



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

PAVIMENTOS DE ELEMENTOS PREFABRICADOS DE BETÃO PRÉ-ESFORÇADO

**Critérios para o cálculo das tensões na armadura
devidas ao pré-esforço**

PROJETO P21 "COMPAV"

Lisboa • junho 2021

I&D EDIFÍCIOS

RELATÓRIO 212/2021 – DED/NEG

Título

PAVIMENTOS DE ELEMENTOS PREFABRICADOS DE BETÃO PRÉ-ESFORÇADO

Critérios para o cálculo das tensões na armadura devidas ao pré-esforço

Autoria

DEPARTAMENTO DE EDIFÍCIOS

Manuel Francisco Camacho Baião

Investigador Principal, Núcleo de Economia, Gestão e Tecnologia da Construção

Copyright © LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL, I. P.

AV DO BRASIL 101 • 1700-066 LISBOA

e-mail: lnec@lnec.pt

www.lnec.pt

Relatório 212/2021

Proc. 0805/1102/20377

PAVIMENTOS DE ELEMENTOS PREFABRICADOS DE BETÃO PRÉ-ESFORÇADO

Critérios para o cálculo das tensões na armadura devidas ao pré-esforço

Resumo

Os estudos de avaliação estrutural de sistemas de pavimentos prefabricados de betão pré-esforçado, tendo em vista a emissão, primeiramente, de Documentos de Homologação (DH) e, posteriormente, de Documentos de Aplicação (DA), têm-se baseado, na regulamentação estrutural em vigor no nosso País (RSA e REBAP). Com a publicação do Decreto-Lei n.º 95/2019, de 18 de julho, em que aqueles regulamentos são revogados, e a publicação do Despacho Normativo n.º 21/2019, de 17 de setembro, que aprova as condições para a utilização dos Eurocódigos nos projetos de estruturas de edifícios, passam a ser estas as normas a observar em substituição dos referidos regulamentos.

Neste relatório apresentam-se: i) os documentos regulamentares e normativos aplicáveis na apreciação estrutural dos pavimentos de elementos prefabricados de betão; ii) aspetos do fabrico dos elementos prefabricados de betão pré-esforçado; e iii) os critérios a satisfazer, de acordo com o Eurocódigo 2, tornado obrigatório pela legislação em vigor, para o cálculo dos esforços que se podem verificar nos elementos prefabricados de betão por ação do pré-esforço aplicado por pré-tensão na armadura desses elementos.

Palavras-chave: Pavimentos prefabricados / Betão pré-esforçado / Pré-tensão / Perdas de pré-esforço

FLOORS OF PRECAST PRESTRESSED CONCRETE ELEMENTS

Criteria for the determination of the stresses in the prestressed reinforcement due to prestressing force

Abstract

The structural evaluation studies of precast prestressed concrete floor systems, with a view to issuing, first, Approval Documents (DH) and, later, Application Documents (DA), have been based on the structural regulations in effect in our country (RSA and REBAP). With the publication of Decree-Law No. 95/2019, of July 18, in which those regulations are revoked, and the publication of Normative Dispatch No. 21/2019, of September 17, which approves the conditions for the use of Eurocodes in the design of building structures, these are now the standards to be observed in place of the aforementioned regulations.

This report presents: i) the regulatory and normative documents applicable in the structural evaluation of the floors of precast concrete elements; ii) aspects of the manufacture of prestressed concrete precast elements; and iii) the criteria to be met, in accordance with Eurocode 2, made mandatory, for the calculation of stresses and the respective losses that can be verified in the prestressing reinforcement of precast concrete elements, by the action of the applied prestress, taking into account the usual manufacturing conditions practiced in the production units in Portugal.

Keywords: Precast floors / Prestressed concrete / Pre-tension / Prestress losses

Índice

1	Introdução.....	1
2	Documentos regulamentares e normativos aplicáveis.....	2
3	Processo de fabrico dos elementos prefabricados e a aplicação do pré-esforço	4
4	Tensões nas armaduras devidas ao pré-esforço	6
4.1	Nota introdutória.....	6
4.2	Força de pré-esforço durante a aplicação.....	7
4.2.1	Pré-esforço na origem	7
4.2.2	Pré-esforço inicial	7
4.3	Perdas de pré-esforço instantâneas	8
4.3.1	Perdas a considerar.....	8
4.3.2	Perdas devidas ao atrito ($\Delta P\mu$).....	8
4.3.3	Perdas devidas ao deslocamento da armadura nos dispositivos de ancoragem (ΔPsl)	8
4.3.4	Perdas devidas à relaxação a curto prazo (ΔPr)	9
4.3.5	Perdas devidas à deformação elástica do betão (ΔPel)	9
4.4	Perdas de pré-esforço diferidas.....	10
4.4.1	Perdas a considerar.....	10
4.4.2	Perdas devidas à fluência do betão	11
4.4.3	Perdas devidas à retração do betão.....	14
4.4.4	Perdas devidas à relaxação na armadura de pré-esforço.....	16
4.4.5	Perdas diferidas resultantes da fluência e retração do betão e da relaxação da armadura de pré-esforço.....	18
5	Observações finais.....	19
	Referências bibliográficas	22

Índice de figuras

Figura 2.1 – Pavimentos de elementos prefabricados de betão pré-esforçado: (a) vigotas; (b) pranchas vazadas ou alveoladas; e (c) prelares.....	2
Figura 3.1 – Mesa de cofragem para o fabrico de vigotas.....	4
Figura 3.2 – Extremidades da mesa: (a) lado da ancoragem passiva; (b) lado da ancoragem ativa	4
Figura 3.3 – Esquema do processo de fabrico das vigotas: (a) Aplicação do pré-esforço nas armaduras; (b) Betonagem das vigotas; (c) Transmissão do pré-esforço ao betão; (d) Corte das vigotas	5
Figura 4.1 – Perdas de pré-esforço na armadura	6
Figura 5.1 – Variação do valor do pré-esforço na armadura ao longo do tempo.....	19

1 | Introdução

Os pavimentos constituídos por elementos prefabricados são desde praticamente meados do séc. XX uma solução construtiva bastante utilizada em Portugal.

A intervenção do LNEC, no âmbito da sua apreciação técnica, é realizada desde 1947 e, de uma forma sistematizada, apoiou-se, primeiramente, nos estudos que conduziram à elaboração de Documentos de Homologação (DH), de carácter obrigatório, face à legislação nacional (RGEU, 1951) e, posteriormente, após o início da obrigatoriedade da aposição da marcação CE nos elementos prefabricados desses pavimentos, nos estudos para a elaboração de Documentos de Aplicação (DA), de carácter voluntário.

Uma parte desses estudos consiste na determinação numérica da capacidade resistente desses pavimentos, a qual deve ser considerada na verificação da sua segurança estrutural, em fase de projeto.

Os pavimentos que neste domínio têm sido maioritariamente objeto desses estudos pelo LNEC são os pavimentos de vigotas prefabricadas de betão pré-esforçado, os pavimentos de pranchas vazadas de betão pré-esforçado e os pavimentos de prelares de betão pré-esforçado.

Após a publicação do Regulamento de Segurança e Ações para Estruturas de Edifícios e Pontes (RSA, 1983) e do Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado (REBAP, 1983), estes documentos constituíram a base para o dimensionamento, a determinação da capacidade resistente e a verificação da segurança estrutural destes pavimentos prefabricados de betão.

