



M 2017

U. PORTO
FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

CARATERIZAÇÃO NÃO-DESTRUTIVA DE CAMADAS DE UHPFRC COM BASE NO MÉTODO MAGNÉTICO

JOÃO NUNO ROSADO BATISTA FERNANDES MOTA
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA
À FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO EM
ENGENHARIA CIVIL

CARATERIZAÇÃO NÃO-DESTRUTIVA DE CAMADAS DE UHPFRC COM BASE NO MÉTODO MAGNÉTICO

JOÃO NUNO ROSADO BATISTA FERNANDES MOTA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS

Orientador: Professora Doutora Sandra da Conceição Barbosa Nunes

JUNHO DE 2017

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2016/2017

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2016/2017 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2017.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus pais e irmão

AGRADECIMENTOS

Agradeço à professora Sandra Nunes por toda a ajuda que me deu ao longo deste trabalho.

À Paula Silva e ao Cláudio Ferraz quero agradecer toda a ajuda que me deram durante os trabalhos em laboratório.

Ao Ricardo Pereira quero agradecer a ajuda com alguns dos conceitos de eletromagnetismo envolvidos neste trabalho.

Agradeço ainda aos meus amigos por todo o apoio que me deram ao longo do meu percurso na Faculdade.

RESUMO

O betão tem um papel fundamental na atualidade como material de construção. Devido à sua importância, este material está em constante evolução tendo em vista melhorar o seu desempenho e baixar os seus custos, quer de produção quer de manutenção. É neste contexto que num passado recente surgiram os materiais cimentícios de ultra-elevado desempenho reforçados com fibras (Ultra High Performance Fiber Reinforced Cement composite - UHPFRC).

Como se trata de um material recente, quando comparado com a maioria dos restantes materiais de construção, ainda carece de normas que regulem o seu dimensionamento e a sua aplicação. Para além disso, o seu comportamento à tração está muito dependente da distribuição das fibras dentro da matriz cimentícia. Para tal recorreu-se a uma sonda desenvolvida anteriormente na FEUP no âmbito do projeto PTDC/ECM/122446/2010, capaz de medir a indutância magnética.

No seguimento desse projeto estabeleceram-se dois indicadores que permitem determinar a dosagem de fibras e estabelecer a respetiva orientação. No entanto, surgiram algumas dúvidas com a aplicação destes indicadores, nomeadamente na presença de dosagens de fibras mais elevadas e na presença de armadura ordinária. É aqui que se insere o presente trabalho que tem como objetivo caracterizar a distribuição e orientação das fibras em elementos finos de UHPFRC.

No caso da presença de varões de armadura, procurou-se estabelecer limites para os quais as leituras do UHPFRC já não seriam afetadas. Contudo, não foi possível estabelecer limites definitivos para a influência destes nas medições uma vez que, durante a campanha experimental, surgiram novas variáveis com as quais não se tinha entrado em linha de conta. Ainda assim, identificaram-se as variáveis envolvidas e apresentaram-se como limites 220.71 mm de afastamento e/ou 51.95 mm de recobrimento.

PALAVRAS-CHAVE: UHPFRC, ARMADURAS, NDT, INDUTÂNCIA, ORIENTAÇÃO DE FIBRAS

ABSTRACT

Concrete plays a key role today as a building material. Due to this importance, it is constantly evolving to improve its performance and lower its production and maintenance costs. It is in this context that the Ultra High-Performance Fiber Reinforced Cement composite (UHPFRC) has emerged in the recent past.

As it is a recent material, when compared to most other building materials, it still lacks standards that regulate its design and application. In addition, its tensile behavior is very dependent on the fibers' distribution within the cementitious matrix. For this purpose, a probe previously developed at FEUP in the scope of project PTDC / ECM / 122446/2010, capable of measuring the magnetic inductance, was used.

Following this project, two indicators were established, that can measure the fiber dosage and establish an average orientation of these fibers. However, some doubts arose about the behavior of these, namely about the presence of larger dosages of fibers and the presence of rebars. The present work inserts here, aiming to characterize the distribution and orientation of the fibers in thin elements of UHPFRC.

In the case of the presence of reinforcing bars, it was attempted to establish limits for which the readings of the UHPFRC would no longer be affected. However, it was not possible to establish definitive limits for their influence on the measurements since, during the experimental campaign, new variables that had not been considered appeared. Nevertheless, the variables involved were identified. The limits were presented as 220.71 mm of distance between rebars and/or 51.95 mm of covering.

KEYWORDS: UHPFRC, REBARS, NDT, INDUCTANCE, FIBER ORIENTATION

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
1 Introdução.....	1
1.1. ENQUADRAMENTO DO TRABALHO.....	1
1.2. OBJETIVOS DO TRABALHO	2
1.3. DESCRIÇÃO DO TRABALHO	2
2 Materiais Cimentícios de Ultra-Elevado Desempenho Reforçados com Fibras(UHPFRC)	3
2.1. NOTA HISTÓRICA.....	3
2.2. MATERIAIS CONSTITUINTES.....	4
2.2.1. SUPERPLASTIFICANTE	4
2.2.2. AGREGADO.....	4
2.2.3. FIBRAS.....	4
2.3. PRINCIPAIS PROPRIEDADES DO UHPFRC	6
2.3.1. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E À TRAÇÃO	6
2.3.2. IMPERMEABILIDADE	8
2.3.3. AUTORREGENERAÇÃO.....	8
2.4. EXEMPLOS DE APLICAÇÃO	8
2.4.1. ELEMENTOS ARQUITETÓNICOS	8
2.4.2. ESTRUTURAS ESBELTAS	9
2.4.3. APLICAÇÃO DE REFORÇO/REPARAÇÃO DE ESTRUTURAS EXISTENTES	10
2.4.4. ANCORAGENS.....	10
2.4.5. ESTRUTURAS RESISTENTES A EXPLOSÕES	11
2.4.6. VIAS DE COMUNICAÇÃO	11
2.4.7. ESTRUTURAS HIDRÁULICAS.....	12
3 Métodos de Ensaio Não-destrutivos	15
3.1. MÉTODOS DE ENSAIO DIRETOS	15
3.2. MÉTODOS DE ENSAIO INDIRETOS.....	16

3.3. ENSAIO NÃO DESTRUTIVO PARA DETERMINAÇÃO DA DOSAGEM E ORIENTAÇÃO DAS FIBRAS	17
3.3.1. MOTIVAÇÃO.....	17
3.3.2. DESCRIÇÃO DA SONDA.....	17
3.3.3. INDICADOR DA DOSAGEM DE FIBRAS.....	20
3.3.4. INDICADOR DA ORIENTAÇÃO DAS FIBRAS.....	22
3.3.5. SONDA COMERCIAL DESENVOLVIDA PELA HILTI.....	24
4 Programa Experimental.....	27
4.1. INFLUÊNCIA DOS VARÕES	27
4.1.1. MOTIVAÇÃO.....	27
4.1.2. DESENVOLVIMENTO DE UMA ESTRUTURA PARA O POSICIONAMENTO DOS VARÕES	27
4.1.2.1. Materiais	27
4.1.2.2. Funcionamento.....	27
4.1.3. ENSAIOS APENAS COM UM VARÃO.....	32
4.1.3.1. Definição	32
4.1.3.2. Resultados	33
4.1.4. INFLUÊNCIA DO RECOBRIMENTO E DO ESPAÇAMENTO DOS VARÕES	35
4.1.4.1. Resultados	40
4.2. INFLUÊNCIA DA MISTURA DE FIBRAS.....	44
4.2.1. MOTIVAÇÃO.....	44
4.2.2. DEFINIÇÃO.....	44
4.2.3. MATERIAIS.....	46
4.2.4. PREPARAÇÃO	47
4.2.5. ENSAIOS NO ESTADO FRESCO.....	49
4.2.6. MEDIÇÕES DA INDUTÂNCIA	50
4.2.7. RESULTADOS.....	50
4.3. INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DO PROVETE.....	56
4.4. MISTURA DE FIBRAS USADA NO VIADUTO DE CHILLON.....	60
4.4.1. MOTIVAÇÃO E RESULTADOS ANTERIORES	60
4.4.2. PREPARAÇÃO DOS PROVETES	61
4.4.3. ENSAIOS NO ESTADO FRESCO.....	63
4.4.4. MEDIÇÕES DA INDUTÂNCIA	65
4.4.5. RESULTADOS.....	65

5 Conclusões	69
5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS	69
5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	70
Bibliografia.....	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Comparação das proporções dos diversos materiais constituintes no UHPFRC e no betão convencional [21].	4
Figura 2.2 Setup de orientação das fibras com indicação da direção da força eletromagnética	5
Figura 2.3 Esquema de corte do UHPFRC para equacionar a orientação das fibras [26].	6
Figura 2.4 Representação do comportamento teórico do UHPFRC em tração e das diferentes fases do seu comportamento [42].	7
Figura 2.5 Diagrama de comportamento tensão-extensão em tração, proposto pela JSCE [11].	7
Figura 2.6 Resultados de ensaios à tração para diferentes orientações das fibras [26].	7
Figura 2.7 Exterior do estádio Jean Bouin em Paris, França [50].	8
Figura 2.8 MuCem, Museu das Civilizações da Europa e do Mediterrâneo, em Marselha [51].	9
Figura 2.9 Ponte pedonal Sakata-Mirai sobre o rio Niita na cidade de Sakata [52].	9
Figura 2.10 Reforço e impermeabilização da laje de um dos viadutos de Chillon, na Suíça [33].	10
Figura 2.11 Solução de uma placa de ancoragem em UHPFRC, antes e depois da sua aplicação [56].	10
Figura 2.12 Pannel de UHPFRC depois de ter sido testado [59].	11
Figura 2.13 a) Peça ensaiada no Laboratório Central de Estradas e Pontes no Centre de Nantes; b) Ensaio à abrasão [61].	12
Figura 2.14 Pavimento constituído por elementos de UHPFRC ao longo de uma linha de caminho de ferro de alta velocidade na China [62].	12
Figura 2.15 Reabilitação com o recurso a UHPFRC da torre de sinalização “Le Cabon” na baía do porto de Lorient em Brittany, França [64].	13
Figura 2.16 Baragem de Caderousse, no rio Rhone em França, após as obras de reparação com UHPFRC, visíveis a cinzento claro [65].	13
Figura 2.17 Cobertura em UHPFRC dos tanques da central de tratamento de águas residuais de Seine Aval no rio Sena, a jusante de Paris, França [66].	14
Figura 3.1 a) Probe Penetration Test [68]. b) Martelo de Schmidt [67].	15
Figura 3.2 a) Pull-off test [69]. b) Break off test [70]. c) Pullout test [71].	16
Figura 3.3 a) Half-cell potential method; b) Four-probe resistivity test [72].	17
Figura 3.4 Esquema simplificado com os principais elementos constituintes da sonda e respetivas dimensões [40].	18
Figura 3.5 Esquema da hipótese de percurso de fluxo magnético, com as principais dimensões [33].	19
Figura 3.6 Sonda ligada ao medidor LCR Agilent usado nos ensaios.	20
Figura 3.7 Esquema de funcionamento da configuração de medição utilizada. (HCUR: corrente alta; HPOT: potencial alto; LPOT: potencial baixo; LCUR: corrente baixa; DUT: elemento sob teste) [33].	20
Figura 3.8 Modelo elétrico equivalente à sonda [1].	21

Figura 3.9 Representação de μ_r , θ_i , μ_r , $90^\circ-\theta_i$ e μ_r , médio para os vários ângulos θ_i [1].	21
Figura 3.10 Exemplo de uma reta de calibração para uma mistura igual de fibras de 9 e de 12 milímetros de comprimento e 0.175 milímetros de diâmetro [1].	22
Figura 3.11 Variação de $\rho_{90^\circ-\theta_i}-\rho_{\theta_i}$ ao longo dos vários ângulos θ_i para as diferentes dosagens de fibras [1].	23
Figura 3.12 Resultados do indicador de orientação para fibras com 10 milímetros de comprimento e 0.175 milímetros de diâmetro [1].	23
Figura 3.13 Exemplo de representação de medições de provetes orientados e não orientados em função das suas permeabilidades magnéticas relativas [1].	24
Figura 3.14 Esquema de funcionamento das sondas da Hilti [78], [79].	24
Figura 3.15 Leituras 2D e representação 3D de uma malha de armadura.	25
Figura 3.16 Leitura da serpentina de um piso radiante e fotografia da mesma.	25
Figura 4.1 Figura representativa de um ensaio genérico onde os varões se encontram suspensos nos cordões.	28
Figura 4.2 Pormenor de uma roldana de plástico fixada na estrutura com recurso a um conjunto de porca e parafuso de nylon.	28
Figura 4.3 (a) Pormenor da colocação dos cordões em torno de uma roldana. (b) Roldana numa posição superior. (c) Roldana numa posição inferior.	29
Figura 4.4 Colocação do cordão central que irá suspender os varões. O cordão tem bastante folga para compensar o comprimento que será enrolado em torno de varões de diâmetro maior.	29
Figura 4.5 a) Varões numa posição próxima um do outro. b) Varões numa posição mais afastada um do outro.	30
Figura 4.6 Pormenor de um varão enrolado com duas voltas pelo cordão de suspensão.	30
Figura 4.7 Placa de acrílico no topo da estrutura. Foi usada uma folha branca para realçar as linhas desenhadas na placa.	31
Figura 4.8 (a) Acetato com uma folha branca para realçar as linhas desenhadas. (b) Acetato encaixado na sonda durante um ensaio.	31
Figura 4.9 Fotografia da estrutura com o acetato onde é possível ver a coordenação entre os referenciais desenhados em ambos.	32
Figura 4.10 Pormenor da parte inferior da placa de acrílico onde é visível a cabeça de um dos parafusos de nylon que a estão a fixar e a respetiva anilha de cartão.	32
Figura 4.11 Ensaio de apenas um varão com a sonda nas posições a) 0° e b) 90° .	33
Figura 4.12 Variação da indutância com a altura do provete, com um alinhamento de 0° .	33
Figura 4.13 Variação da indutância com a distância do varão à sonda, com um alinhamento de 90° .	34
Figura 4.14 Variação relativa da indutância com a distância do varão à sonda, alinhada de 0° .	35
Figura 4.15 Plano fatorial aumentado onde estão representados os pontos fatoriais (círculos azuis), os pontos axiais (estrelas a vermelho) e o ponto central.	36
Figura 4.16 Diferentes posições de leitura da sonda: a) 0° , b) 45° , c) 90° e d) 135° .	37

Figura 4.17 Representação das combinações para a sonda nas posições: a) 0° e b) 90°.	37
Figura 4.18 Representação da combinação F1 para a sonda nas posições: a) 0° e b) 90°.	38
Figura 4.19 Representação da combinação F2 para a sonda nas posições: a) 0° e b) 90°.	38
Figura 4.20 Representação da combinação F3 para a sonda nas posições: a) 0° e b) 90°.	38
Figura 4.21 Representação da combinação F4 para a sonda nas posições: a) 0° e b) 90°.	38
Figura 4.22 Representação da combinação CC1 para a sonda nas posições: a) 0° e b) 90°.	39
Figura 4.23 Representação da combinação CC2 para a sonda nas posições: a) 0° e b) 90°.	39
Figura 4.24 Representação da combinação CC3 para a sonda nas posições: a) 0° e b) 90°.	39
Figura 4.25 Representação da combinação CC4 para a sonda nas posições: a) 0° e b) 90°.	39
Figura 4.26 Representação radial dos resultados da indutância para os varões de 8 mm: a) todos os pontos do plano; b) todos os pontos do plano exceto F1.	42
Figura 4.27 Representação radial dos resultados da indutância para os varões de 10 mm: a) todos os pontos do plano; b) todos os pontos do plano exceto F1.	43
Figura 4.28 Representação radial dos resultados da indutância para os varões de 8 mm: a) todos os pontos do plano; b) todos os pontos do plano exceto F1.	44
Figura 4.29 Secção da peça moldada na fábrica de elementos pré-fabricados na fábrica da Ergon.	45
Figura 4.30 Esquema com as forças intervenientes num ensaio DEWST. [82]	46
Figura 4.31 Procedimento de amassadura.	48
Figura 4.32 Provete “não-orientado”.	48
Figura 4.33 a) Setup de orientação das fibras. b) Provete após betonagem.	49
Figura 4.34 Medição do resultado do ensaio de espalhamento.	49
Figura 4.35 Provetes DEWST com a sonda nas posições: (a) 0° e (b) 90°.	50
Figura 4.36 Provetes DEWST com a sonda nas posições: (a) 45° e (b) 135°.	50
Figura 4.37 Resultado das leituras da indutância para as várias orientações para uma dosagem de fibras de 0.5%.	51
Figura 4.38 Resultado das leituras da indutância para as várias orientações para uma dosagem de fibras de 1.0%.	51
Figura 4.39 Resultado das leituras da indutância para as várias orientações para uma dosagem de fibras de 1.5%.	51
Figura 4.40 Resultado das leituras da indutância para as várias orientações para uma dosagem de fibras de 2.0%.	52
Figura 4.41 Relação entre a permeabilidade relativa média e a dosagem de fibras usando resultados das direções 0° e 90°.	52
Figura 4.42 Relação entre a permeabilidade relativa média e a dosagem de fibras para uma mistura de fibras de 10 mm e diâmetro de 0.175 [1], [40].	53
Figura 4.43 Retas de calibração obtidas num estudo anterior para as fibras Dramix OL 13/20 [40].	53

Figura 4.44 Relação entre as permeabilidades magnéticas relativas segundo a direção de 90°, Y, e a direção de 0°, X.	54
Figura 4.45 Relação entre a permeabilidade relativa média e a dosagem de fibras usando resultados das direções 45° e 135°.	54
Figura 4.46 Relação entre as permeabilidades magnéticas relativas segundo a direção de 135°, Y', e a direção de 45°, X'.	55
Figura 4.47 Última fase de ensaio dos provetes cilíndricos.	57
Figura 4.48 Indutância em função da orientação da sonda para os provetes descritos em 4.2.7 e para os provetes cilíndricos, em ambas as situações a dosagem de fibras é de 0.5%.	58
Figura 4.49 Indutância em função da orientação da sonda para os provetes descritos em 4.2.7 e para os provetes cilíndricos, em ambas as situações a dosagem de fibras é de 1.0%.	58
Figura 4.50 Indutância em função da orientação da sonda para os provetes descritos em 4.2.7 e para os provetes cilíndricos, em ambas as situações a dosagem de fibras é de 1.5%.	59
Figura 4.51 Indutância em função da orientação da sonda para os provetes descritos em 4.2.5 e para os provetes cilíndricos, em ambas as situações a dosagem de fibras é de 2.0%.	59
Figura 4.52 Variação da permeabilidade magnética relativa com a redução da espessura dos provetes.	60
Figura 4.53 Esquema com as dimensões dos provetes para os ensaios DEWST.	61
Figura 4.54 Esquema do processo de mistura das dosagens de fibras de 3.0% e 4.0%.	62
Figura 4.55 Setups de orientação para: a) 90° e b) 0°.	63
Figura 4.56 Molde para amassaduras sem orientação de fibras.	63
Figura 4.57 Ensaio de espalhamento.	64
Figura 4.58 Ensaio de espalhamento para a dosagem de 4.0%.	64
Figura 4.59 Posições da sonda para a medição da indutância: a) 0° e 180°, b) 45° e 225°, c) 90° e 270° e d) 135° e 315°.	65
Figura 4.60 Representação do indicador de dosagem para os pares de orientações a) 0°-90° e b) 45°-135°.	66
Figura 4.61 Relação entre as permeabilidades magnéticas relativas: a) segundo a direção de 90°, Y, e a direção de 0°, X; b) segundo a direção de 135°, Y, e a direção de 45°, X.	67
Figura 4.62 Representação do indicador de orientação das fibras para os pares de orientações a) 0°-90° e b) 45°-135°.	68

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 Quadro resumo das características mais importantes da sonda [40].....	18
Tabela 4.1 Análise estatística dos resultados das medições dos varões com 0 milímetros de recobrimento e a sonda alinhada com a direção dos varões.	34
Tabela 4.2 Plano experimental.....	36
Tabela 4.3 Composições utilizadas para produzir os provetes (kg/m ³).....	47
Tabela 4.4 Resultados dos ensaios de espalhamento	49
Tabela 4.5 Valores calculados do indicador (3.9)	56
Tabela 4.5 Resultados das medições das diferentes alturas dos provetes e respetiva média.	57
Tabela 4.6 Composições utilizadas para produzir os provetes para o ensaio DEWST (kg/m ³).....	62
Tabela 4.7 Resultados dos ensaios de espalhamento.	64

1 INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO DO TRABALHO

Os materiais cimentícios de ultra elevado desempenho reforçados com fibras (Ultra High Performance Fiber Reinforced Cement composite - UHPFRC) são materiais de construção que aliam várias características de outros materiais, como, por exemplo, o desenvolvimento de um patamar de cedência quando sob esforços de tração, ou a sua capacidade impermeabilizante. Para além disso também possuem a característica de autorregenerar pequenas fissuras.

Os seus principais constituintes são areia fina, cimento, partículas finas, como sílica ou cinzas, água, superplastificante e fibras. Esta mistura dá origem a uma matriz cimentícia auto-compactável que envolve as fibras de aço de alta resistência.

Tal como o nome indica, o UHPFRC tem um desempenho mecânico muito bom, atingindo valores de resistência à compressão da ordem dos 120-210 MPa, e uma resistência à tração de 9 a 15 MPa. É também de salientar a sua ductilidade e durabilidade.

Devido a estas características, também as suas aplicações são muito diversificadas, desde elementos puramente arquitetónicos até reforços estruturais importantes, passando por estruturas destinadas a ambientes altamente corrosivos ou proteção contra explosivos.

Esta dissertação vem na continuação dos trabalhos desenvolvidos na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto no âmbito do projeto PTDC/ECM/122446/2010, “BETOFIBRA-Betões de elevado desempenho reforçado com fibras em soluções inovadoras: conceção, caracterização e controlo de qualidade”. Mais especificamente, os trabalhos aqui desenvolvidos têm como foco a caracterização do material com o recurso a indicadores que o descrevam possibilitando um melhor controlo de qualidade. Assim, como o objetivo destes indicadores é o controlo de qualidade de elementos já existentes, os parâmetros utilizados no seu cálculo têm que ser medidos com o recurso a métodos não destrutivos. Devido a estas condicionantes, foi desenvolvido na faculdade um indutor eletromagnético que permite medir valores de indutância, valores estes que são utilizados no cálculo dos indicadores. Estes indicadores permitem estimar a dosagem de fibras e a tendência de orientação das fibras [1].

Verificou-se que para dosagens de fibras mais elevadas, acima de 3.0%, o indicador de dosagem não mantinha a sua aplicabilidade. Assim, insere-se neste trabalho uma recalibração do indicador para averiguar o seu comportamento.

Um dos objetos de estudo do projeto “BETOFIBRA” foram as obras de reforço e impermeabilização do tabuleiro do viaduto de Chillon, na Suíça. Neste estudo tomou-se consciência para a influência que as armaduras de reforço, de aço, têm nas leituras da indutância e, conseqüentemente, nos indicadores estabelecidos. Assim, no presente trabalho procurou-se perceber de que forma o recobrimento, o afastamento e o diâmetro dos varões de armadura influenciam as medições da indutância.

Apesar de terem sido estabelecidos indicadores que caracterizam a dosagem de fibras e a orientação destas, estes apenas são válidos para a mistura de fibras para os quais foram calculados. Assim, sempre que se estiver perante uma nova mistura de fibras é necessário recalibrar estes indicadores. Desta forma, quando surgiu a oportunidade de utilizar uma outra mistura de fibras aproveitou-se para restabelecer estes indicadores. Esta nova mistura está a ser utilizada na conceção de elementos pré-fabricados pela ERGON, uma empresa de pré-fabricação da Bélgica. Como estes elementos apresentam uma espessura maior do que a anteriormente analisada decidiu-se estabelecer limites de aplicação da sonda em termos de obtenção de resultados em profundidade.

1.2. OBJETIVOS DO TRABALHO

Este trabalho procura dar resposta a três questões. A primeira prende-se com o limite de profundidade a partir do qual o UHPFRC deixa de influenciar as medições da sonda. A segunda com os limites de afastamento e recobrimento de varões de armadura para os quais os valores da indutância do UHPFRC, onde os varões estão embebidos, deixam de ser afetados por estes. A terceira, com a reinterpretação da não linearidade da relação entre a dosagem de fibras e a permeabilidade relativa média em provetes com dosagens de fibras superiores a 3.0%.

1.3. DESCRIÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em cinco capítulos, incluindo este onde são descritos o enquadramento e os objetivos do trabalho.

No segundo capítulo é apresentado o UHPFRC descrevendo-se os materiais que o constituem, as suas características e alguns exemplos de aplicação.

No terceiro capítulo é feita uma síntese de vários métodos de ensaio não destrutivos e uma análise mais aprofundada do método de ensaio aqui utilizado.

O quarto capítulo foca a análise experimental e está subdividido em três subcapítulos: o primeiro incide na análise dos efeitos que a armadura tem nos ensaios; no segundo é feita uma análise dos limites de medição da sonda e dos efeitos de uma mistura de fibras diferente das analisadas no projeto onde este trabalho se insere; no terceiro é avaliado o alcance sonda e no quarto são reavaliados os indicadores estabelecidos no projeto PTDC/ECM/122446/2010.

Por fim, no quinto capítulo, apresenta-se as conclusões deste trabalho e algumas considerações a ter em conta numa futura continuação deste trabalho.

2

MATERIAIS CIMENTÍCIOS DE ULTRA-ELEVADO DESEMPENHO REFORÇADOS COM FIBRAS(UHPFRC)

2.1. NOTA HISTÓRICA

Após o aparecimento do betão, o objetivo passou a ser o desenvolvimento do mesmo a fim de obter melhores características e desempenho, diminuindo custos. Para que tal fosse possível, o desenvolvimento de adjuvantes para o betão teve um papel crucial. No caso abordado neste trabalho, o adjuvante em questão é o superplastificante. Este permite obter um betão com elevada fluidez, sem adição extra de água, suficiente para eliminar a necessidade de vibração aquando da sua colocação.

Foi na década de 60 que os superplastificantes foram desenvolvidos permitindo, a partir de então produzir betão com quantidades de água reduzidas [2]. Anos mais tarde, em meados da década de 80, no Japão, foi introduzido um novo tipo de superplastificante, com base no polímero policarboxilato, que permitiu atingir rácios de água/cimento no betão ainda mais baixos [3]. Foi ainda no Japão que se desenvolveu o betão autocompactável com o recurso a estes adjuvantes [4].

É graças a estes adjuvantes de última geração que se conseguiu desenvolver o UHPFRC. Sem o recurso a superplastificantes seria muito difícil conseguir misturar a matriz cimentícia com as fibras mantendo uma baixa quantidade de água que permita obter elevada resistência à compressão, característica deste material [5]. Para além disso torna o UHPFRC numa mistura autocompactável já que o recurso a vibração pode conduzir à segregação das fibras [4], [5].

O desenvolvimento de betões que conseguissem atingir valores de resistência à compressão da ordem dos 500 MPa surgiu em 1972 por Roy et al. [6] e por Yudenfreund et al. [7], através de pesquisas independentes. Como estes betões têm um comportamento muito frágil, houve a necessidade de introduzir fibras na mistura para aumentar a ductilidade, tendo o estudo do UHPFRC começado ainda na década de 70, na Dinamarca pelo professor Bache [8].

Contudo, só na década de 1990 em França se deu a primeira aplicação do UHPFRC, a reabilitação de uma das torres de refrigeração da central nuclear de Cattenom [9]. Foi ainda esta construção que deu origem às recomendações da AFGC, Association Française de Génie Civil, para a construção com este material [9], [10].

No início da década de 2000 também o Japão começou a desenvolver construções com este material, tendo como maior destaque a ponte de Sakata Mirai que deu origem às recomendações da JSCE, Japan Society of Civil Engineers, para o uso de UHPFRC publicadas em 2004 em japonês [11] e em 2006 em inglês [12].

Em 2005 foi a vez da Alemanha fazer um grande investimento na investigação deste material, num esforço conjunto de várias universidades. Contudo, devido à falta de interesse por parte de empreiteiros e donos-de-obra, carecem de experiência no dimensionamento e utilização de UHPFRC [8].

2.2. MATERIAIS CONSTITUINTES

O betão convencional é constituído por cimento, água, agregado grosso e agregado fino [13], podendo ainda incorporar alguns adjuvantes (plastificante, retardador de presa, entre outros) [14]. O betão reforçado com fibras inclui, para além destes materiais, fibras metálicas ou sintéticas. [15]. O UHPFRC não inclui agregado grosso. Inclui adições com partículas finas e superplastificante, incorpora fibras metálicas de menor dimensão e pode ser sujeito a um processo de cura a temperaturas elevadas [11], [16]–[20]. Na Figura 2.1 observa-se a diferença entre as proporções dos diferentes materiais constituintes num UHPFRC e no betão convencional [21].

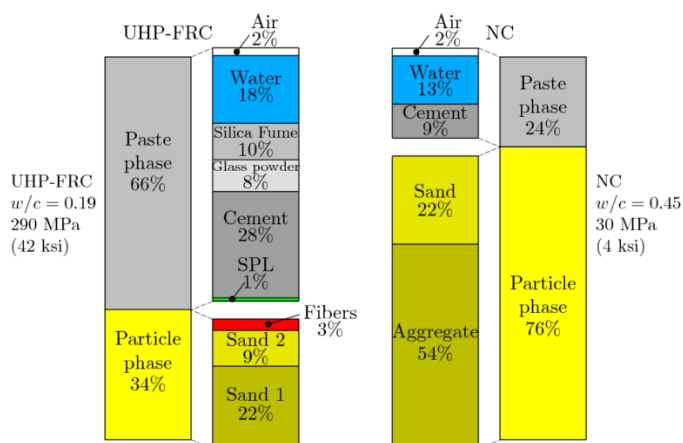


Figura 2.1 Comparação das proporções dos diversos materiais constituintes no UHPFRC e no betão convencional [21].

2.2.1. SUPERPLASTIFICANTE

Devido à possibilidade de segregação dos seus elementos quando é realizada vibração excessiva ou incorreta, é fundamental que o UHPFRC seja autocompactável [4], [5]. Assim, a única possibilidade de conseguir esta característica com pouca quantidade de água é com o recurso a superplastificantes. Desta forma, é possível manter as características de autocompactabilidade, a capacidade de preencher todos os espaços sem vazios, a capacidade de não segregar os diferentes constituintes e a capacidade de passar entre espaços estreitos, por exemplo, entre os varões de armadura [4], com uma razão de água/ligante próxima de 0,2 [5], [10], [11], [17], [22].

2.2.2. AGREGADO

Para além da presença de fibras, um dos fatores que distingue o UHPFRC de outros betões é a inexistência de agregado grosso na sua matriz [17], [19]. Contudo, este é substituído por partículas finas o que dá origem a uma mistura mais densa [17], [18]. Esta redução da dimensão das partículas aumenta a densidade de empacotamento o que permite manter a mesma trabalhabilidade para uma razão de água/ligante mais baixa [18].

2.2.3. FIBRAS

As recomendações japonesas referem que as fibras devem ter entre 10 a 20 mm de comprimento e 0.1 a 0.25 mm de diâmetro, devendo ser usada uma dosagem mínima de 2% em volume, correndo o risco de não atingir os valores de resistência esperados para outras condições de fibras [11], [23]. Contudo a

quantidade mais comum é entre 2 e 3%, chegando por vezes aos 10%, em volume [8]. Já os comprimentos não ultrapassam os 30 mm, na maioria dos casos [24].

Por terem um comprimento reduzido, na generalidade dos casos, as fibras são retas. Para comprimentos maiores utilizam-se, fibras com ganchos [25]. As diferentes fibras têm diferentes papéis consoante o seu tamanho, as menores para combater as microfissuras e as maiores são ativadas para aberturas de fenda maiores [8], [15], [25].

A orientação das fibras também tem um papel fulcral no desempenho à tração do UHPFRC, existindo uma grande diferença nos resultados de uma mesma amostra para várias orientações [24], [26]–[28]. O método mais utilizado para conseguir esta orientação consiste em deixar o UHPFRC fluir no molde, o que leva a que as fibras se posicionem naturalmente [24], [26], [27], [29]–[31]. No caso de elementos de grandes dimensões com um escoamento radial as fibras distribuem-se perpendicularmente à direção do escoamento [30]–[32]. No caso de elementos de menores dimensões com um escoamento linear as fibras distribuem-se paralelamente à direção do escoamento [26], [27], [31], [32]. Neste trabalho foi utilizado um outro método que consiste em orientar as fibras através da criação de um campo eletromagnético, desenvolvido anteriormente na FEUP no âmbito do projeto PTDC/ECM/122446/2010, [1], [33]

Este método consiste na criação de um campo eletromagnético uniforme entre as duas pernas de um eletroímã em forma de U quando se faz passar uma corrente elétrica nas bobinas enroladas em torno destas, como se pode observar na Figura 2.2. Para completar o circuito, é ainda necessário ligar uma bateria de 12 Volt e um reóstato para controlar a corrente elétrica no circuito. Para verificar que a corrente se mantinha nos 3 mA, ligou-se no circuito um multímetro. Estes elementos podem ser visualizados também na Figura 2.2.

