

Dimensionamento de armaduras mínimas em lajes restringidas considerando a interação solo-estrutura

Design of minimum reinforcement for restrained slabs considering soil-structure interaction

Carlos Sousa
Rui Faria
Emanuel Felisberto

Resumo

O controlo da fissuração, em lajes restringidas, conduz frequentemente a uma armadura requerida superior àquela que é necessária para a verificação dos estados limites últimos. Diversos estudos têm sido realizados sobre este tema, considerando os efeitos combinados das deformações impostas restringidas e das ações gravíticas. Tais trabalhos incidem geralmente sobre a análise de lajes em que a restrição à sua deformação axial é muito severa, impedindo o movimento das extremidades da laje em estudo. Sabe-se que, em numerosas situações práticas, essa restrição é na realidade mais ligeira. Neste contexto, o artigo apresenta o estudo de uma estrutura apoiada através de fundações diretas em solo residual do granito, avaliando-se o modo como a interação entre o solo e a estrutura contribui para diminuir a restrição à deformação axial de lajes. Recorre-se a análises não-lineares, com modelos de elementos finitos de fissuração distribuída para o betão.

Abstract

Crack control, in restrained slabs, frequently leads to a required reinforcement greater than the one needed for ultimate limit state verifications. Several studies have been devoted to this topic, considering the combined effects of restrained imposed deformations and vertical loads. In general, these works focus on the analysis of severely restrained slabs, in which the horizontal movement is totally prevented at their extremities. It is well known that in numerous practical applications the restraint is, in reality, lighter. In this context, the article presents the analysis of a structure supported by direct foundations in a soil from residual granite. Influence of soil-structure interaction, and of the inherent relaxation of the restraint to the slabs' axial deformation, are assessed. The study is supported by nonlinear analyses, with finite element models where a distributed crack approach is adopted for concrete.

Palavras-chave: Fissuração / Retração / Fluência / Laje restringida / Análise não-linear

Keywords: Cracking / Shrinkage / Creep / Restrained slab / Nonlinear analysis

Carlos Sousa

CONSTRUCT-LABEST
Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto
Porto, Portugal
cfsousa@fe.up.pt

Rui Faria

CONSTRUCT-LABEST
Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto
Porto, Portugal
rfaria@fe.up.pt

Emanuel Felisberto

CONSTRUCT-LABEST
Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto
Porto, Portugal
emanuelandre@fe.up.pt

Aviso legal

As opiniões manifestadas na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

Legal notice

The views expressed in the Portuguese Journal of Structural Engineering are the sole responsibility of the authors.

SOUSA, C. [et al.] – Dimensionamento de armaduras mínimas em lajes restringidas considerando a interação solo-estrutura. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 5. ISSN 2183-8488. (novembro 2017) 73-80.

1 Introdução

Têm sido realizados, recentemente, diversos trabalhos procurando desenvolver e melhorar os procedimentos para quantificação das armaduras mínimas que garantam o controlo da fissuração em lajes de edifícios onde as deformações por retração são restringidas por paredes rígidas [1-5]. Um dos objetivos desses trabalhos é o estabelecimento de recomendações práticas para o valor do esforço axial a considerar na determinação da abertura de fendas em estado limite de serviço. Essas recomendações práticas são importantes porque, por um lado, o valor do referido esforço axial influencia fortemente o valor da abertura de fendas em fase de serviço (e portanto a quantidade de armadura requerida para limitar a abertura de fendas a um dado valor regulamentar). Por outro lado, a determinação, caso a caso, desse esforço, recorrendo a análises detalhadas (análises não-lineares considerando o faseamento construtivo e os efeitos da fissuração) não é praticável em situações correntes de projeto.

O desenvolvimento de recomendações práticas de projeto tem então sido feito através de análises paramétricas não-lineares com modelos de elementos finitos, simulando o comportamento das lajes de edifícios com consideração dos efeitos da retração e fluência do betão, da fissuração e do faseamento construtivo. Mesmo tratando-se de análises detalhadas, há necessariamente simplificações envolvidas, nomeadamente na forma como são modelados os elementos que restringem a livre deformação das lajes (paredes e respetivas fundações, geralmente). Um dos aspetos que têm sido ignorados nos trabalhos já publicados é a interação solo-estrutura. No presente estudo avalia-se então a importância dessa interação, no contexto de análises não-lineares efetuadas com o software DIANA. Consideram-se dois cenários limite em termos de rigidez e resistência do solo de fundação: solo residual do granito e rocha medianamente alterada. Com base nos resultados obtidos, apresentam-se recomendações práticas para projeto.

