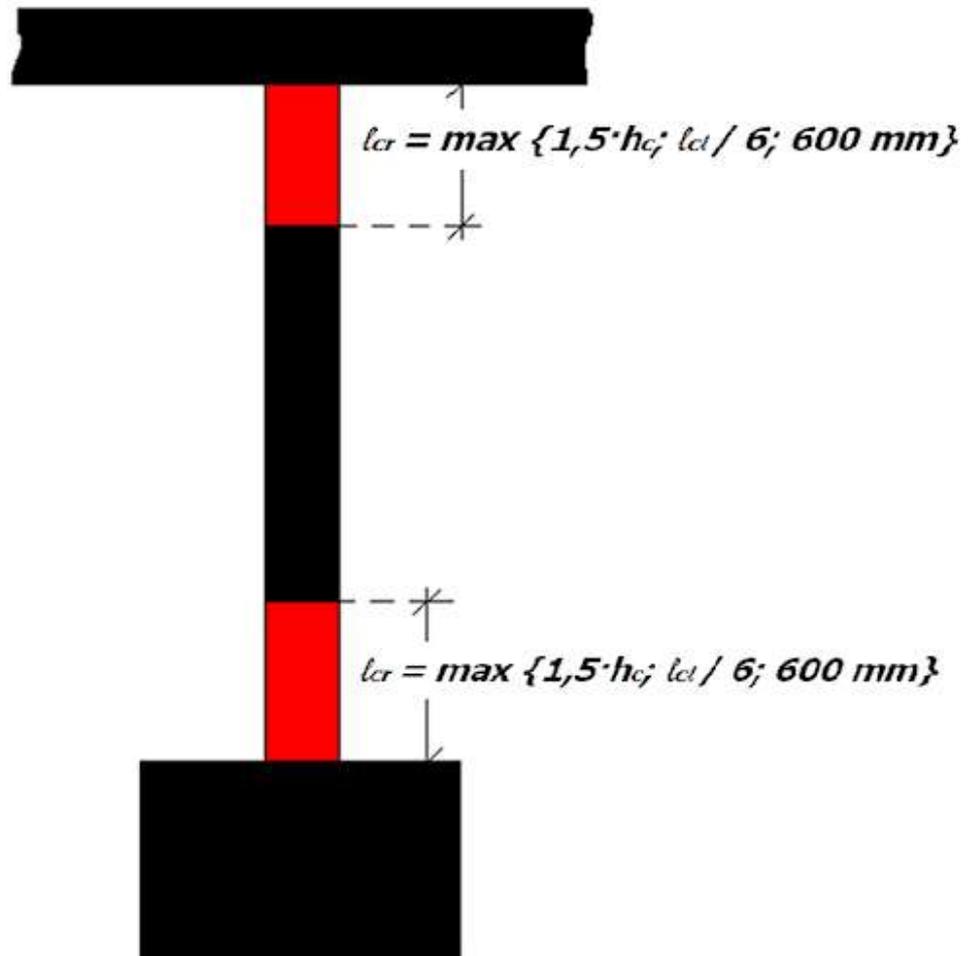
- **Armadura para Pilares (Art. 5.5.3.2.2).**- Definem limites para a quantia longitudinal para toda a altura do pilar definidos pela seguinte equação:

$$0,01 \leq \rho_l \leq 0,04$$

Além do critério anterior, devem existir sempre, pelo menos três varões por cada face do pilar no caso desta ser rectangular (um total de, no mínimo, oito varões na secção).

