

# Avaliação da orientação das fibras em BEDRF através de técnicas não destrutivas

Diogo Azevedo

*Universidade do Porto, LABEST/FEUP, Departamento de Engenharia Civil, Porto*

Filipe Ribeiro

*Universidade do Porto, LABEST/FEUP, Departamento de Engenharia Civil, Porto*

Adriano Carvalho

*Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Porto*

João Rio

*Universidade do Porto, LABEST/FEUP, Departamento de Engenharia Civil, Porto*

Sandra Nunes

*Universidade do Porto, LABEST/FEUP, Departamento de Engenharia Civil, Porto*

**RESUMO:** O presente artigo apresenta alguns resultados iniciais do projecto Betofibra – “Betões de elevado desempenho reforçado com fibras (BEDRF) em soluções inovadoras: concepção, caracterização e controlo de qualidade”. Foram realizados vários ensaios por métodos não destrutivos (NDT) para avaliar a distribuição e orientação das fibras numa laje de BEDRF. Foram aplicadas as técnicas dos ultra-sons, resistividade eléctrica e indutância eléctrica e foi avaliado o desempenho de cada ensaio por si, assim como o seu desempenho relativamente aos restantes. Os resultados indicam preliminarmente que os três métodos de ensaio se mostraram sensíveis à distribuição e orientação das fibras com destaque para a indutância eléctrica.

## 1 INTRODUÇÃO

O Betão de Elevado Desempenho Reforçado com Fibras (BEDRF) é um material que resulta da investigação e do conhecimento adquiridos, no âmbito dos materiais compósitos à base de cimento reforçado com fibras, ao longo das últimas quatro décadas [Lequesne, 2011]. Encarado como uma extensão de três materiais conhecidos, nomeadamente, o Betão de Elevado Desempenho, o Betão Reforçado com Fibras e o Betão Auto-Compactável, este material é caracterizado pela sua elevada resistência mecânica, o comportamento dúctil potenciado pela inclusão de fibras, baixa relação água/cimento, grande densidade de empacotamento, elevada resistência à penetração de agentes agressivos e grande durabilidade.

Assim sendo, o BEDRF apresenta-se como uma alternativa capaz de resolver os problemas conhecidos do betão convencional, como por exemplo: a baixa resistência à tração e diminuta ductilidade; o elevado peso próprio dos elementos de betão armado convencional, significativamente superior ao das estruturas de aço com a mesma capacidade de carga, e a vulnerabilidade à penetração de substâncias nocivas, que aceleram o processo de corrosão das armaduras. Devido à sua grande resistência mecânica e elevada durabilidade, o BEDRF é então uma opção que

permite produzir estruturas mais esbeltas, com menor consumo de matérias-primas. Por outro lado, a possibilidade de conseguir misturas auto-compactáveis permite eliminar a necessidade de vibração e, pelo facto de escoarem sob a acção do peso próprio, obter uma melhor distribuição das fibras. Estes factores contribuem não só para melhorar a qualidade da estrutura final, mas também para prolongar a sua vida útil. O seu elevado custo dificulta uma utilização generalizada em estruturas correntes, no entanto estes betões especiais podem ser competitivos em estruturas com necessidades específicas, como por exemplo, peso reduzido, rapidez de construção ou resistência a agentes agressivos. A utilização do BEDRF em elementos pré-fabricados permite evitar/reduzir o uso de armaduras ordinárias devido à resistência à tracção conferida pelas fibras de aço, o que conduz a elementos mais delgados e leves. No que se refere à reparação/reabilitação, o BEDRF aplicado em camadas finas (com ou sem armadura) permite substituir camadas carbonatadas e/ou fissuradas por uma nova camada muito resistente e impermeável.

Em diversos trabalhos dedicados ao estudo do tema, tem sido demonstrado que havendo um equilíbrio adequado entre as propriedades no estado fresco e uma preparação cuidada do processo de betonagem, é possível orientar de forma eficaz as fibras ao longo da direcção do fluxo de betonagem [Stahli P. et al., 2008; Ferrara L. et al., 2011; Martinie L. et al., 2010]. A distribuição homogénea das fibras bem como a orientação das mesmas no elemento de BEDRF são questões que têm recebido atenção especial nos últimos anos dada a sua grande relevância para o desempenho estrutural. De facto, o comportamento mecânico dos elementos estruturais é melhorado se as fibras estiverem alinhadas de acordo com as tensões principais de tracção [Abrishambaf, A. et al., 2012].

