

ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVOS PARA A CARACTERIZAÇÃO DE BETÕES DE ELEVADO DESEMPENHO REFORÇADO COM FIBRAS

CRISTIANA REGINA PINHO SOARES

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

Orientadora: Professora Doutora Sandra da Conceição Barbosa Nunes

JUNHO DE 2013

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2012/2013

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 - 2012/2013 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2013.*

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.

Ao Pedro
Aos meus Avós maternos

AGRADECIMENTOS

Agradeço especialmente à minha orientadora Sandra Nunes por toda a disponibilidade prestada durante o decorrer desta dissertação. O seu empenho, a sua dedicação, a sua compreensão, o seu entusiasmo e a sua determinação é algo que admiro e admirei desde o meu segundo ano de Faculdade.

A toda a equipa de laboratório, em especial à Paula Silva o meu muito obrigado por me ter recebido tão bem no laboratório e por todos os ensinamentos prestados durante e após a fase laboratorial.

Agradeço também ao Hugo Caetano pelo companheirismo, pela ajuda e pela partilha de ideias em toda a fase da dissertação, principalmente na fase laboratorial.

Quero prestar o meu agradecimento aos técnicos do laboratório de eletrónica e controlo de potência e em especial ao Professor Adriano Carvalho pela constante ajuda e preocupação na conceção de um equipamento essencial ao desenvolvimento desta dissertação.

A toda a equipa do projeto em que a minha tese se inseriu que de alguma forma me ajudaram e que sempre mostraram disponibilidade para o fazer, em especial o Filipe Ribeiro, Diogo Azevedo, João Rio o meu muito obrigado.

Aos meus avós, principalmente aos meus avós maternos, o meu muito obrigado por todos os valores transmitidos e por acreditarem em mim nesta caminhada, a eles dedico todo o meu empenho e todas as minhas vitórias.

Por último agradeço ao António Pedro Oliveira pela compreensão e pelo orgulho que sempre depositou em mim, o que fez com que eu fizesse mais e melhor: Muito Obrigado.

RESUMO

O betão é o material mais utilizado na engenharia estrutural em todo o mundo. No entanto, o betão simples apresenta-se como um material frágil, com baixa resistência à tração e ductilidade reduzida. Assim o aparecimento da armadura revolucionou as características do betão, apresentando-se com características apropriadas para dar resposta a forças de tração.

O betão de elevado desempenho reforçado com fibras (HPFRC) é um material novo na construção e apresenta propriedades distintas do betão convencional, nomeadamente, elevada resistência e durabilidade [9]. A orientação e o volume de fibras utilizadas nas composições do HPFRC influenciam significativamente o desempenho mecânico do material, nomeadamente, no que diz respeito ao aumento da tensão após a abertura da primeira fenda. Este comportamento, verificado pela existência de fibras, é semelhante ao comportamento do betão armado capaz de absorver as tensões até ao limite de resistência do aço [76]. É de esperar que a orientação das fibras segundo a direção das tensões principais de tração conduza a resistências de tração mais elevadas devido à maior eficiência das fibras durante o processo de tração. A presença de fibras neste material faz com que o material possua uma maior energia de fratura e portanto uma maior ductilidade [5].

Os métodos de ensaio para avaliação da integridade das estruturas e das propriedades mecânicas durante a sua construção e/ou ciclo de vida têm sofrido avanços significativos, e dividem-se maioritariamente em dois grandes grupos: ensaios destrutivos e ensaios não destrutivos (NDT's). No passado, os NDT's eram utilizados principalmente para a determinação das propriedades elásticas do meio. Nos dias de hoje, estes métodos, para além das propriedades elásticas, são utilizados também com o intuito de estimar a qualidade e as propriedades mecânicas das estruturas de betão. O estudo laboratorial iniciou-se com a elaboração de um equipamento que permite a orientação das fibras no interior da mistura através de um campo magnético. Pretende-se avaliar a evolução ao longo do tempo do betão com fibras, a influência da percentagem de fibras e a influência da orientação das fibras através de ensaios não-destrutivos: resistividade elétrica, ondas ultrassons e indutância.

Pretende-se ainda avaliar o aumento da força no ensaio de flexão, resistência à compressão e a resistência à tração através do ensaio Double-Edge Wedge Splitting Test (DEWST) devido à orientação e à percentagem de fibras confrontando estes resultados com os resultados dos ensaios não-destrutivos.

A partir dos ensaios não-destrutivos mencionados anteriormente foi possível identificar quais os melhores ensaios para avaliar a orientação e a percentagem de fibras numa mistura. No que diz respeito aos ensaios destrutivos avaliou-se qual a melhor orientação e percentagem de fibras que leva a uma maior resistência.

PALAVRAS-CHAVE: HPFRC, orientação das fibras, percentagem de fibras, ensaios não-destrutivos, DEWST.

ABSTRACT

Concrete is the most common material used in structural engineering in the world. However, the plain concrete presents itself as a weak material with low tensile strength and reduced ductility. Reinforcement revolutionized the concrete behavior exhibiting appropriate characteristics to respond to tensile forces.

The high performance fibre reinforced concrete (HPFRC) is a new material in construction and has distinct properties from conventional concrete, in particular, high strength and durability [9]. Test methods for assessing the integrity of structures and mechanical properties during their construction and / or life cycle have suffered significant advances and are divided mainly into two major groups: destructive testing and nondestructive testing (NDT's). In the past, NDT's were mainly used for determining the elastic properties of the materials. Today, in addition to the elastic properties these methods are also used in order to estimate the quality and mechanical properties of concrete.

The direction and amount of fibers used in the compositions of HPFRC influence significantly the mechanical performance of the material, in particular the tensile behavior after the opening of the first crack. This behavior, observed due to by the presence of fibers, is similar to the behavior of reinforced concrete, which is able to absorb the stresses up to the steel tensile strength [76]. It is expected that the fiber orientation, according to the direction of principal tensile stress, leads to higher tensile strength due to higher efficiency of the fiber during the fracture process. The presence of fibers in this material increases the energy absorption and therefore increases its ductility [5].

The laboratory study started with the elaboration of a device that allows the orientation of the fibers within the concrete by a magnetic field. The objective is the evaluation of the concrete properties over the time as well as the influence of the fiber percentage and the influence of fiber orientation through non-destructive testing: electrical resistivity, ultrasonic waves and inductance.

Another objective is the evaluation of the increase of bending strength, compressive strength and tensile strength variation by Double-Edge Wedge Splitting Test (DEWST) due to the orientation and the percentage of fibers through destructive tests. Through of the non-destructive tests mentioned above it was possible to identify the most adequate test to evaluate the orientation and optimum fiber percentage to achieve a greater strength.

KEYWORDS: HPFRC, fiber orientation, fiber percentage, nondestructive testing, DEWST.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ÂMBITO E OBJETIVOS DO TRABALHO	1
1.2. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	2
2. BETÃO DE ELEVADO DESEMPENHO REFORÇADO COM FIBRAS	3
2.1. INTRODUÇÃO	4
2.2. COMPOSIÇÃO DO HPFRC	4
2.2.1. COMPARAÇÃO ENTRE DIFERENTES COMPOSIÇÕES DE BETÃO	5
2.2.2. MATRIZ DO BETÃO.....	7
2.3. COMPORTAMENTO NO ESTADO FRESCO DO HPFRC	13
2.4. COMPORTAMENTO NO ESTADO ENDURECIDO DO HPFRC	14
2.4.1. AÇÃO DAS FIBRAS DURANTE O PROCESSO DE TRAÇÃO	15
2.4.2. DISPERSÃO E ORIENTAÇÃO DAS FIBRAS	18
2.4.3. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO À TRAÇÃO DO BETÃO	23
2.5. DURABILIDADE DO HPFRC	26
2.5.1. MÉTODO DE INTRUSÃO DE MERCÚRIO.....	26
2.5.2. RESISTÊNCIA AO ATAQUE QUÍMICO.....	28
2.6. APLICAÇÕES DO HPC	30
3. ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVOS (NDT's)	35
3.1. INTRODUÇÃO	37
3.2. RESISTIVIDADE ELÉTRICA	37
3.2.1. FUNDAMENTOS FÍSICOS	37
3.2.2. MÉTODOS DE ENSAIO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA	39
3.2.2.1. Um único eléctrodo externo.....	40
3.2.2.2. Método dos dois eléctrodos.....	40

3.2.2.3. Método dos quatro elérodos – Método de Wenner	42
3.2.2.3.1. Restrições geométricas	43
3.2.2.3.2. Heterogeneidade do betão	44
3.2.2.3.3. Superfície de contacto	44
3.2.2.3.4. Camadas superficiais com resistividades distinta.....	44
3.2.2.3.5. Presença de armadura	45
3.2.2.3.6. Variações das condições ambientais	46
3.3. ENSAIOS DE ULTRASSONS (UPV)	47
3.3.1. FUNDAMENTOS FÍSICOS	47
3.3.2. LOCALIZAÇÃO DOS TRANSDUTORES	50
3.3.3. PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM OS UPV	52
3.3.4. ESTUDO REALIZADO POR GLAUBITT E MIDDENDORF	54
3.4. INDUTÂNCIA	56
4. PROGRAMA EXPERIMENTAL	61
4.1. INTRODUÇÃO	61
4.2. CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS	61
4.2.1. CIMENTO	62
4.2.2. SÍLICA DE FUMO	63
4.2.3. FÍLER DE CALCÁRIO	64
4.2.4. AREIA FINA	65
4.2.5. SUPERPLASTIFICANTE	65
4.2.6. FIBRAS	66
4.3. ORIENTAÇÃO DAS FIBRAS	67
4.3.1. NOÇÕES DE MAGNETISMO E ELETRICIDADE	67
4.3.2. CONSTRUÇÃO DO EQUIPAMENTO	69
4.3.3. VALIDAÇÃO DO EQUIPAMENTO	70
4.4. PROCEDIMENTOS DE AMASSADURA E BETONAGEM	72
4.5. RESISTIVIDADE	77
4.5.1. MÉTODO DOS DOIS ELÉTODOS	77
4.5.2. TROCA DE MULTÍMETROS.....	80
4.5.3. MÉTODO DOS QUATRO ELÉTODOS	83
4.6. ULTRASSONS	84

4.6.1. TRANSMISSÃO INDIRETA	85
4.6.2. TRANSMISSÃO DIRETA	87
4.7. INDUTÂNCIA	88
4.8. MASSA VOLÚMICA	91
4.9. ENSAIOS DESTRUTIVOS.....	92
4.9.1. DEWST	92
4.9.2. ENSAIOS DE TRAÇÃO POR FLEXÃO E DE COMPRESSÃO DOS PRISMAS	95
5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS.....	97
5.1. INTRODUÇÃO	97
5.2. EVOLUÇÃO COM A IDADE.....	98
5.2.1. RESISTIVIDADE ELÉTRICA.....	96
5.2.2. ULTRASSONS	103
5.2.3. PERMEABILIDADE MAGNÉTICA	105
5.3. INFLUÊNCIA DA DOSAGEM DE FIBRAS.....	106
5.3.1. RESISTIVIDADE ELÉTRICA.....	106
5.3.2. ULTRASSONS	107
5.3.3. PERMEABILIDADE MAGNÉTICA	108
5.3.4. MASSA VOLÚMICA	109
5.3.5. ENSAIO À TRAÇÃO POR FLEXÃO DOS PRISMAS	109
5.3.6. ENSAIO À COMPRESSÃO DOS PRISMAS	111
5.3.7. ENSAIO DEWST DAS PLACAS	112
5.4. INFLUÊNCIA DA ORIENTAÇÃO DAS FIBRAS	113
5.4.1. RESISTIVIDADE ELÉTRICA.....	113
5.4.2. ULTRASSONS	114
5.4.3. PERMEABILIDADE MAGNÉTICA	114
5.4.4. ENSAIO À TRAÇÃO POR FLEXÃO DOS PRISMAS	115
5.4.5. ENSAIO À COMPRESSÃO DOS PRISMAS	116
5.4.6. ENSAIO DEWST DAS PLACAS	117
5.5. CORRELAÇÃO ENTRE RESULTADOS	117
5.5.1. RESISTIVIDADE ELÉTRICA.....	117
5.5.2. ULTRASSONS	121
5.5.3. PERMEABILIDADE MAGNÉTICA	122

5.5.4. TENSÃO TRAÇÃO DE PICO E ÁREA ABAIXO DO DIAGRAMA - DEWST.....	123
5.5.5. ENSAIO DEWST E O ENSAIO DE INDUTÂNCIA	123
5.5.6. ENSAIO DEWST NAS PLACAS E O ENSAIO DE FLEXÃO NOS PRISMAS.....	124
6. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	127
6.1. CONCLUSÕES	127
6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	128

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Família dos betões reforçados com fibras.....	4
Figura 2 Exemplo das proporções na mistura em volume comparando UHPFRC com betão normal (NC) [20].....	5
Figura 3 Diagramas tensão/extensão em compressão de betões HPC, NC e UHPFRC [45].....	5
Figura 4 Exemplo das proporções de uma mistura UHPFRC [50].....	6
Figura 5 Composição do betão HPFRC.....	6
Figura 6 Materiais utilizados nas misturas desenvolvidas e características particulares [20]	7
Figura 7 Relação típica entre água/cimento e a resistência à compressão de um betão com cimento Portland [39]	8
Figura 8 Resistência à compressão de HPC [39].....	8
Figura 9 Curva granulométrica do cimento (CEM I 52.5) e do fíler de calcário [38].....	9
Figura 10 Comparação de curvas granulométricas do cimento Portland, cinza volante calcária e sílica de fumo [33].....	10
Figura 11 Distribuição granulométrica de ultrafinos [41].....	11
Figura 12 Resistência à compressão de UHPC para idades 28 e 90 dias [41]	11
Figura 13 Efeito da sílica de fumo e metacaulino na fendilhação devido à retração restringida; w/cm = 0.35; Control II (sem aditivos); MK5 (5% metacaulino); MK15 (15% metacaulino); SF5 (5% sílica de fumo) SF15 (15% sílica de fumo) [44].....	12
Figura 14 Representação esquemática da secção transversal de um grão de cimento [47]	13
Figura 15 Auto-compactabilidade betão. a) camada de pasta que envolve cada grão de agregado. b) Fissura colmatada pelas fibras. c) Empacotamento ideal onde cada grão pequeno preenche espaços maiores provocados pelos grãos maiores.....	14
Figura 16 Diagramas típicos de comportamento. a) Com amolecimento. b) Com endurecimento [49]	15
Figura 17 Diferentes tipos de fibras com as dimensões correspondentes; l/d (comprimento da fibras (mm)/ diâmetro das fibras (mm)) [27].....	16
Figura 18 Comportamento do betão com diferentes tipos de fibras a) Influência das fibras curtas na controlo das microfissuras e aumento da tensão de tração; b) Influência das fibras longas na controlo das microfissuras e aumento da ductilidade [27].	17
Figura 19 a) Secção transversal da fibra, da zona de interface com poros, com os cristais de hidróxido de cálcio e a matriz de betão; b) Resultados dos testes de dureza na zona à volta do betão, para diferentes razões água/cimento. [27].....	18
Figura 20 Preparação do provete. a) colocação do material paralelo à direção longitudinal do provete (PL). b) colocação do material transversalmente à direção longitudinal do provete (TL) (nota: o material foi colocado pela ordem mencionada na figura) [30].....	19
Figura 21 Equipamento para o ensaio de flexão [30]	19

Figura 22 a) Diagrama do ensaio de flexão até abertura da primeira fenda nos dois tipos de provetes com fibras b) diagrama total do ensaio de flexão PL-material depositado longitudinalmente TL-material depositado transversalmente [30]	19
Figura 23 Três planos de corte [30].....	20
Figura 24 Fotografias para as duas direções de colocação do betão e as três direções de corte dos provetes [30].....	20
Figura 25 Relação entre o ângulo de inclinação da fibra com a densidade de empacotamento.....	22
Figura 26 Diversos esquemas de ensaios para avaliar a resistência à tração (b), c), e) e f)) e à flexão (a) e d)) [27].....	23
Figura 27 Esquema do ensaio de flexão por 4 pontos [52]	24
Figura 28 a) Ensaio de Wedge Splitting Test [53]. b) analogia entre o ensaio Wedge Splitting Test e o ensaio de flexão por três pontos com entalhe [55].....	25
Figura 29 a) Ensaio Double-Edge Wedge Splitting Test [55]. b) Analogia entre o ensaio Double-Edge Splitting Test e o ensaio de tração direto [55].....	25
Figura 30 Transformação da força aplicada vertical na força de tração.....	25
Figura 31 Equipamento utilizado para a determinação do coeficiente de atrito [55].....	25
Figura 32 a) Distribuição do tamanho dos poros $dV/d\log r$ (V – Volume dos poros, r – Raio dos poros). b) Porosidade do betão UHP, UHPCn.f. e UHPC90°	27
Figura 33 Microestrutura do betão fendilhado. a) UHPC n.f. b) UHPC90°).....	28
Figura 34 Zona de interface entre a pasta de cimento e as fibras. a) UHPC. b) UHPC90°C.....	28
Figura 35 Relação entre a profundidade de penetração e o teor de cloretos nas amostras [25]	29
Figura 36 Carbonatação do UHPC na vizinhança da fibra localizada perto da superfície (fatia exposta por um período de 6 meses); a linha a tracejado representa o limite da fatia e as setas a direção de ataque do CO ₂)	29
Figura 37 Ponte pedestre em Sherbrooke no Canadá. a) Vista completa. b) Pormenores [22].....	30
Figura 38 Cobertura das portagens de Millau [57]	31
Figura 39 Secção transversal da ponte The PS34 [57]	31
Figura 40 Estádio Jean-Bouin, Paris [49].....	31
Figura 41 a) Painéis de fachada [80]. b) Pormenorização de um painel [49].....	31
Figura 42 Vista de cima da construção do aeroporto Haden [57]	32
Figura 43 Canal, vista do aqueduto [57].....	33
Figura 44 Secção transversal tipo do túnel [56]	33
Figura 45 Transporte dos elementos pré-fabricados [56].....	33
Figura 46 Reparação e proteção das fundações e dos pilares do viaduto The Valabres [57]	34
Figura 47 Medição da resistividade com equipamento de quatro sondas [58].....	36
Figura 48 Equipamento utilizado para a medição dos ensaios UPV. [60].....	36

Figura 49 Equipamento utilizado para o ensaio de indutância [60].....	37
Figura 50 Evolução da resistividade com o tempo de um betão reforçado com fibras [68]	39
Figura 51 Esquema de ensaio com um único eléctrodo externo para avaliar a resistividade [63]	40
Figura 52 Métodos dos dois eléctrodos. a) Método dos dois eléctrodos embebidos [79]. b) Método dos dois eléctrodos exteriores [62]	41
Figura 53 Efeito da área de superfície de contacto na medição da resistividade [65]	42
Figura 54 Método dos quatro eléctrodos, adaptado [60].....	43
Figura 55 Efeito das dimensões da secção de betão nos resultados de resistividade [65].....	44
Figura 56 Efeito de bordo e da proximidade do extremo nos resultados de resistividade [65].....	44
Figura 57 Utilização de imagem X-ray CT para a avaliação da orientação das fibras; o eixo vertical entra-se para dentro ou fora do plano de imagem [58].....	45
Figura 58 Relação entre a resistividade e a temperatura do ar [65].....	46
Figura 59 Recomendações para a realização do ensaio dos quatro eléctrodos [65]	46
Figura 60 Três tipos de ondas geradas por um transdutor [73]	48
Figura 61 Ondas de Rayleigh [75]	48
Figura 62 Esquema do ensaio de ultrassons [60]	49
Figura 63 Exemplo de uma transmissão e corresponde recepção de um sinal transmitido pelo método indireto num bloco de granito [74].....	50
Figura 64 Tipos de leituras: a) directa; b) semidirecta; c) indirecta [10].....	50
Figura 65 Localização do transmissor/Recetor [10]	51
Figura 66 Gráfico: Distância percorrida/tempo de transmissão da onda	51
Figura 67 Evolução nas primeiras horas da velocidade das ondas ultrassons, da percentagem de poros e sólidos e a ligação entre partículas [70]	53
Figura 68 Evolução da velocidade ao longo do tempo para diferentes razões água/cimento [71].....	53
Figura 69 Efeito da temperatura no processo de cura nos UPV [72]	53
Figura 70 Efeito das fibras na velocidade de propagação dos ultrassons [72].....	53
Figura 71 Corte dos cilindros em estudo. As partículas brancas representam os poros existentes na estrutura; Esquerda: CYL1 (sem fibras); Direita: CYL2 (com fibras).....	54
Figura 72 Principio de funcionamento do método de indutância com o intuito de localizar armadura [60]	56
Figura 73 Sonda Magnética [69].....	57
Figura 74 Circuito magnético da sonda na medição da permeabilidade do betão com fibras [69].....	57
Figura 75 Simulação da densidade de fluxo magnético [69].....	58
Figura 76 Valores de indutância compensada medidos em diferentes direcções [69]	59

Figura 77 CEM I 42.5R observado num microscópio eletrónico de varrimento com uma ampliação de 2000 x	63
Figura 78 Sílica de Fumo observada num microscópio eletrónico de varrimento com uma ampliação de 50000 x.....	63
Figura 79 Distribuição granulométrica do Fíler de Calcário: distribuição granulométrica em volume de partículas e distribuição do volume de partículas acumuladas	64
Figura 80 Fíler de Calcário observado num microscópio eletrónico de varrimento com uma ampliação de 2000 x.....	65
Figura 81 Distribuição granulométrica da areia final	65
Figura 82 Diagrama tensão-abertura de fendas para as fibras orientadas favoravelmente (direção 0°) e para orientações desfavoráveis [55].....	67
Figura 83 O condutor: (a) sem circulação de corrente, (b) com circulação de corrente e o campo magnético resultante [7].....	68
Figura 84 Campo magnético numa espira [7]	69
Figura 85 Bobine envolvida num núcleo magnético [7]	69
Figura 86 Construção de uma das bobines do equipamento	69
Figura 87 Primeira camada de fio de cobre numa das bobines.....	69
Figura 88 Constituição do equipamento utilizado para a orientação das fibras.....	70
Figura 89 Ensaio realizado apenas com fibras	70
Figura 90 Camara de vácuo.....	71
Figura 91 Provete de silicone vista de cima.....	71
Figura 92 Provete de silicone vista lateral	71
Figura 93 Cofragem de uma placa 304x150x25 mm ³ e de 3 prismas 160x40x40 mm ³	72
Figura 94 Ensaio de espalhamento para a mistura com 3% de fibras	73
Figura 95 Materiais utilizados na amassadura	73
Figura 96 Misturadora utilizada na amassadura	74
Figura 97 Esquema ilustrativo do procedimento de amassadura	74
Figura 98 Linhas de campo geradas pelo equipamento.....	75
Figura 99 Betonagem de uma placa e prisma para a obtenção de fibras sem orientação	76
Figura 100 Betonagem de uma placa e prisma para a obtenção de fibras com orientação a 0°	76
Figura 101 Betonagem de uma placa e prisma para obtenção de fibras com orientação a 90°	76
Figura 102 Prisma com redes embebidas em duas faces opostas. Resistividade medida na direção 0°.....	77
Figura 103 Resistividade elétrica pelo método dos dois eléctrodos exteriores medida a 0°.....	77
Figura 104 Resistividade elétrica pelo método dos dois eléctrodos exteriores medida a 90°.....	77

Figura 105 Montagem do circuito elétrico	78
Figura 106 Esquema ilustrativo do esquema elétrico e os seus intervenientes.....	78
Figura 107 Dimensões das cunhas (m)	80
Figura 108 Gerador de sinal.....	80
Figura 109 Multímetros utilizados para avaliação da diferença de potencial e da intensidade de corrente	80
Figura 110 Onda transmitida pelo gerador de sinal.....	81
Figura 111 Resistividade medida pelo método dos dois elétrodos na placa sem fibras	82
Figura 112 Correção dos valores registados pela Combinação 1.....	83
Figura 113 Recomendações para a realização do ensaio dos quatro elétrodos	84
Figura 114 Comparação entre as recomendações e o estudo realizado	84
Figura 115 Equipamento de ensaios de UPV utilizado.....	84
Figura 116 Ensaio de ultrassons por transmissão indireta	85
Figura 117 Posições dos transdutores para medição de ultrassons pelo método indireto.....	85
Figura 118 Relação entre a distância entre transdutores e o tempo de propagação da onda	86
Figura 119 Ondas transmitidas pelo transdutor e visualizadas no osciloscópio	87
Figura 120 Descrição das 4 posições dos transdutores nas placas para avaliar a transmissão direta	87
Figura 121 Transmissão direta num prisma (direção de medição a 0°)	88
Figura 122 Transmissão direta numa placa (direção de medição a 0°)	88
Figura 123 Transmissão direta numa placa (direção de medição a 90°)	88
Figura 124 a) Equipamento para a medição da permeabilidade magnética, ponte de medida RLC; b) sonda utilizada.....	90
Figura 125 Posicionamento da sonda. a) zona 1 e direção 0°. b) zona 2 e direção 90°.....	90
Figura 126 a) Equipamento para medir a massa volúmica. b) Balança com provete. b) Provete em suspensão num recipiente com água	92
Figura 127 Serragem das placas. a) A placa antes da serragem (304x150x25 mm ³). b) As duas placas depois da serragem (150x150x25 mm ³). c) Equipamento de serragem	93
Figura 128 Pormenor do contacto entre o varão de aço e as chapas de aço	94
Figura 129 Transformação da força vertical aplicada na força de tração.....	94
Figura 130 Realização do ensaio DEWST.....	94
Figura 131 Ensaio à tração por flexão de um prisma e as dimensões associadas.....	96
Figura 132 Equipamento utilizado para os três tipos de ensaios destrutivos estudados	96
Figura 133 Medição da resistividade método dos dois elétrodos embebidos num prisma (ensaio realizado na direção 0°)	98

Figura 134 Evolução da resistividade elétrica nos prismas com a idade (ensaio realizado na direção 0°).....	99
Figura 135 Evolução da resistividade elétrica nos prismas com a idade. Prismas com valores de resistividade mais baixos	99
Figura 136 Medição da resistividade método dos dois eléttodos exteriores numa placa na direção 0°	100
Figura 137 Evolução da resistividade elétrica das placas com a idade determinada pelo método dos dois eléttodos na direção 0°	100
Figura 138 Evolução da Resistividade elétrica nas placas com a idade determinada pelo método dos dois eléttodos na direção 0°. Placas com valores de resistividade mais baixos.....	101
Figura 139 Medição da resistividade método dos quatro eléttodos numa placa na direção 0° na zona 1	101
Figura 140 Evolução da resistividade nas placas com a idade. Medições realizadas pelo método dos quatro eléttodos na zona 1 na direção 0°	102
Figura 141 Evolução da resistividade nas placas com a idade determinada pelo método dos quatro eléttodos na zona 1 na direção 0°. Placas com valores de resistividade mais baixos.....	102
Figura 142 Método dos ultrassons com transmissão direta num prisma na direção 0°	103
Figura 143 Evolução da velocidade de propagação de ondas ultrassons nos prismas com a idade determinada por transmissão direta na direção 0°	103
Figura 144 Método dos ultrassons com transmissão indireta numa placa na direção 0°. a) esquema onde ilustra o posicionamento dos transdutores para a medição na direção 0° na zona 1 (posição 10) e na zona 2 (posição 12). b) ensaio realizado na posição 10.	104
Figura 145 Evolução da velocidade de propagação de ondas ultrassons nas placas com a idade determinada por transmissão indireta com transdutores na posição 10	104
Figura 146 Ensaio realizado para medir a permeabilidade magnética com a sonda na direção 0° e na zona 1	105
Figura 147 Evolução da permeabilidade nas placas com a idade na zona 1 na direção 0°	105
Figura 148 Relação entre a resistividade elétrica medida nos prismas e a percentagem de fibras ...	106
Figura 149 Relação entre a velocidade de propagação dos ultrassons medida nas placas a 0° com a percentagem de fibras	107
Figura 150 Relação entre a permeabilidade magnética medida a 0° com a percentagem de fibras..	108
Figura 151 Relação entre a massa volúmica com a percentagem de fibras	109
Figura 152 Relação entre a resistência de pico à tração por flexão com a percentagem de fibras ...	110
Figura 153 Ensaio à tração por flexão de um prisma com fibras orientadas a 0°	110
Figura 154 Relação entre a resistência à compressão dos prismas com a percentagem de fibras...	111
Figura 155 Relação entre a tensão de tração máxima e a percentagem de fibras.....	112
Figura 156 Placa com 3% de fibras orientadas a 0° depois de submetida ao ensaio DEWST	112

Figura 157 Relação da resistividade medida na direção 0° e 90°	113
Figura 158 Relação entre a velocidade de propagação de onda ultrassons nas placas medida na direção 0° e medida na direção 90°	114
Figura 159 Relação entre a permeabilidade magnética nas placas medida na direção 0° e medida na direção 90°	115
Figura 160 Ensaio à tração por flexão nos prismas	115
Figura 161 Diagrama Força-Deslocamento comparação entre prismas com fibras orientadas e não orientadas	116
Figura 162 Diagrama Força-Deslocamento dos ensaios à compressão dos prismas	116
Figura 163 Diagrama tensão-abertura de fendas (COD) para as placas com 3%, 1.5% e 0.5% de fibras	117
Figura 164 Métodos dos 2 elérodos: a) elérodos embebido. b) elérodos externos	118
Figura 165 Correlação entre o método dos dois elérodos embebidos (prismas – direção 0°) e o método dos dois elérodos exteriores na direção 0° (placas)	118
Figura 166 Correlação entre o método dos dois elérodos embebidos (prismas - direção 0°) e o método dois elérodos exteriores na direção 0° (placas). Resultados excluindo os provetes sem fibras	119
Figura 167 a) Métodos dos 2 elérodos embebido. b) Método dos 4 elérodos	120
Figura 168 Correlação entre o método dos 2 elérodos embebidos e o método dos 4 elérodos na direção 0°	120
Figura 169 a) Métodos dos 2 elérodos exteriores. b) Método dos 4 elérodos	120
Figura 170 Correlação entre o método 2 elérodos exteriores e o método dos 4 elérodos para a direção 0°	121
Figura 171 a) Transmissão direta na direção 0°. b) Transmissão indireta na direção 0°	121
Figura 172 Correlação entre o método por transmissão direta e o método por transmissão indireta para a direção 0°	122
Figura 173 Correlação entre a permeabilidade na zona 1 com a zona 2 para a direção 0°	122
Figura 174 Correlação entre a área abaixo do diagrama e a tensão de pico	123
Figura 175 Correlação entre a área abaixo do diagrama DEWST e a permeabilidade magnética (direção 0°)	124
Figura 176 Correlação entre a área do DEWST das placas e a força máxima de pico no ensaio de flexão dos prismas	124
Figura 177 Correlação entre a tensão de pico do DEWST das placas e a força máxima de pico no ensaio de flexão dos prismas	125

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 Propriedades físicas típicas da sílica de fumo [32]	10
Tabela 2 Resultados obtidos através do programa de processamento de imagem	23
Tabela 3 Indicadores da durabilidade de betões convencionais (NC), HPC, VHPC (betões de muito alto desempenho) e UHPC [51].....	26
Tabela 4 Composição da mistura [kg/m^3]	27
Tabela 5 Correlação entre a velocidade de onda ultrassons com a qualidade do betão [11]	53
Tabela 6 Características dos cilindros	54
Tabela 7 Resultados obtidos das velocidades longitudinais e transversais nos dois cilindros.....	54
Tabela 8 Velocidade das ondas e propriedades da composição do cilindro 1 (sem fibras) e do cilindro 2 (com fibras).....	55
Tabela 9 Composições e propriedades de diversos UHPFRC disponíveis no mercado [77].....	62
Tabela 10 Resultados do ensaio pelo método de Blaine de duas amostras de cimento	62
Tabela 11 Análise química e outros dados relativos ao Fíler de Calcário	64
Tabela 12 Características do superplastificante Sika ViscoCrete 20HE	66
Tabela 13 Tipos de fibras utilizados	66
Tabela 14 Comparação entre composições com diferentes misturas de fibras de 6, 9 e 12 mm [82]..	66
Tabela 15 Composição das misturas sem fibras, 3%, 1.5% e 0.5% de fibras.....	73
Tabela 16 Descrição das amassaduras realizadas	75
Tabela 17 Dados geométricos para o cálculo da resistividade	79
Tabela 18 Diferença entre a consideração e a não consideração da área das cunhas.....	80
Tabela 19 Valores iniciais registados nos multímetros sem qualquer provete	81
Tabela 20 Correção dos valores registados pela Combinação 1	82
Tabela 21 Nomenclatura utilizada	98
Tabela 22 Força máxima obtida no ensaio de flexão dos prismas	110
Tabela 23 Resistência à compressão dos prismas	111

1

INTRODUÇÃO

1.1. ÂMBITO E OBJETIVOS DO TRABALHO

Apesar de o betão ser o material mais utilizado na construção, apresenta algumas fragilidades, como por exemplo, no que diz respeito à resistência à tração e ductilidade. Para resolver o problema da falta de resistência à tração foi necessário a procura de um material com resistência à tração suficientemente elevada, surgindo assim o betão armado. Esta combinação de materiais só é possível pelo facto dos dois materiais apresentarem coeficientes de expansão térmica semelhantes, caso contrário quando a peça estivesse sujeita a mudanças de temperatura iriam gerar tensões longitudinais e transversais adicionais [1].

A evolução constatada ao longo do tempo teve como intuito combinar as propriedades dos materiais de modo que a matriz resultante adquira o interesse necessário às aplicações de engenharia civil como, resistência, absorção de energia, rigidez, durabilidade, resistência ao gelo-degelo, resistência à corrosão, resistência ao fogo, estanqueidade, aparência, controle de qualidade e, por último, mas não menos importante, o custo e a facilidade de colocação [19].

O betão de ultra-elevado desempenho (UHPC), um dos avanços recentes na tecnologia do betão, impressiona com a sua elevada durabilidade e resistência à compressão comparativamente ao aço. Este betão permite o projeto de estruturas de betão sustentável tais como pontes com grande extensão, arranha-céus e permite projetos de arquitetura deslumbrantes. O UHPC apesar de apresentar uma elevada resistência à compressão e durabilidade apresenta-se com uma elevada fragilidade, assemelhando-se a um material cerâmico. Esta característica do material pode ser ultrapassada adicionando fibras à matriz o que leva a um melhoramento da resistência à tração e da ductilidade.

O betão de elevado desempenho reforçado com fibras (HPFRC) é muitas vezes aplicado na indústria da pré-fabricação uma vez que este campo é muitas vezes confrontado com estruturas de betão associadas a geometrias complexas as quais são exigidas elevadas resistências e ductilidade. O HPFRC surge, para além das características inumeradas anteriormente, com o intuito de prevenir problemas associados à dobragem dos varões bem como na montagem da cofragem, o que por vezes resulta em estruturas de baixa qualidade e com defeitos colocando em causa o comportamento mecânico da mesma bem como a sua estética [14].

O comportamento mecânico à tração do HPFRC é significativamente afetado pela orientação das fibras [55]. Num caso ideal, deveria ser possível projetar e controlar a orientação das fibras nos elementos estruturais com o intuito de otimizar a capacidade de carga [27]. A solução encontrada por diversos autores nomeadamente Markovic [27], Prisco *et al.* [55], Walraven [15] e Pansuk *et al.* [81] consiste na orientação das fibras através da criação de um fluxo de betonagem. As propriedades do betão no estado fresco, como por exemplo a auto-compactabilidade, têm uma elevada importância uma vez que permite a orientação das fibras devido ao fluxo gerado no decorrer da betonagem levando a que o material apresente uma maior resistência à tração nessa direção.

A presente dissertação enquadra-se num Projeto de investigação desenvolvido na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto intitulado por “BETOFIBRA-Betões de elevado desempenho reforçado com fibras em soluções inovadoras: conceção, caracterização e controlo de qualidade”.

Os métodos de ensaio aplicados para a caracterização e o controlo de qualidade na construção e/ou ciclos de vida das estruturas têm sofrido avanços significativos, e dividem-se em dois grandes grupos: ensaios destrutivos e ensaios não-destrutivos. Esta dissertação pretende avaliar e caracterizar o HPFRC no que diz respeito à orientação e à percentagem de fibras utilizando diferentes métodos não-destrutivos e confrontar estes resultados com os ensaios destrutivos.

1.2. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação encontra-se dividida em seis capítulos em que o primeiro capítulo retrata o âmbito e objetivos do trabalho referindo também o conteúdo de cada capítulo. O segundo capítulo intitula-se como Betão de elevado desempenho reforçado com fibras (HPFRC) e tem como objetivo a revisão bibliográfica do material quanto à sua composição, ao seu comportamento mecânico e aos ensaios de caracterização do material. Referem-se ainda questões ligadas com a durabilidade deste material bem como algumas das aplicações possíveis.

No terceiro capítulo apresentam-se diferentes ensaios não-destrutivos apropriados para a caracterização do HPFRC, nomeadamente, o ensaio de resistividade, o ensaio de ultrassons e a medição de indutância.

No quarto capítulo consta o programa experimental em que se descrevem os materiais utilizados e procedimentos utilizados para a preparação dos provetes de betão HPFRC bem como o programa de ensaios realizados: não-destrutivos e destrutivos.

A discussão dos resultados obtidos insere-se no quinto capítulo onde se avalia a evolução dos resultados nos ensaios não-destrutivos ao longo do tempo, avalia-se a influência da percentagem e da orientação das fibras. Por último, apresentam-se correlações entre os resultados dos diferentes ensaios.

No sexto capítulo apresentam-se as conclusões do trabalho desenvolvido bem como os desenvolvimentos futuros necessários para uma melhor caracterização do material.

Para finalizar, encontram-se os anexos relativos aos resultados obtidos na campanha de ensaios efetuada e alguns gráficos de apoio ao quinto capítulo.

2

BETÃO DE ELEVADO DESEMPENHO REFORÇADO COM FIBRAS

2.1. INTRODUÇÃO

Investigadores na área do betão procuraram formas de aumentar a resistência à compressão do betão, fazendo com que o peso próprio das estruturas seja diminuído e, conseqüentemente, economicamente mais acessíveis [1]. Desta forma, surgiu o betão de ultra-elevado desempenho sendo um dos recentes avanços na tecnologia, impressionando pela grande resistência à compressão. Existem critérios básicos para a produção deste betão, nomeadamente, a utilização de um agregado de menor dimensão, a qualidade do cimento no que diz respeito às propriedades reológicas e a sua resistência, material pozolânico adequado e a utilização de superplastificantes compatíveis com o cimento [5].

As cinco décadas passadas marcaram o desenvolvimento e a grande expansão das fibras como reforço de betão, as quais, nos dias de hoje se apresentam em inúmeras aplicações em todo o mundo. Este sucesso das fibras deve-se a avanços significativos nas próprias fibras, na matriz cimentícia, na compreensão da interface de ligação entre a matriz e as fibras, e fundamentalmente, no entendimento do comportamento do material e na redução da relação custo/benefício [20]. As fibras, sendo detentoras de ductilidade e resistência, quando incorporadas num betão de elevado desempenho originam um material com uma elevada resistência à tração, ductilidade, durabilidade e com grande capacidade de absorção de energia.

O betão reforçado com fibras (FRC) foi alvo de avanços notáveis no que diz respeito à compreensão detalhada do seu comportamento sendo composto por dois principais componentes: as fibras e a matriz. O betão de elevado desempenho reforçado com fibras (HPFRC) é uma classe particular do betão reforçado com fibras o qual apresenta um comportamento com endurecimento (strain-hardening) quando sujeito a forças de tração depois da abertura da primeira fenda acompanhado de múltiplas fendas para níveis de tensão elevados [19]. Dentro do HPFRC encontra-se o betão de ultra-elevado desempenho reforçado com fibras (UHPFRC) como sendo uma das classes do HPFRC e diferencia-se pelo facto de a composição apresentar uma maior compacidade e portanto uma maior resistência [77]. Na Figura 1 é possível identificar a família dos betões reforçados com fibras expostos anteriormente.

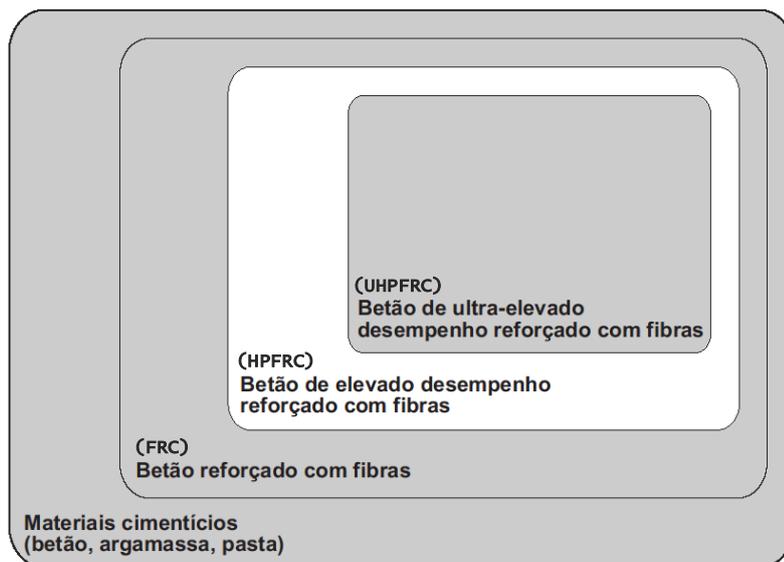


Figura 1 Família dos betões reforçados com fibras

As fibras normalmente são dispostas aleatoriamente no betão fazendo com que este apresente um comportamento isotrópico. A não uniformidade da disposição das fibras faz com que o betão apresente uma resistência consideravelmente menor numa das direções e maior noutra [30]. É de realçar a importância, no comportamento estrutural, da distribuição e da orientação das fibras no betão, uma vez que a orientação das fibras segundo a direção das tensões principais aumenta consideravelmente a resistência.

