

Estudo comparativo do dimensionamento de betão de acordo com Eurocódigo 2 e a ABNT NBR6118:2014



**Rui Vaz
Rodrigues¹**



Daniela Gutstein²

Resumo

A Norma Brasileira ABNT NBR 6118:2014 Projecto de estruturas de concreto – Procedimento, define os princípios básicos aplicáveis ao dimensionamento das estruturas de betão armado. Apesar de os princípios gerais de dimensionamento e formato desta norma serem semelhantes aos indicados na norma NP EN 1992-1-1 (2010) Eurocódigo 2 - Projecto de Estruturas de Betão, verificam-se algumas diferenças ao nível dos coeficientes utilizados e mais concretamente ao nível das expressões utilizadas, por exemplo para a formulação do esforço transversal, incluindo o estado Limite Último de Esforço Transversal em Lajes e o Estado Limite Último de Punção. Por forma a enquadrar os diferentes tópicos abordados nesta norma de betão estrutural, apresenta-se neste artigo uma comparação entre as principais regras de dimensionamento estrutural dos elementos em betão armado, contribuindo para um melhor entendimento dos fundamentos associados às formulações propostas. A ilustração dos princípios de aplicação é exemplificada por casos de projecto, contribuindo para a consolidação do estudo comparativo. Para efeitos de dimensionamento das secções, são analisadas as propriedades mecânicas dos betões previstas nas classes de resistência da NBR8953 e as propriedades dos aços de armadura passiva de acordo com a NBR7480, em comparação com as preconizadas pelo Eurocódigo 2. Regista-se ainda o tratamento diferenciado em matéria das classes de agressividade ambiental e os requisitos respectivos associados ao betão e recobrimento das armaduras. Relativamente ao comportamento em serviço, é apresentada a comparação relativa ao Estado Limite de Fissuração, incluindo abordagem das diferenças no cálculo do valor característico da abertura de fenda e consequências para o dimensionamento.

Palavras-chave: Norma Brasileira NBR6118, Eurocódigo 2, Dimensionamento, Estudo comparativo, Betão Armado, Normalização.

¹ Universidade de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Departamento de Engenharia Civil, Arquitetura e Georrecursos, Lisboa Portugal; e-mail: rui.vaz.rodrigues@tecnico.ulisboa.pt

² Membro da Comissão de Estudos de revisão da ABNT NBR6118 e doutora pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina – Brasil; e-mail: danigutstein@gmail.com.

1. INTRODUÇÃO

Para efeitos de dimensionamento de estruturas em betão e /ou verificação de projecto, é habitual a utilização das normas ABNT NBR 6118:2014 e do Eurocódigo 2, NP EN 1992-1-1 (2010). Tendo em vista o aprofundamento do conhecimento destes documentos normativos, bem como de suas diferenças, interessa o desenvolvimento dos estudos comparativos respeitantes aos principais aspectos das estruturas de betão armado que se apresentam a seguir.

2. PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

Indicam-se na Fig. 1a) a comparação dos diagramas de tensões-extensões, para o betão comprimido. Os diagramas apresentam o mesmo formato parábola-rectângulo e se diferenciam pelo factor multiplicativo $\alpha = 0,85$, que é considerado pela ABNT NBR6118 e cuja consideração não é obrigatória pelo EC2 em Portugal. No EC2 o valor de α pode ser considerado entre 0,80 e 1,00, sendo o valor recomendado igual a 1,00.

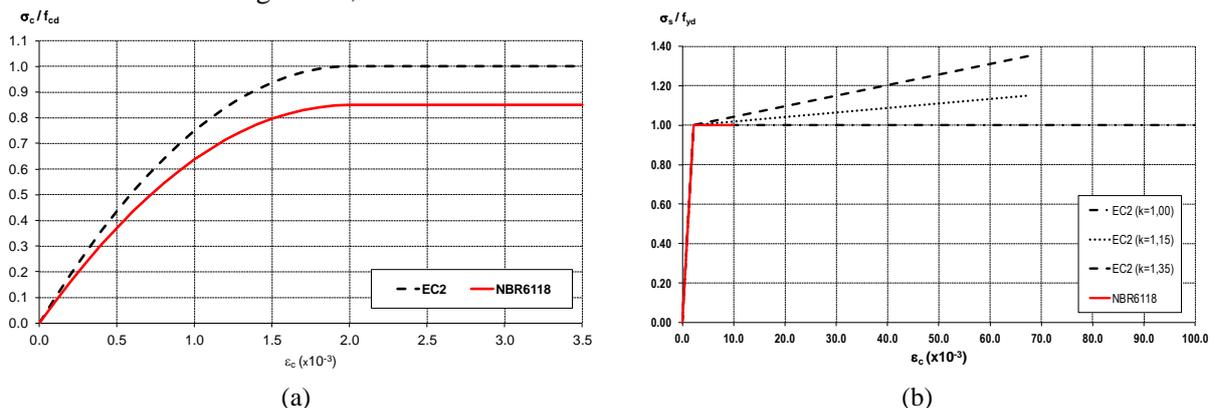


Figura 1. Comparação dos diagramas de tensões-extensões: (a) Para o betão comprimido, do tipo parábola-rectangulo e (b) Para as armaduras traccionadas ou comprimidas.

No respeitante ao comportamento das armaduras para betão armado (Fig. 1b), o Eurocódigo permite utilizar um diagrama bilinear, com consideração do acréscimo de tensão após a cedência das armaduras ($k=f_{tk}/f_{yk}$), por intermédio de um patamar inclinado limitado pela extensão na carga máxima $\epsilon_{uid} = 0,9 \epsilon_{uk}$. A título indicativo o valor característico da extensão máxima para armaduras da classe de ductilidade B, é de $\epsilon_{uk} = 5\%$, e o acréscimo de tensão para a mesma classe de ductilidade é de $k=1,08$. A norma brasileira considera para efeitos de modelação um patamar horizontal após a cedência das armaduras e uma extensão máxima das armaduras limitada a 10‰.

3. DURABILIDADE DE ESTRUTURAS EM BETÃO

A questão da durabilidade das estruturas em betão é abordada na ABNT NBR 6118, pela identificação dos mecanismos de deterioração do betão, quer os resultantes das condições ambientais, quer os resultantes de reacções internas ou de outras acções em geral. Para projectos de estruturas correntes, procede-se à classificação da agressividade ambiental em função das condições de exposição da estrutura ou de suas partes, conforme se indica no Quadro 1.