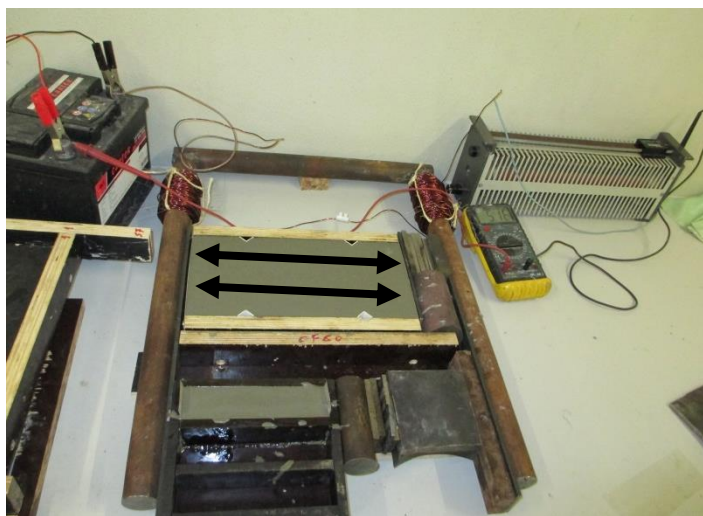


Figura 2.2 Setup de orientação das fibras com indicação da direção da força eletromagnética

É relevante salientar que para além destes casos tem-se ainda a situação em que a orientação das fibras é condicionada pela proximidade de uma das faces do molde, devido ao efeito de parede [24], [29], [32], [34], [35].

Os dois métodos mais comuns para a verificação da orientação das fibras são a análise de imagem [26], [36], [37] e a análise de raio-x [5], [30]. Ambos os métodos têm como objetivo a obtenção de imagens de alta resolução de amostras de UHPFRC. No caso da análise de imagem os provetes têm que ser polidos para serem posteriormente analisados, enquanto que na análise de raio-x não é necessário este

processo, sendo possível analisar várias camadas de um mesmo provete [30] ou proceder a uma análise tridimensional da posição das fibras [38]. Esta análise tem por objetivo equacionar a orientação de cada fibra a partir dos diâmetros máximo e mínimo medidos na respetiva secção, como se vê esquematicamente na Figura 2.3.

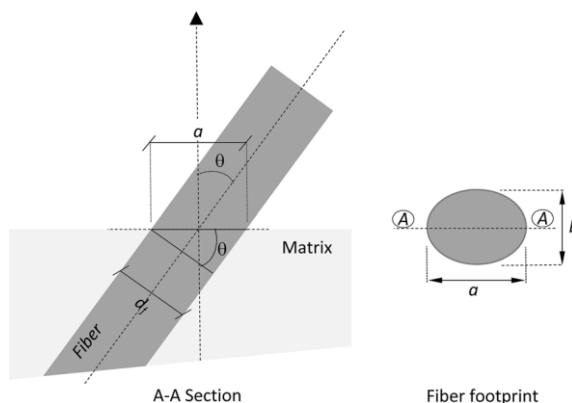


Figura 2.3 Esquema de corte do UHPFRC para equacionar a orientação das fibras [26].

2.3. PRINCIPAIS PROPRIEDADES DO UHPFRC

2.3.1. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E À TRAÇÃO

Devido à quantidade de água reduzida e à elevada densidade da matriz, o UHPFRC apresenta resultados de ensaios à compressão bastante superiores aos do betão convencional, alcançando valores superiores a 200MPa [19], [20], [24], [39]. Inclusivamente, as recomendações japonesas definem como limite mínimo da resistência à compressão do UHPFRC o valor de 150 MPa [11], [23].

Devido à presença de fibras também a resistência à tração assume valores superiores aos normais. Neste caso a orientação das fibras, a sua quantidade e a sua dimensão têm um papel fulcral no valor desta resistência. Fibras maiores, quando ultrapassados os problemas da sua orientação, atingem valores de resistência maiores [36]. Em relação à sua orientação, numa situação ótima com as fibras orientadas de modo a fazerem 90° com as fissuras, ou 0° com a direção da tensão de tração, os valores de resistência alcançados são bastante superiores a uma situação sem fibras ou com as fibras orientadas de modo a fazerem 0° com as fissuras [27], [28]. Nestas circunstâncias, alguns estudos alcançaram valores superiores a 10 MPa para a resistência à tração [11], [22], [26]–[28], [40]. As recomendações japonesas impõem como limite mínimo de resistência 5 MPa [23]. Em termos de resistência à flexão, podem atingir-se valores superiores a 20 MPa [20], [36], [39], chegando em alguns casos a 50 MPa [19].

Uma outra característica do UHPFRC quando tracionado é a possibilidade de exibir endurecimento em tração com um aumento significativo da extensão última [22], [26], [36], [37], [41]. Como se pode observar na Figura 2.4, o UHPFRC tem um comportamento inicial elástico, até ao ponto A, ao que se segue uma fase onde aparecem múltiplas micro-fissuras e se dá um aumento da resistência devido à presença de fibras. A partir do ponto B as deformações localizam-se numa fenda macroscópica, que exibe ainda uma elevada capacidade de dissipação de energia até ao anulamento da tensão transferida.

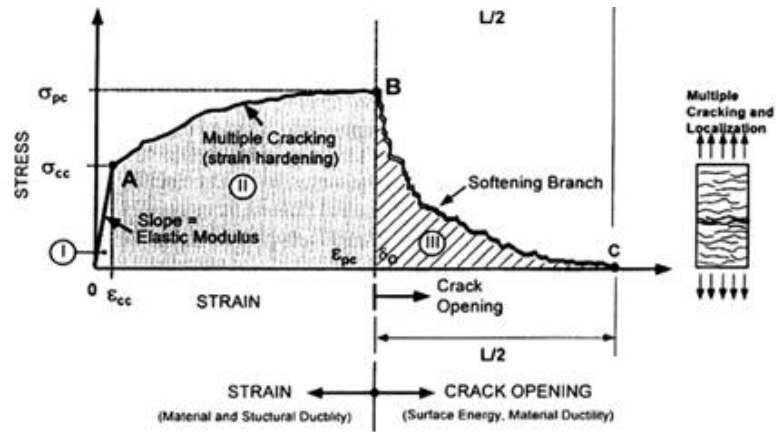


Figura 2.4 Representação do comportamento teórico do UHPFRC em tração e das diferentes fases do seu comportamento [42].

Na Figura 2.5 tem-se um diagrama mais simples proposto pela JSCE para descrever o comportamento à tração do UHPFRC. Na Figura 2.6 apresentam-se os resultados de um conjunto de ensaios por Maya et al. [26], onde se pode constatar claramente a influência da orientação das fibras.

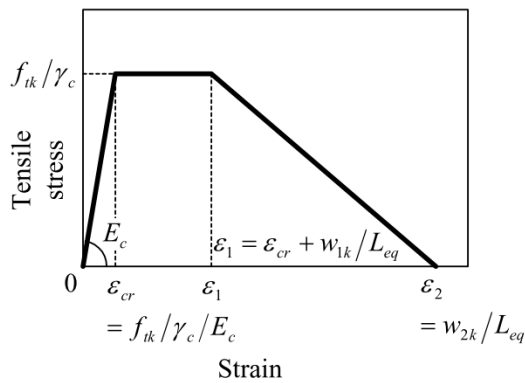


Figura 2.5 Diagrama de comportamento tensão-extensão em tração, proposto pela JSCE [11].

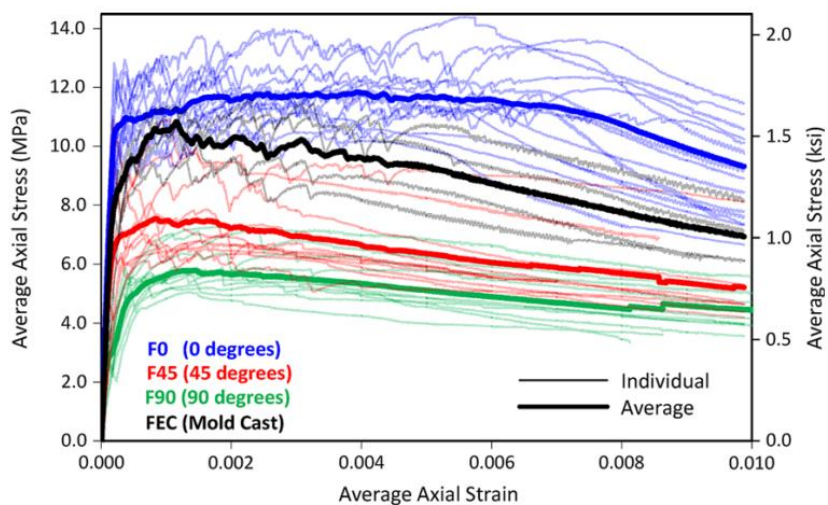


Figura 2.6 Resultados de ensaios à tração para diferentes orientações das fibras [26].

2.3.2. IMPERMEABILIDADE

Como o UHPFRC não tem agregado grosso e possui uma matriz muito densa, este apresenta uma permeabilidade à água muito baixa [19], [43], [44]. Desta forma e juntamente com a presença de microfibras, a permeabilidade do UHPFRC, quando comparada com a de um betão corrente, apresenta valores da permeabilidade de várias ordens de grandeza menores [10], [11].

2.3.3. AUTORREGENERAÇÃO

Como a matriz é muito densa e a quantidade de água é muito baixa, mesmo ao fim de algum tempo, nem todo o cimento reagiu quimicamente. Assim, quando se dá a formação de microfissuras superficiais, com a entrada de água há a possibilidade de reagir parte do cimento não-hidratado, colmatando, desta forma, as microfissuras que se tinham aberto [45], [46].

É este fenómeno de autorregeneração que permite retardar a corrosão das fibras na presença de água [46].

2.4. EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

Devido às suas características muito melhoradas, o UHPFRC também tem diferentes aplicações.

2.4.1. ELEMENTOS ARQUITETÓNICOS

Como o UHPFRC tem uma capacidade resistente elevada permite construir elementos de geometria complexa. Tratam-se de elementos que seriam impossíveis de realizar com betão convencional e com recurso a armadura, o que limita a liberdade de formas.

Neste tipo de utilização são de destacar os elementos de fachada do estádio Jean Bouin, na Figura 2.7, e do Museu das Civilizações Europeia e Mediterrânea, na Figura 2.8, ambas desenhadas pelo arquiteto Rudy Ricciotti [47]–[49].



Figura 2.7 Exterior do estádio Jean Bouin em Paris, França [50].



Figura 2.8 MuCem, Museu das Civilizações da Europa e do Mediterrâneo, em Marselha [51].

2.4.2. ESTRUTURAS ESBELTAS

Uma outra consequência da capacidade resistente é a possibilidade de reduzir a área das secções das estruturas, permitindo uma estrutura final mais esbelta.

Este tipo de utilização é característico das pontes. De entre os vários exemplos que se encontram na literatura, destaca-se a ponte de Sakata-Mirai, na Figura 2.9, que esteve na génese do regulamento japonês com as recomendações para a construção com UHPFRC [11], [52]. Esta estrutura tem um vão de 49.35 metros, a secção transversal tem 1.65 metros de altura por 2.4 metros de largura a meio vão e tem ainda pré-esforço exterior.



Figura 2.9 Ponte pedonal Sakata-Mirai sobre o rio Niita na cidade de Sakata [52].

2.4.3. APLICAÇÃO DE REFORÇO/REPARAÇÃO DE ESTRUTURAS EXISTENTES

Devido às suas características de resistência e impermeabilidade, uma camada fina de UHPFRC, de 2,5 a 5 cm, é o tipo de utilização adotado para reforços estruturais de construções existentes. Este uso permite aumentar a resistência em partes críticas da estrutura e ainda protege-la de infiltrações e de ataques de agentes do meio exterior.

Um exemplo deste tipo de aplicação são as obras de reparação/reforço do viaduto de Chillon na Suíça, que se apresenta na Figura 2.10 [33], [53].



Figura 2.10 Reforço e impermeabilização da laje de um dos viadutos de Chillon, na Suíça [33].

2.4.4. ANCORAGENS

O uso de UHPFRC em ancoragens permite transmitir as cargas dos cabos de pré-esforço para o betão mais facilmente sem recurso, ou, pelo menos, com uma quantidade menor de armaduras ordinárias [54].

No exemplo apresentado na Figura 2.11, o UHPFRC foi usado apenas na placa de ancoragem, circunscrita pelo elemento a azul, que transmite os esforços da cabeça de ancoragem para o resto da estrutura. Como esta é uma zona onde a concentração de esforços é maior, é necessário um material mais resistente [55].



Figura 2.11 Solução de uma placa de ancoragem em UHPFRC, antes e depois da sua aplicação [56].

2.4.5. ESTRUTURAS RESISTENTES A EXPLOSÕES

Numa situação em que o betão esteja sujeito a uma explosão ou a um grande impacto, este em geral fragmenta-se. Contudo, devido à presença de fibras, a projeção de estilhaços é reduzida, caso se use o UHPFRC, prevenindo potenciais danos a pessoas ou objetos que estejam em seu redor. Assim, o UHPFRC é usado em construções de alto risco. A investigação sobre a possibilidade deste tipo de aplicação foi realizada sobretudo na Austrália [57], [58]. Nestes testes, para simular o impacto das explosões, foram utilizadas bolas de demolição. Na Figura 2.12 tem-se o resultado de um destes testes.



Figura 2.12 Painel de UHPFRC depois de ter sido testado [59].

2.4.6. VIAS DE COMUNICAÇÃO

Devido à pequena dimensão dos seus elementos e à sua resistência à derrapagem, o UHPFRC também pode ser utilizado com o pavimento rodoviário. As suas outras características, como por exemplo a sua resistência à abrasão ou a sua impermeabilidade, permitem que esta seja uma solução de longa duração [60]. Na Figura 2.13 pode-se ver um provete com uma camada de gravilha e o respetivo ensaio para simular a abrasão provocada por veículos numa utilização da via. Estes testes foram realizados para provetes de diferentes materiais e para ciclos de mais de 1000 repetições [61].

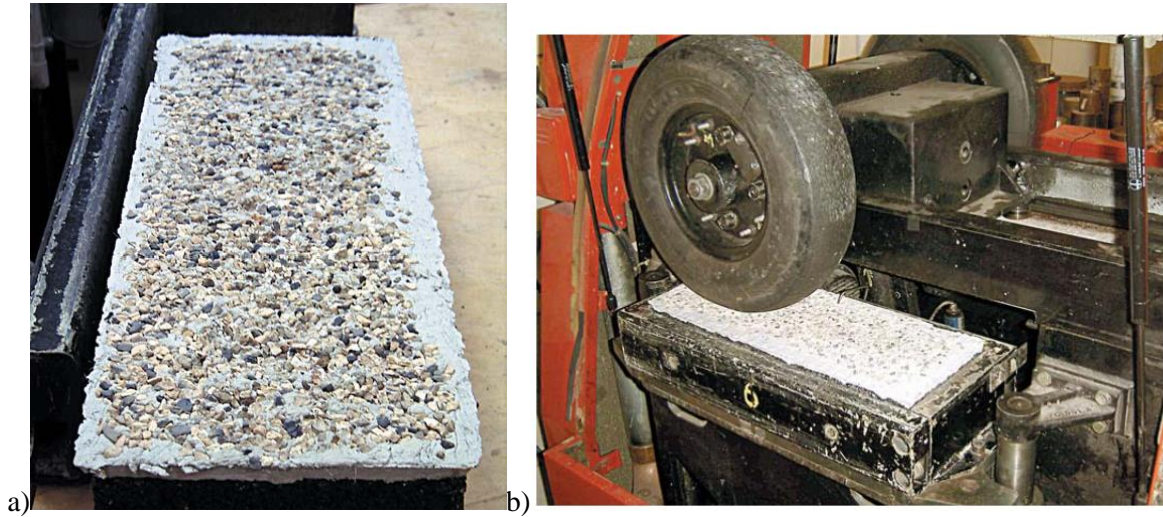


Figura 2.13 a) Peça ensaiada no Laboratório Central de Estradas e Pontes no Centre de Nantes; b) Ensaio à abrasão [61].

Pode ainda ser usado para pavimentos pedonais e passagem de veículos de serviço através do uso de elementos pré-fabricados, como se pode observar na Figura 2.14 [62].



Figura 2.14 Pavimento constituído por elementos de UHPFRC ao longo de uma linha de caminho de ferro de alta velocidade na China [62].

2.4.7. ESTRUTURAS HIDRÁULICAS

As construções com UHPFRC onde se retira maior partido da sua impermeabilidade à água, são principalmente de dois tipos, construções offshore e barragens. Nestas construções as principais vantagens deste material são a impermeabilidade, a resistência ao impacto e a resistência à abrasão [63]–[65]. Um exemplo de construções offshore é o da Figura 2.15 onde o UHPFRC foi transportado de barco para as imediações da construção enquanto a betonagem foi realizada com o recurso a um helicóptero. Um exemplo de uma utilização em barragens é o da Figura 2.16, onde o UHPFRC foi utilizado para reforçar o muro de contenção da água.



Figura 2.15 Reabilitação com o recurso a UHPFRC da torre de sinalização “Le Cabon” na baía do porto de Lorient em Brittany, França [64].



Figura 2.16 Baragem de Caderousse, no rio Rhone em França, após as obras de reparação com UHPFRC, visíveis a cinzento claro [65].

Uma outra utilização semelhante está relacionada com ambientes agressivos como são as estações de tratamento de água. Nestes casos a resistência à presença de agentes agressivos, também tem um papel muito importante no desempenho do material. No caso apresentado na Figura 2.17, os tanques de uma estação de tratamento de água têm grandes quantidades de ácido sulfídrico o que torna este num ambiente muito agressivo para o betão [66].



Figura 2.17 Cobertura em UHPFRC dos tanques da central de tratamento de águas residuais de Seine Aval no rio Sena, a jusante de Paris, França [66].

3

MÉTODOS DE ENSAIO NÃO-DESTRUTIVOS

Os métodos de ensaio não-destrutivos inserem-se em duas categorias distintas, os que estimam diretamente a resistência, na maior parte dos casos a resistência à compressão, e os que o fazem indiretamente através de outros parâmetros. Apesar de serem considerados não destrutivos alguns destes métodos provocam danos superficiais no betão. No entanto, estes podem ser facilmente reparados.

3.1. MÉTODOS DE ENSAIO DIRETOS

São vários os métodos de ensaio que se inserem nesta categoria, contudo têm em comum a característica de estimarem a resistência à compressão através da resistência da camada superficial. Estes ensaios podem ser divididos em dois conjuntos distintos: os que estimam a partir da resistência de penetração ou de impacto, (há um elemento do equipamento de teste que entra ou tenta entrar no betão, como mostra a Figura 3.1) [67], [68]; e os outros que estimam a partir da força necessária para arrancar um pedaço de betão de forma controlada, (há uma parte do betão que é extraída pelo equipamento de teste, como mostra a Figura 3.2) [69]–[71]

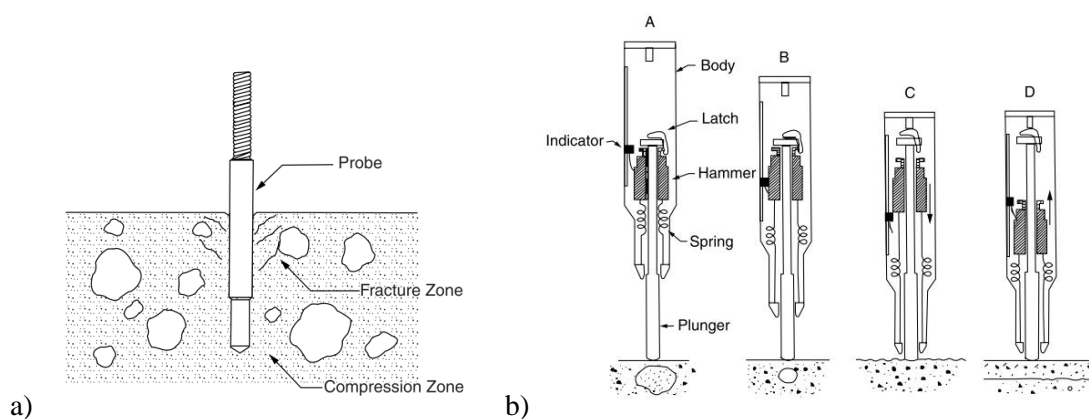


Figura 3.1 a) Probe Penetration Test [68]. b) Martelo de Schmidt [67].

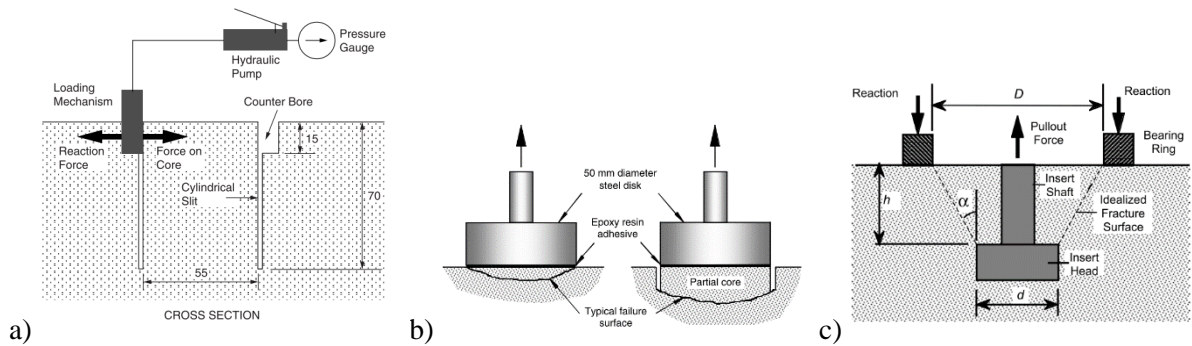


Figura 3.2 a) Pull-off test [69]. b) Break off test [70]. c) Pullout test [71].

3.2. MÉTODOS DE ENSAIO INDIRETOS

De entre os vários métodos de ensaio indiretos, destacam-se três conceitos principais que são comuns a vários ensaios. São eles o uso de pulsos sonoros através do betão, o uso de corrente elétrica e o uso de magnetismo. Para além disso, estes métodos distinguem-se dos métodos diretos por nem sempre terem como objetivo a determinação de uma resistência; estes também englobam ensaios sobre a posição e estado das armaduras ou o estado de conservação do betão, entre outros.

No que toca ao uso do som, os ensaios têm como objetivo a obtenção da resistência à compressão, a localização de fissuras e defeitos, a determinação da espessura da peça ensaiada, a deteção de outros elementos, como por exemplo a armadura, ou a determinação do teor de água em estado fresco.

O uso da corrente elétrica recai sobre dois elementos distintos, podendo ser aplicada no betão ou diretamente nas armaduras. Quando aplicada no betão, consoante o ensaio e respetivo equipamento, pode-se inferir o risco de corrosão das armaduras, o grau de degradação do betão e a espessura do elemento (ver Figura 3.3 b)). Devido à presença de água no interior do betão, estes ensaios têm resultados diferentes para diferentes níveis de cura, ou seja, numa fase mais jovem do betão, devido à maior quantidade de água, também a sua permeabilidade elétrica é maior, afetando os resultados dos ensaios. Por outro lado, é possível estimar o grau de cura do betão através da análise das variações destas leituras ao longo do tempo. Na presença de um betão mais velho, estes ensaios, apesar de estarem a ser aplicados na superfície do betão, permitem também estudar o estado das armaduras. Para poder aplicar a corrente elétrica na armadura é necessário, inicialmente expô-la, ou seja, uma parte da camada superficial do betão tem que ser retirada (ver Figura 3.3 a)). Estes ensaios recaem exclusivamente na análise do estado de conservação das armaduras.

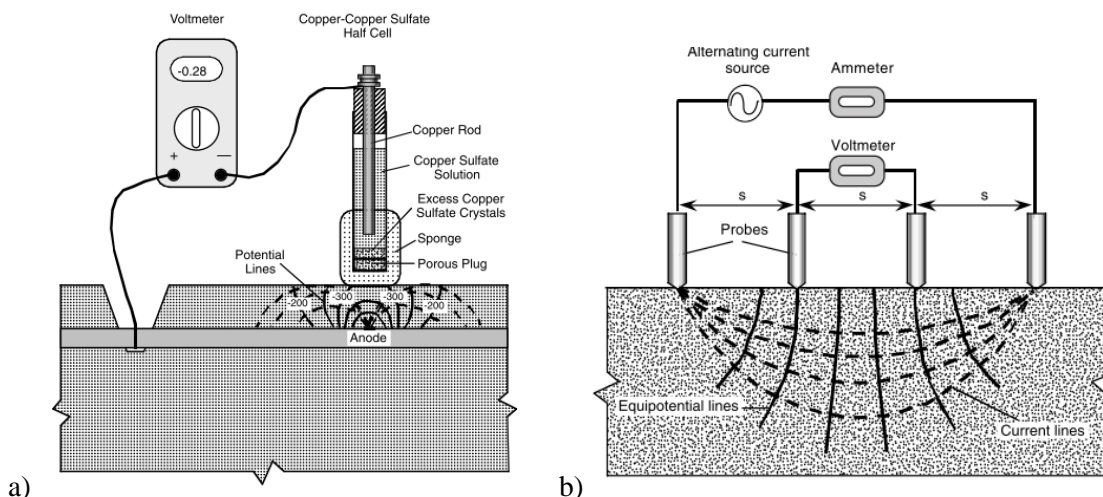


Figura 3.3 a) Half-cell potential method; b) Four-probe resistivity test [72].

As utilizações mais comuns dos métodos de ensaio magnéticos têm como base um indutor magnético e a análise dos efeitos que a armadura produz no campo magnético que o indutor produz. Com estes métodos é possível identificar fissuras nas armaduras e também avaliar se estas se encontram próximas da superfície do betão ou, determinar a posição, diâmetro e profundidade de varões de aço embebidos no betão. Ainda nesta categoria, mas num conceito ligeiramente diferente, é possível determinar o teor de humidade do betão. Depois de colocar o betão num campo eletromagnético é medida a ressonância provocada pelos núcleos de hidrogénio obtendo o resultado esperado [73].

3.3. ENSAIO NÃO DESTRUTIVO PARA DETERMINAÇÃO DA DOSAGEM E ORIENTAÇÃO DAS FIBRAS

3.3.1. MOTIVAÇÃO

No âmbito do projeto PTDC/ECM/122446/2010 foram estudados e comparados diferentes métodos não-destrutivos para caracterização da distribuição das fibras em camadas finas de UHPFRC, nomeadamente, os métodos baseados na medição da velocidade de ultrassons, da resistividade elétrica e da indutância magnética[33]. De entre estes, o que se revelou mais eficaz foi o método baseado na medição da indutância magnética, por ser independente das características da matriz, da idade de ensaio e da humidade do provete. E, por isso, será o método usado no presente trabalho.

3.3.2. DESCRIÇÃO DA SONDA

A sonda desenvolvida para medir a indutância magnética é constituída por um núcleo de ferrite em forma de U (Siemens ferrite N47), cujas dimensões são apresentadas na Figura 3.4. A bobine é constituída por um fio de cobre de 0.5 milímetros e totaliza 1454 voltas em torno das pernas da sonda como mostra a Figura 3.4. Todas as características relevantes da sonda podem ser observadas na Tabela 3.1.

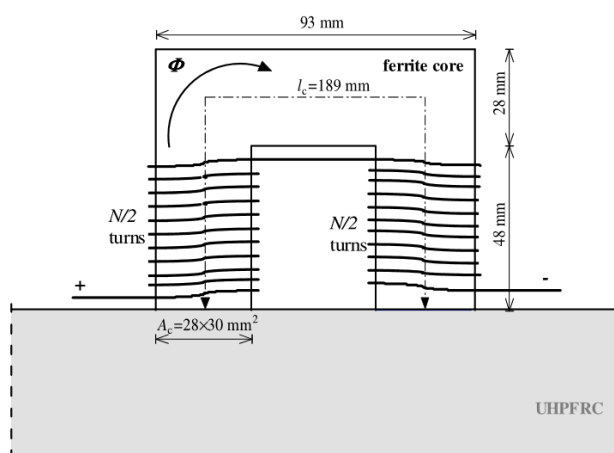


Figura 3.4 Esquema simplificado com os principais elementos constituintes da sonda e respectivas dimensões [40].

Tabela 3.1 Quadro resumo das características mais importantes da sonda [40].

Tipo de núcleo	Núcleo de ferrite em forma de U (Siemens ferrite N47)
Permeabilidade magnética relativa do material do núcleo ($\mu_{r,c}$)	desconhecida
Comprimento do núcleo (l_c)	189 mm
Secção do núcleo (A_c)	28x30 mm ²
Diâmetro do fio de cobre	0.5 mm
Número de voltas do fio de cobre (N)	1454
L_{ar} (mH)	268.93
Resistência (Ω)	19.71

A sonda é caracterizada pela sua impedância e indutância que dependem das características magnéticas do material, neste caso, da ferrite, e funciona como um indutor. A impedância mede a oposição de um circuito a uma corrente elétrica [74]. A indutância é uma característica de um condutor que é medida pelo valor da força eletromotriz que lhe é induzida quando comparado com a taxa de variação da corrente elétrica que a produz [33], [75]. A sua unidade é o Henry (H) que é equivalente a um volt a dividir por um ampere por segundo [75]. A elevada permeabilidade magnética relativa da ferrite no núcleo leva a que as linhas de campo magnético se concentrem nesta e, conseqüentemente, ao aumento do campo magnético que por sua vez leva a um aumento da indutância.

Foi demonstrado por Nunes et al. [53] que a indutância pode ser obtida pela seguinte expressão:

$$L = \frac{\mu_0 N^2 A \mu_{r1} \mu_{r2}}{l_1 \mu_{r2} + l_2 \mu_{r1}} \quad (3.1)$$

na qual:

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ (H/m) que é a permeabilidade magnética do vazio

N é o número de voltas do fio de cobre

A é a área da secção transversal do núcleo

μ_{r1} é a permeabilidade magnética relativa da ferrite

μ_{r2} é a permeabilidade magnética relativa do material em contacto com a sonda, por exemplo, o ar, o UHPFRC, varões de aço, ou outros materiais.

l_1 e l_2 são os comprimentos descritos na Figura 3.5.

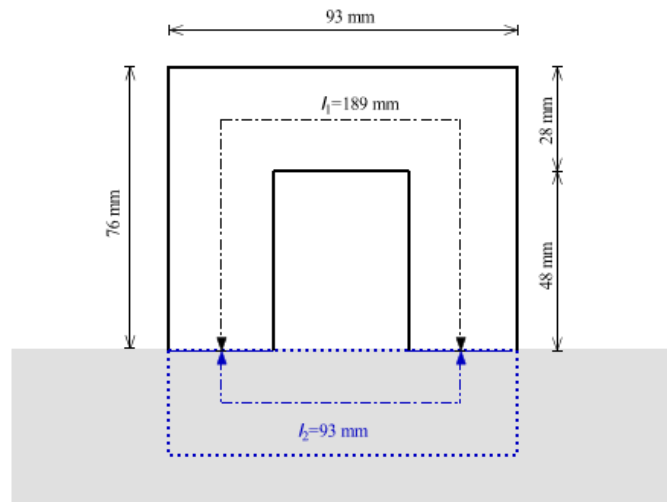


Figura 3.5 Esquema da hipótese de percurso de fluxo magnético, com as principais dimensões [33].

Nunes et. al [53] demonstrou ainda que a permeabilidade relativa do UHPFRC por ser obtida aproximadamente através da seguinte expressão:

$$\mu_{rUHPFRC} \cong k = \frac{L_{UHPFRC}}{L_{ar}} \quad (3.2)$$

Para se proceder às medições utilizou-se o medidor de LCR de alta precisão Agilent E4980A, visível na Figura 3.6. Foi usada uma configuração de um par de quatro terminais que tem vantagens para leituras quer de baixa quer de alta impedância. Esta configuração é feita, tal como mostra a Figura 3.7, de modo a não criar campos magnéticos secundários. Desta forma os ensaios realizados não são adulterados por auto indutância ou indução mútua dos elementos do conjunto de medição. Para além disso, todas as ligações entre a sonda e o medidor devem ser o mais curtas possíveis a fim de evitar perdas [33].

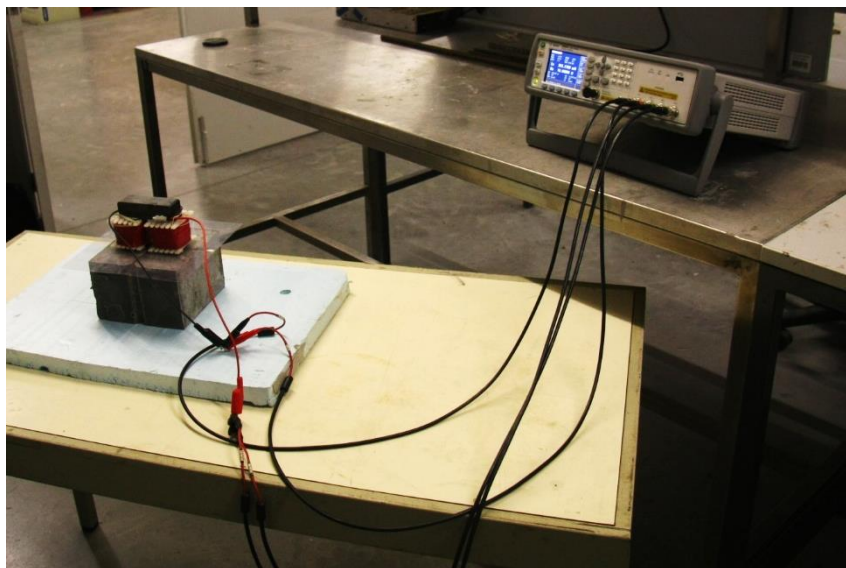


Figura 3.6 Sonda ligada ao medidor LCR Agilent usado nos ensaios.