2.2. COMPOSIÇÃO DO HPFRC

O FRC foi alvo de avanços notáveis e ganhou um enorme impulso nos últimos anos devido a estudos permanentes na compreensão mais detalhada da matriz do betão, das fibras, da interface matriz – fibra, do processo de produção do material, dos mecanismos fundamentais do controlo do comportamento particular deste material e no melhoramento do rácio entre o custo e desempenho do betão. Para além disso, a evolução do betão com fibras desenvolveu-se também devido a estudos que dizem respeito à capacidade tecnológica desenvolvida até à data e à sua capacidade de desenvolvimento. Assim surge [19]:

- Introdução comercial de uma nova geração de aditivos e superplastificantes que permitem aumentar a resistência da matriz para reduzir a perda de trabalhabilidade.
- Aumento do uso de micropartículas ativas ou inativas, como a sílica de fumo e cinzas volantes e melhor compreensão da porosidade, resistência e durabilidade da matriz.
- Disponibilidade crescente de diferentes tipos de fibras com propriedades distintas no que diz respeito à sua resistência, ductilidade, tenacidade e sua interação com a matriz.
- Avanço nos processos de produção, tal como na auto-compactabilidade para a uniformização da mistura quando envolve grandes quantidades de fibras reduzindo desta forma a porosidade da matriz.

2.2.1. COMPARAÇÃO ENTRE DIFERENTES COMPOSIÇÕES DE BETÃO

Pretende-se nesta secção esclarecer as principais diferenças entre betões referidos anteriormente, nomeadamente, o betão convencional (NC), betão de elevado desempenho (HPC), betão de ultra-elevado desempenho (UHPC) e betão de ultra-elevado desempenho reforçado com fibras (UHPFRC).

A composição típica de UHPFRC comparada com o betão convencional (NC) é ilustrada na Figura 2 mantendo-se o volume de ar nas duas composições. Analisando a figura é possível identificar que a pasta no UHPFRC é superior em mais de 2.5 vezes à pasta no betão convencional enquanto a parte inerte da mistura é muito inferior para que desta forma a diferença seja compensada [20]. Associado à pasta identifica-se um aumento significativo de 0.19 para 0.45 da razão água cimento quando transitamos de uma composição UHPFRC para NC.

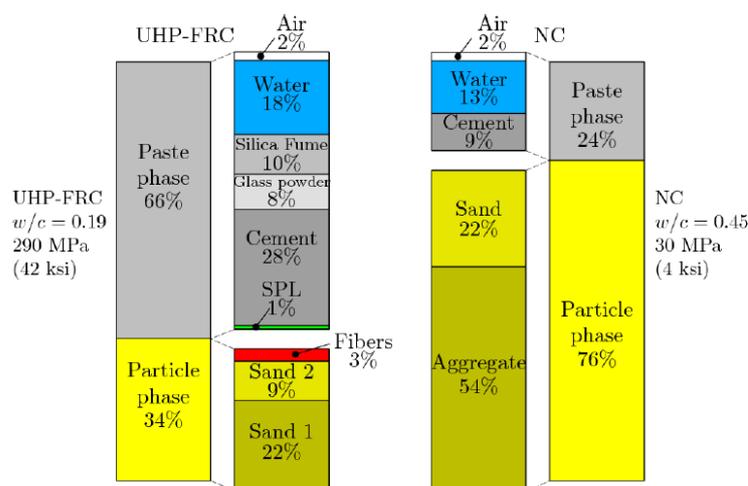


Figura 2 Exemplo das proporções na mistura em volume comparando UHPFRC com betão normal (NC) [20]

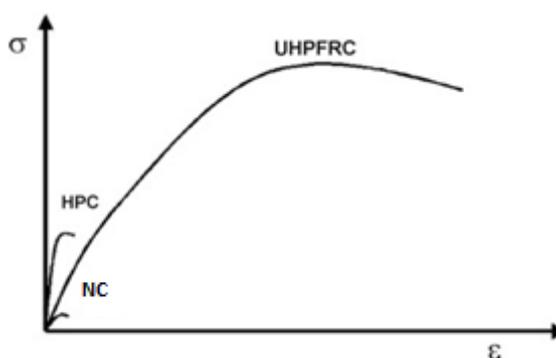


Figura 3 Diagramas tensão/extensão em compressão de betões HPC, NC e UHPFRC [45]

A Figura 3 pretende a comparação de três tipos de betões: betão convencional (NC), betão de elevado desempenho (HPC) e o betão de ultra-elevado desempenho reforçado com fibras (UHPFRC). O HPC é empregue em situações de forças estáticas ou dinâmicas fortes e em ambientes agressivos. Os UHPFRC apresentam um melhor desempenho principalmente na exibição de elevada resistência à tração e à compressão e apresentam também uma elevada ductilidade Este tipo de betões normalmente exibem valores de resistência à compressão e à tração bastante superiores às outras misturas sendo valores superiores a 150 MPa e 7MPa, respetivamente [23].

Estudos realizados por Jung Park *et al.* [50] concluíram que uma composição típica de UHPFRC representada na Figura 4 adquire uma resistência de compressão cerca de 180MPa. A Figura 5 ilustra um esquema onde se refere as composições do HPFRC mais correntes.

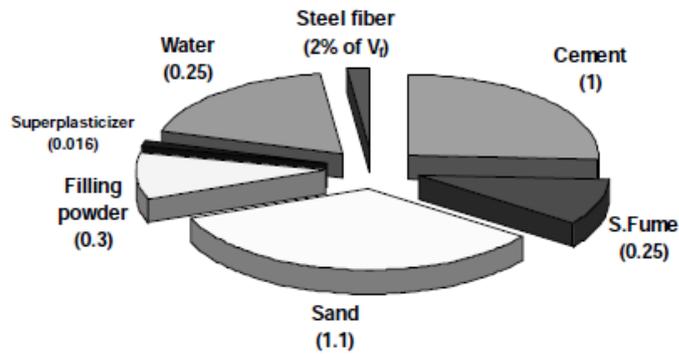


Figura 4 Exemplo das proporções de uma mistura UHPFRC [50]

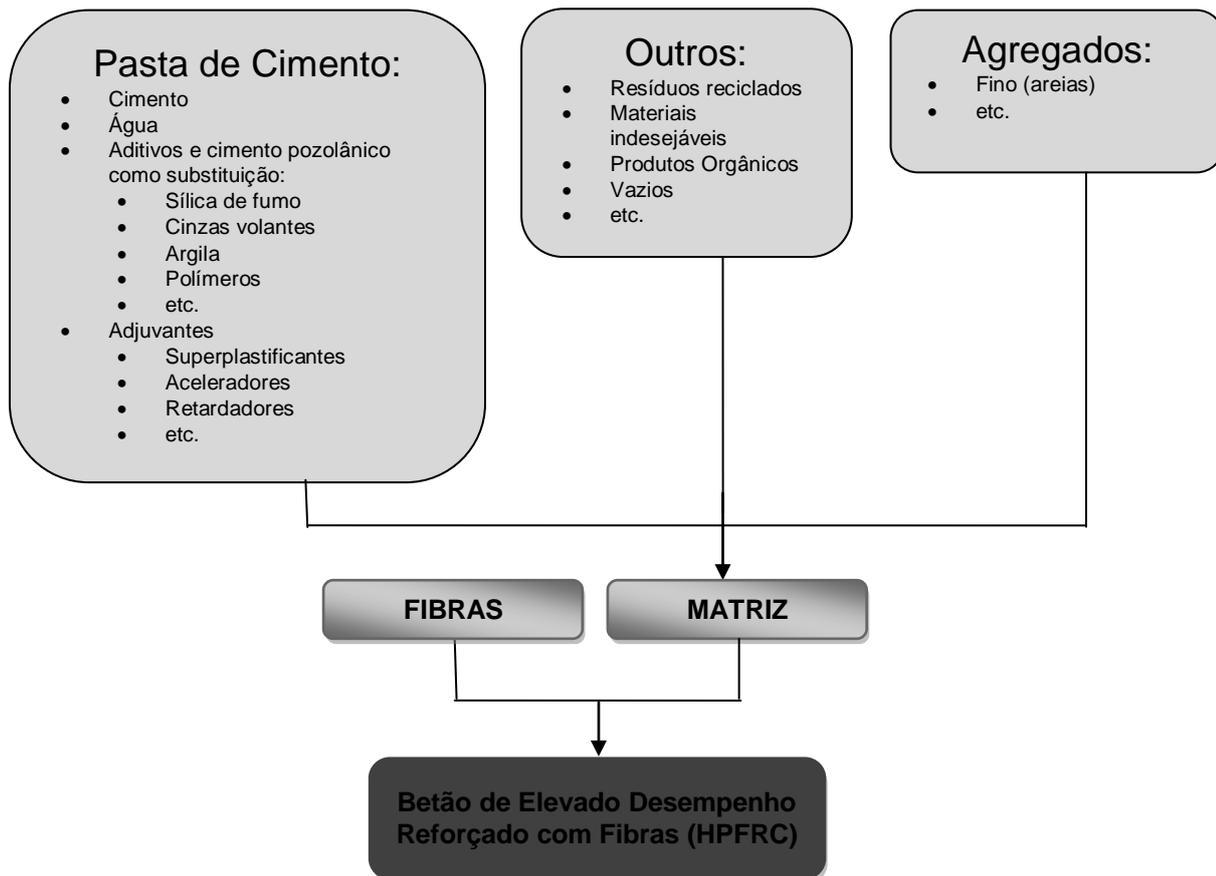


Figura 5 Composição do betão HPFRC

2.2.2. MATRIZ DO BETÃO

O betão de elevado desempenho (HPC) consiste na combinação de cimento com adições reativas e agregados otimizados para a obtenção de propriedades específicas do betão fresco e endurecido. A baixa razão água/finos e a elevada densidade de empacotamento do UHPC, comparada com um betão normal, originam uma microestrutura densa com baixa porosidade. Não só as propriedades de endurecimento do betão como também o seu comportamento no estado fresco podem ser controladas a partir da escolha adequada das adições [35].

Na Figura 6 é possível identificar a descrição dos tamanhos das partículas e algumas características recomendadas de vários materiais utilizados na composição de HPC.

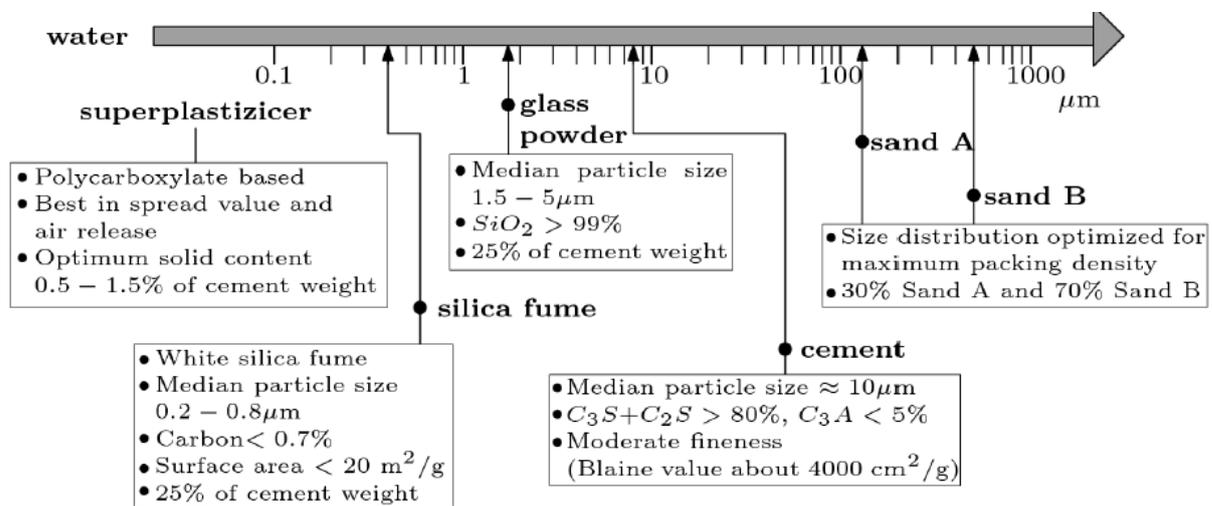


Figura 6 Materiais utilizados nas misturas desenvolvidas e características particulares [20]

A resistência do betão é controlada pelas proporções de materiais constituintes, nomeadamente cimento, agregados finos e grossos, água e outras partículas. No entanto, a razão água/cimento é um fator dominante para a resistência em que, quanto menor for esta relação maior a resistência. Este fator poderá ser reduzido até à quantidade de água necessária para que as reações químicas de hidratação do betão se desenvolvam [1].

A Figura 7 esquematiza a relação entre a resistência à compressão para diferentes razões água-cimento. Na Figura 8 apresenta-se o estudo desenvolvido por Sobolev [39] onde comprovam a relação exponencial entre a resistência à compressão e a razão água/cimento para um betão de elevado desempenho (HPC).

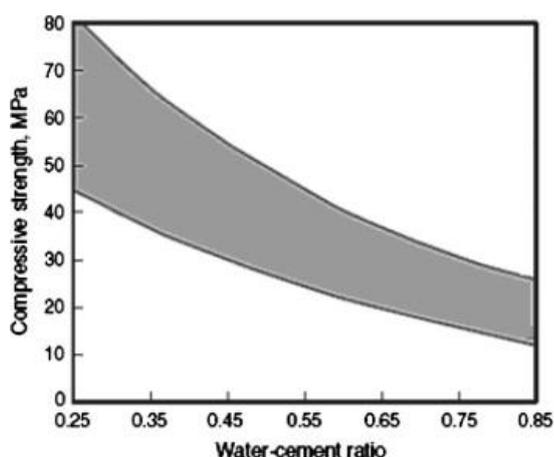


Figura 7 Relação típica entre água/cimento e a resistência à compressão de um betão com cimento Portland [1]

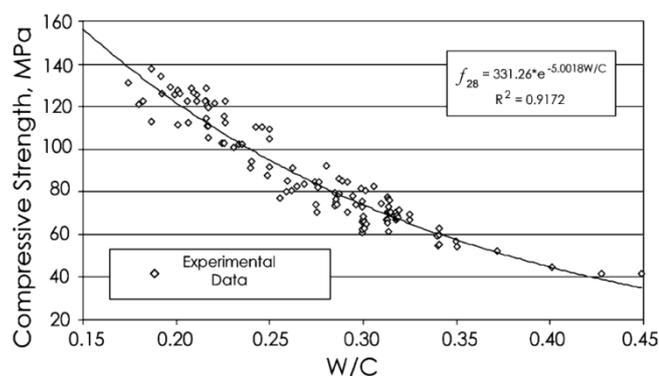


Figura 8 Resistência à compressão de HPC [39]

De acordo com o Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), a produção do clínquer do cimento em 2003 foi responsável por 5% das emissões antropogénicas de CO₂. A percentagem rapidamente subiu devido à crescente produção de cimento. Algumas das estratégias para reduzir as emissões de CO₂ é a substituição do clínquer do cimento por partículas minerais como as pozolanas e substituir as partículas maiores do cimento por fíler de calcário [40].

Por outro lado estes materiais geralmente possuem uma elevada superfície específica, nomeadamente sílica de fumo, metacaulino, cinza volante superfina, que em combinação com superplastificantes produzem HPC uma vez que a distância entre partículas diminui, provocando um aumento do contacto entre as mesmas, e desta forma, há uma redução da permeabilidade do betão tornando-se numa estrutura mais densa e homogénea. Existem três tipos de adições [33]:

- adições quase inertes – ex: Fíler de calcário
- adições hidráulicas latentes – ex: Escórias de Alto-forno
- adições com propriedades pozolânicas – ex: Pozolana natural, Cinza Volante, Sílica de fumo, Metacaulino.

Nesta dissertação serão abordadas as adições mais comuns para o HPC, nomeadamente, o fíler de calcário para otimizar a composição e a sílica de fumo com o intuito de reduzir a porosidade e aumentar a resistência [5, 32]. O fíler de calcário apresenta uma superfície específica maior que 500 m²/kg e é a adição mais utilizada com o intuito de reduzir a dosagem de água devido ao melhoramento granulométrico das partículas do betão. No entanto a introdução de fíler de calcário no betão pode contribuir para o ataque do betão por sulfatos [33].

A Figura 9 apresenta a distribuição granulométrica típica do cimento Portland e do fíler de calcário. O tamanho médio das partículas de fíler de calcário é ligeiramente inferior ao do cimento CEM I 52.5 [38].

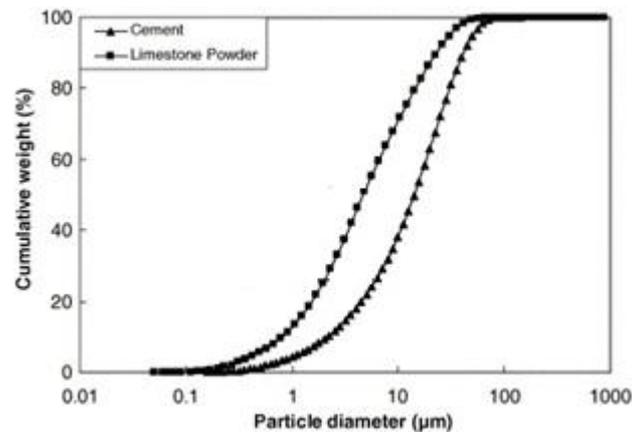


Figura 9 Curva granulométrica do cimento (CEM I 52.5) e do filer de calcário [38]

A utilização de ultrafinos com propriedades pozolânicas tem vantagens na redução do aumento da temperatura no processo de hidratação e no melhoramento da resistência, embora em alguns casos se desenvolva mais lentamente. As partículas ultrafinas pozolânicas são também interessantes devido ao aumento na durabilidade do betão. A portlandite (hidróxido de cálcio – Ca(OH)_2) libertada pela hidratação do cimento Portland não contribui significativamente para a resistência e pode ainda ser prejudicial à durabilidade do betão, no caso de alguns ambientes quimicamente agressivos. No entanto, as partículas pozolânicas adicionadas na mistura podem reagir com a portlandite libertada pela hidratação do clínquer do cimento produzindo secundariamente gel C-S-H dentro da pasta de cimento, o que se traduz num aumento da compactidade da microestrutura do cimento [41].

A sílica de fumo é um subproduto do metal silício e do ferro-silício usado frequentemente em betões de elevada resistência devido à grande melhoria na zona de interface da pasta de cimento e agregados. A sílica de fumo consiste em elementos ultra finos ($< 1\mu\text{m}$) os quais aumentam a ligação entre a pasta de cimento e o agregado originando uma interface mais densa. Esta propriedade é de elevada importância pelo facto de aumentar a resistência mecânica do betão devido à atividade pozolânica que desenvolve.

Sendo a sílica de fumo um material bastante utilizado na conceção de betão de elevado desempenho é necessário conhecer algumas das vantagens na sua aplicação, nomeadamente [32]:

- alta resistência à compressão
- alta resistência à flexão e aumento do módulo de elasticidade
- aumento da durabilidade
- baixa permeabilidade à intrusão de cloretos e água
- maior resistência à abrasão
- alta resistência ao ataque químico de cloretos, ácidos, nitratos, sulfatos, etc.
- alta resistividade elétrica e baixa permeabilidade

A adição de sílica de fumo promove o acréscimo de água ao betão devido à dimensão ultrafina das partículas. Portanto, para o controlo da trabalhabilidade e para a obtenção de um material com elevada resistência a sílica de fumo é normalmente utilizada em simultâneo com um superplastificante [31].

Na Tabela 1 identificam-se algumas das propriedades típicas da sílica de fumo e na Figura 10 a curva granulométrica típica comparada com o cimento e outros aditivos. É de destacar o reduzido tamanho das partículas, que comparado com o cimento é cerca de 100 vezes inferior, a elevada área de superfície e a elevada densidade deste material.

Tabela 1 Propriedades físicas típicas da sílica de fumo [32]

Property	Value
Particle size (typical)	<1 μm
Bulk density (as-produced)	130–430 kg/m^3
(slurry)	1320–1440 kg/m^3
(densified)	480–720 kg/m^3
Specific gravity	2.22
Surface area (BET)	13,000–30,000 m^2/kg

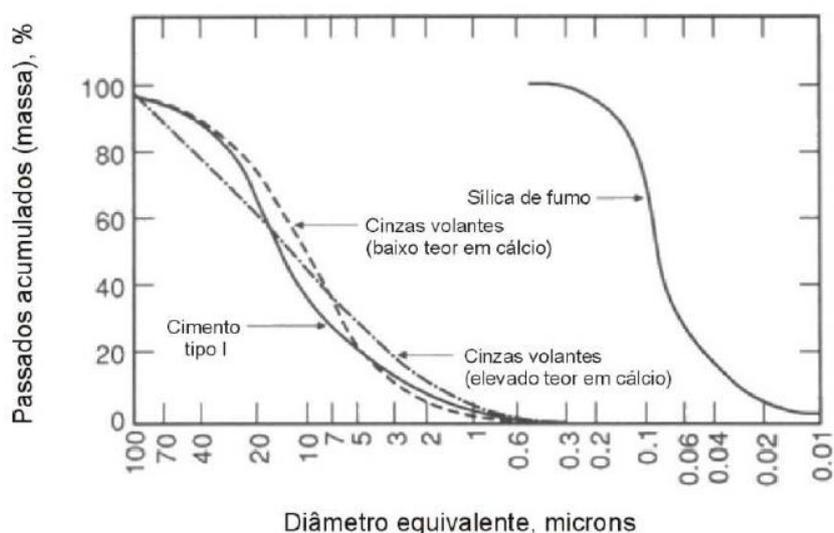


Figura 10 Comparação de curvas granulométricas do cimento Portland, cinza volante calcária e silicosa e sílica de fumo [33]

A sílica de fumo, como referido anteriormente, apresenta inúmeras vantagens no betão de elevado desempenho, no entanto apresenta algumas desvantagens, nomeadamente na sua escassez, no custo e na cor, refletindo-se no custo elevado do betão resultante [42]. Desta forma, várias composições são estudadas por diversos investigadores com o intuito de encontrar diferentes adições, na tentativa de diminuir as desvantagens associadas à sílica de fumo.

Rougeau *et al.* [41] estudaram a resistência à compressão e à tração, porosidade, capacidade de absorção de água e a resistência à carbonatação para uma grande variedade de aditivos ultrafinos possíveis com o objetivo da substituição da sílica de fumo nomeadamente:

- metacaulino (MK)
- cinzas volantes pulverizadas (PFA)
- microfiller de calcário (LM)
- microfiller de sílica (SM)
- fonólito (PH)

Na Figura 11 apresentam-se as curvas granulométricas dos materiais utilizados como substitutos da sílica de fumo e na Figura 12 são comparadas as resistências à compressão obtidas para os 28 e os 90 dias na qual se verifica que o material com maior desempenho é a sílica de fumo, no entanto, o microfíler de calcário, o microfíler de sílica, metacaulino e o fonólito podem ser utilizados para atingir forças acima dos 150 MPa. O microfíler de sílica, microfíler de calcário e o metacaulino têm a vantagem de conferir uma cor branca ao betão ao contrário da cor cinzenta transmitida pela sílica de fumo.

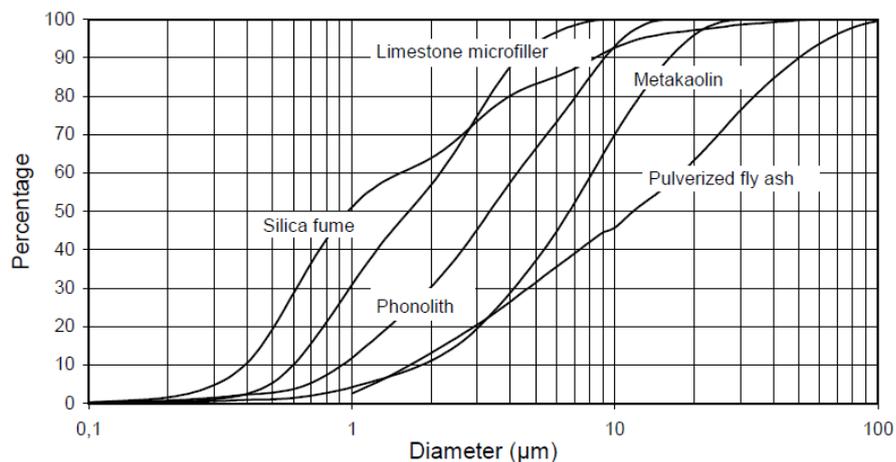


Figura 11 Distribuição granulométrica de ultrafinos [41]

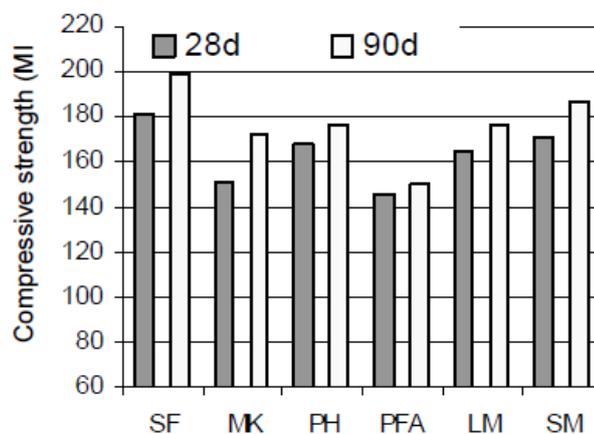


Figura 12 Resistência à compressão de UHPC para idades 28 e 90 dias [41]

Estudos realizados por Hassan *et al.* [43] concluíram que um betão auto-compactável contendo metacaulino apresenta uma durabilidade maior do que o mesmo betão com sílica de fumo. Guneyisi *et al.* [44] desenvolveram estudos com os mesmos materiais, no entanto, para além do estudo da durabilidade realizaram ensaios de resistência e de abertura de fendas por retração concluindo que a substituição tem efeitos sobre as características mecânicas no entanto têm maior efeito na durabilidade. Na Figura 13 é possível identificar o estudo da abertura de fendas, onde concluíram a existência de um atraso no início da sua abertura e na sua propagação na composição com sílica de fumo.

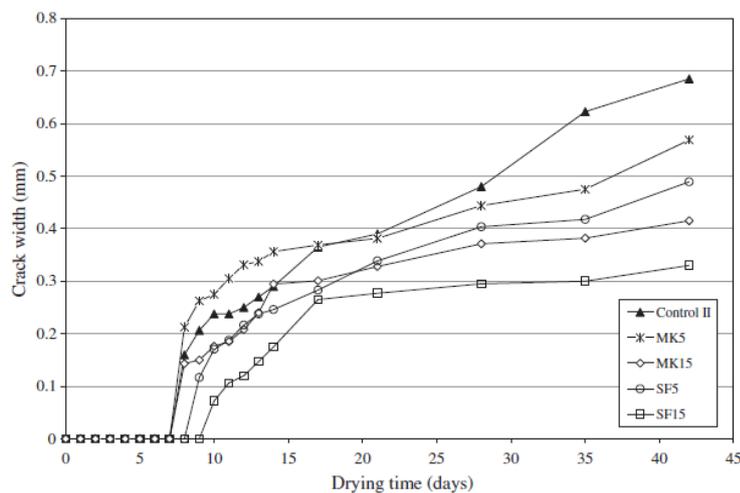


Figura 13 Efeito da sílica de fumo e metacaulino na fendilhação devido à retração restringida; $w/cm = 0.35$; Control II (sem aditivos); MK5 (5% metacaulino); MK15 (15% metacaulino); SF5 (5% sílica de fumo) SF15 (15% sílica de fumo) [44]

O HPC é caracterizado pelo facto de ter uma densidade de empacotamento elevada devido ao cimento, microsilica e material de enchimento inerte fino e o volume de água bastante reduzido [46]. Esta última característica leva à produção de uma mistura com baixa trabalhabilidade, caracterizada por um baixo abaixamento. Com a adição de fibras há um efeito semelhante, desta forma, é necessário adotar um superplastificante adequado para obter a trabalhabilidade pretendida [1].

A adição de fibras reduz a trabalhabilidade a qual depende da forma, do comprimento e da composição das fibras. Normalmente, os materiais que levam a uma diminuição da trabalhabilidade levam a um aumento do desempenho do material, desta forma é necessário encontrar um compromisso entre a trabalhabilidade e o desempenho da mistura [1].

A trabalhabilidade é uma característica fundamental do betão no estado fresco e é definida como a capacidade que o betão apresenta em ocupar os moldes e as cofragens quando se encontra em estado fresco. É devido a esta propriedade que se torna possível conceber estruturas com as mais diversas formas. É sabido que a quantidade de água afeta substancialmente esta propriedade uma vez que em excesso tende a ficar na superfície e/ou pode originar segregação dos agregados. Como resultado há uma redução da qualidade do betão [1].

A auto-compactabilidade conferida ao HPFRC leva a uma reformulação dos ensaios do betão convencional com o intuito de avaliar as características relacionadas com a trabalhabilidade. Assim, os ensaios previstos nas normas para classificar um betão como auto-compactável são o ensaio de abaixamento (slump test – NP EN 12350-8), ensaio de escoamento no funil V (NP EN 12350-9), Ensaio de escoamento na caixa L (NP EN 12350-10), ensaio de segregação no peneiro (NP EN 12350-11).

Os superplastificantes transformam-se num componente imprescindível quando é necessário conceber um betão de elevado desempenho uma vez que o objetivo é alcançar uma elevada resistência e com trabalhabilidade adequada. Estes aditivos reagem facilmente com as partículas do cimento eliminando o ar existente na mistura. A Figura 14 pretende demonstrar as diferentes fases de hidratação de uma mistura na presença de água e de superplastificante. É possível verificar uma melhor dispersão das partículas do cimento quando é adicionado o superplastificante.

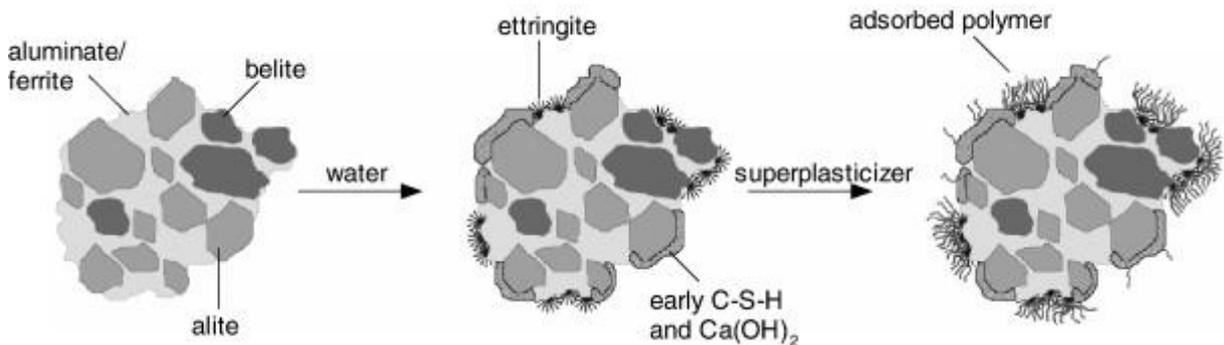


Figura 14 Representação esquemática da secção transversal de um grão de cimento [47]

No que diz respeito aos agregados utilizados num betão HPC, Pierre Richard *et al.* [48] afirmam que para obtenção de uma matriz com uma grande resistência à compressão é necessário aumentar a homogeneidade da matriz eliminando os agregados grossos, aumentar a densidade de empacotamento pela adição de partículas com granulometrias diferentes.

Quando uma peça é sujeita a forças de compressão, retração ou térmicas há a formação de fissuras na zona de interface entre pasta e agregado. Desta forma, a dimensão das fissuras está diretamente interligado com a granulometria da matriz. Assim, com a redução no diâmetro das partículas há uma redução importante no tamanho das microfissuras [48].

2.3. COMPORTAMENTO NO ESTADO FRESCO DO HPFRC

Ao longo dos anos o betão com fibras tem sido continuamente melhorado. Assim o salto de um betão convencional, compactado manualmente ou com forte vibração, para um betão auto-compactável foi um avanço muito significativo, uma vez que permite uma maior uniformização das fibras e, por outro lado, possibilita a orientação das mesmas, originando um nível de resistência consideravelmente mais elevado na direção da orientação.

O betão auto - compactável é fluído e não requer nenhuma compactação depois da betonagem. Pelo facto de ser tão viscoso, que as bolhas de ar tendem a migrarem para a superfície do betão fresco. A Figura 15 a) apresenta a ideia fundamental do betão auto-compactável onde a lubrificação dos agregados é realizada através de uma fina camada de pasta de cimento, de tal forma que a força de corte entre elas na mistura fresca possa diminuir, e a mistura tornar-se fluida. Dois dos métodos de dimensionamento da composição mais importantes – método japonês e o método sueco, são baseados numa quantidade constante de líquido no betão, assim como no aumento da quantidade de ligante comparado com o betão convencional [27]. A Figura 15 b) retrata um dos aspetos discutidos anteriormente no que diz respeito à colmatagem de uma fenda pelas fibras e a Figura 15 c) ilustra a forma como partículas de vários tamanhos se distribuem, uma vez que os grãos pequenos preenchem espaços maiores entre grãos maiores.

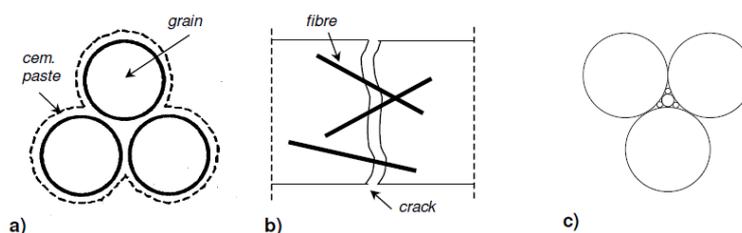


Figura 15 Auto-compactabilidade betão. a) camada de pasta que envolve cada grão de agregado. b) Fissura colmatada pelas fibras. c) Empacotamento ideal onde cada grão pequeno preenche espaços maiores provocados pelos grãos maiores

A nível do comportamento estrutural é importante a distribuição homogénea das fibras em toda a parte da estrutura, a distância entre fibras vizinhas deverá ser mantida a mesma, e portanto, a segregação das fibras deverá ser evitada. A auto-compactabilidade associada ao FRC previne a segregação das partículas e portanto permite uma distribuição homogénea das fibras [27].

O betão auto - compactável tem como característica principal a sua adaptabilidade ao molde através do fluxo gerado pelo seu peso próprio. Quando há a junção de fibras, estas tendem a orientarem-se segundo a direção do fluxo de escoamento, influenciando a resposta à tração do elemento estrutural. No entanto, quando as fibras inseridas no betão são de aço rígido, muitas vezes têm uma influência negativa na trabalhabilidade do betão, principalmente quando são aplicadas em percentagens elevadas, influenciando a auto - compactabilidade do betão [27].

2.4. COMPORTAMENTO NO ESTADO ENDURECIDO DO HPFRC

Segundo Naaman [19] o FRC pode ter dois comportamentos à tração distintos:

- Amolecimento (Strain-softing);
- Endurecimento (Strain-hardening).

O comportamento com endurecimento (Figura 16 b)) distingue-se pela abertura de múltiplas fendas, apresentando uma grande capacidade de absorção de energia. Tipicamente a curva tensão-extensão inicia com um comportamento linear com grande inclinação até à abertura da primeira fenda (Parte I), numa fase seguinte há abertura de múltiplas fendas para tensões continuamente crescentes (Parte II). Quando não há capacidade de desenvolvimento de maior número de fendas, apenas uma fenda crítica se desenvolve sob maior deformação fazendo com que a curva tenda a descer (Parte III).

No que diz respeito ao comportamento com amolecimento (Figura 16 a)) inicia-se de igual forma ao comportamento descrito anteriormente, no entanto, quando ocorre a primeira fenda há uma quebra de tensão e não se verifica o desenvolvimento de múltiplas fendas iniciando-se um comportamento semelhante à parte III do comportamento com endurecimento. É de realçar uma diferença na energia de fratura entre os dois comportamentos devido à capacidade de formação de múltiplas fendas no comportamento com endurecimento.

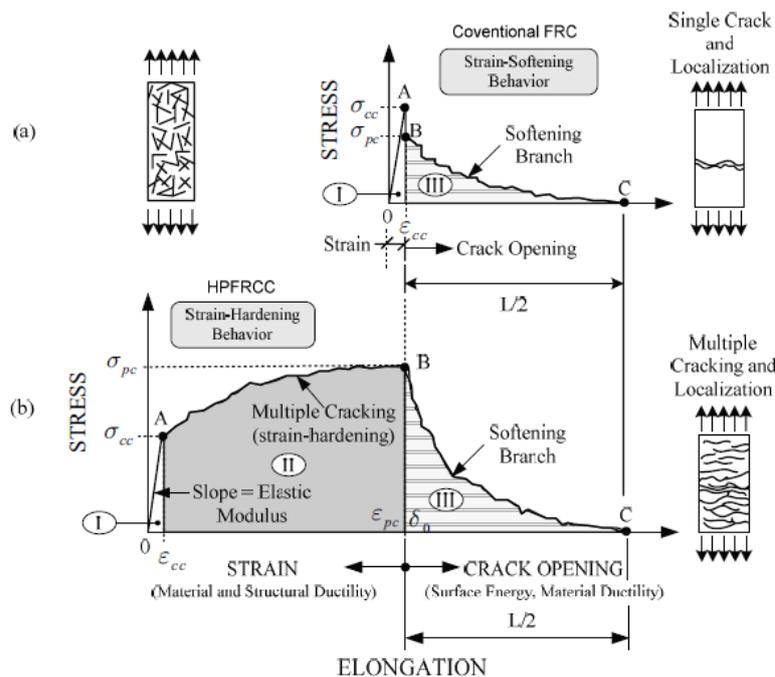


Figura 16 Diagramas típicos de comportamento. a) Com amolecimento b) Com endurecimento [19]

2.4.1. AÇÃO DAS FIBRAS DURANTE O PROCESSO DE TRAÇÃO

Em regra, a matriz de UHPC apresenta uma rotura frágil, para controlar a abertura de fendas, a incorporação de fibras de aço é muito importante na maior parte das aplicações de UHPC. Devido à alta resistência das fibras de aço, as fibras são utilizadas para proporcionar a um material frágil a ductilidade suficiente para a sua aplicação assim como para aumentar a tensão de tração e a resistência à tração em flexão cerca de 15 e 40MPa, respetivamente [21].

Tal como as armaduras convencionais, as fibras têm como principal objetivo o controlo das fendas. No entanto, embora o número de fibras que atravessa uma fissura seja muito maior comparado com o número de varões que atravessaria, a ação das fibras nunca pode ser tão eficaz como os varões. As principais razões são [27]:

- Os varões são contínuos e têm um diâmetro muito maior do que as fibras;
- A capacidade resistente à tração dos varões e a ligação dos varões com o betão poderá ser mais forte comparando com a ligação entre as fibras e o betão;
- Num elemento estrutural, os varões estão de acordo com as instruções do projetista, enquanto que as fibras geralmente encontram-se distribuídas aleatoriamente.

A introdução de fibras num betão convencional, portanto sem modificações das proporções da mistura, resulta num decréscimo de trabalhabilidade da mistura, originando um betão heterogéneo e não compacto resultando numa deficiente ligação das fibras com o betão. Além disso, as fibras são distribuídas aleatoriamente nos elementos, com a orientação que normalmente não corresponde à direção da tensão principal de tração. A ductilidade num betão convencional reforçado com fibras tende a ser maior quando comparado com um betão simples, no entanto, a força de tração pode permanecer a mesma ou eventualmente inferior. [27]

Como alternativa ao betão com fibras surge o betão auto-compactável com fibras. O betão auto-compactável resolve alguns problemas descritos anteriormente tais como a trabalhabilidade, o facto das fibras poderão ser orientadas e portanto adquirirão uma maior eficiência. A resistência à flexão e a ductilidade poderão também ser melhoradas [27].

Na Figura 17 apresentam-se vários tipos de fibras de aço com vários tamanhos e formas, a aplicação de vários tipos de fibras, isto é fibras pequenas e retas e fibras grandes com ganchos, está diretamente relacionado com a fratura do betão [27].

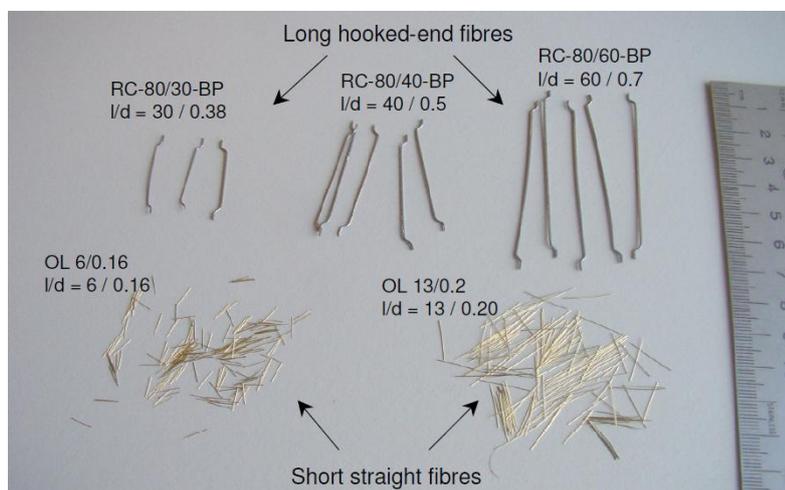


Figura 17 Diferentes tipos de fibras com as dimensões correspondentes; l/d (comprimento da fibras (mm)/ diâmetro das fibras (mm)) [27]

O processo de fratura do betão tracionado leva à formação de inúmeras microfissuras na zona de interface em torno dos grãos de areia. Quando a tração cresce, as microfissuras unem-se formando fissuras de grandes dimensões, as quais levam à rotura [27]. No que respeito ao betão reforçado com fibras, as fibras procedem ao controlo das fissuras existentes, em que, as fibras pequenas (diâmetro $\leq 0.1\text{mm}$) pelo facto de oferecem um grande número de fibras por unidade de volume, reduzem o tamanho e a largura das microfissuras, quando bem ligadas á matriz também aumentam a resistência á tração do betão [19]. As fibras grandes com ganchos serão ativadas no aparecimento de fendas de grandes dimensões, aumentando a ductilidade e também a tensão de tração e oferecendo uma resposta estável na fase pós-pico. Nesta fase as fibras pequenas ativas são cada vez menores devido à grande abertura de fendas (ver Figura 18) [27].

