

# 8\_11

## A REGULAMENTAÇÃO DE CÁLCULO ESTRUTURAL NOVIDADES INTRODUZIDAS NO EUROCÓDIGO 2 — PARTE 1.1, RELEVANTES PARA O PROJETO DE ESTRUTURAS DE EDIFÍCIOS DE BETÃO

Neste artigo vão ser abordados três temas de relevância para o projeto de estruturas de betão, particularmente de edifícios, com o objetivo de salientar a introdução de metodologias de análise e de dimensionamento que diferenciam a “NP EN 1992-1-1:2010 – Eurocódigo 2 – Projeto de estruturas de betão – Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios” (EC2) relativamente ao REBAP. Estes temas, relacionados com (i) os estados limites de utilização (SLS), (ii) a abordagem dos efeitos de 2ª ordem e (iii) o dimensionamento ao esforço transversal, naturalmente correspondem apenas a uma parte limitada do conjunto de novidades que o EC2 introduz relativamente ao REBAP.

É de salientar que, para além da natural evolução científica que ocorreu nas metodologias de análise e de dimensionamento estrutural desde a entrada em vigor do REBAP, um importantíssimo avanço tecnológico ocorreu igualmente ao nível do betão e da armadura, que apresentam hoje resistências características muito superiores às dos anos 80 do século XX. O aumento da resistência do betão permite a conceção de elementos estruturais cada vez mais esbeltos, logo propensos a maiores flechas e a efeitos de 2ª ordem mais severos. Por sua vez, a armadura ordinária é hoje correntemente utilizada com resistências características da ordem de 500MPa (mais do dobro dos 240MPa do aço A24, tão usual há 40 anos atrás), possibilitando assim a utilização de menores áreas de aço nos estados limites últimos (ULS). Mas esta redução das áreas de aço nos ULS induz a que em serviço os correspondentes varões estão agora submetidos a tensões elásticas muito superiores às que se observavam quando o REBAP entrou em vigor, o que induz o aumento da abertura de fendas no betão, acentuando a necessidade de dedicar uma especial atenção à problemática da durabilidade.

Rui Faria  
Prof. Catedrático, FEUP

### NOVIDADES NOS ESTADOS LIMITES DE UTILIZAÇÃO

Como referido no parágrafo anterior, a importância da limitação em serviço das tensões de tração no aço, do controlo da abertura de fendas e da limitação das flechas, tem-se vindo a acentuar. A sociedade é hoje menos

tolerante relativamente a avarias estruturais decorrentes de deficiências nos SLS, pois além de interferirem com a funcionalidade e a estética das construções, a respetiva reparação é habitualmente difícil e dispendiosa – ver Fig. 1. Os requisitos de verificação de conformidade face a estes SLS estavam já consagrados no REBAP, mas a deteção de avarias em muitas

estruturas - algumas delas observáveis pouco tempo após a construção, relacionadas com fendilhação excessiva, e outras após vários anos de funcionamento, associadas a grandes flechas, especialmente em lajes –, conduziu a que no EC2 se registasse um significativo aumento das disposições relativas à categorização da agressividade ambiental, ao controlo da





> 1

durabilidade e aos procedimentos de cálculo da fendilhação e da deformação de peças fletidas. Desde logo, no EC2 a categorização da agressividade ambiental é feita no Capítulo 4 com base num conjunto de 18 classes/sub-classes (número muito superior às 3 classes de ambientes pouco, moderadamente ou muito agressivos do REBAP), o que permite um melhor enquadramento da estrutura em estudo no ambiente em que se destinará a funcionar. Relativamente ao cálculo explícito da abertura de fendas  $w_k$ , a metodologia base do REBAP é similar à do EC2. Mas atendendo a que  $w_k$  depende da tensão do aço  $\sigma_s$ , do diâmetro dos varões  $\phi$  e da área efetiva de betão que envolve as armaduras, no EC2 são fornecidos dois quadros, um relacionando  $\sigma_s$  com  $\phi$  (Quadro 7.2N – ver Fig. 2), e o outro  $\sigma_s$  com o intervalo entre os varões (Quadro 7.3N), por forma a garantir o cumprimento de 3 valores de  $w_k$  com interesse prático: 0,2mm, 0,3mm e 0,4mm. Estes quadros, elaborados a partir de valores base do recobrimento nominal das armaduras, da classe de resistência do betão, das propriedades de aderência dos varões e da distribuição das extensões na secção, podem ser corrigidos para melhor ajuste ao caso em estudo, e permitem uma verificação expedita (e tendencialmente conservativa) do estado limite de fendilhação em estruturas correntes.