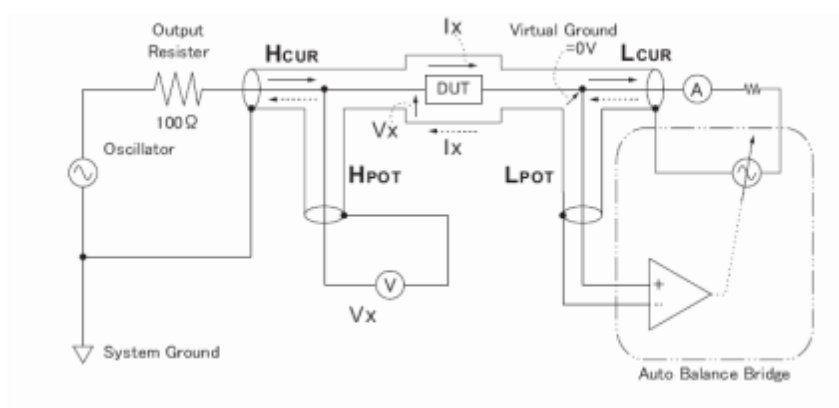


Figura 3.7 Esquema de funcionamento da configuração de medição utilizada. (Hcur: corrente alta; HPOT: potencial alto; LPOT: potencial baixo; Lcur: corrente baixa; DUT: elemento sob teste) [33].

As definições utilizadas na medição foram a função L_s-R_s , uma frequência de 20 Hertz e uma corrente de 2 volt.

No âmbito do projeto PTDC/ECM/122446/2010 estabeleceram-se ainda dois indicadores que permitem estabelecer a relação entre as medições da indutância e a dosagem de fibras e a orientação, que se descrevem nas secções seguintes.

3.3.3. INDICADOR DA DOSAGEM DE FIBRAS

Com o intuito perceber o comportamento magnético da sonda aquando das leituras de provetes de UHPFRC, foi equacionado um modelo elétrico equivalente [1], Figura 3.8. Neste, R_c representa a relutância do núcleo e $R_{UHPFRC,0^\circ}$ representa a relutância de um elemento de UHPFRC com as fibras orientadas na direção de 0° , neste caso. A relutância é o conceito magnético equivalente à resistência elétrica [76].

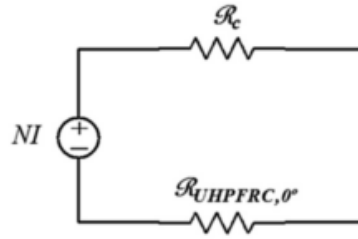


Figura 3.8 Modelo elétrico equivalente à sonda [1].

A partir deste foi possível equacionar a permeabilidade magnética relativa de amostras de UHPFRC, respetivamente para provetes com as fibras orientadas a 0° e a 90°[1].

$$\frac{L_{\theta_i}}{L_{ar}} \cong \frac{1}{\left(\frac{V_f \times \sin^2 \theta_i}{\gamma + \mu_{r,f} \times (1 - \gamma)} + \frac{(1 - V_f \times \sin^2 \theta_i) \times (\mu_{r,f} \times \gamma + 1 - \gamma)}{\mu_{r,f} \times V_f \times \cos^2 \theta_i + (1 - V_f \times \cos^2 \theta_i) \times (\mu_{r,f} \times \gamma + 1 - \gamma)} \right)} \cong \mu_{r,\theta_i} \quad (3.3)$$

$$\frac{L_{(90^\circ - \theta_i)}}{L_{ar}} \cong \frac{1}{\left(\frac{V_f \times \cos^2 \theta_i}{\gamma + \mu_{r,f} \times (1 - \gamma)} + \frac{(1 - V_f \times \cos^2 \theta_i) \times (\mu_{r,f} \times \gamma + 1 - \gamma)}{\mu_{r,f} \times V_f \times \sin^2 \theta_i + (1 - V_f \times \sin^2 \theta_i) \times (\mu_{r,f} \times \gamma + 1 - \gamma)} \right)} \cong \mu_{r,(90^\circ - \theta_i)} \quad (3.4)$$

Na Figura 3.9 encontram-se as representações destas equações para os vários valores de θ_i e para vários teores de fibras.

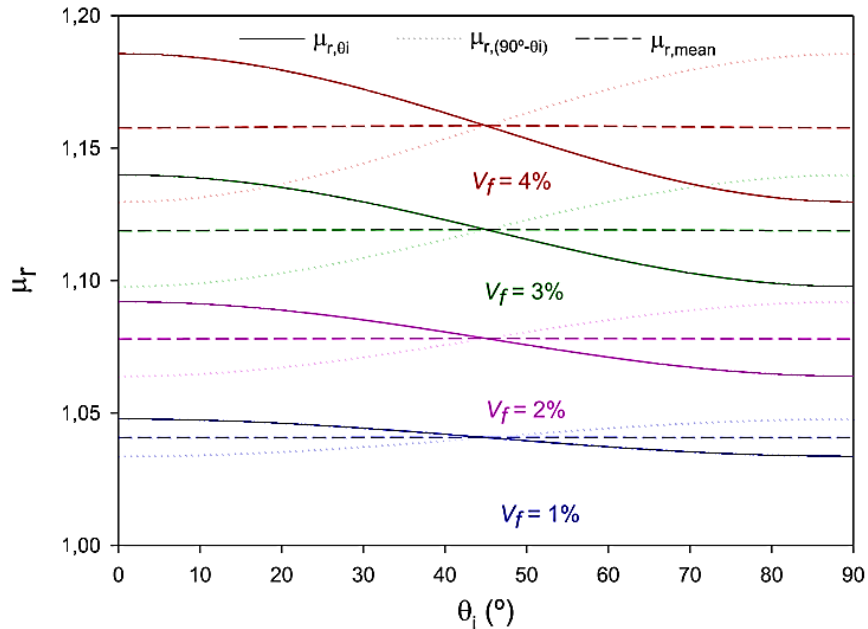


Figura 3.9 Representação de μ_{r,θ_i} , $\mu_{r,(90^\circ - \theta_i)}$ e $\mu_{r,m\u00e9dio}$ para os v\u00e1rios \u00e2ngulos θ_i [1].

Com base nestes dados foi poss\u00edvel concluir que se registam os valores maiores quando as fibras se encontram alinhadas com a sonda e as menores quando estas s\u00e3o ortogonais. Desta forma pode-se definir a permeabilidade magn\u00e9tica relativa m\u00e9dia [1], [33] como:

$$\mu_{r,m\u00e9dio} = \frac{\mu_{r,\theta_i} + \mu_{r,(90^\circ - \theta_i)}}{2} \quad (3.5)$$

Como $\mu_{r,m\u00e9dio}$ n\u00e3o apresenta uma depend\u00eancia relevante em fun\u00e7\u00e3o de θ_i e varia linearmente com a varia\u00e7\u00e3o do teor de fibras, foi proposto como indicador da dosagem de fibras em elementos de UHPFRC.

Assim, tem-se que independentemente da orienta\u00e7\u00e3o das fibras a rela\u00e7\u00e3o entre a dosagem de fibras na mistura e o respetivo valor da permeabilidade magn\u00e9tica relativa m\u00e9dia, obtida a partir dos valores da indut\u00e2ncia em duas dire\u00e7\u00f5es ortogonais, \u00e9 linear. Assim tendo previamente calibrada esta reta, \u00e9 poss\u00edvel estimar a dosagem presente no UHPFRC a partir dos valores da indut\u00e2ncia em duas dire\u00e7\u00f5es ortogonais [1].

Contudo esta rela\u00e7\u00e3o mant\u00e9m-se apenas para a mesma mistura de fibras, pelo que sempre que esta variar ser\u00e1 necess\u00e1rio recalibrar a reta para a gama de dosagens de interesse. Na Figura 3.10 mostra-se a rela\u00e7\u00e3o linear obtida para uma das misturas de fibras estudada no \u00e2mbito do projeto PTDC/ECM/122446/2010, nomeadamente, uma mistura igual de fibras de 9 e de 12 mil\u00edmetros de comprimento e 0.175 mil\u00edmetros de di\u00e2metro [1].

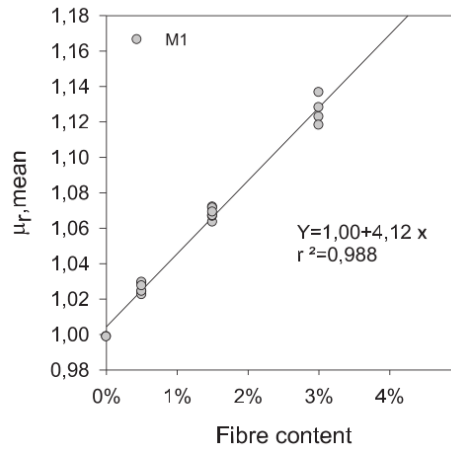


Figura 3.10 Exemplo de uma reta de calibração para uma mistura igual de fibras de 9 e de 12 mil\u00edmetros de comprimento e 0.175 mil\u00edmetros de di\u00e2metro [1]

3.3.4. INDICADOR DA ORIENTA\u00c7\u00c3O DAS FIBRAS

A varia\u00e7\u00e3o da permeabilidade magn\u00e9tica relativa [1] \u00e9 dada por:

$$\Delta\mu_{r,\theta_i} = \mu_{r,\theta_i} - 1 \quad (3.6)$$

Por sua vez, a varia\u00e7\u00e3o relativa de μ_r [1] \u00e9 dada pelas express\u00f5es:

$$\rho_{\theta_i} = \frac{\Delta\mu_{r,\theta_i}}{\Delta\mu_{r,\theta_i} + \Delta\mu_{r,(90^\circ - \theta_i)}} \quad (3.7)$$

$$\rho_{(90^\circ - \theta_i)} = \frac{\Delta\mu_{r,(90^\circ - \theta_i)}}{\Delta\mu_{r,\theta_i} + \Delta\mu_{r,(90^\circ - \theta_i)}} \quad (3.8)$$

representando a varia\u00e7\u00e3o relativa para duas dire\u00e7\u00f5es ortogonais.

Desta forma a diferen\u00e7a ($\rho_{(90^\circ - \theta_i)} - \rho_{\theta_i}$) [1] \u00e9 dada por:

$$(\rho_{(90^\circ - \theta_i)} - \rho_{\theta_i}) = \frac{\Delta\mu_{r,(90^\circ - \theta_i)}}{\Delta\mu_{r,\theta_i} + \Delta\mu_{r,(90^\circ - \theta_i)}} - \frac{\Delta\mu_{r,\theta_i}}{\Delta\mu_{r,\theta_i} + \Delta\mu_{r,(90^\circ - \theta_i)}}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{\mu_{r,(90^\circ-\theta_i)} - 1}{\mu_{r,\theta_i} - 1 + \mu_{r,(90^\circ-\theta_i)} - 1} - \frac{\mu_{r,\theta_i} - 1}{\mu_{r,\theta_i} - 1 + \mu_{r,(90^\circ-\theta_i)} - 1} = \\
 &= \frac{\mu_{r,(90^\circ-\theta_i)} - \mu_{r,\theta_i}}{2 \times (\mu_{r,média} - 1)} \quad (3.9)
 \end{aligned}$$

Tal como se pode observar na Figura 3.11, os resultados das várias dosagens de fibras são quase coincidentes pelo que se pode concluir que $(\rho_{(90^\circ-\theta_i)} - \rho_{\theta_i})$ é um bom indicador da orientação das fibras [1].

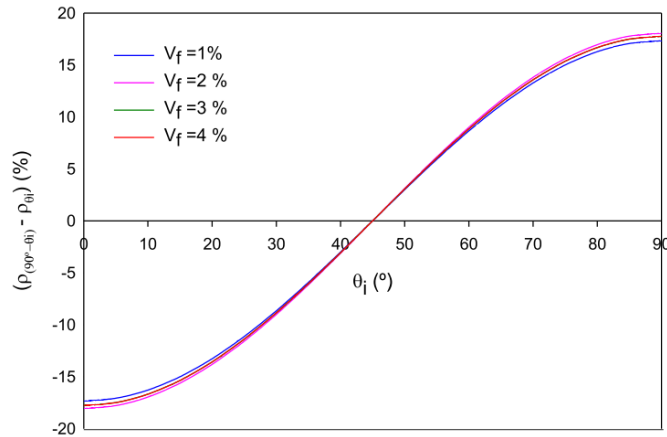


Figura 3.11 Variação de $(\rho_{(90^\circ-\theta_i)} - \rho_{\theta_i})$ ao longo dos vários ângulos θ_i para as diferentes dosagens de fibras [1].

Este indicador assume valores positivos e negativos consoante as fibras estejam orientadas perpendicularmente ou segundo i , respectivamente. No caso de o indicador assumir valores próximos de 0 as fibras não assumem qualquer de estas duas direções como preferencial. Neste caso, as fibras podem assumir quer uma distribuição aleatória quer segundo $(45^\circ - \theta_i)$.

Na Figura 3.12 representam-se os resultados deste indicador para os mesmos provetes referidos na secção anterior.

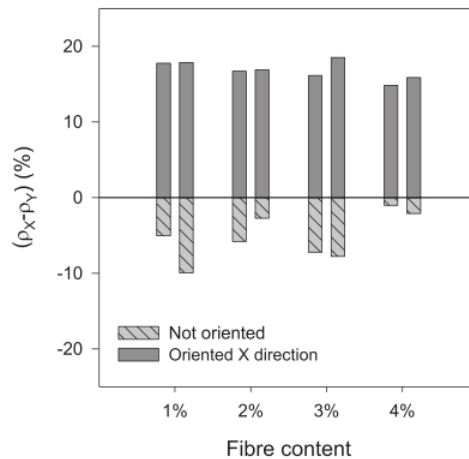


Figura 3.12 Resultados do indicador de orientação para fibras com 10 milímetros de comprimento e 0.175 milímetros de diâmetro [1].

Como alternativa de representação, pode-se distinguir visualmente os provetes orientados dos não-orientados, em função da permeabilidade magnética relativa em duas direções perpendiculares, e usando

uma representação do tipo da Figura 3.13. Cada ponto terá tendência a aproximar-se do eixo para o qual as fibras estão orientadas, ou manterem-se equidistantes dos dois eixos no caso de uma distribuição aleatória ou no caso de a orientação ser equidistante das duas direções [1].

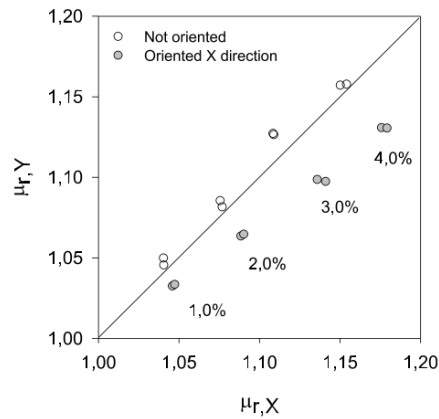


Figura 3.13 Exemplo de representação de medições de provetes orientados e não orientados em função das suas permeabilidades magnéticas relativas [1].

3.3.5. SONDA COMERCIAL DESENOVIDA PELA HILTI

Foi desenvolvida pela Hilti uma sonda que aplica este princípio da indutância magnética em conjunto com radar [77]. Esta sonda emprega três núcleos ferríticos e permite ser utilizada em varrimento [77]–[79]. O primeiro modelo do equipamento apresentado em 1999 continha apenas dois núcleos sendo necessário conhecer a orientação da armadura, tal como esquematizado na Figura 3.14 a). Figura 3.14 Esquema de funcionamento das sondas da Hilti [78], [79]. Em 2001 foi apresentado um novo modelo com três indutores magnéticos permitindo que os objetos de estudo estejam com uma qualquer orientação como está esquematizado na Figura 3.14 b). Para além dos três indutores magnéticos também foi incorporado um sistema de radar permitindo assim a deteção de outros materiais não ferrosos. Desta forma a sonda consegue determinar a posição, o diâmetro e o recobrimento dos vários elementos sob a superfície a ser analisada para além de fazer um mapeamento 3D da zona em estudo [77], tal como se pode observar nos exemplos apresentados na Figura 3.15 e na Figura 3.16.

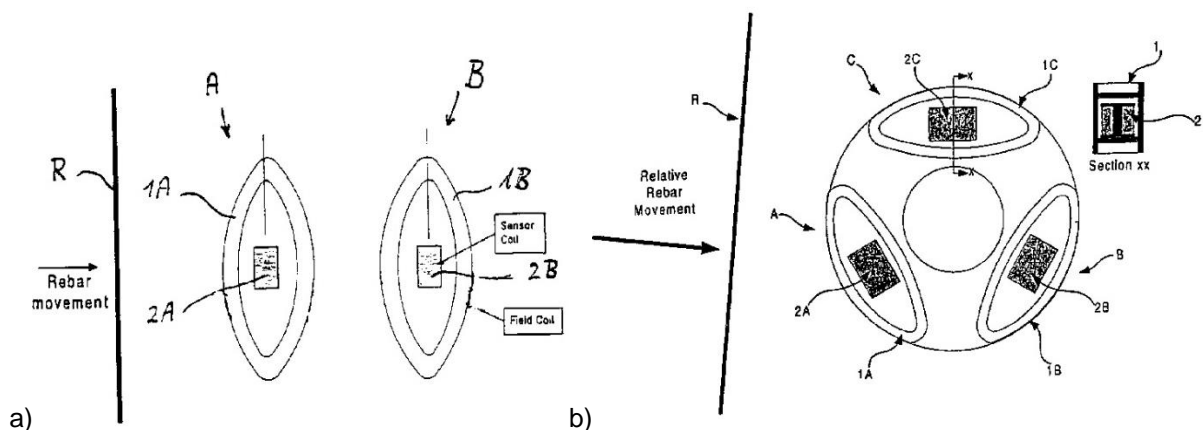


Figura 3.14 Esquema de funcionamento das sondas da Hilti [78], [79].

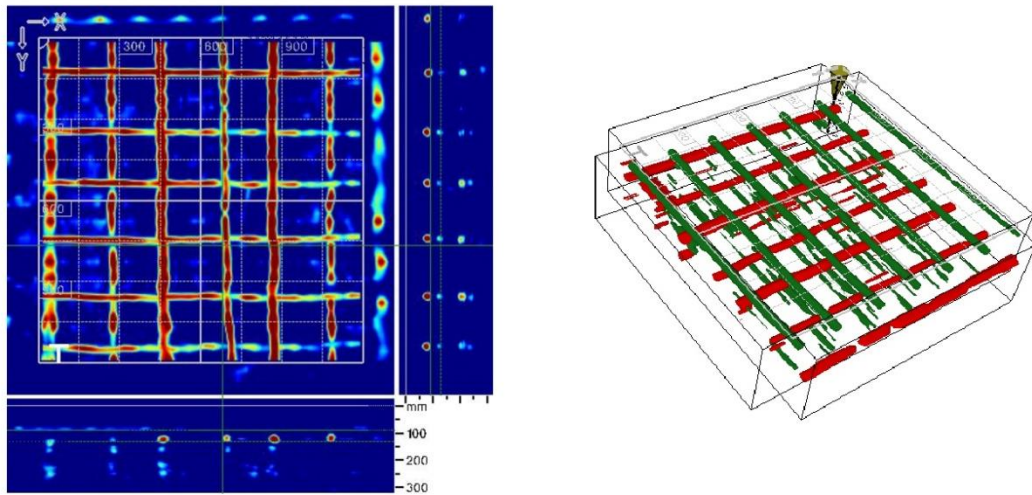


Figura 3.15 Leituras 2D e representação 3D de uma malha de armadura.

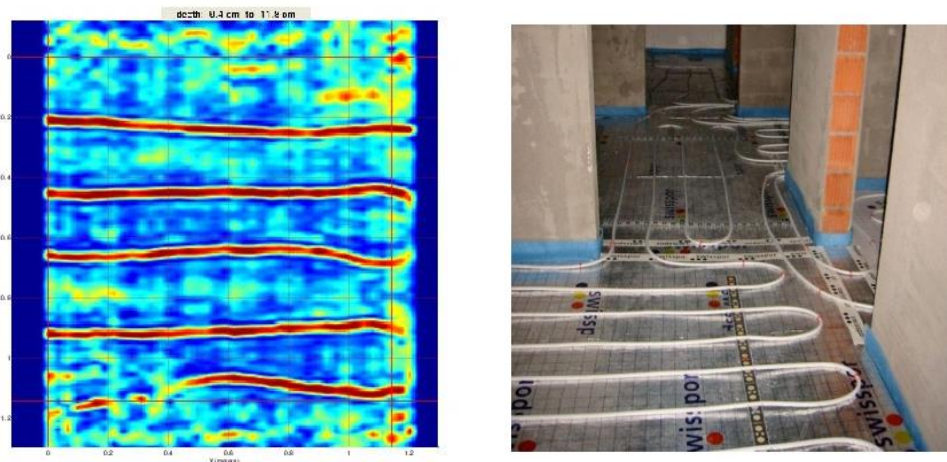


Figura 3.16 Leitura da serpentina de um piso radiante e fotografia da mesma.

4

PROGRAMA EXPERIMENTAL

4.1. INFLUÊNCIA DOS VARÕES

4.1.1. MOTIVAÇÃO

Na aplicação do UHPFRC para o reforço e impermeabilização do viaduto de Chillon, assim como em muitas outras aplicações, para além das fibras presentes no UHPFRC, há ainda reforço com armadura. Assim, sempre que a sonda se encontra próxima de um varão há um pico nas leituras realizadas. Sabendo o motivo para esta situação nos resultados, a questão seguinte foi perceber se os valores registados entre os varões contíguos são válidos ou se foram afetados pela presença das armaduras. Para perceber melhor os efeitos das armaduras foram realizados vários ensaios nos quais se fez variar o diâmetro, o afastamento, o recobrimento e o ângulo do varão com a sonda.

4.1.2. DESENVOLVIMENTO DE UMA ESTRUTURA PARA O POSICIONAMENTO DOS VARÕES

4.1.2.1. Materiais

Para realizar estes ensaios foi necessário conceber uma estrutura que permitisse posicionar varões de diferentes diâmetros e que, simultaneamente, permitisse variar o afastamento e o recobrimento e ainda que permitisse pousar a sonda. Para além disso, era necessário que os materiais utilizados não fossem ferromagnéticos para não influenciarem as medições.

Assim, pensou-se numa estrutura simples, tipo pórtico, feita de tubos quadrangulares de PVC e peças de encaixe, também em PVC, para concretizar os cantos. Nesta estrutura os varões são suspensos através de cordéis que permitem os ajustes necessários em termos de posicionamento com o recurso a roldanas feitas a partir de rodas de borracha. A sonda pousa numa placa de acrílico com 5 milímetros de espessura. Esta placa e as roldanas são fixadas na estrutura principal com parafusos e porcas de nylon.

4.1.2.2. Funcionamento

Perante a necessidade de suspender os varões pensou-se nesta solução na qual estes apenas precisam de estar apoiados nas pontas (ver Figura 4.1). Desta forma, o mecanismo que permite o ajuste dos varões é simétrico estando presente em dois dos lados da estrutura. Este mecanismo é constituído por seis roldanas de borracha e por cinco cordéis. Quatro destas roldanas estão fixas nos cantos (ver Figura 4.2), com os parafusos de nylon, e as restantes duas estão suspensas por dois cordéis cada. Estes dois cordéis estão seguros pelas duas roldanas fixas no respetivo lado da face da estrutura. Desta modo, é possível movimentar verticalmente as duas roldanas suspensas (ver Figura 4.3). O uso de dois cordéis por cada roldana suspensa advém da necessidade de impedir rotações segundo um eixo que não o de simetria. O quinto cordel suspende os varões nas roldanas suspensas (ver Figura 4.4). Como os varões estão seguros com uma volta do cordel é possível controlar o afastamento apenas com a rotação dos varões (ver Figura

4.5). O recobrimento é controlado pela posição das roldanas suspensas. Para que todos estes elementos móveis se mantenham estáveis é fundamental que todos os cordéis estejam suficientemente tensionados, sendo necessário dar mais do que uma volta, com o cordel, em torno dos varões de diâmetro menor (ver Figura 4.6).

A placa de acrílico tem um referencial desenhado para facilitar o posicionamento da sonda (ver Figura 4.7). A sonda está inserida numa folha de acetato, também ela com um referencial desenhado, recortada para facilitar o seu correto posicionamento (ver Figura 4.8), coordenando o referencial do acetato com o referencial da placa (ver Figura 4.9). Para facilitar a rotação do acetato, a fim de obter as várias orientações pretendidas, a placa de acrílico está espaçada do resto da estrutura por anilhas de cartão (ver Figura 4.10).

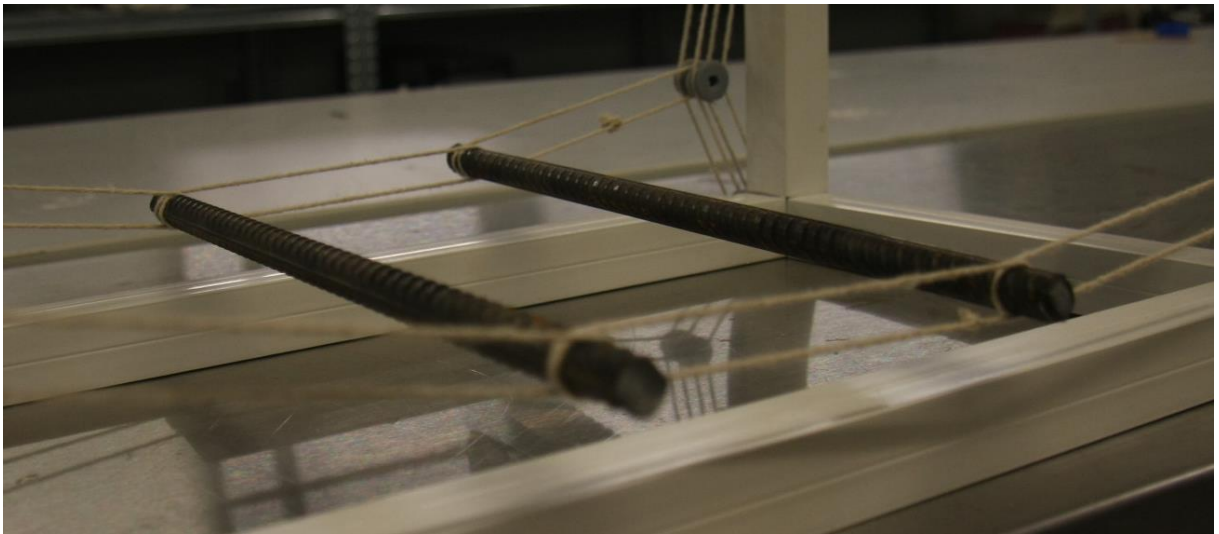


Figura 4.1 Figura representativa de um ensaio genérico onde os varões se encontram suspensos nos cordões.

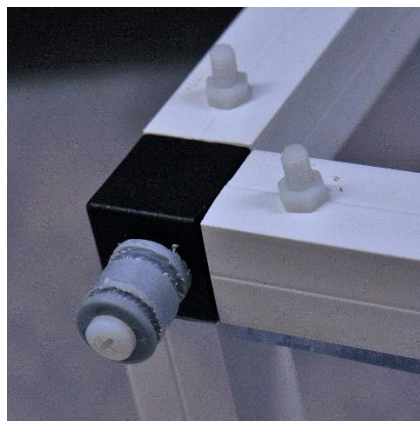


Figura 4.2 Pormenor de uma roldana de plástico fixada na estrutura com recurso a um conjunto de porca e parafuso de nylon.

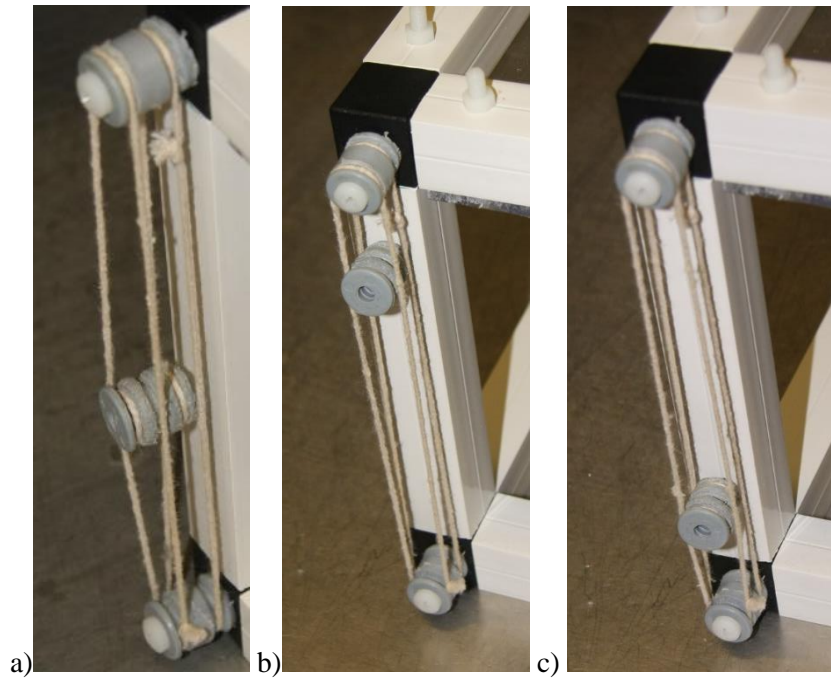


Figura 4.3 (a) Pormenor da colocação dos cordões em torno de uma roldana. (b) Roldana numa posição superior. (c) Roldana numa posição inferior.



Figura 4.4 Colocação do cordão central que irá suspender os varões. O cordão tem bastante folga para compensar o comprimento que será enrolado em torno de varões de diâmetro maior.

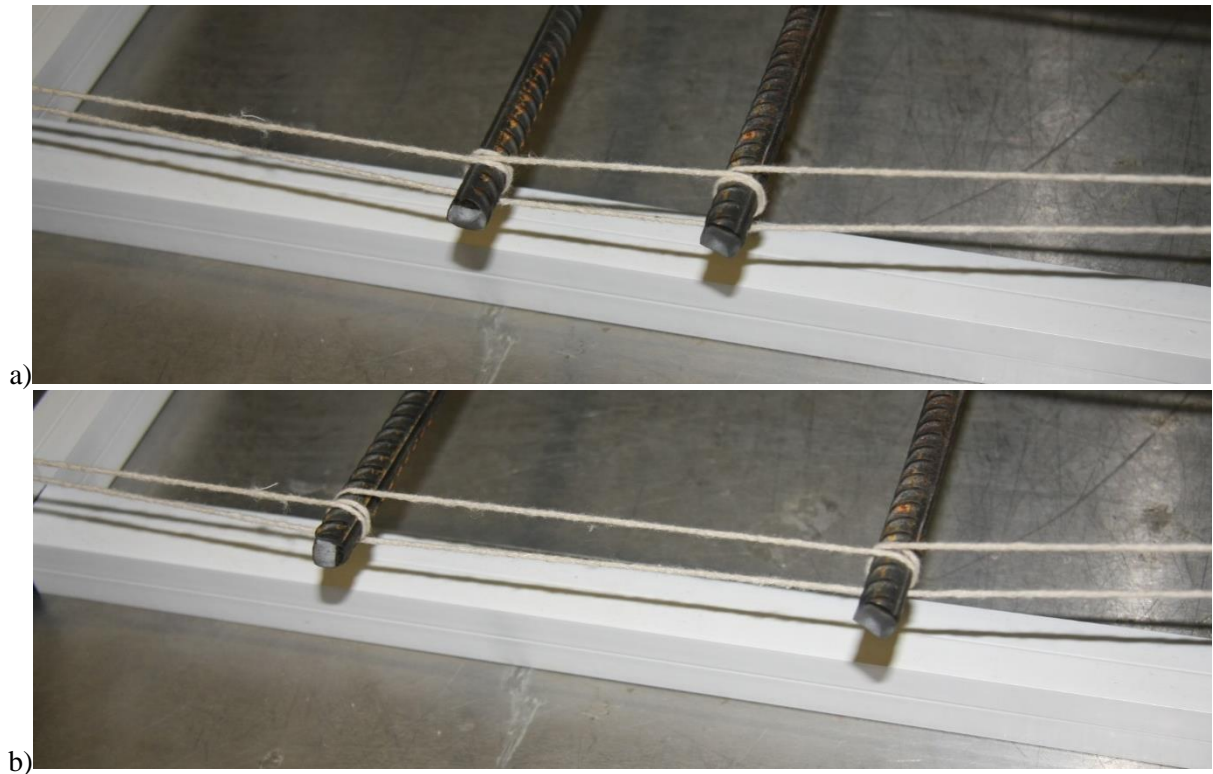


Figura 4.5 a) Varões numa posição próxima um do outro. b) Varões numa posição mais afastada um do outro.



Figura 4.6 Pormenor de um varão enrolado com duas voltas pelo cordão de suspensão.