Nos estudos mais recentes, os ensaios de natureza eléctrica, em particular, os ensaios de Resistividade eléctrica e de Indução eléctrica têm sido implementados para a monitorização da distribuição e da orientação das fibras metálicas no elemento estrutural [Ferrara L. et al., 2011]. No presente estudo foi também considerado o ensaio de ultra-sons, este já bem estabelecido no domínio do estudo de betões correntes, mas ainda pouco aplicado ao estudo de betões com fibras. Assim, o presente trabalho teve como principais objectivos avaliar a distribuição e a orientação das fibras numa laje de BEDRF através de ensaios não destrutivos, do tipo resistividade eléctrica, indução magnética e propagação de ondas ultra-sónicas.

## 2 COMPOSIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO

As argamassas investigadas foram preparadas com misturas ternárias de cimento (CEM I 42.5 R), filer calcário (BETOCARB P1 – OU), e sílica de fumo (Centrilit Fume SX em suspensão com 50% de teor de sólidos) com uma densidade de 3.10, 1.38 e 2.68, respetivamente. O tamanho médio das partículas de cimento e filer calcário foi de 14.6 e 5.36  $\mu\text{m}$ , respetivamente. As partículas da sílica de fumo apresentam uma dimensão 50 a 100 vezes inferior à das partículas do cimento. O superplastificante utilizado (Sika Viscocrete 20HE) é constituído por carboxilatos modificados e apresenta uma densidade de 1.08 e 40% teor de sólidos. Utilizou-se uma areia fina natural com um diâmetro máximo de 1 mm e uma massa volúmica de 2630 kg/m<sup>3</sup> (material seco). Foram incluídos três tipos de micro-fibras lisas de secção circular com um diâmetro de 0.175 mm, 2100 MPa de resistência à tracção e com três comprimentos diferentes: 6, 9 e 12 mm.

De modo a assegurar as propriedades de auto-compatibilidade, exigiu-se que a composição de referência (sem fibras) exhibisse um diâmetro de espalhamento (Desp) próximo dos 300 mm, seguindo as conclusões alcançadas por Naaman [2010]. Depois de definida a composição de referência (Quadro 1), estudou-se o efeito que a inclusão de fibras provocaria no comportamento da argamassa, em ambos os estados: fresco e

endurecido. De modo a manter o volume global da mistura, retirou-se uma quantidade de areia correspondente ao volume de fibras adicionado.

Quadro 1. Composição de referência e alguns resultados (sem fibras).

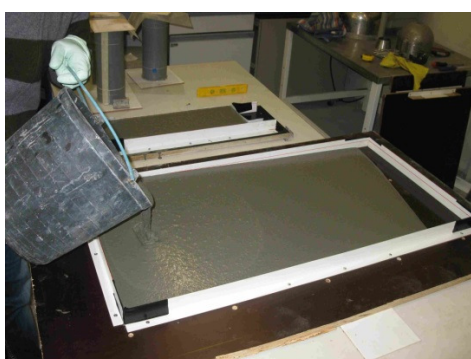
Razões		Materiais constituintes (kg/m <sup>3</sup> )		Estado fresco	Estado endurecido, 7 dias (MPa)	
w/c	0,25	cimento	810,60	Desp (mm) 298,50	ft,cr	17,28
sf/c	5%	silica fumo	81,06			
Vw/Vp	0,510	filer calcário	317,58			
Vs/Vm	40%	areia fina	1040,00			
Sp/p	0,95%	água	156,80		fc	99,09
		superplasticante	11,16			

A análise feita indicou a dosagem de 3% de fibras como um bom compromisso entre a resistência mecânica, avaliada através de ensaio de flexão e compressão de prismas 4x4x16 cm<sup>3</sup>, e a trabalhabilidade, [Ribeiro et al 2012]. O passo seguinte consistiu na apreciação da influência que a variação do comprimento das fibras provoca no comportamento do material. Para isso, realizou-se outra série de ensaios, fixando a dosagem de 3% e variando apenas o comprimento das fibras utilizadas. Verificou-se que, para um volume constante de fibras (3%), existe uma perda de trabalhabilidade à medida que se utilizam fibras mais compridas. Uma descrição mais detalhada dos trabalhos realizados e das conclusões alcançadas pode ser encontrada no trabalho de Ribeiro et al. [2013].