Na sequência da publicação do Decreto de Lei nº 95/2019, de 18 de julho, em que aqueles regulamentos são revogados, e da publicação do Despacho Normativo nº 21/2019, de 17 de setembro, que aprova as condições para a utilização dos Eurocódigos (EC) nos projetos de estruturas de edifícios, passam a ser estas as normas a observar em substituição dos regulamentos revogados.

Por outro lado, no que diz especificamente respeito aos pavimentos atrás referidos, há que considerar a aplicação das normas harmonizadas, através das quais é possível proceder à marcação CE, obrigatória, dos elementos prefabricados que constituem esses pavimentos.

Enquadrados por estes documentos legislativos e normativos, os DA a ser emitidos pelo LNEC deverão ser reformulados para atender aos critérios que, findo o período de transição estabelecido no Art.º 6.º do referido Despacho Normativo, ou seja, a partir do dia 17 de setembro de 2022, os projetos de estruturas de edifícios terão de obrigatoriamente satisfazer. Durante o período de transição, estes projetos de estruturas poderão ainda ser elaborados de acordo com a regulamentação revogada.

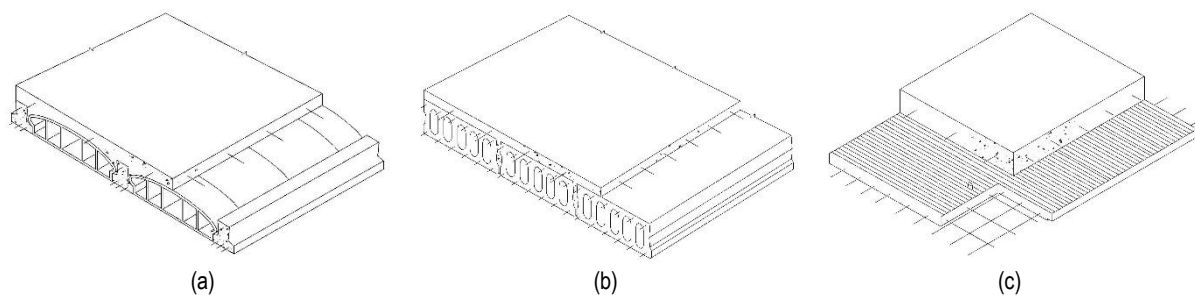
Neste relatório apresentam-se: i) os documentos regulamentares e normativos aplicáveis na apreciação estrutural dos pavimentos de elementos prefabricados de betão; ii) aspetos do fabrico dos elementos prefabricados de betão pré-esforçado; e iii) os critérios a satisfazer, de acordo com o Eurocódigo 2, tornado obrigatório, para o cálculo das tensões e das respetivas perdas que se podem verificar na armadura de pré-esforço dos elementos prefabricados de betão, por ação do pré-esforço aplicado, tendo em conta as condições de fabrico usuais praticadas nas unidades de produção em Portugal.

2 | Documentos regulamentares e normativos aplicáveis

Referem-se neste capítulo os documentos regulamentares e normativos aplicáveis na apreciação, em geral, e na determinação das características mecânicas, em particular, dos pavimentos que integram elementos prefabricados de betão armado e de betão pré-esforçado, efetuadas pelo LNEC.

Desde a publicação, em 1983, do Regulamento de Segurança e Ações para Estruturas de Edifícios e Pontes (RSA, 1983) e do Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado (REBAP, 1983), o LNEC tem por base estes regulamentos, na apreciação, e mais especificamente na determinação das características resistentes, dos pavimentos constituídos por elementos prefabricados de betão armado e de betão pré-esforçado.

Em particular, em relação a estes últimos, para além dos pavimentos de vigotas prefabricadas de betão pré-esforçado (Figura 2.1), os mais correntes, têm sido objeto de apreciação pelo LNEC, os pavimentos de pranchas vazadas ou alveoladas de betão pré-esforçado (Figura 2.2b) e os pavimentos executados a partir de prelares de betão pré-esforçado (Figura 2.1c).



**Figura 2.1 – Pavimentos de elementos prefabricados de betão pré-esforçado:
(a) vigotas; (b) pranchas vazadas ou alveoladas; e (c) prelares**

No que se refere aos pavimentos de vigotas prefabricadas de betão pré-esforçado, a sua apreciação pelo LNEC baseia-se ainda nas Especificações LNEC E 435 - 2012 e E 436 - 1995.

Na sequência da publicação do Decreto de Lei nº 95/2019, de 18 de julho, em que são revogados o RSA, o REBAP e, identicamente, o Regulamento de Segurança das Construções Contra os Sismos (RSCCS), aprovado pelo Decreto-Lei nº 41658, de 31 de maio de 1958, e, também, na sequência da publicação do Despacho Normativo nº 21/2019, de 17 de setembro, que aprova as condições para a utilização dos Eurocódigos nos projetos de estruturas de edifícios, passam a ser as seguintes as normas a observar em substituição dos regulamentos revogados:

- NP EN 1990:2009 – Eurocódigo – Bases para o projeto de estruturas;
- NP EN 1991-1-1:2009 – Eurocódigo 1 – Ações em estruturas – Parte 1-1: Ações gerais – Pesos volúmicos, pesos próprios, sobrecargas em edifícios;
- NP EN 1991-1-2:2010 – Eurocódigo 1 – Ações em estruturas – Parte 1-2: Ações gerais – Ações em estruturas expostas ao fogo;

- NP EN 1991-1-3:2009 – Eurocódigo 1 – Ações em estruturas – Parte 1-3: Ações gerais – Ações da neve;
- NP EN 1991-1-4:2010 – Eurocódigo 1 – Ações em estruturas – Parte 1-4: Ações gerais – Ações do vento;
- NP EN 1991-1-5:2009 – Eurocódigo 1 – Ações em estruturas – Parte 1-5: Ações gerais – Ações térmicas;
- NP EN 1992-1-1:2010 – Eurocódigo 2 – Projeto de estruturas de betão – Parte 1-2: Regras gerais e regras para edifícios;
- NP EN 1998-1:2010 – Eurocódigo 8 – Projeto de estruturas para resistência aos sismos – Parte 1: Regras gerais, ações sísmicas e regras para edifícios.

Por outro lado, e ainda no que diz especificamente respeito aos pavimentos atrás referidos, há que considerar a aplicação das normas harmonizadas que a seguir se referem, através das quais é possível proceder à marcação CE, obrigatória, dos elementos prefabricados que constituem esses pavimentos.

- NP EN 15037-1:2008 – Produtos prefabricados de betão. Pavimentos com vigotas e blocos de cofragem. Parte 1: Vigotas;
- NP EN 15037-2:2009+A1:2011 – Produtos prefabricados de betão. Pavimentos com vigotas e blocos de cofragem. Parte 2: Abobadilhas de betão (publicada Errata 1:2013);
- NP EN 15037-3:2009+A1:2013 – Produtos pré-fabricados em betão - Sistemas de pisos com vigas e blocos. Parte 3: Abobadilhas cerâmicas;
- NP EN 15037-4:2010+A1:2016 – Produtos prefabricados em betão - Pavimentos com vigotas e blocos. Parte 4: Abobadilhas de poliestireno expandido;
- NP EN 15037-5:2016 – Produtos prefabricados em betão - Sistemas de pavimento com vigotas e blocos. Parte 5: Abobadilhas leves para cofragem simples;
- NP EN 1168:2005+A3:2014 – Produtos prefabricados de betão. Lajes alveoladas;
- NP EN13747:2005+A2:2012 – Produtos prefabricados de betão. Prelajes para pavimentos.