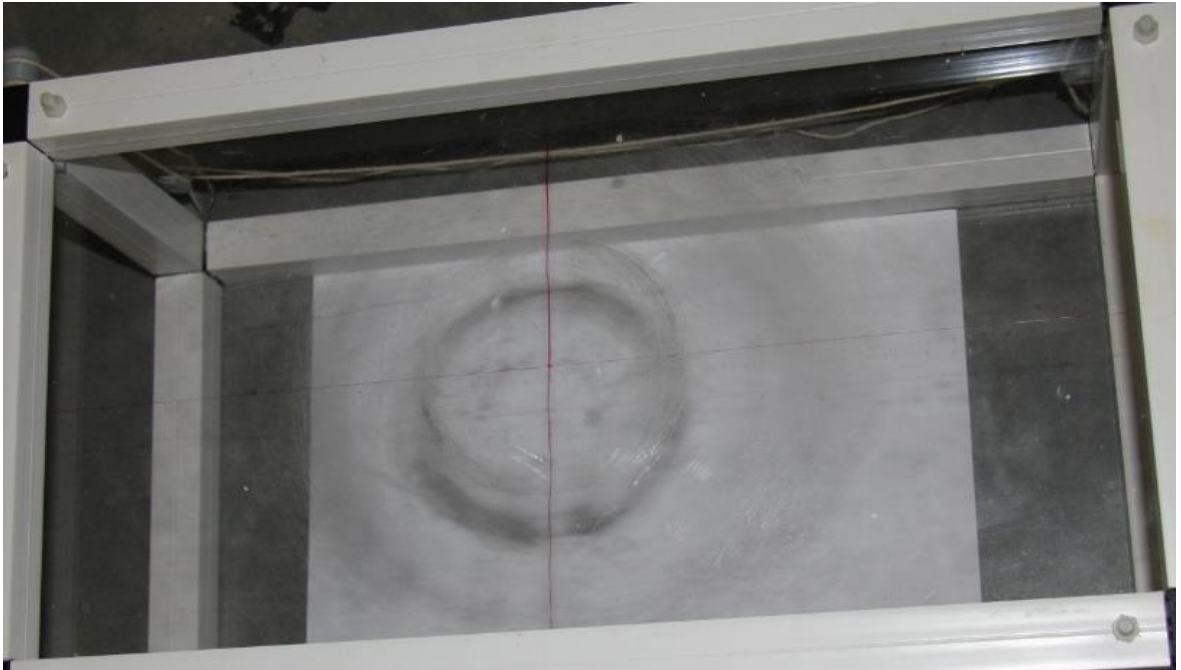
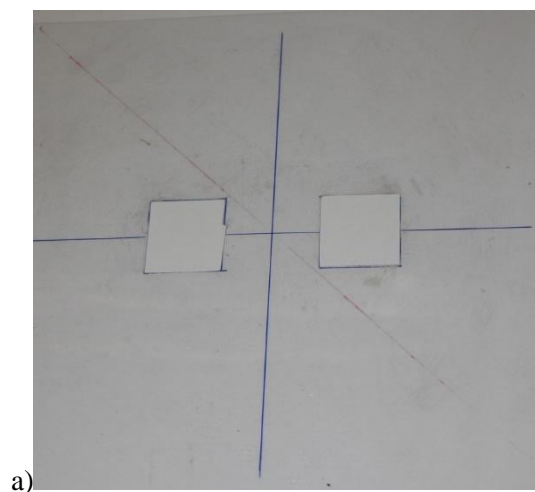
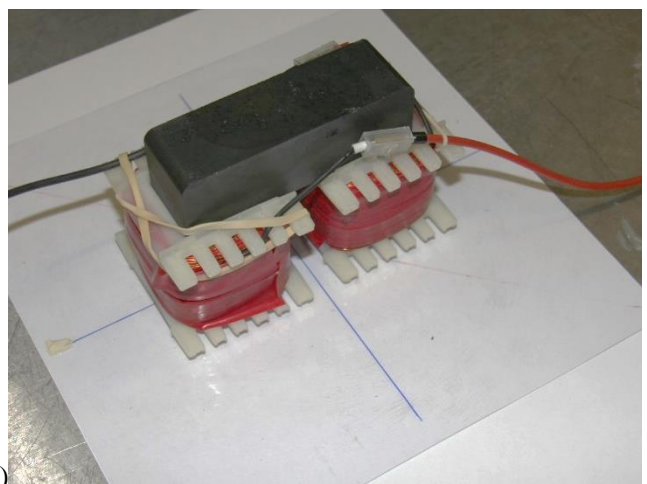


Figura 4.7 Placa de acrílico no topo da estrutura. Foi usada uma folha branca para realçar as linhas desenhadas na placa.



a)



b)

Figura 4.8 (a) Acetato com uma folha branca para realçar as linhas desenhadas. (b) Acetato encaixado na sonda durante um ensaio.

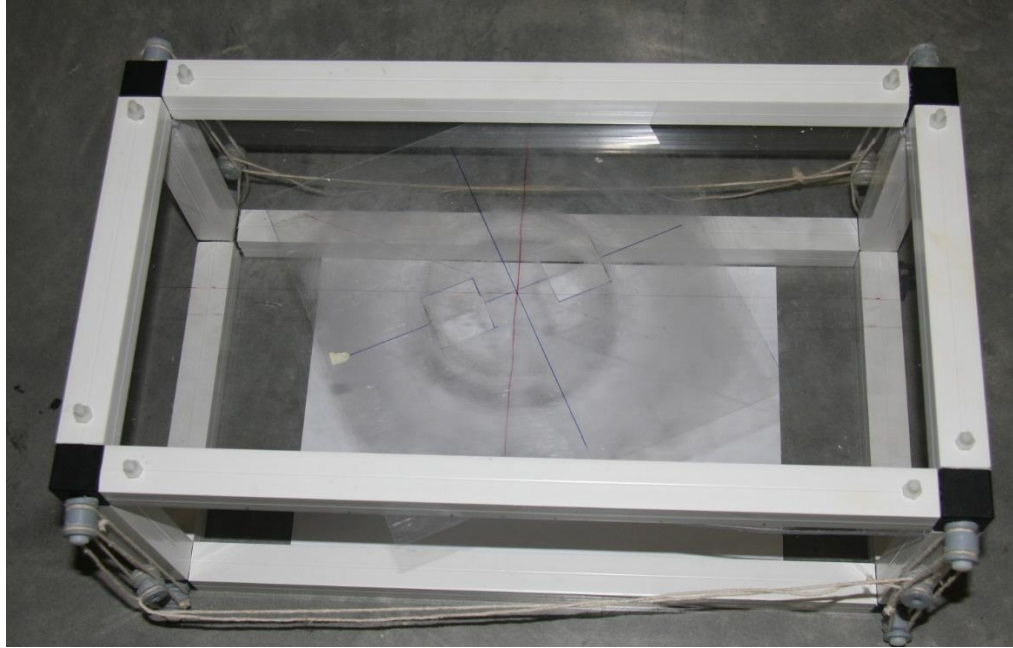


Figura 4.9 Fotografia da estrutura com o acetato onde é possível ver a coordenação entre os referenciais desenhados em ambos.



Figura 4.10 Pormenor da parte inferior da placa de acrílico onde é visível a cabeça de um dos parafusos de nylon que a estão a fixar e a respetiva anilha de cartão.

4.1.3. ENSAIOS APENAS COM UM VARÃO

4.1.3.1. Definição

Para determinar o intervalo de interesse em termos de recobrimento, realizou-se este ensaio no qual a um único varão centrado com a sonda é feito variar o recobrimento. Neste ensaio o recobrimento assumiu os valores de 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 e 100 milímetros e os diâmetros dos varões ensaiados foram de 6, 8, 10 e 12 milímetros. Contudo, como ao fim dos primeiros ensaios foi visível que os valores obtidos praticamente não tinham diferença a partir dos 50 milímetros, os restantes ensaios realizaram-se apenas até este recobrimento.

Estas medições foram realizadas para duas direções ortogonais, tal como mostra a Figura 4.11.

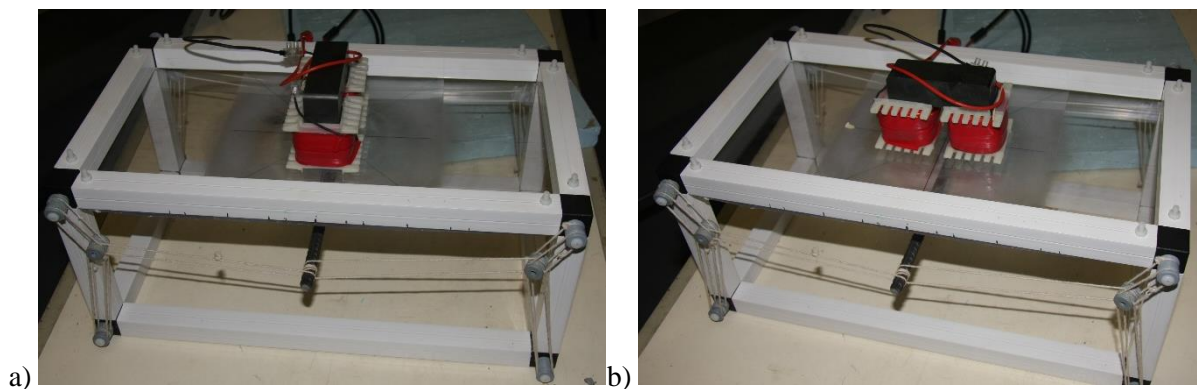


Figura 4.11 Ensaio de apenas um varão com a sonda nas posições a) 0° e b) 90°

4.1.3.2. Resultados

Para cada posição de cada varão foram registados os valores da indutância com a sonda a realizar 0° e 90° com o alinhamento dos varões.

Durante os ensaios com a sonda a 0° encontrou-se um conjunto de resultados aparentemente anómalos, nos quais o valor medido da indutância, para o mesmo valor de recobrimento, assumia um valor maior para o varão de 10 milímetros do que para o varão de 12 milímetros, como seria expectável. Na Figura 4.12 tem-se a representação destes resultados e da indutância do ar como valor mínimo de referência.

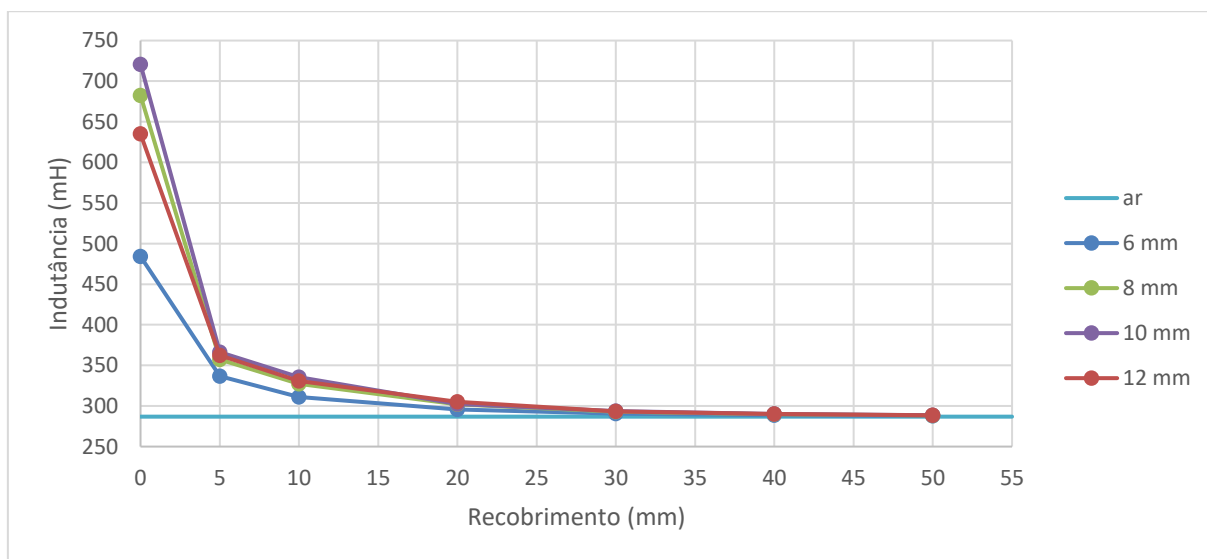


Figura 4.12 Variação da indutância com a altura do provete, com um alinhamento de 0°.

Nas medições em que a sonda se encontrava perpendicular aos varões (ver Figura 4.13), esta anomalia já não ocorre, estabelecendo-se a relação entre os valores da indutância e o diâmetro dos varões expectada.

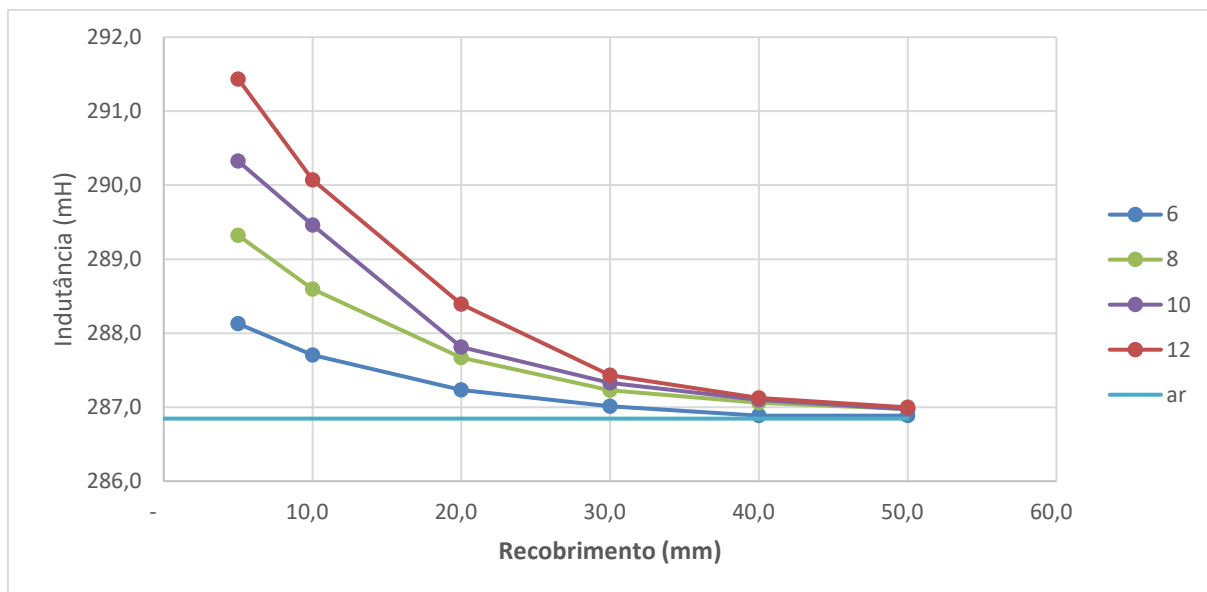


Figura 4.13 Variação da indutância com a distância do varão à sonda, com um alinhamento de 90°.

Perante a possibilidade de ter havido um erro durante as medições, os ensaios para os varões de diâmetros 8, 10 e 12 mm foram repetidos para averiguar a validade dos resultados. Constatando que os resultados eram válidos e procedendo a uma análise das nervuras dos varões concluiu-se que a causa desta variação nos resultados seria devida ao facto de os varões serem de tipos de aço diferentes. Assim decidiu-se proceder a uma análise em termos de valores relativos. Para tal realizou-se mais um conjunto de ensaios com 0 milímetros de recobrimento, ou seja, com o varão encostado à sonda, tomando a média dos resultados (ver Tabela 4.1) como o valor de referência para calcular a variação relativa (apresentada na Figura 4.14). A grande variabilidade dos resultados deve-se à influência que as nervuras dos varões, uma vez que estas trazem pequenas variações no posicionamento da sonda. Apesar de serem pequenas, estas variações, por se encontrarem muito próximas da sonda, levam a uma variação significativa dos resultados. Para valores de recobrimento maiores este efeito foi desprezado.

Tabela 4.1 Análise estatística dos resultados das medições dos varões com 0 milímetros de recobrimento e a sonda alinhada com a direção dos varões.

	$\phi=8$ mm	$\phi=10$ mm	$\phi=12$ mm
Número de medições	40	20	37
Valor máximo da indutância (mH)	708.72	779.57	683.27
Valor mínimo da indutância (mH)	554.21	601.58	554.04
Valor médio da indutância (mH)	621.37	708.08	621.85
Desvio padrão (mH)	48.53	50.44	37.34

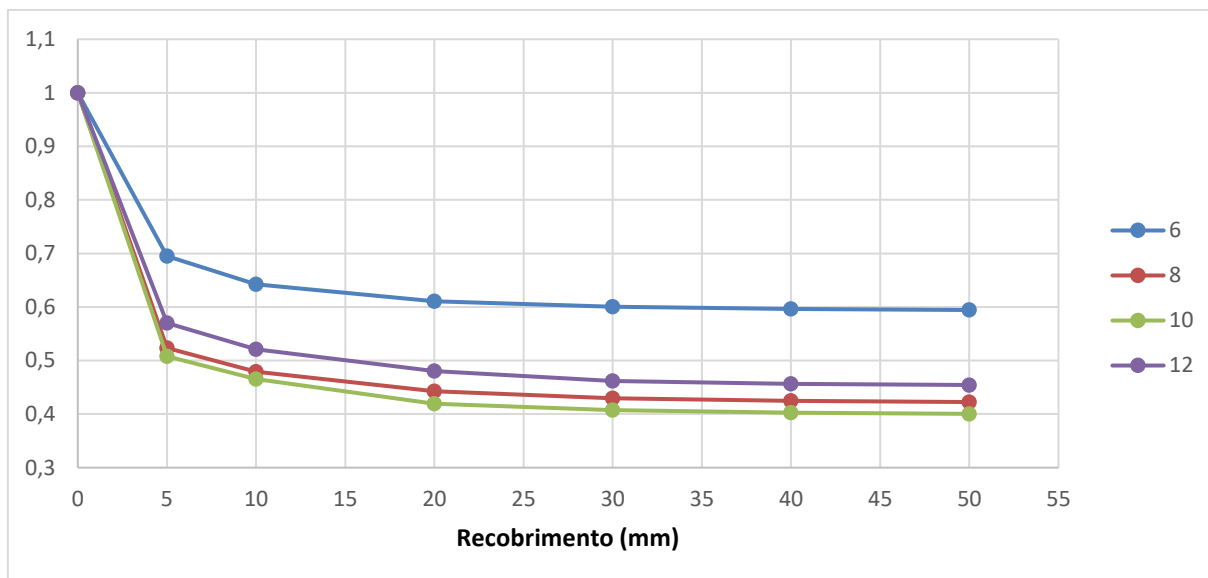


Figura 4.14 Variação relativa da indutância com a distância do varão à sonda, alinhada de 0°.

Destes resultados há duas principais conclusões que se podem retirar. Primeiro, os valores da indutância têm variações muito pequenas para recobrimentos maiores que 20 milímetros, independentemente do diâmetro do varão. Segundo, para valores muito baixos de recobrimento a variação de resultados é maior. Para além do diâmetro do varão, o próprio material de que é feito o varão e a geometria das suas nervuras influenciam a indutância máxima medida, com o varão encostado à sonda.

4.1.4. INFLUÊNCIA DO RECOBRIMENTO E DO ESPAÇAMENTO DOS VARÕES

Com o intuito de compreender melhor a influência simultânea do recobrimento e do espaçamento dos varões desenvolveu-se uma nova campanha experimental, planeada segundo um plano fatorial aumentado (CCD).

Neste plano, consideraram-se duas variáveis, o recobrimento e o espaçamento, tendo-se desenvolvido uma campanha de ensaios independente para cada tipo de varão.

Neste estudo adotou-se um plano fatorial completo (2^2) com 4 pontos fatoriais, F_i , ao qual foram adicionados 4 pontos axiais, CC_i , e 5 pontos centrais, C_i , tal como ilustrado na Figura 4.15, resultando num Plano Fatorial Aumentado (ou Central Composite Design (CCD) [80], na designação inglesa). Num CCD as variáveis são avaliadas em cinco níveis diferentes, que codificadas correspondem a $-\alpha$, -1 , 0 , $+1$, $+\alpha$. O valor de α , é igual a $n_F^{1/4}$, em que n_F é o número de pontos fatoriais. Logo neste estudo $n_F = 4$ e $\alpha = 1,414$ (ver Tabela 4.2). A correspondência entre os valores codificados nos níveis $-\alpha$, -1 , 0 , $+1$, $+\alpha$ e os valores reais das variáveis independentes é apresentada na Tabela 4.2. A repetição do ponto central destinou-se a avaliar o erro experimental inerente à variabilidade das condições e procedimentos de ensaio.

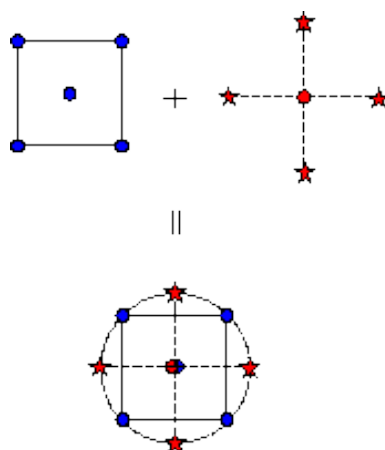


Figura 4.15 Plano fatorial aumentado onde estão representados os pontos fatoriais (círculos azuis), os pontos axiais (estrelas a vermelho) e o ponto central.

Tabela 4.2 Plano experimental.

Ref.	Centrais					Fatoriais				Axiais			
	C1	C2	C3	C4	C5	F1	F2	F3	F4	CC1	CC2	CC3	CC4
Valores codificados das variáveis													
c	0	0	0	0	0	-1	1	-1	1	-1,414	1,414	0	0
s	0	0	0	0	0	-1	-1	1	1	0	0	-1,414	1,414
Valores reais das variáveis													
c(mm)	32.5	32.5	32.5	32.5	32.5	13.05	51.95	13.05	51.95	5.00	60.00	32.50	32.50
s (mm)	150	150	150	150	150	79.29	79.29	220.71	220.71	150.00	150.00	50.00	250.00

Numa situação real, a presença de armadura próxima da superfície de uma aplicação de UHPFRC tem duas origens distintas. Podem ser armaduras de superfície embebidas no UHPFRC ou armaduras de uma estrutura em betão corrente que foi reforçada com uma camada de UHPFRC. Em qualquer destes casos, o recobrimento não assume valores maiores que 60 milímetros. Para além disso, tal como já foi comprovado em 4.1.3.2, não existe uma variação significativa para valores de recobrimento acima deste valor. Assim, este é o valor máximo de recobrimento neste ensaio. O valor mínimo é de 5 milímetros que corresponde ao valor da espessura da placa de acrílico que suporta a sonda. Os restantes valores equacionados são os valores intermédios de 13.05 milímetros, 32.50 milímetros e 51.95 milímetros.

Com o intuito de aproximar o ensaio a aplicações reais, optou-se por usar espaçamentos representativos da realidade. Assim, para valor extremo máximo utilizou-se 250 milímetros. Já para o valor mínimo, que normalmente seria de 100 milímetros, para salvaguardar algum erro construtivo, definiu-se como espaçamento mínimo extremo o valor de 50 milímetros. Para valores intermédios utilizaram-se 79.29 milímetros, 150 milímetros e 220.71 milímetros.

Cada combinação prevista no plano foi ensaiada com a sonda nas orientações de 0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270°, 315° e 360°. Neste ensaio, as posições 0°, 180° e 360° correspondem a uma direção perpendicular aos varões, enquanto as posições 90° e 270° correspondem a uma direção paralela a estes. Estas relações podem ser observadas na Figura 4.16. Ao longo de todos os ensaios os varões encontram-se ao longo da menor direção da estrutura de suporte.

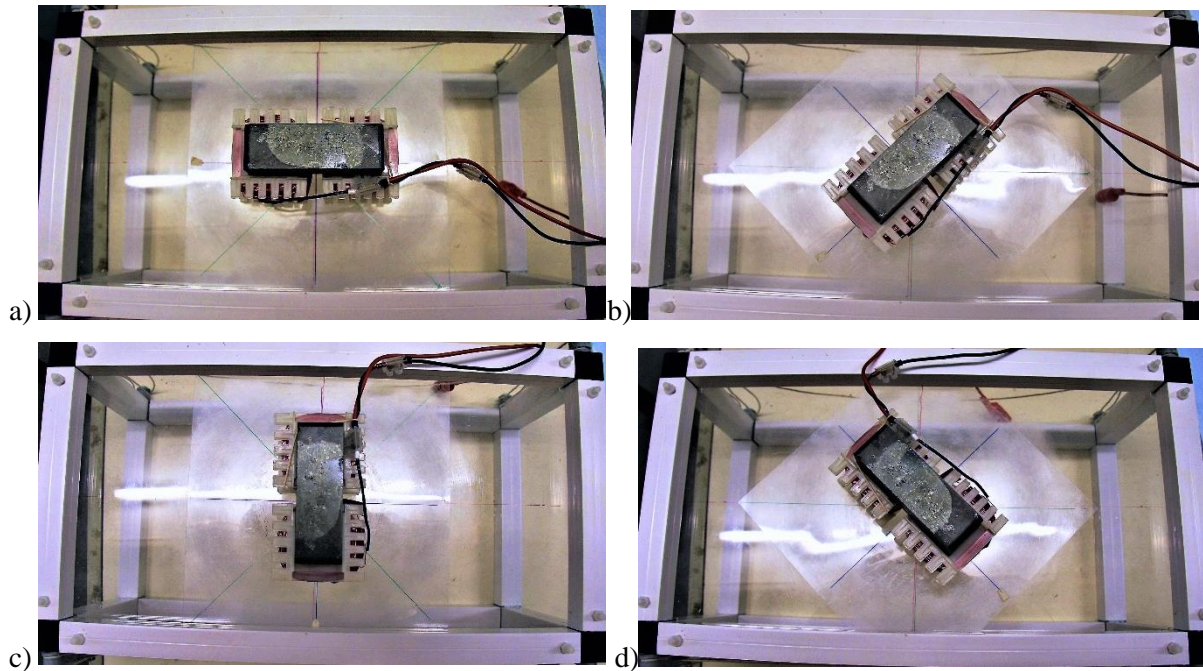


Figura 4.16 Diferentes posições de leitura da sonda: a) 0°, b) 45°, c) 90° e d) 135°.

De forma a manter a independência dos ensaios, as medições dos grupos Factorial e Axial foram ordenadas aleatoriamente [81] e intercaladas com as do grupo Central. Esta estratégia foi repetida para os planos respetivos aos diferentes diâmetros.

Com o intuito de melhor compreender a posição dos varões em relação à sonda e assim conseguir interpretar os resultados obtidos da forma mais correta, criaram-se esquemas que ilustram essas posições, apresentados nas Figura 4.17 aFigura 4.25. Nestas representações, cada quadrícula corresponde a 10 milímetros e, por serem apenas esquemas, todos os varões têm 10 milímetros de diâmetro.

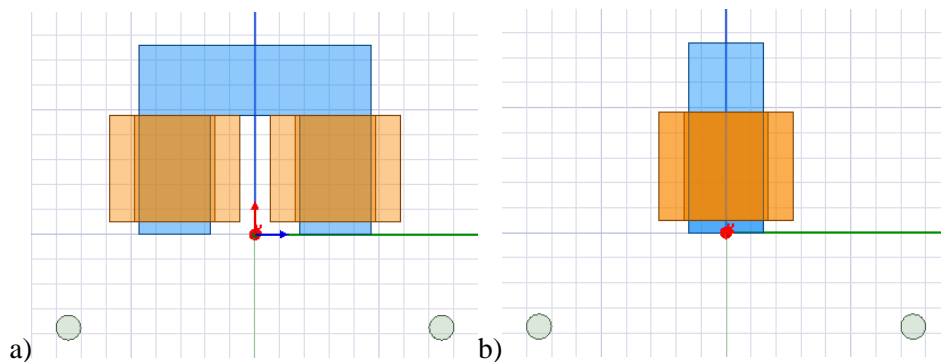


Figura 4.17 Representação das combinações para a sonda nas posições: a) 0° e b) 90°.

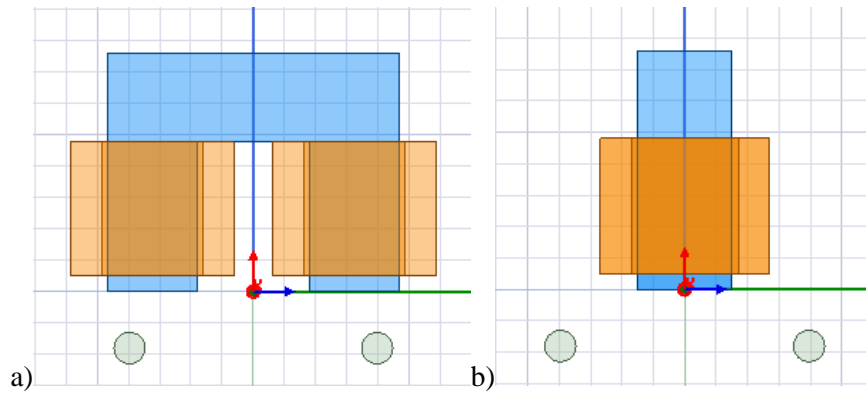


Figura 4.18 Representação da combinação F1 para a sonda nas posições: a) 0° e b) 90°.

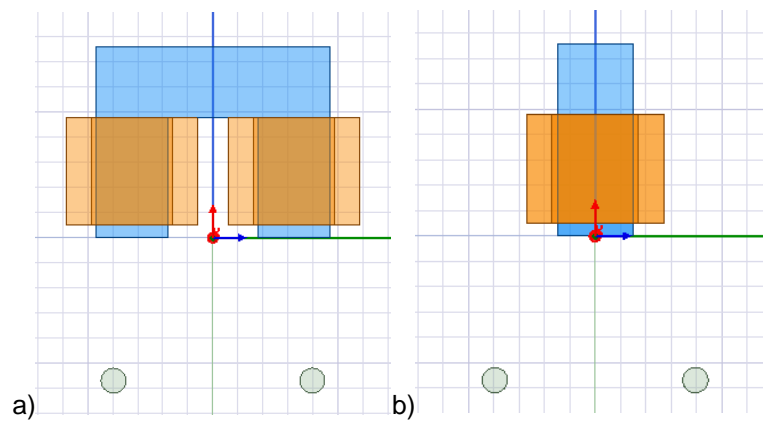


Figura 4.19 Representação da combinação F2 para a sonda nas posições: a) 0° e b) 90°.

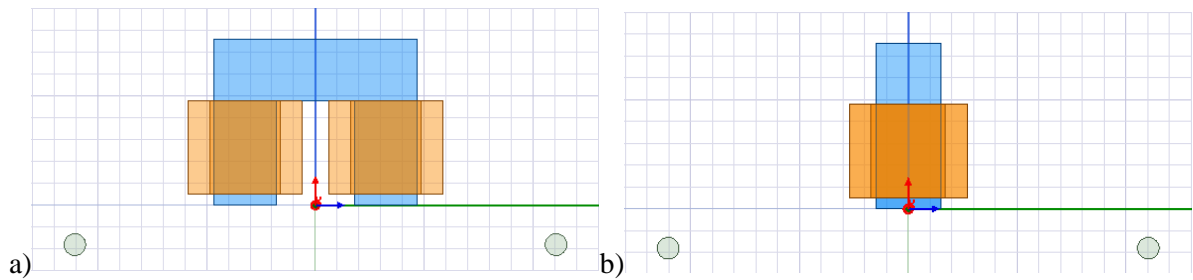


Figura 4.20 Representação da combinação F3 para a sonda nas posições: a) 0° e b) 90°.

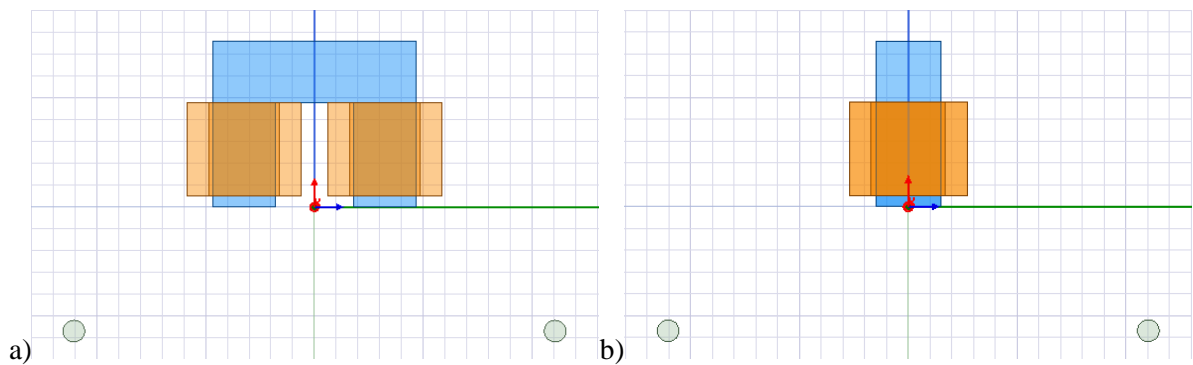


Figura 4.21 Representação da combinação F4 para a sonda nas posições: a) 0° e b) 90°.

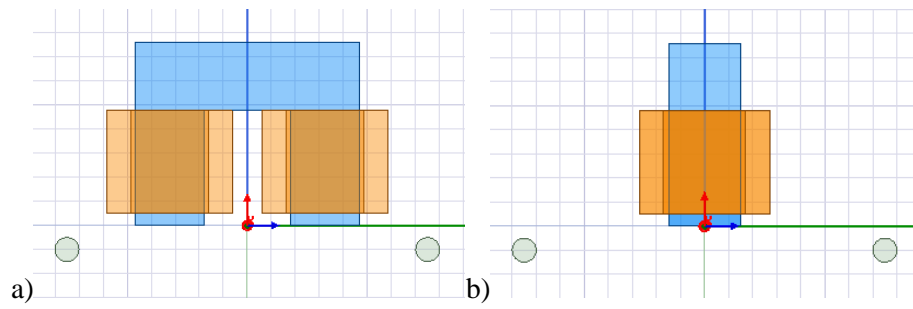


Figura 4.22 Representação da combinação CC1 para a sonda nas posições: a) 0° e b) 90°.