2 Metodologia de análise

Recorre-se a análises não-lineares com elementos finitos, utilizando uma metodologia previamente validada para o estudo do comportamento a longo prazo de elementos laminares em betão armado (BA). Usa-se o software DIANA [6].

A estrutura em estudo (descrita com mais detalhe na secção 3) é um edifício com lajes maciças (com funcionamento bidirecional) apoiadas em vigas e muros de BA. A discretização é feita com elementos finitos de casca, quadrangulares, com 8 nós por elemento e 5 graus de liberdade por nó (3 translações e 2 rotações, não incluindo, portanto, a rotação em torno do eixo normal ao folheto médio da laje). Ao longo da espessura, cada elemento finito é integrado numericamente.

O aço é modelado através de elementos finitos de armadura embecida. O modelo constitutivo adotado para estes elementos reproduz um comportamento elástico-perfeitamente plástico.

O comportamento não-linear do betão em tração é simulado recorrendo ao conceito de fissuração distribuída. É assim possível combinar os efeitos de fissuração com a simulação da retração,

fluência, variação de temperatura e evolução do módulo de elasticidade [7]. Para isso, o modelo adotado envolve a decomposição de extensões do betão, isto é, o vetor das extensões totais é a soma do vetor das extensões correspondentes ao betão entre fissuras com o vetor das extensões relativas à própria abertura de fissuras. Neste trabalho são empregues modelos de múltiplas fendas fixas, que permitem a formação de mais do que uma fenda num mesmo ponto de integração, sendo que, após formada, uma fenda permanece com orientação inalterada. Apenas pode ocorrer mais do que uma fenda num mesmo ponto se o ângulo entre fendas for superior a um dado valor limite (60° no presente trabalho). No betão que envolve as armaduras de tração (área efetiva de betão tracionado) é considerado o efeito de retenção de tensões de tração (*tension stiffening* na língua inglesa), que é uma consequência da aderência aço-betão. A área efetiva é quantificada de acordo com as prescrições do Eurocódigo 2 [8]. Foi adotado um diagrama de retenção de tensões multilinear, com tensão retida de valor constante ao longo da fase de fissuração estabilizada. Mais detalhes podem ser encontrados na referência [1].

É importante notar que o *fib Model Code* [9] apresenta uma abordagem para cálculo da abertura de fendas consistente com o procedimento de análise não-linear usado neste trabalho: a tensão de tração retida pelo betão assume um valor constante ao longo da fase de fissuração estabilizada (se não for atingida a cedência do aço) e é considerada a extensão livre de retração na quantificação da extensão relativa entre o aço e o betão.

A interação entre a estrutura e a fundação é simulada através de elementos finitos de interface, com comportamento não-linear. Com estes elementos pretende-se reproduzir os movimentos que ocorrem na base dos muros e pilares da estrutura em estudo. Recorde-se que se analisam neste trabalho construções com apoio direto no terreno, através de sapatas de fundação. O solo de fundação não é modelado explicitamente. Em vez disso, os referidos elementos de interface possuem propriedades elásticas que simulam a rigidez da fundação, quer para movimentos segundo a direção vertical (perpendicular portanto à base da sapata), quer para os movimentos horizontais. A rigidez para movimentos de rotação da sapata (em torno do seu eixo fraco) é também considerada. Além disso, o modelo de comportamento atribuído a estes elementos inclui uma envolvente de cedência de Mohr-Coulomb, que controla a possibilidade de deslizamento (num plano horizontal) e de levantamento da base do muro relativamente ao terreno de fundação. As propriedades consideradas para este modelo de comportamento são descritas na subsecção 3.2.

3 Caso de estudo

3.1 Geometria e ações

A estrutura em estudo é um edifício em BA com dimensões em planta de $60 \times 32 \text{ m}^2$, com um piso enterrado e seis pisos acima do solo. Na Figura 1 apresenta-se um quarto dessa planta, tomando partido das condições de simetria. As lajes são maciças e armadas em 2 direções, com 20 cm de espessura, apoiando-se em vigas de BA com 60 cm de altura total e pilares de secção quadrada. Os vãos

interiores são de 7,0 m, sendo os vãos junto à periferia de 5,5 m. Ao longo de todo o contorno da laje existe (entre a fundação e o nível da primeira laje acima do terreno) um muro em BA com 25 cm de espessura. Este muro apresenta uma altura de 3,4 m, medida entre os eixos da sapata e da laje. A sapata tem uma largura de 1,20 m.