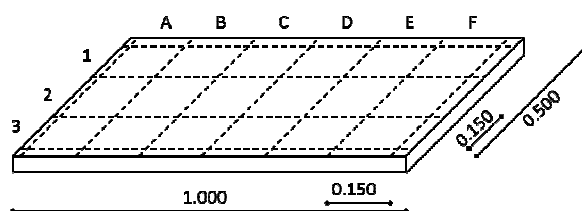
### 3 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS – PROGRAMA EXPERIMENTAL

Nos ensaios aqui apresentados utilizou-se uma composição com 3% de fibras de 6 mm de comprimento na betonagem de um provete de dimensões 1000x500x25mm<sup>3</sup>, o qual se designou BF121130A. Esse provete foi desmoldado com 1 dia de idade e mantido submerso em água no interior de uma câmara com temperatura controlada (Temp=20°C).

Foi tentada uma orientação preferencial das fibras ao verter o betão fresco a partir de uma das extremidades do molde, de forma a fluir ao longo do mesmo como se pode observar na Figura 1 (a).



(a)



(b)

Figura 1 – (a) Betonagem do provete; (b) Esquema com marcação do provete.

Depois de desmoldado, o provete foi marcado com uma grelha de 3 x 6, num total de 18 segmentos quadrados com 150x150 mm<sup>2</sup>, com 5 mm de intervalo entre si e com bordos de 20 mm ou mais, como se ilustra na Figura 1 (b). Esta grelha foi idealizada de forma a sistematizar os ensaios não destrutivos à superfície e também para ,posteriormente, se cortar a placa nos respectivos segmentos quadrados para serem sujeitos a ensaios destrutivos (de tração), e se poder correlacionar os resultados obtidos nos ensaios não-destrutivos com o comportamento à tracção do material.

### 3.1 Ensaio de resistividade

A resistividade elétrica do betão pode ser avaliada em laboratório e em estruturas in-situ com diversos métodos [Polder et al 2000 e Gowens et al 1999] sendo o método dos quatro eléctrodos – Sonda Wenner – o mais comum.

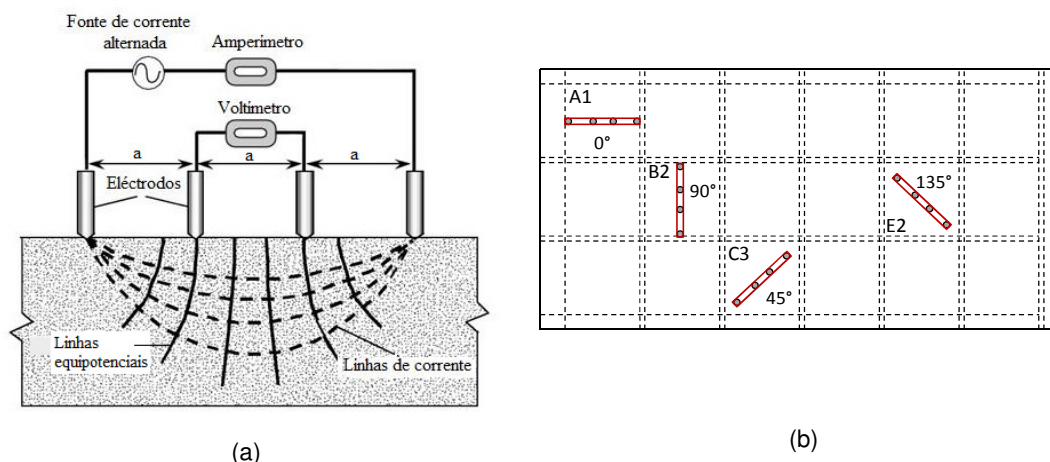


Figura 2 – (a) Princípio de funcionamento pela técnica dos 4 eléctrodos [Malhotra et al, 2004]; (b) Direcções em que foi avaliada a resistividade.

Aplicando a lei de Ohm que relaciona a intensidade da corrente elétrica com a diferença de potencial aplicado num circuito eléctrico, resulta:

$$R = \frac{V}{I} \text{ com } R = \rho \cdot \frac{L}{A} \Leftrightarrow \rho = \frac{V \cdot A}{I \cdot L} \quad (1)$$

sendo R a resistência elétrica [Ω], I a intensidade de corrente elétrica [A], V a diferença de potencial [V], ρ a resistividade elétrica [Ω.m], A a área do eléctrodo que contacta com o elemento [m<sup>2</sup>] e L a distância entre os eléctrodos [m].