Estas normas harmonizadas em geral remetem as exigências comuns aplicáveis aos diversos produtos prefabricados de betão para a norma:

- NP EN 13369:2020 – Regras gerais para produtos prefabricados de betão (*)

Este novo enquadramento legislativo e normativo entrará em vigor obrigatoriamente findo o período de transição estabelecido no Art.º 6.º do referido Despacho Normativo, ou seja, a partir do dia 17 de setembro de 2022. Até esta data, os projetos das estruturas dos edifícios, em particular dos pavimentos prefabricados, ainda poderão ser enquadrados pelos documentos regulamentares e normativos anteriormente referidos.

(*) Esta norma não é uma norma harmonizada e por isso não pode ser utilizada isoladamente para a marcação CE dos produtos de betão.

3 | Processo de fabrico dos elementos prefabricados e a aplicação do pré-esforço

Os elementos prefabricados que atrás se referiram têm em comum o processo de aplicação da força de pré-esforço, a qual é conseguida por pré-tensionamento da armadura e por transmissão aos elementos de betão, que são posteriormente moldados, através da aderência que ocorre entre o betão e as armaduras, após o betão desses elementos ter adquirido uma adequada resistência à compressão.

No que se segue faz-se uma descrição do processo de produção de vigotas, por serem os elementos prefabricados com maior utilização em Portugal nos pavimentos que integram este tipo de elementos.

As vigotas são fabricadas sobre mesas de cofragem que têm comprimentos da ordem dos 100 m ou mais, incorporando cada mesa usualmente não menos do que uma dezena de alinhamentos de vigotas (Figura 2.1).



Figura 3.1 – Mesa de cofragem para o fabrico de vigotas

Numa das extremidades é feita a ancoragem passiva da armadura de pré-esforço (Figura 3.2a), sendo o pré-esforço aplicado à armadura na outra extremidade, onde se efetua a ancoragem ativa (Figura 3.2b).

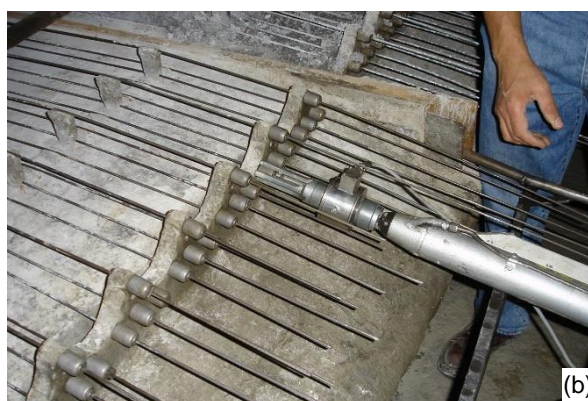


Figura 3.2 – Extremidades da mesa: (a) lado da ancoragem passiva; (b) lado da ancoragem ativa

Após a colocação, sobre a mesa, dos fios, que usualmente constituem a armadura das vigotas, estes são amarrados na extremidade da ancoragem passiva (ver Figura 3.2a), efetua-se o esticamento da armadura, utilizando-se para o efeito macaco hidráulico aplicado a cada um dos fios e garante-se a respetiva amarração no dispositivo que constitui a ancoragem ativa (ver Figura 3.2b),

Na amarração dos fios, na ancoragem passiva e na ancoragem ativa, utilizam-se cunhas com face interior estriada, que entram em cones que por sua vez são suportados por elementos metálicos rigidamente ancorados na mesa de cofragem (Figura 3.3a).

O betão é moldado em geral no mesmo dia ou no dia seguinte após a aplicação do pré-esforço, utilizando uma máquina de moldagem deslizante. A consistência do betão utilizado é a adequada para que não seja necessária a utilização de cofragem lateral (Figura 3.3b).

Após um período de cura em que o betão adquire a resistência necessária, o pré-esforço é transmitido aos elementos prefabricados, que têm o comprimento da mesa de cofragem (Figura 3.3c), mas que após serem cortados com serra de disco nos comprimentos desejados constituem as vigotas (Figura 3.3d). Estas são posteriormente transportadas para o local de armazenagem.

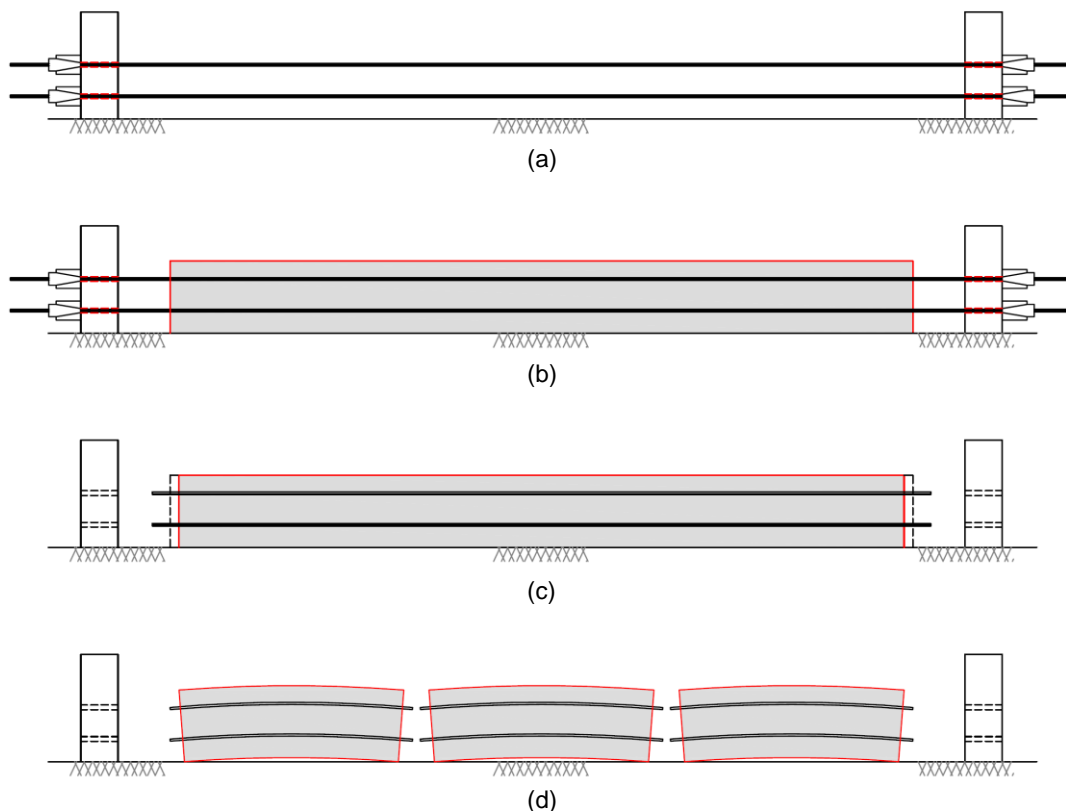


Figura 3.3 – Esquema do processo de fabrico das vigotas: (a) Aplicação do pré-esforço nas armaduras; (b) Betonagem das vigotas; (c) Transmissão do pré-esforço ao betão; (d) Corte das vigotas

4 | Tensões nas armaduras devidas ao pré-esforço

4.1 Nota introdutória

O pré-esforço instalado num elemento de betão pode ser quantificado a partir do valor da força de pré-esforço na origem, P_{max} , que é o valor da força aplicada na armadura na extremidade ativa, ou seja, junto ao dispositivo que aplica a força.

Num dado instante t e a uma distância x da extremidade ativa da armadura, a força média de pré-esforço $P_{m,t}(x)$, é obtida a partir da força máxima P_{max} deduzindo-lhe as perdas de pré-esforço.