O presente trabalho incide sobre o comportamento em serviço da primeira laje acima da fundação, por ser aquela onde são, geralmente, mais importantes os efeitos da restrição das deformações por retração. A armadura da laje consiste numa malha quadrada, com $12 \text{ cm}^2/\text{m}$ na face superior e $10 \text{ cm}^2/\text{m}$ na face inferior. A armadura dos muros consiste numa malha quadrada com $13,5 \text{ cm}^2/\text{m}$ em cada face. Na análise considera-se que a distância entre a face do elemento em estudo e o eixo da armadura é de 31 mm no caso da laje e de 43 mm para os muros.

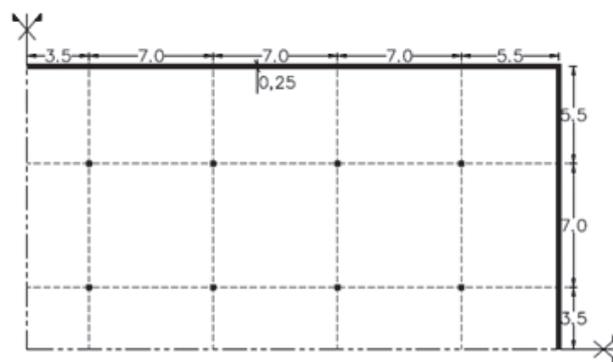


Figura 1 Representação da planta da laje em estudo (dimensões em metros)

O valor quase-permanente da ação gravítica aplicada à laje é o seu peso próprio acrescido de uma sobrecarga de 3 kN/m^2 .

Na análise com elementos finitos, apenas é discretizada a estrutura até ao nível da laje em estudo [1]. A ação vertical devida aos pisos superiores é simulada através de uma carga linear, no topo dos muros, de 250 kN/m e uma força concentrada de 3000 kN aplicada no topo dos pilares.

3.2 Materiais

O Quadro I resume os valores considerados para as propriedades do betão e das armaduras.

Para a definição dos parâmetros que determinam a evolução das deformações por retração e fluência, considera-se uma humidade relativa média de 60%. Assume-se que não há perdas de humidade pela face do muro em contacto com o terreno. Na laje, considera-se que a cofragem é removida aos 28 dias. Simplificadamente, considera-se que a secagem começa, em média, 14 dias após a moldagem, o que corresponde a uma média entre: (i) início da secagem pela face superior após a betonagem; (ii) início da secagem pela face inferior após a remoção da cofragem.

Para o maciço de fundação, consideraram-se dois cenários: solo residual do granito com um grau de alteração W5 e um maciço rochoso com um grau de alteração W3. Usaram-se valores plausíveis para as suas propriedades (ver Quadro II), com base na referência

[10]. Através dessas propriedades, e recorrendo a um modelo de viga em apoio elástico, determinaram-se as rigidezes a atribuir aos elementos de interface na base dos muros (ver Quadro III).

Quadro I Propriedades materiais

Material	Propriedade	Valor
Betão	Resistência à compressão em cilindros (valor característico)	25 MPa
	Módulo de elasticidade secante	31 GPa
	Resistência à tração axial (valor médio)	2,6 MPa
	Coefficiente de dilatação térmica	$10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
	Coefficiente de Poisson	0,2
Aço	Tensão de cedência (valor característico)	500 MPa
	Módulo de elasticidade	200 GPa
	Coefficiente de dilatação térmica	$10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

Quadro II Características dos materiais de fundação

Propriedade	Solo	Rocha
Módulo de elasticidade, E	80 MPa	6000 MPa
Coefficiente de Poisson	0,35	0,20
Ângulo de atrito	38°	52°
Coesão	10 kPa	300 kPa
Ângulo de dilatação	5°	5°

Quadro III Rigidezes que simulam a deformabilidade do maciço de fundação

	Solo	Rocha
Rigidez vertical	$3,38 \times 10^4 \text{ kN/m}^3$	$2,31 \times 10^6 \text{ kN/m}^3$
Rigidez horizontal (tangencial)	$2,95 \times 10^4 \text{ kN/m}^3$	$2,17 \times 10^6 \text{ kN/m}^3$
Rigidez de rotação	$7,13 \times 10^3 \text{ kNm/rad}$	$4,89 \times 10^5 \text{ kNm/rad}$

3.3 Sequência de construção

A sequência de construção foi simulada na análise de acordo com o procedimento sumariado no Quadro IV.