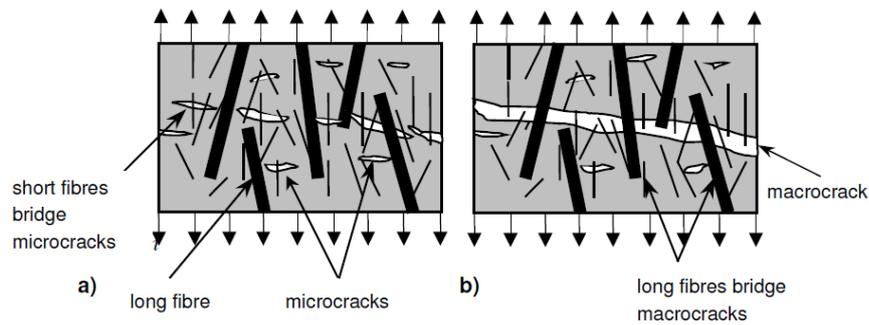


Figura 18 Comportamento do betão com diferentes tipos de fibras a) Influência das fibras curtas no controlo das microfissuras e aumento da tensão de tração; b) Influência das fibras longas no controlo das microfissuras e aumento da ductilidade [27].

Analisando em pormenor um prisma de betão, com fibras orientadas apenas numa direção, fissurado perpendicularmente à direção das fibras, três casos pode ocorrer [19]:

- após o aumento do deslocamento, todas as fibras rompem;
- após o aumento do deslocamento, todas as fibras são arrancadas tal como é possível constatar em betões com fibras de aço de elevada resistência;
- após o aumento do deslocamento, ocorre uma combinação entre as duas opções acima mencionadas, onde algumas fibras rompem e outras são arrancadas.

A eficiência das fibras depende do betão que as rodeia e do tipo de fibras utilizadas. A qualidade da matriz do betão está diretamente correlacionada com a eficiência das fibras, refletindo-se em alguns fatores, tais como [27]:

- razão água/cimento ou água/agregados;
- tipo e qualidade do cimento;
- presença de materiais finos;
- granulometria dos agregados e o seu tamanho máximo;
- presença de fibras no meio de uma fibra que se encontra em deslizamento;
- a taxa de arrancamento das fibras.

O material que se encontra na interface betão-fibras é um dos responsáveis pela eficiência das fibras uma vez que, pela falta de eficiência do empacotamento das partículas finas do cimento num estado fresco, aquela zona será preenchida apenas parcialmente com produtos de hidratação. Para além disso há uma concentração de água à volta das fibras, tal como em qualquer outra intrusão fazendo com que a coesão betão-fibra decresça [27].

Estes fenómenos resultam numa maior porosidade à volta das fibras quando comparada com a matriz de betão e também num aumento da quantidade cristais de hidróxido de cálcio (CH). A dureza do betão à volta da fibra é geralmente 30-50% mais baixa que a matriz, o que justifica a grande porosidade. Assim quanto menor a razão água/finos (w/b), maior é a dureza da zona de interface. No entanto, a zona de influência da intrusão das fibras é independente da razão água-cimento e apresenta cerca de 75µm [27]. Na Figura 19 a) é possível identificar as várias camadas constituintes da zona de interface. Na Figura 19 b) comprova-se a influência da razão água/cimento na dureza desta zona e a independência da razão água-cimento e do tamanho da zona de interface [27].

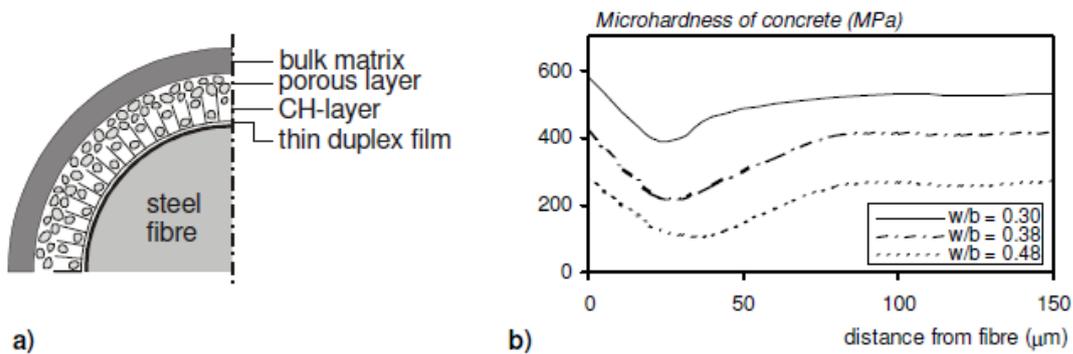


Figura 19 a) Secção transversal da fibra, da zona de interface com poros, com os cristais de hidróxido de cálcio e a matriz de betão; b) Resultados dos testes de dureza na zona à volta do betão, para diferentes razões água/cimento. [27]

Além do material envolvente das fibras, as características das fibras também influenciam substancialmente a sua eficácia tais como [27]:

- a forma da fibra, isto é, a geometria da fibra;
- o material constituinte da fibra;
- o diâmetro da fibra;
- o comprimento aderente da fibra;
- o ângulo de inclinação da fibra relativamente à direção principal de tração.

2.4.2. DISPERSÃO E ORIENTAÇÃO DAS FIBRAS

Paralelamente ao que acontece com a disposição de armaduras correntes, para que uma estrutura adquira um comportamento estrutural eficiente as fibras têm de se encontrar o mais possível orientadas segundo a direção das tensões principais de tração.

Para o estudo da orientação e a dispersão das fibras Kang *et al.* [30] utilizaram um programa de processamento de imagem para avaliar quantitativamente as características de distribuição e orientação das fibras. Para isto, foram realizados três tipos de prismas ($100 \times 100 \times 40 \text{ mm}^3$) de betão, dois com fibras de pequenas dimensões ($l/d=13/0.2 \text{ mm}$) dos quais: Num deles a colocação do betão foi realizada paralela à direção longitudinal (Figura 20 a)): no segundo tipo de prisma o material foi colocado transversalmente à direção longitudinal (Figura 20 b)): No terceiro tipo de prisma foi concebido sem fibras.

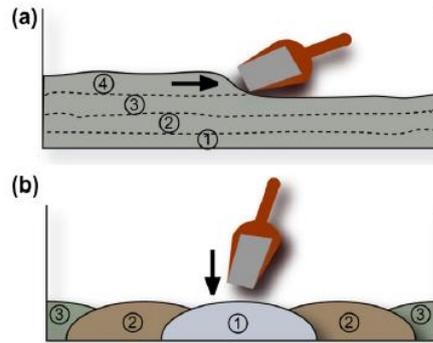


Figura 20 Preparação do provete. a) colocação do material paralelo à direção longitudinal do provete (PL). b) colocação do material transversalmente à direção longitudinal do provete (TL) (nota: o material foi colocado pela ordem mencionada na figura) [30]

Os prismas mencionados anteriormente foram ensaios à flexão (Figura 21) obtendo-se uma maior resistência quando as fibras estão orientadas na direção longitudinal, é de realçar que o aparecimento da primeira fenda não está relacionado com a orientação nem com a dispersão das fibras, mas sim com a resistência da matriz. Contrariamente, a resistência de pico é influenciada substancialmente pela orientação das fibras. Na Figura 22 é possível identificar as características mencionadas anteriormente.

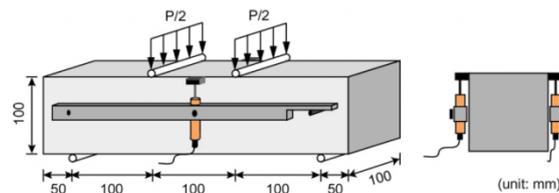


Figura 21 Equipamento para o ensaio de flexão [30]

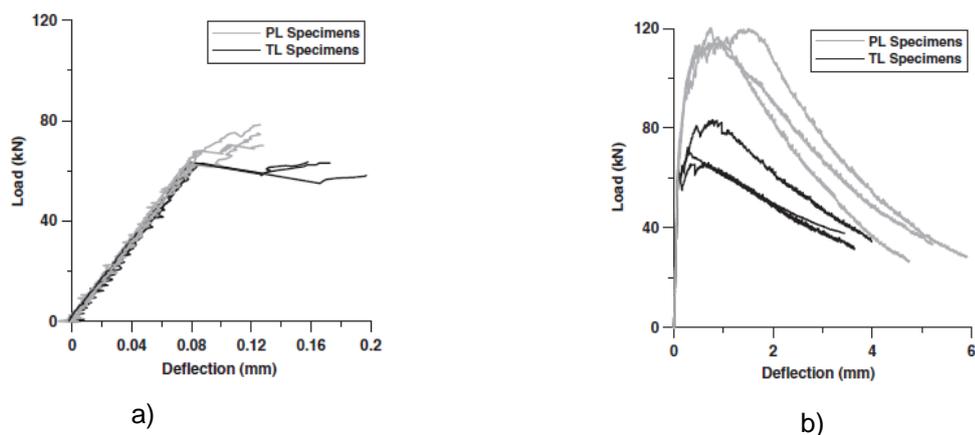


Figura 22 a) Diagrama do ensaio de flexão até abertura da primeira fenda nos dois tipos de provetes com fibras b) diagrama total do ensaio de flexão PL-material depositado longitudinalmente TL-material depositado transversalmente [30]

Para avaliar a distribuição e orientação das fibras Kang *et al.* [30] procederam ao corte dos provetes em três direções: direção transversal (Figura 23 a)), direção horizontal (Figura 23 b)) e direção vertical (Figura 23 c)). Na Figura 24 apresentam-se as fotografias de alta qualidade tiradas aos provetes betonados nas duas direções para os três cortes correspondentes.

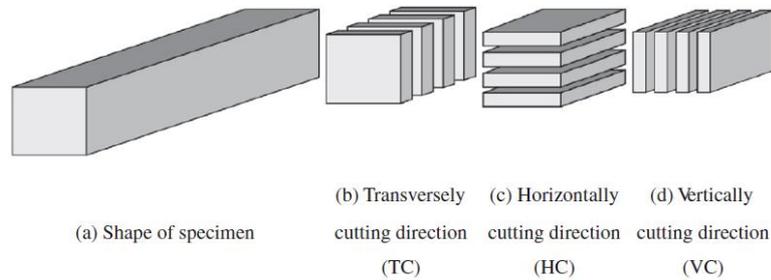


Figura 23 Três planos de corte [30]

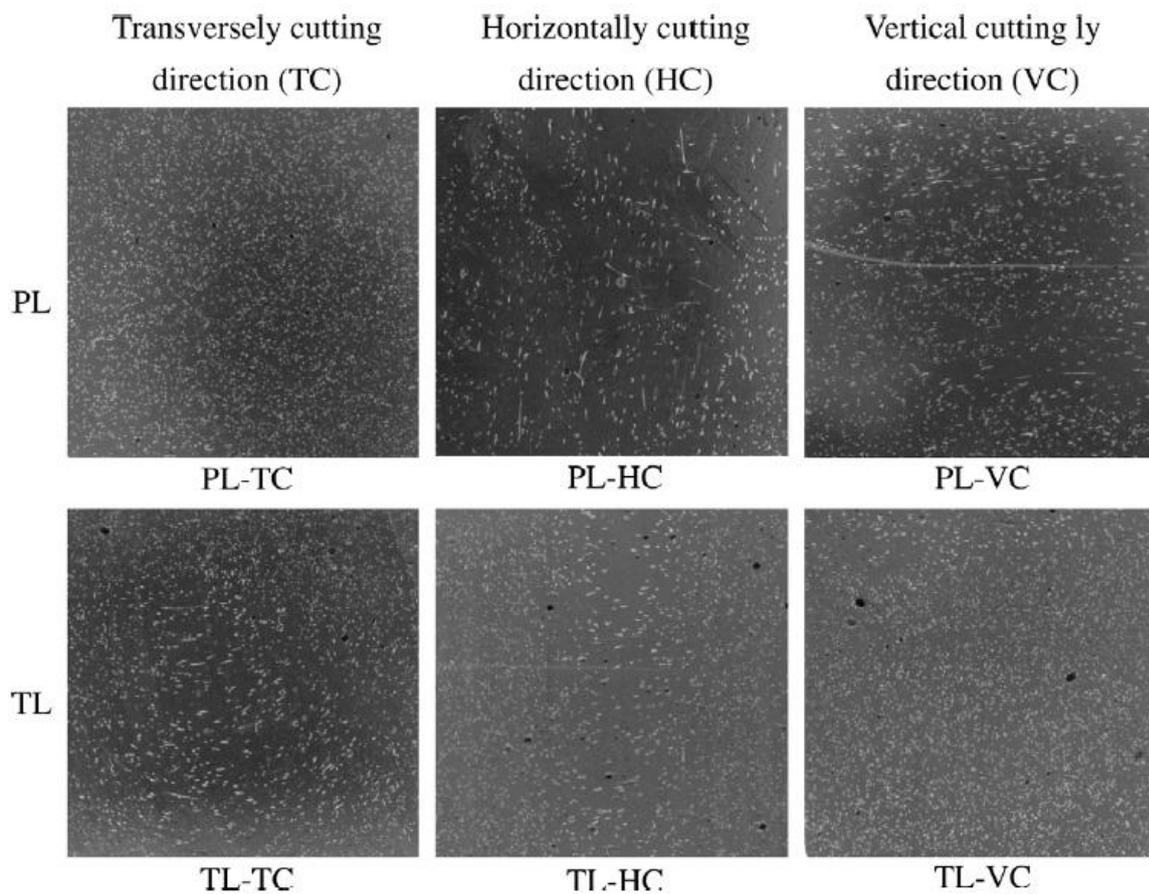


Figura 24 Fotografias para as duas direções de colocação do betão e as três direções de corte dos provetes [30]

No caso das fibras dispostas paralelamente à direção longitudinal do provete (PL), as fibras encontram-se mais uniformemente dispersas na direção de transversal de corte (PL-TC) comparando com as outras direções (PL-HC e PL-VC). Na Figura 24 deteta-se claramente que na secção de corte PL-TC a maior parte das fibras apresentam-se com secção circular evidenciando a sua orientação normal ao plano de corte, relativamente aos outros. No caso da betonagem realizada transversalmente à direção longitudinal do provete (TL) há uma maior dispersão de fibras, no entanto, verifica-se uma orientação preferencial das fibras no corte TL-VC.

As expressões apresentadas a seguir (1), (2), (3) e (4) dizem respeito ao cálculo que o programa de processamento de imagem realiza internamente. O grau de dispersão das fibras pode ser obtido a partir da expressão (1) o qual traduz a dispersão das fibras mais ou menos homogénea na face de corte em que para valores próximos da unidade as fibras encontram-se uniformemente distribuídas na secção em análise.

$$\alpha_f = \exp \left[-\sqrt{\frac{\sum(x_i-1)^2}{n}} \right] \quad (1)$$

Em que,

n = Número total de fibras presente na imagem

x_i = Número de fibras na i – ésima unidade

α_f = Grau de dispersão das fibras

O número de fibras por unidade de área calcula-se através de:

$$F_n = \frac{n_f}{A} \quad (2)$$

Em que,

n_f = Número total de fibras presente na imagem

A = Área da imagem

F_n = N^o de fibras por unidade de área

A densidade de empacotamento pode ser obtida a partir da expressão (3). Este parâmetro tende para 1 quando as fibras apresentarem secção circular na superfície de corte, ou seja, encontram-se orientadas segundo a direção perpendicular à superfície de corte

$$F_c = \frac{A_{ob}}{A_{cc}} \quad (3)$$

Em que,

A_{ob} = Área do objecto

A_{cc} = Área do círculo que circunscribe o objecto

F_c = Densidade de empacotamento

Na Figura 25 apresenta-se a explicação da nomenclatura utilizada para a determinação da área e da inclinação das fibras para que desta forma seja possível o cálculo da densidade de empacotamento dada por:

$$F_c = \frac{\pi dl/4}{\pi l^2/4} = \frac{d}{l} = \frac{d}{d/\cos \theta} = \cos \theta \quad (4)$$

Em que,

d = Diâmetro menor da elipse

l = Diâmetro maior da elipse

θ = Ângulo de inclinação da fibra

F_c = Densidade de empacotamento

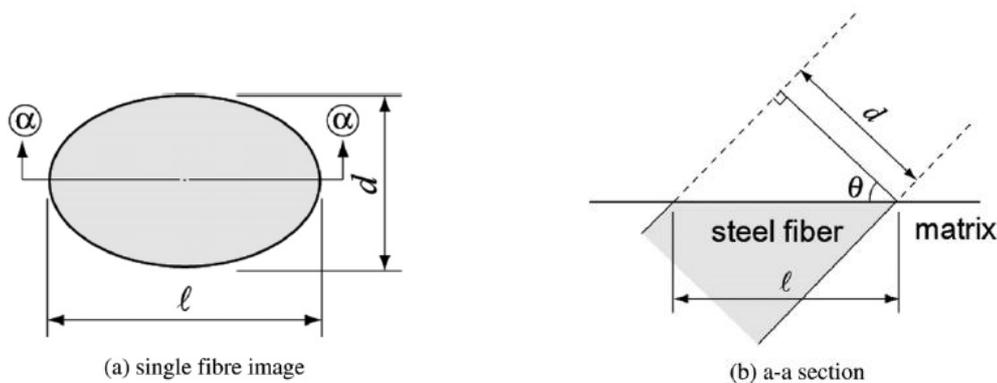


Figura 25 Relação entre o ângulo de inclinação da fibra com a densidade de empacotamento

Na Tabela 2 apresentam-se os resultados obtidos através do programa de processamento de imagem para os dois provetes com direções e betonagem distintos e respetivos cortes. Pela análise da Tabela 2 verifica-se que na secção de corte TL-VC as fibras encontram-se mais uniformemente distribuídas relativamente às restantes secções apresentando um $\alpha_f = 0.40$. Apesar deste parâmetro se apresentar pouco sensível, uma vez que não há grandes variações nos valores para diferentes secções, esta conclusão também é constada na Figura 24. No que diz respeito ao F_c , a secção de corte que apresenta um valor mais elevado deste parâmetro é PL-TC. Os valores de F_c e $\theta(^{\circ})$ apresentados na Tabela 2 representam os valores médios de cada secção em análise.

Tabela 2 Resultados obtidos através do programa de processamento de imagem

	α_f			F_n (number/cm ²)			F_c			θ (°)		
	TC	HC	VC	TC	HC	VC	TC	HC	VC	TC	HC	VC
PL	0.38 (0.019)	0.33 (0.036)	0.35 (0.0021)	49 (1.4)	13 (4.2)	16 (0.90)	0.70 (0.14)	0.49 (0.19)	0.53 (0.19)	45 (11)	60 (13)	57 (13)
TL	0.36 (0.0074)	0.36 (0.012)	0.40 (0.015)	32 (9.6)	27 (3.0)	36 (8.9)	0.56 (0.17)	0.59 (0.16)	0.62 (0.14)	55 (12)	53 (12)	51 (11)

The numerical values in parentheses present the standard deviation.

2.4.3. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO À TRAÇÃO

Ao contrário da medição da resistência à compressão, os ensaios de resistência à tração demonstram grandes fragilidades uma vez que dependendo do equipamento utilizado, mantendo o material de ensaio, os resultados podem apresentar diferenças significativas.

Na Figura 26 apresentam-se equipamentos diferentes para a avaliação da resistência à tração de forma direta e indireta:

- Ensaio à flexão por três pontos com entalhe
- Tração uniaxial em cilindros
- “Wedge Splitting Test” - WST
- Ensaio à flexão por quatro pontos sem entalhe
- e f) Tração uniaxial com amostras de vários formatos

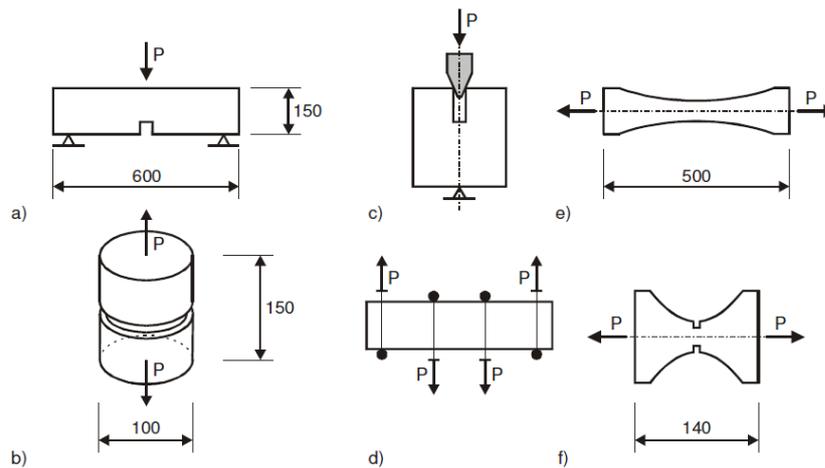


Figura 26 Diversos esquemas de ensaios para avaliar a resistência à tração (b), c), e) e f)) e à flexão (a) e d)) [27]

O ensaio de tração uniaxial é considerado um método de referência para o betão convencional pelo facto de fornecer diretamente a resposta tensão-deformação do betão antes e depois da fendilhação sem necessidade de aplicar transformações aos dados retirados do próprio ensaio. No entanto, o ensaio requer equipamentos sem excentricidade, provetes perfeitos, difíceis de se concretizar, e com reforço adequado nas regiões de extremidade para impedir a anulação do ensaio.

A importância na avaliação da orientação das fibras do betão e as características mencionadas anteriormente inviabilizam a realização do ensaio uniaxial com o intuito de avaliar a influência da orientação das fibras.

As recomendações realizadas pela Association Française de Génie Civil (AFGC) [52], para além de contemplarem o ensaio de tração uniaxial, também recomendam o ensaio de flexão por 4 pontos para a determinação da tensão de tração (Figura 27).

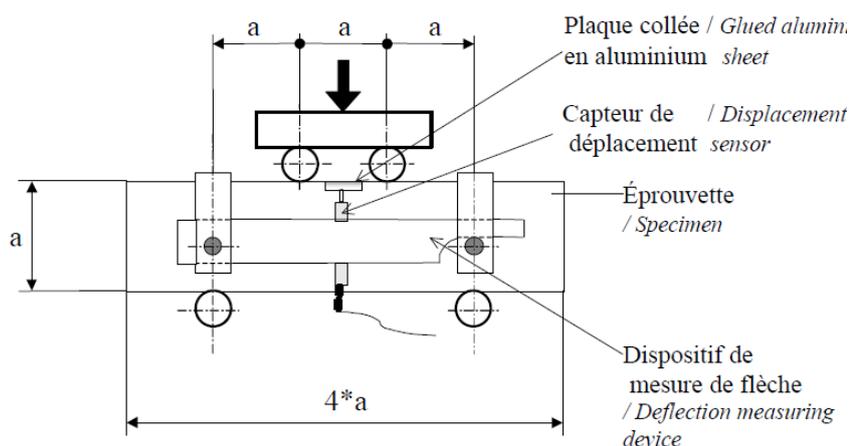


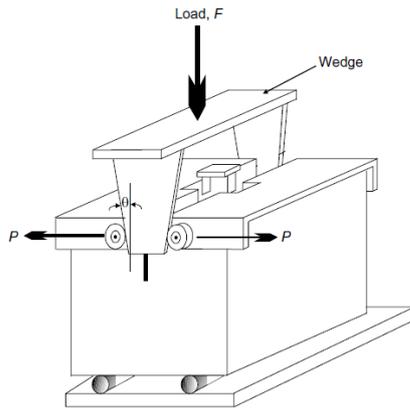
Figura 27 Esquema do ensaio de flexão por 4 pontos [52]

Apesar do ensaio de flexão por 4 pontos necessitar de provetes facilmente executados, quando o ensaio é realizado com provetes de grandes dimensões o peso próprio influencia os resultados dos ensaios. Para além disso, a relação da tensão de tração versus abertura de fendas, normalmente é afetada pela segregação das fibras, principalmente em secções finas, o qual pode resultar na sobrestimação ou subestimação (se o ensaio for realizado na face de betonagem) dos resultados. O facto do ensaio de flexão por 4 pontos não ser direto faz com que seja necessário recorrer a uma análise inversa com o intuito de avaliar a tensão de tração e a lei constitutiva do material.

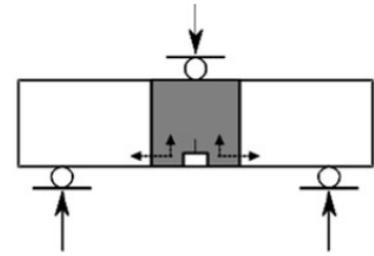
O ensaio Wedge Splitting Test (WST) e o Double-Edge Wedge Splitting Test (DEWST) são métodos alternativos com o intuito de avaliar a resistência à tração. O ensaio WST (Figura 28 a)) é comparado com ensaio de flexão por três pontos com entalhe (Figura 28 b)) pelo facto de as condições de apoio e aplicação da carga serem semelhantes. Este ensaio permite o desenvolvimento de uma tensão de tração indireta com origem numa força de compressão, a abertura de fendas é direcionada devido à existência de um entalhe [55]. Este ensaio apresenta vantagens no que diz respeito à sua simplicidade, estabilidade e a ação do peso próprio do provete é desprezável [54]. No entanto, o ensaio necessita de uma análise indireta para a obtenção da curva que relaciona a tensão de tração com a abertura de fenda.

Quanto ao ensaio DEWST (Figura 29 a)) pode ser comparado a um ensaio de tração axial, como esquematizado na Figura 29 b), não necessitando, portanto, de uma análise inversa. O ensaio consiste na aplicação de uma força vertical (força de compressão), que graças à geometria do provete, é convertida numa força de tração no interior do provete. O esquema da Figura 30 pretende demonstrar a conversão entre as duas forças, esta conversão é concebida devido à existência de duas cunhas com forma triangular com um ângulo de 45° .

Estudos realizados por Prisco *et al* [55] concluem que o fator de atrito entre os vários componentes de distribuição de forças tem uma importância acrescida na contabilização da força de tração desenvolvida. O ensaio é realizado a partir de uma força de compressão que descarrega num varão de aço, este varão descarrega nas placas inseridas nos triângulos, que por sua vez descarregam a força para o provete. O atrito desenvolvido entre os elementos do ensaio é um fator de elevada importância refletindo-se nos resultados finais. Desta forma, os autores usam grafite entre as placas de aço e o varão para reduzir o atrito e assim reduzir o erro do ensaio. A Figura 31 pretende demonstrar o equipamento usado por Prisco e Ferrara tendo como objetivo quantificar o atrito desenvolvido entre os contactos resultando num coeficiente de atrito de $\mu=0.06$. A conversão das forças transmitidas e a contabilização do atrito é desenvolvida com maior detalhe no Capítulo 4.

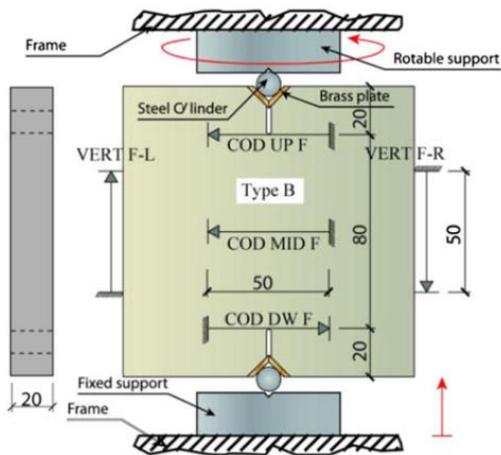


a)

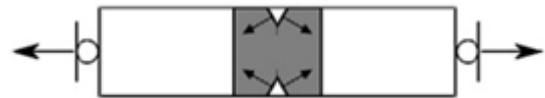


b)

Figura 28 a) Ensaio de Wedge Splitting Test [53]. b) analogia entre o ensaio Wedge Splitting Test e o ensaio de flexão por três pontos com entalhe [55]



a)



b)

Figura 29 a) Ensaio Double-Edge Wedge Splitting Test [55]. b) Analogia entre o ensaio Double-Edge Wedge Splitting Test e o ensaio de tração direta [55]

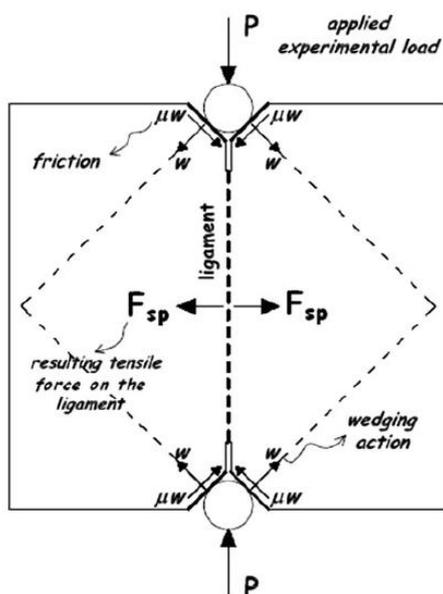


Figura 30 Transformação da força aplicada vertical na força de tração



Figura 31 Equipamento utilizado para a determinação do coeficiente de atrito [55]

2.5. DURABILIDADE DO HPFRC

A durabilidade é caracterizada pela impermeabilidade do betão contra a água, líquidos e gases. O transporte de líquidos e gases, o qual pode ser prejudicial ao betão, ocorre exclusivamente através dos poros capilares os quais estão diretamente relacionados com a densidade de empacotamento da mistura. Com as aplicações e estudos desenvolvidos com o HPFRC é sabido que a durabilidade deste material é substancialmente mais elevada quando comparada com um betão convencional. Na Tabela 3 é possível identificar indicadores da durabilidade de vários tipos de betão. É de realçar que o UHPC apresenta distintivamente uma maior durabilidade. Os betões de muito alto desempenho (VHPC) apresentam características intermédias entre o HPC e o UHPC.

Tabela 3 Indicadores da durabilidade de betões convencionais (NC), HPC, VHPC (betões de muito alto desempenho) e UHPC [51]

	NC	HPC	VHPC	UHPC
Porosidade (%)	14-20	10-13	6-9	1.5-5
Permeabilidade ao oxigénio (m ²)	10 ⁻¹⁶	10 ⁻¹⁷	10 ⁻¹⁸	<10 ⁻¹⁹
Fator de difusão de ião cloreto (m ² /s)	2.10 ⁻¹¹	2.10 ⁻¹²	10 ⁻¹³	2.10 ⁻¹⁴
Conteúdo em Portlandite (Kg/m ³)	76	86	66	0

Para além do tipo de betão existem outros fatores que podem influenciar fortemente a durabilidade deste material, nomeadamente, as microfissuras resultantes da retração autógena ou resultantes de tratamentos térmicos reduzindo significativamente a resistência da argamassa, uma vez que as fissuras são uma passagem para a entrada de agentes agressivos para o interior da mistura [24]. Também existem fatores químicos que levam à degradação do betão nomeadamente cloretos, ácidos e sulfatos.

2.5.1. MÉTODO DE INTRUSÃO DE MERCÚRIO

Scheydt *et al.* [24] desenvolveram um programa experimental com o intuito de avaliar a durabilidade do UHPFRC fazendo a comparação do UHPC com o UHPFRC e com curas distintas aplicando o método da intrusão do mercúrio

O método da intrusão de mercúrio consiste, simplifadamente, em fechar uma amostra porosa num recipiente, degaseificá-la e mergulhá-la de mercúrio líquido. A pressão é aumentada por incrementos sucessivos e, para cada valor de pressão, mede-se o volume de mercúrio forçado a entrar nos poros da amostra. Esta técnica baseia-se no facto de que o mercúrio é um líquido não molhante, quando em contacto com a maior parte das substâncias sólidas. Consequentemente, o mercúrio não penetra naturalmente em pequenas aberturas e/ou fendas dos sólidos, sendo necessário aplicar uma dada pressão no mercúrio para forçar a sua penetração. À medida que o mercúrio entra na amostra é necessário aplicar uma maior pressão para que o mercúrio atravesse os poros cada vez mais pequenos, desta forma a pressão a aplicar é dependente do diâmetro dos poros, pois quanto mais pequeno é o diâmetro maior é a pressão necessária para introdução do mercúrio [25].

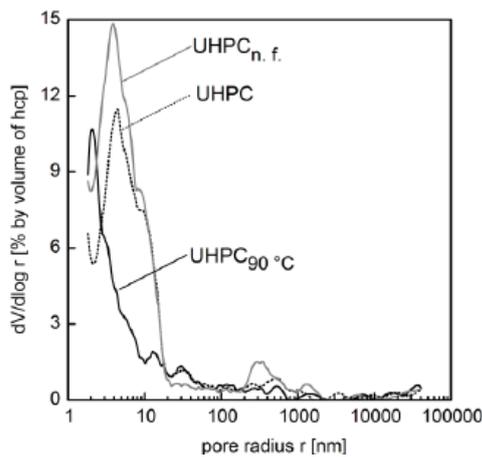
O estudo desenvolvido pelos autores referidos incidiu em 3 amostras distintas, em que as composições encontram-se apresentadas na Tabela 4:

- UHPC (curado em água por 28 dias);
- UHP_{90°} (tratamento a 90° por 3 dias);
- UHPC_{n.f.} (curado em água por 28 dias, sem fibras de aço).

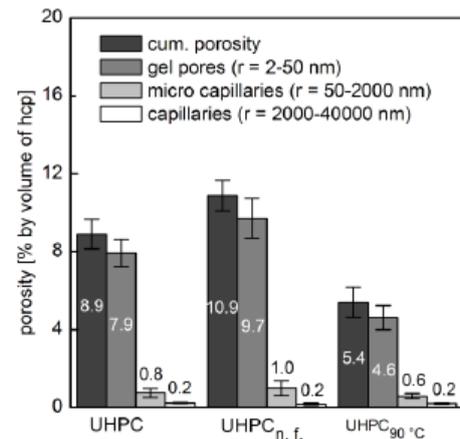
A Figura 32 pretende correlacionar o diâmetro com volume dos poros e com a porosidade. É possível verificar que a amostra UHPC_{90°}, pelo facto de ter sofrido um tratamento a 90° durante 3 dias, apresenta-se mais densa não só na zona capilar ($r=50-40000$ nm) mas também no gel da pasta ($r=2-50$ nm). Por outro lado, a mistura UHPC_{n.f.} apresenta maior porosidade no gel da pasta bem como nos poros capilares.

Tabela 4 Composição da mistura [kg/m³]

CEM I 52,5 R-HS/NA	silica fume	quartz sand	quartz powder	basalt (2/8 mm)	steel fibres (l/d = 8/0.175 mm)	super- plasticiser	mixing water	w/b
582	178	355	458	714	196	28	138	0.21



a)



b)

Figura 32 a) Distribuição do tamanho dos poros $dV/d\log r$ (V- Volume dos poros, r- Raio dos poros). b) Porosidade do betão UHP, UHPCn.f. e UHPC90°

O betão de elevado desempenho (UHPC) apresenta fortes deformações devidas à retração autogénea conduzindo à microfissuração do betão. Esta retração do betão é a principal razão da elevada capilaridade no betão sem fibras. Na Figura 33 a) é possível identificar fissuras com largura entre 0.5 e 2 μ m detetadas a microscópio.

Quando estamos presente numa amostra UHPC_{90°} é possível também a identificação de fissuras a olho nu com largura entre 30 a 100 μ m (representadas na Figura 33 b)) devido ao tratamento a 90° que a amostra sofreu durante 3 dias.

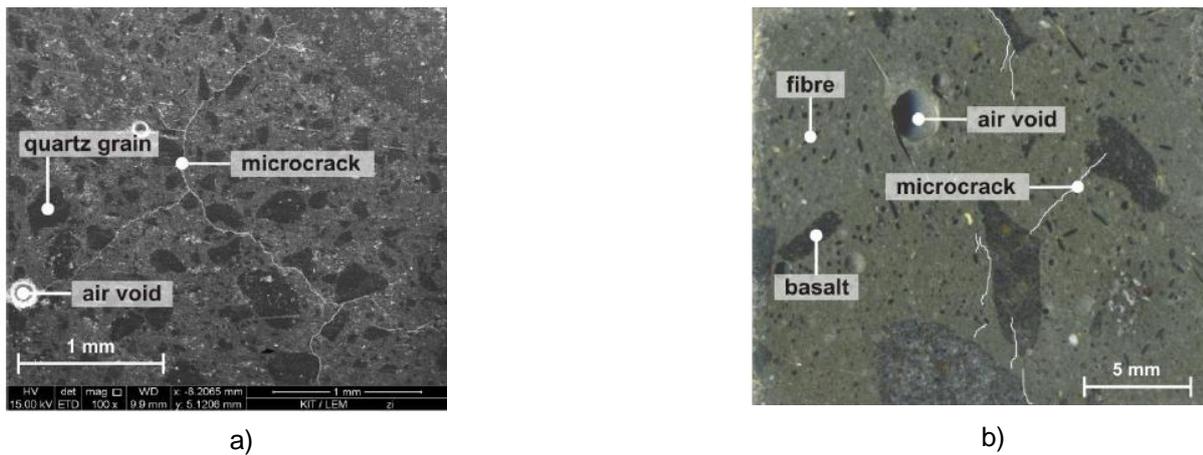


Figura 33 Microestrutura do betão fendilhado. a) UHPC n.f. b) UHPC90°

Analisando a zona de interface entre a pasta de cimento e as fibras verifica-se que com a introdução de fibras na mistura há geração de uma zona de interface entre a pasta de cimento e as fibras onde poderá ser alvo de concentração de poros capilares. Assim, visualizando a estrutura ao microscópio verificam-se poros capilares com 2-4 μm na interface pasta de cimento e fibras na amostra UHPC (ver Figura 34 a)) em oposição à amostra sujeita a um tratamento térmico (UHPC_{90°}- ver Figura 34 b)) onde se verifica uma zona de interface densa.

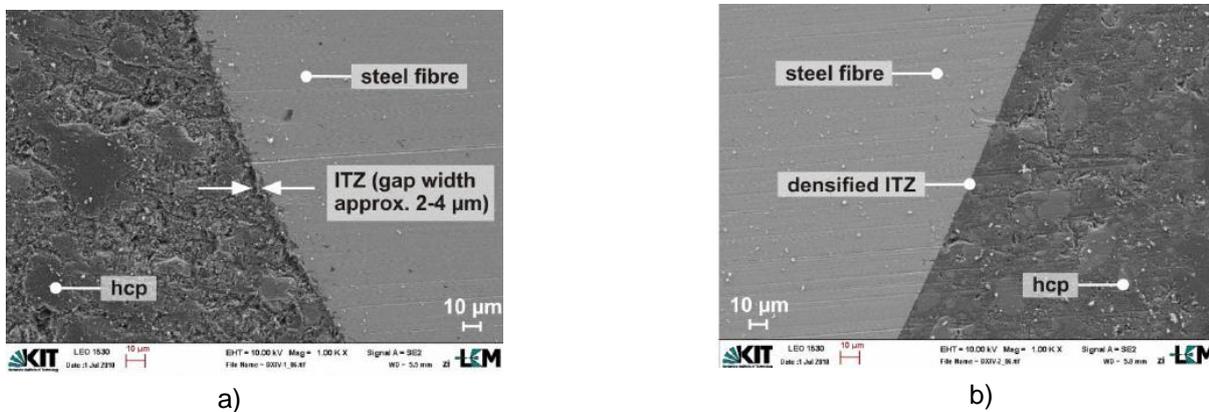


Figura 34 Zona de interface entre a pasta de cimento e as fibras. a) UHPC. b) UHPC_{90°C}

2.5.2. RESISTÊNCIA AO ATAQUE QUÍMICO

Scheydle *et al.* [24] demonstraram também a perda de resistência devido à microfissuração do UHPC pela absorção da solução de NaCl e do ataque de hidrocloreto ácidos. Para este estudo foram avaliadas 3 composições: UHPC, UHPC_{90°} e UHPC_{n.f.} as quais estiveram sujeitas a uma solução de cloretos NaCl durante um período de 16 meses.

A profundidade de penetração de cloretos não é significativamente afetada pela ausência de fibras ou pelo tratamento térmico. No entanto, o teor de cloretos na amostra UHPC_{n.f.} é consideravelmente menor que a amostra que sofreu tratamentos (UHPC_{90°C}) ou curada em água (UHPC). A explicação mais plausível para este efeito deve-se à presença das fibras uma vez que conduzem a um aumento da porosidade na zona de transição entre as fibras e a pasta de cimento que, devido a uma diferença de potencial local, levam à penetração de cloretos. O efeito descrito anteriormente encontra-se representado na Figura 35 onde se constata uma profundidade de penetração semelhante nas três amostras (cerca de 1 mm). As amostras com fibras destacam-se pela quantidade de cloretos no seu interior.

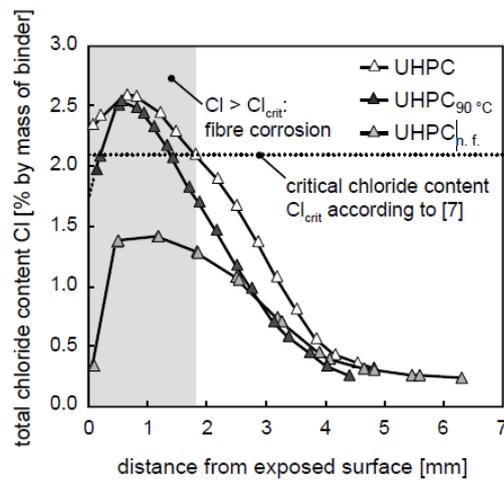


Figura 35 Relação entre a profundidade de penetração e o teor de cloretos nas amostras [25]

O aumento da porosidade na zona de interface fibras e pasta pode ser verificado pela carbonatação do UHPC. Desta forma Scheydle *et al.* [24] armazenaram fatias finas de prismas durante um período de 3 anos a uma temperatura de 20° e a uma humidade relativa de 65%, protegidas do desgaste direto. Verifica-se uma carbonatação máxima de 180 µm de espessura.

Na área circundante das fibras localizadas perto da superfície há um aumento da entrada de CO₂ e assim uma progressiva aceleração da carbonatação mesmo quando a peça é exposta por um período curto de tempo, visível na Figura 36.