Durante o teste é aplicada uma corrente alternada (CA) de baixa tensão entre os dois eléctrodos exteriores e mede-se uma tensão nos dois eléctrodos interiores, a partir da qual se obtém a resistividade do betão. O espaçamento entre os eléctrodos é de 50 mm (constante), e aplica um sinal com frequência de 72 Hz, que permite uma gama de medição entre 0 – 99 kΩ.cm, com uma precisão de ± 1 kΩ.cm. De modo a poder aferir as medições, os ensaios são intercalados com calibrações numa régua de calibração. As medições foram feitas no centro de cada segmento em 4 direcções, 0°, 45°, 90° e 135°, tal como se ilustra na Figura 2 (b).

Caso a resistividade seja realmente sensível à orientação preferencial das fibras, serão de esperar valores inferiores ao longo desse alinhamento e superiores noutras direcções, particularmente numa direcção ortogonal à preferencial.

A Figura 3, na qual se representam os valores médios em cada ponto independentes da orientação, permite identificar uma significativa heterogeneidade espacial. Os valores medidos são superiores à média nas extremidades e inferiores no

centro. Atendendo a que a presença de fibras diminui a resistividade medida, as diferenças encontradas nos valores locais da resistividade elétrica podem ser atribuídas a uma menor concentração de fibras na extremidade direita da placa.

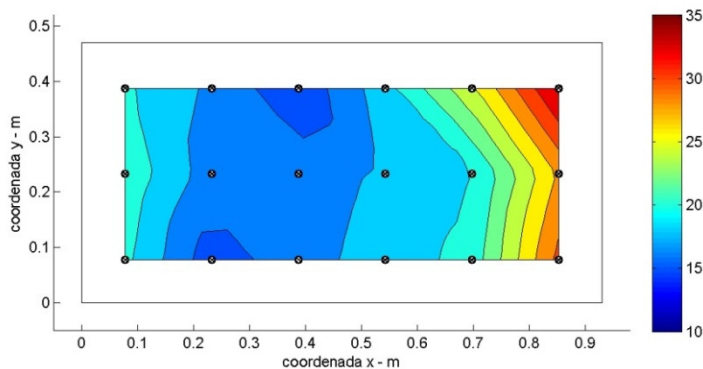


Figura 3 – Médias locais da resistividade, independente da orientação

Nas Figura 4 (a) e (b) ilustra-se a variação em torno da média local para cada segmento e para as direções  $0^\circ$  e  $90^\circ$ . Presumindo que as fibras estão preferencialmente orientadas na direção longitudinal da placa, isto é, ao longo da direção referida como  $0^\circ$ , e vendo que os resultados da resistividade são, não sempre, mas em média menores nessa direção, então os resultados aparentam ser algo sensíveis à orientação das fibras. No entanto, este tipo de ensaio parece ser bastante mais sensível à concentração das fibras do que à sua orientação.

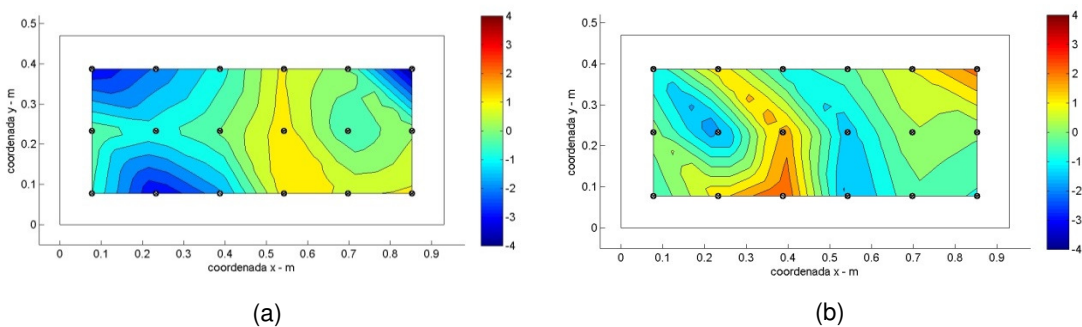


Figura 4 – Variação da resistividade face à média local para: (a) direção  $0^\circ$ ; (b) direção  $90^\circ$ .