Quadro IV Sequência de construção e de aplicação das cargas na análise

Fase	Evento	Tempo ⁽¹⁾ [dias]
Ph1	Betonagem das sapatas	0
Ph2	Betonagem dos muros	28
Ph3	Betonagem da laje e das vigas	56
Ph4	Remoção da cofragem e escoramento da laje e vigas ⁽²⁾	84
Ph5	Aplicação de 1/3 das ações transmitidas pelos pisos superiores	112
Ph6	Aplicação dos restantes 2/3 das ações transmitidas pelos pisos superiores e da sobrecarga no piso 1	168

Notas: ⁽¹⁾Tempo contado deste o início da construção.
⁽²⁾A ação vertical correspondente ao peso próprio da laje e das vigas (no piso em estudo) é aplicada neste instante de tempo.

4 Resultados

Nesta secção apresentam-se resultados das análises, para dois tipos de maciço de fundação (solo residual do granito ou maciço rochoso, com as propriedades apresentadas atrás). Além disso, os resultados destas análises são confrontados com simulações onde se impede qualquer movimento na base dos muros (apoios fixos). Na referência [1] podem ser encontrados detalhes adicionais sobre esta última simulação. Aí, é possível ver também a malha de elementos finitos utilizada na análise, assim como a variação ao longo do tempo do esforço axial instalado em pontos críticos da laje e a correspondente variação temporal da abertura de fendas. Foi possível concluir que as aberturas de fendas mais desfavoráveis ocorrem no final da análise (que foi realizada com incrementos de tempo até uma idade máxima de 30 anos após a primeira betonagem). Por isso, neste artigo apresentam-se apenas resultados para o último instante de tempo da análise. Não obstante, foi possível observar que após 5 anos de idade, aproximadamente, a evolução da abertura de fendas é muito pequena, em virtude da reduzida espessura dos elementos em estudo, que proporciona uma reduzida evolução da retração do betão após essa idade.

As Figuras 2 e 3 apresentam os padrões de fissuração nas faces superior e inferior da laje, respetivamente, no final da análise, para o cenário em que se considera que a fundação é em solo residual. Verifica-se que a área de laje onde ocorre fissuração é muito inferior (neste cenário) àquela onde existem fendas num cenário de cálculo

em que se considere apoios fixos na base dos muros (isto é, quando é ignorada a interação com o solo de fundação). O padrão de fissuração obtido para este último cenário de cálculo pode ser visto na referência [1].

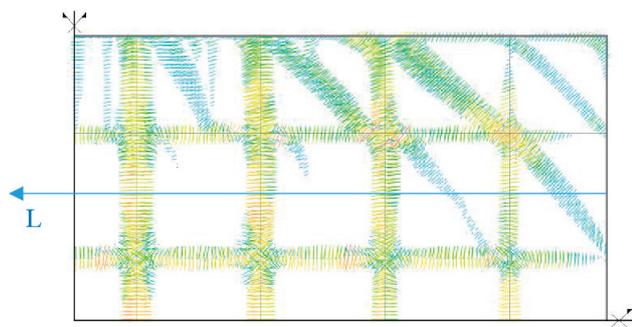


Figura 2 Padrão de fissuração na face superior da laje, para o cenário de fundação em solo. Fendas representadas por um vetor normal ao plano da fenda (um vetor por ponto de integração)

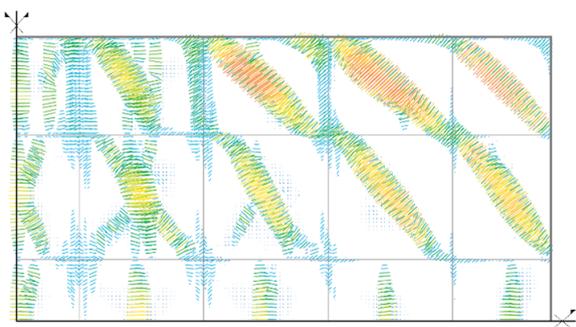


Figura 3 Padrão de fissuração na face inferior da laje, para o cenário de fundação em solo. Fendas representadas por um vetor normal ao plano da fenda (um vetor por ponto de integração)

Por outro lado, a distribuição das fendas no cenário de cálculo em que se considera a interação com o maciço rochoso (com as propriedades indicadas no Quadro II é mais próxima da que ocorre na análise com apoios fixos.