No que se refere à distância, não se considera, tendo em conta o traçado linear das armaduras ao longo da mesa de moldagem dos elementos prefabricados, que exista variação da força de pré-esforço.

No que se refere à variação no tempo do valor do pré-esforço instalado no elemento prefabricado, distinguem-se os dois seguintes casos particulares de pré-esforço $P_{m,t}$, ao fim do tempo t :

- i) o pré-esforço inicial, $P_{m,0}$, em que $t = 0$, imediatamente após a transmissão do pré-esforço ao elemento de betão;
- ii) o pré-esforço final, $P_{m,\infty}$, em que $t = \infty$.

No caso do pré-esforço por pós-tensão, a aplicação de pré-esforço na armadura é simultânea com a sua transmissão para o elemento de betão, a qual é efetuada através de dispositivo próprio colocado numa das extremidades do elemento a pré-esforçar, designado como ancoragem ativa.

No caso de pré-esforço por pré-tensão, usual em elementos prefabricados para pavimentos, a aplicação de pré-esforço na armadura é efetuada em fase anterior à da sua transmissão ao elemento de betão, e essa transmissão só é efetuada quando este tem capacidade resistente para absorver, em adequadas condições, as forças provenientes da armadura tracionada através da aderência entre essa armadura e o betão do elemento a pré-esforçar.

Neste último caso, o pré-esforço inicial ($P_{m,0}$) obtém-se do pré-esforço na origem (P_{max}) deduzindo a este as perdas instantâneas (ΔP_i) e o pré-esforço final ($P_{m,\infty}$) obtém-se do pré-esforço inicial ($P_{m,0}$) deduzindo a este as perdas diferidas (ΔP_{dif}) (Figura 4.1).

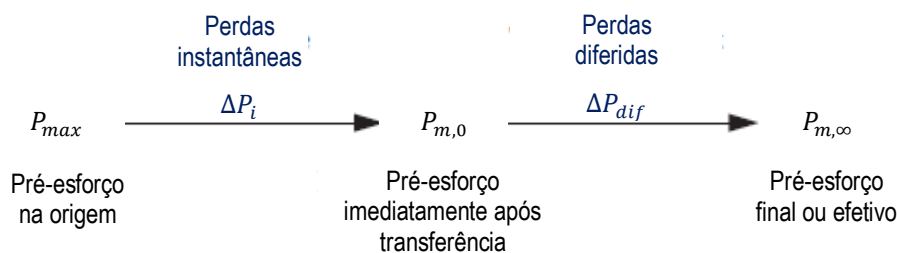


Figura 4.1 – Perdas de pré-esforço na armadura

4.2 Força de pré-esforço durante a aplicação

4.2.1 Pré-esforço na origem

De acordo com EC2-1, 5.10.2.1(1), a força aplicada à armadura de pré-esforço (P_{max}) (ou seja, a força na extremidade ativa durante a aplicação do pré-esforço), não deve exceder o seguinte valor:

$$P_{max} = A_p \cdot \sigma_{p,max} \quad (4.1)$$

em que:

A_p : área da secção transversal da armadura de pré-esforço;

$\sigma_{p,max}$: tensão máxima aplicada à armadura de pré-esforço

$$= \min \{0,8 f_{pk}; 0,9 f_{p0,1k}\}.$$

em que

f_{pk} : valor característico da tensão de rotura à tração do aço da armadura de pré-esforço;

$f_{p0,1k}$: valor característico da tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,1 % à tração do aço da armadura de pré-esforço;

De acordo com EC2-1, 5.10.2.1(2), admite-se a aplicação de uma força de pré-esforço superior se a intensidade da força no macaco puder ser medida com uma exatidão de $\pm 5\%$ do valor final da força de pré-esforço. Neste caso, a força máxima de pré-esforço, (P_{max}), poderá ser aumentada para $0,95 f_{p0,1k} \cdot A_p$ (por exemplo, no caso de um atrito elevado não previsto na pré-tensão em mesas de fabrico de grande comprimento).

4.2.2 Pré-esforço inicial

De acordo com EC2-1, 5.10.3(2), o valor da força de pré-esforço inicial ($P_{m,0}$) (na idade $t = 0$), aplicada ao betão após a transferência do pré-esforço (pré-tensão), não deverá exceder o seguinte valor:

$$P_{m0} = A_p \cdot \sigma_{p,m0} \quad (4.2)$$

em que:

A_p : área da secção transversal da armadura de pré-esforço;

$\sigma_{p,m0}$: tensão na armadura imediatamente após a transferência do pré-esforço

$$= \min \{0,75 f_{pk}; 0,85 f_{p0,1k}\}.$$

4.3 Perdas de pré-esforço instantâneas

4.3.1 Perdas a considerar

As perdas instantâneas (ΔP_i) correspondem às perdas que se processam antes e durante a transferência de pré-esforço para os elementos de betão.

De acordo com EC2-1, 5.10.3(3), na determinação das perdas instantâneas (ΔP_i) deverão ser consideradas, sempre que for relevante, as seguintes influências imediatas:

- perdas devidas ao atrito (ΔP_μ);
- perdas devidas ao deslocamento da armadura nos dispositivos de ancoragem (ΔP_{sl});
- perdas devidas à relaxação a curto prazo (ΔP_r);
- perdas devidas à deformação elástica do betão (ΔP_{el}).

4.3.2 Perdas devidas ao atrito (ΔP_μ)

É uma das perdas que se verifica durante a transferência das forças dos macacos para os dispositivos de amarração da mesa e engloba as perdas devidas ao atrito no contacto eventualmente existente entre as armaduras e a mesa de moldagem dos elementos prefabricados e ao atrito das armaduras nas cruzetas na zona da ancoragem ativa, as quais posicionam os fios das armaduras nessa zona (ver Figura 3.2b).

Tratando-se de armaduras com desenvolvimento retilíneo, não se consideram eventuais perdas por atrito ao longo da mesa de moldagem. Na passagem pelas cruzetas, devem evitar-se desvios dos fios das armaduras procurando o alinhamento com a sua posição na ancoragem.

4.3.3 Perdas devidas ao deslocamento da armadura nos dispositivos de ancoragem (ΔP_{sl})

É outra das perdas que se verifica durante a transferência das forças dos macacos para os dispositivos de amarração da mesa e engloba as perdas devidas aos escorregamentos dos fios nas cunhas e a adaptação destas nos dispositivos de ancoragem.

A tração das armaduras é efetuada individualmente em cada fio por macaco hidráulico (ver Figura 3.2b).

A ancoragem de cada fio é feita através de cunhas cónicas de aço de alta resistência, com superfície interior estriada, que bloqueiam os fios por aperto dentro dos dispositivos de ancoragem. Durante este processo de bloqueio ocorrem curtos deslizamentos dos fios nesses dispositivos.

Sendo δ o deslizamento dos fios (em mm) e L o comprimento da mesa de moldagem (em m), a perda de tensão de pré-esforço (em MPa) é dada por:

$$\Delta\sigma_{sl} = \frac{\delta}{L} E_p \quad (4.3)$$

em que:

E_p : módulo de elasticidade do aço das armaduras de pré-esforço (em GPa).

O valor de δ depende de cada sistema de ancoragem, podendo situar-se entre 1 e 5 mm. Como se pode deduzir pela expressão 4.3, o valor desta perda é tanto menor quanto maior for o comprimento da mesa de moldagem. Atendendo a que este comprimento é em geral bastante elevado, da ordem dos 100 m ou superior, os valores destas perdas de tensão são bastante reduzidos, podendo ser compensados por uma ligeira sobretensão no instante da aplicação do pré-esforço.