Quadro 1. Classes de agressividade ambiental (CAA) de acordo com a ABNT NBR6118:2014 [1]

| Classe de agressividade ambiental | Agressividade | Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto | Risco de deterioração da estrutura |
|-----------------------------------|---------------|--|------------------------------------|
| I | Fraca | Rural Submersa | Insignificante |
| II | Moderada | Urbana ^{a,b} | Pequeno |
| III | Forte | Marinha ^a | Grande |

| | | Industrial ^{a,b} | |
|--|-------------|--|---------|
| IV | Muito forte | Industrial ^{a,c} Respingos de maré | Elevado |
| ^a Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) para ambiente internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura). | | | |
| ^b Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade média relativa do ar menor ou igual a 65%, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos ou regiões onde raramente chove. | | | |
| ^c Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas. | | | |

Por sua vez o Eurocódigo 2 define classes de exposição específicas em função do tipo de degradação estrutural resultante de acções ambientais em seis grupos, três dos quais associados à corrosão das armaduras por acção do dióxido de carbono e dos cloretos provenientes da água do mar ou de outras origens (XC, XS, XD), dois grupos associados à deterioração do betão pelo gelo/degelo (XF) ou por ataque químico (XA), e ainda o caso onde não existe risco de corrosão das armaduras ou de ataque químico ao betão (X0). Indicam-se respectivamente no Quadro 2 e no Quadro 3 as classes de exposição relativas à corrosão induzida por carbonatação, e corrosão induzida por cloretos da água do mar. No respeitante ao ataque químico do betão (XA), a caracterização na natureza agressiva das águas ou dos solos em contacto com o betão, deverá ser efectuada mediante a análise das características químicas (SO_4^{2-} , pH, CO_2 agressivo, NH_4^+ , Mg^{2+}), conforme indicações do Quadro 2 da NP EN 206-1.

Quadro 2. Classes de exposição relativas à corrosão induzida por carbonatação, de acordo com a NP EN 206-1 [2].

| Classe | Descrição do ambiente | Exemplos informativos |
|--------|--------------------------------|--|
| XC1 | Seco ou permanentemente húmido | Betão armado no interior de edifícios ou estruturas, com excepção das áreas com humidade elevada. Betão armado permanentemente submerso em água não agressiva. |
| XC2 | Húmido, raramente seco | Betão armado enterrado em solo não agressivo. Betão armado sujeito a longos períodos de contacto com água não agressiva. |
| XC3 | Moderadamente húmido | Superfícies exteriores de betão armado protegidas da chuva transportada pelo vento. Betão armado no interior de estruturas com moderada ou elevada humidade do ar (v.g., cozinhas, casas de banho). |
| XC4 | Ciclicamente húmido e seco | Betão armado exposto a ciclos de molhagem/secagem. Superfícies exteriores de betão armado expostas à chuva ou fora do âmbito da XC2 |

Quadro 3. Classes de exposição relativas à corrosão induzida por cloretos da água do mar, de acordo com a NP EN 206-1 [2].

| Classe | Descrição do ambiente | Exemplos informativos |
|--------|---|--|
| XS1 | Ar transportando sais marinhos mas sem contacto directo com água do mar | Betão armado em ambiente marítimo saturado de sais. Betão armado em áreas costeiras perto do mar, directamente exposto e a menos de 200 m do mar; esta distância pode ser aumentada até 1 km nas costas planas e foz de rios. |
| XS2 | Submersão permanente | Betão armado permanentemente submerso. |

| | | |
|-----|--|--|
| XS3 | Zona de marés, de rebentação e de salpicos | <p>Betão armado sujeito às marés ou aos salpicos, desde 10 m acima do nível superior das marés (5 m na costa Sul de Portugal Continental) até 1 m abaixo do nível inferior das marés.</p> <p>Betão armado em que uma das superfícies está imersa em água do mar e a outra exposta ao ar (v.g., túneis submersos ou abertos em rocha ou solos permeáveis no mar ou em estuário de rios). Esta exposição exigirá muito provavelmente medidas de protecção suplementares.</p> |
|-----|--|--|

A NBR6118 faz corresponder à classe de agressividade ambiental, requisitos mínimos para a resistência e composição do betão (Quadro 4) e recobrimentos nominais mínimos a adoptar em situações de projecto (Quadro 5).

Quadro 4. Correspondencia entre classe de agressividade e qualidade do betão, extraído da ABNT NBR6118:2014 [1].

| Betão | Tipo | Classe de agressividade | | | |
|---------------------------------|------|-------------------------|--------|--------|--------|
| | | I | II | III | IV |
| Relação água / cimento em massa | CA | ≤ 0,65 | ≤ 0,60 | ≤ 0,55 | ≤ 0,45 |
| | CP | ≤ 0,60 | ≤ 0,55 | ≤ 0,50 | ≤ 0,45 |
| Classe de betão | CA | ≥ C20 | ≥ C25 | ≥ C30 | ≥ C40 |
| | CP | ≥ C25 | ≥ C30 | ≥ C35 | ≥ C40 |

NOTAS

1 O betão empregado na execução das estruturas deve cumprir com os requisitos estabelecidos na ABNT NBR 12655.

2 CA corresponde a componentes e elementos estruturais de betão armado

3 CP corresponde a componentes e elementos estruturais de betão pré-esforçado

Quadro 5. Correspondencia entre a classe de agressividade ambiental e o recobrimento nominal para $\Delta c = 10$ mm, extraído da ABNT NBR6118:2014 [1].

| Tipo de estrutura | Componente ou elemento | Classe de agressividade ambiental | | | |
|----------------------------------|---|-----------------------------------|----|-----|-----------------|
| | | I | II | III | IV ^c |
| | | Recobrimento nominal [mm] | | | |
| Betão Armado | Laje ^b | 20 | 25 | 35 | 45 |
| | Viga / pilar | 25 | 30 | 40 | 50 |
| | Elementos estruturais em contacto com o solo ^d | 30 | | 40 | 50 |
| Betão pré-esforçado ^a | Laje | 25 | 30 | 40 | 50 |
| | Viga / pilar | 30 | 35 | 45 | 55 |

^a Recobrimento nominal da bainha ou dos fios, cabos e cordões. O recobrimento da armadura passiva deve respeitar os recobrimentos para betão armado.