### 3.2 Ensaios de ultra-sons

O uso mais corrente de ultra-sons em ensaios não destrutivos em materiais à base de cimento, nomeadamente em betões correntes, é feito pela aplicação do método de medição da velocidade de transmissão de impulsos de ultra-sons (UPV). A transmissão e propagação de impulsos ultra-sónicos necessitam: da geração de um sinal eléctrico do tipo impulso, isto é, não contínuo, por um gerador de sinal; seguido da transformação do sinal eléctrico em movimento mecânico e sua transmissão ao meio por um transdutor transmissor com frequência de ressonância da gama ultra-sónica desejada; a propagação da onda mecânica pelo meio que se pretende estudar; a recepção da onda mecânica e sua transformação em sinal eléctrico analógico por um transdutor receptor sensível a uma gama suficientemente larga de frequências ultra-sónicas; a aquisição e digitalização do sinal por um receptor de sinal e; finalmente, o processamento de sinais, transmitido e recebido, em que é medido o tempo de viagem

Foram realizados ensaios com medição de velocidade de propagação de ondas P, UPV, na superfície da placa sendo o objectivo avaliar a uniformidade das velocidades de propagação ou dos tempos de viagem das ondas, em função da distribuição das fibras. Os ensaios com UPV na superfície da placa foram feitos colocando um dos transdutores no centro de cada um dos segmentos, e colocando o outro transdutor a uma distância de 0.155 m, centro a centro, obtendo várias leituras do tempo de viagem para diferentes ângulos como ilustrado na Figura 5 (b). Os segmentos junto aos bordos produzem um número menor de orientações possíveis.

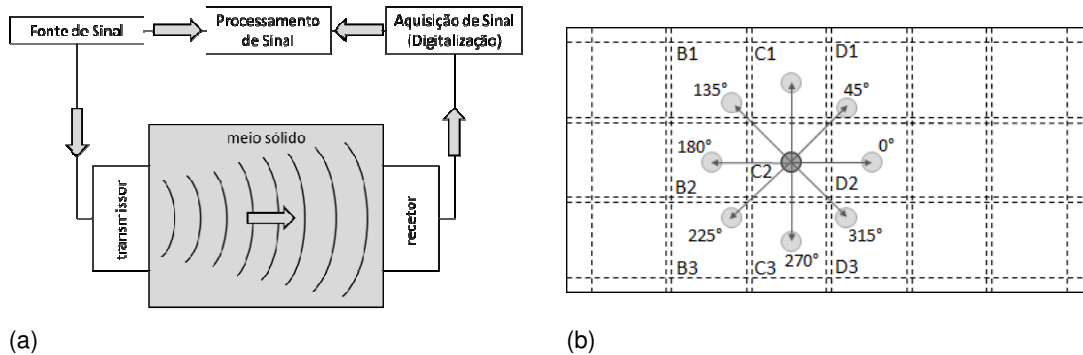


Figura 5 – (a) Esquema de funcionamento do ensaio UPV; (b) Localização dos transdutores nas diferentes direcções no ensaio UPV.

Em princípio, caso a propagação de ondas seja sensível à presença e orientação preferencial das fibras, então será de esperar tempos de viagem menores com maiores concentrações e orientação preferencial das fibras, e tempos de viagem maiores para menores concentrações e noutras orientações de fibras. A análise da Figura 6 permite observar, tal como nos ensaios de resistividade elétrica, alguma heterogeneidade espacial. Os resultados, mais elevados no centro e inferiores nas extremidades, variam visivelmente em relação à média global.

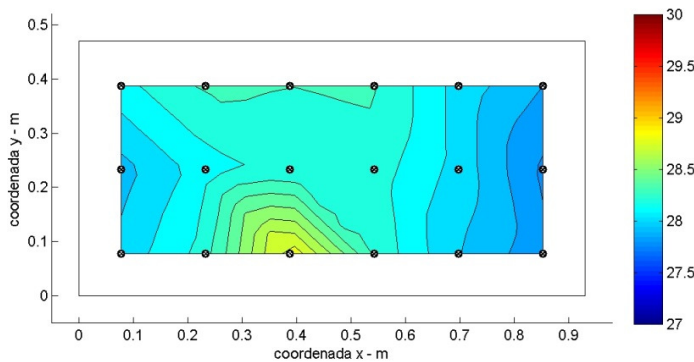


Figura 6 – Médias locais dos tempos de viagem ( $\mu\text{s}$ ) independentemente da orientação.