4.3.4 Perdas devidas à relaxação a curto prazo (ΔP_r)

As perdas devidas à relaxação inicial das armaduras ocorrem desde o instante da aplicação do pré-esforço no dispositivo de amarração na mesa até à transmissão do pré-esforço para os elementos de betão. As perdas devidas à relaxação da armadura são tratadas adiante, na secção 4.4.4.

4.3.5 Perdas devidas à deformação elástica do betão (ΔP_{el})

No caso de pré-tensionamento das armaduras, deve ter-se em conta que a transmissão se processa em simultâneo do conjunto dessas armaduras para os elementos de betão.

A perda de tensão na armadura de pré-esforço situada no nível i , devida à deformação elástica do betão é calculada pela expressão:

$$\Delta\sigma_{p,el}^{(i)} = \frac{E_p}{E_{cm}(t)} \sigma_{c,pmax}^{(i)} \quad (4.4)$$

em que:

$\sigma_{c,pmax}^{(i)}$: tensão de compressão no betão ao nível da armadura, situada no nível i , devida à força de pré-esforço máxima (*);

E_p : módulo de elasticidade da armadura de pré-esforço;

$E_{cm}(t)$: módulo de elasticidade do betão à idade de t dias, que, de acordo com EC2-1, 3.1.3(3), pode ser estimado por:

$$E_{cm}(t) = (f_{cm}(t)/f_{cm})^{0,3} \cdot E_{cm} \quad (4.5)$$

em que:

f_{cm} : tensão média de rotura do betão à compressão aos 28 dias de idade, de acordo com EC2-1, Quadro 3.1;

E_{cm} : módulo de elasticidade do betão aos 28 dias de idade, que, de acordo com EC2-1, Quadro 3.1, é dado por:

$$E_{cm} = 22 (f_{cm}/10)^{0,3} \quad (4.6)$$

em que

(*) Caso não se considerem as outras perdas instantâneas, atrás referidas, que eventualmente se processam antes da transmissão do pré-esforço

$f_{cm}(t)$: tensão média de rotura do betão à compressão aos t dias de idade, dada pela expressão (*):

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) \cdot f_{cm} \quad (4.7)$$

com:

$$\beta_{cc}(t) = \exp \left[s \left(1 - \frac{28}{t} \cdot f_{cm} \right)^{0,5} \right] \quad (4.8)$$

em que

$\beta_{cc}(t)$: coeficiente que depende da idade do betão, t (dias);

s : coeficiente que depende do tipo de cimento:

= 0,20 para cimento das classes de resistência CEM 42,5 R, CEM 52,5 N, CEM 52,5 R (Classe R);

= 0,25 para cimento das classes de resistência CEM 32,5 R, CEM 42,5 N (Classe N);

= 0,38 para cimento das classes de resistência CEM 32,5 N (Classe S).

4.4 Perdas de pré-esforço diferidas

4.4.1 Perdas a considerar

As perdas diferidas poderão ser calculadas considerando as duas causas seguintes da redução da tensão na armadura:

- redução da extensão no aço provocada pela deformação do betão devida à fluência, sob ações permanentes, e à retração do betão;
- redução da tensão no aço devida à relaxação da armadura de pré-esforço.

A fluência e a retração do betão dependem da humidade ambiente, das dimensões do elemento e da composição do betão. A fluência também depende da idade do betão no primeiro carregamento assim como da duração e da intensidade da carga.

No que se segue abordar-se-ão os fenómenos independentemente. No entanto, existindo um carácter de interdependência destes fenómenos, será no final introduzido o critério de cálculo que, de acordo com o EC2-1, deverá ser adotado para o cálculo das perdas diferidas resultantes dos mesmos.

(*) A tensão de rotura do betão à compressão numa idade t depende do tipo de cimento, da temperatura e das condições de cura. A expressão apresentada estima um valor da tensão de rotura para uma temperatura média de 20° C e uma cura de acordo com a norma NP EN 12390-2:2019.

4.4.2 Perdas devidas à fluência do betão

A deformação do betão por fluência, $\varepsilon_{cc}(t, t_0)$, na idade t , para uma tensão de compressão constante, aplicada na idade do betão t_0 , é obtida por:

$$\varepsilon_{cc}(t, t_0) = \varphi(t, t_0) \cdot \frac{\sigma_{c,t_0}}{E_c} \quad (4.9)$$

em que:

σ_{c,t_0} : tensão constante aplicada na idade t_0 , desde que $\sigma_{c,t_0} \leq 0,45 f_{ck}(t_0)$, sendo $f_{ck}(t_0)$ o valor característico da tensão de rotura de betão na idade t_0 ;

E_c : módulo de elasticidade tangente, que, de acordo com EC2-1, 3.1.4(2), poderá ser determinado por:

$$E_c = 1,05 \cdot E_{cm} \quad (4.10)$$

em que:

E_{cm} : módulo de elasticidade secante, entre 0 e $0,4 \cdot f_{cm}$ aos 28 dias de idade, em GPa, que, de acordo com EC2-1, Quadro 3.1, pode ser determinado por:

$$E_{cm} = 22 \left[\frac{f_{cm}}{10} \right]^{0,3} \quad (4.11)$$

em que:

f_{cm} : valor médio da tensão de rotura do betão à compressão aos 28 dias de idade, em MPa, que é igual a $f_{ck} + 8$, sendo f_{ck} o valor característico da tensão de rotura do betão em provetes cilíndricos

Quando a tensão de compressão de betão na idade t_0 excede o valor de $0,45 f_{ck}(t_0)$ deverá considerar-se a não linearidade da fluência.

Neste caso, o coeficiente teórico de fluência não linear deverá ser obtido por:

$$\varphi_{nl}(t, t_0) = \varphi(t, t_0) \cdot \exp(1,5(K_\sigma - 0,45)) \quad (*) \quad (4.12)$$

em que:

$\varphi_{nl}(t, t_0)$: coeficiente teórico de fluência não linear, que substitui $\varphi(t, t_0)$;

k_σ : razão tensões-resistências $\frac{\sigma_c}{f_{ck}(t_0)}$, em que σ_c é a tensão de compressão e $f_{ck}(t_0)$ é o valor característico da tensão de rotura à compressão do betão na data de carregamento.

(*) Nota: $\exp()$ corresponde a $e^{()}$

O coeficiente de fluência $\varphi(t, t_0)$ pode ser determinado, de acordo com o EC2-1, Anexo B, a partir de:

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_0 \cdot \beta_c(t, t_0) \quad (4.13)$$

em que:

φ_0 : coeficiente de fluência que pode ser calculado a partir de:

$$\varphi_0 = \varphi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_0) \quad (4.14)$$

em que:

φ_{RH} : factor que, tendo em conta a influência da humidade relativa no coeficiente da fluência, é dado por:

$$\varphi_{RH} = 1 + \frac{1 - \frac{RH}{100}}{0,1 \cdot \sqrt[3]{h_0}} \quad \text{para } f_{cm} \leq 35 \text{ MPa} \quad (4.15)$$

$$\varphi_{RH} = \left[1 + \frac{1 - \frac{RH}{100}}{0,1 \cdot \sqrt[3]{h_0}} \cdot \alpha_1 \right] \cdot \alpha_2 \quad \text{para } f_{cm} > 35 \text{ MPa} \quad (4.16)$$

em que:

RH : humidade relativa do meio ambiente (%);