É também possível avaliar a importância da restrição, conferida pelos muros, à deformação axial da laje. Essa restrição varia ao longo da superfície da laje. Na Figura 4 mostra-se então a deformação média, em cada vão, expressa em percentagem da deformação de uma laje não restringida por paredes ou muros (isto é, restringida apenas pelas armaduras embebidas na própria laje). Estes resultados correspondem ao cenário com fundação em solo, no final da análise (30 anos). As deformações apresentadas nesta figura são as que ocorrem segundo a direção paralela à maior dimensão da planta do edifício (direção horizontal nesta figura).

Uma laje não restringida teria então um resultado de 100% numa representação do tipo que é mostrado na Figura 4, enquanto um vão totalmente restringido conduziria a um resultado de 0% nessa

representação. Verifica-se na Figura 4 que há uma importante restrição do tipo conhecido, na literatura inglesa, por *edge restraint*. Essa é a restrição que o muro (e respetiva fundação) confere às deformações axiais da laje segundo a direção paralela ao próprio muro. É por causa desse tipo de restrição que as deformações representadas na Figura 4 diminuem da direita para a esquerda (à medida que aumenta a distância à extremidade do muro mais longo) e aumentam de cima para baixo (à medida que aumenta a distância a esse muro).

Por outro lado (conforme era expectável), a restrição à deformação da laje é bastante superior quando a fundação é em maciço rochoso, ou quando se consideram na análise apoios fixos na base dos muros [1].



Figura 4 Deformação axial média em cada vão, em percentagem da deformação de uma laje não restringida por paredes ou muros. Resultados para o cenário de fundação em solo

Conforme foi explicado na secção 1, o esforço axial instalado na laje é um resultado relevante deste tipo de análise. Nas Figuras 5 e 6 apresenta-se a variação desse esforço num alinhamento representativo da laje: o alinhamento L indicado na Figura 2. Apresenta-se o valor do esforço atuando segundo a direção paralela a esse eixo. Nessas figuras mostram-se os resultados para os dois cenários de fundação, assim como para uma análise em que se considera apoios fixos na base dos muros. Os resultados referem-se ao instante final da análise (30 anos).

A diferença entre a Figura 5 e a Figura 6 reside no facto de, na primeira, se apresentarem resultados de análises em que não se considera o efeito de fissuração do betão. Deste modo, comparando essas duas figuras, é possível concluir que a fissuração tem uma grande importância em termos de diminuição do esforço axial na laje, quando a fundação na base dos muros apresenta uma grande rigidez. No caso de maciços de fundação menos rígidos (tais como o solo residual do granito considerado neste trabalho), a importância da fissuração em termos dessa diminuição de esforço axial é mais reduzida.

Para que possa ser percebida a importância dos valores de esforço axial mostrados nas Figuras 5 e 6, indica-se nessas figuras o valor do esforço de fissuração (para tração simples), quantificado simplificada como $N_{cr} = A_c \times f_{ctm} = 520 \text{ kN}$.

Na Figura 5 é também possível confirmar que o esforço axial instalado na laje resulta essencialmente de uma restrição do tipo *edge restraint*. Isto porque o esforço aumenta muito para valores crescentes da abcissa (isto é, da distância ao muro perpendicular ao eixo L). Se o efeito de *end restraint* (tipo de restrição associado ao impedimento dos movimentos das extremidades do elemento em estudo) fosse importante, então seria maior o valor do esforço axial para uma abcissa nula (na Figura 5).

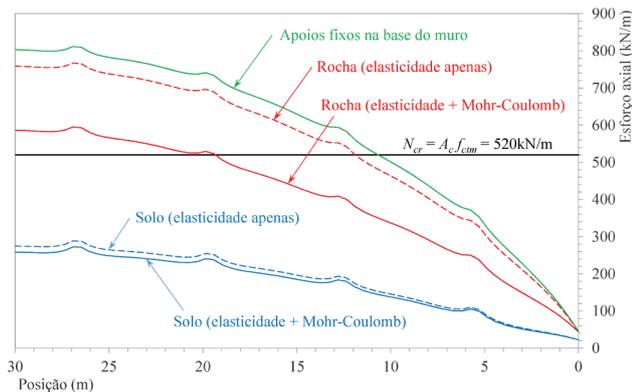


Figura 5 Esforço axial ao longo do alinhamento L. Resultados a longo prazo (30 anos) para análises em que não é considerado o efeito de fissuração do betão