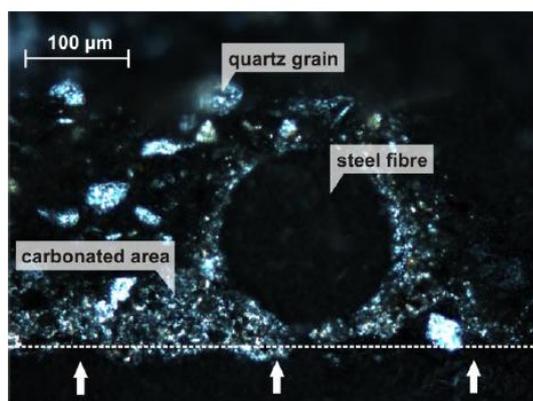


Figura 36 Carbonatação do UHPC na vizinhança da fibra localizada perto da superfície (fatia exposta por um período de 6 meses); a linha a tracejado representa o limite da fatia e as setas a direção de ataque do CO₂)

Scheydle *et al.* [24] concluíram, a partir do trabalho experimental, que as microfissuras resultantes do tratamento térmico ou da retração autogénea podem diminuir significativamente a resistência à penetração de agentes agressivos no betão. Além disso foi comprovado que a zona de interface fibras e pasta de cimento pode enfraquecer o desempenho do betão. Assim, é possível que a resistência do UHPC sem fibras ou densificada pelo tratamento térmico seja igual ou superior que a resistência quando não há tratamento térmico do UHPC reforçado com fibras. Para evitar ou minimizar a fissuração do UHPC_{90°}, provocado pelo tratamento térmico, é possível a aplicação de uma taxa de aquecimento e arrefecimento mais reduzida.

2.6. APLICAÇÕES DO HPFRC

O número de projetos que envolve o HPFRC não é muito elevado pois estes são restringidos pelo facto do material não ser coberto por normas técnicas que já existem para betões normais ou mesmo de alto desempenho, como por exemplo as Normas Europeias EN 206 e as normas de projeto de estruturas de betão [21].

A primeira aplicação de UHPC foi realizada em Sherbrooke no Canadá em 1997 e trata-se de uma ponte pedonal que atravessa o rio The Magog. A ponte apresenta 60 m de comprimento e é composta por uma treliça espacial, 6 elementos pré-fabricados e um tabuleiro superior de 30 mm de espessura [21,22]. Na Figura 37 é possível identificar a ponte numa vista completa e em pormenor.



Figura 37 Ponte pedestre em Sherbrooke no Canadá. a) Vista completa. b) Pormenores [22]

O UHPFRC pode ser aplicado também nas coberturas. É o caso da cobertura das portagens de Millau com cerca de 2300 toneladas (Figura 38). A cobertura apresenta um comprimento de 98 metros e uma largura de 28 metros. Foi realizada com duas lajes finas com 10 cm de espessura ligadas a 12 vigas pré-esforçadas. A construção realizou-se com estes materiais devido ao controlo que os mesmos estão sujeitos na sua fabricação, a facilidade na construção de estruturas com formas complexas e finas mantendo as características deste material.



Figura 38 Cobertura das portagens de Millau [57]

Na Figura 39 é possível observar uma secção transversal de um tabuleiro de uma ponte rodoviária The PS34 realizada num único vão de 47.40 metros de comprimento. O tabuleiro da ponte é constituído por 22 elementos pré fabricados de UHPFRC. A geometria da secção transversal foi especialmente adaptada ao material utilizado apresentando curvas para facilitar a implementação do betão com fibras.

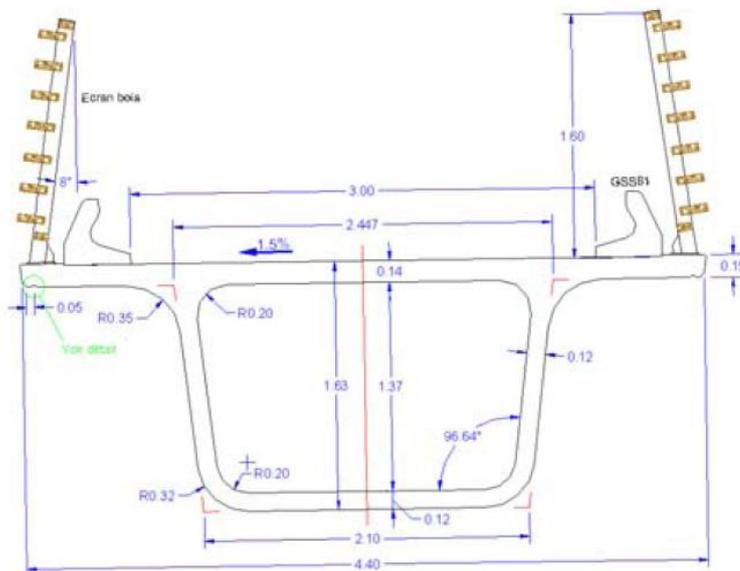
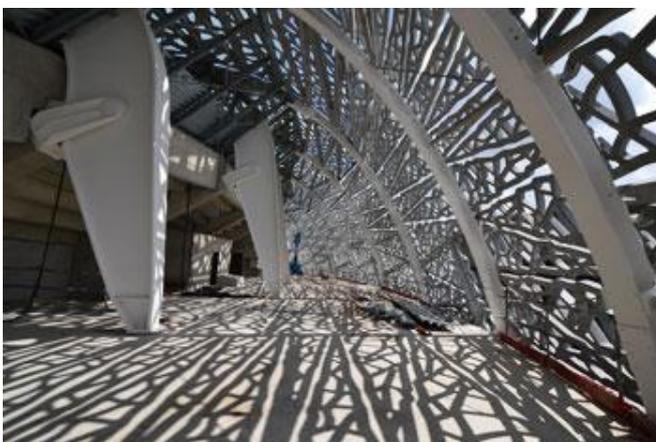


Figura 39 Secção transversal da ponte The PS34 [57]

Um dos maiores projetos em construção com UHPFRC neste momento é o estádio Jean Bouin em Paris, França. O estádio foi projetado segundo o desenho ilustrado na Figura 40 e o UHPFRC pode ser encontrado nos painéis de fachada do estádio os quais estão apresentados na Figura 41.



Figura 40 Estádio Jean-Bouin, Paris [49]



a)



b)

Figura 41 a) Painéis de fachada [80]. b) Pormenorização de um painel [49]

O maior projeto no Japão com UHPFRC é o aeroporto Haden. A construção do aeroporto localiza-se sobre o mar levando a que, na estrutura seja aplicado um material com peso reduzido e com grande durabilidade: UHPFRC. Na Figura 42 encontra-se a vista de cima do aeroporto Haden.



Figura 42 Vista de cima da construção do aeroporto Haden [57]

Uma alternativa económica e interessante é a construção de canais com UHPFRC, os quais têm grandes vantagens relativamente à diminuição significativa do peso da estrutura comparativamente ao betão de resistência normal. A construção do canal é realizada por elementos pré-fabricados que posteriormente são pré-esforçadas na obra. O canal presente na Figura 43 encontra-se ao lado de um aqueduto e apresenta uma extensão de 27 metros de comprimento.



Figura 43 Canal, vista do aqueduto [57]

Estudos realizados por Randl *et al.* [56] demonstraram a viabilidade na construção das paredes do túnel Chain Perchling em UHPFRC. O diâmetro interno do túnel é de 11,50 metros (Figura 44) e apresenta uma espessura de elementos pré-fabricados de betão convencional com 0,30 m (Figura 45). A incorporação do betão de elevado desempenho reforçado com fibras teria um impacto na resistência, na durabilidade, redução nos custos de manutenção e, principalmente, na diminuição de espessura da parede do túnel, reduzindo de 0,30 para 0,22 m.

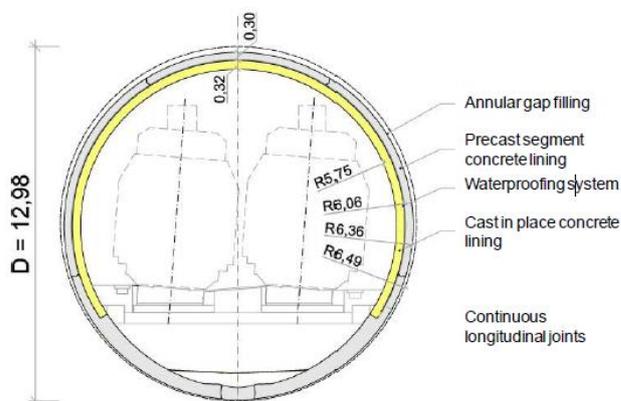


Figura 44 Secção transversal tipo do túnel [56]



Figura 45 Transporte dos elementos pré-fabricados [56]

Este material é também bastante económico e eficiente na reparação e proteção de estruturas sujeitas a correntes, nomeadamente, em pilares e fundações de pontes. Depois da remoção do betão degradado é betonada uma camada fina de UHPFRC. Na Figura 46 é possível analisar o modo como se processa a betonagem deste material no viaduto The Valabres.



Figura 46 Reparação e proteção das fundações e dos pilares do viaduto The Valabres [57]

3

ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS (NDT's)

3.1. INTRODUÇÃO

Os métodos de ensaio para avaliação da integridade das estruturas e das propriedades mecânicas durante a sua construção e/ou ciclo de vida têm sofrido avanços significativos, e dividem-se maioritariamente em dois grandes grupos: ensaios destrutivos e ensaios não destrutivos (NDT's). No passado, os NDT's eram utilizados principalmente para a determinação das propriedades elásticas do meio. Nos dias de hoje, estes métodos, para além das propriedades elásticas, são utilizados também com o intuito de estimar a qualidade e as propriedades mecânicas das estruturas de betão.

O controlo da qualidade das novas construções, ou o grau de deterioração das estruturas existentes, podem ser avaliadas através de ensaios NDT's. O recurso aos ensaios não destrutivos deve-se às dificuldades encontradas na recolha de amostras [13] ou, quando a recolha é possível, as amostras poderão não ser representativas do verdadeiro comportamento do material [9]. Os danos provocados nas estruturas devido à extração de amostras é também outro dos principais inconvenientes dos ensaios destrutivos [13].

A aplicação dos NDT's como solução para os problemas de engenharia civil, por vezes apresenta fragilidades devido, essencialmente, à imprecisão na investigação estrutural ou à utilização de um método inadequado para o problema em causa. Em alguns dos casos estes problemas podem ser resolvidos procurando aconselhamento especializado antes de iniciar o estudo. Sublinha-se ainda que, em outros casos, a condição física da estrutura é muito mais complexa do que o previsto na fase de planeamento do estudo de NDT's o que leva a resultados não previstos.

Há vários tipos de NDT's, nomeadamente, ultrassons, ressonância magnética, magnéticos/elétricos, termografia com infravermelhos, emissão acústica e métodos de propagação de ondas de tensão [13]. Cada um destes ensaios baseia-se em princípios teóricos distintos, e fornecem resultados diferentes sobre as propriedades físicas da estrutura. A interpretação das propriedades físicas, como por exemplo, a velocidade de propagação das ondas de compressão e corte, resistividade elétrica, implicam algum grau de conhecimento sobre as estruturas e o uso de medidas de calibração, sendo este último um fator essencial na maioria dos ensaios não-destrutivos [28].

O facto do betão de elevado desempenho reforçado com fibras (HPFRC) apresentar um comportamento substancialmente diferente dos betões convencionais, implica a necessidade de recorrer a ensaios adequados para uma melhor caracterização. Os ensaios mais comuns utilizados para este fim são:

- Resistividade elétrica;
- Ondas ultrassons;
- Indutância.

O ensaio de resistividade elétrica é utilizado normalmente como indicador da atividade de corrosão nas armaduras e, desta forma, avalia a durabilidade do betão [59]. Além disto, Barnett *et al.* [58] mostraram que é possível avaliar a orientação das fibras do betão através da resistividade elétrica. A Figura 47 ilustra o equipamento utilizado no estudo de Barnett *et al.* [58] para a medição da resistividade elétrica o qual apresenta uma geometria quadrada uma vez que possibilita a medição da resistividade elétrica em duas direções ao mesmo tempo permitindo o acesso à anisotropia elétrica local do betão.



Figura 47 Medição da resistividade com equipamento de quatro sondas [58]

Para além da resistividade elétrica, o método dos ultrassons fornece informações relevantes na caracterização do betão de elevado desempenho devido à grande homogeneidade e compacidade da microestrutura. A Figura 48 ilustra um possível equipamento para a realização de ensaios de ondas ultrassons (UPV). Este método é utilizado essencialmente para a avaliação das propriedades elásticas do meio [9,10], no entanto, este ensaio pode fornecer informações sobre danos no betão, extensão dos danos e a sua progressão, por exemplo, após um sismo [1].



Figura 48 Equipamento utilizado para a medição dos ensaios UPV. [60]

Um outro método utilizado recentemente no HPFRC é o método da indutância. Uma das vantagens deste método consiste no facto de este ensaio ser influenciado apenas pela presença de fibras, o betão envolvente, como não apresenta propriedades magnéticas, não influencia os resultados. A presença e a posição relativa das fibras modificam as linhas do campo magnético geradas pelas sondas, originando uma variação na medição da indutância [6]. Na Figura 49 apresenta-se um exemplo de um equipamento utilizado para a medição da indutância.



Figura 49 Equipamento utilizado para o ensaio de indutância [60]

3.2. RESISTIVIDADE ELÉTRICA

A mudança das propriedades elétricas do betão ao longo do tempo tem sido alvo de estudo para a compreensão da durabilidade do betão. Um dos fatores que inibe a durabilidade das estruturas é a corrosão das armaduras uma vez que a produção de ferrugem conduz a um volume superior ao volume inicial do ferro provocando fissuração do betão envolvente e uma diminuição da secção das armaduras devido à dissolução do ferro. O ensaio de resistividade elétrica é conhecido como sendo um ensaio de elevada importância no controlo da corrosão das armaduras [61], uma vez que, quanto maior a resistividade do betão menor é a corrente que atravessa o betão e, conseqüentemente, menor é o risco de corrosão das armaduras [63].

O desenvolvimento do betão de elevado desempenho reforçado com fibras (HPFRC) levantou novas questões relativamente à orientação e dispersão das fibras. Assim, estudos realizados por Barnett *et al.* [58] demonstram que o ensaio da resistividade elétrica fornece informações qualitativas relativamente à orientação das fibras.

3.2.1. FUNDAMENTOS FÍSICOS

A resistividade elétrica do betão é uma propriedade intrínseca do material que pode ser definida como a resistência que o betão oferece à passagem da corrente. A corrente elétrica é transportada pelos iões dissolvidos na água que fluem através dos poros do betão. Este material, o qual é classificado como semiconductor, apresenta uma grande variação da resistividade devido a:

- a razão água/cimento, tipo de cimento [61];
- adições pozolânicas [61];
- grau de hidratação da mistura [61] (influenciam diretamente a topografia da estrutura porosa);
- distribuição de água [62];
- temperatura [62];
- concentração iónica na solução intersticial [62].

A água é composta maioritariamente por iões Na^+ , K^+ , Ca^{++} , SO^- e OH^- , os quais apresentam concentrações que variam no tempo [60]. Esta variação da concentração de iões faz com que a resistividade do betão varie também com o tempo.

A resistência de um material é dada pela equação (5) sendo diretamente proporcional ao comprimento e inversamente proporcional à área transversal da secção.

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (5)$$

Em que,

R = Resistência

ρ = Resistividade

L = Comprimento

A = Área da secção transversal

A lei de Ohm apresenta-se descrita na equação (6) e afirma que a corrente contínua através de um condutor metálico é diretamente proporcional à potência aplicada e inversamente proporcional à resistência do condutor, assim:

$$R = \frac{V}{I} \quad (6)$$

Em que,

V = Potencial

I = Intensidade de corrente

Nos casos em que o material condutor é um eletrólito, a passagem de corrente contínua, a qual provoca movimento dos eletrões, poderá causar o fenómeno de polarização originando uma diferença de potencial nos elétrodos que se opõe ao potencial aplicado. Neste caso a intensidade de corrente é dada pela equação (7).

$$I = \frac{V_a - V_p}{R} \quad (7)$$

Em que:

V_a = Potencial aplicado

V_p = Potencial de polarização

O potencial de polarização resulta das reações que acontecem nos elétrodos, sendo que estas dependem da sua composição e dos iões presentes na mistura. A polarização resulta numa camada fina de oxigénio, hidrogénio, ou outros gases que se formam sobre os elétrodos e influenciam o potencial gerado [60].

Estudos realizados por Figueiras *et al.* [62] afirmam que as medições de resistividade com corrente alternada e corrente contínua apresentam diferenças. No entanto, estas diferenças são maiores quando o provete se encontra não saturado, sendo que para este caso é recomendado o uso de corrente

alternada. Malhotra *et al.* [60] afirma que o uso de corrente alternada não evita os efeitos de polarização, no entanto, este efeito é maior na presença de corrente contínua. Hughes *et al.* [66] apresentam a mesma conclusão mencionada anteriormente, afirmando ainda que a utilização de pequenas correntes alternadas minimiza o efeito de polarização: pequenas porque evitam a formação de gás e alternadas porque desta forma há inversão dos eléctrodos quimicamente inalterados mantendo-se a concentração de electrólito.

Em geral, a resistividade elétrica do betão aumenta com o tempo (Figura 50). Este aumento será mais elevado para a cura ao ar do que para a cura húmida, uma vez que para a cura húmida o aumento da resistividade ocorre maioritariamente devido à hidratação do cimento e preenchimento dos poros com produtos de hidratação, enquanto que para a cura ao ar, a resistividade tende a ser mais elevada devido à perda de água do betão [59].

A Figura 50 ilustra a evolução da resistividade com o tempo de um betão com fibras e sem fibras. É possível verificar que para além do aumento da resistividade do betão com a idade também se verifica uma diminuição da resistividade no betão com o aumento da percentagem de fibras

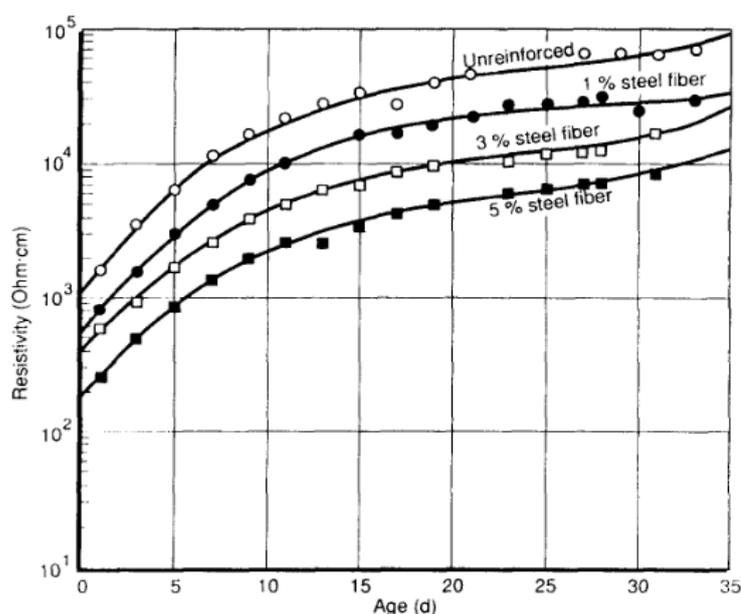


Figura 50 Evolução da resistividade com o tempo de um betão reforçado com fibras [68]

3.2.2. MÉTODOS DE ENSAIO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA

A resistividade elétrica denota-se como um ensaio não-destrutivo pelo facto da medição desta grandeza se realizar junto da superfície do betão. Os ensaios requerem no mínimo dois eléctrodos, em que um deles poderá ser o varão de armadura [63]. Nesta secção serão abordados três tipos de ensaios de resistividade:

- Um único eléctrodo externo;
- Método dos dois eléctrodos;
- Método dos quatro eléctrodos (Método de Wenner).

O resultado do ensaio de resistividade virá em intensidade de corrente se for aplicada uma tensão entre os dois eléttodos ou em tensão caso seja aplicada uma intensidade de corrente. A resistividade e a resistência são calculadas com estas duas grandezas através da aplicação das equações (5) e (6), respetivamente [63].

3.2.2.1. Um único eléttodo externo

O ensaio de um único eléttodo externo encontra-se esquematizado na Figura 51 e envolve um eléttodo com a forma de disco situado na superfície do betão e sobre um varão (segundo eléttodo). A resistência elétrica é calculada entre o disco e o varão. Esta grandeza pode ser convertida em resistividade utilizando a constante da célula que varia com distância do disco à armadura (recobrimento - variável ao longo da superfície) e com o diâmetro das armaduras. O cálculo preciso desta constante não é possível, pois o fluxo de corrente não pode ser previsto. Desta forma, a máxima precisão é conseguida através da determinação empírica da constante da célula, utilizando provetes de betão com resistividade conhecida [63].

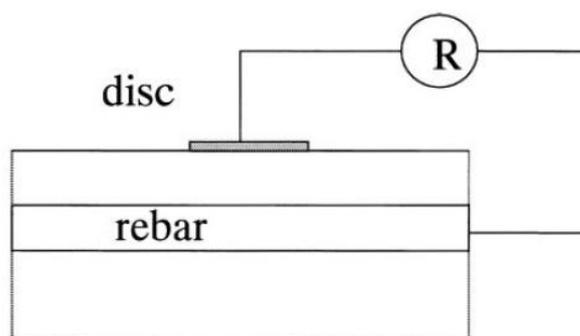


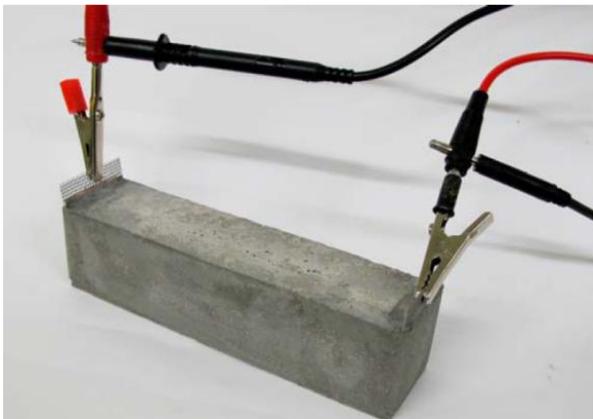
Figura 51 Esquema de ensaio com um único eléttodo externo para avaliar a resistividade [63]

3.2.2.2. Método dos dois eléttodos

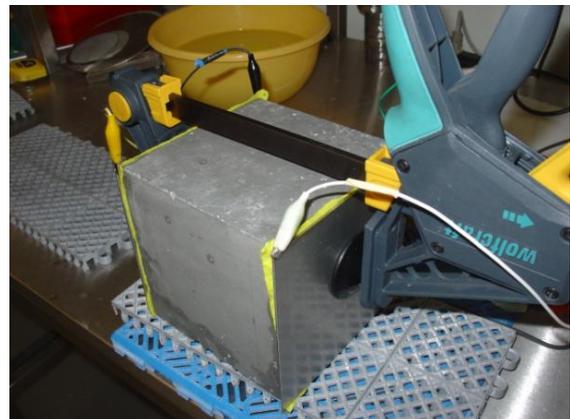
No que diz respeito ao método dos dois eléttodos, quando a medição da resistividade por este método for planeada na fase de projeto com o intuito da manutenção da estrutura ou para estudos de laboratório, os dois eléttodos metálicos deverão ser instalados antes da betonagem: eléttodos embebidos [63,64]. Caso não seja planeado é possível a realização do ensaio por meio de duas placas de aço pressionadas nas duas faces opostas: eléttodos externos [63,64].

Como referido anteriormente o método dos dois eléttodos divide-se em dois tipos: eléttodos embebidos e eléttodos externos. Estes dois métodos distinguem-se na resistência de contacto eléttodo/betão, em que para uma dada diferença de potencial, o aumento da resistência de contacto entre o eléttodo e a superfície de betão reduz a corrente que atravessa o betão [62]. Na Figura 52 a) é possível observar o método dos dois eléttodos embebidos aplicado a um prisma com dimensões $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ e na Figura 52 b) apresenta-se o método dos dois eléttodos externos empregue num provete cúbico cujas dimensões são $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$.

Para o estudo da resistividade de um betão, argamassa ou pasta é comum a utilização de redes de aço inox como elétrodos embebidos, desta forma é garantida uma boa aderência entre o material e os elétrodos. No que diz respeito à utilização de elétrodos externos, o contacto elétrodo-betão pode ser concebido através de pasta de cimento no estado fresco, géis de grafite ou esponjas humedecidas cujos materiais apresentem uma baixa resistência e devem ajustar-se às pequenas irregularidades da superfície do betão [62]. A resistência adicional devido ao material empregue no contacto elétrodo/betão no ensaio com elétrodos externos deverá ser contabilizada. Estudos realizados no LABEST [62] afirmam que a resistividade dos provetes medidos pelo método dos elétrodos exteriores é sempre mais elevada que nos provetes com elétrodos embebidos.



a)



b)

Figura 52 Métodos dos dois elétrodos. a) Método dos dois elétrodos embebidos [79]. b) Método dos dois elétrodos exteriores [62]

O método dos dois elétrodos é muito sensível a qualquer desvio no valor da área de contacto [65,63]. A Figura 53 ilustra o efeito da área de superfície de contacto nos resultados de resistividade pelo método dos dois elétrodos e pelo método dos quatro elétrodos. Pela análise da figura constata-se que no método dos quatro elétrodos a resistividade, para diferentes áreas de contacto, mantém-se aproximadamente constante. Já no método dos dois elétrodos os valores de resistividade decrescem exponencialmente com o aumento da área de contacto.

Polver *et al.* [63] afirmam que, na prática, o método dos dois elétrodos apresenta uma menor precisão e é de difícil reprodução, desta forma o método dos dois elétrodos quer embebidos quer externos não são recomendados.

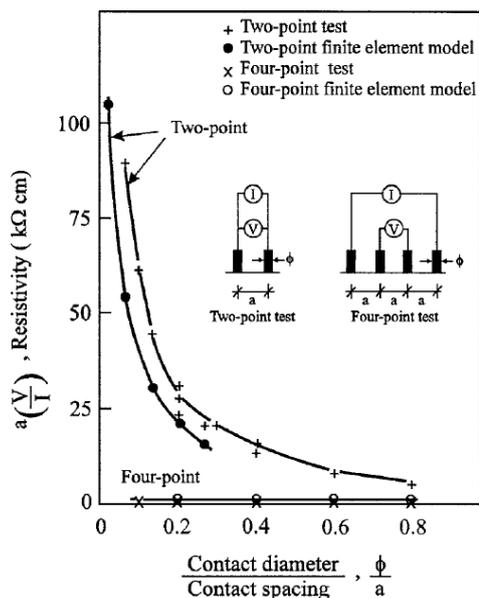


Figura 53 Efeito da área de superfície de contacto na medição da resistividade [65]

3.2.2.3. Método dos quatro elérodos - Método de Wenner

O método de Wenner é a técnica com maior utilização com o intuito de determinar a resistividade elétrica em situações práticas [65]. Este método consiste em pressionar os quatro elérodos, igualmente espaçados entre si, sobre a superfície de betão, em que os dois elérodos extremos induzem a corrente e os dois elérodos intermédios registam a diferença de potencial [63]. Este método foi desenvolvido inicialmente para prospeções geofísicas, mas recentemente é aplicado também no betão [65].

O método de Wenner é constituído por quatro elérodos igualmente espaçados entre si, em que os elérodos exteriores são ligados a uma fonte de corrente alternada, e os elérodos interiores a um voltímetro. [60] A resistividade elétrica aparente é calculada segundo a equação (8).

$$\rho = \frac{2 \times \pi \times s \times V}{I} \quad (8)$$

Em que:

ρ = Resistividade aparente

s = Espaçamento entre elérodos

V = Diferença de potencial

I = Intensidade de corrente

A resistividade é conotada de aparente pelo facto de a equação (8) assumir que o material é semi-indefinido e homogéneo. Qualquer desvio nos pressupostos, o cálculo de resistividade pode não estar de acordo com a resistência verdadeira do material. A Figura 54 ilustra um esquema do método dos quatro eléttodos e as linhas de corrente originadas no decorrer de um ensaio.

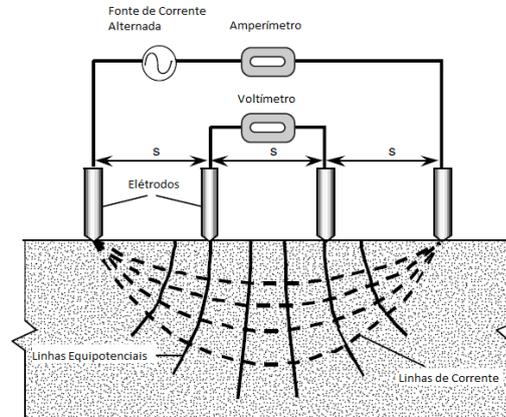


Figura 54 Método dos quatro eléttodos, adaptado [60]

O método dos quatro eléttodos requer uma utilização cuidada tendo em conta todos os pressupostos associados ao mesmo, caso contrário os erros nas leituras podem ser significativos [60,65]. Estes erros podem ter várias naturezas, nomeadamente:

- geometria do provete [65];
- heterogeneidade do betão [65];
- mau contacto de superfície [65];
- camadas superficiais com resistividades distintas [65];
- presença de armadura [65];
- mudança de condições ambientais [65];
- inadequação do espaçamento dos eléttodos relativamente ao material em estudo [60, 61].

De seguida abordam-se com mais pormenor algumas das fontes que mais induzem erros no processo de medição da resistividade elétrica.

3.2.2.3.1. Restrições geométricas

Estudos realizados por Sengul *et al.* [61] afirmam que o espaçamento entre os eléttodos apresenta um efeito significativo na resistividade, assim o autor refere que as medições em betão armado devem ser realizadas com espaçamentos relativamente pequenos em relação ao recobrimento da armadura, caso contrário o resultado da resistividade diminui devido à passagem de corrente pelas armaduras. Esta conclusão advém do interesse no estudo do betão e não propriamente da armadura, uma vez que a distância dos eléttodos influencia a profundidade das linhas de corrente. No caso de betão simples as dimensões do elemento também influenciam o valor da resistividade elétrica do betão, uma vez que se as dimensões do provete forem reduzidas a corrente é restringida levando a uma sobrestimação dos resultados da resistividade. A Figura 55 mostra a relação das dimensões de uma dada peça e o espaçamento dos eléttodos com a resistividade. Na Figura 56 pretende-se demonstrar a influência da resistividade na proximidade dos eléttodos à extremidade da peça [65]. Com as figuras mencionadas anteriormente conclui-se que, quanto maiores as dimensões dos provetes e mais afastado estiverem os eléttodos dos extremos da peça menor o erro da resistividade associado à geometria.

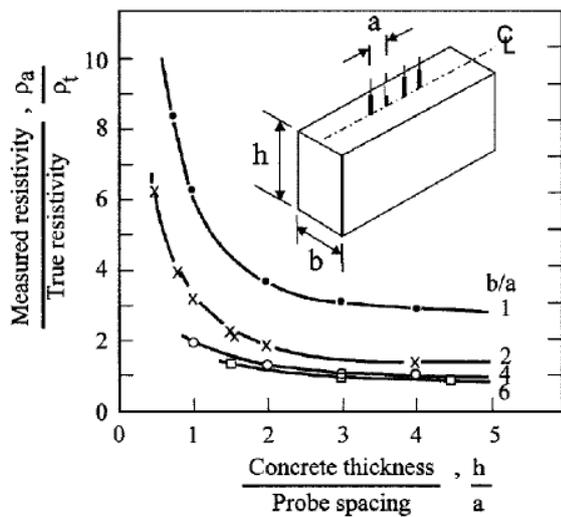


Figura 55 Efeito das dimensões da secção de betão nos resultados de resistividade [65]

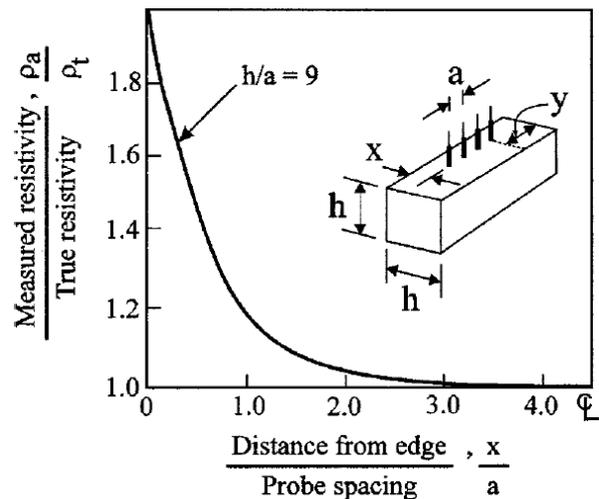


Figura 56 Efeito de bordo e da proximidade do extremo nos resultados de resistividade [65]

3.2.2.3.2. Heterogeneidade do betão

A heterogeneidade do betão consiste essencialmente na diferença de tamanho das partículas dos constituintes do material. Assim, o espaçamento dos eléctrodos terá de estar de acordo com a dimensão máxima dos agregados, em que, quanto maior o tamanho dos agregados maior o espaçamento entre os eléctrodos [60].

3.2.2.3.3. Superfície de contacto

Á área de superfície de contacto, como foi referido anteriormente, não afeta significativamente no método dos quatro eléctrodos, no entanto, influencia drasticamente no método dos dois eléctrodos. No entanto, para ambos os métodos é necessário um bom contacto entre o betão e os eléctrodos [65]. O bom contacto é conseguido através da limpeza e da humedificação da superfície do betão e das esponjas em ambos os métodos [63].

3.2.2.3.4. Camadas superficiais com resistividades distinta

Outro fator que afeta o cálculo da resistividade é a presença de uma camada superficial de espessura reduzida com baixa resistividade. A presença desta camada faz com que a resistividade diminua consideravelmente influenciando o verdadeiro valor do betão [60].

3.2.2.3.5. Presença de armadura

No que diz respeito à presença de armadura no betão há um erro associado devido ao fluxo da corrente que intersectar a armadura. Este erro é muito significativo se o ensaio for realizado na direção paralela à localização das armaduras. Se o ensaio tomar a direção perpendicular ou relativamente afastado da armadura paralela o erro perde significado [65].

No caso de um betão com fibras, em que as fibras tendem a distribuir-se uniformemente pelo betão, as linhas de corrente são intersectadas pelas fibras. Neste tipo de betão a resistividade é fortemente afetada não só pelos eletrólitos presentes nos poros mas também pelos materiais condutores existentes, as fibras de aço [67].

Estudos realizados por Barnett *et al.* [58] e por Lataste *et al.* [67] demonstram a utilização da resistividade como um ensaio não-destrutivo capaz de fornecer informação sobre a orientação das fibras. Nestes estudos realizaram-se ensaios de resistividade elétrica em várias direções com o intuito de avaliar a resistividade e correlacioná-la com a respetiva orientação das fibras [67].

No estudo realizado por Lataste *et al.* [67] foram comparados os resultados de resistividade com a análise visual das fibras durante o processo de betonagem. Os autores verificaram uma uniformidade entre as duas análises, na medida em que, para uma direção onde visualmente se apresentavam mais fibras orientadas a resistividade atingiu valores inferiores. Estes resultados verificam-se devido ao facto de as fibras apresentarem condução elétrica fazendo com que a corrente elétrica seja conduzida pelas fibras resultando numa diminuição da resistividade. Contrariamente, quando as fibras se encontram perpendiculares à direção da corrente elétrica a influência da condução das fibras é menor.

Barnett *et al.* [58] estudaram também o efeito da orientação das fibras no ensaio de resistividade. No entanto, os resultados da resistividade elétrica foram comparados com imagens dos planos de corte dos provetes em estudo retiradas pelo método da tomografia computacional de raios X (raios-X TC). A Figura 57 representa uma imagem retirada pelo processo mencionado anteriormente com descrição da orientação das fibras envolvidas no estudo desenvolvido por Barnett *et al.* [58].

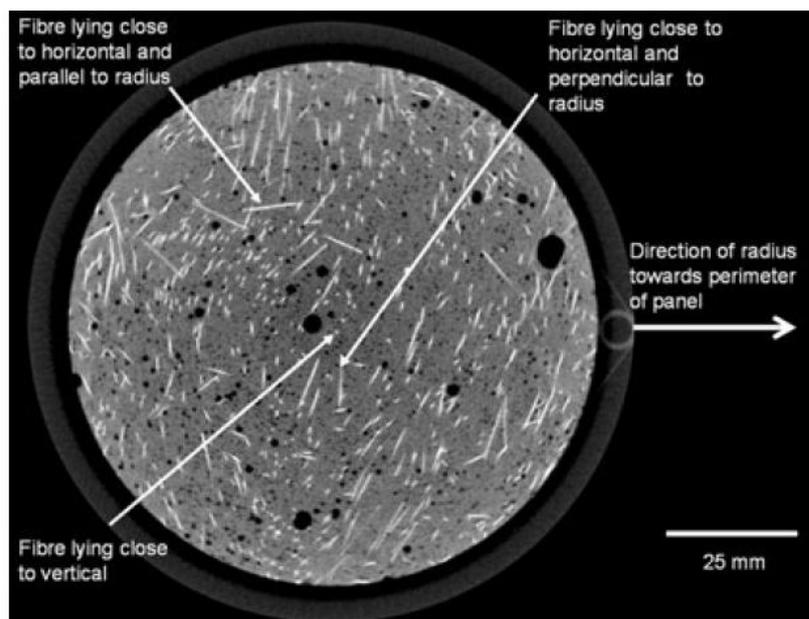


Figura 57 Utilização da imagem raios-X TC para a avaliação da orientação das fibras [58]

3.2.2.3.6. Variações das condições ambientais

A temperatura tem um efeito muito significativo na resistividade do betão. Polder [63] recomenda que as condições atmosféricas muito quentes ou muito frias sejam evitadas. A relação entre a resistividade e a temperatura do ar é apresentada na Figura 58. Nesta figura observa-se uma diminuição significativa da resistividade com o aumento da temperatura.

A Figura 59 ilustra um resumo das recomendações associadas ao método dos quatro elétrodos baseadas nos resultados experimentais de Gowers *et al.* [65].

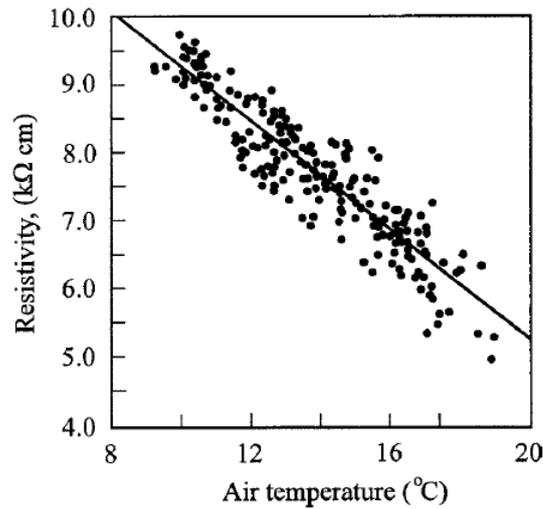


Figura 58 Relação entre a resistividade e a temperatura do ar [65]

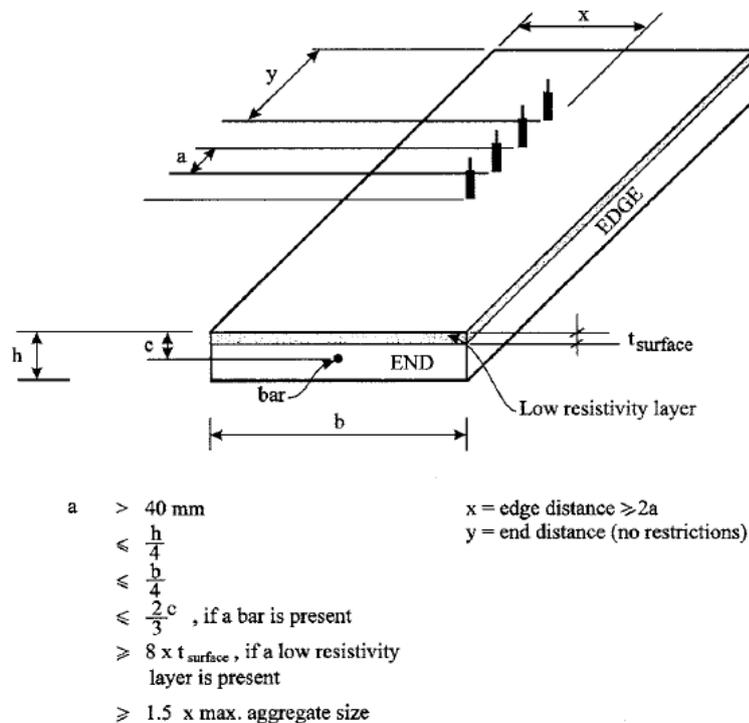


Figura 59 Recomendações para a realização do ensaio dos quatro elétrodos [65]

3.3. ENSAIOS DE ULTRASSONS (UPV)

Em meados do ano 1940 surgiram nos EUA os primeiros relatos sobre a medição da velocidade dos impulsos gerados mecanicamente no betão. Desta forma foi descoberta a relação entre velocidade destes impulsos com as propriedades elásticas do material [10].

A aplicação do ensaio de ultrassons no âmbito dos betões de elevado desempenho (UHPC) deve-se ao facto de o material apresentar composições de granulometria mais fina e mais uniforme comparativamente aos betões usuais levando a que o comprimento de onda dos impulsos sejam aproximadamente 10 vezes menor.

O equipamento utilizado para a medição dos ultrassons é um aparelho moderno, robusto, de custo relativamente baixo, fácil de operar e fiável. No entanto, é necessário que os operadores se encontrem aptos e conscientes dos fatores que afetam o ensaio. É necessário também que os resultados sejam devidamente tratados e analisados por engenheiros experientes que se encontrem familiarizados com este método [10].

Os resultados dos ensaios de ultrassons podem fornecer variadíssimas informações do betão em estudo, nomeadamente [71]:

- uniformidade;
- existência de fissuras e vazios;
- controlo da qualidade do betão;
- condição e deterioração;
- profundidade as fissuras de superfície;
- determinação a resistência do betão.

3.3.1. FUNDAMENTOS FÍSICOS

O espectro sonoro é constituído não só pelos sons audíveis mas também pelos ultrassons e infrassons. A gama de frequências de um som audível situa-se entre 20 Hz e os 20KHz. Os sons com frequências abaixo deste intervalo designam-se por infrassons e os sons acima do intervalo por ultrassons.

O princípio do ensaio de ultrassons baseia-se na interação das ondas sonoras com a estrutura interna do material [16] uma vez que quando um sinal sonoro é emitido por uma fonte há transferência de energia mecânica para as partículas que constituem o meio material fazendo com que estas oscilem em torno da sua posição de equilíbrio.

Para os ensaios de ultrassons não destrutivos são utilizadas frequências de vibração altas com baixas amplitudes, uma vez que o uso de amplitudes altas poderia resultar num aquecimento, numa deformação permanente ou fissuração do material a ensaiar, tornando-se assim num método destrutivo [16].

