



PROJETO E MONITORIZAÇÃO DE FUNDAÇÃO ESPECIAL EM BETÃO REFORÇADO COM SISTEMA HÍBRIDO

Joaquim Barros*, Prof. Catedrático, ISISE, IB-S, Universidade do Minho
 Tiago Valente, Doutor em Eng.ª Civil, CiviTest, Inês Costa, Doutora em Eng.ª Civil, CiviTest
 Felipe Salomão, Eng.ª Civil, CiviTest

No âmbito do dimensionamento da fundação de uma estrutura com grande desenvolvimento, foi prevista a construção de um elemento com secção transversal tubular de parede delgada em betão com um sistema combinando armaduras convencionais de aço e fibras de polipropileno (PP). A fundação possui uma secção transversal com $1.20 \times 1.20 \text{ m}^2$ e um desenvolvimento de 22.4m. Nas extremidades e a cerca de $\frac{1}{4}$ e $\frac{1}{2}$ do desenvolvimento da fundação foram previstos enrijecedores em BRF com 100mm de espessura. O núcleo de aligeiramento da secção tubular é formado por EPS. Na Figura 1 é ilustrada a geometria da fundação. As fibras de PP têm como principal efeito substituir a armadura convencional disposta em grelha a meio da espessura das paredes que formam a estrutura, com recobrimento que lhe assegura elevada proteção a fenómenos de corrosão (fundação localizada em edifício industrial).

O dimensionamento da estrutura contemplou não só a análise dos estados limite últimos, tendo em conta o nível de carregamento a que a fundação será solicitada pela estrutura, mas também a análise do risco e magnitude de fendilhação da fundação devido à variação da temperatura gerada pela reação de hidratação do cimento, bem como do fenómeno de retração do betão desde a betonagem até ao seu comportamento em serviço.

MATERIAIS

Em fase de projeto foi prescrito um betão da classe de resistência C40/50 XC2 (P) CL0.40 S5 D20 (conforme a NP EN 206-1:2013), tendo-se verificado ser necessário reforçar este betão com fibras de forma a dotá-lo de capacidade pós fendilhação correspondente à classe de tenacidade 3c (conforme o *fib* Model Code 2010

[1], MC2010). Por forma a cumprir com a classe de tenacidade, o empreiteiro adotou uma dosagem de fibras de polipropileno de 6 kg/m^3 , denominação comercial 1EST54, fabricadas pela ExporPlás – Indústria de Exportação de Plásticos, S.A. O desempenho do betão reforçado com fibras PP aplicado em obra foi avaliado executando ensaios de acordo com as recomendações do MC 2010.

Para as armaduras convencionais foi adotada malha electrosoldada de aço da classe A500 NR. Os blocos de aligeiramento são constituídos por EPS com densidade igual a 10 kg/m^3 .

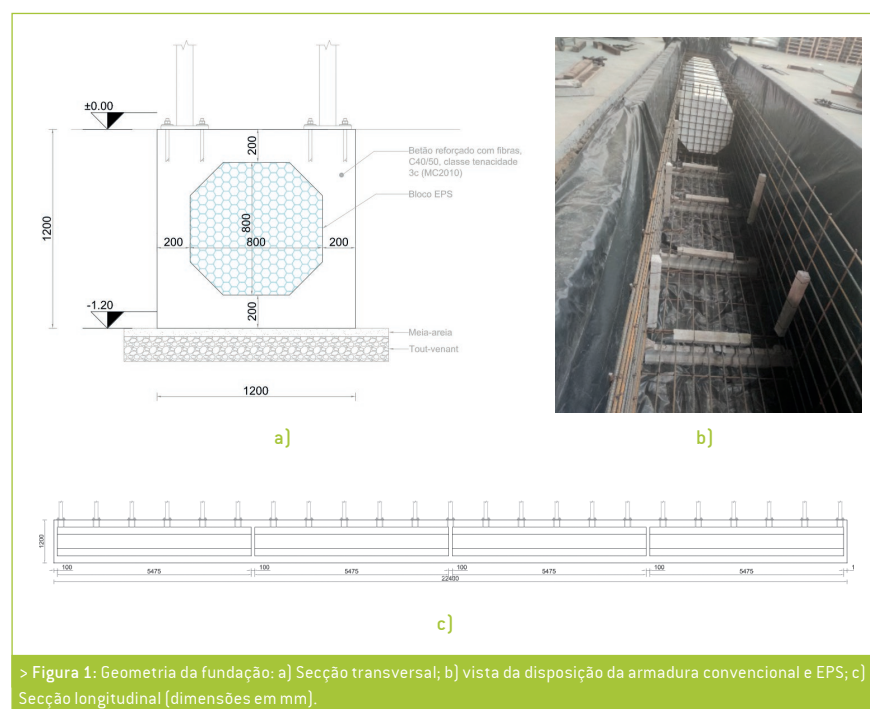
ANÁLISE TERMOMECÂNICA DA FUNDAÇÃO

Para a avaliação do risco de fendilhação durante as idades jovens de endurecimento do betão foi desenvolvido um modelo térmico da fundação acoplado a um modelo mecânico de simulação do fenómeno de iniciação e propagação de fendas. As simulações numéricas foram realizadas com o programa de cálculo automático baseado no método de elementos finitos FEMIX [2].