α_1/α_2 : coeficientes que têm em conta a influência da resistência do betão:

$$\alpha_1 = \left[\frac{35}{f_{cm}} \right]^{0,7} \quad (4.17)$$

$$\alpha_2 = \left[\frac{35}{f_{cm}} \right]^{0,2} \quad (4.18)$$

h_0 : espessura equivalente do elemento, em mm, dada por:

$$h_0 = \frac{2A_c}{u} \quad (4.19)$$

em que:

A_c : área da secção transversal

u : parte do perímetro em contacto com o ambiente

$\beta(f_{cm})$: fator que tem em conta a resistência de betão no coeficiente de fluência convencional:

$$\beta(f_{cm}) = \frac{16,8}{\sqrt{f_{cm}}} \quad (4.20)$$

em que:

f_{cm} : valor médio da tensão de rutura de betão à compressão, em MPa, aos 28 dias de idade

$\beta(t_0)$: factor que tem em conta a influência da idade de betão à data de carregamento no coeficiente de fluência:

$$\beta(t_0) = \frac{1}{0,1 + t_0^{0,20}} \quad (4.21)$$

$\beta_c(t, t_0)$: coeficiente que traduz a evolução da fluência no tempo, após o carregamento e que poderá ser estimado pela seguinte expressão:

$$\beta_c(t, t_0) = \left(\frac{t - t_0}{\beta_H + t - t_0} \right)^{0,3} \quad (4.22)$$

em que:

t : idade de betão, em dias, na data considerada;

t_0 : idade de betão, em dias, na data do carregamento;

$t - t_0$: duração do carregamento, em dias;

β_H : coeficiente que depende da humidade relativa (RH , em %) e da espessura equivalente do elemento (h , em mm), podendo ser estimado a partir de:

$$\beta_H = 1,5 [1 + (0,012RH)^{18}] h_0 + 250 \leq 1500 \quad \text{para } f_{cm} \leq 35 \text{ MPa} \quad (4.23)$$

$$\beta_H = 1,5 [1 + (0,012RH)^{18}] h_0 + 250 \alpha_3 \leq 1500 \alpha_3 \quad \text{para } f_{cm} \geq 35 \text{ MPa} \quad (4.24)$$

em que:

α_3 : coeficiente que tem em conta a influência da resistência do betão:

$$\alpha_3 = \left(\frac{35}{f_{cm}} \right)^{0,5} \quad (4.25)$$

4.4.3 Perdas devidas à retração do betão

A extensão total de retração do betão, ε_{cs} , é constituída por duas componentes, a extensão de retração por secagem e a extensão de retração autógena (EC2-1, 3.1.4(6)).

A extensão de retração por secagem evolui lentamente, uma vez que é função da migração da água através do betão endurecido.

A extensão de retração autógena desenvolve-se durante o endurecimento de betão, ou seja, desenvolve-se na sua maior parte nos primeiros dias após a betonagem.

Assim o valor da extensão total de retração é igual a:

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca} \quad (4.26)$$

em que:

ε_{cs} : extensão total de retração;

ε_{cd} : extensão de retração por secagem;

ε_{ca} : extensão de retração autógena.

A evolução com o tempo da extensão de retração por secagem, $\varepsilon_{cd}(t)$ é obtida por:

$$\varepsilon_{cd}(t) = \beta_{ds}(t, t_s) \cdot k_h \cdot \varepsilon_{cd,0} \quad (4.27)$$

em que:

$\beta_{ds}(t, t_s)$ é um factor dado por:

$$\beta_{ds}(t, t_s) = \frac{(t - t_s)}{(t - t_s) + 0,04 \sqrt{h_0^3}} \quad (4.28)$$

em que:

t : idade do betão na data considerada, em dias;

t_s : idade do betão (dias) no início da retração por secagem; normalmente corresponde ao fim da cura;

h_0 : espessura equivalente (em mm) da secção transversal dada por:

$$h_0 = \frac{2A_c}{u} \quad (4.29)$$

em que:

A_c : área da secção transversal do betão

u : perímetro da parte da secção transversal exposta à secagem

k_h : coeficiente que depende da espessura equivalente, h_0 , e que, de acordo com EC2-1, Quadro 3.3, tem os seguintes valores:

= 1,0 para $h_0=100$

= 0,85 para $h_0=200$

= 0,75 para $h_0=300$

= 0,70 para $h_0=500$

$\varepsilon_{cd,0}$: extensão de retração por secagem de referência, que, de acordo com EC2-1, Anexo B.2, é calculada por:

$$\varepsilon_{cd,0} = 0,85 \left[(220 + 110 \cdot \alpha_{ds1}) \cdot \exp\left(\alpha_{ds2} \cdot \frac{f_{cm}}{f_{cm0}}\right) \right] \cdot 10^{-6} \cdot \beta_{RH} \quad (4.30)$$

$$\beta_{RH} = 1,55 \left[1 - \left(\frac{RH}{RH_0}\right)^3 \right] \quad (4.31)$$

em que:

f_{cm} : valor médio da tensão de rotura do betão à compressão (MPa);

$f_{cm0} = 10$ MPa;

α_{ds1} : coeficiente que depende do tipo de cimento (*)

= 3 para cimento da Classe S

= 4 para cimento da Classe N

= 5 para cimento da Classe R

α_{ds2} : coeficiente que depende do tipo de cimento

= 0.13 para cimento da Classe S

= 0.12 para cimento da Classe N

= 0.11 para cimento da Classe R

RH : humidade relativa ambiente (%)

RH_0 : 100%

A extensão de retração autógena é obtida por:

$$\varepsilon_{ca}(t) = \beta_{as}(t) \cdot \varepsilon_{ca}(\infty) \quad (4.32)$$

em que:

$\varepsilon_{ca}(\infty)$: extensão de retração autógena a $t = \infty$, dada por:

$$\varepsilon_{ca}(\infty) = 2,5 \cdot (f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6} \quad (4.33)$$

$\beta_{as}(t)$: factor dado por:

$$\beta_{as}(t) = 1 - \exp(-0,2t^{0,5}) \quad (4.34)$$

em que:

t : idade do betão na data considerada, em dias.

(*) De acordo com EC2-1, 3.1.2(6), os tipos de cimento são:

- cimento da Classe S (CEM 32,5 N)
- cimento da Classe N (CEM 32,5 R e CEM 42,5 N)
- cimento da Classe R (CEM 42,5 R, CEM 52,5 N e CEM 52,5 R)

4.4.4 Perdas devidas à relaxação na armadura de pré-esforço

A relaxação é a perda de tensão ao longo do tempo, que ocorre em armaduras sujeitas a tensão elevada.