^b Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassas de revestimento e acabamento, como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros, as exigências desta Tabela podem ser substituídas pelas de 7.4.7.5, respeitando um recobrimento nominal ≥ 15 mm.

^c Nas superfícies expostas a ambientes agressivos, como reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutas de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, devem ser respeitados os recobrimentos da classe de agressividade IV.

^d No troço de pilares em contato com o solo junto com elementos de fundação, a armadura deve ter cobertura nominal ≥ 45 mm.

Em complementação ao exposto na nota ^b do Quadro 5, os recobrimentos devem sempre respeitar também os valores mínimos relacionados com o diâmetro do varão, ou ao diâmetro equivalente, no caso de agrupamentos, ou ainda, ao diâmetro de bainhas, o que apresenta pouca diferenciação em relação ao EC2.

No respeitante aos requisitos mínimos para a composição do betão e recobrimentos, o Anexo Nacional do EC2 remete para a Especificação do LNEC E464 [3]. Neste âmbito, considerando os valores de

vida útil de projecto de 50 e 100 anos, e ainda em função do tipo de degradação estrutural, faz corresponder à classe de agressividade ambiental, requisitos mínimos para a resistência e composição do betão e também valores mínimos para os recobrimentos nominais a adoptar em situações de projecto (Quadros 6, 7 e 8).

Quadro 6. Limites da composição e da classe de resistência do betão sob a acção do dióxido de carbono, para uma vida útil de 50 anos ou 100 anos (para 100 anos indicam-se os valores a negrito, quando distintos), de acordo com Especificação do LNEC E464 [3].

| Tipo de cimento | CEM I (Referência); CEM II/A (1) | | | | CEM II/B(1); CEMIII/A(2); CEMIV(2); CEMV/A(2) | | | |
|--|----------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|---|-------------------|-------------------|-------------------|
| | XC1 | XC2 | XC3 | XC4 | XC1 | XC2 | XC3 | XC4 |
| Classe de exposição | XC1 | XC2 | XC3 | XC4 | XC1 | XC2 | XC3 | XC4 |
| Mínimo recobrimento nominal (mm) | 25 (35) | 35 (45) | 35 (45) | 40 (50) | 25 (35) | 35 (45) | 35 (45) | 40 (50) |
| Máxima razão água / cimento | 0,65 | 0,65 | 0,60 | 0,60 | 0,65 | 0,65 | 0,55 | 0,55 |
| Mínima dosagem de cimento C (kg/m ³) | 240 | 240 | 280 | 280 | 260 | 260 | 300 | 300 |
| Mínima classe de resistência | C25/30 | C25/30 | C30/37 | C30/37 | C25/30 | C25/30 | C30/37 | C30/37 |

(1) Não aplicável aos cimentos II/A e II/A-W e aos cimentos II/B-T e II/B-W, respectivamente.

(2) Não aplicável aos cimentos com percentagem inferior a 50% a clínquer portland, em massa.

Quadro 7. Limites da composição e da classe de resistência do betão sob a acção dos cloretos, para uma vida útil de 50 anos ou 100 anos (para 100 anos indicam-se os valores a negrito, quando distintos), de acordo com Especificação do LNEC E464 [3].

| Tipo de cimento | CEMIV/A (Referência); CEMIV/B; CEMIII/A; CEMIII/B; CEM V; CEMII/B(1); CEMII/A-D | | | CEMI; CEMII/A(1) | | |
|--|---|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | XS1/XD1 | XS1/XD1 | XS1/XD1 | XC1 | XC2 | XC3 |
| Classe de exposição | XS1/XD1 | XS1/XD1 | XS1/XD1 | XC1 | XC2 | XC3 |
| Mínimo recobrimento nominal (mm) | 45 (55) | 50 (65) | 55 (65) | 45 (55) | 50 (60) | 55 (65) |
| Máxima razão água / cimento | 0,55 | 0,55 | 0,45 | 0,45 | 0,45 | 0,40 |
| Mínima dosagem de cimento C (kg/m ³) | 320 | 320 | 340 | 360 | 360 | 380 |
| Mínima classe de resistência | C30/37 | C30/37 | C35/45 | C40/50 | C40/50 | C50/60 |

(1) Não aplicável aos cimentos II-T, II-W, II/B-L e II/B-LL.

Quadro 8. Limites da composição e da classe de resistência à compressão do betão sob ataque químico, para uma vida útil de 50 anos ou 100 anos (para 100 anos indicam-se os valores a negrito), de acordo com Especificação do LNEC E464 [3].

| Tipo de cimento | CEMIV/A (Referência); CEMIV/B; CEMIII/A; CEMIII/B; CEM V; CEMII/B(1); CEMII/A-D | | | CEMI; CEMII/A(1) | | |
|--|---|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| | XA1 | XA2(2) | XA3(2) | XA1 | XA2(2) | XA3(2) |
| Classe de exposição | XA1 | XA2(2) | XA3(2) | XA1 | XA2(2) | XA3(2) |
| Máxima razão água / cimento | 0,55 (0,50) | 0,50 (0,45) | 0,45 (0,40) | 0,50 (0,45) | 0,45 (0,40) | 0,45 (0,40) |
| Mínima dosagem de cimento C (kg/m ³) | 320 (340) | 340 (360) | 360 (380) | 340 (360) | 360 (360) | 380 (400) |
| Mínima classe de resistência | C30/37 (C40/50) | C35/45 (C45/55) | C35/45 (C45/55) | C35/45 (C45/55) | C40/50 (C50/60) | C40/50 (C50/60) |

(1) Não aplicável aos cimentos II-T, II-W, II/B-L e II/B-LL.

(2) Quando a agressividade resultar da presença de sulfatos, os cimentos devem satisfazer os requisitos mencionados na secção 5.3, nomeadamente no Quadro 10, aplicando-se ao betão as exigências estabelecidas neste quadro para o CEMIV

Para as estruturas de betão pré-moldado, Doniak e Gutstein [9] referenciam a normalização brasileira específica onde os cobrimentos das armaduras podem ser reduzidos levando-se em conta o maior controle dimensional dos elementos, entre outros. Adopta-se a mesma classificação de classes de agressividade ambiental, variando-se as tolerâncias de execução (Δc) utilizada para o cálculo dos recobrimentos mínimos, especificando também outros valores de recobrimentos mínimos para os elementos pré-fabricados em condições especiais.

