

AValiação DA SEGURANÇA EM PAVIMENTOS SEMI-PRÉ-FABRICADOS USANDO ELEMENTOS DO TIPO PRÉ-LAJE, DOTADOS DE ALIGEIRAMENTO



S. MACEDO PEIXOTO
Eq. Assistente
IPB
Bragança



A. SERRA NEVES
Prof. Associado
FEUP
Porto

SUMÁRIO

Apresenta-se um sistema de construção de pavimentos de edifícios recorrendo a painéis pré-fabricados e pré-esforçados com aligeiramento de betão leve incorporado. São descritos os critérios para a avaliação da segurança da laje resultante aos estados limites últimos e estados limites de utilização.

1. INTRODUÇÃO

O recurso a elementos pré-fabricados na construção de edifícios tem uma crescente utilização, não só porque conduz a soluções economicamente competitivas, mas também porque proporciona uma qualidade superior e processos construtivos simples.

Nas lajes de edifícios o peso próprio assume uma particular importância, pelo que se impõe o recurso a soluções aligeiradas. A utilização da técnica do pré-esforço nos elementos pré-fabricados permite a redução do seu peso próprio. Combinando estes dois aspectos, aligeiramento e pré-fabricação, foi possível criar uma solução de lajes do tipo pré-laje, que incorpora no elemento pré-fabricado o aligeiramento.

Neste trabalho é apresentado um sistema construtivo de lajes envolvendo elementos pré-fabricados pré-esforçados que incluem um aligeiramento com betão de argila expandida. São

discutidas as verificações de segurança estrutural aos estados limite últimos de resistência e aos estados limite de utilização, tendo em conta o processo construtivo e considerando o comportamento diferido dos betões envolvidos.

2. DESCRIÇÃO DO SISTEMA CONSTRUTIVO

Conjugando as vantagens do aligeiramento, com o efeito favorável da presença de uma “cofragem perdida” e com um comportamento semelhante ao de uma laje maciça, desenvolveu-se então uma nova solução de pavimento envolvendo um painel em betão pré-esforçado.

O painel é composto por uma pequena camada de betão pré-esforçada por pré-tensão com fios aderentes e apresenta uma superfície superior aderente. Sobre o painel é colocado um aligeiramento em betão de argila expandida que tem uma largura ajustável junto aos apoios. Em obra é colocada uma camada de betão armado (betão complementar) com função resistente, solidarizando o conjunto. Na figura 1 apresenta-se uma vista do elemento pré-fabricado final e na figura 2 apresenta-se um corte da laje resultante.

O funcionamento estrutural deste tipo de lajes é comparável ao de uma laje com armadura resistente unidireccional e com aligeiramento na alma da mesma.

Os materiais utilizados na pré-laje são o betão de classe C40/50 e aço de pré-esforço aderente da classe 1770, de baixa relaxação, de acordo com a Euronorm 138/79. O aligeiramento é constituído por betão leve com argila expandida, com um peso volúmico de 7 kN/m³, uma resistência à compressão de cerca de 1 MPa, e um módulo de elasticidade de 9,5 GPa. A armadura transversal colocada no painel sob o betão leve é da classe A500.

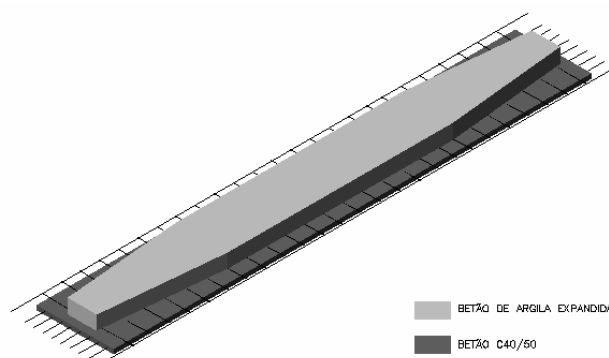


Figura 1: Vista em perspectiva de um painel

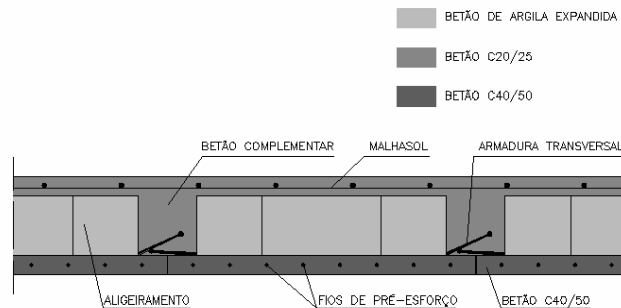


Figura 2: Corte transversal tipo dos pavimentos propostos

Os materiais utilizados em obra para conclusão da pavimento são o betão complementar da classe C20/25, armaduras de distribuição a colocar na camada de betão complementar da classe A500 e armaduras de continuidade sobre os apoios da classe A400 ou A500.