Quando uma massa sólida é sujeita a um impulso são geradas três tipos de ondas mecânicas: ondas de compressão (também designadas por ondas P), ondas transversais (ondas S) e ondas de superfície (ou ondas de Rayleigh).

A Figura 60 ilustra os três tipos de ondas e o correspondente modo de propagação das ondas descritas anteriormente. As ondas de compressão movimentam as partículas na direção de propagação das ondas e apresentam maiores velocidades. No entanto, a amplitude das ondas é baixa [73]. Estas ondas fornecem uma maior informação sobre as propriedades elásticas do meio. Por outro lado as ondas S fazem com que as partículas vibrem na direção transversal à direção de propagação das ondas. Por último, as ondas de Rayleigh provocam um movimento das partículas seguindo uma trajetória helicoidal, esta trajetória é ilustrada na Figura 61 [75].

Na equação (9), (10) e (11) apresentam-se as relações existentes entre a velocidade dos três tipos de ondas com as propriedades elásticas de um meio [73].

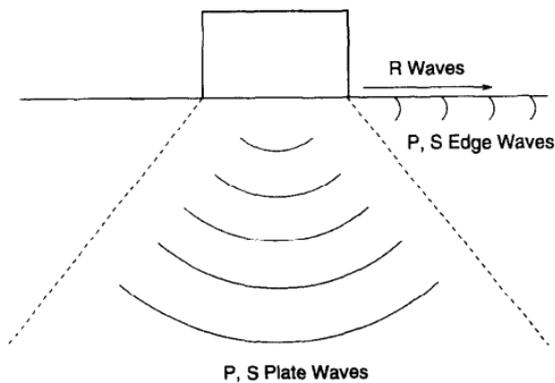


Figura 60 Três tipos de ondas geradas por um transdutor [73]

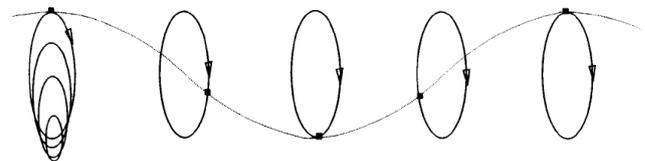


Figura 61 Ondas de Rayleigh [75]

$$V_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (9)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{E}{\rho \times 2(1-\nu)}} \quad (10)$$

$$V_r = \frac{0.87 + 1.12\nu}{1 + \nu} \sqrt{\frac{E}{\rho \times 2(1 + \nu)}} \quad (11)$$

Em que:

V_p = Velocidade das ondas de compressão

V_s = Velocidade das ondas transversais

V_r = Velocidade das ondas de superfície

E = Modulo de elasticidade dinamico

ν = Coeficiente de Poisson dinâmico

ρ = Densidade

O equipamento de medição dos ultrassons é composto por dois transdutores. Um dos transdutores produz e introduz a onda no interior do betão (transmissor) e o outro deteta a chegada da onda (recetor) [60]. O equipamento pode ser ligado a um osciloscópio ou a um computador para observar a natureza do impulso recebido. Na Figura 62 apresenta-se um esquema do funcionamento do equipamento utilizado nas medições do tempo de propagação de onda. Usualmente, o tempo de percurso da onda no interior do betão é registado pelo aparelho. No entanto, os resultados do ensaio normalmente apresentam-se em velocidade de propagação de onda, a conversão é realizada a partir da equação (12).

$$V = \frac{d}{t} \quad (12)$$

Em que,

V = Velocidade de propagação da onda

d = Distância percorrida pela onda

t = Tempo de percurso da onda

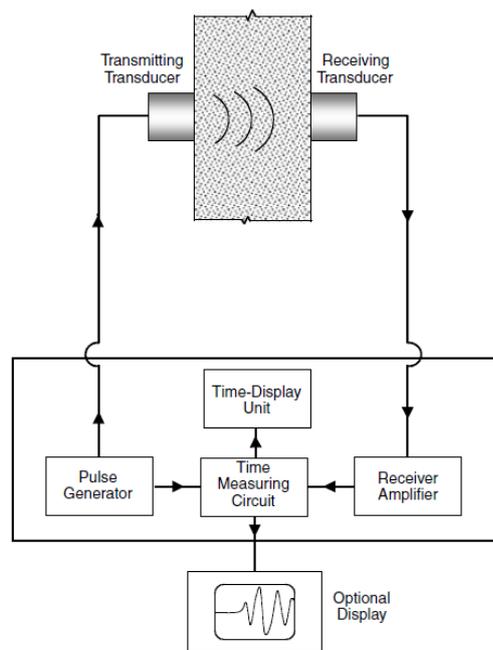


Figura 62 Esquema do ensaio de ultrassons [60]

O transdutor emite ondas P e S na direção axial e na direção radial. As ondas S apresentam energias relativamente baixas e por este motivo os ultrassons baseiam-se nas ondas de compressão (ondas P). Por outro lado, as ondas R apresentam-se com uma energia substancialmente maior propagando-se apenas pela superfície. A Figura 63 ilustra um sinal transmitido e o recebido pelos transdutores no ensaio de ultrassons num bloco de granito por transmissão direta (como se explica em 3.3.2.). Pela análise da figura verifica-se que a onda P é a primeira a ser detetada no recetor pelo facto de apresentar uma maior velocidade. As ondas R evidenciam-se com atraso em relação às primeiras constatando-se pelo aumento da amplitude do sinal devido à grande energia que possui.

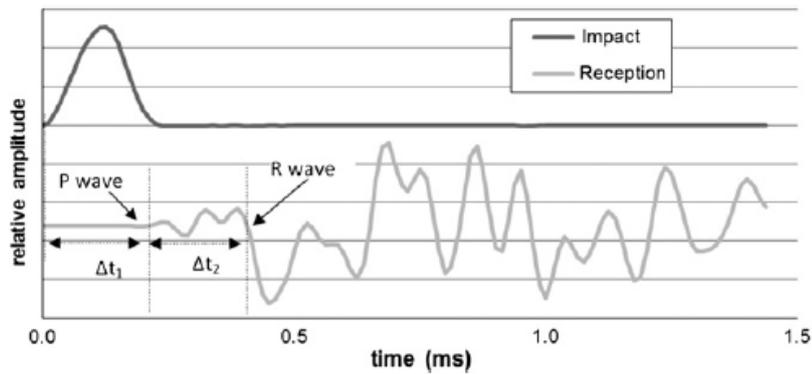


Figura 63 Exemplo de uma transmissão e correspondente recepção de um sinal transmitido pelo método indireto num bloco de granito [74]

3.3.2. LOCALIZAÇÃO DOS TRANSDUTORES

Há 3 formas de colocação dos transdutores Figura 64 [10]:

- Faces opostas (transmissão direta)
- Faces adjacentes (transmissão semidirecta)
- Na mesma face (transmissão indirecta)

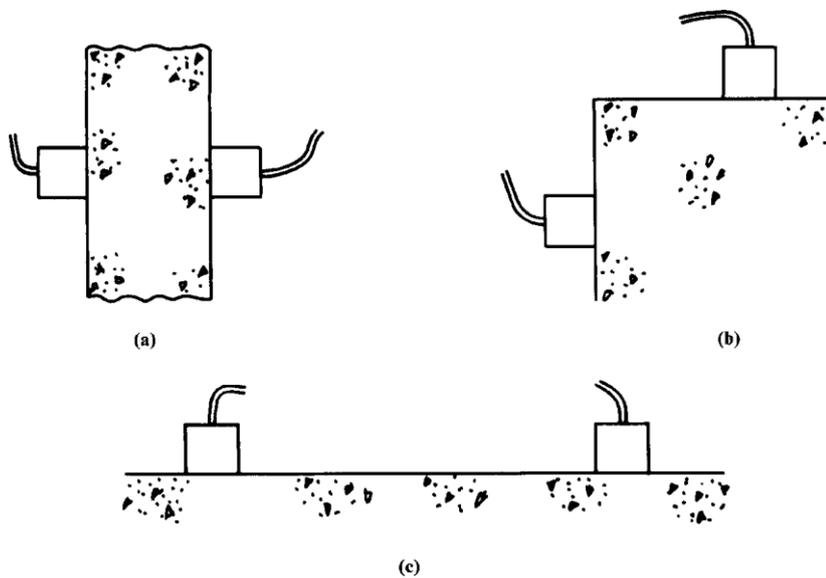


Figura 64 Tipos de leituras: a) directa; b) semidirecta; c) indirecta [10]

A energia transmitida pelo transdutor é máxima na direção perpendicular à face do transmissor, o que faz com que o método direto apresente resultados mais fiáveis. Para além disso, como os transdutores se encontram colocados em faces opostas, é possível identificar claramente a distância percorrida pela onda, e desta forma avaliar a velocidade de propagação da onda. No que diz respeito ao método semidirecto, este apresenta resultados satisfatórios quando os valores do ângulo entre transdutores e a distância entre si não são muito elevados. Os ensaios indirectos oferecem resultados ainda menos satisfatórios pelo facto de a onda transmitida sofrer processos de reflexão devido a descontinuidades, a velocidade do impulso é influenciada pela superfície de betão e o comprimento do percurso da onda ser incerto.

Os ensaios diretos por vezes apresentam dificuldades na sua aplicação em obra, pois nem sempre há disponibilidade de duas faces opostas para a realização do ensaio. Desta forma, para minimizar os erros é necessário realizar uma série de ensaios em que o transmissor é fixado num determinado local e o recetor é colocado em distâncias diferentes (ver Figura 65). Através dos resultados dos ensaios é possível construir um gráfico em que a distância entre o recetor e o transmissor é representado no eixo das abcissas e o tempo de transmissão da onda no eixo das ordenadas (ver Figura 66). A inclinação da reta construída pela aproximação linear destes pontos é definida como sendo a velocidade de propagação da onda. No caso de a reta apresentar descontinuidades possivelmente deve-se à existência de fissuras na superfície ou à existência de uma camada de material diferente no interior da estrutura [10].

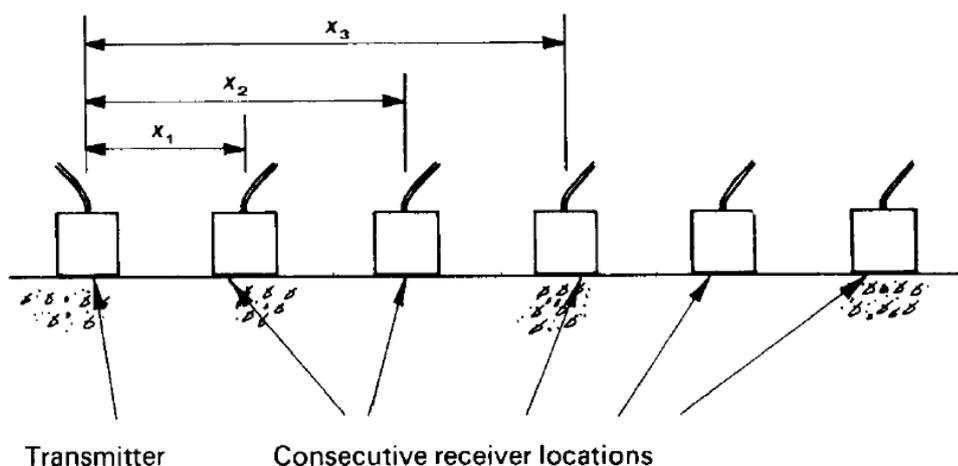


Figura 65 Localização do transmissor/Recetor [10]

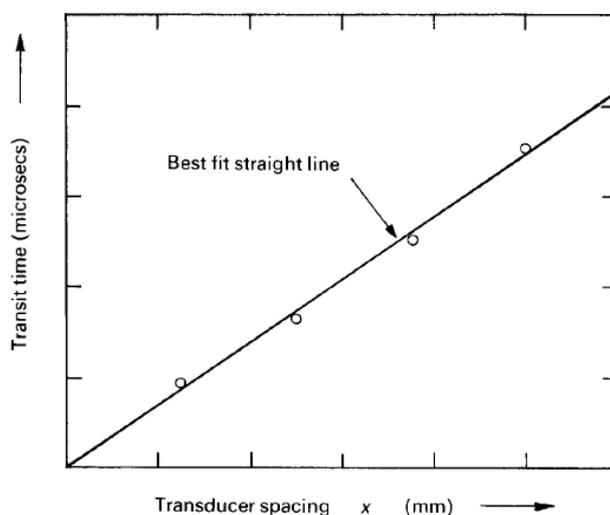


Figura 66 Gráfico: Distância percorrida/tempo de transmissão da onda

3.3.3. PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM OS UPV

A Figura 67 representa a evolução ao longo do tempo da velocidade dos ultrassons, da percentagem de poros e sólidos e da ligação entre partículas de uma pasta de cimento com a razão água/cimento de 0.45. É possível constatar que a velocidade dos ultrassons apresenta uma correlação com a quantidade de poro, de sólidos presentes na estrutura e da ligação entre partículas. Este facto deve-se ao fenómeno de hidratação do cimento ao longo do tempo, o que faz com que a estrutura fique mais compacta originando uma maior ligação entre partículas e portanto a velocidade das ondas aumenta com o tempo.

A densidade da estrutura é função da razão água/cimento e varia com o decorrer do tempo. Desta forma, para razões de água/cimento baixas a estrutura apresenta-se mais densa e portanto maior é a velocidade de propagação das ondas de ultrassons [71]. Esta conclusão é retirada da Figura 68 onde se ilustra a evolução da velocidade dos ultrassons para diferentes razões de água/cimento.

A Figura 69 representa o efeito da temperatura no processo de cura do betão na velocidade dos ultrassons, constatando-se que a temperatura de cura é outro fator que influencia as reações intrínsecas do betão e portanto a velocidade de propagação das ondas também se altera. Na figura observa-se que quanto maior a temperatura de cura do betão menor o tempo de fase dormente e maior é a taxa de crescimento dos ultrassons. É de realçar que a velocidade de propagação das ondas tende a aumentar com o aumento da temperatura de cura devido essencialmente à velocidade das reações de hidratação promovidas por materiais cimentícios. Este aumento de velocidade resulta de um aumento de produtos de hidratação e, conseqüentemente, de uma microestrutura mais compacta em idades avançadas [72].

O efeito da adição de fibras na microestrutura do betão é alvo de estudos contínuos uma vez que as fibras têm uma elevada importância no comportamento do betão de elevado desempenho. Como é possível constatar na Figura 70 a evolução da velocidade de propagação de ultrassons com diferentes percentagens de fibras é semelhante ao betão sem fibras. No entanto a adição de fibras adia o processo de formação da microestrutura do betão, o que faz com que o período de dormência seja mais alargado quanto maior a percentagem de fibras na mistura [72].

A velocidade de propagação de onda no betão com armadura é frequentemente mais elevada do que em betão simples com a mesma composição. Isto deve-se ao facto de a velocidade de propagação da onda de compressão em aço é de 1.4 a 1.7 vezes maior que em betão simples. Por vezes a propagação da onda é realizada uma parte pelo betão e outra parte pela armadura, o que faz com que a velocidade de propagação atinja valores mais elevados. Este aumento depende da proximidade dos transdutores à armadura, das dimensões e do número de varões e da orientação dos varões em relação à direção de propagação das ondas [60]. De igual modo, em betão reforçado com fibras a velocidade de propagação das ondas tende a aumentar pois as velocidades de propagação das ondas nas fibras é aproximadamente de $V_p=5900$ m/s e $V_s=3230$ m/s, valores consideravelmente superiores ao betão sem fibras [8].

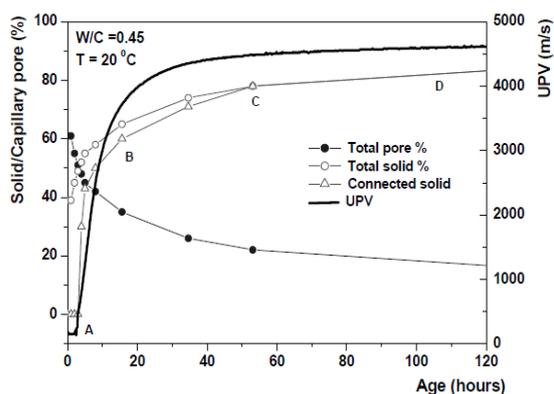


Figura 67 Evolução nas primeiras horas da velocidade das ondas ultrassons, da percentagem de poros e sólidos e a ligação entre partículas [70]

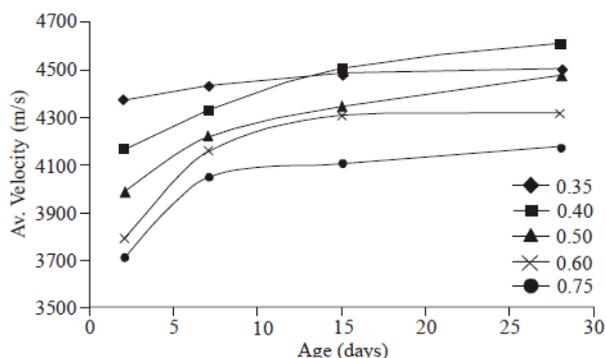


Figura 68 Evolução da velocidade ao longo do tempo para diferentes razões água/cimento [71]

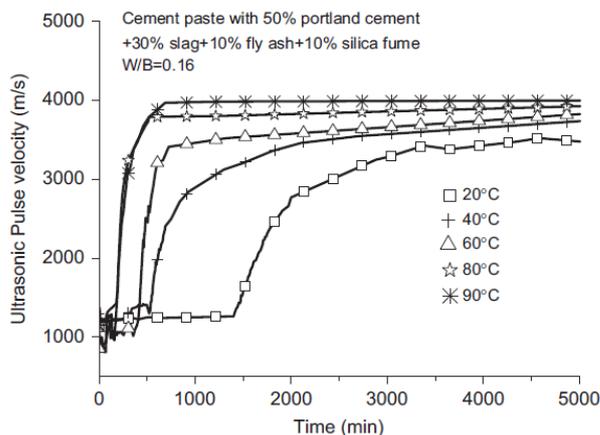


Figura 69 Efeito da temperatura no processo de cura nos UPV [72]

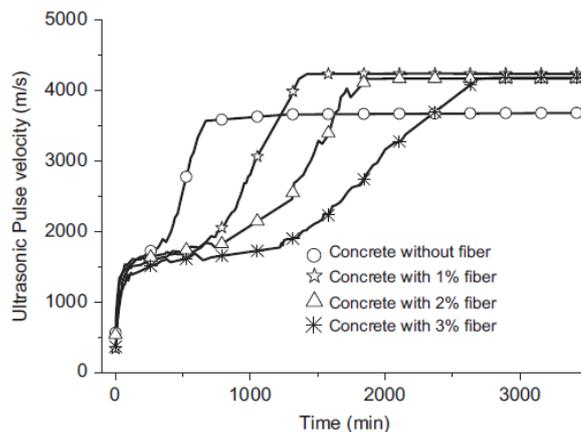


Figura 70 Efeito das fibras na velocidade de propagação dos ultrassons [72]

Na Tabela 5 apresenta-se a velocidade de propagação das ondas de ultrassons tendo em conta a qualidade do betão. Assim verifica-se um crescimento da velocidade para um betão com uma densidade elevada e portanto com maior qualidade.

Tabela 5 Correlação entre a velocidade de onda ultrassons com a qualidade do betão [11]

Velocidade de onda (m/s)	Condições gerais
>4575	Excelente
3660 - 4575	Bom
3050 - 3660	Razoável
2135 - 3050	Mau
<2135	Muito Mau

3.3.4. ESTUDO REALIZADO POR GLAUBITT E MIDDENDORF [8]

Glaubitt e Middendorf utilizaram o método dos ultrassons para avaliar as propriedades elásticas do betão com e sem fibras. As propriedades do meio foram determinadas a partir da velocidade das ondas P, das ondas S e da densidade registadas em dois cilindros. Na Tabela 6 é possível observar as características dos cilindros utilizados no estudo.

Tabela 6 Características dos cilindros

Cilindros	Diâmetros ¹ [cm]	Comprimento [cm]	Fibras
CYL1	15, 8, 15	30	-
CYL2	15, 8, 15	30	1.5% (lf/df (mm)=9/0.15)

Os resultados das velocidades de propagação nos dois cilindros apresentam-se na Tabela 7. Verifica-se que o provete CYL2 (com fibras) exibe uma velocidade menor que o provete CYL1 contrariamente ao que era esperado pelo facto de a velocidades de propagação das ondas nas fibras ($V_p=5900$ m/s e $V_s=3230$ m/s) apresentar valores consideravelmente maiores que no betão. Para averiguar a contradição constatada nos resultados, os cilindros foram serrados obtendo-se os cortes apresentados na Figura 71.

Tabela 7 Resultados obtidos das velocidades longitudinais e transversais nos dois cilindros

Cilindros	V_p [m/s]	V_s [m/s]
CYL1	4890	3183
CYL2	4870	3193

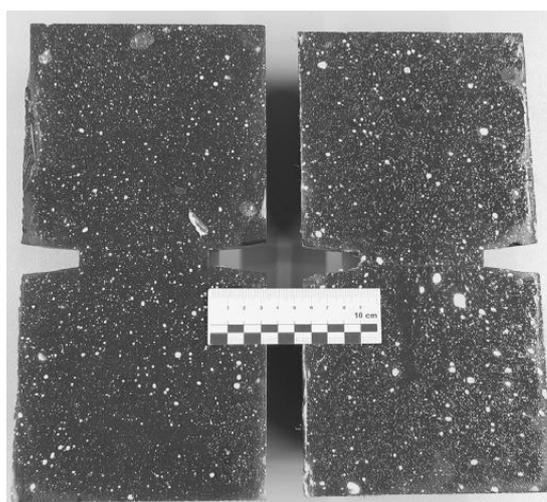


Figura 71 Corte dos cilindros em estudo. As partículas brancas representam os poros existentes na estrutura; Esquerda: CYL1 (sem fibras); Direita: CYL2 (com fibras)

¹ O diâmetro no centro dos cilindros é de 8 cm devido à existência de uma cavidade. Nos extremos dos cilindros apresentam um diâmetro de 15 cm. Na Figura 71 é possível observar o aspeto dos cilindros.

É sabido que as fibras de aço reduzem a trabalhabilidade do betão fresco UHPC, no qual resulta uma compactação de má qualidade. Esta compactação origina por sua vez amostras com grandes quantidades de vazios. Com a análise da Figura 71 verifica-se uma maior quantidade de poros no cilindro com fibras quando comparado com o cilindro sem fibras. O provete com fibras apresenta uma densidade 0.05 g/cm^3 maior do que os provetes sem fibras. Os resultados anteriores, que aparentemente são contraditórios, referem-se à densidade elevada das fibras. Caso os dois cilindros exibissem a mesma porosidade, a amostra com fibras deveria apresentar uma densidade maior em 0.08 g/cm^3 .

A densidade (ρ), o módulo de elasticidade (E) e o coeficiente de Poisson (ν) indicados na Tabela 8 foram determinados com base no conhecimento da velocidade de propagação das ondas e na aplicação das equações (13) e (14).

$$V_p = \sqrt{\frac{E(1 - \nu)}{\rho(1 + \nu)(1 - 2\nu)}} \quad (13)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{E}{\rho \times 2(1 + \nu)}} \quad (14)$$

Tabela 8 Velocidade das ondas e propriedades da composição do cilindro 1 (sem fibras) e do cilindro 2 (com fibras)

Resultados	Unidades	CYL1	CYL2
Velocidade de onda longitudinal V_p	m/s	4890	4870
Velocidade de onda transversal V_s	m/s	3183	3193
Densidade aparente ρ	g/cm^3	2.26	2.31
Módulo de elasticidade dinâmico E_{din}	N/mm^2	51 860	52 900
Coeficiente de Poisson dinâmico ν_{din}	-	0.13	0.12

Analisando os resultados da Tabela 8 verifica-se uma maior densidade no CYL2 devido à densidade das fibras de aço embora esta amostra apresente uma maior porosidade. Como era de esperar o módulo de elasticidade no provete CYL2 é superior ao CYL1. No que diz respeito ao coeficiente de Poisson, este apresenta valor mais elevado CYL 1 uma vez que o nível de porosidade é menor.

Os resultados determinados no presente estudo encontram-se na gama de valores para o betão UHPC apresentando um módulo de elasticidade cerca de 50 GPa e o coeficiente de Poisson entre 0.16-0.24. É de notar que as constantes determinadas dinamicamente são superiores às mesmas determinadas estaticamente e portanto verifica-se que os cilindros apresentam um coeficiente de Poisson e um módulo de elasticidade inferior.

3.4. INDUTÂNCIA

A corrente elétrica que circula por um condutor gera um campo magnético (fluxo magnético) à sua volta, o que induz no condutor uma corrente de sentido contrário ao sentido inicial, este fenómeno é conhecido como autoindução. A relação entre o campo magnético e a intensidade da corrente induzida é denominado por indutância, deste forma a indutância é dependente das características físicas e geométricas do material condutor.

Os materiais que contêm ferro, níquel e cobalto são fortemente atraídos entre si quando se encontram magnetizados; estes materiais intitulam-se como materiais ferromagnéticos e são os materiais mais utilizados no HPFRC. Outros materiais, como por exemplo o oxigénio, são pouco atraídos por campos magnéticos e denominam-se por materiais paramagnéticos [60].

Como foi referido anteriormente, Lataste *et al* [67] demonstrou que o método da resistividade deteta a orientação das fibras, no entanto é incapaz de fornecer informação sobre a concentração de fibras uma vez que a resistividade é influenciada pela presença de fibras e também pelos eletrólitos presentes nos poros. Assim o efeito de condução das fibras levou ao desenvolvimento de outro método baseado nas propriedades magnéticas das fibras. O princípio do método baseia-se no facto de que a presença e a posição relativa das fibras no betão reforçado com fibras modificam as linhas de campo magnético provocadas por uma sonda magnética. Deste modo, inserindo o betão no circuito magnético de uma bobine, a medição da sua indutância permite medir indiretamente a permeabilidade magnética do betão, por comparação das indutâncias da bobine com betão e com o ar no espaço utilizado. O esquema da Figura 72 pretende demonstrar o princípio do método descrito anteriormente

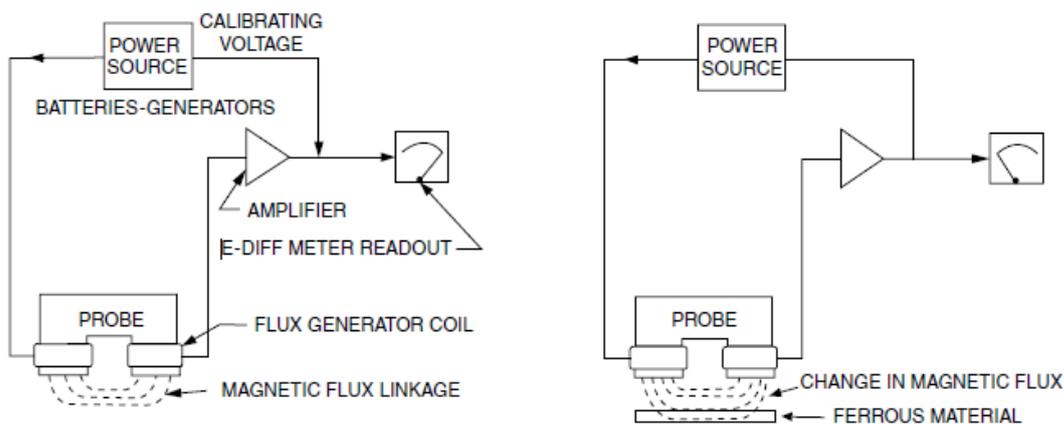


Figura 72 Princípio de funcionamento do método de indutância com o intuito de localizar armadura [60]

O betão reforçado com fibras é composto por dois materiais com diferentes propriedades magnéticas. Desta forma, temos a matriz base de cimento caracterizada pela permeabilidade magnética μ_0 e as fibras com a permeabilidade μ_{Fe} , sendo que $\mu_{Fe} \gg \mu_0$ [61]. A consideração de um provete com dimensões muito maiores que o comprimento das fibras, leva a considerar que o comprimento das fibras e a distância entre elas é muito mais baixa que o comprimento de onda considerado na análise. Desta forma, é possível desprezar os efeitos de dispersão provocados por inclusões [61].

Para a concretização da sonda magnética Ferrara *et al* [6] utilizaram um núcleo magnético com forma de C enrolado com N voltas de fio condutor. Quando o núcleo é pousado no provete a indutância própria da bobine é influenciada pela concentração de fibras, assim quanto maior for a indutância da bobine maior é a influência na concentração das fibras, desta forma o número de voltas não influencia os resultados da permeabilidade do betão. A indutância também é influenciada pela orientação do núcleo magnético e a orientação média das fibras. Desta forma quando o eixo magnético da bobine e a orientação média das fibras se encontram alinhados o valor de indutância é máximo.

Nas Figura 73 e Figura 74 apresenta-se um esquema e um circuito magnético da sonda envolvendo os efeitos do betão reforçado com fibras.

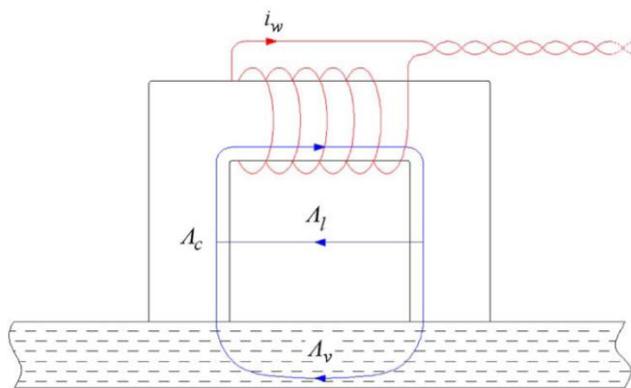


Figura 73 Sonda Magnética [69]

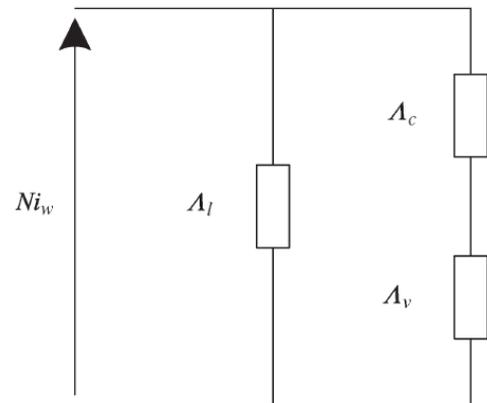


Figura 74 Circuito magnético da sonda na medição da permeabilidade do betão com fibras [69]

A permeância (A) de um circuito magnético corresponde à condutância num circuito elétrico sendo este o inverso da resistência elétrica e é definida como sendo a capacidade que um circuito magnético apresenta em conduzir o fluxo magnético.

Uma bobine pode ser apresentada como sendo uma fonte de força magnetomotriz (MMF) Ni_w , onde i_w é o fluxo de corrente que atravessa a bobine. Parte do fluxo magnético gerado pela bobine não é importante para a medição do provete (A_l). A outra parte do fluxo pode ser visto como uma conexão em série entre a queda de tensão magnética devido ao núcleo magnético e a permeância constatada pelo caminho de fluxo magnético ente os dois polos, A_c e A_v , respetivamente. O fluxo magnético entre os dois polos está associado estritamente à concentração de fibras e ao ângulo destas com direção do núcleo de ferrite. Assim, o circuito magnético consiste numa conexão paralela entre a MMF, permeância A_l e uma conexão em série com as permeâncias A_c e A_v [69]. A permeância A_v divide-se em dois termos A_{v0} e ΔA_v , em que o segundo termo diz respeito á presença de fibras no provete [69]. A Figura 75 ilustra uma simulação da densidade de fluxo magnético onde se observa as permeâncias referidas anteriormente.

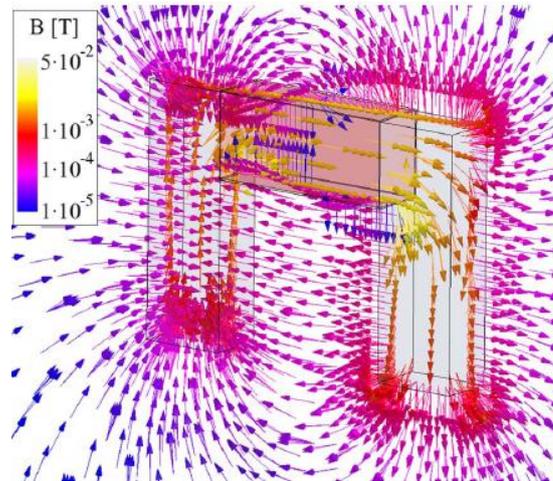


Figura 75 Simulação da densidade de fluxo magnético [69]

A indutância é função do número de voltas na espira, o que leva a que quanto maior o número de voltas maior este valor. A permeância e a indutância são calculadas segundo as equações (15), (16) e (17)

$$L = N^2 \Lambda \quad (15)$$

$$\Lambda = \mu_0 \mu_r \frac{A}{l} \quad (16)$$

$$L = \mu_0 \mu_r N^2 \frac{A}{l} \quad (17)$$

Em que:

L = Indutância (Henry – H)

N = Número de voltas na espira

Λ = Permeância

μ_0 = Permeabilidade do vácuo – $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$

μ_r = Permeabilidade do material

A = Área do núcleo que envolve as espiras

l = Comprimento núcleo envolvido pela espira

Faifer *et al.* [69] estudaram a influência da orientação das fibras numa laje com dimensões de $1.0 \times 0.5 \times 0.025 \text{ m}^3$ utilizando este método não-destrutivo. A Figura 76 mostra a relação entre os valores das medições de indutância compensada na laje em função do ângulo das sondas e da frequência aplicada. O presente gráfico mostra que a orientação média das fibras faz 0° com a direção da sonda, uma vez que é nesta direção que a indutância é máxima. Este resultado resultou da auto-compactabilidade do betão utilizado permitindo que o betão fresco flua paralelamente ao lado mais longo (direção 0°). No gráfico ainda é possível observar uma grande simetria nos resultados o que leva a uma maior confiança nos resultados. É de realçar que os valores apresentados não se referem à indutância total mas sim à indutância originada apenas pelas fibras (indutância compensada). Esta indutância relaciona a indutância obtida diretamente do ensaio com a indutância da própria bobine (indutância avaliada distante de elementos ferromagnéticos). A indutância compensada é obtida pela equação (18).

$$\Delta_l = L_{ensaio} - L_{bobine} \quad (18)$$

Em que:

Δ_l = Indutância compensada

L_{ensaio} = Indutância total do ensaio

L_{bobine} = Indutância própria da bobine

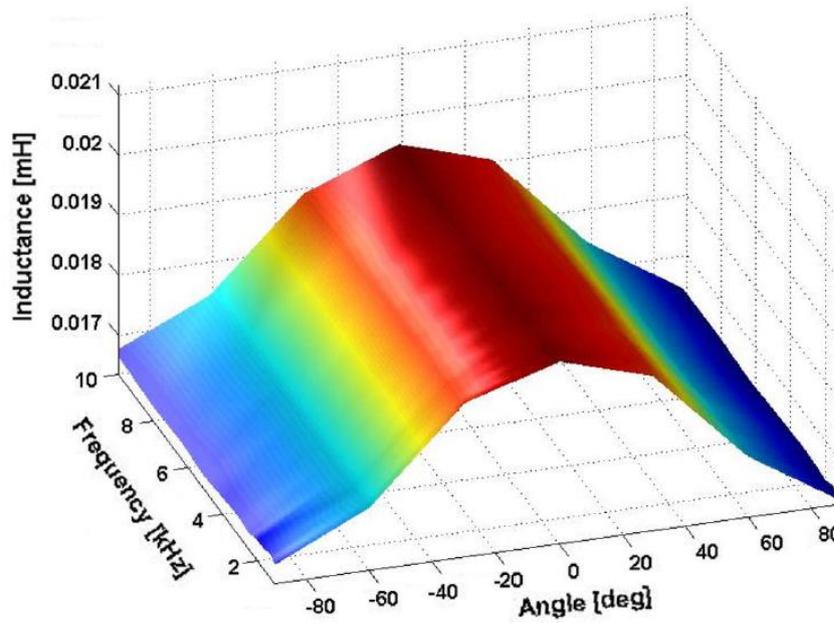


Figura 76 Valores de indutância compensada medidos em diferentes direções [69]

4

PROGRAMA EXPERIMENTAL

4.1. INTRODUÇÃO

Conforme referido no primeiro capítulo, a presente dissertação enquadra-se num Projeto de investigação desenvolvido na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto intitulado por “BETOFIBRA-Betões de elevado desempenho reforçado com fibras em soluções inovadoras: conceção, caracterização e controlo de qualidade”. Desta forma, um dos aspetos a abordar em relação ao material descrito é a orientação das fibras e o efeito destas na resistência à tração.

A orientação e o volume de fibras utilizadas nas composições do HRFRC influenciam significativamente o desempenho mecânico do material, nomeadamente no que diz respeito ao aumento da tensão após a abertura da primeira fenda. Este comportamento, verificado pela existência de fibras, é semelhante ao comportamento do betão armado capaz de absorver as tensões até ao limite de resistência do aço [76]. É de esperar que a orientação das fibras, segundo a direção das tensões principais de tração, conduza a resistências de tração mais elevadas, devido à maior eficiência das fibras durante o processo de tração. A presença de fibras neste material faz com que o material possua uma maior energia de absorção e portanto uma maior ductilidade [1].

No presente capítulo pretende avaliar-se a influência da orientação e da concentração de fibras na resistência à tração e ductilidade deste material para que, desta forma, se atinja uma melhor caracterização do material. A avaliação é efetuada a partir dos ensaios não-destrutivos descritos no capítulo 3 e pela realização do ensaio destrutivo “Double-Edge Wedge Splitting Test” (DEWST) apresentado no final do mesmo capítulo. Os ensaios realizaram-se no Laboratório da Tecnologia do Betão e do Comportamento estrutural – LABEST que disponibilizou os materiais, equipamentos e meios necessários para a execução dos trabalhos.

4.2. CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS

A composição da mistura utilizada nos ensaios da presente dissertação baseou-se em trabalhos publicados por diversos investigadores [77]. Na Tabela 9 apresentam-se algumas das composições típicas mais utilizadas no âmbito do betão de ultra elevado desempenho reforçado com fibras (UHPRC) [77]. Os materiais aplicados no decorrer deste estudo e que posteriormente serão apresentados com maior detalhe foram: cimento, sílica de fumo, fíler de calcário, areia fina, água, superplastificante e fibras.

Tabela 9 Composições e propriedades de diversos UHPFRC disponíveis no mercado [77]

	Ductal®		BSI®		CRC®		CEMTEC multiscale®		BCV®	
	Tipo	Kg/m ³	Tipo	Kg/m ³						
Cimento	Portl.	746	-	1114	-	-	CEM I 52.5	1050	-	-
Silica de fumo	-	242	-	169	Binder	930	-	275	-	2115
Fíler	-	224	-	-	-	-	-	-	-	-
Areia	0.1-0.6	1066	0-6	1072	0-5	1325	<0.5	730	2-3	-
Água	w/c	0.19	w/c	0.19	w/b	0.16	w/c	0.181	w/c	0.25
Superplasticificante	Chryso	9	SIKA	40	-	-	Chryso	35	-	21.5
Fibras	lf/df (mm) =13/0.2	161	lf/df (mm) =20/0.3	234	lf/df (mm) =12/0.4	150-300	lf/df (mm)=10/0.2	470	lf (mm) =13 a 20	156
Desp (mm)	-	700	-	640	-	-	-	-	-	750
fct,28 (MPa)	-	8	-	8.8	-	-	-	20	-	8
fcm,7	Cura a 20°	101 MPa	Cura a 20°	165 MPa	-	-	-	-	Cura a 20°	98 MPa
fcm,28	Cura a 20°/90°	124/198 MPa	Cura a 20°	199 MPa	Cura a 20°/90°	150/400 MPa	Cura a 20°	168-200 MPa	Cura a 20°/90°	130-150 MPa

4.2.1. CIMENTO

O cimento Portland utilizado foi do tipo CEM I 42.5 R o qual foi produzido na fábrica da Secil em Outão e apresenta uma massa volúmica de 3160 kg/m³. A finura do cimento utilizado foi determinada através do Método Blaine (Método de permeabilidade ao ar) de acordo com a norma NP EN 196-6:2010. O método consiste na determinação do tempo que demora uma dada quantidade de ar a atravessar uma camada compacta de cimento com dimensões e porosidade especificadas, através deste tempo é possível a obtenção da superfície específica do cimento. A determinação da superfície específica serve principalmente para verificar a uniformidade do processo de moagem numa determinada instalação [29]. Na Tabela 10 é possível identificar os resultados do ensaio mencionado anteriormente. Devido ao processo de moagem do cimento as suas partículas apresentam dimensões e formas muito diversas, este aspeto pode ser observado na Figura 77 onde se apresenta uma imagem destas partículas obtida através de um microscópio eletrónico de varrimento.

Tabela 10 Resultados do ensaio pelo método de Blaine de duas amostras de cimento

Massa volúmica (kg/m ³)	3160			
Porosidade	0,50			
Amostra	A		B	
Ensaio	1	2	1	2
Temperatura °C	19,6	19,6	19,8	19,8
Tempo medido (s)	96	96	95	95
Tempo médio (s)	96			
Superfície do cimento (cm ² /g)	3820			
Superfície específica do cimento (m ² /kg)	382			

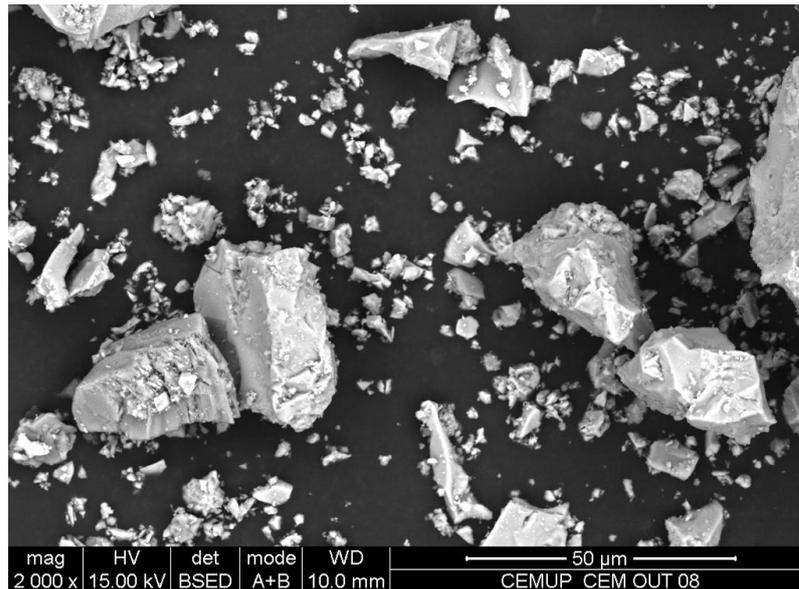


Figura 77 CEM I 42.5R observado num microscópio eletrónico de varrimento com uma ampliação de 2000 x

4.2.2. SÍLICA DE FUMO

A Sílica de Fumo utilizada foi a Centrilit Fume SX em suspensão com 50% de teor de sólidos, fornecida pela MC-Bauchemie. Na Figura 78 é possível observar que as partículas da sílica de fumo têm uma forma perfeitamente esférica e apresentam dimensões aproximadamente 100 vezes inferiores ao tamanho das partículas de cimento. Na figura apresentam-se ainda algumas medições dos diâmetros das partículas de sílica de fumo constatando-se a existência de uma grande diversidade nos tamanhos das partículas (120.4-543.0 nm). Este material apresenta uma massa volúmica de 1380 kg/m^3 , menos de metade da massa volúmica do cimento.