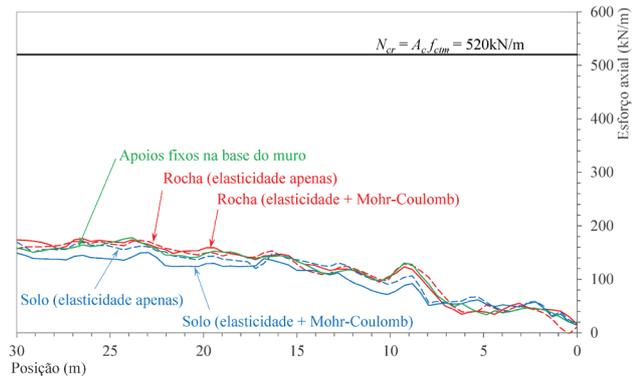


Figura 6 Esforço axial ao longo do alinhamento L. Resultados a longo prazo (30 anos) para análises em que é considerado o efeito de fissuração do betão

A Figura 5 permite também perceber a influência da consideração da envolvente de cedência de Mohr-Coulomb, nos elementos de interface que simulam a deformabilidade na base da sapata e do maciço de fundação. Nessa figura, para cada tipo de maciço de fundação (solo ou rocha), são apresentados os resultados de duas análises:

- uma dessas análises é aquela em que a interação com o solo é modelada conforme descrito nas secções 2 e 3; isto é, os elementos de interface possuem uma determinada rigidez elástica (quantificada no Quadro III) e, para além disso, o seu comportamento é também regido por uma envolvente de cedência de Mohr-Coulomb (com os parâmetros indicados no Quadro II);

- na outra análise, não é considerada a envolvente de cedência de Mohr-Coulomb; isto é, apenas é considerada na análise a deformabilidade, em regime elástico, do maciço de fundação.

A Figura 5 permite então concluir que a cedência na base da sapata é apenas importante no caso do maciço de fundação com maior rigidez (rocha). Apesar disso, é importante notar que, conforme foi explicado atrás, a Figura 5 mostra resultados de uma análise em que não são considerados os efeitos da fissuração. Nas análises em que esses efeitos são tidos em conta (que são aquelas que têm interesse prático) foi possível concluir que a consideração da envolvente de cedência de Mohr-Coulomb não é importante. Isto é, obtêm-se resultados muito próximos quando a interação com o maciço de fundação é simulada considerando apenas a deformabilidade, em regime elástico, do maciço de fundação. Esta é uma conclusão importante, pois a não consideração da envolvente de Mohr-Coulomb (nos elementos de interface, na base do muro) torna o processo iterativo (análise não-linear) significativamente mais rápido.

O procedimento de análise apresentado neste artigo permite quantificar, de uma forma rigorosa e sem sobredimensionamento, a armadura requerida para que a abertura máxima de fendas (a longo prazo) não ultrapasse um determinado valor limite previamente fixado (por exemplo 0,3 mm, ou um valor diferente dependendo dos requisitos em termos de durabilidade). Para isso:

- 1) deve ser feita uma primeira análise não-linear considerando uma estimativa plausível para a armadura na laje e muros;
- 2) com base nos esforços calculados nessa análise, é possível quantificar uma nova quantidade de armadura requerida para controlo da fissuração (isto é, para que a abertura máxima de fendas a longo prazo não ultrapasse o limite estabelecido);
- 3) considerando a armadura quantificada no passo anterior, é feita nova análise não-linear; após esta análise deverá ser possível concluir (tal como foi concluído no estudo agora apresentado) que os esforços instalados na laje são muito próximos daqueles que foram previamente quantificados no passo 1); isto porque variações ligeiras na quantidade de armadura embecida na laje e muros têm muito pouca influência sobre o valor dos esforços instalados na laje.

5 Conclusões

Este trabalho, que incide sobre o comportamento em serviço de lajes bidirecionais maciças de edifícios, considerando os efeitos das cargas aplicadas e das deformações restringidas, apresenta as seguintes principais evoluções relativamente a trabalhos previamente publicados sobre este tema:

- É realizada uma análise da laje na sua totalidade (tirando partido das condições de simetria), permitindo assim ter em consideração o facto de as restrições às deformações por retração variarem ao longo da superfície da laje.
- É tida em consideração a interação com o maciço de fundação e os consequentes movimentos na base das sapatas, tendo sido avaliados dois cenários em termos de propriedades desse maciço (solo residual do granito ou rocha).