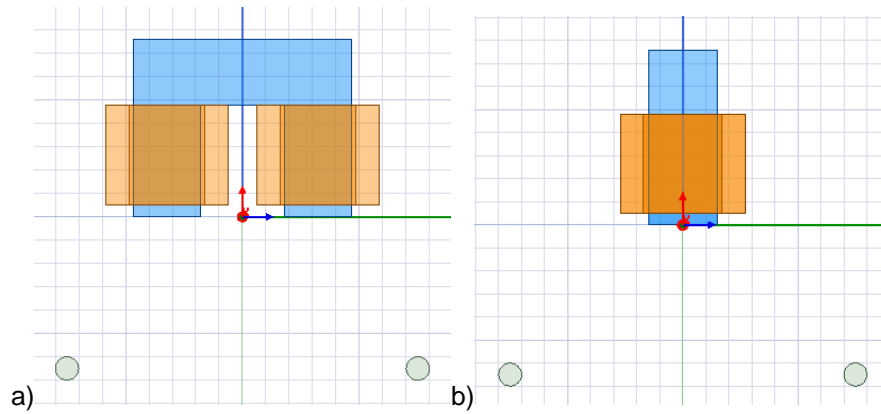


Figura 4.23 Representação da combinação CC2 para a sonda nas posições: a) 0° e b) 90°.

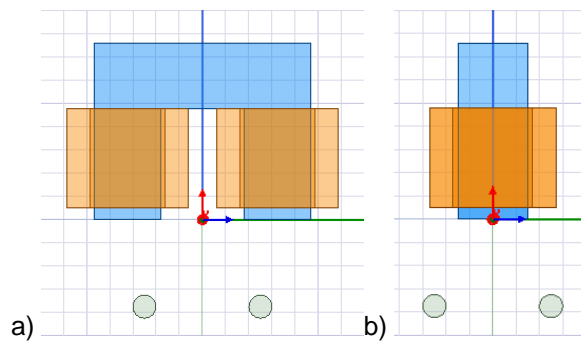


Figura 4.24 Representação da combinação CC3 para a sonda nas posições: a) 0° e b) 90°.

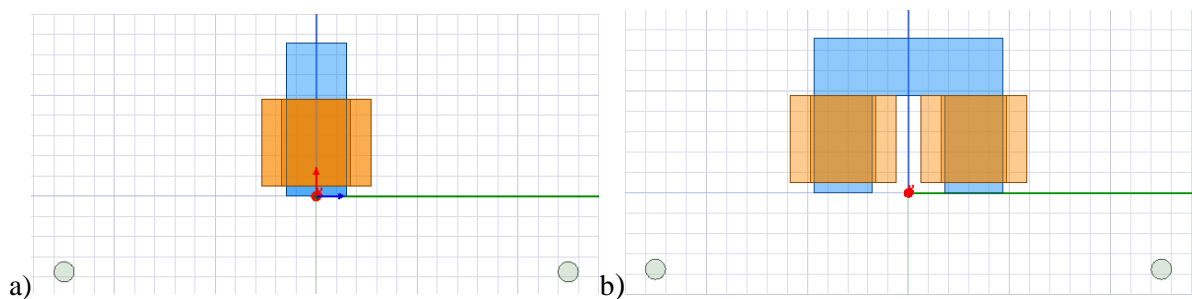


Figura 4.25 Representação da combinação CC4 para a sonda nas posições: a) 0° e b) 90°.

Numa análise preliminar, concluímos que as leituras feitas com a sonda são tanto mais elevadas quanto maior for o volume de varão, ou outro elemento com propriedades ferromagnéticas, que estiver nas proximidades da sonda. Esta zona de maior influência foi estimada quando a sonda foi desenvolvida [33]. Simplificadamente, assemelha-se a um prisma que une as duas pernas da sonda, ao longo de toda a sua espessura, e a uma profundidade de cerca de 28 milímetros. Na Figura 3.5 encontra-se uma representação esquemática dessa zona. Desta forma, é expectável que para a sonda na direção 90° se alcancem valores maiores de indutância, já que quando um varão atravessa esta zona o volume de intersecção é maior do que na direção perpendicular a esta.

4.1.4.1. Resultados

Para conseguir interpretar os resultados da melhor forma possível decidiu-se apresentar os valores medidos numa representação radial. Cada raio da representação corresponde a um dado ângulo de medição, ou seja, 0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225° e 270°.

Como as experiências do grupo “Central” são iguais, por motivos de controlo de erros do ensaio, nas figuras seguintes será apresentado apenas o respetivo valor médio dos resultados.

Nas Figura 4.26 Figura 4.28 encontram-se representados os valores da indutância das várias experiências previstas no plano CCD, para as direções estabelecidas anteriormente, e para varões com diâmetro de 8mm, 10mm e 12 mm, respetivamente.

Como se pode observar, os pontos fatoriais encontram-se representados a azul, os pontos axiais a vermelho, e o ponto central, a verde e o ar, como valor mínimo de referência, a preto.

Para todos os diâmetros testados a experiência F1 conduziu ao valor mais elevado da indutância. Nesta experiência, como se pode verificar na Figura 4.18, quer o afastamento quer o recobrimento assumem valores baixos. Como tal, era expectável que esta combinação conduzisse a valores elevados. Na Figura 4.18 b) pode-se verificar que apesar de o recobrimento ser relativamente pequeno, na medição a 90° a sonda fica centrada entre os dois varões o que justifica o valor mais reduzido da indutância para esta direção. Já na Figura 4.18 a), constata-se que os varões atravessam completamente o prisma de maior influência referido anteriormente. Desta forma, na direção de 0° o material ferromagnético, como se encontra mais próximo das pernas da sonda, leva a que os valores da indutância medidos sejam maiores do que na direção de 90°.

Como se pode observar nas Figura 4.26 Figura 4.27 Figura 4.28 b) direção 0° temos que o valor máximo, a seguir a F1, é o da combinação CC1. Já para a direção 90° o valor máximo é o da experiência CC3. O atributo que leva à variação dos resultados nestas duas combinações é a quantidade de material que se encontra nas proximidades da sonda, ou seja, quanto mais próximos estiverem os varões das pernas da sonda maiores serão os valores da indutância medidos.

Tal como foi referido em 4.1.3.1 para recobrimentos maiores que 50 milímetros a diferença para os valores da indutância do ar era muito pequena pelo que era expectável que para todas as direções a combinação CC2 registasse valores muito próximos dos do ar. Esta relação espacial pode ser observada na Figura 4.23. Assim, como na combinação CC4 têm um afastamento muito grande, tal como mostra a Figura 4.25, os varões encontram-se muito afastados o que leva a que tenham pouca influência nas leituras o que implica valores de indutância próximos dos do ar.

Comparando as Figura 4.22 a) e Figura 4.24 a) observa-se que apesar de na combinação CC3 os varões se encontrarem por baixo da sonda, estes estão, ainda assim, mais afastados da sonda do que os da combinação CC1. Por outro lado, quando comparando as Figura 4.22 b) e Figura 4.24 b), repara-se que

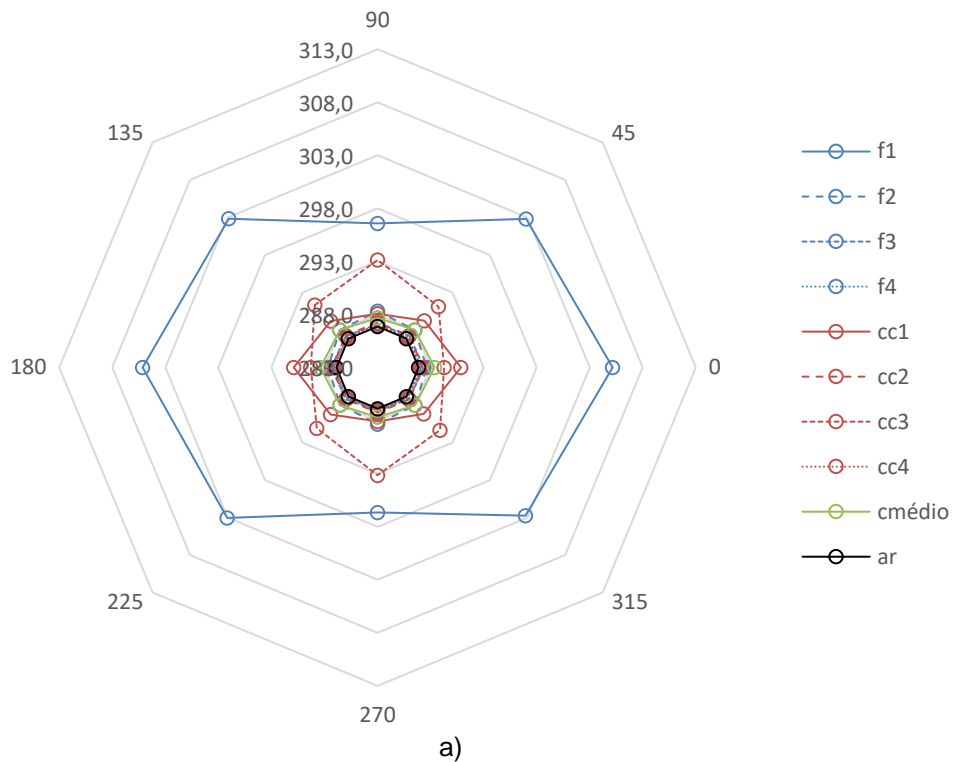
apesar do menor recobrimento, na combinação CC1 os varões têm bastante maior afastamento e, como para esta posição, a sonda se encontra alinhada com os varões, nesta combinação os varões estão fora da zona que mais influencia as medições da indutância. Assim, como na combinação CC3 o afastamento é menor, apesar do maior recobrimento, os varões têm maior influência nos resultados, atingindo leituras de indutância bastante mais elevadas nesta direção.

Comparando os valores nestas duas direções para a combinação CC1, na direção 90°, Figura 4.22 b), os varões estão demasiado afastados da zona de maior influência levando a leituras de indutância menores que na direção 0°, Figura 4.22 a).

Já na combinação CC3 em ambas as direções, 0°, Figura 4.24 a), e 90°, Figura 4.24 b), os varões encontram-se muito próximos da zona de maior influência. Contudo, tal como referido anteriormente, na direção 90° há um maior volume de material ferromagnético a afetar os resultados.

As restantes combinações, F2, F3, F4, CC2 e CC4, como se pode observar na Figura 4.26, têm resultados muito próximos dos do ar, o mínimo possível. Desta forma, pode-se concluir que os varões se encontravam demasiado afastados da sonda. Analisando os valores do afastamento e do recobrimento dos varões nestas combinações, podem-se estabelecer limites destas duas variáveis para além dos quais as medições da sonda não são afetadas. No entanto, com este conjunto de ensaios não foi possível equacionar estes limites.

Assim, para valores de recobrimento superiores a 51.95 mm e/ou valores de afastamento superiores a 220.71 mm as medições da indutância realizadas pela sonda não são significativamente afetadas pelos varões. Contudo, um plano fatorial com limites diferentes poderia ter alcançado um intervalo mais rigoroso.



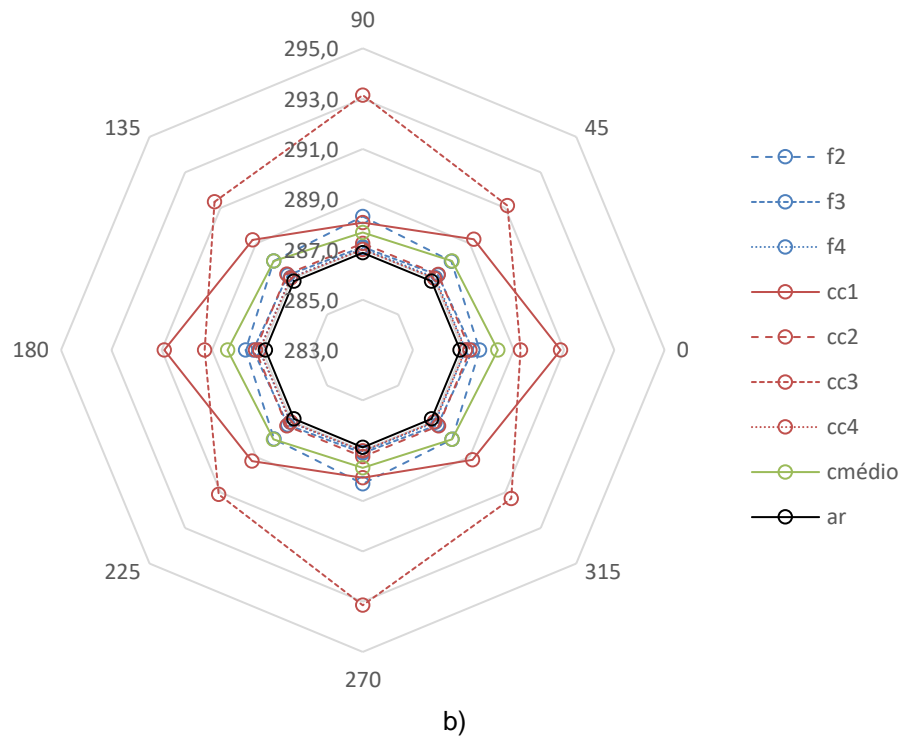
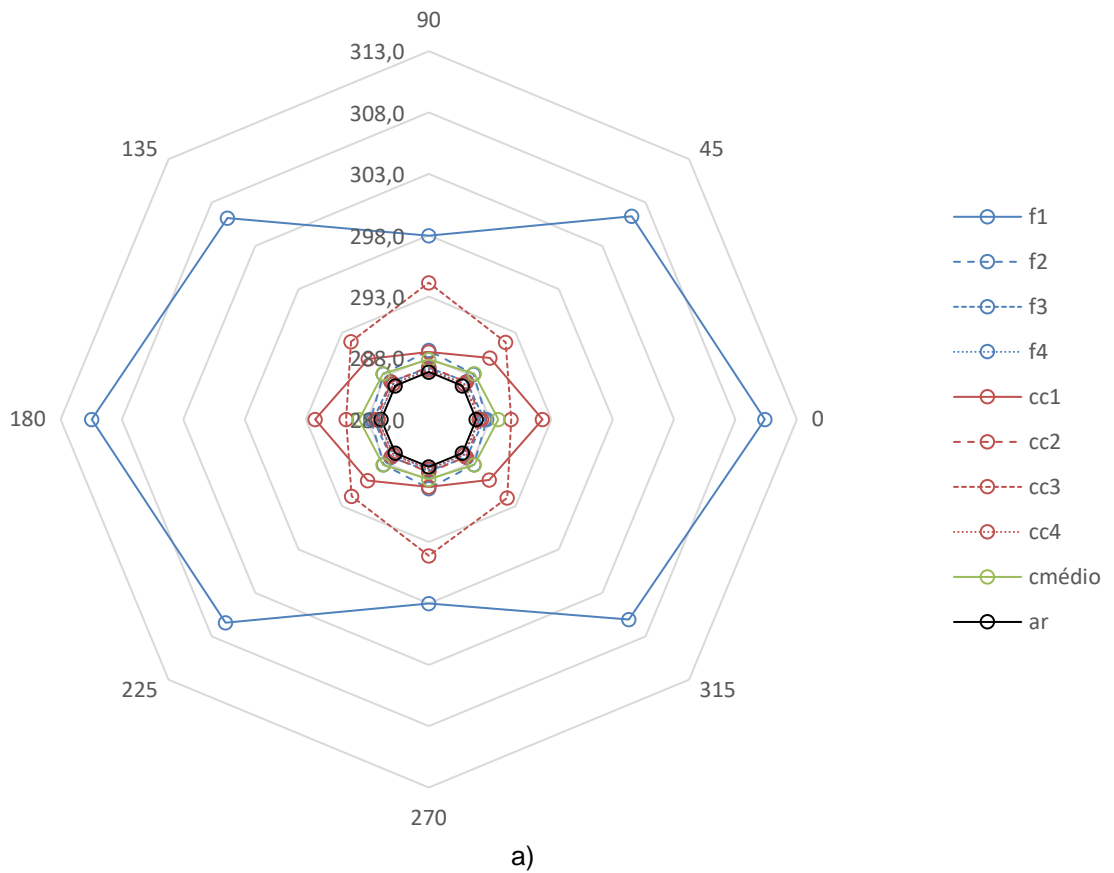
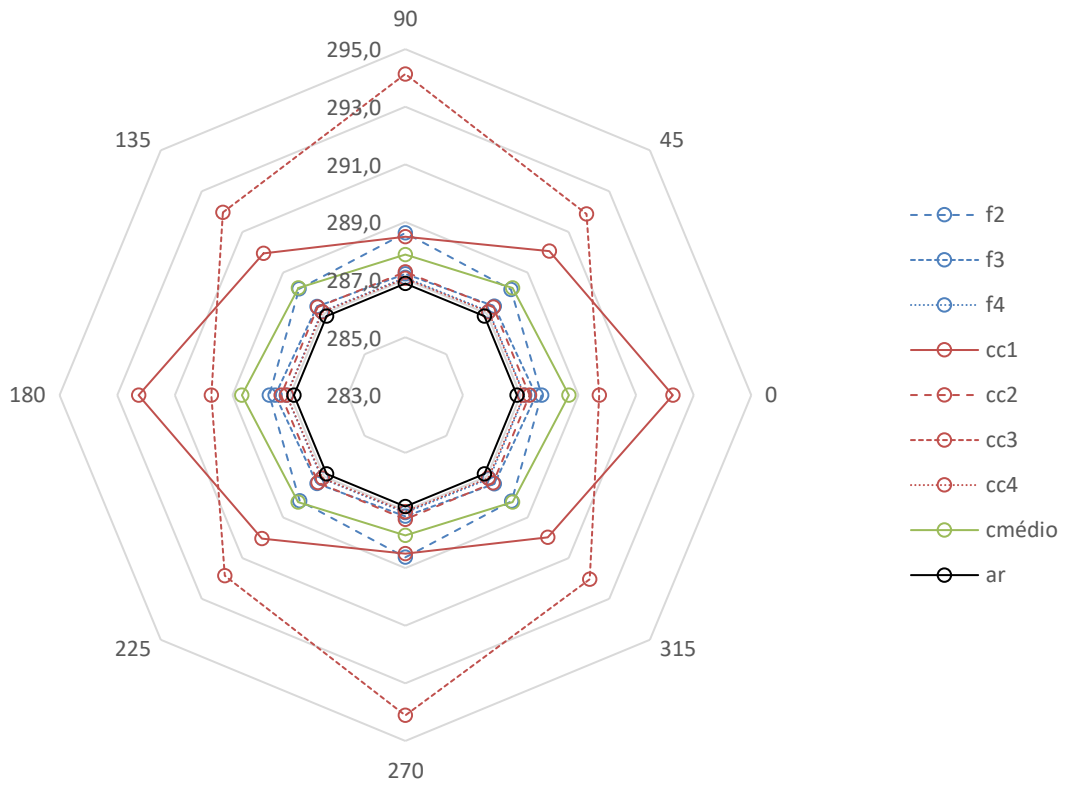


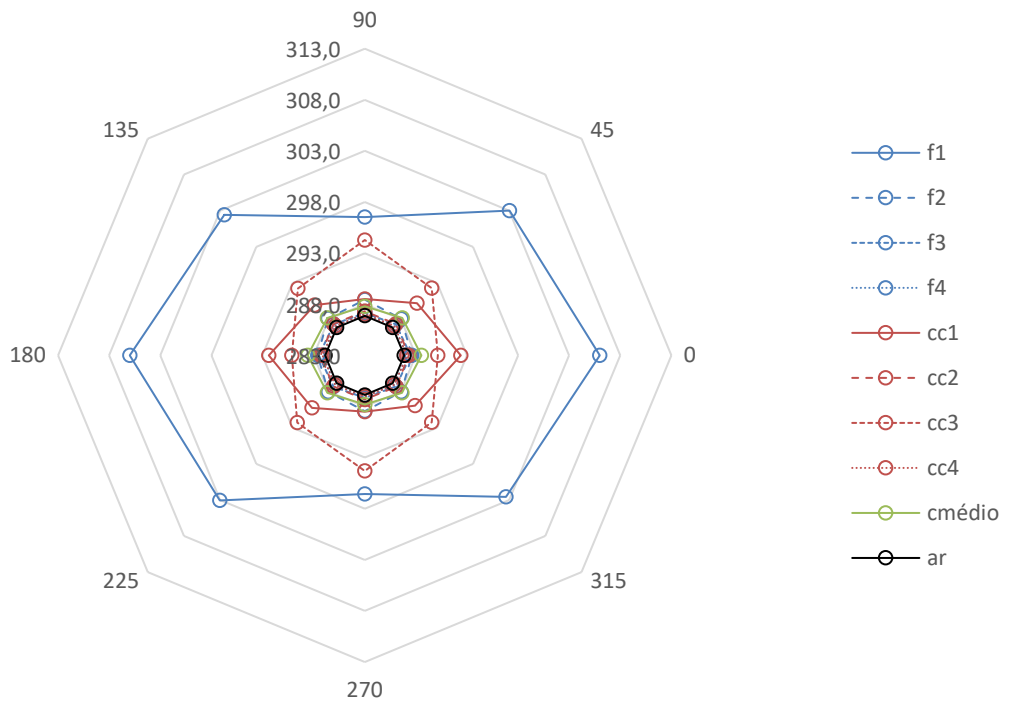
Figura 4.26 Representação radial dos resultados da indutância para os varões de 8 mm: a) todos os pontos do plano; b) todos os pontos do plano exceto F1.





b)

Figura 4.27 Representação radial dos resultados da indutância para os varões de 10 mm: a) todos os pontos do plano; b) todos os pontos do plano exceto F1.



a)

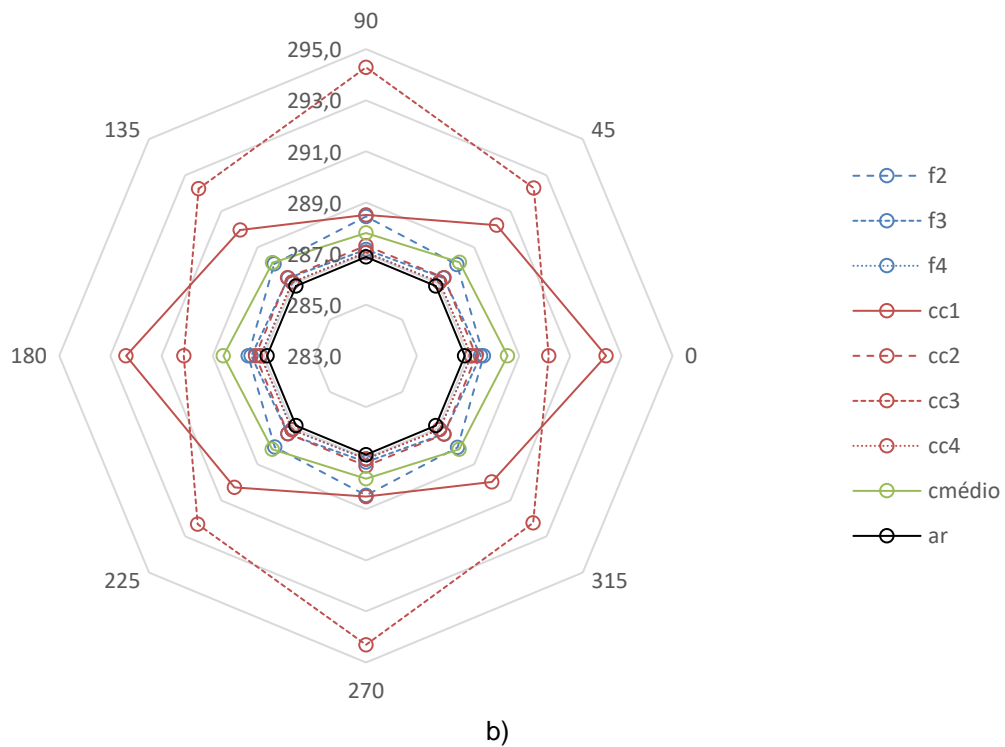


Figura 4.28 Representação radial dos resultados da indutância para os varões de 8 mm: a) todos os pontos do plano; b) todos os pontos do plano exceto F1.

4.2. INFLUÊNCIA DA MISTURA DE FIBRAS

4.2.1. MOTIVAÇÃO

Em colaboração com uma fábrica de pré-fabricação, situada na Bélgica (Ergon), decidiu-se avaliar a capacidade da sonda para analisar o UHPFRC em profundidades maiores do que as que tinham sido anteriormente avaliadas [33]. Como se trata de uma mistura de fibras que ainda não tinha sido estudada, foi necessário avaliar a sua capacidade de adotar uma orientação definida pelo aparato experimental de orientação referido em 2.2.3.

4.2.2. DEFINIÇÃO

Para os ensaios se assemelhem a uma situação próxima da que se verifica na fábrica, os provetes utilizados nos ensaios têm 100 milímetros de espessura. Estes provetes têm como objetivo simular a alma da secção transversal da peça moldada na Bélgica, Figura 4.29.

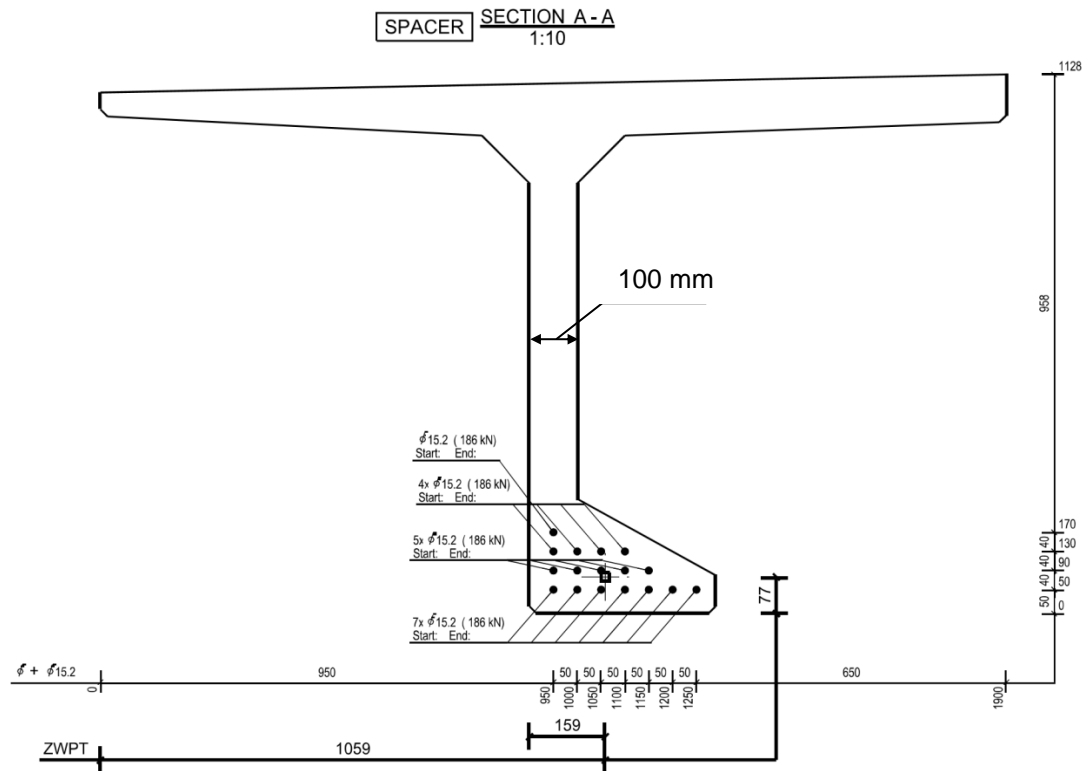


Figura 4.29 Secção da peça moldada na fábrica de elementos pré-fabricados na fábrica da Ergon.

Como os ensaios realizados são completamente não destrutivos, decidiu-se reutilizar os provetes para a realização de ensaios destrutivos tendo em vista a avaliação da resistência do UHPFRC para as várias dosagens de fibras. Assim, resolveu-se utilizar o “double edge wedge splitting test”, DEWST. Este ensaio consiste na aplicação de duas forças compressivas, no topo e na base, em indentações no provete. Devido à inclinação das paredes das indentações, as forças compressivas são convertidas em forças de tração, como mostra a Figura 4.30.

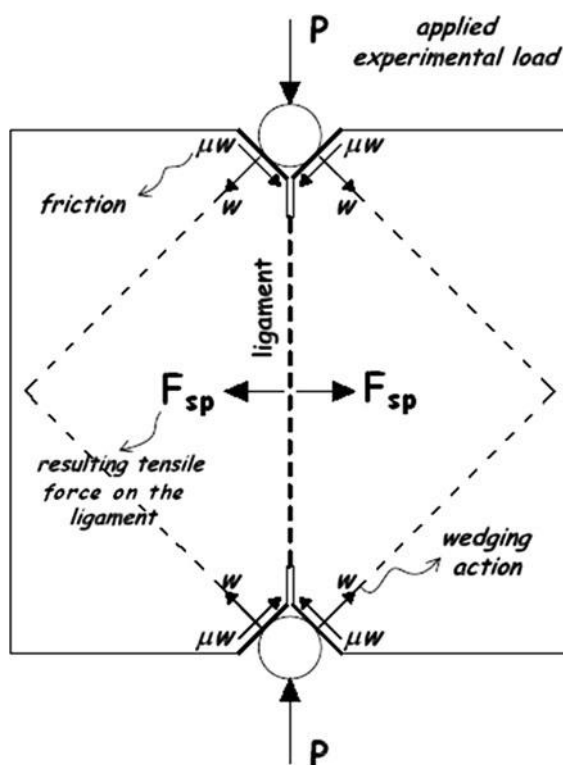


Figura 4.30 Esquema com as forças intervenientes num ensaio DEWST. [82]

Durante o ensaio foi necessário colocar pequenas peças de aço lubrificadas com grafite para proteger as indentações. Sendo a inclinação das indentações 45° e o coeficiente de atrito entre aço com a grafite 0,06 [28], vem:

$$F_{sp} = P \frac{\cos 45^\circ - 0.06 \cdot \sin 45^\circ}{\sin 45^\circ + 0.06 \cdot \cos 45^\circ} \quad (4.1)$$

Como se pensou em dois tipos de análise diferentes, nas quais se têm fibras orientadas numa e fibras não orientadas noutra, para cada dosagem de fibras realizaram-se dois provetes. Estes provetes foram betonados na vertical de modo a obter duas faces moldadas, simulando a situação que ocorre nas paredes dos elementos produzidos pela Ergon. As dimensões dos provetes são 150 milímetros de largura, 150 milímetros de altura e 100 milímetros de espessura.

De referir que a realização deste ensaio destrutivo encontra-se fora do âmbito do presente trabalho.

4.2.3. MATERIAIS

Tal como foi referido em 4.2.2, foram usados dois tipos de fibras: as Dramix OL6/.16 com um comprimento de 6 milímetros, um diâmetro nominal de 0.15 milímetros e uma resistência à tração de 3000 N/mm^2 ; e as Dramix RC80/30BP com um comprimento de 30 milímetros, um diâmetro de 0.38 milímetros e uma resistência à tração de 3070 N/mm^2 . A mistura adotada foi de 70% das fibras Dramix OL6/.16 e 30% das fibras Dramix RC80/30BP. A composição da matriz e respetivos materiais constituintes estão indicados na Tabela 4.3. Estudaram-se 4 dosagens de fibras (0.5%, 1.0%, 1.5% e 2%), em torno da dosagem utilizada pela Ergon que é de 1%.

Tabela 4.3 Composições utilizadas para produzir os provetes (kg/m³)

Fornecedor/referência	Massa volúmica	Teor de sólidos	Dosagem de fibras			
			0.50%	1.00%	1.50%	2.00%
CEM I 42.5 R (Secil)	3160		794.90	794.90	794.90	794.90
Centrlit Fume SX MCBauchemie	1380	50%	79.49	79.49	79.49	79.49
OMYA COMITAL (Betocarb HP- OU)	2680		311.43	311.43	311.43	311.43
Areia fina, (d _{max} =1mm)	2630		1006.712	993.562	980.412	967.262
Água	1000		153.76	153.76	153.76	153.76
Viscocrete 20HE, Sika	1080	40%	13.75	13.75	13.75	13.75
Fibras Bekaert (Total)	7850		39.25	78.5	117.75	157

4.2.4. PREPARAÇÃO

Para a preparação dos provetes destinados ao ensaio DEWST, com 100mm de espessura, realizaram-se amassaduras com um volume de 2.475 litros cada, seguindo o procedimento de amassadura apresentado na Figura 4.31.

A primeira amassadura realizada foi com uma dosagem de 0.50% de fibras e com um volume de 2.4 litros da mistura apresentada em 4.2.3. Contudo, como devido às perdas decorrentes da transferência entre o recipiente de mistura e o molde, o volume útil de betão era muito próximo do do molde, decidiu-se aumentar o volume de amassadura para 2.475 litros para as restantes dosagens.

Na Figura 4.31 encontra-se um esquema resumo do processo de mistura.

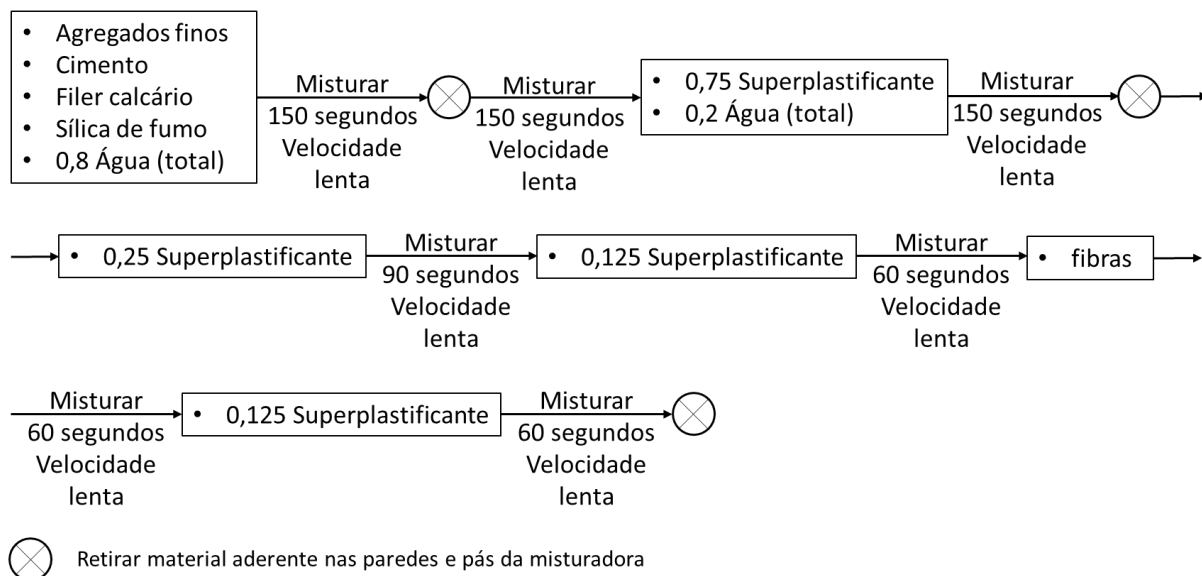


Figura 4.31 Procedimento de amassadura.