Uma importante inovação que o EC2 introduz, relativamente ao REBAP, relaciona-se com a especial atenção que é dedicada ao dimensionamento de armaduras mínimas para controlo

| Tensão no aço<br>[MPa] | Diâmetros máximos dos varões [mm] |                        |                        |
|------------------------|-----------------------------------|------------------------|------------------------|
|                        | $w_k = 0,4 \text{ mm}$            | $w_k = 0,3 \text{ mm}$ | $w_k = 0,2 \text{ mm}$ |
| 160                    | 40                                | 32                     | 25                     |
| 200                    | 32                                | 25                     | 16                     |
| 240                    | 20                                | 16                     | 12                     |
| 280                    | 16                                | 12                     | 8                      |
| 320                    | 12                                | 10                     | 6                      |
| 360                    | 10                                | 8                      | 5                      |
| 400                    | 8                                 | 6                      | 4                      |
| 450                    | 6                                 | 5                      | -                      |

> 2

da fendilhação devida à restrição, por elementos construídos em fase prévia, das deformações volumétricas dos elementos estruturais em estudo. Exemplos destas situações ocorrem em muros, que têm as deformações longitudinais (paralelas ao desenvolvimento do muro) impedidas pelas sapatas de fundação construídas em fase anterior. Mesmo não existindo ações diretas (forças) a solicitar o muro naquela direção, o impedimento à livre contração longitudinal do muro induzida pelo abaixamento de temperatura que nas primeiras idades acompanha a perda do calor de hidratação, ao arrefecimento do betão do dia para a noite (ciclo diário) ou do verão para o inverno (ciclo anual), e ainda à retração, gera trações longitudinais no betão do muro, que induzem fendilhação (vertical e oblíqua) que não pode ser negligenciada. Nestas situações o EC2 preconiza a adoção de uma armadura mínima,  $A_{s,min}$ , calculada com base na expressão:

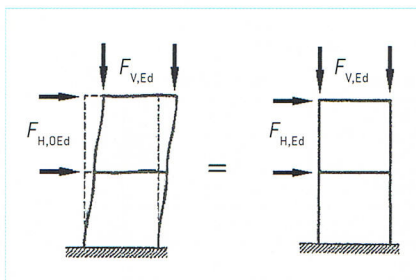
$$A_{s,min} = k_c k [f_{ct,eff} A_{ct}] / \sigma_s \quad (1)$$

em que  $f_{ct,eff}$  designa o valor médio da resistência do betão à tração à data em que se prevê a formação das primeiras fendas (numa primeira aproximação poder-se-á tomar  $f_{ct,eff} = f_{ctm}$ ),  $A_{ct}$  representa a área de betão em tração antes da formação da primeira fenda,  $k_c$  é um coeficiente que tem em conta a distribuição de tensões na secção imediatamente antes da fendilhação (no caso do muro, como na direção longitudinal ocorre uma situação de tração, será  $k_c = 1.0$ ) e  $k$  é um coeficiente que considera o efeito

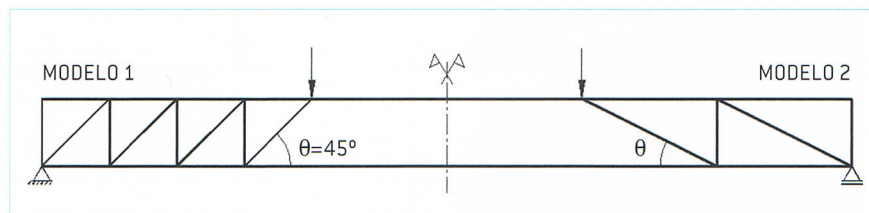
das tensões não uniformes autoequilibradas, de que resulta uma redução dos esforços de coação (se a espessura do muro for inferior a 0.30m considerar-se-á  $k = 1.0$ ). É fácil de reconhecer que na Eq. (1) a expressão entre parêntesis retos define o esforço axial de tração necessário para fissurar o muro,  $N_{cr}$ , pelo que se  $k_c k = 1.0$ ,  $A_{s,min}$  não é mais do que a armadura necessária para equilibrar o esforço  $N_{cr}$  logo após a formação da fenda induzida pela restrição, considerando no dimensionamento dessa armadura uma tensão  $\sigma_s$ . Se  $\sigma_s = f_{yk}$  o valor de  $A_{s,min}$  corresponderá ao valor da armadura que permitirá a formação de uma fendilhação estabilizada no muro (essencialmente de orientação vertical), mas a abertura de fendas  $w_k$  não se poderá considerar controlada. Para que  $w_k$  satisfaça um valor máximo preestabelecido, a Eq. (1) deverá ser utilizada considerando um valor de  $\sigma_s$  inferior a  $f_{yk}$ , usando para o efeito as indicações do Quadro 7.2N da Fig. (2), consoante o diâmetro  $\phi$  que se pretender adotar na armadura a dispor longitudinalmente no muro. Destaca-se que o Quadro 7.2N necessita de ser utilizado com uma correção (que o EC2 especifica sob a forma de uma expressão que modifica o diâmetro da armadura), uma vez que está elaborado para situações de flexão, conquanto a fendilhação vertical do muro restringido longitudinalmente decorre de uma ação indireta de tração.