- Além disso, é importante notar que a estratégia usada na análise não-linear, para simulação dos efeitos de fissuração, retração, fluência e evolução temporal do módulo de elasticidade, é coerente com os modelos previstos no *fib* Model Code 2010.

Este trabalho conduziu às seguintes conclusões e considerações finais:

- As condições de fundação dos muros influenciam de forma muito significativa o desenvolvimento da fissuração das lajes ligadas a esses muros.
- Nos casos analisados, o esforço axial instalado nas lajes (atendendo aos efeitos das deformações restringidas) é muito inferior ao valor $N_{cr} = A_c \times f_{ctm}$.
- O procedimento de análise apresentado nesta comunicação permite quantificar, de modo detalhado, a armadura requerida para controlo da fissuração.
- Nos padrões de fissuração apresentados nesta comunicação verifica-se que, nas proximidades dos cantos das lajes, há zonas com fendas que fazem uma inclinação de aproximadamente 45° em relação à armadura da laje. A quantificação da armadura requerida para controlo da fissuração, para essas zonas, pode também ser feita de forma simples. No entanto, esse assunto não foi desenvolvido neste artigo.
- Apesar de a análise não-linear não ser ainda utilizada de forma corrente no projeto de estruturas, pode ser vantajosa a utilização do procedimento de análise aqui apresentado em casos especiais, nomeadamente em estruturas com grandes distâncias entre juntas. A obtenção de uma solução convergida na análise não-linear revelou-se fácil, especialmente quando a interação estrutura-macizo de fundação é analisada sem consideração da envolvente de cedência de Mohr-Coulomb. Para os casos aqui apresentados foi possível concluir que essa simplificação (não considerar essa envolvente de cedência) não afeta o rigor dos resultados.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado por: Projeto POCI-01-0145-FEDER-007457 - CONSTRUCT - Instituto de I&D em Estruturas e Construções, financiado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER), através do COMPETE2020 – Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (POCI) e por fundos nacionais através da Fundação para a Ciência e a Tecnologia I.P.; Projeto FCT IntegraCrete PTDC/ECM-EST/1056/2014.

Referências

- [1] Sousa, C.; Felisberto, E.; Faria, R. – "Influence of restrained shrinkage in RC building slabs: a case study". *International RILEM Conference on Materials, Systems and Structures in Civil Engineering - Conference Segment on Service Life of Cement-Based Materials and Structures*. Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark, 2016.
- [2] Sousa, C.; Faria, R.; Carvalho, J.; Ribeiro, C. – "Análise de lajes sujeitas a deformações impostas e ações exteriores usando modelos de fendilhação distribuída". *5^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas, JPÉE2014*, Lisboa, Portugal, 2014.
- [3] Leitão, L.; Faria, R.; Azenha, M.; Sousa, C. – "Análise da fendilhação em elementos de betão armado induzida por restrições a deformações impostas". *Encontro Nacional Betão Estrutural, BE2012*, Porto, Portugal, 2012.
- [4] Câmara, J.; Figueiredo, C. – "Concepção de edifícios com grande área de implantação". *Encontro Nacional de Betão Estrutural, BE2012*, Porto, Portugal, 2012.
- [5] Câmara, J.; Luís, R. – "Structural response and design criteria for imposed deformations superimposed to vertical loads effects". *Proc. of the 2nd International fib Congress*, Naples, Italy, 2006.
- [6] TNO DIANA BV – *DIANA - Finite Element Analysis. Release 9.6*, 2014.
- [7] Borst, R. – "Smearred cracking, plasticity, creep, and thermal loading - A unified approach". *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. Vol. 62, pp. 89-110, 1987.
- [8] IPQ – Eurocódigo 2 – Projecto de estruturas de betão. Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios, 2010.
- [9] fib – Model Code for Concrete Structures 2010. Ernst & Sohn, 2013.
- [10] Martins, F. F.; Costa, A. F.; Sousa, J. A. – "Túnel 4 (Porto) - Análise tridimensional por elementos finitos". *Geotecnica*, nº 99, pp. 65-80, 2003.