A betonagem dos provetes “não-orientados” foi feita vertendo o UHPFRC, de uma baixa altura para evitar a formação de bolhas de ar, de forma o mais aleatória possível para que não houvesse orientação das fibras devido ao escoamento do betão dentro do molde.



Figura 4.32 Provette “não-orientado”.

Para os provetes orientados, a betonagem foi feita com o molde inserido numa estrutura que cria um campo eletromagnético a fim de orientar as fibras enquanto o UHPFRC ainda se encontra no estado fresco. Esta estrutura é constituída por um elemento ferroso, formado por elementos cilíndricos soldados, em forma de U, na qual foi enrolado um fio de cobre criando duas bobines. De modo a permitir o melhor contacto entre esta estrutura e o provete, alguns elementos ferrosos foram inseridos entre eles. Também as paredes do molde em contacto com estes elementos são de um material ferroso, No entanto, as restantes faces do molde são de madeira. A betonagem neste caso foi feita com uma corrente eléctrica de aproximadamente 3mA a passar pelo aparato de orientação. Na Figura 4.33 a) apresenta-se o aparato de orientação, a seta a vermelho indica a orientação do campo formado por este. Tal como no provete com fibras não orientadas, no fim da betonagem é colocada uma “tampa” para criar a cunha, tal como mostra a Figura 4.33 b).

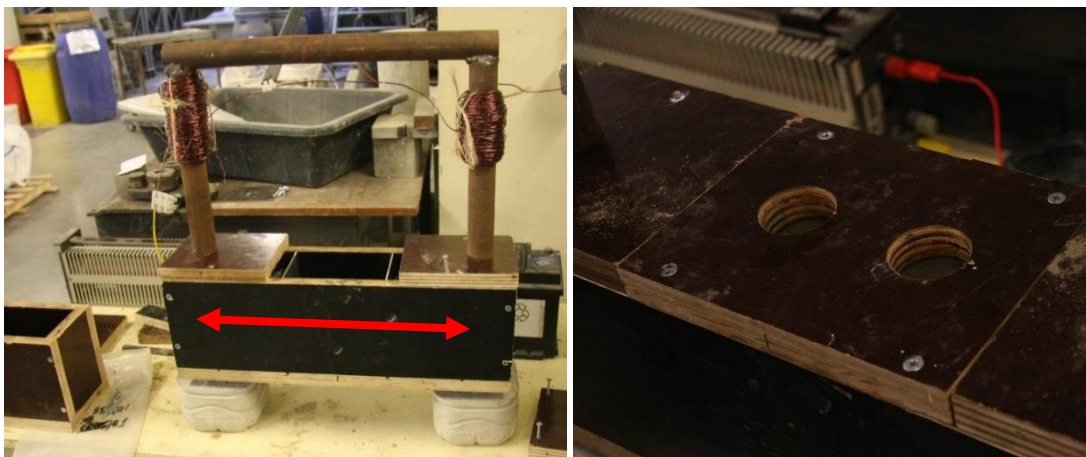


Figura 4.33 a) Setup de orientação das fibras. b) Provete após betonagem.

4.2.5. ENSAIOS NO ESTADO FRESCO

Para confirmar a auto-compactabilidade da mistura, realizou-se um ensaio de espalhamento, como mostra a Figura 4.34, para cada uma das dosagens, tendo todas elas apresentado resultados satisfatórios. Estes resultados encontram-se na Tabela 4.4.

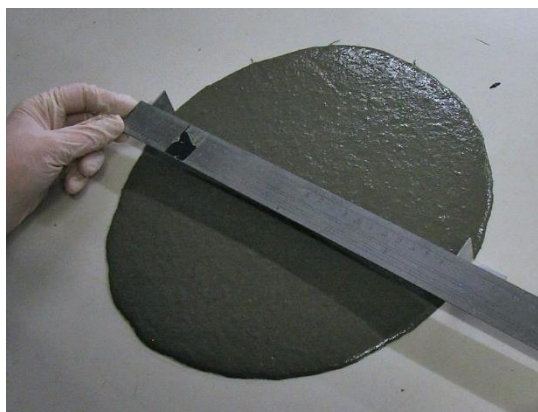


Figura 4.34 Medição do resultado do ensaio de espalhamento.

Tabela 4.4 Resultados dos ensaios de espalhamento

Dosagem de fibras:	0.5%	1.0%	1.5%	2.0%
D ₁ (mm)	271	270	254	245
D ₂ (mm)	272	275	274	262
D _{médio} (mm)	271.5	272.5	264	253.5

4.2.6. MEDIÇÕES DA INDUTÂNCIA

Em ambos os tipos de provetes, orientados e não orientados, foram atribuídas aleatoriamente as denominações de face A e face B às duas faces moldadas. Para cada face foram realizados quatro conjuntos de medições. Estes conjuntos correspondem a dois conjuntos de medições paralelas e perpendiculares em relação à direção das fibras, ou seja, 0° - 90° e 180° - 270° como mostra a Figura 4.35, e a dois conjuntos de medições oblíquas com a direção das fibras, isto é, 45° - 135° e 225° - 315° com mostra a Figura 4.36.

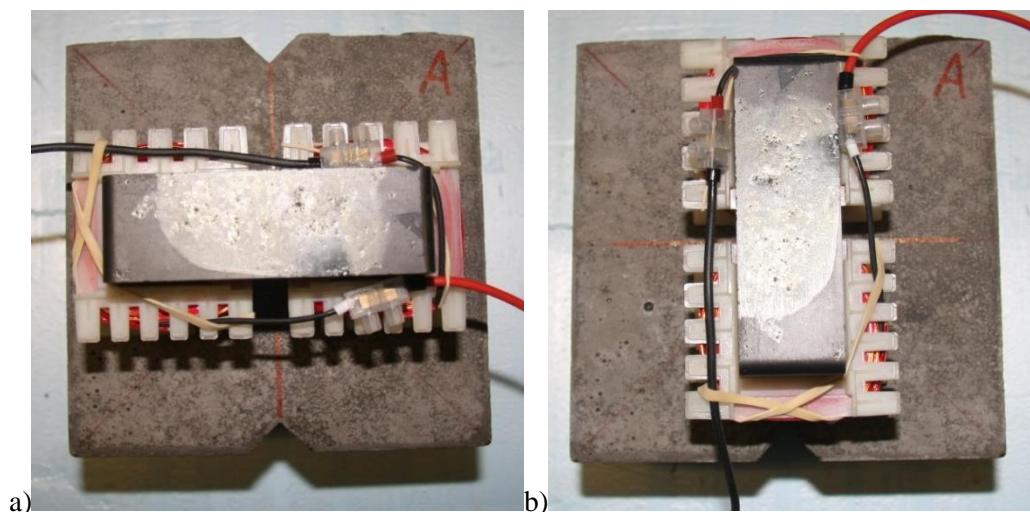


Figura 4.35 Provetes DEWST com a sonda nas posições: (a) 0° e (b) 90° .

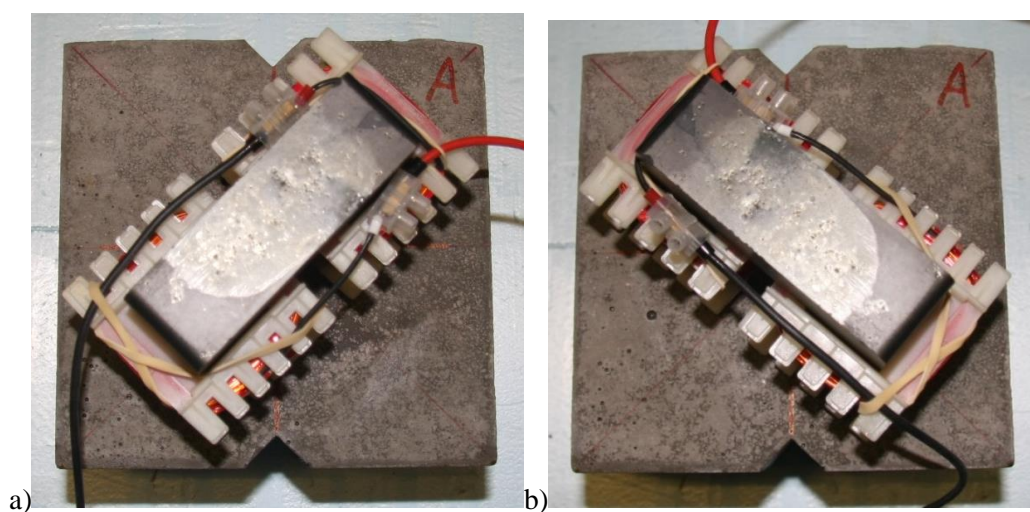


Figura 4.36 Provetes DEWST com a sonda nas posições: (a) 45° e (b) 135° .

4.2.7. RESULTADOS

A análise de resultados foi dividida em duas etapas, primeiro uma análise individual de cada dosagem e depois uma análise em conjunto.

Numa primeira análise, compararam-se os resultados dos provetes orientados e não-orientados, para a mesma dosagem de fibras, para confirmar que o aparato de orientação das fibras foi eficaz na orientação desta mistura de fibras.

Tal como é possível ver nas Figura 4.37 a Figura 4.40, para as diferentes dosagens de fibras existe uma clara diferença nos valores da indutância medidos com a sonda na direção das fibras e com a sonda na direção perpendicular às fibras, no caso dos provetes orientados.

Tal como esperado, nos provetes não orientados esta variação da indutância para os diferentes ângulos é muito menos pronunciada. Isto observou-se para todas as dosagens em ambas as faces.

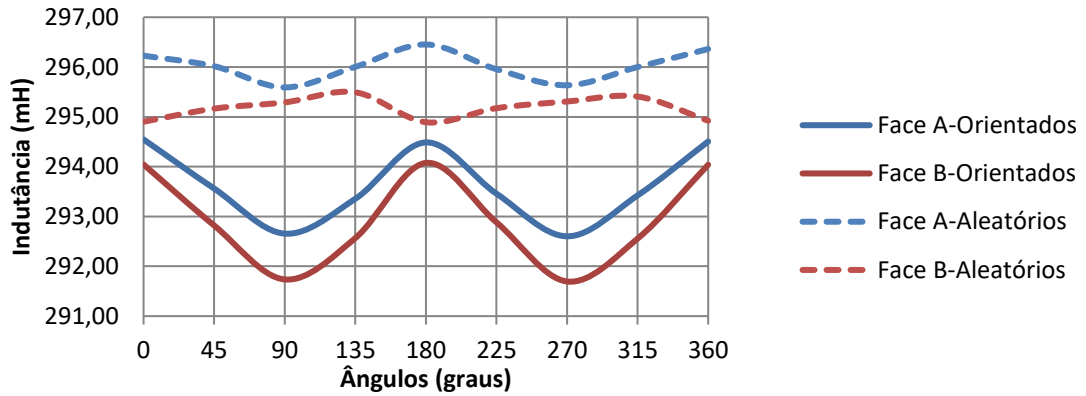


Figura 4.37 Resultado das leituras da indutância para as várias orientações para uma dosagem de fibras de 0.5%

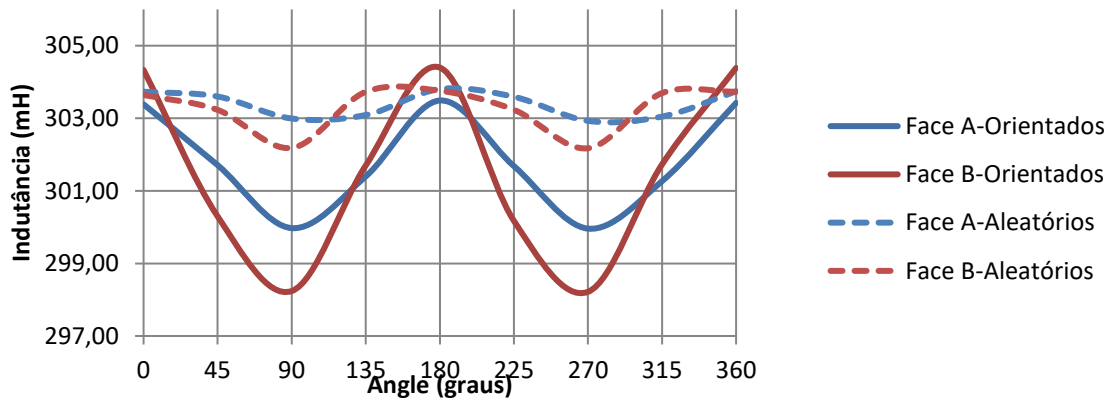


Figura 4.38 Resultado das leituras da indutância para as várias orientações para uma dosagem de fibras de 1.0%

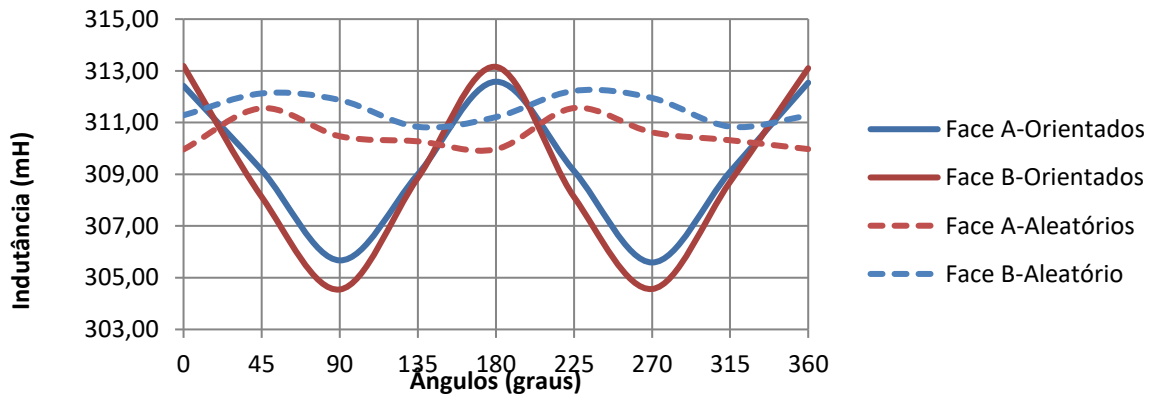


Figura 4.39 Resultado das leituras da indutância para as várias orientações para uma dosagem de fibras de 1.5%

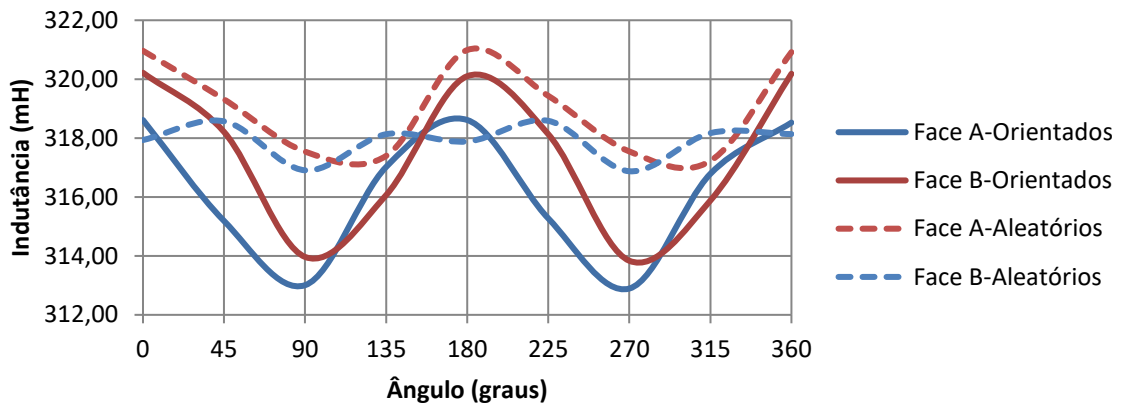


Figura 4.40 Resultado das leituras da indutância para as várias orientações para uma dosagem de fibras de 2.0%

Para a análise conjunta dos resultados optou-se por utilizar os valores da indutância relativos à indutância registada para o ar. Nesta análise são comparados os resultados como se de duas situações completamente distintas se tratassem, ou seja, os resultados para cada par de eixos, 0°-90° e 45°-135°. Estes dois casos são ainda subdivididos em duas análises, numa relaciona-se a permeabilidade magnética relativa média com o teor de fibras e na outra relacionam-se as permeabilidades magnéticas relativas nas duas direções.

Tal como é possível observar na Figura 4.41, quer para os provetes com as fibras orientadas, quer para os provetes com uma distribuição aleatória de fibras, a relação entre a permeabilidade magnética média do UHPFRC e o seu teor de fibras é aproximadamente linear. Para além disso, registaram-se valores ligeiramente mais baixos para os provetes com as fibras orientadas. Esta variação foi algo inesperada, já que nos ensaios de projetos anteriores não se observou esta diferença na reta de ajuste aos resultados dos provetes orientado e não-orientados, tal com se pode constatar na Figura 3.10. No entanto, é conservativo adotar a reta de ajuste correspondente aos provetes aleatórios, uma vez que para uma mesma permeabilidade magnética relativa corresponde a valores de armadura mais baixos.

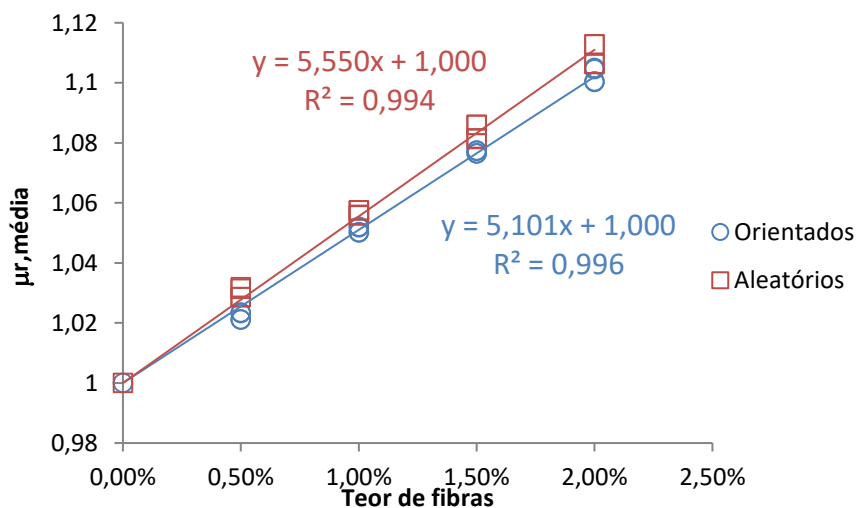


Figura 4.41 Relação entre a permeabilidade relativa média e a dosagem de fibras usando resultados das direções 0° e 90°.

Na Figura 4.42 encontram-se os resultados da análise de uma outra combinação pertencente a uma campanha experimental desenvolvida anteriormente na FEUP. Nesta pode-se observar que, ao contrário do que aconteceu nas análises deste trabalho, não existe uma variação significativa entre os resultados obtidos para os provetes orientados e não orientados.

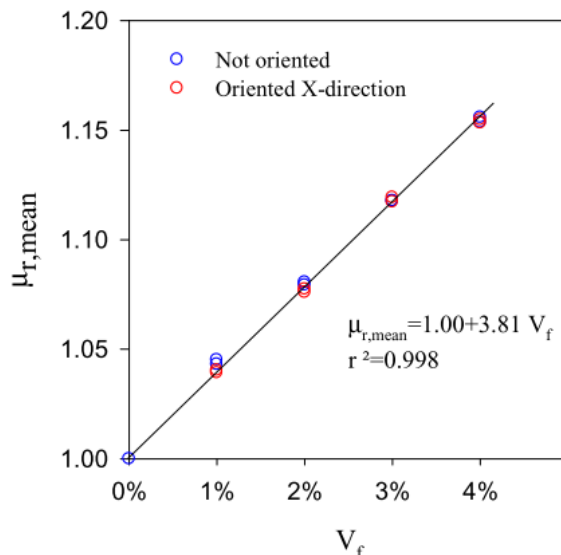


Figura 4.42 Relação entre a permeabilidade relativa média e a dosagem de fibras para uma mistura de fibras de 10 mm e diâmetro de 0.175 [1], [40].

No entanto, para uma mistura de apenas fibras de 13 milímetros também analisada anteriormente, e à semelhança do que se registou na presente análise, já se obtiveram resultados diferentes para os dois tipos de provetes. Para além disso, é de salientar que estes resultados podem indiciar um comportamento não-linear, desta mistura de fibras, para dosagens maiores [40]. Contudo, este comportamento não se verificou na mistura aqui estudada.

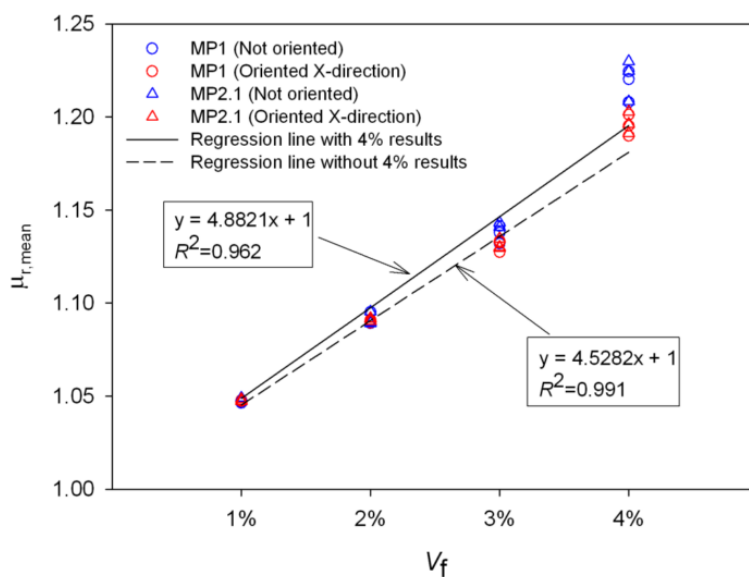


Figura 4.43 Retas de calibração obtidas num estudo anterior para as fibras Dramix OL 13/20 [40].

Analisando os resultados obtidos para a permeabilidade relativa medida nas duas direções, como na Figura 4.44, constata-se que, tal como era esperado, os resultados dos provetes não orientados encontram-se equidistantes dos dois eixos. Já nos resultados dos provetes orientados observam-se valores mais próximos do eixo correspondente à direção para a qual foram orientados.

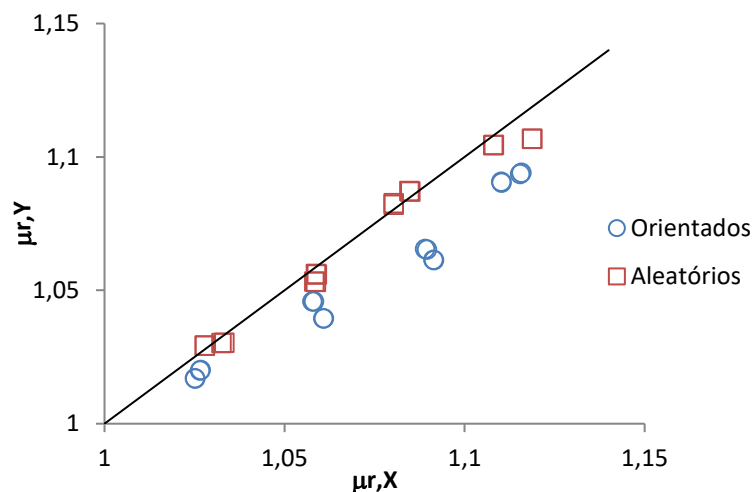


Figura 4.44 Relação entre as permeabilidades magnéticas relativas segundo a direção de 90°, Y, e a direção de 0°, X.

À semelhança do que foi descrito para as direções 0°-90°, na Figura 4.45, verifica-se que com os resultados das direções 45° e 135° se obtêm valores ligeiramente superiores da permeabilidade magnética relativa média para os provetes com as fibras não orientadas em relação aos que têm as fibras orientadas. Para além disso, também se mantem a linearidade da relação entre a permeabilidade magnética relativa média e o teor de fibras e as retas de ajuste obtidas são próximas das indicadas na Figura 4.41.

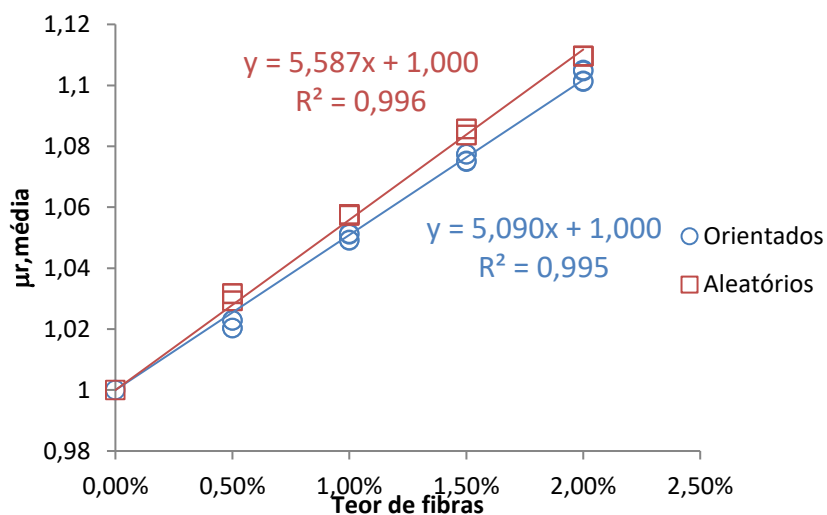


Figura 4.45 Relação entre a permeabilidade relativa média e a dosagem de fibras usando resultados das direções 45° e 135°.

Como nesta situação, em qualquer das duas direções, a sonda mantém o mesmo ângulo de 45° com a direção para a qual as fibras estão orientadas, os valores da permeabilidade magnética relativa para as duas direções são muito próximos uns dos outros levando a que a sua representação gráfica esteja equidistante de ambos os eixos, tal como se pode verificar na Figura 4.46. Devido à aleatoriedade da posição das fibras nos provetes com as fibras não orientadas os valores da permeabilidade magnética relativa para as duas direções são também muito próximos uns dos outros, assumindo uma posição próxima da dos provetes com fibras orientadas.

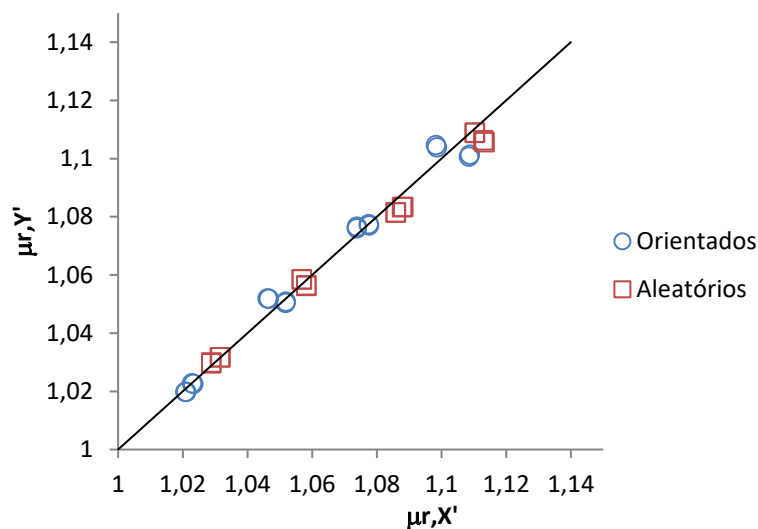


Figura 4.46 Relação entre as permeabilidades magnéticas relativas segundo a direção de 135°, Y', e a direção de 45°, X'.

Na Tabela 4.5 apresentam-se os resultados calculados do indicador da dosagem de fibras. Como se pode observar, este indicador varia muito pouco para os provetes não orientados, independentemente da orientação da sonda, sendo os seus valores próximos de 0%. No entanto para os provetes orientados a orientação da sonda tem um papel fulcral na variação dos valores deste indicador, sendo os resultados obtidos para uma orientação da sonda de 0°-90°, paralela e perpendicular com as fibras, próximos de 15%, enquanto os obtidos para uma orientação da sonda de 45°-135° são da mesma grandeza que os aleatórios. Esta variação é comprovativa de uma das limitações deste indicador, uma vez que, se todas as medições não coincidirem com a direção das fibras não é possível determinar o valor máximo do indicador. Ainda no provete orientado com medições nas direções 0°-90°, a grande diferença do valor deste indicador para a dosagem de 2.0% denota a dificuldade de orientar as fibras para dosagens maiores.

Tabela 4.5 Valores calculados do indicador $= \frac{\mu_{r,(90^\circ-\theta_i)} - \mu_{r,\theta_i}}{2 \times (\mu_{r,média} - 1)}$ (3.9)

Dosagem de fibras:		0.50%	1.00%	1.50%	2.00%	
Provetes Orientados Direções 0°-90°	Face A	0°-90°	14%	11%	15%	10%
		180°-270°	14%	12%	16%	10%
	Face B	0°-90°	19%	21%	20%	10%
		180°-270°	20%	21%	20%	10%
Provetes Aleatórios Direções 0°-90°	Face A	0°-90°	4%	2%	-1%	-3%
		180°-270°	4%	3%	-1%	5%
	Face B	0°-90°	-2%	5%	-1%	-2%
		180°-270°	-3%	5%	-2%	2%
Provetes Orientados Direções 45°-135°	Face A	0°-90°	2%	1%	0%	-3%
		180°-270°	0%	1%	0%	-3%
	Face B	0°-90°	3%	-5%	-2%	4%
		180°-270°	3%	-6%	-1%	4%
Provetes Aleatórios Direções 45°-135°	Face A	0°-90°	0%	2%	3%	3%
		180°-270°	0%	2%	3%	4%
	Face B	0°-90°	-2%	-2%	3%	1%
		180°-270°	-1%	-1%	3%	1%

4.3. INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DO PROVETE

Perante a possibilidade de se terem obtido resultados representativos apenas de uma camada superficial decidiu-se realizar um novo conjunto de testes usando as mesmas condições descritas em 4.2.3 mas com um volume de 1.6 litros cada. Estes testes consistiram nas medições de provetes cilíndricos de 150 milímetros de diâmetro e apenas com uma face plana moldada. A escolha destes provetes centrou-se no facto de estes terem uma dimensão próxima das dos provetes DEWST utilizados nos ensaios anteriores. A estes provetes, após cada conjunto de medições foi retirada uma “fatia” a partir da face não moldada, repetindo, de seguida, as medições e assim sucessivamente. Desta forma, ao longo dos vários conjuntos de medições o material sob análise mais próximo da sonda mantém-se inalterado. Assim, as variações medidas nas leituras correspondem ao efeito que a camada que foi retirada tinha na leitura do provete completo. Na Figura 4.47 encontram-se as diferentes fases de ensaios correspondentes às várias alturas dos provetes. Estas fotografias foram obtidas após a realização dos ensaios. No entanto, cada fase de ensaios foi executada antes do corte da fase seguinte, mantendo, assim, intacta a parte do provete que se encontra sob análise. A dimensão das fatias, e, conseqüentemente, o seu número estiveram limitados às capacidades da ferramenta de corte disponível.



Figura 4.47 Última fase de ensaio dos provetes cilíndricos.

Devido a algumas imperfeições no corte dos provetes procedeu-se à medição das alturas dos mesmos em quatro posições distintas. Estas posições correspondem às duas orientações para as quais foram registados os valores da indutância. Foram os resultados das médias de cada um desses conjuntos de quatro valores que foram utilizados como sendo as alturas dos provetes após as betonagens e os cortes. Estes valores podem ser observados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 Resultados das medições das diferentes alturas dos provetes e respetiva média.

	h1 (cm)	h2 (cm)	h3 (cm)	h4 (cm)	h médio (cm)
0.50%	3.00	2.80	2.60	2.70	2.78
	4.70	4.70	4.80	4.80	4.75
	6.90	7.00	6.80	6.80	6.88
	8.80	8.90	8.80	8.70	8.80
1.00%	2.80	2.80	2.80	2.70	2.78
	5.00	4.80	4.80	5.00	4.90
	6.90	6.80	6.80	7.00	6.88
	9.20	9.10	9.20	9.20	9.18
1.50%	2.80	2.80	2.80	2.70	2.78
	5.00	4.90	4.90	5.00	4.95
	6.80	7.00	6.90	6.80	6.88
	9.10	9.10	9.20	9.10	9.13
2.00%	2.80	2.70	2.90	3.00	2.85
	4.90	4.80	4.70	4.70	4.78
	6.90	6.90	6.80	7.00	6.90
	9.10	9.30	9.20	9.10	9.18

Com o intuito de verificar se os valores obtidos para a indutância estavam em conformidade com os dos ensaios anteriores, ver 4.2.7, procedeu-se à comparação dos resultados obtidos. Esta comparação foi feita principalmente com os provetes com as fibras não orientadas, já que os cilindros também não tinham as fibras orientadas. Contudo, como a secção transversal dos cilindros é ligeiramente menor, a sonda, aquando das leituras, alcançou menos material pelo que os resultados atingidos nestes casos foram sempre menores. Embora este facto implique valores da indutância mais baixos, estes mantêm-se mais ou menos constantes para as várias orientações da sonda, comprovando a aleatoriedade do posicionamento das fibras. Estas relações podem ser observadas na Figura 4.48 para os provetes com 0.5% de fibras, na Figura 4.49 para os provetes com 1.0% de fibras, na Figura 4.50 para os provetes com 1.5% de fibras e na Figura 4.51 para os provetes com 0.5% de fibras.