Por fim, assinala-se que a atual tendência para reduzir a utilização de juntas de dilatação na construção de edifícios também suscita nas lajes de betão, em condições de serviço, ações





&gt; 3



&gt; 4

indiretas de tração, decorrentes de os pavimentos serem betonados em fase posterior a muros de cave e a sistemas de contraventamento de elevada rigidez. Nestas condições, a ligação monolítica das lajes aos elementos restritores verticais betonados em fase prévia induz, paralelamente ao folheto médio da laje, o desenvolvimento de importantes esforços axiais de tração. Combinados com a flexão induzida pelas cargas verticais aplicadas em serviço no pavimento, estas trações de membrana geram na laje aberturas de fendas muito superiores às que ocorreriam numa situação de flexão simples.

#### NOVIDADES NA ABORDAGEM DOS EFEITOS DE 2ª ORDEM

Na verificação da segurança estrutural em que os efeitos de 2ª ordem devidos aos esforços axiais de compressão são relevantes, o EC2 é mais completo do que o REBAP. O EC2 menciona 3 métodos para análise dos efeitos de 2ª ordem na presença de esforço normal: (I) o Método Geral (MG), baseado numa análise não-linear material e geométrica, (II) o Método baseado numa Curvatura Nominal (MCN) e (III) o Método baseado numa Rigidez Nominal (MRN).

O método MG, também mencionado no REBAP, é naturalmente o de maior rigor, embora de aplicabilidade extremamente difícil em situações de projeto corrente. Envolve uma análise materialmente não-linear, bem como uma análise não-linear geométrica para determinação dos esforços na posição deformada final da estrutura, tendo ainda em conta a fluência do betão. Pela sua complexidade trata-se de um tipo de análise justificável apenas em situações muito

particulares, por exemplo envolvendo estruturas especiais, pois requer metodologias computacionais e conhecimentos de análise não-linear não acessíveis à generalidade dos projetistas.

Para uma utilização mais viável no projeto de edifícios correntes, os métodos MCN e MRN são as opções mais óbvias. O MCN adequa-se ao estudo de elementos isolados – *in stricto sensu* –, ou que podem ser considerados como isolados na estrutura para efeitos de determinação dos efeitos de 2ª ordem (por exemplo, em estruturas contraventadas). O MCN baseia-se na definição de uma curvatura na secção crítica, assumindo uma deformada de 2ª ordem sinusoidal, dando origem a um momento fletor de 2ª ordem,  $M_2$ , que deve ser adicionado ao momento de 1ª ordem na referida secção crítica.  $M_2$  é proporcional ao quadrado do comprimento efetivo (ou de encurvadura) do pilar, pelo que o MCN tem notórias semelhanças com o método de uso mais corrente proposto no REBAP.

A análise de situações em que os efeitos de 2ª ordem envolvem a instabilidade global do edifício não pode, em geral, ser efetuada com base no MCN (nem no método simplificado do REBAP). O MRN preconizado no EC2 cobre esta lacuna do REBAP, sem necessidade de recorrer ao MG. No MRN a rigidez  $EI$  (denominada de 'nominal') dos elementos comprimidos esbeltos é determinada com base na expressão

$$EI = K_c E_{cd} I_c + K_s E_s I_s \quad [2]$$

em que  $I_c$  e  $I_s$  correspondem às inércias das secções de betão e das armaduras relativamente ao centro da área de betão,  $E_{cd} = E_{cm}/1,2$ ,  $E_s$  é

o módulo de elasticidade do aço, o coeficiente  $K_c$  tem em conta os efeitos da fendilhação e da fluência do betão e  $K_s$  é um coeficiente que tem em conta a contribuição das armaduras. De notar que neste método é necessário conhecer antecipadamente a solução de armaduras (número de varões e respetiva disposição na secção), pelo que (e à semelhança do que também sucede com o método MG), a aplicação do MRN requer a adoção de um processo iterativo (primeiro propõe-se uma solução de armaduras, e no final confirma-se essa solução, ou altera-se, sendo neste último caso necessário reiniciar o processo, redefinindo uma nova rigidez  $EI$  a partir da Eq. (2)).