Os painéis propostos possuem uma largura de 80cm, valor condicionado pelo processo de transporte. A espessura da base do elemento é de 5 a 7cm, encontrando-se a armadura de pré-esforço à distância de 2,5cm da superfície inferior. O aligeiramento tem uma altura que é variável, entre 5 e 40cm. A largura do aligeiramento na zona central do vão do painel é de 65cm, enquanto junto aos apoios apresenta uma largura variável, dependendo da necessidade em termos de resistência ao esforço transversal. Junto aos apoios, o aligeiramento é interrompido a 10cm da extremidade do painel, de modo a garantir uma melhor solidarização da laje com os elementos de apoio.

3. AVALIAÇÃO DE SEGURANÇA

De acordo com a regulamentação de segurança de estruturas EC2 [2] devem ser verificados os estados limites de utilização (fendilhação e deformação) e os estados limites últimos de resistência.

3.1 Estado limite de deformação

3.1.1 Limites para as deformações

Uma deformação excessiva em lajes pode comprometer o desempenho e aspecto de uma laje, pelo que deve ser limitado a valores máximos admissíveis.

A norma ISO4356 [3] estabelece que tal limite é de 1/250 do vão e deve ser quantificado para combinações quase permanentes de acções. Pode no entanto usar-se uma contra-flecha que contudo não deve ultrapassar 1/250 do vão. Por outro lado as deformações provocadas por materiais de revestimento e equipamentos podem provocar avarias em alvenarias ou outros

elementos, pelo que também este acréscimo de deformação, que se designa por flecha activa, deve ser limitado. A mesma norma especifica para tal um limite de 1/500.

A regulamentação europeia considera de igual modo duas condições para o controle de deformações. A primeira refere-se à flecha activa e a segunda à flecha total. A flecha activa, é quantificada pela soma dos efeitos da fluência, retracção diferencial entre betão complementar e betão dos painéis, pré-esforço, acções permanentes aplicadas após a construção dos elementos secundários e as acções variáveis tomadas como acções de longa duração. O limite previsto pelo EC2 [2] para a flecha activa é de 1/500 do vão. A flecha total calculada para todas as acções envolvidas é limitada a 1/250 do vão segundo o projecto de norma europeia 229010-1 [4] aplicável a lajes de vigotas que possuem um comportamento similar.

A regulamentação actual portuguesa REBAP [5] estabelece que para combinações frequentes de acções o valor da flecha total não deve ultrapassar 1/400 do vão. No entanto, se tais deformações são susceptíveis de afectar paredes divisórias, a flecha é limitada a 1,5 cm. Na regulamentação portuguesa não se distingue a flecha activa da total.

3.1.1 Quantificação das deformações

Em Portugal, para pavimentos similares realizados com vigotas pré-fabricadas e pré-esforçadas, determina-se [6] a flecha máxima a meio vão de uma laje pela expressão

$$f = \frac{5 \cdot (g + \psi_1 \cdot q_k) \cdot l^4}{384 \cdot E_{c28} \cdot I} \cdot \left(1 + \frac{g}{g + \psi_1 \cdot q_k} \cdot \varphi\right) \quad (1)$$

onde:

- l - vão de laje considerando simplesmente apoiada
- g - valor das acções permanentes
- q_k - sobrecarga
- $E_{c28}I$ - factor de rigidez da laje
- φ - coeficiente de fluência
- ψ_1 - coeficiente de redução das sobrecargas

O referido projecto de norma europeia 229010-1 [4] quantifica a flecha activa pela expressão:

$$f_a = \frac{M \cdot (g' + g)}{9,6 \cdot E_{c\infty} \cdot K_a \cdot I} \cdot l^2 + \frac{M(q)}{9,6 \cdot E_{c28} K_a I} \cdot l^2 + \frac{M_s}{8 \cdot E_{c\infty} K_a I} \cdot l^2 - \frac{M_p}{8 \cdot E_{c\infty} K_a I} \cdot l^2 \quad (2)$$

onde o momento flector $M(g' + g)$ devido às acções permanentes é quantificado pela equação,

$$M(g' + g) = \frac{(k_1 \cdot g_1 + k_2 \cdot g_2 + k_3 \cdot g_3 + k_4 \cdot g_4) + g'}{8} \cdot l^2 \quad (3)$$

e o momento flector máximo devido às acções variáveis $M(q)$ é dado por

$$M(q) = \frac{q \cdot l^2}{8} \quad (4)$$

O momento flector devido à retracção diferencial entre o betão da pré-laje e o betão complementar M_s pode ser calculado pela expressão (5),

$$M_s = k_s \cdot S_p \cdot n_s \quad (5)$$

e o momento devido aos efeitos diferidos do pré-esforço é dado por:

$$M_p = k_p \cdot P_{m,o} \cdot e_p \quad (6)$$

os símbolos usados nas expressões (2) a (6) correspondem ao seguinte:

- g_1 – peso próprio do painel;
- g_2 – peso próprio da laje deduzido do peso próprio dos painéis;
- g_3 – peso próprio das paredes divisórias distribuído na laje;
- g_4 – peso próprio dos revestimentos em tectos e pisos;
- g^* - parte permanente das cargas aplicadas ao pavimento;
- q – valor das acções variáveis;
- S_p – momento estático da secção do painel relativamente ao eixo neutro da laje incluindo o betão complementar;
- n_s – tensão de tracção nos painéis devido à retracção impedida do betão complementar cujo valor pode ser considerado 3 MPa;
- $P_{m,o}$ – valor final do pré-esforço instalado;
- e_p – valor absoluto da excentricidade do pré-esforço, relativamente ao eixo neutro da secção resistente da laje;
- l – vão da laje;
- E_{c28} – valor médio do módulo de elasticidade tangente dos betão aos 28 dias;
- I – momento de inércia da secção do pavimento concluído;
- $E_{c\infty}$ - módulo de elasticidade a tempo infinito, $E_{c\infty} = \frac{E_{c28}}{\phi}$
- ϕ - coeficiente de fluência;
- k_a – coeficiente que tem em conta o aumento de rigidez devido ao aligeiramento utilizado no pavimento, podendo ser tomado igual a 1 (aligeiramento não resistente);
- $k_1, k_2, k_3, k_4, k_s, k_p$ – coeficientes que têm em conta o efeito diferido das várias acções e cujos valores se reproduzem na Tabela 1.

Tabela 1: Valores dos coeficientes k

Tempo de armazenagem dos painéis (1)	k_1	k_2	k_3	k_4 (2)	k_s	k_p
Superior a 3 semanas	1/10	1/2	2/3	1	1/3	1/10
Inferior ou igual a 3 semanas	1/5	1/2	2/3	1	1/5	1/5

(1) O tempo de armazenagem é o que decorre entre o fabrico dos painéis e o da betonagem da laje.

(2) O valor de $k_4=1$ pressupõe que os acabamentos do piso e tecto são realizados após a execução das alvenarias

A flecha total pode ser calculada pela expressão (7), que adiciona à flecha activa a flecha associada à totalidade das acções permanentes.

$$f_{total} = f_a + \frac{5 \cdot g \cdot l^4}{384 \cdot E_{c28} \cdot I} \quad (7)$$

onde,

f_a – flecha activa;

g – valor total das acções permanentes.

3.2 Estado limite de fendilhação

O principal objectivo do controle de fendilhação é o de assegurar a durabilidade da estrutura face à agressividade do ambiente. No caso presente, sendo os painéis pré-fabricados dotados de fios de pré-esforço, esta preocupação assume particular importância.

O controle da fendilhação é efectuado geralmente através da quantificação directa da abertura de fendas ou pelos valores das tensões instaladas. Podem também ser adoptadas regras simplificadas e disposições construtivas.

A regulamentação portuguesa REBAP [5] estabelece que para situações que envolvam armaduras de pré-esforço, o controle de fendilhação para ambiente pouco (moderadamente) agressivo seja efectuado através da largura de fendas $w \leq 0,2\text{mm}$ (0,1mm) para combinações frequentes de acções e através do estado limite de descompressão para combinações quase permanentes. Na prática, o controle da abertura de fendas é geralmente substituído pelo controle do início de fendilhação que se considera verificado quando a tensão no betão não atinge o valor característico inferior da resistência do betão à tracção f_{ctk} .

A regulamentação europeia EC2 [2], para classes de exposição (X0, XC1) equivalentes a ambiente pouco agressivo, impõe limites de 0,2mm para a abertura de fendas (combinações frequentes de acções). Se o ambiente é equivalente a moderadamente agressivo (X2, XC3, XC4) obriga ainda a verificar o estado limite de descompressão (para combinações quase permanentes de acções).

A legislação europeia [4] aplicável a pavimentos dotados de vigotas pré-esforçadas, pode aplicar-se às lajes em estudo com as convenientes adaptações. Nesta pré-norma as tensões no betão que envolvem as armaduras de pré-esforço podem atingir para combinações frequentes:

- $2 \cdot f_{ctk}$ (ambiente seco)
- $1,5 \cdot f_{ctk}$ (ambiente húmido)

A quantificação da abertura de fendas e tensões no betão pode ser efectuada de acordo com a formulação apresentada na regulamentação europeia EC2 [2], para a quantificação do valor característico da abertura de fendas w_k .