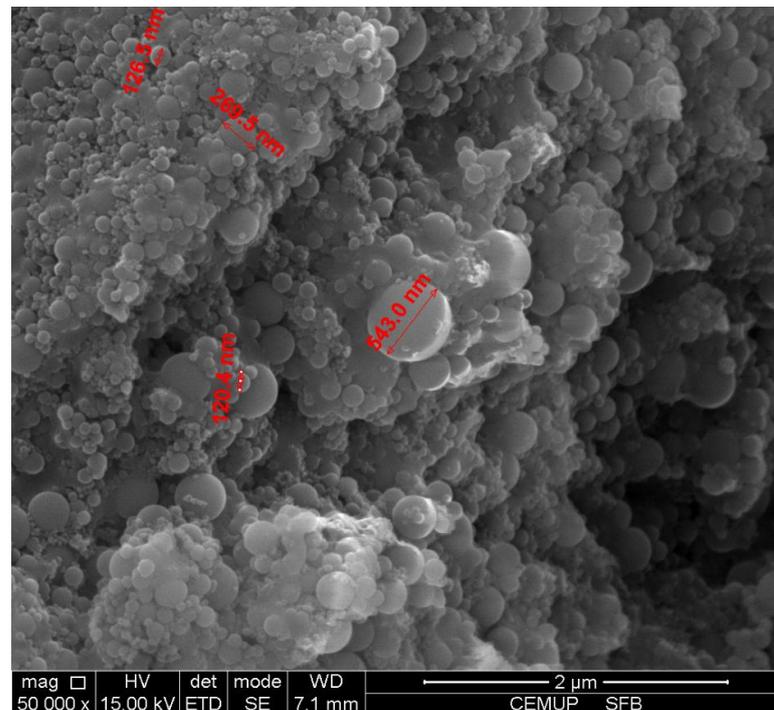


Figura 78 Sílica de Fumo observada num microscópio eletrónico de varrimento com uma ampliação de 50000 x

4.2.3. FÍLER DE CALCÁRIO

A Figura 79 ilustra a distribuição granulométrica em volume do fíler de calcário empregue na mistura (BETOCARB P1 – OU). O centro de produção deste componente foi em Soure, Portugal. Este material é composto por carbonato de cálcio e apresenta-se como sendo de grande pureza química, excelente brancura e isento de matéria orgânica. Na Tabela 11 apresenta-se a caracterização química e física deste material. As dimensões das partículas do fíler de calcário são da mesma ordem de grandeza das do cimento [38] verificando-se igualmente uma grande dispersão no tamanho e forma das partículas. Na Figura 80 é possível observar estes dois aspetos em que se verifica a forma angulosa das partículas. As diferenças existentes entre os tamanhos e a forma angulosa das partículas derivam do processo de moagem a que estiveram sujeitas tal como o cimento.

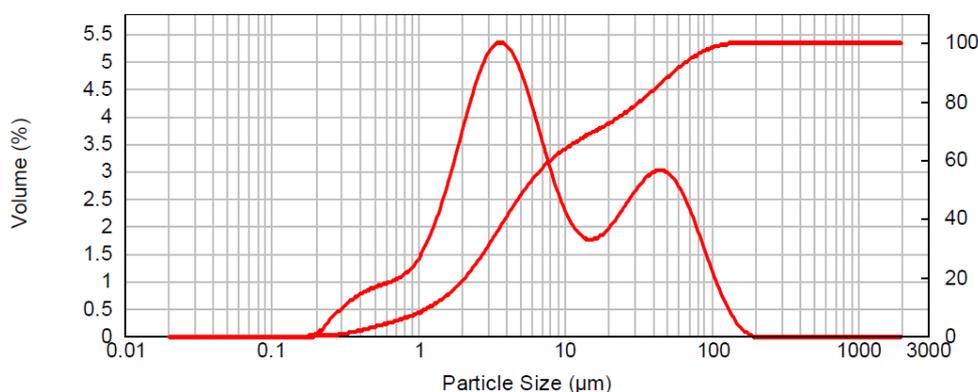


Figura 79 Distribuição granulométrica do Fíler de Calcário: distribuição granulométrica em volume de partículas e distribuição do volume de partículas acumuladas

Tabela 11 Análise química e outros dados relativos ao Fíler de Calcário

Análise química da matéria-prima	CaCO ₃	99 %
	MgCO ₃	0.3 %
	Fe ₂ O ₃	0.02 %
	Insolúveis em HCl	0.2%
	Sulfatos solúveis em ácido (NP EC 1744-1)	<0.05
	Cloretos (NP EN 1744-1)	<0.001
	Enxofre total (NP EN 1744-1)	<0.04
Dados específicos do produto - Granulometria	Partículas inferiores a 2 mm (EN 933-10)	100 %
	Partículas inferiores a 125 µm (EN 933-10)	99 %
	Partículas inferiores a 63 µm (EN 933-10)	85 %
Dados gerais do produto	Massa Volúmica	2680Kg/m ³
	Teor de humidade (ISO 787/2)	0.1 %
	Densidade aparente (OMYA LTM 1)	900kg/m ³
	Azul de metileno (EN 933-1)	0.06g/100g

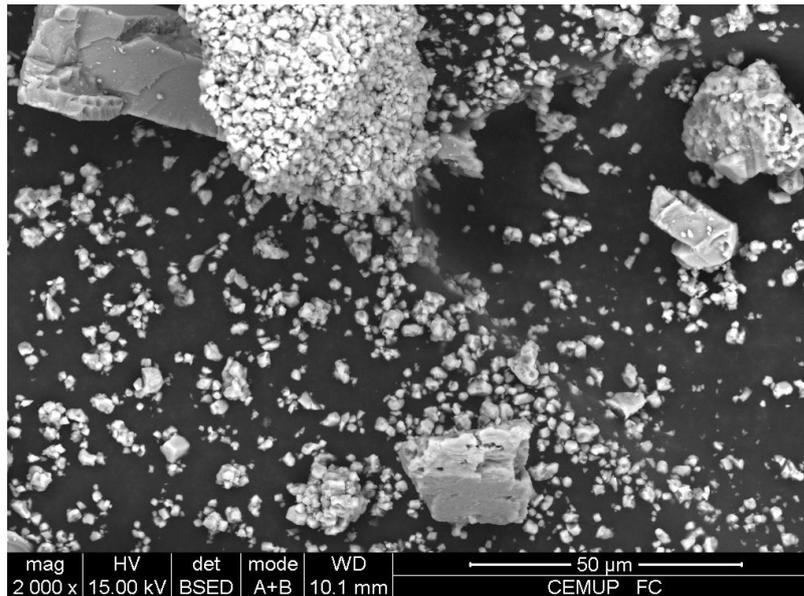


Figura 80 Fíler de Calcário observado num microscópio eletrónico de varrimento com uma ampliação de 2000 x

4.2.4. AREIA FINA

A areia fina utilizada foi fornecida pela CONCREMAT e apresenta uma dimensão máxima de agregado de 1 mm ($d_{m\acute{a}x}=1$ mm) e massa volúmica de 2630 kg/m³. Na Figura 81 apresenta-se a respetiva distribuição granulométrica.

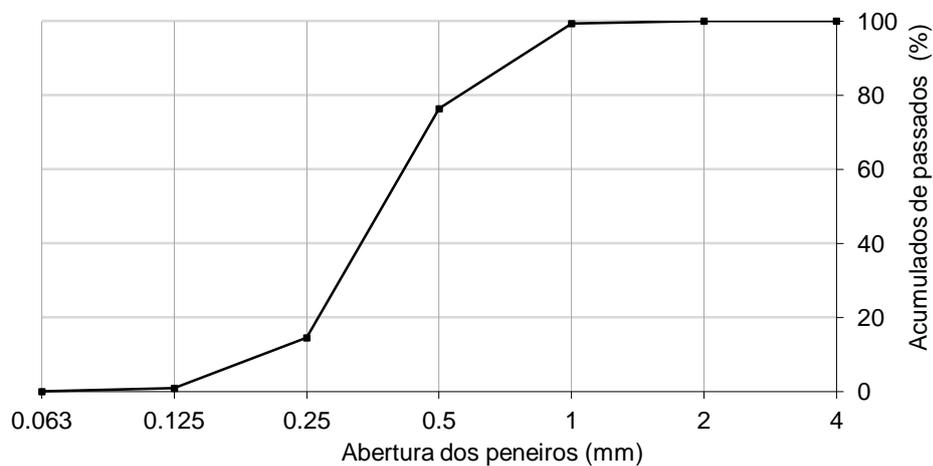


Figura 81 Distribuição granulométrica da areia fina

4.2.5. SUPERPLASTIFICANTE

O superplastificante utilizado designa-se por Sika ViscoCrete 20HE e permite uma elevada redução de água de amassadura e ao mesmo tempo uma elevada fluidez da mistura. As características mais importantes encontram-se na Tabela 12.

Tabela 12 Características do superplastificante Sika ViscoCrete 20HE

Sika ViscoCrete 20HE	
Aspeto/Cor	Líquido castanho claro, turvo
Base química	Solução aquosa de polímeros acrílicos modificados
Massa volúmica	$1,08 \pm 0,02 \text{ Kg/dm}^3$ ($a + 23 \pm 2^\circ\text{C}$)
pH	$4,3 \pm 1,0$ ($a + 23 \pm 2^\circ\text{C}$)
Teor de sólidos	$40,0 \pm 2,0\%$
Teor em cloretos	$\leq 0,1\%$

4.2.6. FIBRAS

Na mistura em estudo foram utilizados dois tipos de fibras em iguais percentagens (50% + 50%) que se distinguem apenas pelo tamanho: 9 e 12 mm. Na Tabela 13 apresentam-se algumas características destas fibras nomeadamente a massa volúmica de 7850 Kg/m^3 .

O tipo e percentagem de cada tipo de fibras na mistura foi selecionado tendo em conta estudos realizados por Ribeiro, F. [78] e estudos desenvolvidos posteriormente a estes [82]. Estes estudos consistiram na avaliação do efeito de várias combinações de fibras com diferentes comprimentos (6, 9 e 12 mm de comprimento), mantendo a matriz cimentícia. Na Tabela 14 é possível observar as várias combinações utilizadas, destacando-se a combinação VI onde se observa uma maior resistência quando comparadas com as outras composições em estudo [82]. A combinação VI corresponde a uma combinação de fibras de 9 e 12 mm, em iguais percentagens, a qual foi utilizada para o presente estudo.

Tabela 13 Tipos de fibras utilizados

Nome	Resistência à tração (MPa)	Massa Volúmica (Kg/m^3)	lf (mm)	df (mm)	lf/df
KrampelHarex DM	2100	7850	9	0.175	51
			12	0.175	69

Tabela 14 Comparação entre composições com diferentes misturas de fibras de 6, 9 e 12 mm [82]

Combinações							
	I	II	III	IV	V	VI	VII
6mm	0.5%	1.0%	0.5%	2.0%	1.5%	0.0%	1.5%
9mm	0.5%	1.0%	2.0%	0.5%	1.5%	1.5%	0.0%
12mm	2.0%	1.0%	0.5%	0.5%	0.0%	1.5%	1.5%
Estado Fresco							
Desp (mm)	267.5	285.0	290.0	290.5	305.5	288.5	291.0
Tfunil (s)	64.78	42.38	42.06	29.10	25.15	33.63	38.44
Estado Endurecido (7dias)							
fc (MPa)	135.33	133.12	133.84	127.89	128.19	140.08	137.10
Ft,cr (KN)	11.79	9.19	9.34	8.06	8.53	14.53	9.17
ft,cr (MPa)	27.63	21.50	21.90	18.89	19.99	34.05	21.50

4.3. ORIENTAÇÃO DAS FIBRAS

Como referido nos capítulos 1 e 2, a orientação das fibras é um dos fatores que influencia fortemente a resistência à tração do betão. Para avaliar esta influência Prisco *et al.* [55] desenvolveram uma placa betonada a partir de uma extremidade levando a que, graças à auto-compactabilidade do betão, as fibras se orientassem segundo o fluxo de betonagem. Neste mesmo trabalho os autores verificaram que as zonas onde existe um maior número de fibras posicionadas na direção do maior comprimento da placa (direção das tensões principais desenvolvidas durante o ensaio) atingiram valores de resistência mais elevados. Desta forma, Prisco *et al.* [55] confirmaram que a orientação das fibras apresenta um papel de extrema importância no comportamento à tração do HPFRC. Na Figura 82 observam-se os resultados dos ensaios realizados pelos autores referidos.

No presente trabalho concebeu-se um equipamento capaz de orientar as fibras através de um campo magnético, tirando partido das propriedades magnéticas das fibras. Para a conceção do equipamento foi necessário um estudo sobre eletromagnetismo com o intuito de identificar os materiais necessários e qual a sua disposição de forma a criar um campo magnético propício à orientação das fibras.

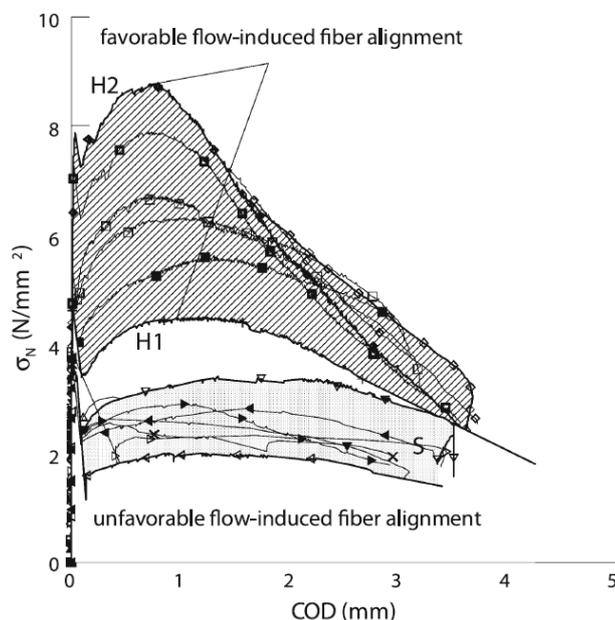


Figura 82 Diagrama tensão-abertura de fendas para as fibras orientadas favoravelmente (direção 0°) e para orientações desfavoráveis [55]

4.3.1. NOÇÕES DE MAGNETISMO E ELETRICIDADE

A relação do magnetismo com eletricidade foi a descoberta mais importante no estudo da eletricidade. Em 1820, Hans Christian Oersted descobriu que a agulha de uma bússola desviava-se quando colocada próxima de um condutor percorrido por uma corrente. Esta experiência é ilustrada na Figura 83 onde se apresenta a direção das agulhas quando a corrente no condutor é nula e no caso de existir passagem de corrente. Esta explicação baseia-se no facto de a bússola ser um íman fraco que tende a alinhar-se com o campo magnético local. Na presença de uma barra magnética, fonte de campo magnético, a bússola tende a alinhar-se com o campo magnético gerado, caso a barra e a bússola se encontrem afastadas de um metro ou mais a bússola tende a alinhar-se com o campo magnético da Terra pelo facto de este ser dominante [17].

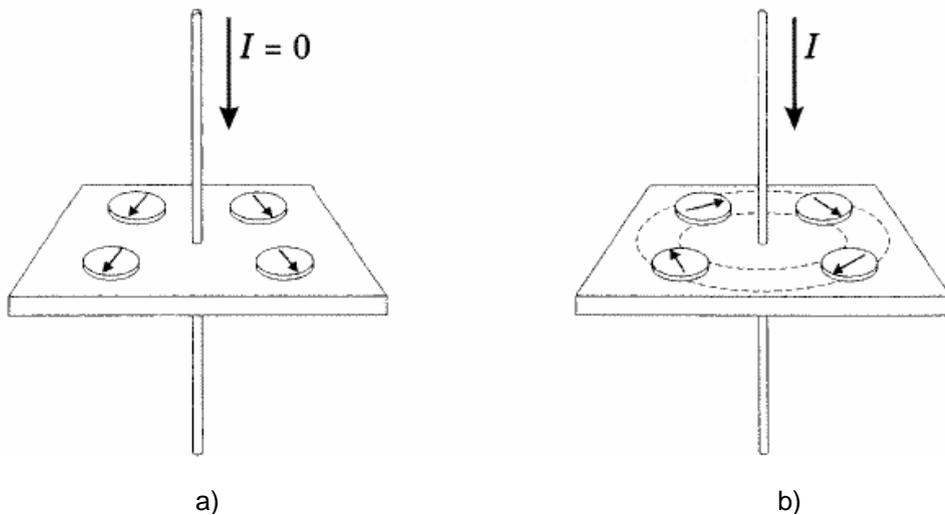


Figura 83 O condutor: (a) sem circulação de corrente, (b) com circulação de corrente e o campo magnético resultante [7]

O fio condutor pode ter várias formas de acordo com objetivo a que se destina. Assim, se o mesmo apresentar a forma de espira surgirá um campo magnético em torno da mesma fazendo com que o campo magnético se concentre na região central da espira. A Figura 84 ilustra o campo magnético produzido por uma única espira. No caso de existirem várias espiras, quanto mais próximas as espiras se encontrarem, ou seja, quanto mais enrolado estiver o fio condutor mais concentrado será o campo magnético levando a que parte do fluxo produzido por cada espira se sobreponha com uma parte produzida pelas outras espiras originando assim um eletroímã [7]. A Figura 85 ilustra um eletroímã, também é designado por bobine, enrolado num núcleo magnético o qual tem como objetivo controlar o caminho do campo magnético. A força magnética resultante da aplicação de uma intensidade de corrente numa bobine depende da grandeza da intensidade I e do número de espiras da bobine N , esta força é designada por força magnetomotriz (MMF) e é dada pela equação (19)

$$Ni_w = I \times N \quad (19)$$

Em que,

Ni_w = Força magnetomotriz

I = Intensidade de corrente

N = Número de espiras da bobine

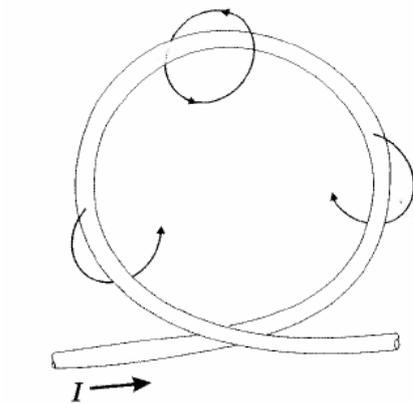


Figura 84 Campo magnético numa espira [7]

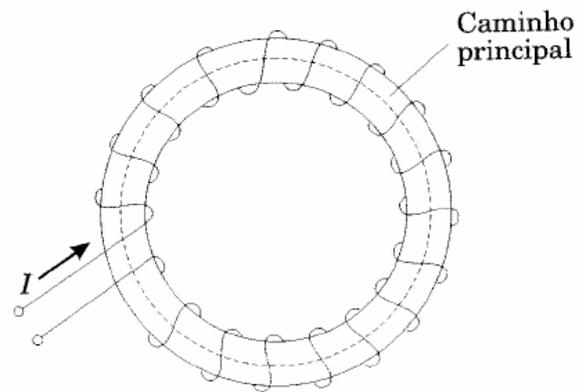


Figura 85 Bobine envolvida num núcleo magnético [7]

4.3.2. CONSTRUÇÃO DO EQUIPAMENTO

O equipamento capaz de orientar as fibras através de um campo magnético foi desenvolvido pelo departamento de eletrotécnica da FEUP sob a orientação do professor Adriano Carvalho e é composto pelos seguintes materiais:

- núcleo de ferro em forma de U - direciona a corrente e desta forma controla o campo magnético;
- fio condutor (fio de cobre) - proporciona a circulação da corrente;
- bateria - gera corrente para circuito;
- reóstato - controla a intensidade de corrente aplicada ao circuito;
- multímetro- mede a intensidade da corrente no circuito.

Na Figura 86 é possível observar a construção de uma das bobines do equipamento e na Figura 87 apresenta-se a primeira camada de fio de cobre da bobine. O equipamento utilizado para a orientação das fibras e a identificação dos materiais enumerados anteriormente é ilustrado na Figura 88.



Figura 86 Construção de uma das bobines do equipamento

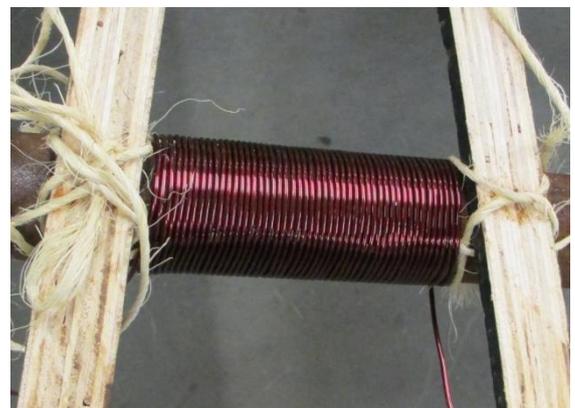


Figura 87 Primeira camada de fio de cobre numa das bobines

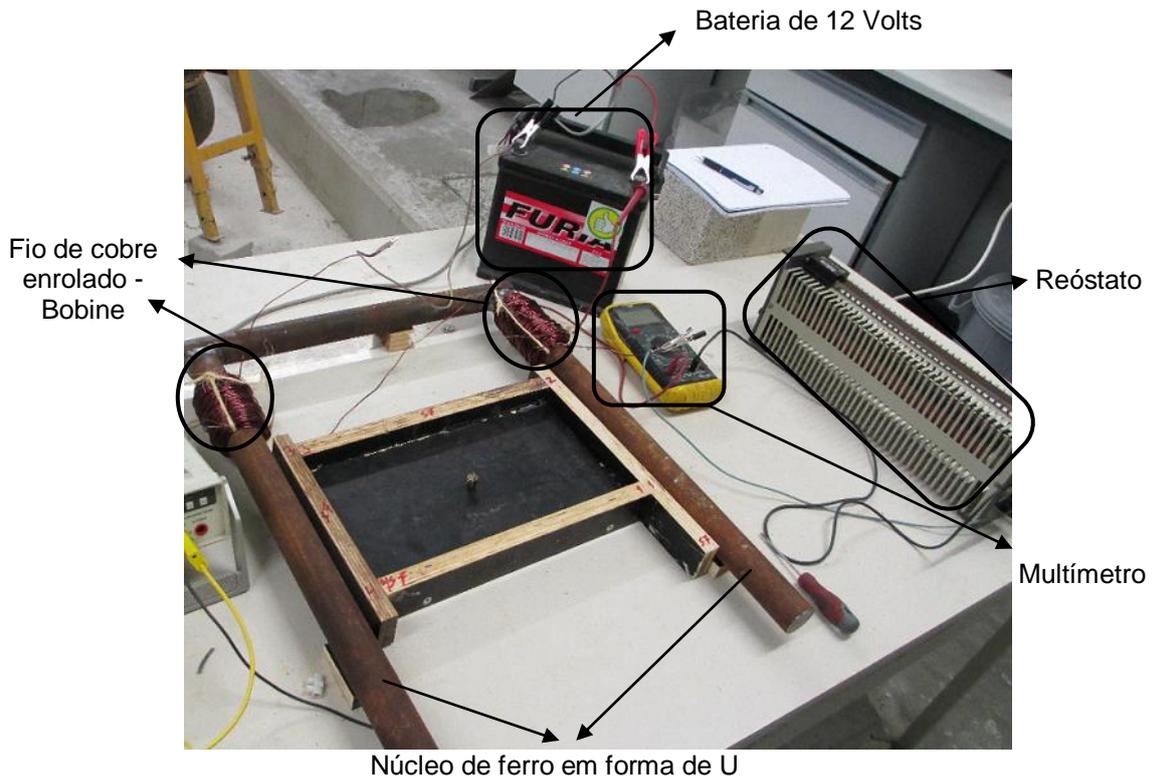


Figura 88 Constituição do equipamento utilizado para a orientação das fibras

4.3.2. VALIDAÇÃO DO EQUIPAMENTO

Após o equipamento de orientação das fibras estar concluído procedeu-se à verificação do funcionamento do mesmo. Para isso, inicialmente colocamos apenas fibras no interior do molde e verificou-se que para uma intensidade de corrente de 5 Amperes as fibras orientam-se na direção pretendida. Na Figura 89 é possível observar o ensaio descrito anteriormente e a respetiva orientação das fibras devido ao campo magnético imposto.

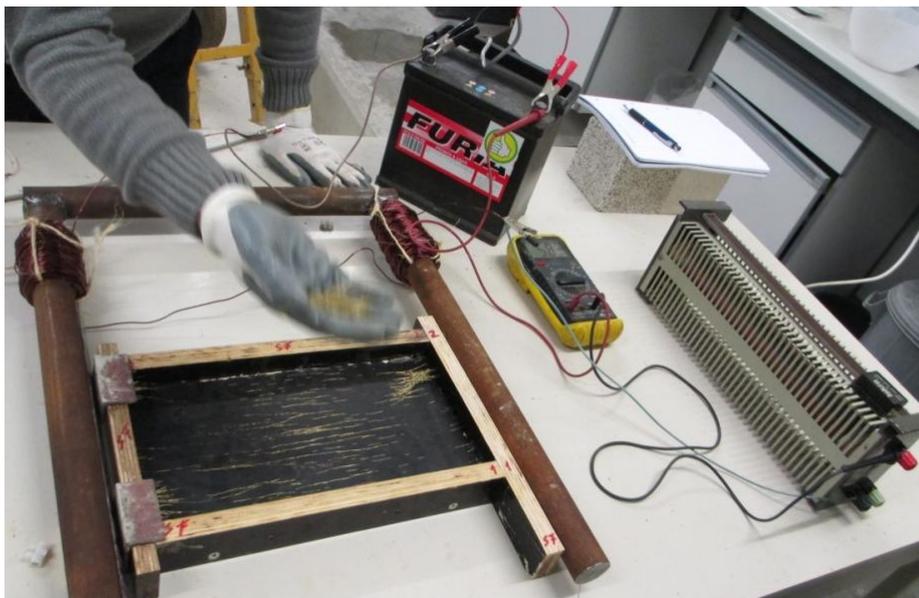


Figura 89 Ensaio realizado apenas com fibras

De seguida foi realizada uma mistura de silicone com fibras com o objetivo de observar a orientação pretendida das fibras no interior da composição e analisar a sua distribuição no provete. Para isso utilizou-se um molde de acrílico transparente para que, no ato de betonagem, seja possível observar o efeito do campo magnético nas fibras. Durante o processo de mistura do silicone com as fibras há produção de ar no seu interior, o que impossibilita a visualização das fibras no interior da mistura. Para a remoção das bolhas de ar foi necessário colocar a mistura numa câmara de vácuo (ver na Figura 90)



Figura 90 Câmara de vácuo

Na Figura 91 e Figura 92 é possível observar o provete de silicone com fibras numa vista de cima e numa vista lateral, respetivamente. Constata-se que as fibras distribuem-se uniformemente pelo provete à exceção de uma camada fina à superfície que não contém fibras. Pela análise dos provetes verifica-se uma orientação privilegiada das fibras segundo a direção do campo magnético.



Figura 91 Provete de silicone vista de cima

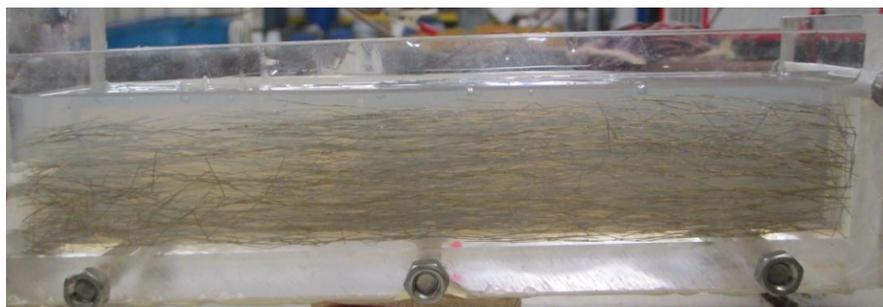


Figura 92 Provete de silicone vista lateral

4.4. PROCEDIMENTOS DE AMASSADURA E BETONAGEM

Após as validações referidas na secção anterior procedeu-se à realização das amassaduras e betonagens do betão de elevado desempenho reforçado com fibras (HPFRC). Betonaram-se 2 tipos de provetes: uma placa com dimensões $304 \times 150 \times 25 \text{ mm}^3$ e um prisma com dimensões $160 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$. Na Figura 93 apresentam-se os moldes utilizados para conceber os provetes referidos. A razão da escolha das dimensões das placas consiste em, numa fase posterior à realização dos ensaios não-destrutivos, proceder-se á sua serragem de modo a obter duas placas quadradas com dimensões $150 \times 150 \times 25 \text{ mm}^3$ em que 4 mm são contabilizados para o desgaste provocado pela serra. As duas placas provenientes do corte serão utilizadas para a realização de ensaios DEWST.



Figura 93 Cofragem de uma placa $304 \times 150 \times 25 \text{ mm}^3$ e de 3 prismas $160 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$

O presente estudo concentra-se em composições onde se fez variar a dosagem de fibras, nomeadamente: sem fibras, 3% de fibras, 1.5 % de fibras e 0.5% de fibras. A Tabela 15 pretende demonstrar a composição para 1 m^3 de betão das quatro amassaduras distintas. É de realçar que as misturas apresentam diferenças apenas na quantidade de fibras e de areia, uma vez que, com o aumento da quantidade de fibras retirou-se um volume de areia correspondente ao volume de fibras.

A Figura 94 demonstra o resultado do ensaio de espalhamento realizado apenas para a mistura com 3% de fibras, pois é a mistura que apresenta maior quantidade de fibras e portanto maior risco de apresentar trabalhabilidade insuficiente. O diâmetro característico para um HPFRC auto-compactável é de aproximadamente 300 mm. Sendo o diâmetro de espalhamento da argamassa em estudo de 290 mm é possível concluir que a argamassa em causa apresenta as características pretendidas. É de realçar a importância da auto-compactabilidade nas misturas em estudo devido à necessidade de orientar as fibras. Caso a argamassa apresente uma viscosidade elevada, as fibras teriam uma maior dificuldade na sua orientação.

Tabela 15 Composição das misturas sem fibras, 3%, 1.5% e 0.5% de fibras

Composição (Kg/m3)	S/ fibras	3.00%	1.50%	0.50%
Cimento	794.90	794.90	794.90	794.90
Sílica de fumo	79.49	79.49	79.49	79.49
Filer de calcário	311.43	311.43	311.43	311.43
Areia fina	1019.86	942.49	980.41	1006.71
Água	153.76	153.76	153.76	153.76
Superplastificante	22.20	22.20	22.20	22.20
Fibras (9 mm + 12 mm)	0.00	235.50	117.75	39.25

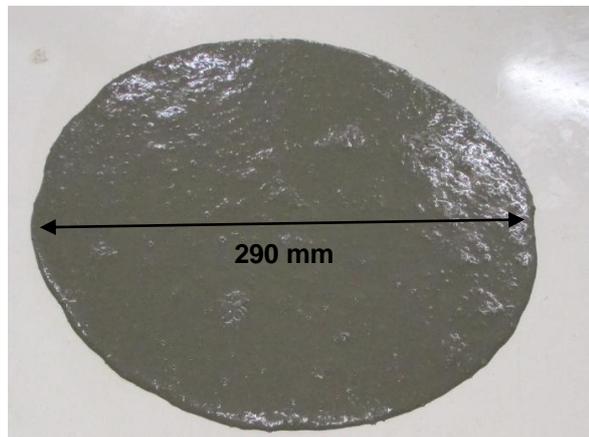


Figura 94 Ensaio de espalhamento para a mistura com 3% de fibras

No seguimento da confirmação da auto-compactabilidade da argamassa em estudo procedeu-se às amassaduras com as composições mencionadas anteriormente. Os materiais e a misturadora utilizados no processo de amassadura encontram-se na Figura 95 e Figura 96, respetivamente. O tempo de amassadura sofreu um aumento relativamente às argamassas convencionais, de modo a garantir uma boa dispersão da sílica da sílica de fumo. Na Figura 97 ilustra o processo de amassadura utilizado neste estudo.



Figura 95 Materiais utilizados na amassadura



Figura 96 Misturadora utilizada na amassadura

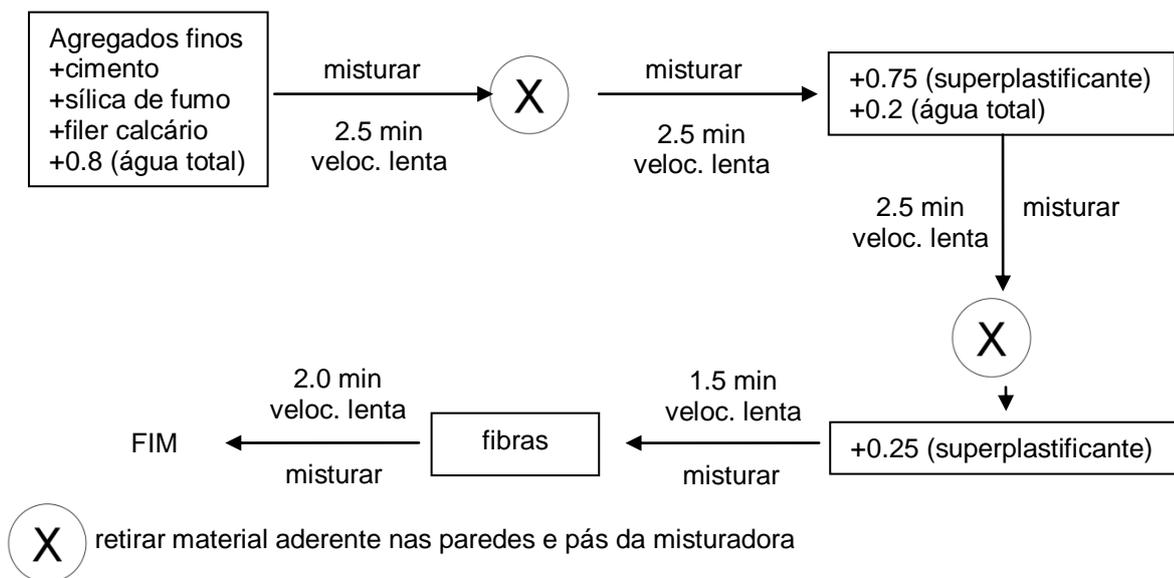


Figura 97 Esquema ilustrativo do procedimento de amassadura

Devido ao condicionamento do volume da misturadora (1,5 litros) foi necessário realizar 10 amassaduras, em que para cada amassadura permitiu betonar uma placa e um prisma. As 10 amassaduras foram realizadas com o intuito de avaliar uma composição sem fibras e três composições com percentagens de fibras distintas: 3%, 1.5% e 0.5%. Para cada percentagem de fibras realizaram-se três amassaduras variando a orientação das fibras: sem orientação, orientação a 0° e orientação a 90°. Na tabela 16 resumem-se as 10 amassaduras referidas anteriormente.

Tabela 16 Descrição das amassaduras realizadas

Mistura nº	% Fibras	Orientação	Referência
1	Sem Fibras	-	S/ fibras
2	3% de fibras	fibras sem orientação	3% fibras S/ orient
3		fibras orientadas a 0º	3% fibras 0º
4		fibras orientadas a 90º	3% fibras 90º
5	1.5% de fibras	fibras sem orientação	1.5% fibras S/ orient
6		fibras orientadas a 0º	1.5% fibras 0º
7		fibras orientadas a 90º	1.5% fibras 90º
8	0.5% de fibras	fibras sem orientação	0.5% fibras S/ orient
9		fibras orientadas a 0º	0.5 fibras 0º
10		fibras orientadas a 90º	0.5% fibras 90º

A orientação das fibras foi conseguida através de um campo magnético gerado pelo equipamento descrito na secção anterior e com a direcção indicada na Figura 98. No caso das placas e respetivos prismas sem orientação, a betonagem é realizada no exterior do equipamento, ou seja, a mistura não é sujeita a um campo magnético (ver Figura 99). A orientação a 0º (ver Figura 100) foi definida como sendo a orientação paralela ao lado maior dos provetes, desta forma é necessário alinhar a orientação do campo magnético com este lado para que as fibras se disponham nesta direcção. Quanto à orientação a 90º (ver Figura 101) foi necessário colocar os provetes com o lado menor orientado segundo as linhas de campo. É de realçar que o campo magnético permanece desde o início da betonagem, caso contrário as fibras depositadas em camadas inferiores poderiam estar sujeitas ao peso das camadas superiores, o que dificultaria a orientação das fibras.



Figura 98 Linhas de campo geradas pelo equipamento



Figura 99 Betonagem de uma placa e prisma para a obtenção de fibras sem orientação



Figura 100 Betonagem de uma placa e prisma para a obtenção de fibras com orientação a 0°



Figura 101 Betonagem de uma placa e prisma para obtenção de fibras com orientação a 90°

4.5. RESISTIVIDADE

4.5.1. MÉTODO DOS DOIS ELÉTRODOS

A resistividade foi avaliada ao longo de 49 dias em dois tipos de provetes mencionados anteriormente: prismas e placas, cujos resultados apresentam-se no Anexo 1. Nos prismas foram embebidas, durante a betonagem, redes de aço inox nas duas faces opostas mais distantes entre si. Na Figura 102 é possível observar as redes de inox e a sua posição. É de realçar que a direção da corrente entre as redes de inox é conotada como direção a 0° e que nos prismas não se realizaram medições de resistividade na direção a 90° .

A medição da resistividade nas placas pelo método dos dois eléttodos foi realizada a partir de dois eléttodos exteriores e em duas direções. O contacto do betão com os dois eléttodos foi garantido através de um pano humedecido e com um ou dois grampos dependendo da orientação a medir. Na Figura 103 e Figura 104 é possível distinguir as duas orientações nas quais foram realizadas medições, em que a primeira diz respeito à orientação 0° e a segunda à orientação a 90° . Na medição a 90° utilizaram-se dois grampos com o intuito de melhorar a ligação entre o betão e os eléttodos uma vez que a área de contacto dos eléttodos com o betão é substancialmente maior que na medição a 0° .



Figura 102 Prisma com redes embebidas em duas faces opostas. Resistividade medida na direção 0°

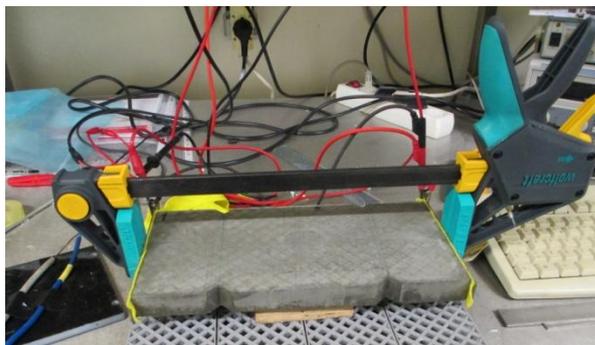


Figura 103 Resistividade elétrica pelo método dos dois eléttodos exteriores medida a 0°

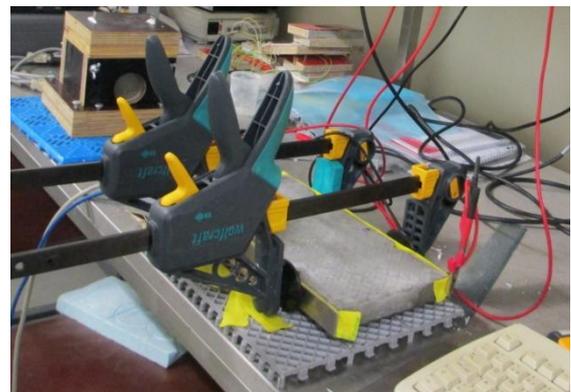


Figura 104 Resistividade elétrica pelo método dos dois eléttodos exteriores medida a 90°

No ensaio da resistividade elétrica pelo método dos dois eletrodos utilizou-se um gerador de sinal e dois multímetros. O gerador de sinal utilizado permite a emissão de uma corrente contínua ou uma corrente alternada através de vários tipos de ondas. Neste estudo utilizou-se uma corrente alternada com uma onda sinusoidal de 100 Hz, uma vez que minimiza o efeito da polarização, discutida no Capítulo 3, e desta forma, os resultados apresentam menor erro. Um dos multímetros utilizados permite a medição da diferença de potencial gerada pela passagem de corrente pelo provete e o outro permite a medição desta mesma intensidade de corrente. A Figura 105 pretende demonstrar o ensaio realizado pelo método dos dois eletrodos com os três equipamentos necessários e na Figura 106 ilustra-se o circuito elétrico correspondente, em que o multímetro que mede a diferença de potencial encontra-se em paralelo com o provete e o multímetro que mede a intensidade de corrente e o gerador encontram-se em série com o provete.