A variação dos tempos de viagem com a direcção do ensaio em relação à média local do respectivo segmento está ilustrada na Figura 7 (a) e (b). Da observação dos resultados da Figura 7, referentes à variação local com a orientação, fica clara a existência de uma tendência de resultados mais baixos do que a média local para a direcção  $0^\circ$  e mais alta do que a média local para a direcção perpendicular, o que confirma a sensibilidade deste método para a orientação das fibras.

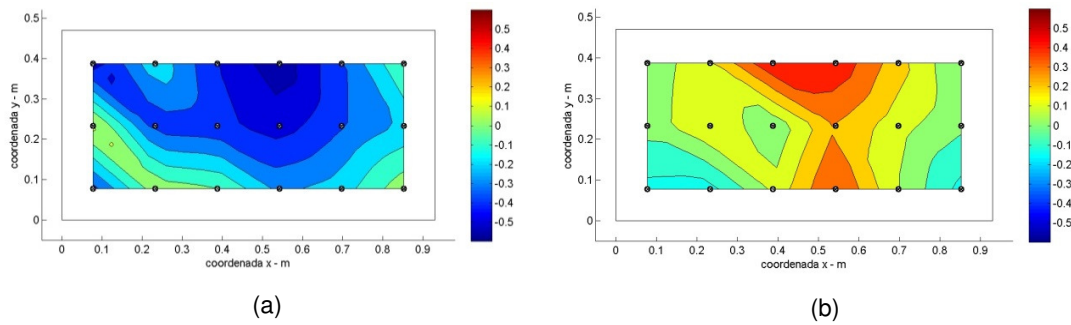


Figura 7 – Variação dos tempos de viagem em relação à média local para: (a) direcção 0º e (b) direcção 90º.

### 3.3 Ensaios de indutância eléctrica

À semelhança do trabalho desenvolvido por Ferrara et al [2011] em que é apresentado um método que utiliza uma sonda sensível às propriedades magnéticas do aço, procurou-se implementar um ensaio de indutância eléctrica. Os fundamentos do método baseiam-se no facto de que, a presença e posição relativa das fibras num elemento de FRC modificam as linhas de um campo magnético aplicado no espaço do betão como se ilustra na Figura 8 (a). Deste modo, inserindo o betão no circuito magnético de uma bobina, a medição da sua indutância permite medir indirectamente a permeabilidade magnética do betão, por comparação das indutâncias da bobina com betão e com ar no espaço utilizado. A diferença do valor da indutância é causada pela diferença de permeabilidade magnética dos dois meios: ar e betão.

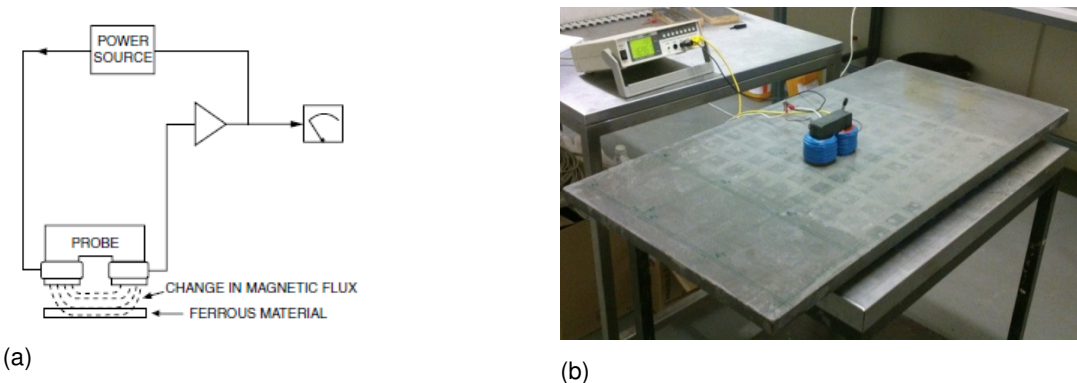


Figura 8 – (a) Esquema do ensaio de indutância eléctrica [Malhotra et al, 2004]; (b) Ensaio de Indutância eléctrica.