3.3 Estados limite últimos de resistência

A verificação dos estados limite últimos de resistência é efectuada através da comparação dos esforços de cálculo instalados com os esforços resistentes de cálculo.

O valor de cálculo do momento resistente é avaliado de acordo com os critérios gerais do EC2 [2] ou REBAP [5]. Geralmente a rotura é condicionada pelo aço.

Os processos adoptados pela regulamentação para a verificação da segurança relativamente ao esforço transversal têm tido modificações significativas, sendo consensual que a formulação proposta pelo EC2 [2] é a mais adequada.

De acordo com o EC2 [2] devem considerar-se duas situações conforme a secção está ou não fendilhada. Considera-se que a secção não está fendilhada quando a tensão máxima de tracção instalada no betão não ultrapassa $f_{ctk}/1,5$ [4].

A capacidade resistente ao esforço transversal em secção não fendilhada é limitada pela expressão (8):

$$V_{Rd,ct} = \frac{I \cdot b_w}{S} \cdot \sqrt{f_{ctd}^2 + \alpha_l \cdot \sigma_{cp} \cdot f_{ctd}} \quad (8)$$

em que:

- I – momento de inércia da secção transversal;
- b_w – largura da secção ao nível do eixo baricêntrico da secção;
- S – momento estático da secção transversal;
- f_{ctd} – valor de cálculo da resistência à tracção do betão $f_{ctk,0,05}/\gamma_s$;
- $\alpha_l = l_x/l_{pt2}$
- l_x – distância da extremidade do elemento até à secção considerada;
- l_{pt2} – limite superior do comprimento para a transmissão ($l_{pt2}=1,2 l_{pt}$ de acordo com [2]);
- l_{pt} – comprimento de referência para a transmissão do pré-esforço de acordo com [2];
- σ_{cp} – tensão de compressão do betão ao nível do eixo baricêntrico da secção devido à força de pré-esforço instalada.

A pré-norma europeia aplicável a lajes de vigotas pode aqui também ser adaptada. De acordo com o seu articulado, é imposto um limite para o valor de cálculo da tensão de corte na secção calculado pela expressão (9):

$$\tau_{Sd} = \frac{S \cdot V_{Sd}}{b \cdot I} \leq \frac{0,8 \cdot f_{ctk,0,05}}{\gamma_c} \quad (9)$$

em que b é a largura da secção (nervuras) e as restantes variáveis possuem o significado já referido.

Quando a secção está fendilhada, de acordo com o EC2 [2] o valor de cálculo do esforço transversal resistente em secções que não possuem armadura específica de esforço transversal, como acontece no caso presente, é avaliado pela expressão:

$$V_{Rd,ct} = \left(\frac{0,18}{\gamma_c} \cdot k \cdot (100 \cdot f_{ck} \cdot \rho_l)^{1/3} \right) \cdot b_w \cdot d \quad (10)$$

em que:

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0 \quad (d \text{ em mm})$$

$$\rho_l = \frac{A_{sl}}{b_w \cdot d} \leq 0,02$$

A_{sl} – área da armadura longitudinal de tracção;

f_{ck} – tensão característica da resistência à compressão do betão em (MPa).

5. AGRADECIMENTOS

Os autores desta comunicação agradecem à PAILECA S.A. o apoio dado no desenvolvimento deste sistema construtivo.

6. REFERÊNCIAS

- [1] Serra Neves, A.; Peixoto, S. Macedo - "Desenvolvimento de um Sistema de Lajes Aligeiradas Usando Elementos Pré-fabricados do Tipo Pré-laje", no *V Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto*, São Paulo – Brasil, 2003, 17p.
- [2] EC 2 – prENV 1992 – 1 – 1 Eurocódigo 2: Projecto de Estruturas de Betão – Regras Gerais e Regras para Edifícios.
- [3] ISO4356, “Basis for design of Structures – Deformations of Buildings at Serviceability Limit States”, Edition Nov. 1977
- [4] Projecto de norma Europeia 229010-1 – “Precast Concrete Products – Beams for Beam and Block Floor Systems”, CEN, Bruxelles.
- [5] REBAP. Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-esforçado. Dec. - Lei nº349-C/83. Imprensa Nacional, Casa da Moeda, Lisboa.
- [6] Documento de homologação DH 572 “PAVILECA: Pavimentos aligeirados de vigotas prefabricadas de betão pré-esforçado”, Lisboa, 1999, 52p. LNEC.