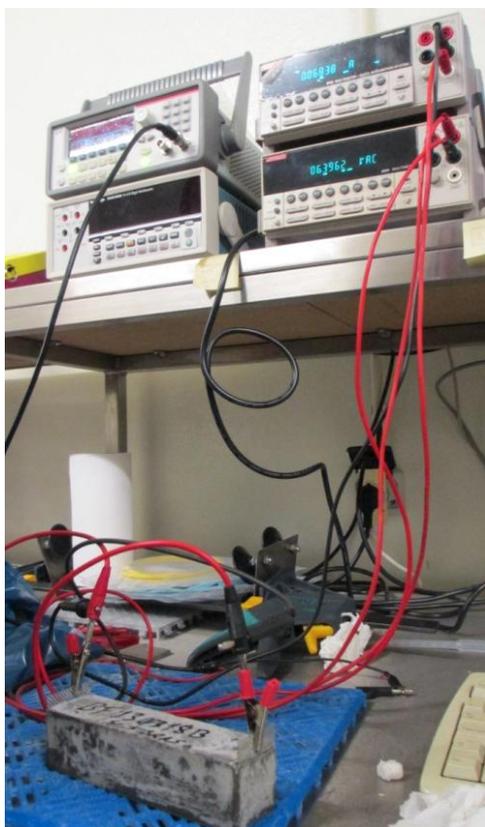


Figura 105 Montagem do circuito elétrico

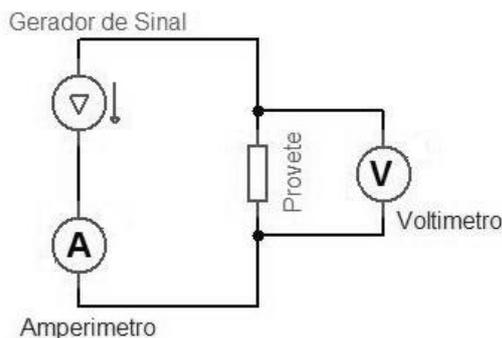


Figura 106 Esquema ilustrativo do esquema elétrico e os seus intervenientes

A resistividade do provete é dada pela equação (5) e a resistência pela equação (6). Na Tabela 17 apresentam-se os dados geométricos envolvidos no cálculo da resistividade nos prismas, nas placas para medições a 0° e para a medição a 90°. A área (A) corresponde à área do eletrodo em contacto com o betão e o comprimento (L) corresponde ao comprimento do provete por onde passa a corrente elétrica, ou seja, a distância entre os dois eletrodos.

$$\rho = R \frac{A}{L} \quad (5)$$

$$R = \frac{V}{I} \quad (6)$$

Em que,

R = Resistência

ρ = Resistividade

L = Comprimento

A = Área da secção transversal

V = Potencial

I = Intensidade de corrente

No que diz respeito à medição de resistividade nas placas, é de realçar que a corrente elétrica é transmitida apenas pelo contacto entre o betão e o eléctrodo, fazendo com que na medição a 90°, onde se encontram as cunhas, seja necessário retirar a área correspondente aos mesmos. No entanto, quando as cunhas terminam a corrente é distribuída igualmente por toda a área da secção. Na tentativa de procurar a solução mais viável compararam-se as duas situações na placa sem fibras onde se esperava uma resistividade semelhante nas duas direcções (0° e 90°). Na Tabela 18 apresentam-se os resultados do ensaio onde se compara a resistividade obtida considerando a área incluindo as cunhas (C/ cunhas) e a área retirando a área correspondente a estas cunhas (S/ cunhas). Da tabela conclui-se que as resistividades apresentam maior semelhança nas duas direcções quando a área correspondente às cunhas não é contabilizada. Note-se que também na medição a 0° há um estrangulamento da corrente devido às cunhas. No entanto este fator foi desprezado devido ao comprimento elevado entre os dois eléctrodos (L). Na Figura 107 apresentam-se as dimensões das cunhas consideradas na medição da resistividade na direcção a 90°.

Tabela 17 Dados geométricos para o cálculo da resistividade

	A (m ²)	L (m)
Prisma	0.001600	0.160
Placa medição a 0°	0.000375	0.304
Placa medição a 90°	0.006100	0.150
Área das duas cunhas	0.001060	-

Tabela 18 Diferença entre a consideração e a não consideração da área das cunhas

(kΩ.cm)	3 dias		7 dias		14 dias	
	S/ cunhas	C/ cunhas	S/ cunhas	C/ cunhas	S/ cunhas	C/ cunhas
medição a 0º	5.1014	5.1014	7.4287	7.4287	12.3208	12.3208
medição a 90º	5.1076	6.3635	8.0146	9.9855	12.6966	15.8187
Percentagem da diferença entre 90º e 0º	12%	126%	59%	256%	38%	350%

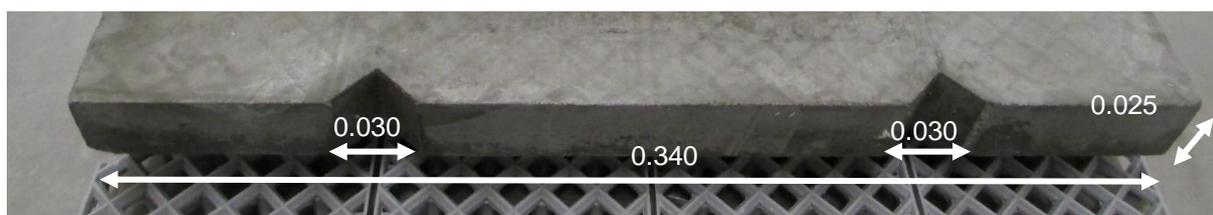


Figura 107 Dimensões das cunhas (m)

4.5.2. TROCA DE MULTÍMETROS

Na avaliação da resistividade pelo método dos dois elétrodos utilizaram-se um gerador de sinal (ver Figura 108) e dois multímetros (ver Figura 109), em que um deles regista a diferença de potencial e o outro regista a intensidade de corrente que atravessa o provete. Inicialmente utilizou-se o multímetro da marca Tektronix para avaliar a diferença de potencial e para medir a intensidade de corrente utilizou-se um multímetro da marca Keithley, esta disposição foi designada como combinação 1.



Figura 108 Gerador de sinal

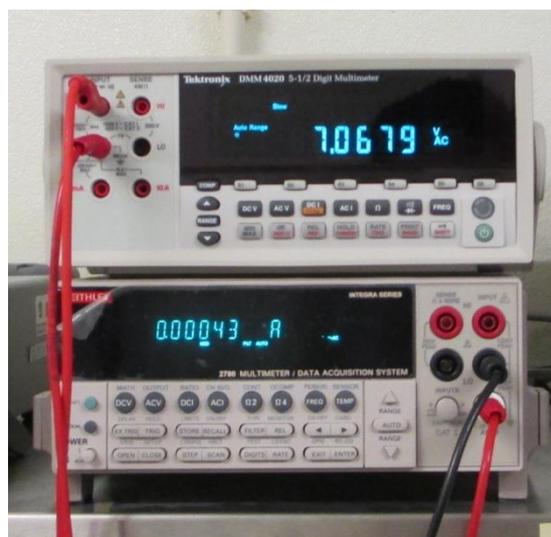


Figura 109 Multímetros utilizados para avaliação da diferença de potencial e da intensidade de corrente

Na avaliação da resistividade ao longo do tempo verificou-se que, na placa sem fibras, a partir dos 14 dias as medições na direção a 0° e na direção a 90°, ao longo do tempo, distanciam-se entre si cada vez mais. Como referido anteriormente a placa sem fibras deveria apresentar a mesma resistividade na direção 0° e 90° em todas as idades uma vez que a placa apresenta características homogêneas nas duas direções. Com o intuito de verificar a possível causa deste problema, optou-se por trocar as funções dos multímetros, ou seja, o multímetro da marca Tektronix passou a registar intensidade de corrente e o multímetro da marca Keithley passou a registar intensidade de corrente, Esta disposição foi designada como combinação 2. No gráfico da Figura 111 apresentam-se os resultados da resistividade para a placa sem fibras com a combinação 1 e ao longo dos 49 dias, apresenta-se também o resultado obtido para a combinação 2 para uma idade de 49 dias. Neste gráfico é possível observar o aumento da discrepância de valores entre as direções 0° e 90°, principalmente a partir dos 14 dias de idade utilizando a combinação 1 e verifica-se ainda uma grande diferença nos resultados obtidos aos 49 dias para as medições feitas com a combinação 1 e a combinação 2. Neste mesmo gráfico é possível visualizar também uma inversão dos valores obtidos, em que para a combinação 1 verifica-se maiores valores de resistividade para a direção 90° e para a combinação 2 verifica-se um maior valor na direção 0°.

Na Tabela 19 apresentam-se os resultados da diferença de potencial e da intensidade de corrente registados nos multímetros antes do início de qualquer medição. Os valores registados das voltagens dependem do tipo de onda que o gerador de sinal envia e da voltagem de pico escolhida. Neste estudo utilizaram-se ondas sinusoidais com voltagens de pico de 10 Volts. Na Figura 110 apresenta-se a onda sinusoidal transmitida pelo gerador de sinal e verifica-se que este tipo de ondas apresenta um fator de crista (Crest Factor) de $\sqrt{2}$ o que leva a um valor eficaz da voltagem de aproximadamente 7.07 Volts, valor este que é registado pelo multímetro (com leituras em voltagem). O valor eficaz de uma tensão ou corrente corresponde ao valor constante, da mesma natureza, que origina uma dissipação térmica idêntica numa resistência.

No que diz respeito à intensidade de corrente residual – residual porque não há passagem de corrente - verifica-se uma grande discrepância dos valores. Desta forma, assumindo que os valores de intensidade de corrente apresentados na Tabela 19 são o limite mínimo dos equipamentos para este tipo de onda, para além do equipamento Tektronix apresentar maior número de casas decimais na leitura de intensidade de corrente também apresenta um valor residual mais baixo levando a acreditar que os resultados medidos pela combinação 2 apresentam maior fiabilidade.

Tabela 19 Valores iniciais registados nos multímetros sem qualquer provete

Combinação 1	Multímetro-Voltímetro	Tektronix	7.0735 V
	Multímetro-Amperímetro	Keithley	0.39 mA
Combinação 2	Multímetro-Voltímetro	Keithley	7.0700 V
	Multímetro-Amperímetro	Tektronix	0.0113 mA

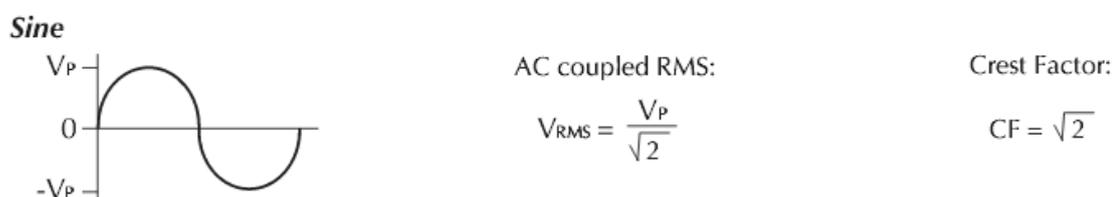


Figura 110 Onda transmitida pelo gerador de sinal

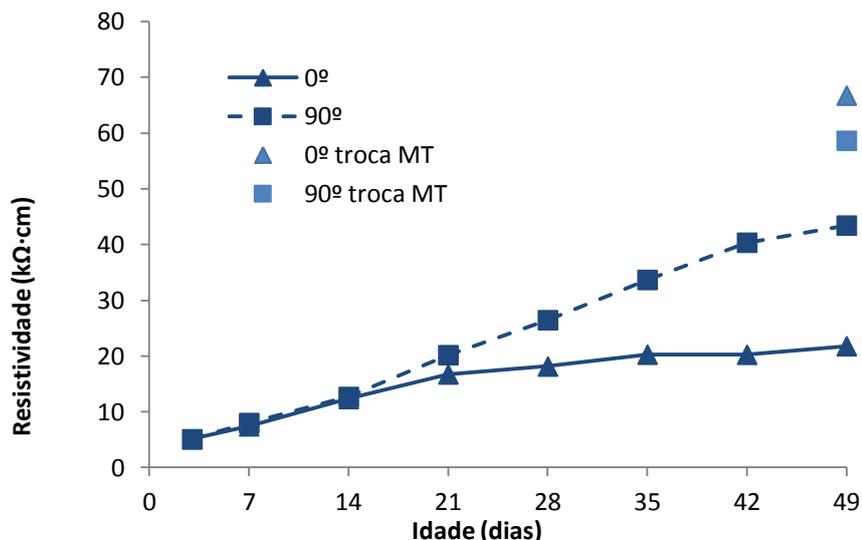


Figura 111 Resistividade medida pelo método dos dois elétrodos na placa sem fibras

Uma vez que se detetou este problema numa fase posterior ao início dos ensaios, realizaram-se medições nos provetes sem fibras, com 1.5% de fibras e com 3% de fibras durante os 49 dias para a combinação 1 e na idade 49 dias também se realizaram ensaios para a combinação 2. No entanto para os provetes com 0.5% de fibras, devido à betonagem ter sido realizada mais tarde, foi possível a medição da resistividade pelas duas combinações a partir dos 21 dias de idade.

Na Tabela 20 e a Figura 112 apresentam-se as medições realizadas na placa sem fibras na direção 0º. O objetivo é propor uma forma de corrigir os valores medidos pela combinação 1 a partir do valor que se assume como correto medido pela combinação 2 (medição aos 49 dias). O fator de correção da intensidade foi determinado iterativamente, de modo que os valores corrigidos formassem uma curva que fosse de encontro ao valor correto. Este valor é de 300 µA e é da mesma ordem de grandeza que o erro residual do multímetro (Amperímetro) da combinação 1. A intensidade corrigida é obtida através da subtração entre a intensidade de corrente obtida na Combinação 1 e o factor de correção.

Tabela 20 Correção dos valores registados pela Combinação 1

Idade (dias)	Combinações	Intensidade (µA)	% ²	Tensão (V)	Resistência (Ω)	Resistividade (kΩ.cm)	Intensidade corrigida (µA)	Tensão (V)	Resistência (Ω)	Resistividade (kΩ.cm)
3	Combinação 1	1690	18	6.9891	4135.5	5.10	1390	6.989	5028.09	6.2
7		1165	26	7.0157	6022.1	7.43	865	7.016	8110.64	10.0
14		705	43	7.0413	9987.6	12.32	405	7.041	17385.80	21.4
21		520	58	7.0520	13561.5	16.73	220	7.052	32054.55	39.5
28		480	63	7.0627	14714.0	18.15	180	7.063	39237.22	48.4
35		430	70	7.0660	16432.4	20.27	130	7.066	54353.46	67.0
42		430	70	7.0623	16423.8	20.26	130	7.062	54325.00	67.0
49		400	75	7.0671	17667.8	21.79	-	-	-	-
49	Combinação 2	131	-	7.0634	54104.6	66.74	-	-	-	-

$$^2 \% = \frac{300\mu A}{Intensidade\ medida}$$

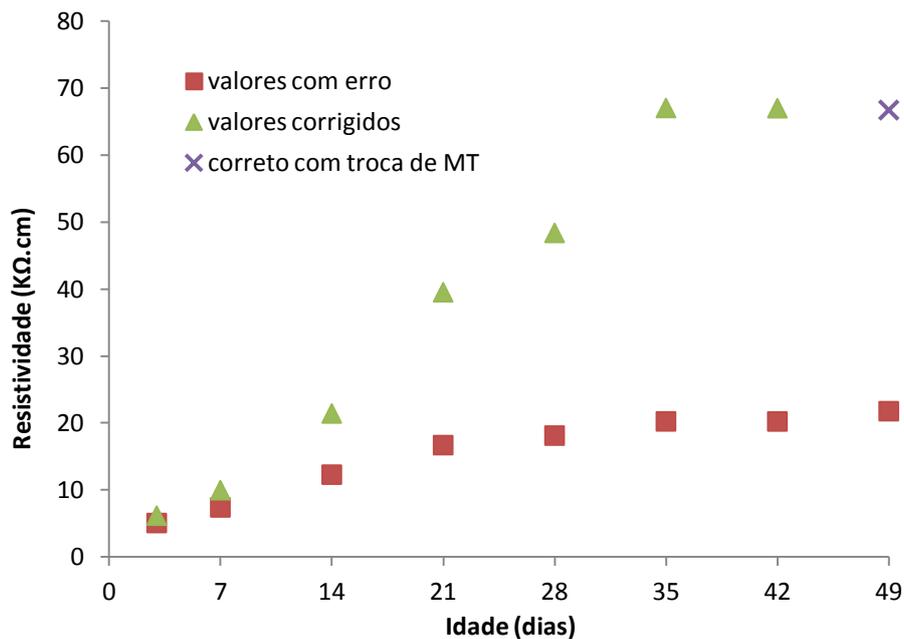
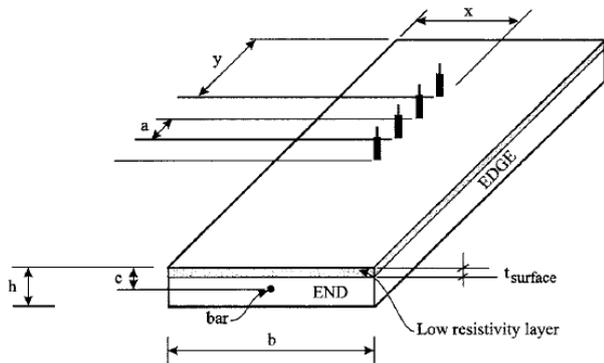


Figura 112 Correção dos valores registados pela Combinação 1

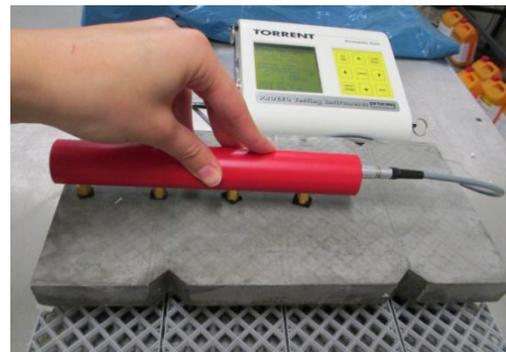
4.5.3. MÉTODO DOS QUATRO ELÉTRODOS

O método dos 4 elétrodos foi utilizado apenas na avaliação da resistividade das placas, durante um período de 49 dias em duas zonas distintas: zona 1 e zona 2. Em cada zona realizaram-se medições a 0° e a aproximadamente 85° uma vez que a sonda apresentava dimensões superiores às do provete. Os resultados destas medições apresentam-se no Anexo 1.

O equipamento utilizado para a medição da resistividade pelo método dos quatro elétrodos foi o TORRENT[®] da PROCEQ[®] que aplica uma corrente alternada com uma frequência de 72 Hz e uma impedância de entrada de 10 MΩ, com o espaçamento dos elétrodos de 50 mm. Como referido no Capítulo 3, o método dos quatro elétrodos apresenta algumas restrições, nomeadamente, restrições geométricas. A Figura 113, já apresentada anteriormente, apresenta algumas recomendações relativamente à geometria do provete e dos elétrodos e na Figura 114 ilustra-se uma medição da resistividade na direção 0° e confronta-se estas recomendações com as condições em que o ensaio foi realizado. Conclui-se que o ensaio não foi realizado nas melhores condições devido, essencialmente, a problemas na geometria do provete. No entanto, o problema poderia ser minimizado caso a distância entre os elétrodos da sonda fosse ajustável.



- a > 40 mm
- $a \leq \frac{h}{4}$
- $a \leq \frac{b}{4}$
- $a \leq \frac{2}{3}c$, if a bar is present
- $a \geq 8 \times t_{\text{surface}}$, if a low resistivity layer is present
- $a \geq 1.5 \times \text{max. aggregate size}$
- x = edge distance $\geq 2a$
- y = end distance (no restrictions)



$$50 \text{ mm} > 40 \text{ mm} \text{_____ok}$$

$$50 \text{ mm} \leq \frac{h}{4} = \frac{25}{4} = 6.25 \text{ mm} \text{_____ko}$$

$$50 \text{ mm} \leq \frac{b}{4} = \frac{150}{4} = 37.5 \text{ mm} \text{_____ko}$$

$$50 \text{ mm} \geq 1.5 \times d_{\text{máx}} = 1.5 \times 1 = 1.5 \text{ mm} \text{_____ok}$$

$$x = \frac{150}{2} = 75 \geq 2a = 2 \times 50 = 100 \text{ mm} \text{_____ko}$$

Figura 113 Recomendações para a realização do ensaio dos quatro elétrodos

Figura 114 Comparação entre as recomendações e o estudo realizado

4.6. ULTRASSONS

Os ensaios de ultrassons com transmissão direta e indireta, tal como a resistividade, foram realizados ao longo de um período de 49 dias, os quais são apresentados no Anexo 2. As placas estiveram sujeitas às duas transmissões, enquanto que os prismas foram ensaiados apenas por transmissão direta. O equipamento utilizado para os ensaios de ultrassons foi o TICO® da PROCEQ®. Este equipamento apresenta os resultados do ensaio em tempo ou em velocidade, se for inserida a distância de propagação das ondas. No entanto, uma vez que se pretende avaliar a propagação dos ultrassons em diferentes direções e com diferentes distâncias entre transdutores registou-se o tempo de percurso das ondas dado pelo equipamento e numa fase posterior determinou-se a velocidade de propagação para que desta forma as medições sejam comparáveis. A equação (12), já referida no capítulo anterior, permite o cálculo da velocidade dos ultrassons a partir do tempo de percurso registado pelo equipamento.



Figura 115 Equipamento de ensaios de UPV utilizado

$$V = \frac{d}{t} \quad (12)$$

Em que,

V = Velocidade de propagação da onda

d = Distância percorrida pela onda

t = Tempo de percurso da onda

4.6.1. TRANSMISSÃO INDIRETA

Na Figura 116 é possível observar o ensaio de ultrassons por transmissão indireta. Na Figura 117 apresentam-se as localizações dos transdutores para a realização de ensaios com transmissão indireta. As posições 5, 6, 7, 8 e 9 foram realizadas apenas no início dos ensaios de ultrassons com o intuito de avaliar a influência da distância entre os transdutores nos resultados obtidos. Este tema foi discutido no Capítulo 3, em que se refere a necessidade da realização de uma série de ensaios onde o transmissor é fixo e o recetor é posicionado a diferentes distâncias do transmissor para avaliar a influência da distância nos resultados.

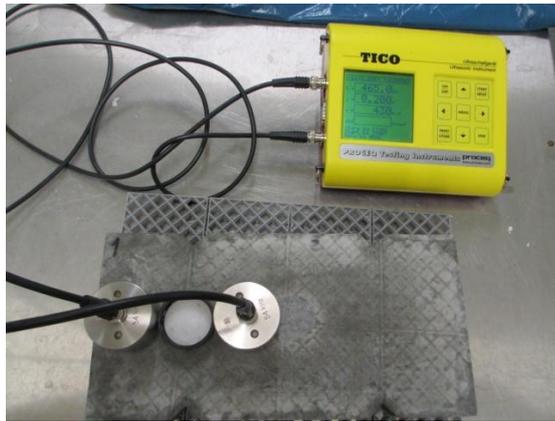


Figura 116 Ensaio de ultrassons por transmissão indireta

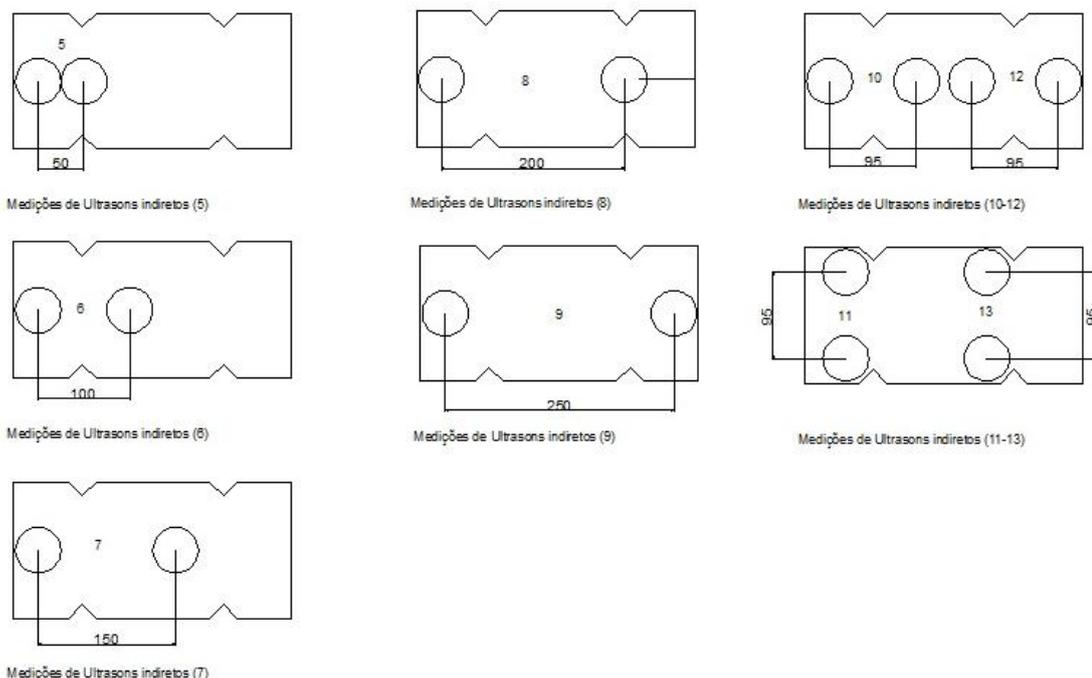


Figura 117 Posições dos transdutores para medição de ultrassons pelo método indireto

Na Figura 118 é possível observar um gráfico que relaciona a distância entre transdutores e o tempo de percurso da onda. Com este gráfico é possível concluir que, para uma distância inferior a 10 cm os resultados podem apresentar variações significativas. Na Figura 119 apresentam-se as ondas recebidas pelo transdutor visualizadas num osciloscópio. As ondas sofreram um processo de translação de modo a que o início da chegada da onda coincidissem com uma onda V_p (Ondas P) de 5000m/s que como foi referido no capítulo anterior, as ondas P são as ondas que apresentam uma maior velocidade e, por isso, normalmente são as primeiras a serem detetadas. Com este acerto verifica-se que para uma velocidade de 2500 m/s ($V_p/2$) há uma certa correlação com a chegada de ondas com mais energia (registra-se uma maior amplitude), supostamente ondas de superfície. Quando se sobrepõe os resultados dos tempos de percurso dados pelo equipamento (TICO) e uma vez que o equipamento apenas está preparado para mostrar o tempo de viagem da primeira onda detetada, verifica-se que, para uma distância de 5 cm o resultado é coincidente com a reta relativa à velocidade de 2500 m/s o que supõe-se ter sido medido o tempo de chegada das ondas de superfície. Nos casos em que a distância entre transdutores seja superior a 5 cm supõe-se ter sido medido o tempo de viagem das ondas P uma vez que a velocidade detetada das ondas é o dobro da velocidade referida anteriormente. A velocidade elevada das ondas deve-se à espessura reduzida do provete a qual leva a sucessivas reflexões das ondas permitindo que as ondas com uma maior velocidade, apesar de percorrerem uma distância maior, sejam as primeiras a serem detetadas. Também fica evidente que com os transdutores mais afastados se poderá estar a fazer uma sobrestimação da velocidade, ou subestimação do tempo de viagem.

As posições 10, 11, 12, 13 foram realizadas durante os 49 dias com o intuito de avaliar a velocidade das ondas ultrassons por transmissão indireta em duas zonas e em duas direções (direção 0° e 90°), tal como o ensaio de resistividade dos quatro eléctrodos.

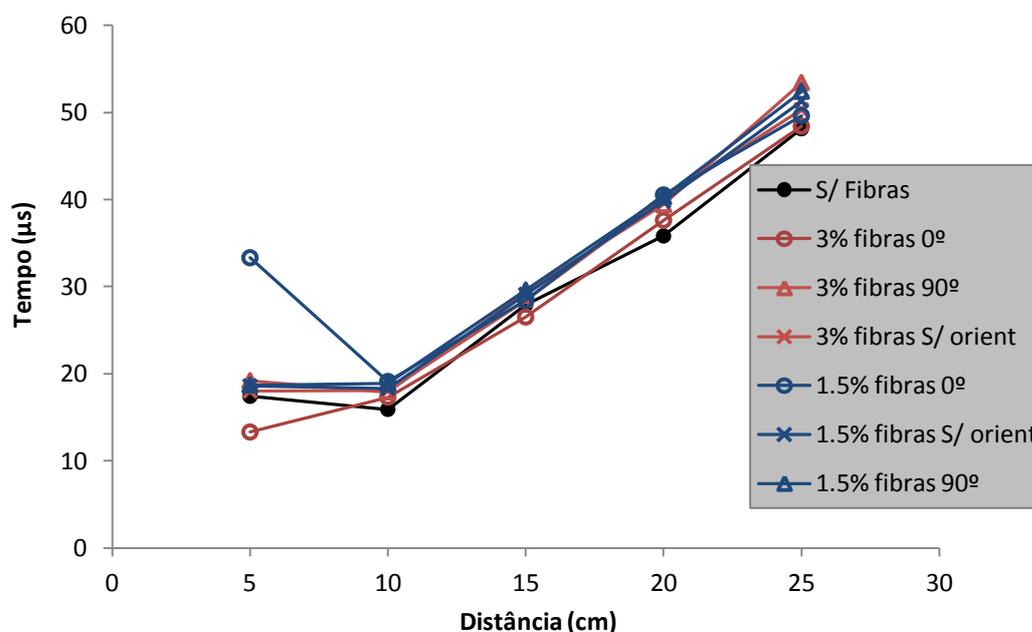


Figura 118 Relação entre a distância entre transdutores e o tempo de propagação da onda

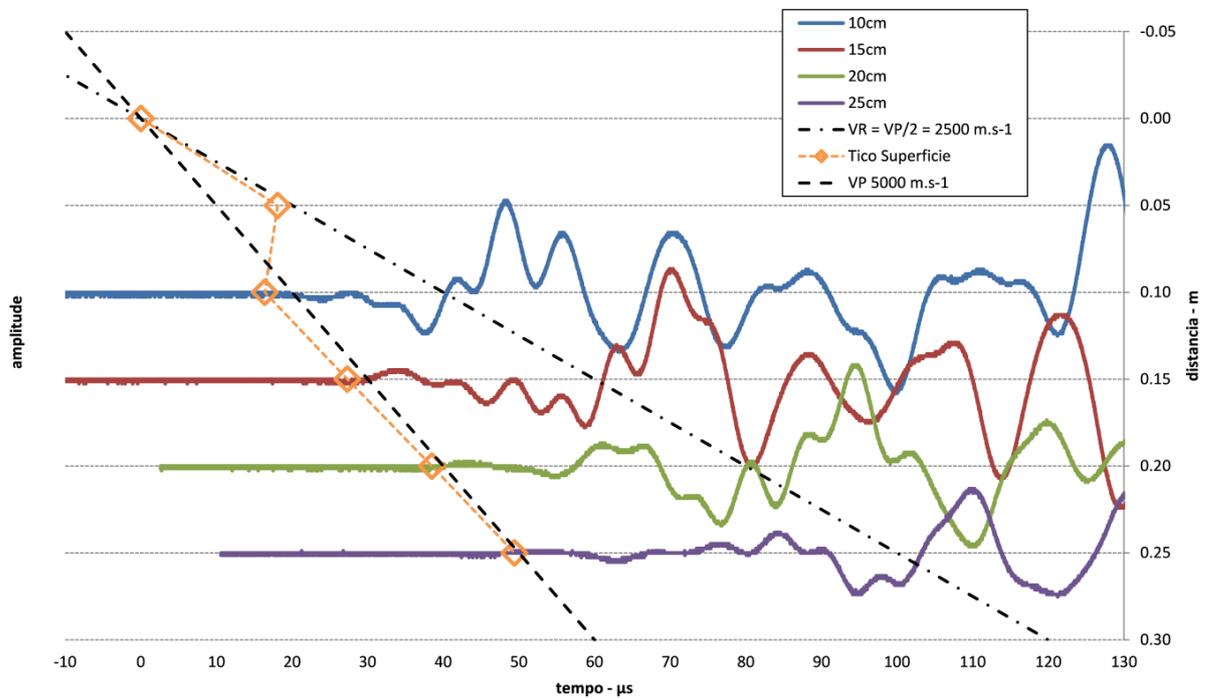


Figura 119 Ondas transmitidas pelo transdutor e visualizadas no osciloscópio

4.6.2. TRANSMISSÃO DIRETA

A transmissão direta foi realizada nas placas e nos prismas, nos prismas apenas foi avaliada uma posição de transdutores, no entanto nas placas avaliaram-se quatro posições 1,2,3 e 4, sendo que as três primeiras correspondem à avaliação na direção a 90° e a quarta posição corresponde à direção a 0°. Na Figura 120 ilustra-se as diferentes posições descritas anteriormente. Na Figura 121 é possível observar o ensaio realizado nos prismas por transmissão direta na direção 0°. Na Figura 122 e na Figura 123 apresenta-se o ensaio realizado na placa na direção 0° e na direção 90°, respetivamente.

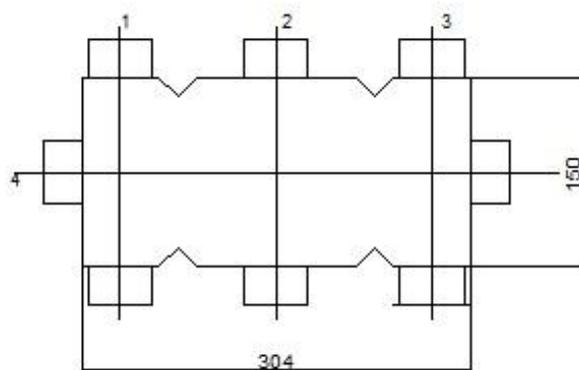


Figura 120 Descrição das 4 posições dos transdutores nas placas para avaliar a transmissão direta



Figura 121 Transmissão direta num prisma (direção de medição a 0°)



Figura 122 Transmissão direta numa placa (direção de medição a 0°)

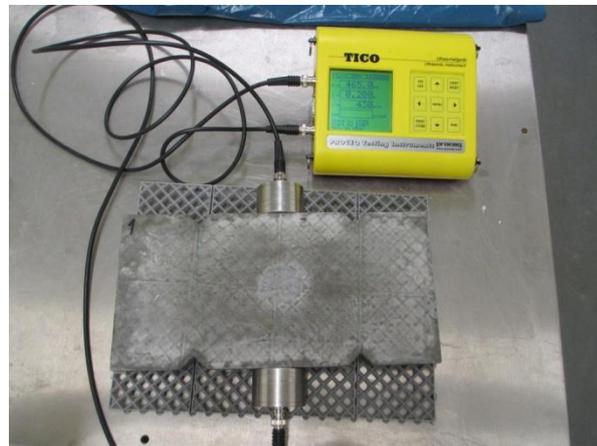


Figura 123 Transmissão direta numa placa (direção de medição a 90°)

4.7. INDUTÂNCIA

A medição da indutância magnética foi realizada apenas nas placas em duas zonas e em duas direções à semelhança do método dos quatro eléctrodos para a avaliação da resistividade. Para a obtenção da indutância foi construída uma sonda composta por um núcleo de ferro envolvido por um fio condutor elétrico (cobre), a sonda é ligada a uma ponte de medida de RLC (R-Resistência, L-Indutor, C-Condensador) da qual, para os presentes ensaios, é extraído o valor de indutância para duas frequências: 120 Hz e 1 KHz. Para além do valor de indutância é necessário ter em conta o fator de qualidade da medição para cada frequência uma vez que traduz as perdas no circuito. Em todas as medições do presente estudo verificou-se que o fator de qualidade para uma frequência de 1 KHz é sempre superior ao fator de qualidade para uma frequência de 120 Hz, desta forma, os resultados apresentados no capítulo seguinte dizem respeito aos valores registados para uma frequência de 1 KHz.

Na Figura 124 a) é possível observar o equipamento utilizado para a medição da indutância e na Figura 124 b) apresenta-se a sonda utilizada onde é possível observar o fio condutor enrolado e isolado, para aumentar a qualidade das medições, num núcleo de ferrite. A indutância foi medida em duas zonas (zona 1 e zona 2) e em duas direções (0° e 90°). Na Figura 125 a) é possível visualizar um ensaio realizado na zona 1 e na direção a 0° e na Figura 125 b) apresenta um ensaio realizado na zona 2 e a 90°.

Neste estudo optou-se por apresentar os resultados em permeabilidade magnética obtidos através dos resultados de indutância uma vez que é a permeabilidade magnética que caracteriza um material. A permeabilidade magnética do material é obtida através de uma comparação entre a permeabilidade magnética do ar (μ_{ar}) e a indutância do material (L_1) com a permeabilidade magnética do material (μ_{r1}) e indutância do ar (L_{ar}) dada pela equação (20). Como a permeabilidade magnética do ar é aproximadamente igual à unidade, a expressão (20) resulta na expressão (21). Esta comparação é possível ser feita uma vez que os valores de N , A e l da equação (22) são propriedades constantes da sonda. No Anexo 3 apresentam-se os valores de indutância e da permeabilidade magnética resultantes dos ensaios nas placas.

$$\frac{\mu_{r1}}{\mu_{ar}} = \frac{L_1}{L_{ar}} \quad (20)$$

$$\mu_{r1} = \frac{L_1}{L_{ar}} \quad (21)$$

Em que,

μ_{r1} = Permeabilidade do material

μ_{ar} = Permeabilidade do ar ($\mu_{ar} = 1$)

L_{ar} = Indutância do ar

L_1 = Indutância do material

$$L = \mu_0 \mu_r N^2 \frac{A}{l} \quad (22)$$

Em que,

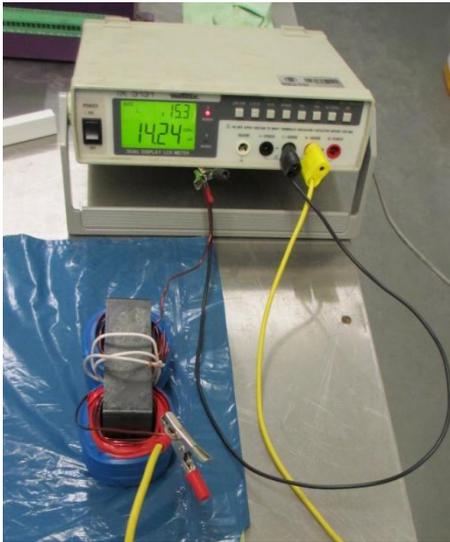
N = Número de voltas na espira

μ_0 = Permeabilidade do vácuo – $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$

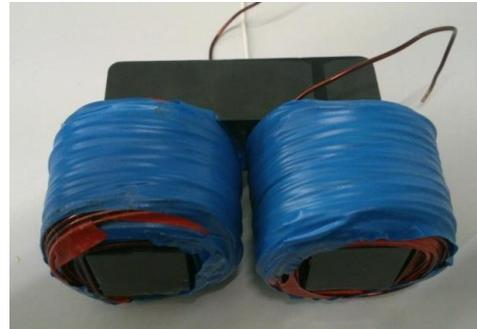
μ_r = Permeabilidade do material

A = Área do núcleo que envolve as espiras

l = Comprimento núcleo envolvido pela espira

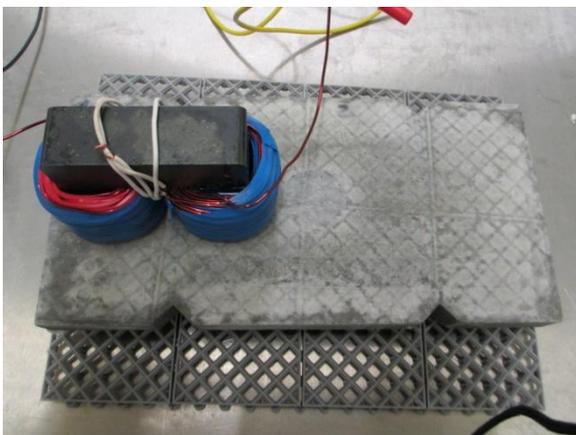


a)



b)

Figura 124 a) Equipamento para a medição da permeabilidade magnética, ponte de medida RLC; b) sonda utilizada



a)



b)

Figura 125 Posicionamento da sonda. a) zona 1 e direção 0°. b) zona 2 e direção 90°.

4.8. MASSA VOLÚMICA

A massa volúmica foi determinada apenas nas placas com o intuito de avaliar a variação da massa volúmica com a percentagem de fibras. O ensaio foi realizado de acordo com a norma NP EN 12390-9 2009. A massa volúmica de cada placa foi determinada através da equação (23)

$$D = \frac{m_s}{V} \quad (23)$$

Em que,

D = Massa volúmica

m_s = Massa do provete saturado

V = Volume do provete

O volume do provete é determinado segundo a equação (24), pelo facto de a balança estar calibrada não é necessário entrar com a parcela da massa aparente do estribo imerso (m_{st}). Desta forma a equação referida simplifica-se originando a equação (25). A equação (26) permite determinar a massa volúmica diretamente através das grandezas retiradas do ensaio. O equipamento utilizado para a medição da massa volúmica apresenta-se na Figura 126.

$$V = \frac{m_a - [(m_{st} + m_w) - m_{st}]}{\rho_w} \quad (24)$$

$$V = \frac{m_a - m_w}{\rho_w} \quad (25)$$

$$D = \frac{m_s}{m_a - m_w} \times \rho_w \quad (26)$$

Em que,

V = Volume do provete

m_a = Massa do provete ao ar

m_{st} = Massa aparente do estribo imerso

m_w = Massa aparente do provete imerso

ρ_w = Massa volúmica da água

D = Massa volúmica

Na Figura 126 a) é possível observar o equipamento completo para a realização do ensaio, na imagem Figura 126 b) ilustra a determinação da massa do provete ao ar (m_a) e na Figura 126 c) é visível um provete imerso e suspenso para o cálculo da massa aparente do provete imerso (m_w).