4. COEFICIENTES DE PONDERAÇÃO DE ACÇÕES E DE RESISTÊNCIA NO ESTADO LIMITE ÚLTIMO

De acordo com o exposto na ABNT NBR6118, indicam-se no Quadro 9 os coeficientes de ponderação das acções no Estado Limite Último (ELU). Os coeficientes são distintos para situações normais, especiais ou de construção, e excepcionais, atendendo ao grau de persistência no tempo.

Quadro 9. Coeficientes de ponderação das acções, de acordo com a ABNT NBR6118:2014 [1].

| Combinações de acções | Permanentes (g) | | Variáveis (q) | | Protensão (p) | | Recalques de apoio e retração | |
|----------------------------|------------------|-----|---------------|-----|---------------|-----|-------------------------------|---|
| | D | F | G | T | D | F | D | F |
| Normais | 1,4 ^a | 1,0 | 1,4 | 1,2 | 1,2 | 0,9 | 1,2 | 0 |
| Especiais ou de construção | 1,3 | 1,0 | 1,2 | 1,0 | 1,2 | 0,9 | 1,2 | 0 |
| Excepcionais | 1,2 | 1,0 | 1,0 | 0 | 1,2 | 0,9 | 0 | 0 |

onde

D é desfavorável, F é favorável, G representa as cargas variáveis em geral e T é a temperatura.

^a Para as cargas permanentes de pequena variabilidade, como o peso próprio das estruturas, especialmente as pré-moldadas, esse coeficiente pode ser reduzido para 1,3.

Os valores dos coeficientes de ponderação das acções a adoptar pelo Eurocódigo para situações persistentes (normais) e transitórias indicam-se no Quadro 10, e para as situações sísmicas e acidentais indicam-se no Quadro 11. Pela análise dos valores apresentados, regista-se um tratamento diferenciado das situações transitórias (por exemplo, de construção), e ainda diferenças nos coeficientes associados ao peso próprio das estruturas (1,30 vs 1,35), e às acções variáveis (1,4 vs 1,50), em situações de projecto persistentes.

Quadro 10. Valores de cálculo das acções (STR/GEO) (Conjunto B) de acordo com o quadro NA-A1.2(B) da NP EN 1990:2009 [4].

| Situações de projeto persistentes e transitórias | Acções permanentes | | Pré-esforço | Acção variável de base da combinação | Acções variáveis acompanhantes |
|--|----------------------------|----------------------------|--------------|--------------------------------------|-----------------------------------|
| | Desfavoráveis | Favoráveis | $\gamma_P P$ | $\gamma_{Q,1} G_{k,1}$ | $\gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$ |
| | $\gamma_{G,sup} G_{k,sup}$ | $\gamma_{G,inf} G_{k,inf}$ | | | |

Os valores de γ_f que devem ser adoptados são os seguintes:

$\gamma_{G,sup} = 1,35$, $\gamma_{G,inf} = 1,00$

$\gamma_{Q,1} = \gamma_{Q,i} = 1,50$ nos casos desfavoráveis (0 nos casos favoráveis)

Quadro 11. Valores de cálculo das acções a utilizar nas situações de projecto acidentais e sísmicas de acordo com o quadro NA-A1.3 da NP EN 1990:2009 [4].

| Situações de projeto | Acções permanentes | | Pré-esforço | Acção de acidente ou sísmicas de base da combinação | Acções variáveis acompanhantes | |
|----------------------|--------------------|-------------|-------------|---|--------------------------------|----------------------|
| | Desfavoráveis | Favoráveis | P | A_d | Principais | Outras |
| Acidentais | $G_{k,sup}$ | $G_{k,inf}$ | P | A_d | $\psi_{1,1} Q_{k,i}$ | $\psi_{1,1} Q_{k,i}$ |
| Sísmicas | $G_{k,sup}$ | $G_{k,inf}$ | P | $\gamma_1 A_{Ek}$ ou A_{Ed} | $\psi_{2,i} Q_{k,i}$ | |

Os coeficientes parciais das acções para os estados limites últimos nas situações de projecto acidentais e sísmicas deverão de acordo com a NP EN 1990:2009 [4] ser tomados iguais a 1,0.

Em ambas normas estudadas, quando ocorre simultaneidade de ações variáveis, considera-se a ação variável principal, com seus valores característicos e as demais ações variáveis com probabilidade não desprezível de ocorrência simultânea, com seus valores reduzidos de combinação. No caso do Eurocódigo, a simultaneidade de ações é tratada conforme resumido no Quadro 10 (ações variáveis base ou acompanhantes) e na norma brasileira, de forma similar, onde os valores correspondentes aos fatores de redução ψ são definidos em função do tipo de edificação ou tipo de ação variável (vento ou temperatura). Na norma brasileira ψ varia de 0 a 0,8 e no Eurocódigo, de 0 a 1,0, para uma classificação distinta entre ambas. Indica-se no Quadro 12 os coeficientes de minoração da resistência do concreto (γ_c) e do aço (γ_s) para os Estados Limites Últimos, de acordo com a ABNT NBR 6118. A norma brasileira também define que “para a execução de elementos estruturais nos quais estejam previstas condições desfavoráveis (por exemplo, más condições de transporte, ou adensamento manual, ou concretagem deficiente por concentração de armadura), o coeficiente γ_c deve ser multiplicado por 1,1.”

Quadro 12. Coeficientes parciais relativos aos materiais para os Estados Limites Últimos segundo a ABNT NBR6118:2014 [1].

| Combinações | Concreto | Aço |
|----------------------------|----------|------|
| Normais | 1,4 | 1,15 |
| Especiais ou de construção | 1,2 | 1,15 |
| Excepcionais | 1,2 | 1,0 |

Por sua vez, o EC2 preconiza os coeficientes parciais que se transcrevem no Quadro 13, onde se regista um tratamento diferenciado das situações transitórias (por exemplo, de construção) e ainda ao nível dos coeficientes de minoração da resistência do betão.