A perda de tensão por relaxação na armadura de pré-esforço, de acordo com o EC2-1, 3.3.2(7), poderá ser obtida a partir dos certificados de ensaio dos fabricantes ou definida como a relação, em percentagem, entre a variação da tensão de pré-esforço e a tensão inicial de pré-esforço, determinada aplicando uma das seguintes expressões, em correspondência com o tipo de armadura utilizada, de cada uma das classes de relaxação:

Classe 1 - Fios ou cordões de armadura de pré-esforço de relaxação normal

$$\frac{\Delta\sigma_{pr}}{\sigma_{pi}} = 5,39 \cdot \rho_{1000} \cdot e^{6,7\mu} \left(\frac{t}{1000}\right)^{0,75(1-\mu)} \cdot 10^{-5} \quad (4.35)$$

Classe 2 - Fios ou cordões de armadura de pré-esforço de baixa relaxação

$$\frac{\Delta\sigma_{pr}}{\sigma_{pi}} = 0,66 \cdot \rho_{1000} \cdot e^{9,3\mu} \left(\frac{t}{1000}\right)^{0,75(1-\mu)} \cdot 10^{-5} \quad (4.36)$$

Classe 3 - Barras laminadas a quente e com tratamento complementar

$$\frac{\Delta\sigma_{pr}}{\sigma_{pi}} = 1,98 \cdot \rho_{1000} \cdot e^{8\mu} \left(\frac{t}{1000}\right)^{0,75(1-\mu)} \cdot 10^{-5} \quad (4.37)$$

em que:

$\Delta\sigma_{pr}$: valor absoluto das perdas de pré-esforço devidas à relaxação;

σ_{pi} : no caso presente, de pré-esforço por pré-tensão, é a tensão de tração máxima aplicada na armadura de pré-esforço após a dedução das perdas que ocorrem durante as operações de pré-esforço (perdas devidas ao atrito nas cruzetas existentes no lado da ancoragem ativa e as perdas por deslizamento nos dispositivos de ancoragem), tal como referido em EC2-1, 5.10.4(1)(i);

t : tempo depois da aplicação de pré-esforço (em horas);

$\mu = \frac{\sigma_{pi}}{f_{pk}}$, em que f_{pk} é o valor característico da resistência à tração do aço de pré-esforço;

ρ_{1000} : valor da perda devida à relaxação (em %) às 1000 h depois da aplicação de pré-esforço a uma temperatura média de 20°C:

= 8 % para armadura de Classe 1;

= 2,5 % para armadura de Classe 2;

= 4 % para armadura de Classe 3.

Os valores a longo prazo (finais) das perdas devidas à relaxação poderão ser estimados para $t = 500\,000\ h$ (57 anos).

As perdas devidas à relaxação são muito sensíveis à temperatura do aço.

Nos casos em que se aplica um tratamento térmico ao betão (por exemplo, cura por meio de vapor) aplica-se o disposto em EC2-1, 10.3.2.1

Nestes casos, às expressões atrás apresentadas, que dão as perdas devidas à relaxação, deverá adicionar-se uma idade equivalente, t_{eq} , à idade depois da aplicação do pré-esforço, t , para ter em conta os efeitos do tratamento térmico na perda de pré-esforço devida à relaxação.

A idade equivalente pode ser estimada a partir da expressão:

$$t_{eq} = \frac{1,14^{T_{m\acute{a}x}-20}}{T_{m\acute{a}x} - 20} \sum_{i=1}^n (T_{(\Delta t_i)} - 20)\Delta t_i \quad (4.38)$$

em que:

t_{eq} : idade equivalente (em horas);

$T_{(\Delta t_i)}$: temperatura (em °C) durante o intervalo de tempo Δt_i ;

$T_{m\acute{a}x}$: temperatura máxima (em °C) durante o tratamento térmico.

Nos outros casos, de acordo com EC2-1, 3.3.2(9), quando a temperatura é superior a 50 °C, as perdas devidas à relaxação deverão ser verificadas.

4.4.5 Perdas diferidas resultantes da fluência e retração do betão e da relaxação da armadura de pré-esforço

As perdas de tensão devidas à ação conjunta e interdependente da fluência e retração do betão e da relaxação da armadura de pré-esforço, ΔP_{c+s+r} , no instante t , podem ser determinadas pela expressão:

$$\Delta P_{c+s+r} = A_p \Delta \sigma_{p,c+s+r} = A_p \frac{\varepsilon_{cs} E_p + 0,8 \Delta \sigma_{pr} + \frac{E_p}{E_{cm}} \varphi(t, t_0) \cdot \sigma_{c,QP}}{1 + \frac{E_p}{E_{cm}} \frac{A_p}{A_c} \left(1 + \frac{A_c}{I_c} z_{cp}^2\right) [1 + 0,8 \varphi(t, t_0)]} \quad (4.39)$$

em que:

$\Delta \sigma_{p,c+s+r}$: valor absoluto da variação de tensão nas armaduras devida à fluência e à retração do betão e à relaxação da armadura, no instante t ;

ε_{cs} : extensão estimada de retração em valor absoluto;

E_p : módulo de elasticidade do aço de pré-esforço;

E_{cm} : módulo de elasticidade do betão;

$\Delta \sigma_{pr}$: valor absoluto da variação de tensão nas armaduras no instante t , devida à relaxação do aço de pré-esforço. É determinado para uma tensão $\sigma_p = \sigma_p (G + P_{m0} + \psi_2 Q)$, em que $\sigma_p = \sigma_p (G + P_{m0} + \psi_2 Q)$ é a tensão inicial nas armaduras devida ao pré-esforço inicial e às ações quase-permanentes;

$\varphi(t, t_0)$: coeficiente de fluência no instante t para uma aplicação das cargas no instante t_0 ;

$\sigma_{c,QP}$: tensão no betão ao nível das armaduras, devida ao peso próprio e ao pré-esforço inicial e, sempre que for relevante, a outras ações quase-permanentes. O valor de $\sigma_{c,QP}$ poderá resultar de parte do peso próprio e do pré-esforço inicial ou da combinação de ações quase-permanente considerada na sua totalidade ($\sigma_c (G + P_{m0} + \psi_2 Q)$), consoante a fase de construção considerada;

A_p : área de todas as armaduras de pré-esforço;

A_c : área da secção transversal de betão;

I_c : momento de inércia da secção de betão;

z_{cp} : distância entre o centro de gravidade da secção de betão e as armaduras de pré-esforço.

5 | Observações finais

Referiram-se no capítulo anterior os valores máximos de força de pré-esforço que podem ser aplicados na armadura de elementos prefabricados de betão e as perdas que essa força de pré-esforço pode registar ao longo do tempo.

Na Figura 5.1 apresenta-se a evolução do valor do pré-esforço no tempo com indicação dos diferentes tipos de perdas de pré-esforço.