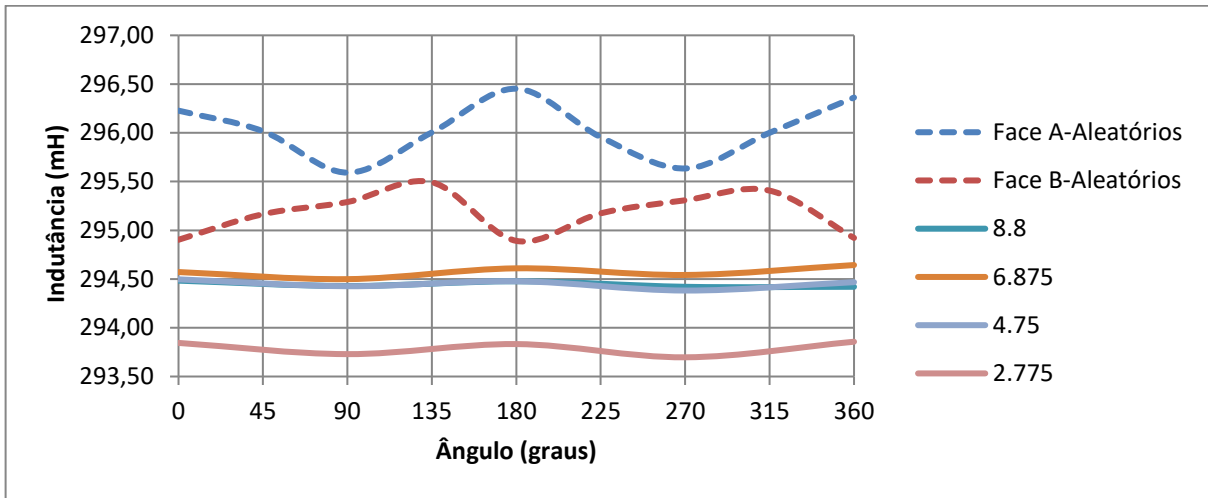


Figura 4.48 Indutância em função da orientação da sonda para os provetes descritos em 4.2.7 e para os provetes cilíndricos, em ambas as situações a dosagem de fibras é de 0.5%.

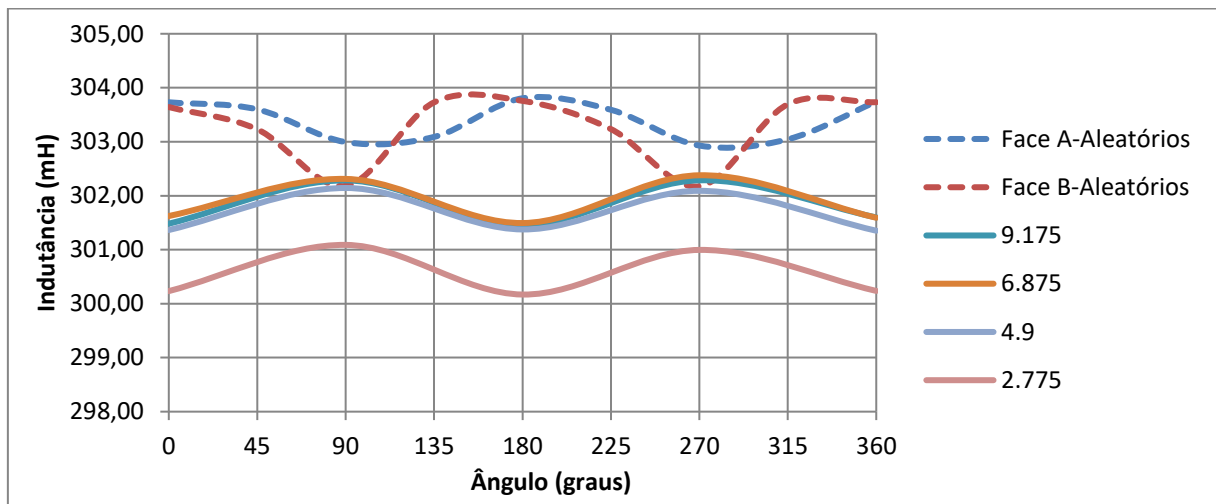


Figura 4.49 Indutância em função da orientação da sonda para os provetes descritos em 4.2.7 e para os provetes cilíndricos, em ambas as situações a dosagem de fibras é de 1.0%.

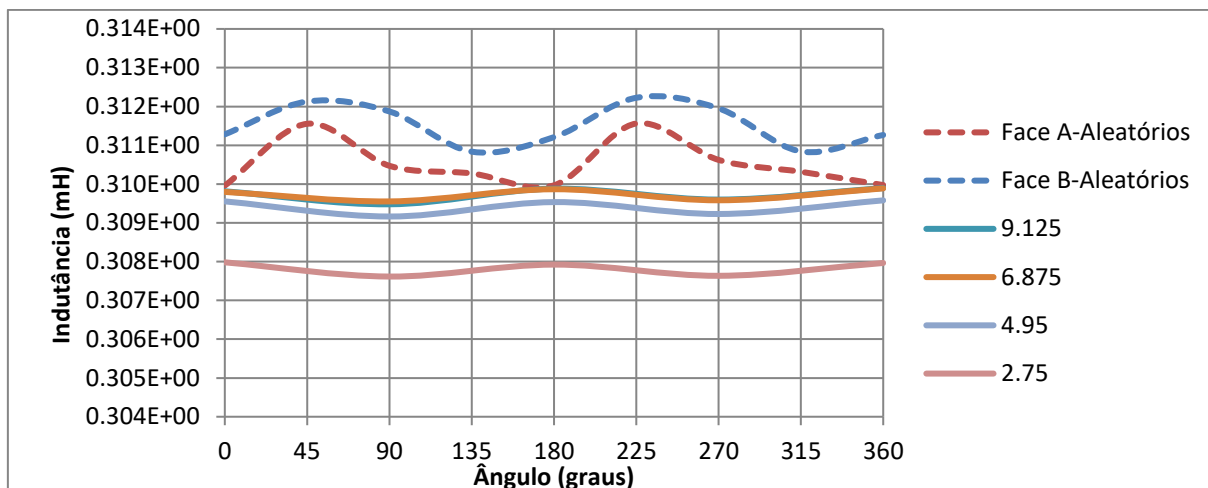


Figura 4.50 Indutância em função da orientação da sonda para os provetes descritos em 4.2.7 e para os provetes cilíndricos, em ambas as situações a dosagem de fibras é de 1.5%.

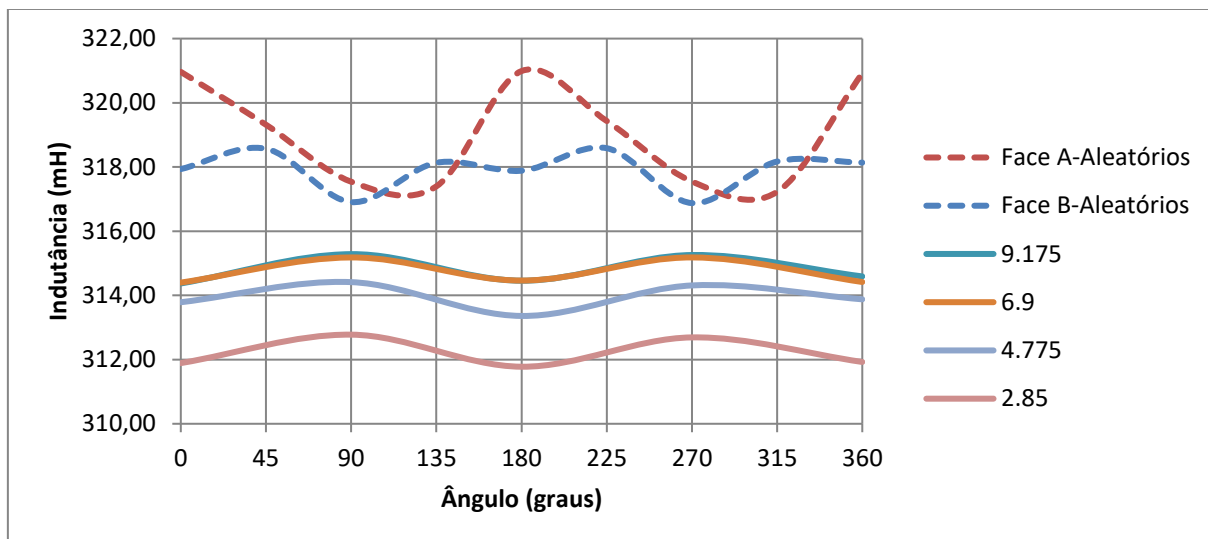


Figura 4.51 Indutância em função da orientação da sonda para os provetes descritos em 4.2.7 e para os provetes cilíndricos, em ambas as situações a dosagem de fibras é de 2.0%.

Como é possível ver no gráfico da Figura 4.52, de uma forma generalizada para as amassaduras das diferentes dosagens, a variação das leituras da indutância é mais acentuada para profundidades menores que aproximadamente 50 milímetros.

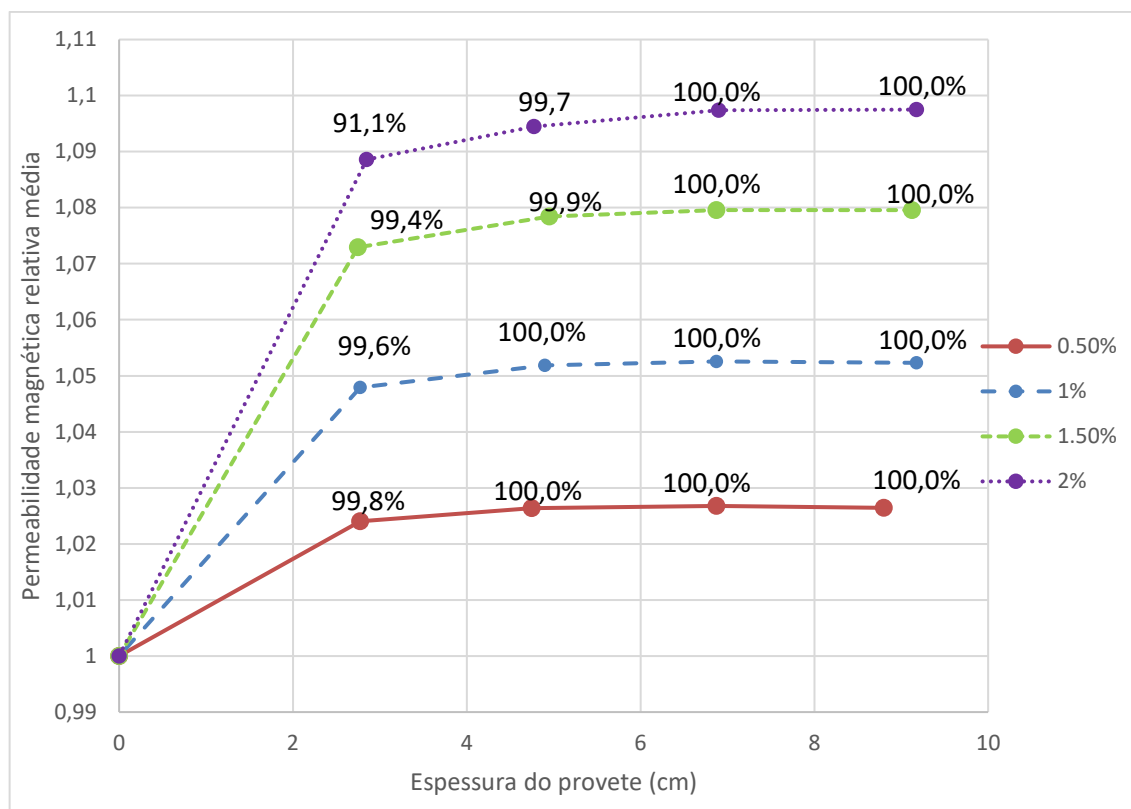


Figura 4.52 Variação da permeabilidade magnética relativa com a redução da espessura dos provetes

Com este ensaio simples foi possível perceber que com os ensaios realizados em 4.2.7 consegue-se analisar os provetes em todo o seu interior. Como estes têm 10 centímetros de espessura, com medições realizadas em ambas as faces, consegue-se examinar todo o UHPFRC. Contudo, tal como é possível verificar na Figura 4.52, a zona central dos provetes DWEST (entre 3 a 7 cm de profundidade) tem um peso muito reduzido nos valores das leituras, mesmo que estas sejam registadas em duas faces opostas. Este facto indicia que, caso exista alguma anomalia no meio do provete, esta sonda nestas condições pode não ser capaz de a detetar. Para agravar ainda mais essa situação, as zonas com maior influência nas leituras da sonda, mais próximas desta, são também, no caso do recurso a faces moldadas, as zonas onde as fibras estão mais condicionadas, o que leva a que o seu natural posicionamento seja quase paralelo à superfície. Desta forma, os valores medidos seriam maiores do que os que seriam registados numa face não moldada.

4.4. MISTURA DE FIBRAS USADA NO VIADUTO DE CHILLON

4.4.1. MOTIVAÇÃO E RESULTADOS ANTERIORES

Num estudo anterior [40], usando provetes com espessuras de 2.5cm, calibrou-se a reta que relaciona a permeabilidade relativa média com a dosagem de fibras Dramix OL 13/.20. Neste estudo, testaram-se provetes com as dosagens de 1.0%, 2.0%, 3.0% e 4.0%. Contudo, a reta que relaciona a permeabilidade magnética relativa média com a dosagem de fibras já não se adequava para uma dosagem de 4.0% [40], tal como se pode verificar na Figura 4.43. Esta tendência para a não linearidade da relação para dosagens de fibras mais elevadas, é atribuída ao maior número de pontos de contacto entre fibras.

Com o objectivo de perceber melhor o comportamento não linear desta função, desenvolveu-se um novo programa experimental para este tipo de fibras.

4.4.2. PREPARAÇÃO DOS PROVETES

Com o intuito de aproveitar estes provetes para a posterior realização de uma análise de imagem para a obtenção da real orientação das fibras, decidiu-se aumentar a espessura dos provetes para 30 milímetros. As restantes dimensões dos provetes foram estabelecidas para se poder realizar também o ensaio destrutivo DEWST. Para que as amostras para a mesma dosagem fossem iguais, os moldes foram feitos para terem em conta a realização de dois provetes em simultâneo. Depois do UHPFRC ganhar presa será necessário cortá-los para os poder ensaiar individualmente. No final os provetes terão 150 milímetros de altura e de largura e 30 milímetros de espessura, tal como está esquematizado na Figura 4.53.

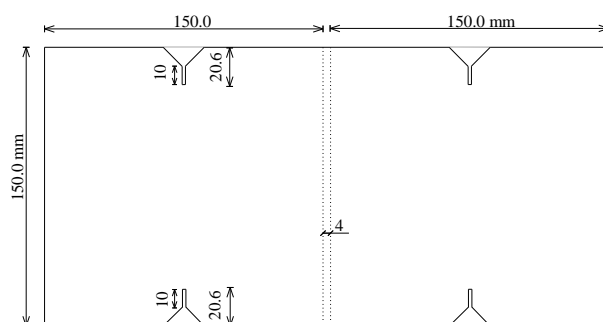


Figura 4.53 Esquema com as dimensões dos provetes para os ensaios DEWST.

Para cada dosagem de fibras realizaram-se três amassaduras diferentes para obter um par de provetes com as fibras não orientadas, um par com elas orientadas para 0° e outro par com elas orientadas para 90° . As amassaduras tiveram um volume de 1.5 litros das misturas da Tabela 4.7. As misturas tiveram apenas um único tipo de fibras com 13 milímetros de comprimento, 0.21 milímetros de diâmetro nominal e uma tensão de resistência de 2750 N/mm^2 . O procedimento de amassadura foi o mesmo do descrito em 4.2.4 para as dosagens de 1.0% e 2.0%. Contudo, devido à limitada capacidade da misturadora e ao elevado volume aparente das fibras, o processo de mistura para as dosagens de 3.0% e 4.0% foi ligeiramente diferente, tal como se pode ver na Figura 4.54.

Tabela 4.7 Composições utilizadas para produzir os provetes para o ensaio DEWST (kg/m³)

Fornecedor/referência	Massa volúmica	Teor de sólidos	Dosagem de fibras			
			1.00%	2.00%	3.00%	4.00%
CEM I 42.5 R (Secil)	3160		794.90	794.90	794.90	794.90
Centrlit Fume SX MCBachemie	1380	50%	79.49	79.49	79.49	79.49
OMYA COMITAL (Betocarb HP- OU)	2680		311.43	311.43	311.43	311.43
Areia fina (dmax=1mm)	2630		1006.712	993.562	980.412	967.262
Água	1000		153.76	153.76	153.76	153.76
Viscocrete 20HE, Sika	1080	40%	13.75	13.75	13.75	13.75
Fibras (Dramix OL 13/.20) total	7850		78.5	157	235.5	314

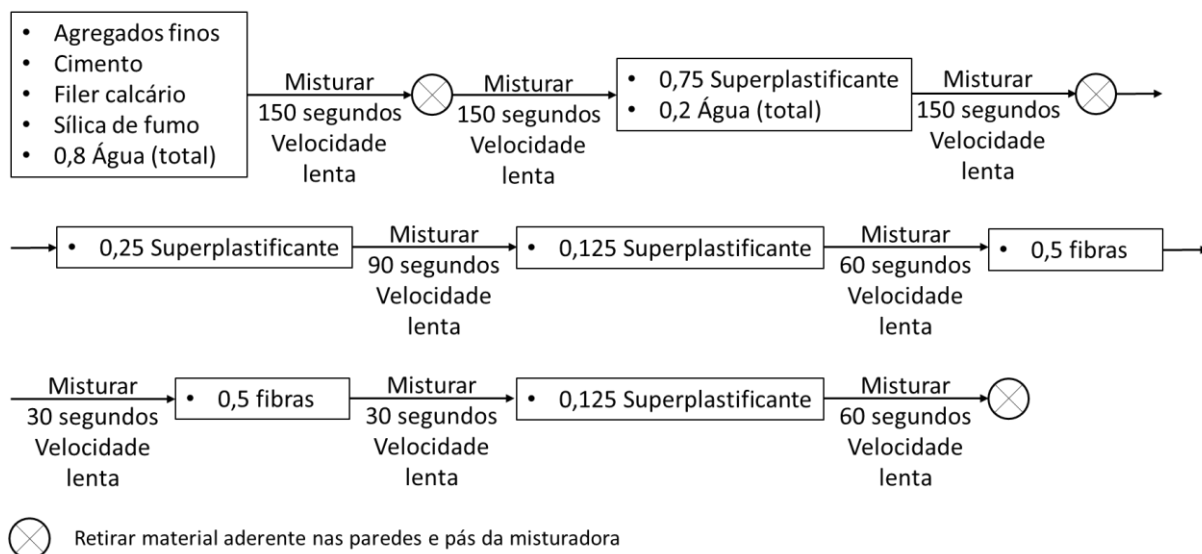


Figura 4.54 Esquema do processo de mistura das dosagens de fibras de 3.0% e 4.0%.

Para obter provetes com fibras orientadas montaram-se dois setups de orientação semelhantes ao descrito em 2.2.3. No entanto, enquanto um orientava as fibras com 0°, o outro orientava-as com 90°. A utilização de dois setups advém da necessidade de realizar várias amassaduras sequenciais e da necessidade de as pernas do setup de orientação se ajustarem às dimensões dos moldes, uma vez que estes tinham dimensões diferentes na direção para a qual as fibras estavam a ser orientadas, como mostra a Figura 4.55. Durante a orientação das fibras, o campo eletromagnético gerado pelo setup foi mantido com uma corrente de aproximadamente 3 mA.

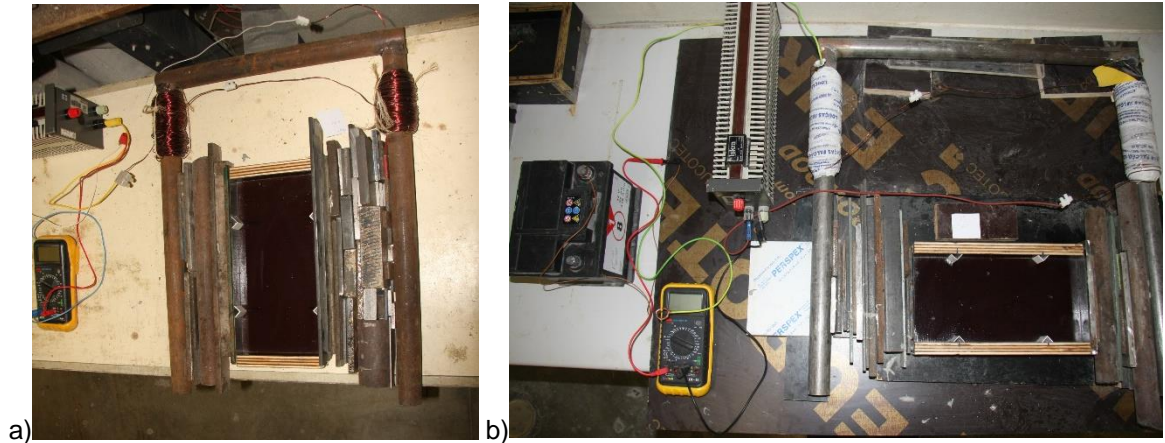


Figura 4.55 Setups de orientação para: a) 90° e b) 0°.

Para além destes dois provetes, foi ainda betonado um terceiro com uma orientação aleatória de fibras. Na Figura 4.56 apresenta-se o molde deste provete. Para garantir que não haja orientação de fibras por escoamento é necessário que a colocação do UHPFRC seja o mais aleatória possível.



Figura 4.56 Molde para amassaduras sem orientação de fibras.

4.4.3. ENSAIOS NO ESTADO FRESCO

Para verificar a autocompactabilidade desta mistura, uma vez que agora quer a dosagem quer as fibras em si são diferentes, realizou-se novamente o ensaio de espalhamento, como mostra a Figura 4.57, obtendo-se os valores expressos na Tabela 4.8.

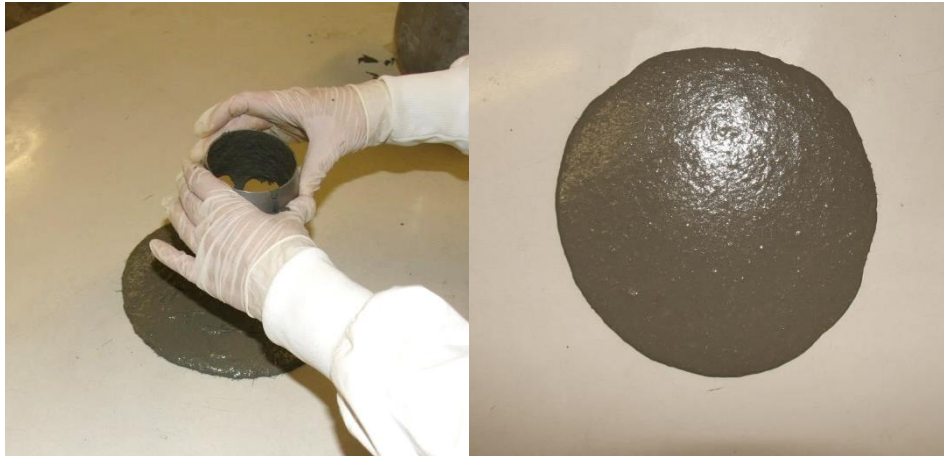


Figura 4.57 Ensaio de espalhamento.

Tabela 4.8 Resultados dos ensaios de espalhamento.

Dosagem de fibras:	1.0%	2.0%	3.0%	4.0%
D1 (mm)	254	272	243	197
D2 (mm)	261	290	267	236
D _{médio} (mm)	258	281	255	217

Devido à grande quantidade de fibras presentes nas amassaduras com uma dosagem de 4.0% houve mais dificuldades em obter uma mistura uniforme. Assim, tal como se pode observar na Figura 4.58, foi possível observar a formação de aglomerados de fibras na mistura. Foram estes aglomerados que diminuíram a trabalhabilidade do UHPFRC e, por conseguinte, levaram a que o resultado do ensaio de espalhamento fosse mais baixo. Este resultado implicou ainda que, aquando da betonagem fosse utilizada vibração já que esta amassadura não é autocompactável.

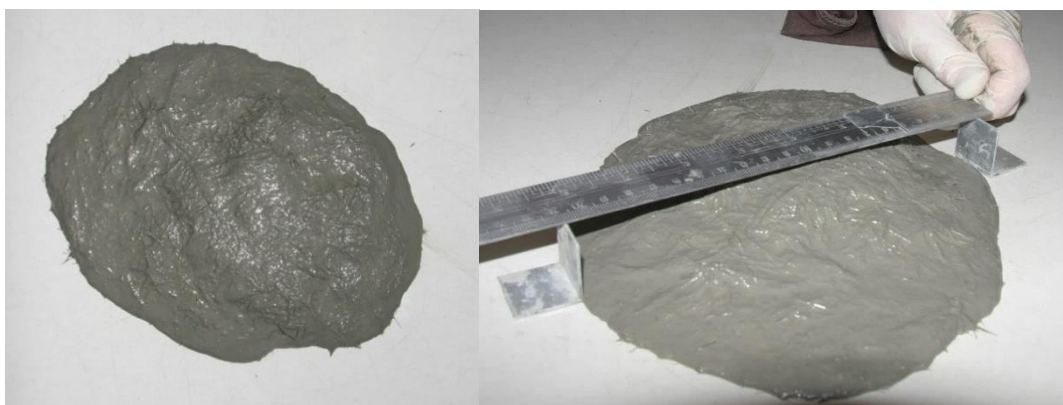


Figura 4.58 Ensaio de espalhamento para a dosagem de 4.0%.

4.4.4. MEDIÇÕES DA INDUTÂNCIA

À semelhança das medições realizadas anteriormente foram registados os valores da indutância para as direções 0° , 45° , 90° , 135° , 180° , 225° , 270° e 315° , tal como mostra a Figura 4.59.

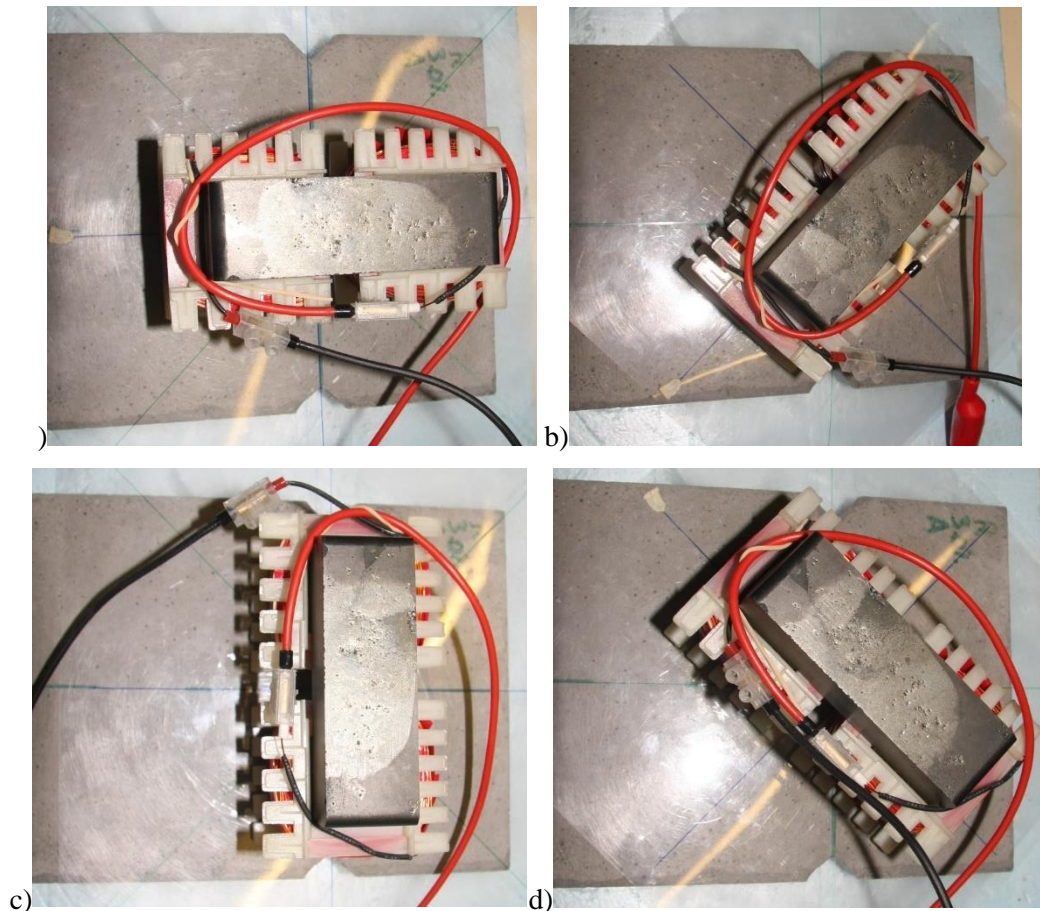
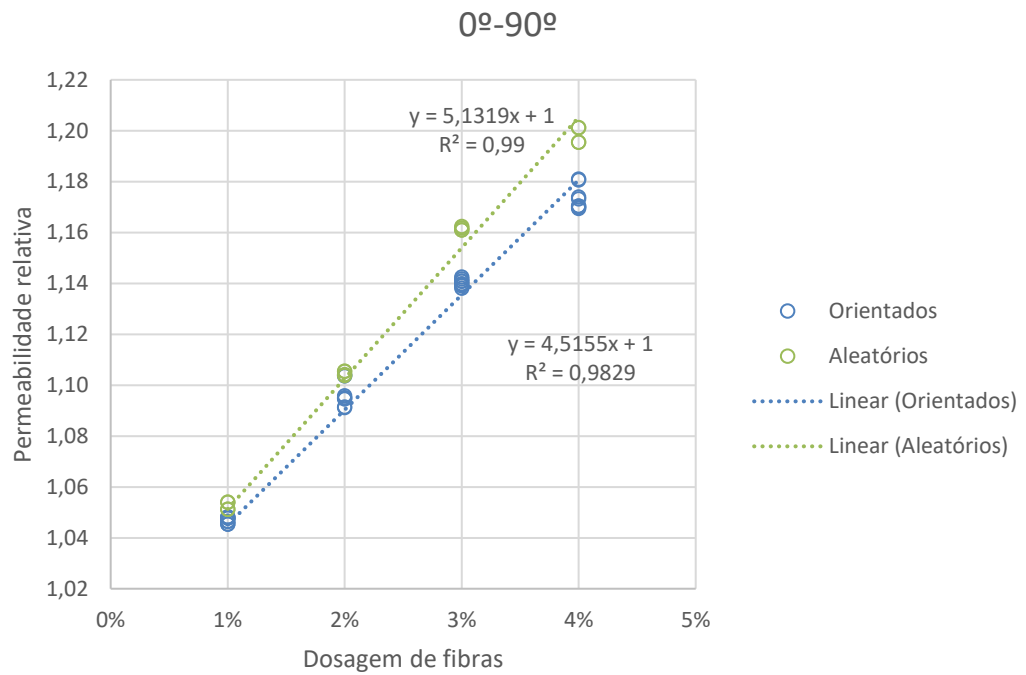


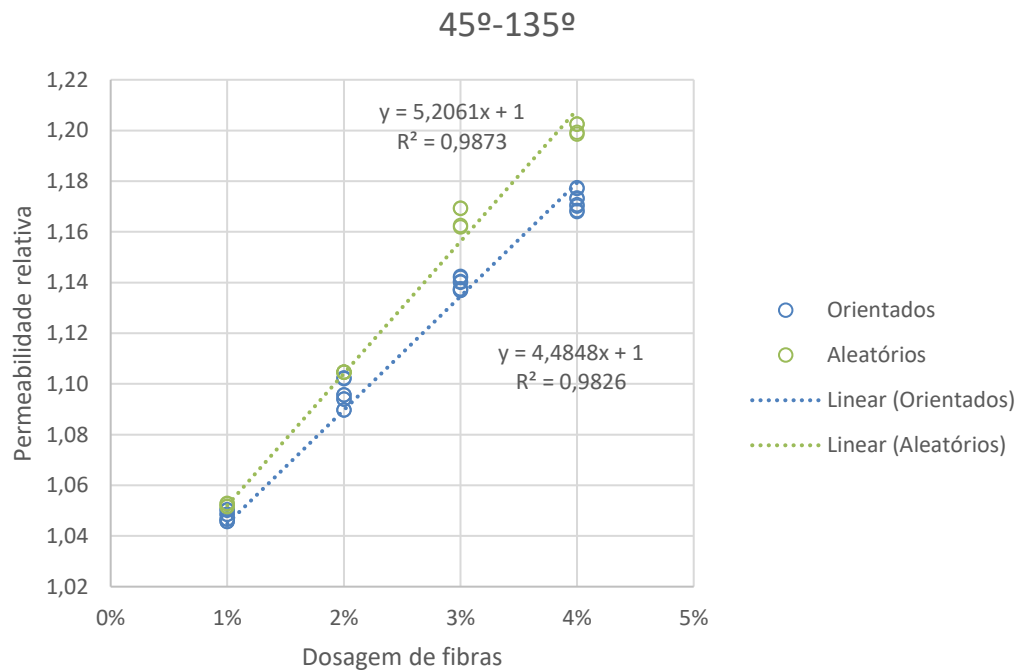
Figura 4.59 Posições da sonda para a medição da indutância: a) 0° e 180° , b) 45° e 225° , c) 90° e 270° e d) 135° e 315° .