Quadro 13. Coeficientes parciais relativos aos materiais para os estados limites últimos de acordo com a NP EN 1992-1-1 [5].

| Situações de projeto | γ_c para betão | γ_c para aço de armaduras para betão armado | γ_s para aço de armaduras de pré-esforço |
|----------------------|-----------------------|--|---|
| Persistentes | 1,50 | 1,15 | 1,15 |
| Transitórias | 1,50 | 1,15 | 1,15 |
| Acidentais | 1,2 | 1,0 | 1,0 |

5. ESTADO LIMITE ÚLTIMO DE FLEXÃO COMPOSTA DE ELEMENTOS LINEARES

Para efeitos de avaliação da resistência à flexão composta de elementos lineares no ELU, procedeu-se à comparação dos diagramas de interação obtidos de acordo com as formulações da NBR6118 e do EC2, para uma secção rectangular simplesmente armada, com altura de 0,45 m e largura de 0,25 m, com betão de resistência $f_{ck} = 40$ MPa, de acordo com as indicações da Figura 2.

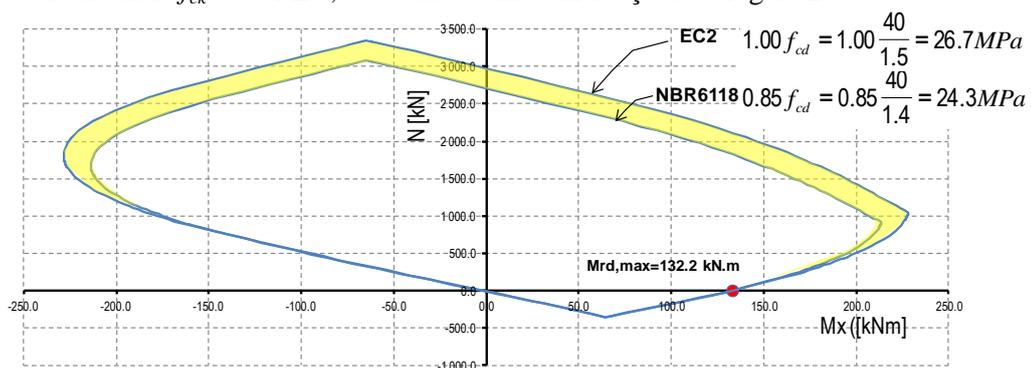


Figura 2. Diagrama de interação M-N, exemplo relativo a secção rectangular com comparação entre a ANBT NBR6118:2014 [1] e a NP EN 1992-1-1 [5].

Conforme se pode verificar, as diferenças resultam da adopção do coeficiente (0,85) afectando a resistência à compressão do betão, e ainda do valor do coeficiente de minoração da resistência do betão (1,4 vs 1,5). As principais diferenças identificadas correspondem às regiões do diagrama onde o modo de ruptura é condicionado pela resistência à compressão do betão. Nestes casos, os valores dos momentos resistentes calculados de acordo com a NBR6118 são inferiores aos valores calculados pelo EC2.

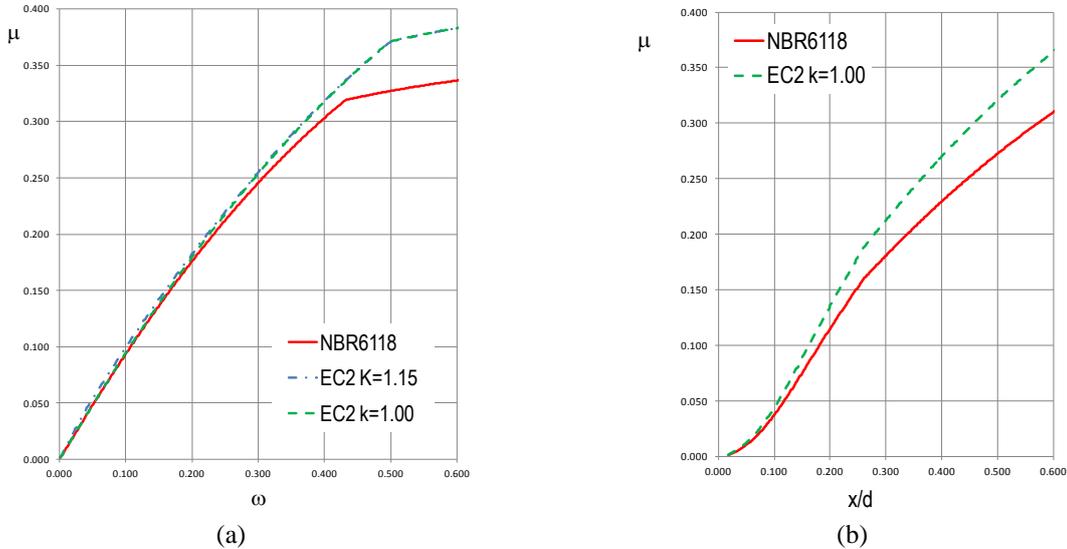


Figura 3. Comportamento à flexão simples, comparação entre a ABNT NBR6118:2014 [1] e a NP EN 1992-1-1 [5]: (a) Relação entre momento flector reduzido e taxa mecânica de armadura e (b) Posição da linha neutra relativa à altura útil.

As diferenças obtidas em termos do comportamento à flexão simples são muito reduzidas, conforme se pode verificar pela análise da relação entre o momento flector reduzido e a taxa mecânica de armadura que se indica na Fig. 3. Estas diferenças ganham alguma expressão para secções fortemente solicitadas ($\mu \geq 0,25$), para as quais maiores quantidades de armadura são necessárias de acordo com a NBR6118. Para a flexão simples, a influência do acréscimo da tensão do aço após a cedência das armaduras (permitida pelo EC2) é pouco significativa.

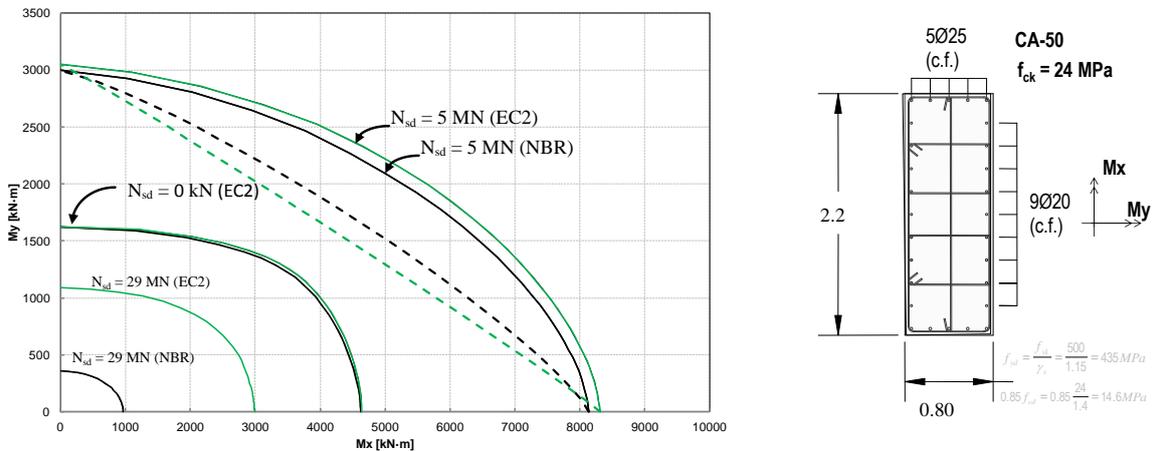


Figura 4. Comportamento à flexão composta desviada, comparação entre a ABNT NBR6118:2014 [1] e a NP EN 1992-1-1 ($N > 0$ para compressão). A traço interrompido, indicam-se os resultados das fórmulas aproximadas contidas nas mesmas normas.