Por outro lado, neste caso, o comprimento das Secções Críticas l_{cr} ficam situadas no início e no final do pilar e assume valores que vão desde os 45cm até à totalidade do comprimento do pilar.

$$l_{cr} = \text{máx} \{1,5h_c; l_c / 6; 600 \text{ mm}\}$$



A armadura de estribos deve cumprir, nestas regiões, os seguintes valores de Quantia Mecânica Volumétrica Mínima:

$$\alpha \cdot \omega_{wd} \geq 30 \cdot \mu \varphi \cdot v_d \cdot \epsilon_{sy,d} \cdot bc / b_0 - 0,035$$

Além disso, na região crítica da base a Quantia Mecânica de estribos deve ser:

$$\omega_{wd} \geq 0,12$$

Enquanto que no resto das regiões deve-se cumprir:

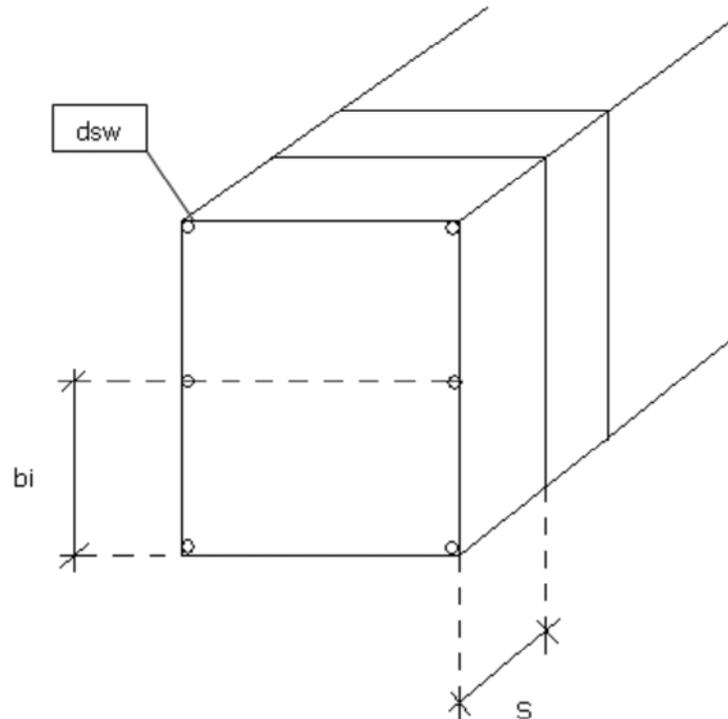
$$\omega_{wd} \geq 0,08$$

Finalmente, com o objectivo de evitar a Encurvadura do pilar o comprimento das regiões críticas dos dois primeiros pisos será 1,5 vezes a definida anteriormente e, a distância entre estribos s entre ramos longitudinais b_i e os diâmetros dos varões d_{sw} devem cumprir, respectivamente, o seguinte:

$$s \leq \min \{ b_0 / 2; 175 \text{ mm}; 8 \cdot d_{bL} \} \quad (5.18)$$

$$b_i \leq 200 \text{ mm}$$

$$d_{sw} \geq 0,4 \cdot d_{bL}, \max \cdot (f_{ydL} / f_{ydw}) 0,5$$



De forma absolutamente simples, basta ao utilizador indicar em Tricalc que se tenham em consideração os critérios construtivos do sismo, para que o programa calcule as secções críticas e a sua armadura de acordo com as condições anteriores de forma automática.

- Armadura em Paredes (Art. 5.5.3.4.5).- As armaduras de paredes que, no caso de DCM não tinham nenhuma prescrição específica, neste caso só se devem cumprir uma série de condições que se detalham de seguida:

- A quantia tanto horizontal como vertical será $\rho \geq 0,002$.
- Devem existir estribos unindo a armadura de ambas as faces a cada 500 mm.
- O diâmetro dos estribos cumprirá: $b_{wo} / 8 \geq d_b \geq 8 \text{ mm}$
- A separação dos estribos será: $s \leq \min \{ 250 \text{ mm}; 25 \cdot d_b \}$

De forma absolutamente simples, basta ao utilizador indicar em Tricalc que se tenham em consideração os critérios construtivos do sismo, para que o programa calcule a sua armadura de acordo com as condições anteriores de forma automática.

Amarrações e Emendas (Art. 5.6)

Qualquer estrutura com sismo que se calcule com o eurocódigo 8, deve cumprir os seguintes requisitos independentemente da sua ductilidade. Tricalc segue de forma fiel as prescrições que se citam a seguir.