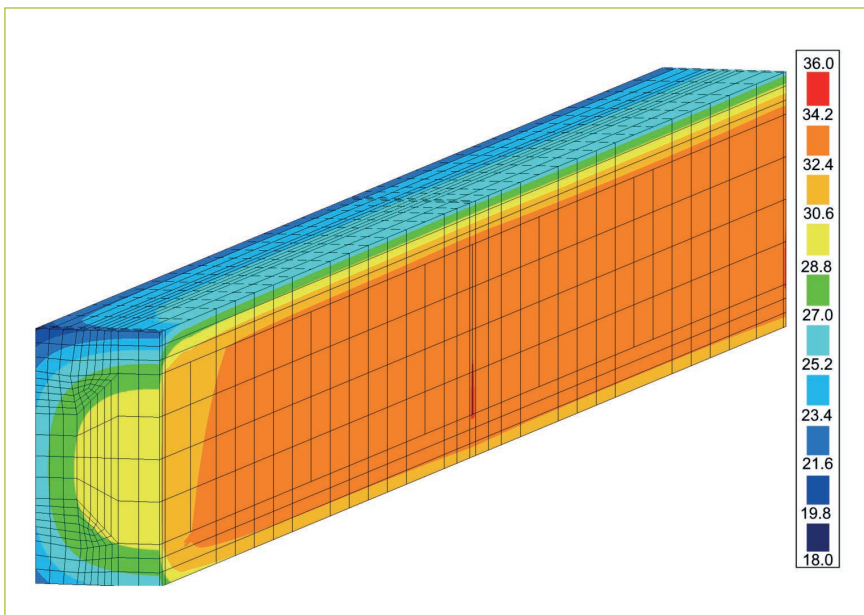
Para a simulação do fenómeno de desenvolvimento de temperatura devido ao calor de hidratação de cimento foi realizada uma análise não-linear transiente, tendo por base a formulação proposta por Reinhardt *et al.* [3], considerando-se a adoção de 350 kg/m^3 do cimento aplicado. A análise térmica contemplou a simulação desde 1h até aos 3 dias após a betonagem da fundação. Na Figura 2 é apresentado um exemplo da distribuição do perfil de temperaturas na fundação 21h após a betonagem.

Com base no campo de distribuição de temperaturas obtido através da análise térmica, foi realizada a análise da distribuição das tensões e da iniciação e propagação de fendas no betão para todos os instantes de tempo considerados.

O comportamento do BRF foi simulado através de um modelo de fendilhação distribuída multi-



> Figura 1: Geometria da fundação: a) Secção transversal; b) vista da disposição da armadura convencional e EPS; c) Secção longitudinal [dimensões em mm].



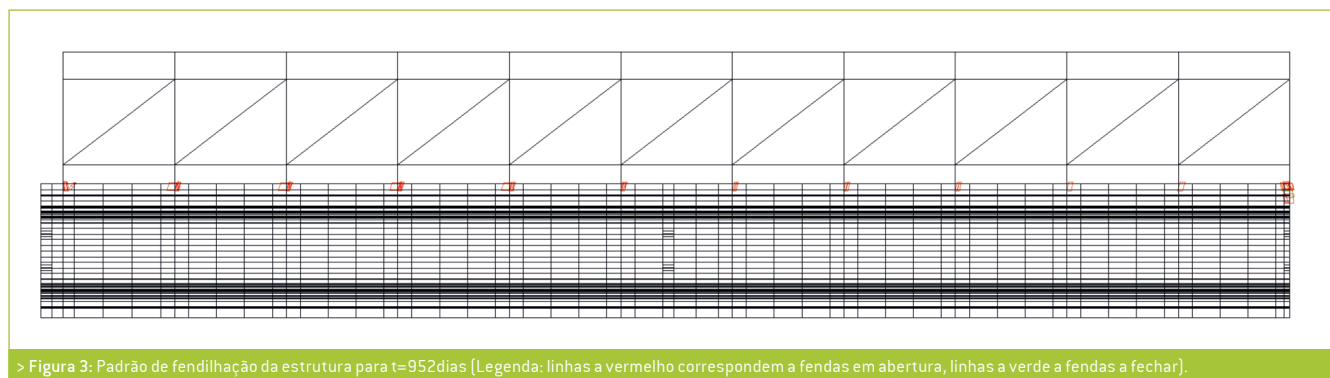
> Figura 2: Perfil de distribuição de temperatura na fundação 21h após a betonagem (Nota: apenas 1/4 da fundação é apresentada) (unidades em graus Celsius).

direcional [4], que tem a capacidade de simular o comportamento não-linear pós-fendilhação do betão reforçado com fibras. Foi admitido comportamento linear-elástico para o BRF em compressão.

Na análise mecânica transiente é considerada a evolução das propriedades mecânicas do betão com o tempo, adotando o modelo de maturidade acoplado ao conceito de idade equivalente do betão proposto em [5].