Exemplifica-se ainda na Fig. 4 o comportamento à flexão composta desviada, por intermédio de exemplo com recurso a secção rectangular de pilar. Verifica-se identicamente que as diferenças são muito reduzidas, com a excepção das situações condicionadas pela resistência à compressão do betão,

para as quais a resistência à flexão composta desviada calculada pela NBR6118 é inferior à calculada pelo EC2, sendo a norma brasileira mais conservativa nestes casos.

6. DIMENSIONAMENTO E VERIFICAÇÃO AO ELU DE ESFORÇO TRANSVERSO DE ELEMENTOS LINEARES

Para efeitos de verificação da resistência ao esforço transverso, a NBR apresenta dois modelos possíveis para verificação (modelo 1 e modelo 2). Ambos os modelos têm o seu fundamento num funcionamento em treliça, com verificação da capacidade dos estribos e bielas comprimidas, e ainda a consideração de uma parcela complementar relativa aos mecanismos de transferência de carga complementares aos mecanismos de treliça (V_c). O ângulo de inclinação das bielas de compressão relativamente ao eixo da viga é constante no modelo 1 (45°), e pode ser escolhido no modelo 2 no intervalo entre (30°) e (45°).

De forma semelhante, o EC2 preconiza para a avaliação da resistência um modelo de treliça, porém sem consideração de parcelas adicionais relativas a outros mecanismos. Ainda no EC2, o ângulo de inclinação das bielas de compressão relativamente ao eixo da viga é permitido no intervalo entre ($21,8^\circ$) e (45°), ou seja para co-tangente do ângulo entre 1 e 2,5.

Para efeitos de comparação dos modelos acima referidos, recorreu-se a uma secção de viga com altura de 0,80 m e largura de 0,30 m, betão com $f_{ck} = 30$ MPa, e quantidade de armadura transversal A_{sw}/s , para a qual se calcula a resistência ao esforço transverso. Os resultados encontram-se representados na Fig. 5., para valores de A_{sw}/s próximos da quantidade de armadura mínima (por exemplo est. $\varnothing 8//0,20$ com $5 \text{ cm}^2/\text{m}$) e até quantidades elevadas (por exemplo est. $\varnothing 12,5//0,10$ com $24,6 \text{ cm}^2/\text{m}$). Na avaliação da resistência máxima, considerou-se o valor do ângulo de inclinação das bielas de compressão que maximiza a resistência da secção.

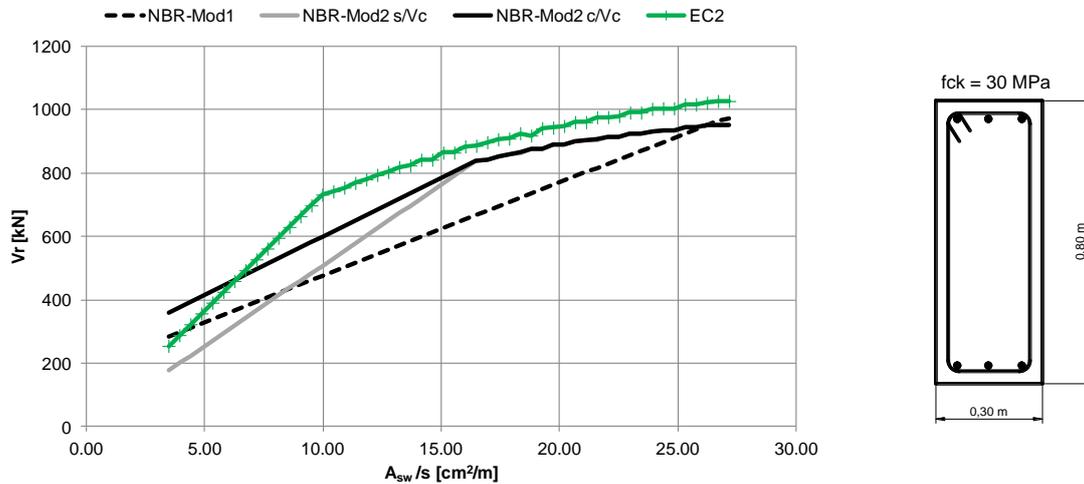


Figura 5. Comparação da resistência ao esforço transverso (secção submetida a esforço transverso e momento flector sem compressão).

Pela análise dos resultados do exemplo da Fig. 5, é possível verificar o seguinte: 1) Na região controlada pela ruptura das armaduras (quantidades de armadura A_{sw}/s reduzidas) os resultados das duas normas igualam-se para a quantidade de armadura próxima de $A_{sw}/s = 6,3 \text{ cm}^2/\text{m}$, considerando o modelo 2 da NBR6118. Por um lado o EC2 permite considerar um ângulo mais reduzido para a inclinação das bielas ($21,8^\circ$), tirando maior proveito da resistência da armadura transversal; por outro lado, a NBR introduz a resistência adicional resultante dos mecanismos suplementares aos da treliça (parcela resistente do betão à compressão). 2) Na região controlada pela ruptura das bielas, as diferenças entre os dois regulamentos encontram-se relacionadas com os valores distintos de f_{cd} , pelos mesmos motivos apresentados no ponto 5.

7. DIMENSIONAMENTO DE LAJES AO CORTE

Apresentam-se de seguida as comparações efectuadas ao nível da resistência ao esforço transversal e da resistência ao punçoamento.