- **Pilares (Art. 5.6.2.1).**- Na grande maioria dos casos, para estruturas que sofrem os efeitos do sismo, existe uma combinação para a qual as armaduras estão traccionadas. Para este caso, os Comprimentos de Amarração usuais devem multiplicar-se por um factor de 1,5.

$$L_a(EC8) = 1,5 \cdot L_a(EC2)$$

- **Vigas (Art. 5.6 e 5.6.2.2).**- Deve-se limitar o diâmetro das armaduras longitudinais de vigas com amarração a:

- Em Pilares interiores de acordo com a expressão:

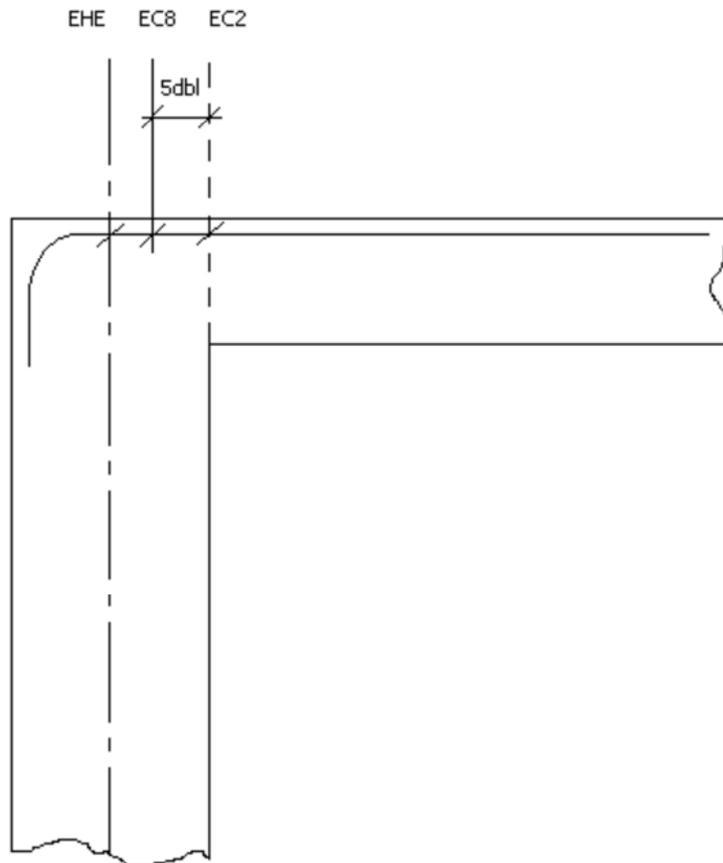
$$dbL / hc \leq [7,5 \cdot f_{ctm} / (\gamma_{Rd} \cdot f_{yd})] \cdot [(1 + 0,8 \cdot v_d) / (1 + 0,75 \cdot k_D \cdot \rho' / \rho_{max})]$$

- o Em Pilares extremos de acordo com a expressão:

$$dbL / hc \leq [7,5 \cdot f_{ctm} / (\gamma_{Rd} \cdot f_{yd})] \cdot (1 + 0,8 \cdot v_d)$$

Por outro lado, tanto as armaduras superiores como as inferiores, da viga que passam pelas uniões com o pilar, devem terminar o mais longe possível da região crítica da viga.

Finalmente, além do referido anteriormente, no caso de DCH, a amarração das vigas nos pilares mede-se desde $5 \cdot dbL$ da face do suporte até ao seu interior.



Armaduras de elementos de Fundação (Art. 5.8)

Entre as especificações citadas pelo eurocódigo sísmico, cabe destacar as que se apresentam de seguida para o caso de Vigas de Fundação e Estacas. Como sucedia no caso anterior, estes requisitos são independentes da ductilidade da estrutura. Da mesma forma que nos casos tratados previamente o programa avisará quando não se cumprirem as dimensões especificadas no eurocódigo e definirá, de forma totalmente automática, as armaduras impostas pelo mesmo.