4.4.5. RESULTADOS

Tal como aconteceu com a mistura de fibras da Ergon mantêm-se relações lineares, entre a permeabilidade relativa média e a dosagem de fibras, diferentes consoante se tratem de provetes não orientados ou de provetes orientados. Esta relação pode ser observada na Figura 4.60. Nesta pode-se observar que esta diferença entre provetes orientados e não orientados se mantém para ambos os referenciais, 0° - 90° e 45° - 135° . Esta diferença supõe-se devida a um maior número de pontos de contacto entre fibras nos provetes não orientados. De referir ainda que nos ensaios anteriores, representados na Figura 4.53, os provetes eram menos espessos, 25 milímetros em vez dos 30 milímetros dos provetes do presente trabalho.



a)

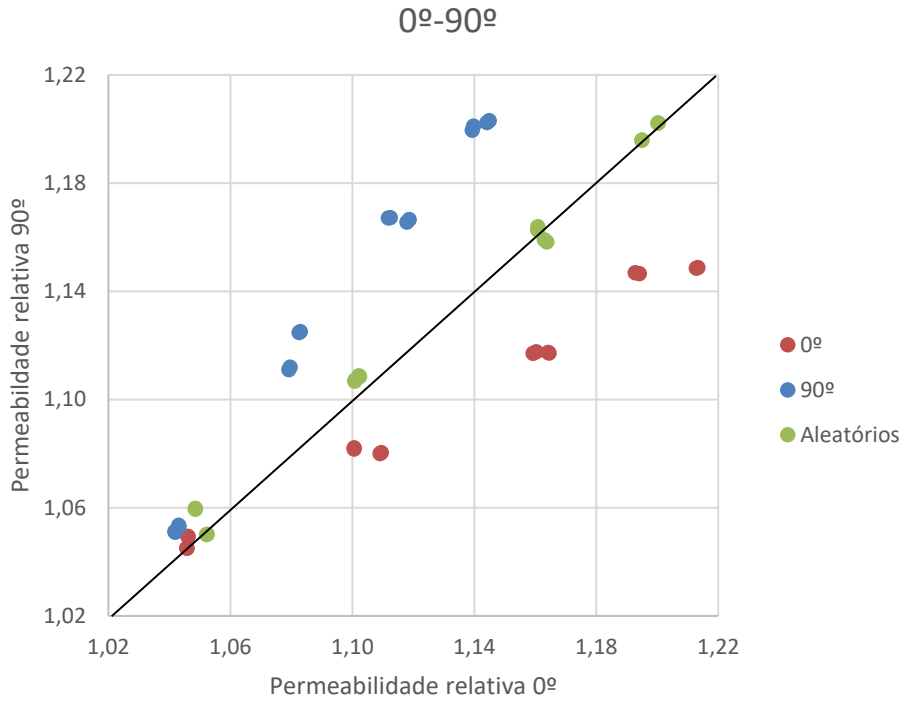


b)

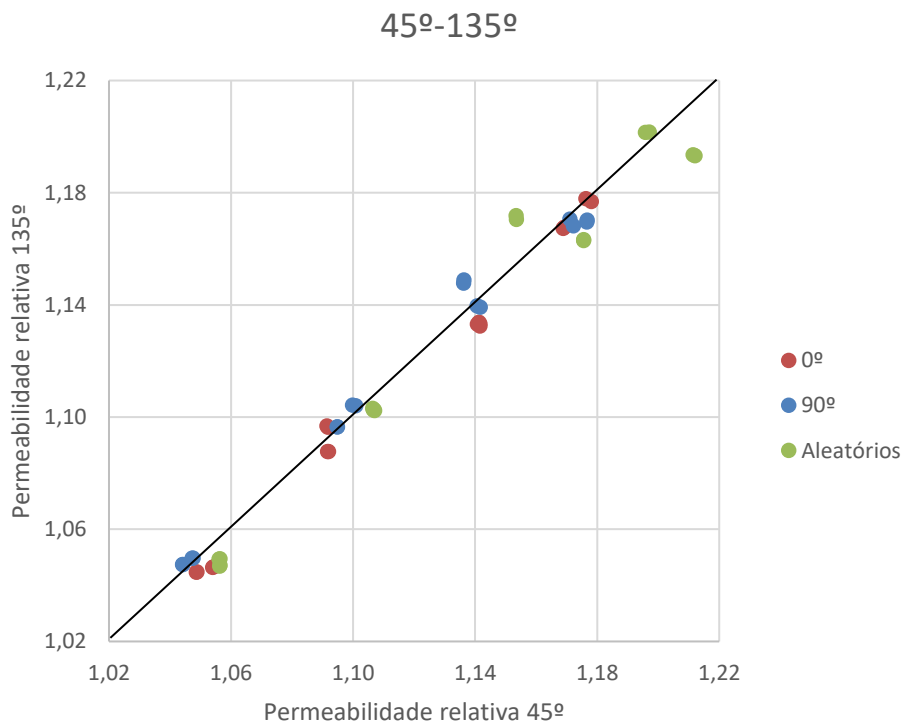
Figura 4.60 Representação do indicador de dosagem para os pares de orientações a) 0°-90° e b) 45°-135°.

Na Figura 4.61 observa-se a relação entre as permeabilidades magnéticas relativas nas duas orientações para os três tipos de provetes. Mais uma vez, tal como para as fibras da Ergon, nos conjuntos de medições para as orientações de 45° e de 135° quase não há diferenças entre os provetes orientados e os não orientados. A única diferença entre estes é que os provetes não orientados alcançam valores maiores

de permeabilidade magnética relativa. Esta diferença mantém-se também para as medições nas orientações de 0° e de 90°.



a)



b)

Figura 4.61 Relação entre as permeabilidades magnéticas relativas: a) segundo a direção de 90°, Y, e a direção de 0°, X; b) segundo a direção de 135°, Y, e a direção de 45°, X.

Na Figura 4.62 apresenta-se uma hipótese de representação do indicador de orientação das fibras. Nesta apresenta-se separadamente consoante as orientações das medições. De salientar que a ordem de grandeza deste valores é bastante diferente.

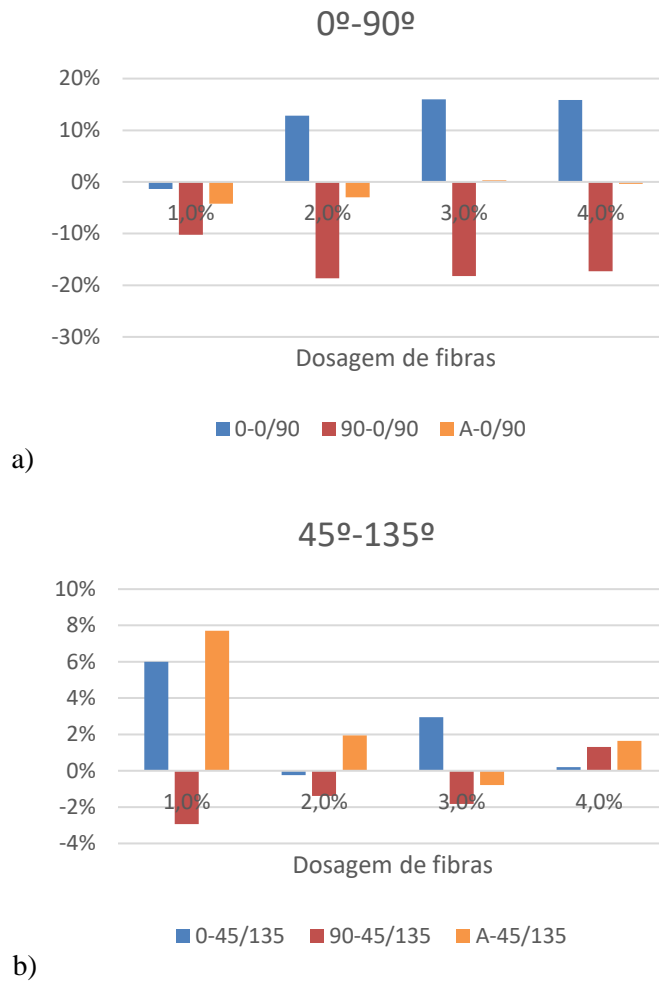


Figura 4.62 Representação do indicador de orientação das fibras para os pares de orientações a) 0°-90° e b) 45°-135°.

5

CONCLUSÕES

5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise dos efeitos que os varões de armadura têm nas leituras da indutância tinha como objetivo estabelecer limites de afastamento e de recobrimento para os quais as leituras do UHPFRC já não são influenciadas. Estes limites permitiriam estabelecer restrições de aplicação dos indicadores estabelecidos e assim aumentar a certeza destes. Durante a análise preliminar estabeleceu-se que, para além do afastamento e do recobrimento, também o tipo de aço tinha uma grande influência. Em alguns casos, para as mesmas condições, registaram-se valores de indutância maiores em varões de 8 milímetros de diâmetro do que em varões de 12 milímetros. Para tentar eliminar esta nova variável analisaram-se os mesmos resultados, mas em função do valor máximo registado para o varão, ou seja, para o varão encostado à sonda. Ainda nesta análise preliminar estabeleceu-se que a influência dos varões para um recobrimento superior a 50 milímetros é desprezável. Esta conclusão foi já implementada nos limites do ensaio fatorial para averiguar a influência do afastamento e do recobrimento. Tal como foi referido, o objetivo deste ensaio era estabelecer limites de aplicabilidade da sonda, contudo, não foi possível estabelecer estes limites com o rigor pretendido uma vês que estes não dependiam exclusivamente destas duas variáveis. A nova condicionante encontrada consistiu nas dimensões da sonda, mais especificamente a relação entre as dimensões da sonda e os valores do afastamento. De referir ainda que as dimensões relevantes para os ensaios mudam consoante a orientação da sonda. Assim em vez de se considerar o valor absoluto do afastamento como uma variável deverá ser considerado o seu valor relativo às dimensões da sonda. Ainda assim foi possível estabelecer com limite de aplicabilidade 220.71 mm de afastamento e 51.95 mm de recobrimento. Este valor do recobrimento foi compatível com o alcançado nos ensaios preliminares.

A análise dos efeitos da mistura de fibras tinha como objetivo a verificação da capacidade de se atribuir uma orientação a uma mistura de fibras que inclui fibras de maior dimensão. Mantendo a mesma corrente no setup de orientação verificou-se que estas fibras adotaram uma boa orientação, tendo-se atingido valores próximos de 20% para o indicador de orientação. De referir ainda que se notou uma grande variação dos valores deste indicador quando uma das orientações da sonda não coincidia com a orientação das fibras. Estes resultados são semelhantes aos dos provetes orientados o que implica que nestes casos não seja possível afirmar a verdadeira orientação das fibras. Para evitar esta situação, estes ensaios deverão ser realizados para diferentes pares de orientação. No indicador de dosagem reparou-se numa ligeira variação entre os provetes orientados e os provetes não orientados. Estima-se que esta diferença advém, do facto de com uma distribuição aleatória o número de pontos de contacto entre fibras aumenta, o que por sua vez leva a um aumento da permeabilidade magnética relativa do provete. Contudo, deverá ser utilizado o indicador referente aos provetes aleatórios uma vez que este é mais

conservativo, isto é, para uma mesma permeabilidade magnética relativa atribui ao UHPFRC uma dosagem mais baixa.

A análise da influência da espessura tinha como objetivo estimar qual o alcance, em profundidade da sonda. Uma vez que várias utilizações deste material são feitas por camadas é fundamental perceber qual o efeito que estas têm. Dos ensaios realizados concluiu-se que o alcance da sonda é cerca de 50 milímetros. Este valor corrobora com os resultados obtidos nos ensaios preliminares do estudo da influência dos varões.

Da análise do indicador da dosagem de fibras para dosagens maiores pode-se concluir que se mantém a linearidade da relação entre a dosagem de fibras e a permeabilidade magnética relativa média do UHPFRC. Contudo esta relação, para a mesma mistura de fibras, assume um valor diferente consoante se trate de um provete com orientação das fibras ou não. Esta diferença traduz-se num aumento da permeabilidade relativa média para a mesma dosagem. Este aumento também se pode observar quando se representa a relação entre as permeabilidades relativa para as duas direções avaliadas. Desta forma, caso se queira verificar qual a dosagem de uma amostra de UHPFRC, deverá ser utilizado o indicar correspondente aos provetes não orientados uma vez que este leva a um resultado mais conservativo, isto é, como o elemento teria uma menor quantidade de fibras também a sua resistência, particularmente a esforços de tração ou flexão, seria menor.

5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

A continuação deste trabalho tem que, obrigatoriamente passar pela caracterização das novas variáveis que foram encontradas neste estudo. Assim é fundamental que seja realizada uma análise das propriedades eletromagnéticas dos diferentes tipos de aço utilizados como armaduras na construção. Esta análise deverá fazer variar não só os tipos de aço, mas também os seus diâmetros.

Outra variável a ser estudada é a influência que a relação entre o afastamento e as dimensões da sonda têm nas medições da indutância. Assim, deverão ser analisados os efeitos gerados por sondas de diferentes tamanhos. Desta forma, o plano fatorial teria que ser revisto, passando a equacionar o recobrimento e a relação entre o afastamento e as sondas, podendo, assim, incluir no plano as diversas sondas.

Apesar de se ter alcançado algumas conclusões sobre o comportamento dos varões, não foi realizada qualquer verificação sobre a veracidade destas quando os varões se encontram embebidos em UHPFRC. Assim, deverão ser realizados ensaios que comprovem, ou não, os limites estabelecidos pela análise do plano fatorial.

Poderá ser criado um modelo de elementos finitos que se aproxime da realidade estudada e que permita simular e validar as conclusões obtidas. Estas simulações poderão avaliar os efeitos que a mudança das dimensões da sonda traz nas medições e estimar com mais certeza os limites de aplicabilidade de cada sonda, nomeadamente em relação às armaduras. Para além disso, uma modelação mais fiel à realidade do UHPFRC, mais precisamente das fibras no seu interior, poderá levar a uma melhor compreensão do seu comportamento, nomeadamente sobre o efeito de parede em faces moldadas. Uma hipótese para esta modelação poderá passar pela geração aleatória de fibras de acordo com algumas restrições equacionadas, como por exemplo a expressão proposta por Guénet et al. [83],

$$p(\theta, \varphi) = kg / (2\pi * \sinh(kg)) * \cosh[kg(\cos \varphi * \cos \varphi_0 - \sin \varphi \sin \theta \sin \varphi_0)] \quad (5.1)$$

Onde φ e θ são coordenadas esféricas, φ_0 é o ângulo entre o eixo de simetria da distribuição e o eixo normal ao plano do esforço e kg é um parâmetro que representa o grau de uniformidade da distribuição.

BIBLIOGRAFIA

- [1] S. Nunes, M. Pimentel, e A. Carvalho, «Non-destructive assessment of fibre content and orientation in UHPFRC layers based on a magnetic method», *Cem. Concr. Compos.*, vol. 72, pp. 66–79, 2016.
- [2] N. Spiratos e M. Páge, «The Role of Superplasticizers in The Development of Environmentally-Friendly Concrete», em *Two-Day CANMET/ACI International Symposium on Concrete Technology for Sustainable Development*, 2000, p. 15.
- [3] J. Plank, K. Pöllmann, N. Zouaoui, P. R. Andres, e C. Schaefer, «Synthesis and performance of methacrylic ester based polycarboxylate superplasticizers possessing hydroxy terminated poly(ethylene glycol) side chains», *Cem. Concr. Res.*, vol. 38, n. 10, pp. 1210–1216, 2008.
- [4] S. Grunewald, «Performance-based design of self-compacting fibre reinforced concrete», tese de doutoramento, Technische Universiteit Delft, 2004.
- [5] L. Ferrara e A. Meda, «Relationships between fibre distribution, workability and the mechanical properties of SFRC applied to precast roof elements», *Mater. Struct.*, vol. 39, pp. 411–420, 2006.
- [6] D. M. Roy, G. R. Gouda, e A. Bobrowsky, «Very high strength cement pastes prepared by hot pressing and other high pressure techniques», *Cem. Concr. Res.*, vol. 2, n. 3, pp. 349–366, Mai. 1972.
- [7] M. Yudenfreund, I. Odler, e S. Brunauer, «Hardened portland cement pastes of low porosity I. Materials and experimental methods», *Cem. Concr. Res.*, vol. 2, n. 3, pp. 313–330, Mai. 1972.
- [8] J. Resplendino, «Introduction: What is a UHPFRC?», em *Designing and Building with UHPFRC*, John Wiley & Sons, Inc., 2011, pp. 3–14.
- [9] G. Birelli, «UHPFRC Development: Review of a Determining Application», em *Designing and Building with UHPFRC*, John Wiley & Sons, Inc., 2011, pp. 21–42.
- [10] AFGC-Sétra, «Bétons fibres à ultra-hautes performances - Recommandations provisoires; Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concretes - Interim Recommendations», 2002.
- [11] Y. Uchida, Y. Tanaka, M. Katagiri, e J. Niwa, «Outlines of JSCE“ Recommendations for Design and Construction of Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete Structures (Draft)”, *Concr. J.*, n. March 2003, pp. 1–8, 2005.
- [12] JSCE, «Concrete Committee Newsletter No.9». [Em linha]. Disponível em: <http://www.jsce.or.jp/committee/concrete/e/newsletter/newsletter09/newsletter09.asp>. [Acedido: 04-Abr-2017].
- [13] «Dicionário da língua portuguesa». Porto Editora, Porto, 2009.
- [14] M. Elices e C. G. Rocco, «Effect of aggregate size on the fracture and mechanical properties of a simple concrete», *Eng. Fract. Mech.*, vol. 75, n. 13, pp. 3839–3851, 2008.
- [15] A. M. Brandt, «Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering», *Compos. Struct.*, vol. 86, n. 1–3, pp. 3–9, 2008.
- [16] D.-Y. Yoo e Y.-S. Yoon, «A Review on Structural Behavior, Design, and Application of Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete», *Int. J. Concr. Struct. Mater.*, vol. 10, n. 2, pp.

- 125–142, 2016.
- [17] P. Richard e M. Cheyrezy, «Composition of reactive powder concretes», *Cem. Concr. Res.*, vol. 25, n. 7, pp. 1501–1511, 1995.
- [18] H. H. Bache, «Densified cement ultra-fined partical-based materials», em *The Second International Conference on Superplasticizers in Concrete*, 1981.
- [19] B. A. Graybeal, «Material Property Characterization of Ultra-High Performance Concrete», n. FHWA-HRT-06-103, p. 186, 2006.
- [20] National Precast Concrete Association, «Ultra High Performance Concrete (Uhpcc) Guide To Manufacturing Architectural Guide To Manufacturing Architectural Precast UHPC Elements».
- [21] A. E. Naaman e K. Wille, «The Path to Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHP-FRC): Five Decades of Progress», *Proc. Hipermat 2012 3rd Int. Symp. UHPC Nanotechnol. High Perform. Constr. Mater.*, 2012.
- [22] P. Maca, J. Zatloukal, e P. Konvalinka, «Development of Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete Mixture», *2012 IEEE Symp. Business, Eng. Ind. Appl.*, vol. Bandung, pp. 861–866, 2012.
- [23] JSCE, «Recommendations for Design and Construction of Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete Structures (draft) Chapter 1», n. 1, pp. 1–4, 2006.
- [24] D. Y. Yoo, S. T. Kang, e Y. S. Yoon, «Effect of fiber length and placement method on flexural behavior, tension-softening curve, and fiber distribution characteristics of UHPFRC», *Constr. Build. Mater.*, vol. 64, pp. 67–81, 2014.
- [25] I. Markovic, «High-Performance Hybrid-Fibre Concrete», tese de doutoramento, Delft University Press, 2006.
- [26] L. F. Maya Duque e B. Graybeal, «Fiber orientation distribution and tensile mechanical response in UHPFRC», *Mater. Struct.*, vol. 50, n. 1, p. 55, 2017.
- [27] M. Bastien-Masse, E. Denarié, e E. Brühwiler, «Effect of fiber orientation on the in-plane tensile response of UHPFRC reinforcement layers», *Cem. Concr. Compos.*, vol. 67, pp. 111–125, 2016.
- [28] F. Ribeiro, M. Pimentel, e S. Nunes, «Caracterização da distribuição e orientação das fibras no UHPFRC», em *5as Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas*, 2014, p. 16.
- [29] L. Martinie, J.-F. Lataste, e N. Roussel, «Fiber orientation during casting of UHPFRC: electrical resistivity measurements, image analysis and numerical simulations», *Mater. Struct.*, vol. 48, n. 4, pp. 947–957, 2013.
- [30] S. J. Barnett, J.-F. Lataste, T. Parry, S. G. Millard, e M. N. Soutsos, «Assessment of fibre orientation in ultra high performance fibre reinforced concrete and its effect on flexural strength», *Mater. Struct.*, vol. 43, n. 7, pp. 1009–1023, 2010.
- [31] L. Ferrara *et al.*, «Structural elements made with highly flowable UHPFRC: Correlating computational fluid dynamics (CFD) predictions and non-destructive survey of fiber dispersion with failure modes», *Eng. Struct.*, vol. 133, pp. 151–171, 2017.
- [32] B. Zhou e Y. Uchida, «Influence of flowability, casting time and formwork geometry on fiber

- orientation and mechanical properties of UHPFRC», *Cem. Concr. Res.*, vol. 95, pp. 164–177, 2017.
- [33] S. Nunes, M. Pimentel, e A. Carvalho, «Engineered high performance fibre reinforced concrete materials : design , characterization and quality control; Parte 10 do relatório do projeto PTDC/ECM/122446/2010», 2015.
- [34] A. Abrishambaf e J. A. O. Barros, «Relation Between fibre Distribution and Post-Cracking Behaviour in Steel Fibre Reinforced Self-Compacting Concrete panels», *Cem. Concr. Res.*, vol. 51, pp. 1–37, 2013.
- [35] V. Mechtcherine, O. Millon, M. Butler, e K. Thoma, «Mechanical behaviour of strain hardening cement-based composites under impact loading», *Cem. Concr. Compos.*, vol. 33, n. 1, pp. 1–11, 2011.
- [36] D. Y. Yoo, N. Banthia, e Y. S. Yoon, «Predicting the flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete», *Cem. Concr. Compos.*, vol. 74, pp. 71–87, 2016.
- [37] S. T. Kang e J. K. Kim, «The relation between fiber orientation and tensile behavior in an ultra high performance fiber reinforced cementitious composites (UHPFRCC)», *Cem. Concr. Res.*, vol. 41, n. 10, pp. 1001–1014, 2011.
- [38] J. Liu, C. Li, J. Liu, G. Cui, e Z. Yang, «Study on 3D spatial distribution of steel fibers in fiber reinforced cementitious composites through micro-CT technique», *Constr. Build. Mater.*, vol. 48, pp. 656–661, 2013.
- [39] R. Sovják, P. Máca, e T. Imlauf, «Effect of fibre aspect ratio and fibre volume fraction on the effective fracture energy of ultra-high-performance fibre-reinforced concrete», *Acta Polytech.*, vol. 56, n. 4, pp. 319–327, 2016.
- [40] S. Nunes e M. Pimentel, «Characterization and comparison of two magnetic probes; relatório do projeto PTDC/ECM/122446/2010», 2016.
- [41] O. Tsioulou, A. Lampropoulos, e S. Paschalis, «Combined Non-Destructive Testing (NDT) method for the evaluation of the mechanical characteristics of Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC)», *Constr. Build. Mater.*, vol. 131, pp. 66–77, 2017.
- [42] A. E. Naaman, «Strain hardening and deflection hardening fiber reinforced cement composites», em *International Workshop High Performance Fiber Reinforced Cement Composites*, A. E. Naaman e H. W. Reinhardt, Eds. RILEM Publications, 2003, pp. 95–113.
- [43] C. M. Tam, V. W. Y. Tam, e K. M. Ng, «Assessing drying shrinkage and water permeability of reactive powder concrete produced in Hong Kong», *Constr. Build. Mater.*, vol. 26, n. 1, pp. 79–89, 2012.
- [44] H. Russel, G e B. a. Graybeal, «Ultra-High Performance Concrete : A State-of-the-Art Report for the Bridge Community», n. June, p. 171, 2013.
- [45] C. Dauriac, «Special concrete may give steel stiff competition», 1997. [Em linha]. Disponível em: <http://www.djc.com/special/concrete97/10024304.htm>. [Acedido: 27-Mar-2017].
- [46] P. Acker e F.-J. Ulm, «Nanoengineering UHPC Materials and Structures», *Ultra High Perform. Concr. Proc. Second Int. Symp. Ultra High Perform. Concr. Kassel, Ger. March 05-07, 2008*, pp. 3–10, 2008.
- [47] P. Mazzacane, R. Ricciotti, e G. Lamoureux, «Roofing of the stade Jean Bouin in UHPFRC»,

- RILEM-fib-AFGC Int. Symp. Ultra-High Perform. Fibre-Reinforced Concr. UHPFRC 2013*, n. October, pp. 59–68, 2013.
- [48] P. Mazzacane, R. Ricciotti, F. Teply, E. Tollini, e D. Corvez, «MUCEM : The builder's perspective», *RILEM-fib-AFGC Int. Symp. Ultra-High Perform. Fibre-Reinforced Concr. UHPFRC 2013*, n. October, pp. 3–16, 2013.
- [49] R. Ricciotti, G. Lamoureux, e R. Ricciotti, «The Jean Bouin Stadium», *Des. Build. with UHPFRC*, pp. 101–108, 2011.
- [50] M. Denet, «Abords du Stade Jean-Bouin avant les finales de la Coupe du Monde 2014». [Em linha]. Disponível em: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e3/Abords_du_Stade_Jean-Bouin_avant_les_finales_de_la_Coupe_du_Monde_2014.jpg. [Acedido: 12-Jun-2017].
- [51] «Mucem — The Mucem». [Em linha]. Disponível em: <http://www.mucem.org/en/the-mucem>. [Acedido: 26-Mai-2017].
- [52] T. C. Corporation e T. Corporation, «Durability Study of the First Pc Bridge Constructed With Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete», *RILEM-fib-AFGC Int. Symp. Ultra-High Perform. Fibre-Reinforced Concr.*, pp. 239–248, 2013.
- [53] S. Nunes, F. Ribeiro, A. Carvalho, M. Pimentel, E. Brühwiler, e M. Bastien-Masse, «Non-destructive measurements to evaluate fiber dispersion and content in UHPFRC reinforcement layers», em *Multi-Span Large Bridges: International Conference on Multi-Span Large Bridges*, 2015, pp. 1001–1008.
- [54] H. Musha, H. Ohkuma, e T. Kitamura, «Innovative Ufc Structures in Japan», *RILEM-fib-AFGC Int. Symp. Ultra-High Perform. Fibre-Reinforced Concr. UHPFRC 2013*, n. 1, pp. 17–26, 2013.
- [55] S. Hock e H. Weiher, «UHPFRC Anchor Plates and First Application for Strengthening a Rhine Lock», *RILEM-fib-AFGC Int. Symp. Ultra-High Perform. Fibre-Reinforced Concr. UHPFRC 2013*, n. 1, pp. 471–478, 2013.
- [56] H. Weiher, C. Tritschler, M. Glassl, e S. Hock, «Hybridanker aus UHPC - Erstanwendung bei der Verstärkung der Rheinschleuse Iffezheim mit Dauerlitzentankern», *Beton- und Stahlbetonbau*, vol. 107, n. 4, pp. 236–243, 2012.
- [57] M. Rebentrost e G. Wight, «Investigation of UHPFRC Slabs under Blast Loads», *Des. Build. with UHPFRC*, pp. 363–376, 2011.
- [58] M. Rebentrost e G. Wight, «Perspective on UHPCs from a Specialist Construction Company», *Des. Build. with UHPFRC*, pp. 189–208, 2011.
- [59] S. J. Barnett, S. G. Millard, G. K. Schleyer, e A. Tyas, «Blast tests of fibre-reinforced concrete panels», *Proc. ICE - Constr. Mater.*, vol. 163, n. 3, pp. 127–129, 2010.
- [60] F. de Larrard, «The High Performance Cementitious Material (HPCM), a Cousin of UHPFRC for Long-life Pavement», *Des. Build. with UHPFRC*, pp. 437–446, 2011.
- [61] F. De Larrard, O. Garcin, F. Hammoum, e F. Travers, «Essais préliminaires d'un enduit hydraulique pour couche de roulement à longue durée de vie», *Bull. DES Lab. DES PONTS CHAUSSÉES*, vol. 258–259, pp. 121–128, 2005.
- [62] C. Gu, S. Zhao, W. Sun, e Q. Wang, «Production of Precast Uhpfrc Pavement Cover Plates in

- High-Speed Railway Construction», *RILEM-fib-AFGC Int. Symp. Ultra-High Perform. Fibre-Reinforced Concr. UHPFRC 2013*, n. 1, pp. 463–470, 2013.
- [63] F.-X. Jammes, X. Cespedes, e J. Resplendino, «Design of Offshore Wind Turbines», *RILEM-fib-AFGC Int. Symp. Ultra-High Perform. Fibre-Reinforced Concr. UHPFRC 2013*, n. 1, pp. 443–452, 2013.
- [64] E. Denarié, D. Jacomo, N. Fady, e D. Corvez, «Rejuvenation of Maritime Signalisation Structures With UHPFRC», *RILEM-fib-AFGC Int. Symp. Ultra-High Perform. Fibre-Reinforced Concr.*, n. 1, pp. 1–10, 2013.
- [65] L. Guingot, D. Dekhil, e P. Soulier, «Strengthening of Hydraulic Structures With UHPC», *RILEM-fib-AFGC Int. Symp. Ultra-High Perform. Fibre-Reinforced Concr.*, n. 1, pp. 137–146, 2013.
- [66] G. Delplace *et al.*, «Precast Thin UHPFRC Curved Shells in a Waste Water Treatment Plant», *RILEM-fib-AFGC Int. Symp. Ultra-High Perform. Fibre-Reinforced Concr.*, n. 1, pp. 49–58, 2013.
- [67] V. M. Malhotra, «Surface Hardness Methods», em *Handbook on Nondestructive Testing of Concrete*, 2004.
- [68] V. M. Malhotra e G. G. Carette, «Penetration Resistance Methods», em *Handbook on Nondestructive Testing of Concrete*, 2004.
- [69] G. D. Henderson, P. A. M. Basheer, e A. E. Long, «Pull-Off Test and Permeation Tests», em *Handbook on Nondestructive Testing of Concrete*, 2004.
- [70] T. R. Naik, «The Break-off Test Method», em *Handbook on Nondestructive Testing of Concrete*, p. 2004.
- [71] N. J. Carino, «Pullout test», em *Handbook on Nondestructive Testing of Concrete*, 2004.
- [72] N. J. Carino, «Methods to Evaluate Corrosion of Reinforcement», em *Handbook on Nondestructive Testing of Concrete*, 2004.
- [73] V. M. Malhotra e N. J. Carino, *Handbook on Nondestructive Testing of Concrete*. 2004.
- [74] The Editors of Encyclopædia Britannica, «electrical impedance | physics | Britannica.com». [Em linha]. Disponível em: <https://www.britannica.com/science/electrical-impedance>. [Acedido: 30-Mai-2017].
- [75] The Editors of Encyclopædia Britannica, «inductance | electronics | Britannica.com». [Em linha]. Disponível em: <https://www.britannica.com/science/inductance>. [Acedido: 30-Mai-2017].
- [76] «magnetic circuit | electronics | Britannica.com». [Em linha]. Disponível em: <https://www.britannica.com/science/magnetic-circuit#ref235762>. [Acedido: 10-Ago-2017].
- [77] S. Korl, C. Wuersch, e J. Zanona, «Nondestructive Testing of Materials and Structures: Proceedings of NDTMS-2011, Istanbul, Turkey, May 15-18, 2011», *RILEM Bookseries*, vol. 6, pp. 131–136, 2012.
- [78] A. Binder e R. Golder, «Inductive sensor arrangement and method for detecting ferrous objects», EP1092988A1, 2001.

- [79] A. Binder e R. Golder, «Inductive sensor arrangement and method for detecting ferrous objects», EP1298457A1, 2003.
- [80] S. Nunes e C. Costa, «Numerical optimization of self-compacting mortar mixture containing spent equilibrium catalyst from oil refinery», *J. Clean. Prod.*, vol. 158, pp. 109–121, 2017.
- [81] «random number generator - Pesquisa Google». [Em linha]. Disponível em: <https://www.google.pt/search?q=random+number+generator&oq=random+&aqs=chrome.1.69i57j0i5.6915j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8>. [Acedido: 08-Jun-2017].
- [82] M. di Prisco, L. Ferrara, e M. G. L. Lamperti, «Double edge wedge splitting (DEWS): an indirect tension test to identify post-cracking behaviour of fibre reinforced cementitious composites», *Mater. Struct.*, vol. 46, n. 11, pp. 1893–1918, 2013.
- [83] T. Guénet *et al.*, «Analysis of a UHPFRC Footbridge With a Deck Slab Under Bending By a Novel Fracture-Micromechanics Fem Model», em *RILEM-fib-AFGC Int. Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete*, 2013, n. November, pp. 519–528.