7.1. Estado Limite Último de Esforço Transverso em Lajes

A comparação da resistência ao esforço transversal é efectuada por intermédio da tensão nominal resistente, cuja comparação se apresenta na Fig. 6 em função da altura útil da laje, para um betão com $f_{ck} = 25$ MPa.

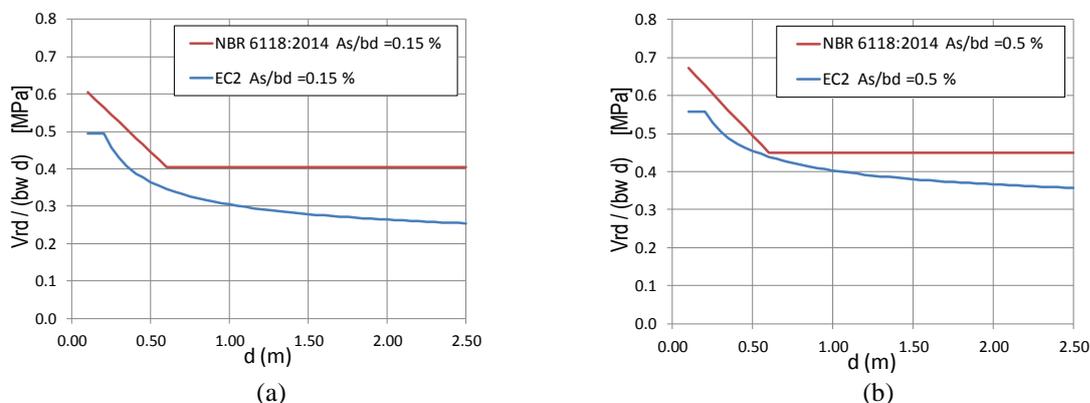


Figura 6. Tensão resistente de esforço transversal para secções fracamente armadas e moderadamente armadas à flexão.

Refere-se que quer o EC2, quer a NBR consideram uma degradação da tensão resistente para elementos de maior dimensão e consideram ainda a influência da quantidade de armadura de flexão na secção em causa. A formulação do EC2 apresenta para o exemplo analisado resultados comparáveis aos da NBR, porém mais conservativos.

7.2. Estado Limite Último de Punçoamento em Lajes

A comparação da resistência ao punçoamento é efectuada por intermédio da tensão nominal resistente, cuja comparação se apresenta na Fig. 7 em função da altura útil da laje, para secções moderadamente armadas e fortemente armadas (situação possível nas lajes fungiformes), para um betão com $f_{ck} = 25$ MPa. A superfície do perímetro de controlo encontra-se nas duas normas a uma distância de $2d$ da face da coluna.

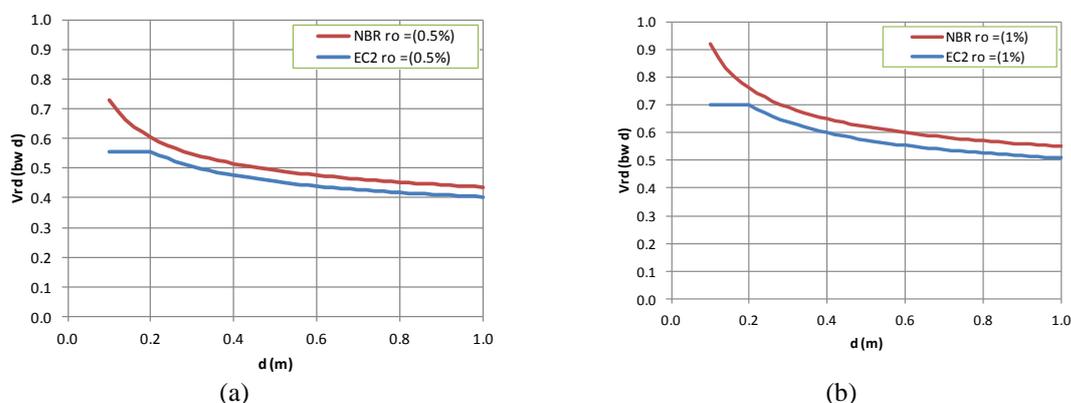


Figura 7. Tensão resistente de punçoamento para secções moderadamente armadas e fortemente armadas à flexão.

Refere-se também que quer o EC2, quer a NBR consideram uma degradação da tensão resistente para elementos de maior dimensão e consideram ainda a influência da quantidade de armadura de flexão na

secção em causa. A formulação do EC2 apresenta para o exemplo analisado resultados comparáveis aos da NBR, porém sensivelmente mais conservativos.

8. ESTADOS LIMITES DE SERVIÇO EM ELEMENTOS LINEARES

Apresentam-se de seguida a análise efectuada para o estado limite de fendilhação (ou fissuração segundo a norma brasileira) e estado limite de deformação.

8.1. Estado Limite de Fendilhação

Com o objectivo de proceder à avaliação da abertura de fenda pelo EC2 e pela NBR, considerou-se uma secção transversal de laje, com $f_{ck} = 20$ MPa, altura h e quantidade de armadura constante, correspondente a $\text{Ø}16//0,20$ ($10,05 \text{ cm}^2/\text{m}$), varões nervurados, e carregamento de curta duração. O valor do momento aplicado é de $M = 80 \text{ kN}\cdot\text{m}/\text{m}$, traccionando as armaduras inferiores. Os resultados são apresentados na Fig. 8, para valores da altura h considerados entre $h = 0,20 \text{ m}$ e $h = 1,00$. A altura útil é considerada a $d = h - 0,05$. A traço interrompido indica-se o caso com $\text{Ø}16//0,20$ ($10,05 \text{ cm}^2/\text{m}$), e a traço contínuo o caso com $\text{Ø}20//0,313$ ($\approx 10,05 \text{ cm}^2/\text{m}$), para efeitos de comparação.