A expressão que permite determinar a indutância de um determinado meio material é dada pela Equação (2):

$$L = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot N^2 \cdot \frac{A}{l} \quad (2)$$

onde L é a Indutância,  $\mu_0$  é a permeabilidade magnética do vácuo ( $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$  H/m),  $\mu_r$  é a permeabilidade magnética do meio em análise, N é o número de espiras, A é a área do núcleo envolvido pelas espiras e l é o comprimento envolvido pelo cabo ao longo das espiras.

Obtêm-se com recurso a uma mesma sonda, duas indutâncias distintas  $L_1$  e  $L_2$ , sem contacto da sonda no meio obtêm-se o valor para o ar e em contacto com o meio o valor respectivo desse meio. Fazendo o quociente entre os valores, e sabendo que, sendo que  $N$ ,  $A$  e  $l$  são propriedades constantes da sonda, então consegue-se obter a permeabilidade magnética do meio, ver Equação (3)

$$\mu_{r1} = \frac{L_1}{L_2} \quad (3)$$

Para implementar este método, foi construída uma sonda com uma bobina com um conjunto de espiras significativo que cria um circuito magnético de alta permeabilidade, de modo que o valor da indutância seja grande mesmo com parte do percurso no ar, de modo a obter qualidade das medições, isto é, a medição é feita com valores altos para a gama de medida do instrumento – uma ponte de medida de RLC.

Tal como nos ensaios de resistividade e de ultra-sons, a observação da Figura 9 evidencia alguma heterogeneidade nestas medições com destaque para os cantos da extremidade direita. Quanto à natureza das variações, os valores de indutância são superiores à média no centro, semelhantes na extremidade esquerda e inferiores na extremidade direita.

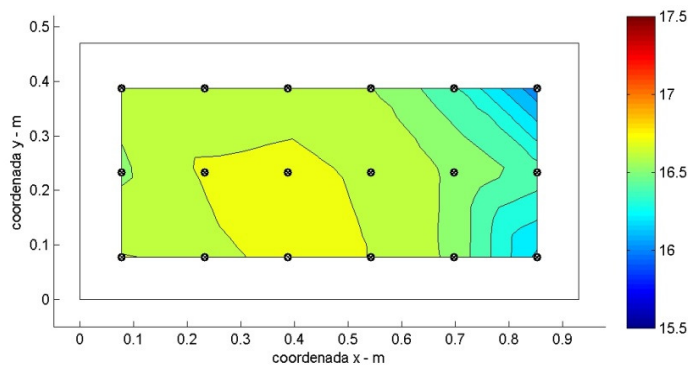


Figura 9 – Médias locais da indutância elétrica independentemente da direção.

Presumindo que as fibras estão preferencialmente orientadas na direção longitudinal da placa, e vendo que os resultados da indutância são, em média, maiores nessa direção, então os resultados aparentam ser consistentemente sensíveis a essa direção. Quanto à direção transversal ( $90^\circ$ ) observa-se que os valores são consistentemente mais baixos que a média.

Na Figura 10 ilustram-se, em forma de superfícies tridimensionais, os resultados referentes aos valores da permeabilidade magnética medidos segundo as duas direções em análise ( $0^\circ$  e  $90^\circ$ ). É bem nítida a variação espacial, semelhante nas duas orientações de ensaio e a diferença entre as duas direções comparadas, com os resultados medidos a  $0^\circ$  a serem superiores aos medidos a  $90^\circ$ .

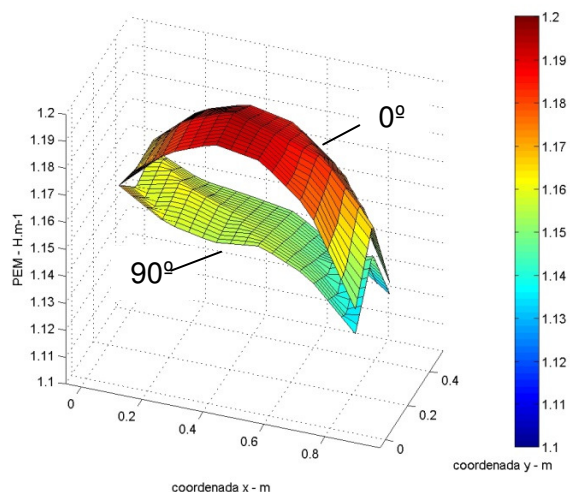


Figura 10 – Comparação entre a permeabilidade magnética medida a 0° e a 90°.