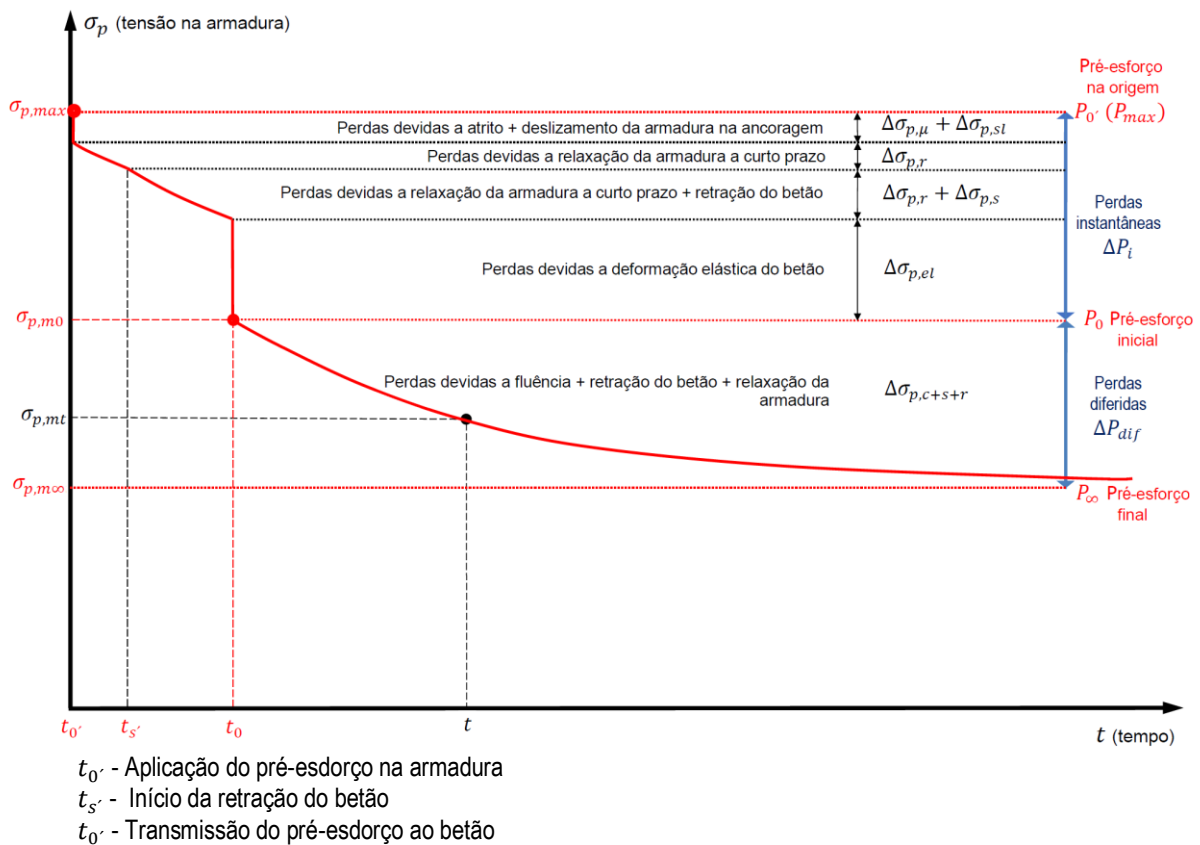


Figura 5.1 – Variação do valor do pré-esforço na armadura ao longo do tempo

As perdas mais significativas devem-se à deformação instantânea do betão, na data em que se processa a transmissão do pré-esforço aplicado na armadura, e às deformações que se produzem no betão, ao longo do tempo, devidas à sua fluência, tendo em conta os esforços de compressão a que se encontra sujeito de forma permanente por via do pré-esforço, e às deformações que se produzem no betão também ao longo do tempo, devidas à sua retração. Estes dois fenómenos, fluência e retração do betão, são responsáveis por perdas de pré-esforço usualmente entre 10 a 25% do valor da força de pré-esforço inicial.

Por outro lado, devido à relaxação do aço, as perdas também poderiam ser relativamente elevadas, mas a utilização de armaduras de aço de baixa relaxação, permite que usualmente esta componente das perdas seja inferior a 5%.

As perdas devidas ao atrito e ao deslizamento da armadura nos dispositivos de posicionamento e de amarração na ancoragem ativa podem ser controladas e compensadas durante a operação de aplicação do pré-esforço à armadura, pelo que nas situações em que estas condições se verificam, não devem ser contabilizadas.

Os critérios que se apresentam no capítulo anterior para a determinação das perdas de pré-esforço baseiam-se essencialmente nas disposições do EC2-1, recentemente transposto para a ordem jurídica nacional e, conseqüentemente, devem ser os critérios a utilizar na verificação da segurança estrutural dos pavimentos em que os elementos prefabricados de betão pré-esforçado se inserem.

Da análise da formulação apresentada pode concluir-se que a deformação por fluência do betão depende de diversos fatores, nomeadamente, da humidade relativa do ambiente envolvente do betão (RH), da espessura equivalente do elemento prefabricado (h_0), da resistência do betão aos 28 dias (f_{cm}), da idade do betão na data de transmissão do pré-esforço (t_0) e da idade do betão a que se quer conhecer essa deformação (t), e que a deformação por retração do betão depende dos mesmos fatores a que acresce o tipo de cimento utilizado no betão.

A relaxação da armadura depende do tipo de armadura utilizada, mas também do nível da tensão instalada na armadura devida ao pré-esforço, aumentando com o valor da razão entre essa tensão e a tensão de rotura do aço da armadura. A relaxação também aumenta rapidamente com o aumento da temperatura. Nos anos recentes, a utilização de aço de baixa relaxação tem permitido a minimização das perdas de pré-esforço resultantes da relaxação.

A importância do pré-esforço nos elementos estruturais a funcionar em flexão, neste caso dos pavimentos prefabricados, é significativa, permitindo a melhoria do seu comportamento no que diz respeito aos estados limites de utilização e à durabilidade desses elementos.

O presente estudo foi financiado pelo Projeto do Plano de Investigação e Inovação (P2I) do LNEC
“COMPAV -- Comportamento estrutural / sísmico de pavimentos prefabricados de betão”.

Lisboa, LNEC, junho de 2021

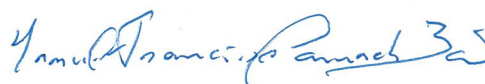
VISTOS

O Chefe do Núcleo de Economia, Gestão e
Tecnologia da Construção



Álvaro Vale e Azevedo

AUTORIA



Manuel Francisco C. Baião
Investigador Principal

O Diretor do Departamento de Edifícios



Jorge M. Grandão Lopes

Referências bibliográficas

- E 435-2012 – **Pavimentos aligeirados de vigotas prefabricadas. Vigotas prefabricadas de betão pré-esforçado. Conceção, cálculo, fabrico e ensaios.** Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2012.
- E 436-1995 – **Pavimentos aligeirados de vigotas prefabricadas. Blocos de cofragem. Conceção, fabrico e ensaios.** Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1995.
- EN 1991-1-6:2005 – **Eurocode 1 - Actions on structures. Part 1-6: General actions – Actions during execution.** European Committee for Standardization (CEN), June 2005. (EC1-1-6).
- NP EN 1168:2005+A3:2014 – **Produtos prefabricados de betão. Lajes alveoladas.** Caparica: Instituto Português da Qualidade, 2014.
- NP EN 1990:2009 – **Eurocódigo - Bases para o projeto de estruturas.** Instituto Português da Qualidade, 2009. (EC0).
- NP EN 1991-1-1:2009 – **Eurocódigo 1 - Ações em estruturas. Parte 1-1: Ações gerais - Pesos volúmicos, pesos próprios, sobrecargas em edifícios.** Instituto Português da Qualidade, 2009. (EC1-1-1).
- NP EN 1992-1-1:2010 – **Eurocódigo 2 - Projeto de estruturas de betão. Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios.** Instituto Português da Qualidade, 2010. (EC2-1-1).
- NP EN 13369:2010 – **Regras gerais para produtos prefabricados de betão.** Caparica: Instituto Português da Qualidade, 2010.
- NP EN 13747:2005+A2:2012 – **Produtos prefabricados de betão. Prelajes para pavimentos** Caparica: Instituto Português da Qualidade, 2012.
- NP EN 15037-1:2008 – **Produtos prefabricados de betão. Pavimentos com vigotas e blocos de cofragem. Parte 1: Vigotas.** Caparica: Instituto Português da Qualidade, 2008.
- REBAP, 1983 – **Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado.** Decreto-Lei nº 349-C/83, de 30 de julho e Decreto-Lei nº 357/85, de 2 de setembro.
- RGEU, 1951 – **Regulamento Geral das Edificações Urbanas.** Decreto-Lei n.º 38 382 de 7 de agosto de 1951 e alterações posteriores.
- RSA, 1983 – **Regulamento de Segurança e Ações para Estruturas de Edifícios e Pontes.** Decreto-Lei nº 235/83, de 31 de maio e Decreto-Lei nº 357/85, de 2 de setembro.