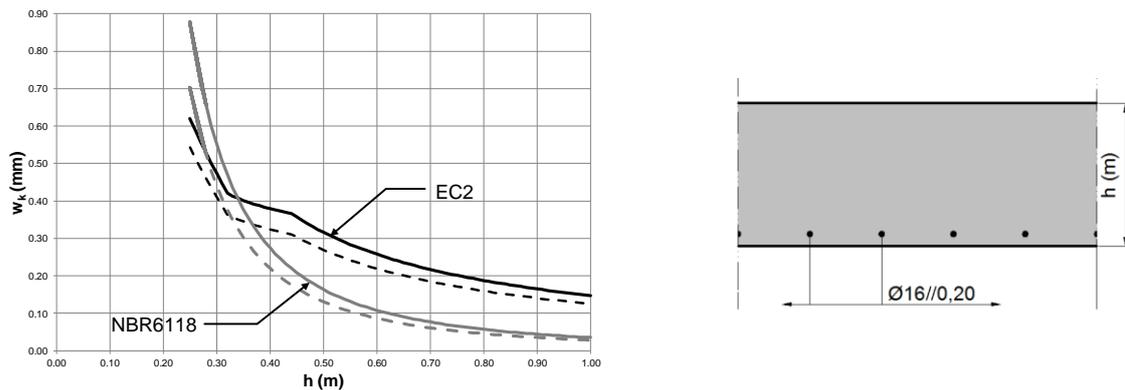


Figura 8. Avaliação da abertura de fendas em laje solicitada à flexão simples, para um momento aplicado de $M = 80 \text{ kN}\cdot\text{m}/\text{m}$

Para valores da tensão no aço de 200 MPa (obtidos para $h = 0,47 \text{ m}$), o valor da abertura de fenda calculado pelo EC2 é de $w_k = 0,29 \text{ mm}$, e de $w_k = 0,15 \text{ mm}$ no caso da NBR, para $\text{Ø}16//0,20$ ($10,05 \text{ cm}^2/\text{m}$). Tendo por base o exemplo apresentado, os resultados obtidos sugerem que o EC2 tende a fornecer valores da abertura de fenda superiores, o que em alguns casos pode ter implicações nas quantidades de armadura a adoptar, se a avaliação da fendilhação for condicionante. A justificação principal para as diferenças observadas reside no facto de o EC2 limitar a extensão média relativa ($\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}$) a valores superiores a $(0,60 \sigma_s/E_s)$.

8.2. Estado Limite de Deformação

A avaliação da deformação de acordo com a NBR é efectuada com recurso ao conceito da rigidez média ponderada, enquanto que no EC2 se recorre ao conceito de deformação média ponderada. Tendo por base estudos recentes [6], julga-se que as diferenças entre as duas metodologias são limitadas. A NBR6118 indica ainda uma espessura mínima de lajes, onde se estabelece, por exemplo, o mínimo de 16 cm para lajes fungiformes sem capitel e 14 cm para lajes fungiformes com capitel (na região fora do capitel). Porém, não se dispõe na norma brasileira de regras simplificadas para controlo indirecto da deformação, como preconizado no EC2. O controlo de deformações é abordado de forma mais qualitativa e abrangente especificando cuidados em relação à especificação e controlo do módulo de deformabilidade do concreto, por exemplo, seja nas normas de projecto (NBR6118) [1], quanto de execução (ABNT NBR14931) [8], das estruturas de betão armado.

9. COMPRIMENTOS DE AMARRAÇÃO

Indicam-se no Quadro 13 a avaliação dos comprimentos de amarração obtidos de acordo com as expressões da NBR6118 e do EC2. Os valores obtidos são da mesma ordem de grandeza, sendo os obtidos pela NBR sensivelmente inferiores.

Quadro 13. Avaliação de comprimentos de amarração de acordo com a ABNT NBR6118:2014 [1] e a NP EN 1992-1-1[5], para $\sigma_s = f_{yd} = 435$ MPa.

| Betão f_{ck} em [MPa] | | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 MPa |
|-------------------------------|-----|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Boas condições de aderência | NBR | 44 ϕ | 38 ϕ | 33 ϕ | 30 ϕ | 28 ϕ | 25 ϕ | 25 ϕ |
| | EC2 | 48 ϕ | 40 ϕ | 36 ϕ | 33 ϕ | 30 ϕ | 27 ϕ | 25 ϕ |
| Outras condições de aderência | NBR | 62 ϕ | 54 ϕ | 48 ϕ | 43 ϕ | 39 ϕ | 36 ϕ | 34 ϕ |
| | EC2 | 69 ϕ | 57 ϕ | 52 ϕ | 47 ϕ | 43 ϕ | 38 ϕ | 36 ϕ |

10. CONCLUSÕES

Enunciam-se de seguida as principais conclusões:

- 1) Na generalidade dos temas, a estruturação das normas é muito semelhante e não existem diferenças de fundo significativas. Nos assuntos específicos que se enunciam de seguida existem abordagens diferenciadas.
- 2) No respeitante à durabilidade, existe um tratamento distinto das matérias, em particular no referente aos conceitos de vida útil de projecto, e ainda à estruturação das classes de exposição ambiental.
- 3) Existem diferenças no respeitante aos coeficientes de majoração a utilizar, em particular para as situações de carácter transitório.
- 4) No respeitante ao ELU, a principal diferença reside na utilização do coeficiente de redução da resistência do betão (efeitos de longo prazo na resistência à compressão do betão).
- 5) No relativo à fendilhação, as análises efectuadas indicam que os modelos contidos no EC2 tendem a ser mais conservativos do que os apresentados pela NBR6118.

Refere-se ainda que os resultados apresentados decorrem da análise de elementos estruturais com dimensões habituais, incluindo ainda o estudo da influência das quantidade de armaduras em alguns casos, no entanto deverá ter-se em consideração que as comparações efetuadas não são exaustivas.

REFERÊNCIAS

- [1] ABNT NBR 6118 (2014) Projeto de estruturas de concreto – Procedimento.
- [2] NP EN 206-1 (2007) Betão. Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade.
- [3] Especificação LNEC E464 (2005). Betões. Metodologia prescritiva para uma vida útil de projecto de 50 e de 100 anos face às acções ambientais.
- [4] NP EN 1990 (2009) Eurocódigo - Bases para o projecto de estruturas.
- [5] NP EN 1992-1-1 (2010) Eurocódigo 2 - Projecto de estruturas de betão. Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios.
- [6] Dimensionamento de Estruturas de Betão Armado de acordo com a Norma Brasileira NBR 6118, IST, FUNDEC, Novembro 2014.
- [7] ABNT NBR8681 (2003) Ações e Segurança nas estruturas – Procedimento.
- [8] ABNT NBR12655 (2015). Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento.
- [9] Doniak, I.L.O. e Gutstein, D. (2011). Capítulo 43: Estruturas Pré-fabricadas. Livro Concreto. Ibracon: Florianópolis, 53^o IBRACON – Congresso Brasileiro do Concreto.