#### 4 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Os ensaios não destrutivos realizados neste trabalho permitiram identificar com sucesso heterogeneidades no material do provete. Aparentemente há uma menor concentração de fibras na zona mais afastada da origem do fluxo de betão, como indicado pelos resultados da resistividade e da indutância elétricas na extremidade direita. Os ensaios com ultra-sons mostraram ser menos sensíveis a esta suposta heterogeneidade.

Quanto à orientação das fibras, o ensaio de indutância eléctrica demonstrou ser o mais sensível observando-se permeabilidades magnéticas mais elevadas na direcção 0°. É de realçar que se observam tempos de viagem menores nos ultra-sons, resistividades mais baixas na direcção longitudinal (0°) sugerindo esse alinhamento preferencial. Assim sendo, os ensaios não destrutivos confirmam os estudos de outros autores segundo os quais é possível orientar as fibras segundo a direcção do fluxo de betonagem.

Estas conclusões têm uma natureza preliminar e só poderão ser completamente confirmadas através de ensaios mecânicos dos segmentos da placa. Está previsto realizar-se uma análise comparativa da distribuição das fibras e respectiva orientação por meio de técnicas destrutivas. A resistência à tracção do material vai ser avaliada, tanto na direcção longitudinal como na direcção transversal à orientação preferencial das fibras, com o objectivo de a correlacionar com a informação fornecida anteriormente sobre a distribuição das fibras e a sua orientação.

#### AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado por Fundos FEDER através do Programa Operacional Factores de Competitividade – COMPETE e por Fundos Nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia no âmbito do projeto PTDC/ECM/122446/2010, pelo apoio particular sob a forma de um contrato Ciência 2008 e pelo apoio financeiro à Unidade de Investigação. Os autores agradecem ainda ao LABEST/FEUP por proporcionar as condições necessárias à realização deste trabalho.

## 5 REFERÊNCIAS

- Abrishambaf, A. & Barros, J. & Cunha, F. N. M. 2012. Assessment of fibre orientation and distribution in steel fibre reinforced self-compacting concrete panels, 1–12.
- Ferrara, L. & Faifer, M. & Toscani, S. 2011. A magnetic method for non destructive monitoring of fiber dispersion and orientation in steel fiber reinforced cementitious composites—part 1: method calibration. *Mat. and Structures*, 45(4), 575–589. doi:10.1617/s11527-011-9793-y.
- Gowers, K. R. & Millard, S. G. 1999. Measurement of Concrete Resistivity for Assessment of Corrosion Severity of Steel Using Wenner Technique." *ACI Materials Journal* 96: 536-541.
- Lequesne, R.D. 2011. Behavior and Design of High-Performance Fiber-Reinforced Concrete Coupling Beams and Coupled-Wall Systems, University of Michigan.
- Malhotra, VM & Carino, NJ. 2004. Handbook on Nondestructive Testing of Concrete, 2nd ed. Boca Raton: CRC Press.
- Martinie L & Roussel N. 2010. Fiber reinforced cementitious materials: from intrinsic isotropic behaviour to fiber alignment. In: Khayat KH, Feys D (eds) Design, production and placement of self-consolidating concrete, proceedings of the 6th international RILEM symposium on SCC and the 4th North American conference on the design and use of SCC, SCC 2010, 26–29 September 2010. Springer, Montreal, pp 407–416.
- Naaman, A.E.W.K. 2010. Some correlation between high packing density, Ultra-High Performance, Flow Ability, and Fiber Reinforcement of a Concrete Matrix. *Actas do 2º Congresso Ibérico, Betão Auto-compactável*, pp. 3-18.
- Polder, R. & Andrade, C. & Elsener, B. & Vennesland, O. & G. R. & W. R. & R. M. 2000. Test methods for on site measurement of resistivity of concrete. RILEM TC 154-ECM: Electrochemical techniques for measuring metallic corrosion. *Materials* 33: 603-611.
- Ribeiro, F & Nunes, S. 2013. Betofibra Formulação optimização da composição e ensaios de caracterização à tracção. LABEST/FEUP, Dep. Eng. Civil, Universidade do Porto.
- Stahli P & Custer R & Van Mier, J.G.M. 2008. On flow properties, fibre distribution, fibre orientation and flexural behaviour of FRC. *Mater Struct* 41(1):189–196