Adicionalmente, é ainda considerada a viscoelasticidade do betão, recorrendo ao modelo proposto em [6], [7], considerando o modelo B4 [8] para simular a fluência do betão.

Para simular a interface de contacto entre a fundação e o solo é adotado o modelo proposto em [7]. Este modelo permite simular a resposta não linear da interface entre dois materiais, considerando que apenas são transmitidas tensões normais de compres-



> Figura 3: Padrão de fendilhação da estrutura para $t=952$ dias (Legenda: linhas a vermelho correspondem a fendilhas em abertura, linhas a verde a fendilhas a fechar).

são, assumindo ainda uma lei não linear para a relação entre a tensão tangencial e o deslizamento da interface, bem como a variação do coeficiente de atrito em função do deslizamento acumulado.

Durante a análise transiente foi determinada uma abertura máxima de fenda igual a 0.05mm, para a idade de 22 horas após a betonagem do elemento estrutural. Dado que o valor da abertura de fenda é inferior ao valor máximo admissível indicado no Eurocódigo 2 (para a classe de exposição XC2, a abertura máxima admissível de fenda é igual a 0.3mm para a combinação de ações quase-permanente), cumprindo a verificação de segurança para os estados limites de utilização.

O comportamento da fundação em serviço também foi estimado considerando as forças solicitantes da estrutura, bem como o efeito da retração e fluência durante um período de 952 dias ($t \approx 2.6$ anos) após a betonagem, e ainda a interação fundação-estrutura.

Na Figura 3 é apresentado o padrão de fendilhação para $t=952$ dias, onde se constata a previsão de ocorrer a fendilhação do BRF na zona da fundação em contacto com a estrutura de a suportar. O valor máximo da abertura de fenda é obtido no final do período em análise, atingindo-se um valor de 0.08mm, sendo este valor consideravelmente inferior ao máximo admissível indicado no Eurocódigo 2.

CONCLUSÕES

Neste trabalho foram utilizadas fibras de polipropileno no reforço de betão de forma a

limitar a armadura convencional a uma rede disposta a meia espessura das paredes que constituem a fundação de uma pista robótica de uma unidade industrial, em secção tubular e de grande desenvolvimento longitudinal, sem qualquer junta de controlo de fendilhação. O processo de dimensionamento exigiu a utilização de modelos termomecânicos com simulação dos fenómenos de maturação, fluência, retração e fendilhação do betão, tendo sido acompanhado por ensaios de controlo das propriedades fundamentais do BRF e de monitorização do campo de temperaturas para se poder simular os efeitos favoráveis dos mecanismos de reforço das fibras. Esta abordagem holística adotada no dimensionamento permitiu demonstrar que o reforço híbrido utilizado constitui uma solução de execução mais rápida e económica que a tradicional em dupla malha de armadura, com garantia do cumprimento das verificações dos estados limites de utilização e últimos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio concedido ao abrigo do projeto NG_TPfib, nº 33719, ANI (FEDER - Programa Operacional Fatores Competitividade). ■

BIBLIOGRAFIA

- [1] fib-federation internationale du beton, *fib Model Code for Concrete Structures 2010*. John Wiley & Sons, 2013.
- [2] A. F. M. Azevedo, J. A. O. Barros, J. Sena-Cruz, and A. V. Gouveia, *Femix 4.0*. Porto: Consoft, 2013.
- [3] H. W. Reinhardt, J. Blaauwendraad, and J. Jongedijk, "Temperature development in concrete structures taking account of state dependent properties," 1982.
- [4] A. V. Gouveia, J. A. Barros, Á. F. Azevedo, and J. Sena-Cruz, "Multi-fixed smeared 3d crack model to simulate the behavior of fiber reinforced concrete structures," presented at the CCC 2008 - Challenges for Civil Construction, Porto, 2008, [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/1822/12802>.
- [5] Ventura-Gouveia, A, Barros, J.A.O., and Azevedo, A.F.M., "Thermo-mechanical model for the material nonlinear analysis of cement based materials," presented at the 9th international conference on fracture mechanics of concrete and concrete structures, Berkeley, California USA, 2016.
- [6] T. Valente, A. Ventura-Gouveia, and J. A. O. Barros, "A new basic creep model coupled with a thermo-mechanical model for the numerical simulation of the time-dependent behaviour of concrete structures," presented at the 10th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, Bayonne, France, Jun. 2019, doi: 10.21012/FC10.232972.
- [7] Tiago Valente, "Advanced tools for design and analysis of fiber reinforced concrete structures," PhD Thesis, University of Minho, Guimarães, Portugal, 2019.
- [8] RILEM Technical Committee TC-242-MDC (Zdenek P. Bazant, chair), "RILEM draft recommendation: TC-242-MDC multi-decade creep and shrinkage of concrete: material model and structural analysis*: Model B4 for creep, drying shrinkage and autogenous shrinkage of normal and high-strength concretes with multi-decade applicability," *Mater. Struct.*, vol. 48, no. 4, pp. 753–770, Apr. 2015, doi: 10.1617/s11527-014-0485-2.