- **Vigas de Travamento (Art. 5.8.2).**- As vigas de travamento deverão ter uma secção mínima de 25cm x 40cm, bem como uma quantia superior e inferior mínima:
 $\rho_{b,min} = 0,4\%$
- **Maciços e Estacas (Art. 5.8.4).**- Num comprimento de dois diâmetros por abaixo do maciço colocar-se-á, nas estacas uma armadura transversal e de confinamento como a das regiões críticas de pilares em DCM.

Paredes de Alvenaria (Art. 9)

No caso de Paredes de Alvenaria, também de forma independente da ductilidade, definem-se prescrições que serão de cumprimento obrigatório em todos os casos. As exigências mais desfavoráveis relativamente a dimensões são, como é lógico, para o caso de alvenarias não armadas. Esta situação está patente nos seguintes pontos.

- **Materiais (Art. 9.2).**- Impõe-se uma resistência mínima que deve de ser garantida pelas unidades de alvenaria para qualquer tipo de parede de alvenaria.
 $f_{bh,min} \geq 2 \text{ MPa}$
- **Dimensões para Alvenaria não Armada (Arts. 9.5.1 e 9.5.2).**- Segundo a tabela que se apresenta de seguida, limitam-se as espessuras e esbeltas por forma a que não possam ser menores que o valor

mínimo no caso das espessuras e que o valor máximo no caso da esbelteza.

$$t_{ef} \geq t_{ef,min}$$

$$(h_{ef} / t_{ef}) \leq (h_{ef} / t_{ef})_{max}$$

Quadro 9.2 – Requisitos geométricos recomendados para as paredes de contraventamento

Tipo de alvenaria	$t_{ef,min}$ (mm)	$(h_{ef}/t_{ef})_{max}$	$(l/h)_{min}$
Alvenaria simples, com unidades de pedra natural	350	9	0,5
Alvenaria simples, com qualquer outro tipo de unidades	240	12	0,4
Alvenaria simples, com qualquer outro tipo de unidades, nos casos de baixa sismicidade	170	15	0,35
Alvenaria confinada	240	15	0,3
Alvenaria armada	240	15	Sem restrição

Os símbolos utilizados têm o seguinte significado:
 t_{ef} espessura efectiva da parede (ver a EN 1996-1-1:2005);
 h_{ef} altura efectiva da parede (ver a EN 1996-1-1:2005);
 h maior altura livre das aberturas adjacentes à parede;
 l comprimento da parede.

Deve ainda existir um tirante de aço ou uma cinta de betão armado para atar a parede em cada um dos seus pisos não podendo existir uma altura maior que 4m entre uma viga e a seguinte. Portanto, se a altura dos pisos é maior que 4m, deverão colocar-se cintas intermédias. No caso do elemento de cintagem ser de betão armado a Quantia Geométrica Mínima será de 200mm².

$$A_{sL} \geq 200 \text{ mm}^2 (4\phi 8)$$

Conclusões

Como resumo de tudo o anteriormente exposto pode-se dizer que as exigências eurocódigo 8 são altas e muito variadas. A diferença, portanto, entre o cálculo de uma estrutura com sismo e sem sismo nas zonas de aplicação do eurocódigo 8 é grande e implica numerosas modificações de índole tanto geométrica como construtiva na estrutura.

Tricalc, não só permite o cálculo sísmico de acordo com os métodos propostos no Eurocódigo EN 1998, como ainda considera todos os aspectos citados no presente artigo que são exigidos pelo EC8.

A inclusão no programa do Eurocódigo Sísmico abre um grande leque de possibilidades no cálculo de estruturas para praticamente qualquer lugar do mundo uma vez que, os eurocódigos, além da sua utilização lógica na Europa, possuem uma elevada aceitação em grande número de países e goza de uma fiabilidade muito importante em praticamente qualquer localização.