Para o caso das vigas o EC2 já não indica explicitamente a rigidez a considerar na análise. Sugere-se, como simplificação, a consideração de uma rigidez totalmente fendilhada, o que uma vez mais requer o conhecimento prévio das armaduras a dispor nas vigas.

De assinalar que a utilização do MRN envolve uma simples análise linear elástica 'modificada', isto é, pode ser conduzida com métodos clássicos de análise, substituindo, no entanto, a clássica rigidez elástica inicial dos elementos pelas correspondentes 'rigidezes nominais'. A determinação dos efeitos globais de 2ª ordem pode ser efetuada analisando a estrutura para forças horizontais fictícias majoradas,  $F_{H,Ed}$ , conforme esquematizado na Fig. 3. Estas forças são determinadas a partir da amplificação das forças horizontais de 1ª ordem,  $F_{H,0Ed}$ , que no estado limite último atuam na estrutura (devidas ao vento, às imperfeições geométricas, etc.) em simultâneo com as forças verticais totais  $F_{V,Ed}$  (isto é, correspondentes à carga vertical transmitida pelos elementos



contraventados e de contraventamento). A referida amplificação é obtida a partir da Eq. (3):

$$F_{H,Ed} = \frac{F_{H,0Ed}}{1 - F_{V,Ed} / F_{V,B}} \quad (3)$$

em que  $F_{V,B}$  é a carga global 'nominal' de encurvadura, determinada considerando os pilares e as vigas com as correspondentes 'rigidezes nominais'.  $F_{V,B}$  é atualmente facilmente obtida, dado que é fornecida pela generalidade dos programas comerciais de análise de estruturas.

Finalmente, é de referir que embora a Eq. (3) esquematize um edifício porticado, a metodologia de amplificação das forças horizontais de 1ª ordem para ter em linha de conta os efeitos de 2ª ordem é igualmente aplicável a estruturas dotadas de elementos de contraventamento de elevada rigidez, como é o caso de paredes estruturais, bem como caixas de escadas e de elevador formando núcleos verticais de betão armado. As paredes estruturais, com e sem aberturas, são inclusivamente objeto de tratamento detalhado no Anexo H do EC2, o que representa também uma novidade relativamente ao REBAP.

#### NOVIDADES NO DIMENSIONAMENTO AO ESFORÇO TRANSVERSO

Na temática do dimensionamento ao  $V_{Ed}$ , o EC2 introduz uma grande inovação relativamente ao que está consagrado no REBAP, permitindo que a clássica treliça de Mörsch, com as diagonais comprimidas de betão idealizadas com inclinações  $\theta=45^\circ$  – ver Modelo 1 da Fig. 4 –, seja modificada, consentindo ângulos  $\theta$  que podem reduzir-se de  $45^\circ$  até cerca de  $22^\circ$  – ver Modelo 2 da Fig. 4. Sempre que seja possível adotar  $\theta < 45^\circ$  as armaduras de esforço transversal calculadas com o Modelo 2 do EC2 reduzem-se significativamente, em proporção inversa à  $\cotg\theta$  que for selecionada. Podem assim conseguir-se reduções destas armaduras para até cerca de 50% das que seriam necessárias com o Modelo 1 do REBAP. De assinalar, porém, que esta redução das armaduras transversais implica um concomitante aumento do escalonamento das armaduras longitudinais, uma vez que tem de ser acompanhada de um agravamento da translação que é necessário aplicar ao diagrama de  $M_{Ed}$ , e que é proporcional a  $\cotg\theta$ . ■

**glasstec**

INTERNATIONAL TRADE FAIR FOR GLASS  
PRODUCTION • PROCESSING • PRODUCTS

**15 - 18 JUNE 2021**  
DÜSSELDORF | GERMANY

## CRIA UMA SENSAÇÃO DE BEM-ESTAR

Arquitetura pioneira feita de luz e vidro. Conceitos de construção únicos, translúcidos e otimizados em termos de energia. Luz natural do dia e luz solar para o nosso bem-estar. Conservar recursos enquanto se poupa e se gera energia como solução para uma urbanização crescente. Vidro: o transparente material de alta tecnologia com valor sustentável a longo prazo. Todas as importantes inovações e evoluções estarão na glasstec, a feira profissional líder a nível mundial.

[glasstec-online.com/architecture](https://glasstec-online.com/architecture)

Informações: Walter & Cia., Lda.  
Largo de Andaluz, 15, 3º Esq. - 2  
1050-004 Lisboa  
Tel. +351-213 556 254 ... Fax +351-213 539 311  
geral@walter.pt  
[www.walter.pt](http://www.walter.pt)

**Messe  
Düsseldorf**