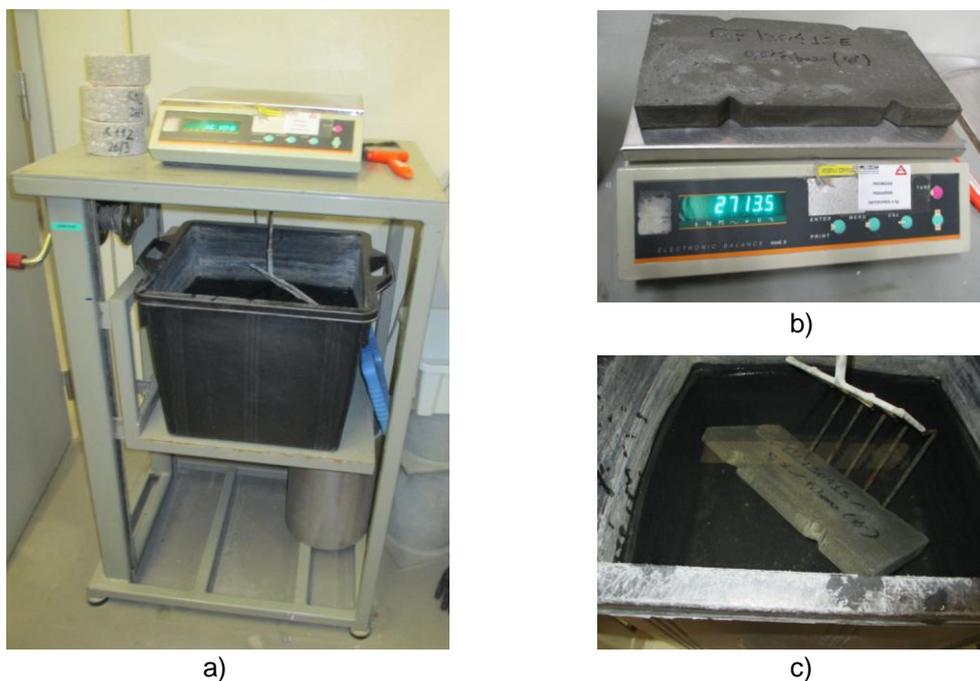


Figura 126 a) Equipamento para medir a massa volúmica. b) Balança com provete. c) Provete em suspensão num recipiente com água

4.9. ENSAIOS DESTRUTIVOS

Os ensaios destrutivos foram realizados em todos os provetes: placas e prismas, no entanto, a idade com que se realizaram os ensaios não foi a exatamente a mesma. No Anexo 4 apresentam-se o tempo de cura e a idade da realização do ensaio. É de realçar que apesar de os ensaios não se terem realizado exatamente para as mesmas idades em todas as placas, estas estiveram sujeitas ao mesmo tempo de cura. Admitindo que a hidratação do betão se desenvolve maioritariamente em água, todas as placas encontram-se num estado de hidratação semelhante.

4.9.1. DEWST

O ensaio DEWST foi realizado tendo em vista o estudo desenvolvido por Prisco *et al.* [55]. As placas referidas nas secções anteriores apresentavam dimensões $304 \times 150 \times 25 \text{ mm}^3$. Como já foi referido, para a realização deste ensaio foi necessário serrar as placas em que cada placa origina duas placas quadradas com dimensões $150 \times 150 \times 25 \text{ mm}^3$. Uma das placas corresponde à zona 1 e outra à zona 2 (zonas onde se realizaram parte dos ensaios não-destrutivos). A Figura 127 a) ilustra a placa inicial com as marcações para a serragem e na Figura 127 b) apresenta-se a placa serrada a meio, antes do corte ou do corte dos entalhes. Na Figura 127 c) é apresentado o equipamento utilizado para proceder ao corte dos provetes.

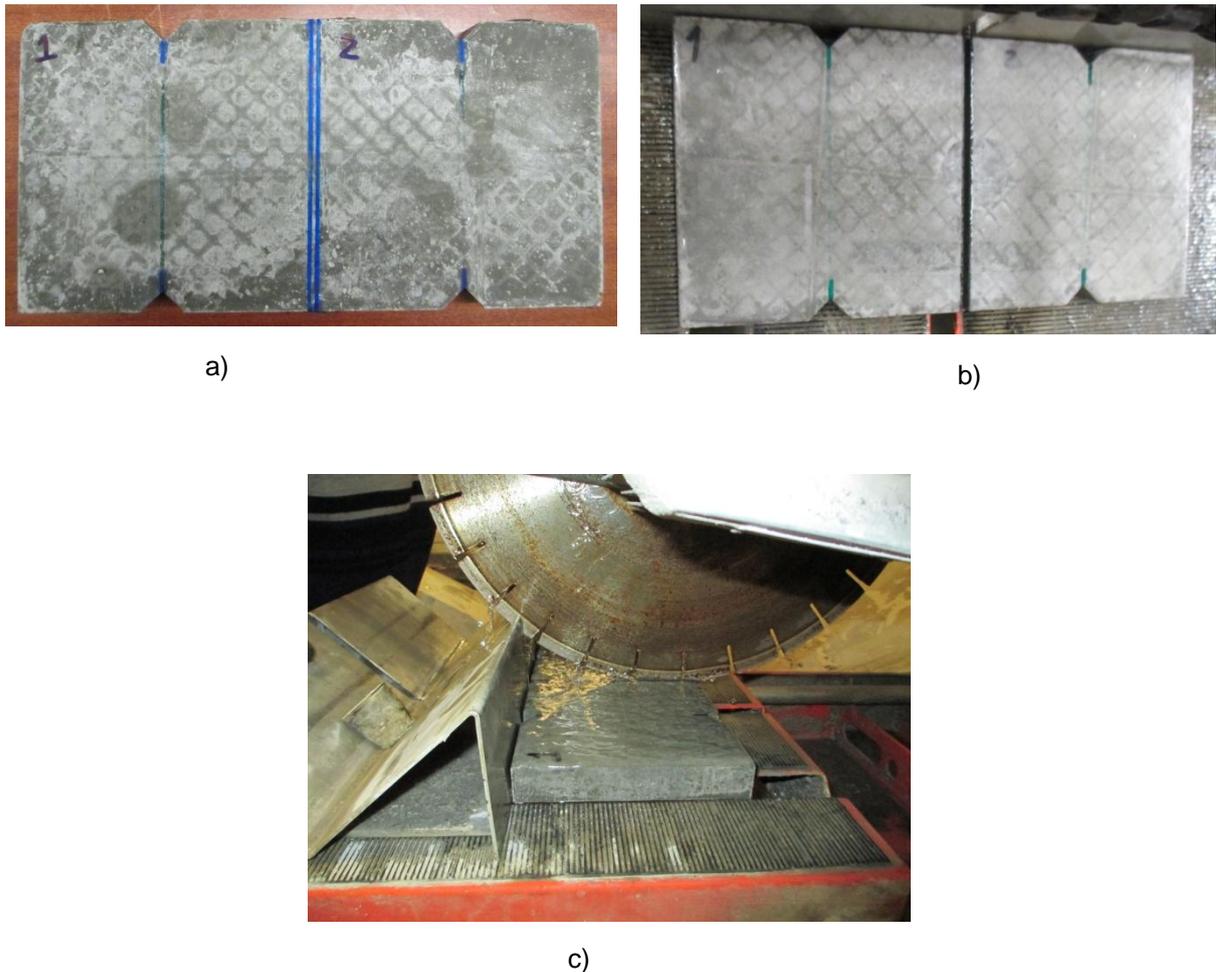


Figura 127 Serragem das placas. a) A placa antes da serragem ($304 \times 150 \times 25 \text{ mm}^3$). b) As duas placas depois da serragem ($150 \times 150 \times 25 \text{ mm}^3$). c) Equipamento de serragem

Como foi referido no Capítulo 2, o ensaio DEWST envolve cuidados especiais na sua preparação. A geometria do provete foi pensada de modo a que uma força vertical se converta numa força de tração. A Figura 129 ilustra a conversão entre a força vertical e a de tração em que a força de compressão se converte numa força tangencial e numa força normal às cunhas concebidas. A força normal às cunhas pretende desviar a força vertical do centro da placa para que desta forma seja criada uma força de tração. A força tangencial surge devido ao efeito do atrito e deve ser minimizada uma vez que pode afetar a tensão de tração mencionada anteriormente. Com o intuito de minimizar o atrito na transmissão de forças, a força de vertical é transmitida a um varão de aço e este por sua vez transmite as forças com as duas componentes (tangencial e normal) para as placas de aço.

Na Figura 128 apresenta-se um pormenor da ligação entre o varão e as chapas de aço, sendo de realçar que estas zonas de transmissão foram lubrificadas com grafite para minimizar o efeito de atrito. Nesta figura é ainda possível observar o corte realizado nos entalhes que têm como o objetivo conduzir a abertura de fenda. Nas Figuras 128 e 130 visualizam-se também os LVDT's (linear variable displacement transducers) utilizados para registar a abertura de fendas. Neste ensaio utilizaram-se três LVDT's em cada face para uma melhor validação e interpretação dos resultados obtidos. O ensaio DEWST foi realizado impondo um deslocamento a uma velocidade constante de 0.003 mm/s .



Figura 128 Pormenor do contacto entre o varão de aço e as chapas de aço

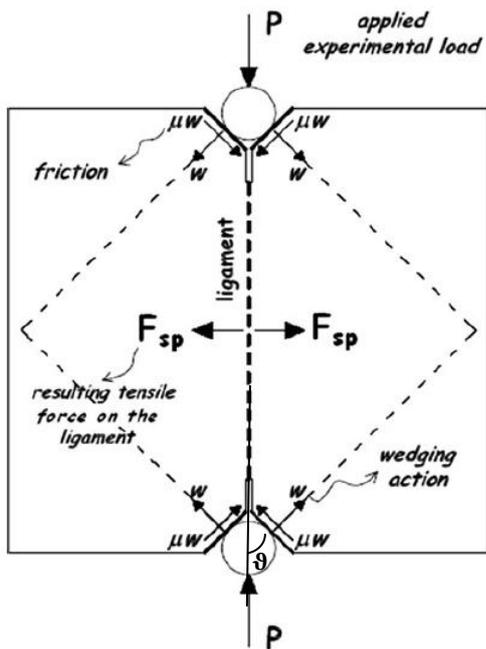


Figura 129 Transformação da força vertical aplicada na força de tração

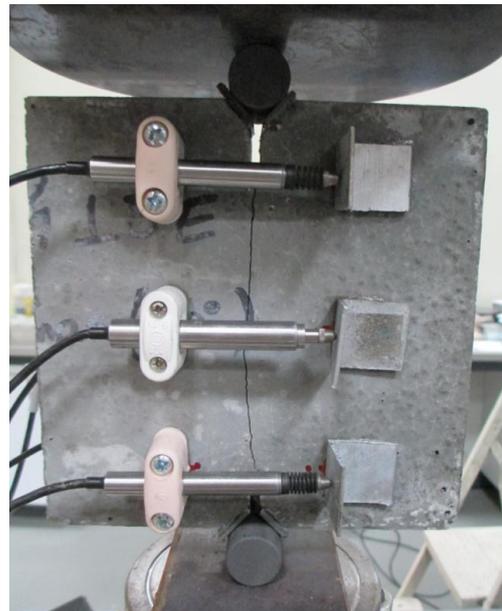


Figura 130 Realização do ensaio DEWST

O cálculo da força de tração resulta do equilíbrio de forças existente na placa e é dada pela equação (27).

$$F_{SP} = P \frac{\cos \vartheta - \mu \sin \vartheta}{\sin \vartheta + \mu \cos \vartheta} \quad (27)$$

Em que,

F_{sp} = Força de tração

P = Força de vertical

ϑ = Ângulo das cunhas

μ = Coeficiente de atrito

O ângulo das cunhas utilizado foi de 45° e o coeficiente de atrito de 0.06 segundo as recomendações de Prisco *et al.* [55]. A equação anterior é simplificada devido à introdução das constantes mencionadas anteriormente e é dada pela equação (28):

$$F_{SP} = 0.89P \quad (28)$$

4.9.2. ENSAIOS DE TRAÇÃO POR FLEXÃO E DE COMPRESSÃO DOS PRISMAS

O ensaio à tração por flexão e o ensaio à compressão foram realizados apenas nos prismas (40x40x160 mm³) e a uma velocidade de 0.01 mm/s. Estes dois ensaios são preconizados na norma NP EN 196-1 2006 Método de ensaio de cimentos - Determinação da resistência mecânica. Neste estudo os ensaios foram realizados com o intuito de avaliar o efeito da orientação das fibras e da percentagem de fibras na resistência à compressão e na resistência à flexão.

A tensão de fissuração é dada pela equação (29) e depende da distância entre apoios (l) e da geometria do provete. Na Figura 131 é possível observar um ensaio á flexão de um prisma e as dimensões utilizadas para o cálculo da tensão de fissuração.

$$f_{t, cr} = \frac{1500 \times F_{t, cr} \times l}{b^3} \quad (29)$$

Em que,

$f_{t, cr}$ = Tensão de fissuração (MPa)

$F_{t, cr}$ = Força de fissuração (KN)

l = Distância entre apoios (mm)

b = Lado da secção quadrada do prisma (mm)

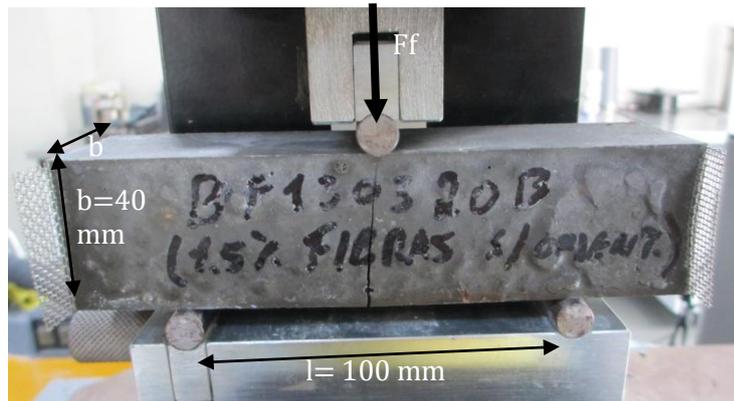


Figura 131 Ensaio à tração por flexão de um prisma e as dimensões associadas

Após a realização do ensaio à flexão é possível a concretização de dois ensaios à compressão nas duas metades resultantes do ensaio. A resistência à compressão dos prismas é dada pela equação (30).

$$f_c = \frac{F_c \times 1000}{40 \times 40} \quad (30)$$

Em que,

f_c = Tensão de rotura à compressão (MPa)

F_c = Força máxima de compressão (KN)

40×40 = Área de carga (mm^2)

Na Figura 132 são apresentados os três tipos de ensaios destrutivos realizados no mesmo equipamento no âmbito deste estudo.



Figura 132 Equipamento utilizado para os três tipos de ensaios destrutivos estudados

5

RESULTADOS OBTIDOS

5.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo pretende-se apresentar e discutir os resultados obtidos nos ensaios não-destrutivos e nos ensaios destrutivos apresentados nos capítulos anteriores. Os dois tipos de provetes usados foram sujeitos a ensaios não-destrutivos periódicos até à idade 49 dias, para se obter uma evolução das propriedades com a idade. Para além da análise desta evolução, analisou-se também a influência da dosagem de fibras e da orientação das fibras nas diversas propriedades do material.

No que respeita a ensaios destrutivos implementou-se o ensaio DEWST desenvolvido por Prisco *et al.* [55] uma vez que é um ensaio que apresenta mais facilidade em ser executado quando comparado com o ensaio de tração direta e, à semelhança deste, desenvolve também um estado de tensão de tração pura no interior do provete. Este ensaio foi realizado em provetes quadrados obtidos a partir de placas retangulares com a geometria necessária para a realização do mesmo. Com este ensaio foi possível uma caracterização do comportamento à tração do material e ductilidade, com o intuito de perceber e detetar a influência da percentagem e da orientação das fibras.

Para além das placas, os prismas também foram sujeitos a ensaios destrutivos, nomeadamente, ensaios indiretos de tração, por flexão, e ensaios de compressão. Os resultados destes ensaios também serão analisados quanto à influência da dosagem e da orientação das fibras.

Realça-se ainda que, tal como descrito no Capítulo 4, o facto existirem placas que apresentam fibras sem orientação, outras placas com fibras orientadas a 0° e outras com fibras orientadas a 90° . Todas as placas foram submetidas a ensaios não-destrutivos na direção 0° e 90° , ou seja, podem-se ter placas com fibras orientadas a 0° e o ensaio realizar-se na direção 90° . No que diz respeito aos prismas, estes também apresentam as diversas orientações de fibras descritas anteriormente, No entanto, devido à sua forma apenas se realizaram ensaios na direção 0° .

Para uma melhor interpretação dos resultados do presente capítulo na Tabela 21 apresenta-se a nomenclatura utilizada.

Tabela 21 Nomenclatura utilizada

		Nomenclatura utilizada	Descrição
Provete	Sem Fibras	S/ fibras	Sem fibras
	3% de fibras	3% fibras S/ orient	3% de fibras sem orientação
		3% fibras 0°	3% de fibras orientadas a 0°
		3% fibras 90°	3% de fibras orientadas a 90°
	1.5% de fibras	1.5% fibras S/ orient	1.5% de fibras sem orientação
		1.5% fibras 0°	1.5% de fibras orientadas a 0°
		1.5% fibras 90°	1.5% de fibras orientadas a 90°
	0.5% de fibras	0.5% fibras S/ orient	0.5% de fibras sem orientação
		0.5 fibras 0°	0.5% de fibras orientadas a 0°
		0.5% fibras 90°	0.5% de fibras orientadas a 90°

5.2. EVOLUÇÃO COM A IDADE

5.2.1. RESISTIVIDADE ELÉTRICA

O método dos dois elérodos foi aplicado em ambos os provetes, no entanto, nos prismas foram utilizados elérodos embebidos e nas placas elérodos exteriores. É importante referir que os resultados da resistividade elétrica no método dos dois elérodos foram obtidos através da combinação 1 de multímetros.

Na Figura 134 apresenta-se a evolução dos resultados da resistividade elétrica com o tempo, avaliada nos prismas, em que os dois elérodos se encontravam embebidos nas duas faces opostas mais distanciadas, correspondendo a uma medição na direção a 0°. A Figura 133 demonstra como é que o ensaio se realizou.



Figura 133 Medição da resistividade método dos dois elérodos embebidos num prisma (ensaio realizado na direção 0°)

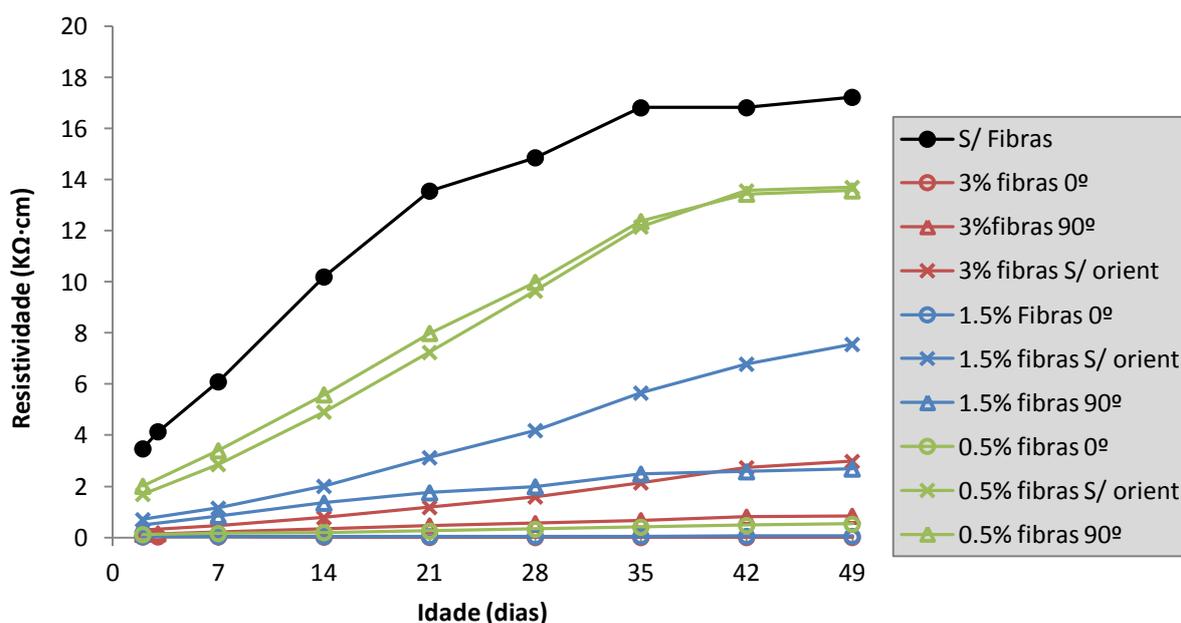


Figura 134 Evolução da resistividade elétrica nos prismas com a idade (ensaio realizado na direção 0°)

Pela análise da Figura 134 observa-se, na maior parte dos provetes, um crescimento da resistividade com o passar do tempo. Este resultado vai de encontro ao esperado uma vez que o processo de hidratação do betão ao longo do tempo faz com que a microestrutura do betão se torne progressivamente mais densa diminuindo desta forma volume de poros interconectáveis. A Figura 135 pretende mostrar a zona do gráfico anterior onde a resistividade é mais baixa. É de realçar que os valores mais baixos de resistividade elétrica registados correspondem a prismas que estiveram sujeitos a um campo magnético que alinhava as fibras a 0° (a mesma direção do ensaio). A razão deste resultado é explorada na seção 5.4. Quanto à evolução com a idade, verifica-se que para 0.5% de fibras há um aumento, no entanto, para 1.5% e 3% de fibras a resistividade permanece praticamente constante.

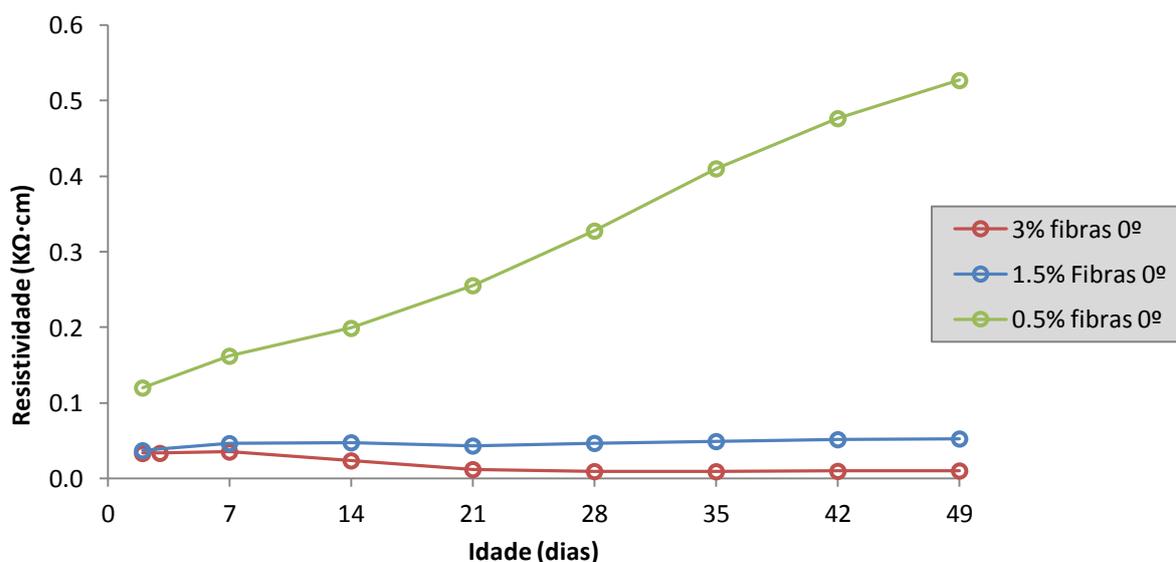


Figura 135 Evolução da resistividade elétrica nos prismas com a idade. Prismas com valores de resistividade mais baixos

Na Figura 137 apresenta-se a evolução da resistividade elétrica com a idade medida pelo método dos dois elétrodos exteriores na direção 0°. O esquema de ensaio, é ilustrado na Figura 136. Pela análise do gráfico da Figura 137 verifica-se um aumento de resistividade ao longo do tempo e, ao contrário do que acontece nos prismas com fibras orientadas a 0° e com percentagem 1.5 e 3% de fibras em que a resistividade se mantém praticamente constante, nas placas correspondentes, a resistividade aumenta ao longo do tempo. Na Figura 138 é possível observar o crescimento descrito anteriormente. No Anexo 5 encontram-se as curvas semelhantes às apresentadas mas para direção a 90°, verificando-se igualmente uma tendência crescente da resistividade com a idade.



Figura 136 Medição da resistividade método dos dois elétrodos exteriores numa placa na direção 0°

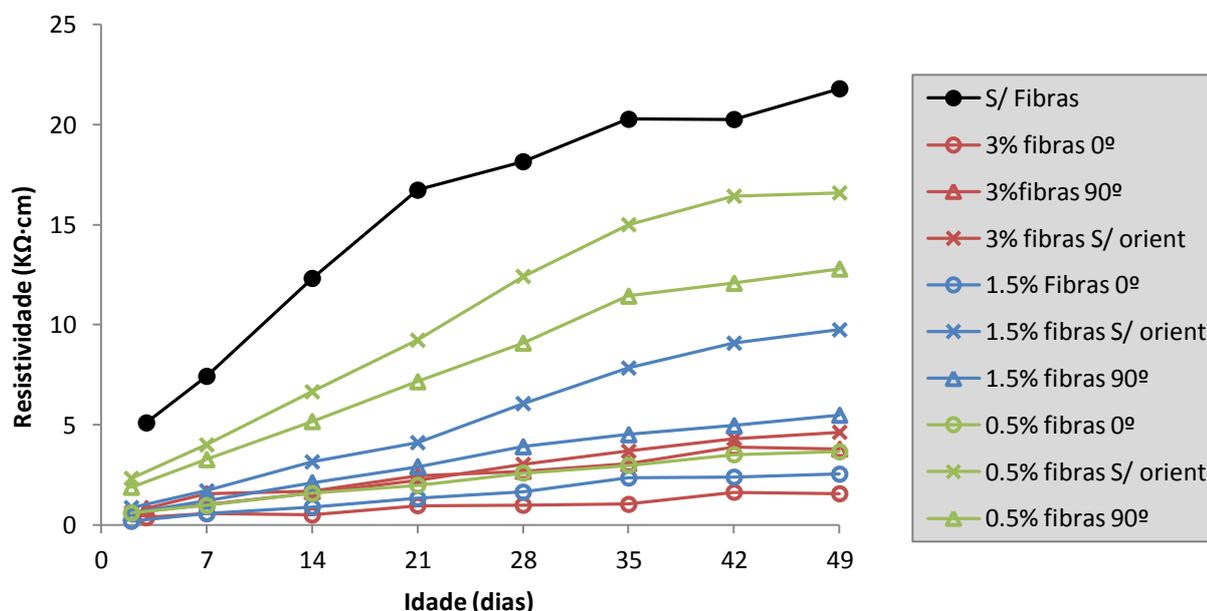


Figura 137 Evolução da resistividade elétrica das placas com a idade determinada pelo método dos dois elétrodos na direção 0°

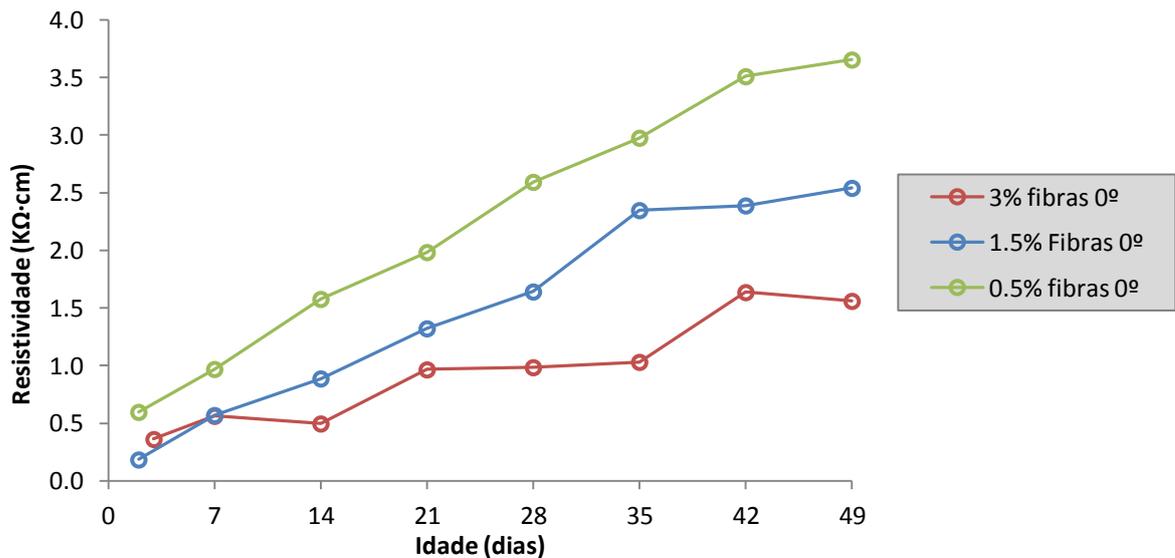


Figura 138 Evolução da Resistividade elétrica nas placas com a idade determinada pelo método dos dois eléttodos na direção 0°. Placas com valores de resistividade mais baixos

Relativamente ao método dos quatro eléttodos, este foi realizado em duas zonas das placas (zona 1 e zona 2) e em duas direções (0° e ≈85°). Na Figura 139 ilustra-se o esquema de ensaio e a medição na direção 0° e na zona 1, cujos resultados são dados na Figura 140. Pela análise desta figura é possível concluir que a resistividade avaliada por este método apresenta igualmente uma tendência crescente. No entanto, quando observamos a parte do gráfico onde há uma grande concentração de curvas (ver Figura 141) observa-se que os resultados oscilam em torno de um valor médio. Uma das razões possíveis que leva a estes resultados deve-se ao facto de o método dos quatro eléttodos não ter sido realizado de acordo com as recomendações no que diz respeito à geometria (ver secção 4.4.3. do capítulo 4).

O aparelho de medição visível na Figura 139 fornece resultados da resistividade elétrica e do grau de incerteza associado à medição. Nas medições das placas sem fibras a partir dos 28 dias os valores de resistividade atingiram a capacidade de medição do aparelho uma vez que os resultados apresentam um grau de certeza inferior a 100%. No entanto, os resultados foram apresentados na Figura 140 uma vez que os mesmos seguem uma tendência normal de crescimento. A resistividade elevada verificada nestas placas deve-se ao facto de o betão sem fibras apresentar uma microestrutura compacta e de elevada densidade, apresentado um volume de poros interconectáveis muito baixo dificultando a passagem de corrente elétrica.

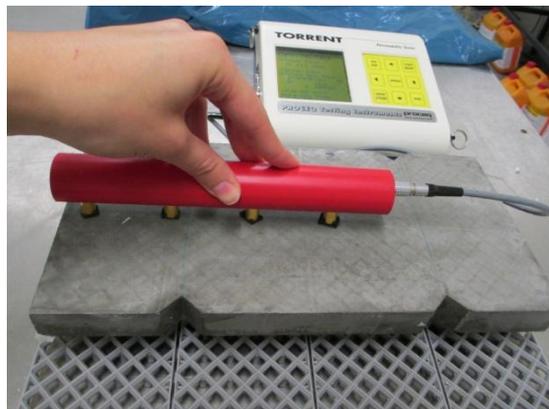


Figura 139 Medição da resistividade método dos quatro eléttodos numa placa na direção 0° na zona 1

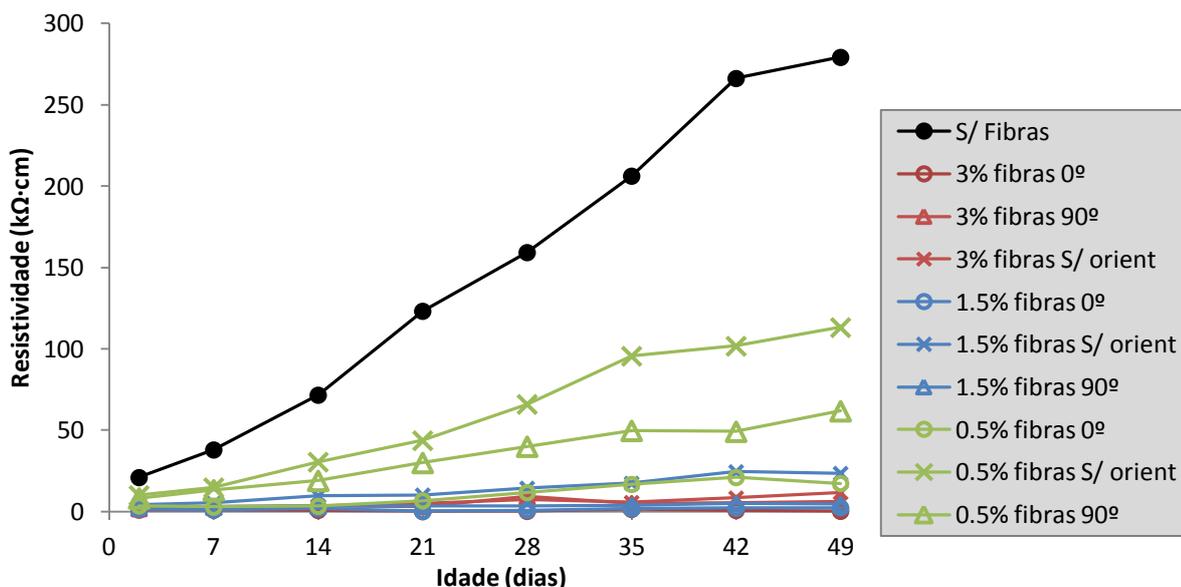


Figura 140 Evolução da resistividade nas placas com a idade. Medições realizadas pelo método dos quatro elétrodos na zona 1 na direção 0°

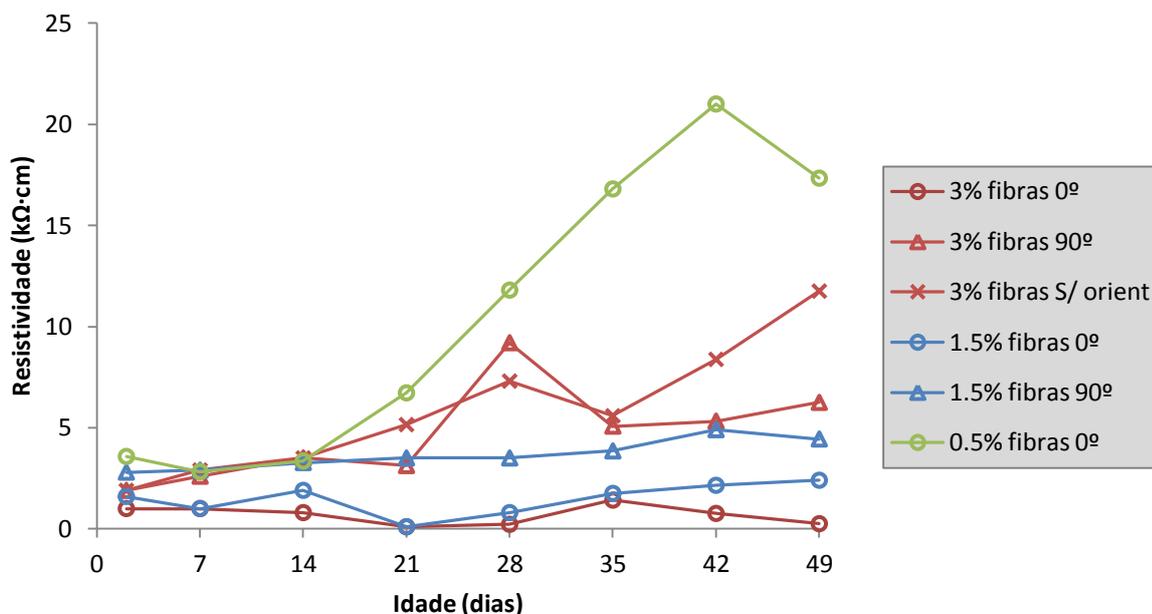


Figura 141 Evolução da resistividade nas placas com a idade determinada pelo método dos quatro elétrodos na zona 1 na direção 0°. Placas com valores de resistividade mais baixos

Os resultados obtidos na zona 1 foram semelhantes aos obtidos para a zona 2 para a mesma direção de ensaio. Os resultados para a direção 85° nas duas zonas também se encontram no Anexo 5 e apresentam resultados igualmente semelhantes aos resultados apresentados anteriormente, no entanto, quando se aumenta a parte do gráfico com resistividades mais baixas encontramos maiores picos e maior instabilidade. Estes resultados provavelmente advêm, para além de questões geométricas discutidas anteriormente, das condições fronteira em que o ensaio foi realizado, uma vez que procurou-se inclinar a sonda o mais possível com o intuito da proximidade com o ângulo 90° levando a que os elétrodos se localizassem muito próximos do bordo do provete.

5.2.2. ULTRASSONS

O ensaio de ultrassons foi aplicado nos prismas e nas placas. Para os prismas aplicou-se o método de transmissão direta e para as placas utilizaram-se ambos os métodos de transmissão direta e a indireta. Na Figura 142 ilustra-se a aplicação por transmissão direta num prisma, na direção 0°, e na Figura 143 apresenta-se a evolução dos respetivos resultados com a idade. É possível verificar que a velocidade de propagação das ondas aumenta com a idade devido essencialmente ao processo de hidratação do betão em que a estrutura densifica e faz com que as ondas se propagem mais rapidamente. Realça-se ainda que a velocidade de propagação das ondas aumenta até cerca dos 21 dias de idade e a partir dessa idade a velocidade tende a estabilizar.



Figura 142 Método dos ultrassons com transmissão direta num prisma na direção 0°

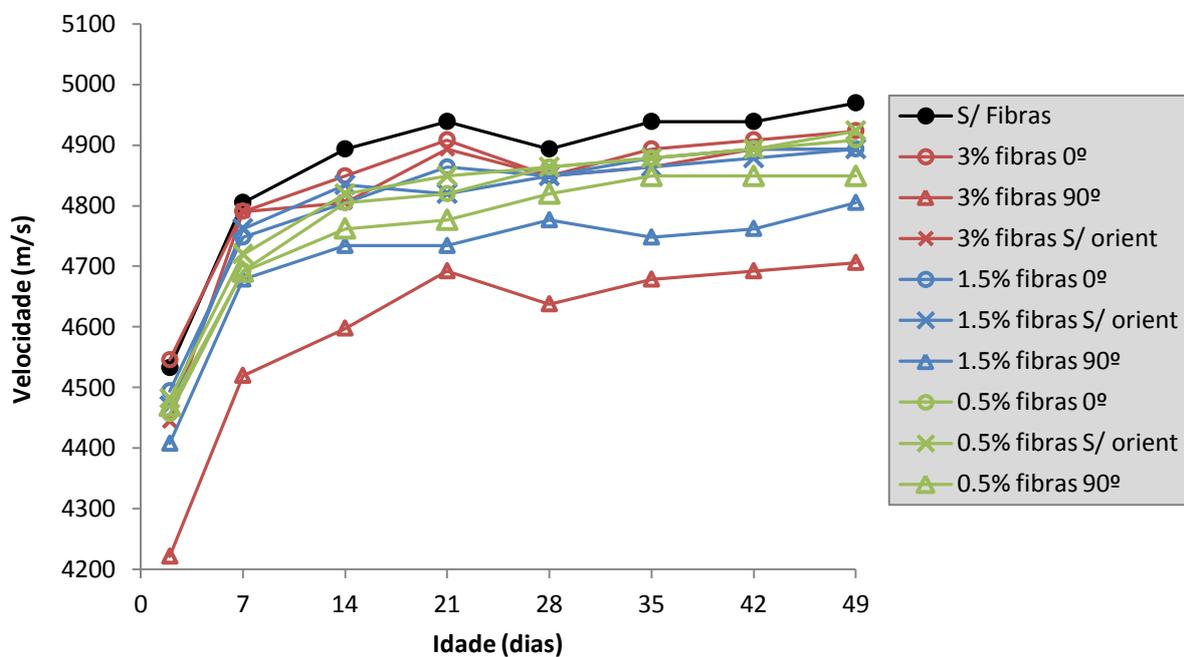


Figura 143 Evolução da velocidade de propagação de ondas ultrassons nos prismas com a idade determinada por transmissão direta na direção 0°

No Anexo 5 apresentam-se os resultados da evolução da velocidade de propagação das ondas com a idade para as placas na direção 0° e 90° para a transmissão direta. Estes resultados apresentam semelhanças com os resultados anteriores uma vez que a velocidade tende a aumentar com a idade e à semelhança dos prismas há uma tendência para a estabilização a partir dos 21 dias.

No que diz respeito à transmissão indireta, apenas as placas estiveram sujeitas a este tipo de ensaio. A Figura 144 a) ilustra um esquema do posicionamento dos transdutores na direção 0° por transmissão indireta em duas posições (10 e 12) e na Figura 144 b) apresenta-se o esquema de ensaio realizado com os transdutores na posição 10. Na Figura 145 apresenta-se a evolução da velocidade de propagação das ondas com o tempo.

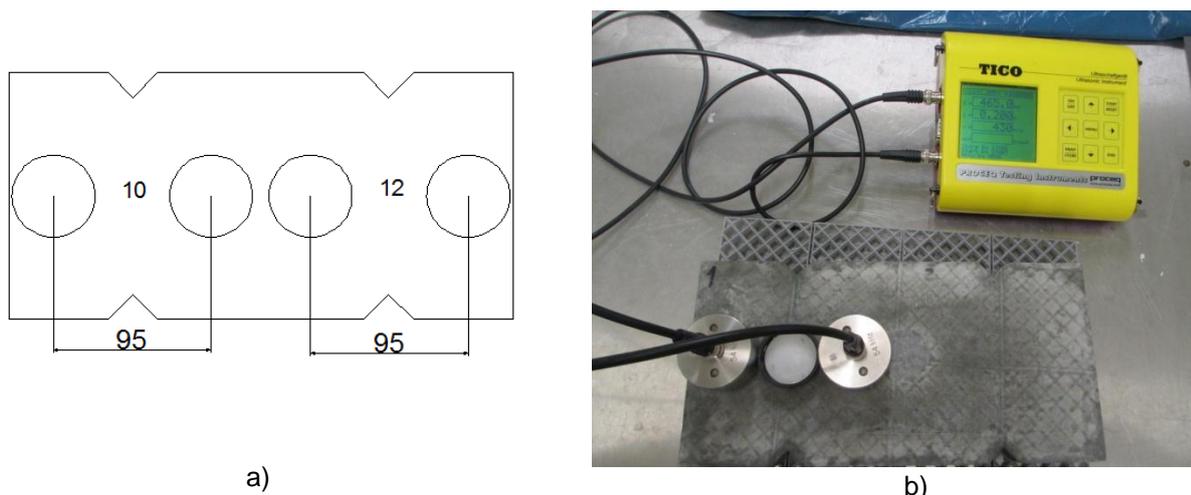


Figura 144 Método dos ultrassons com transmissão indireta numa placa na direção 0°. a) esquema onde ilustra o posicionamento dos transdutores para a medição na direção 0° na zona 1 (posição 10) e na zona 2 (posição 12). b) ensaio realizado na posição 10.

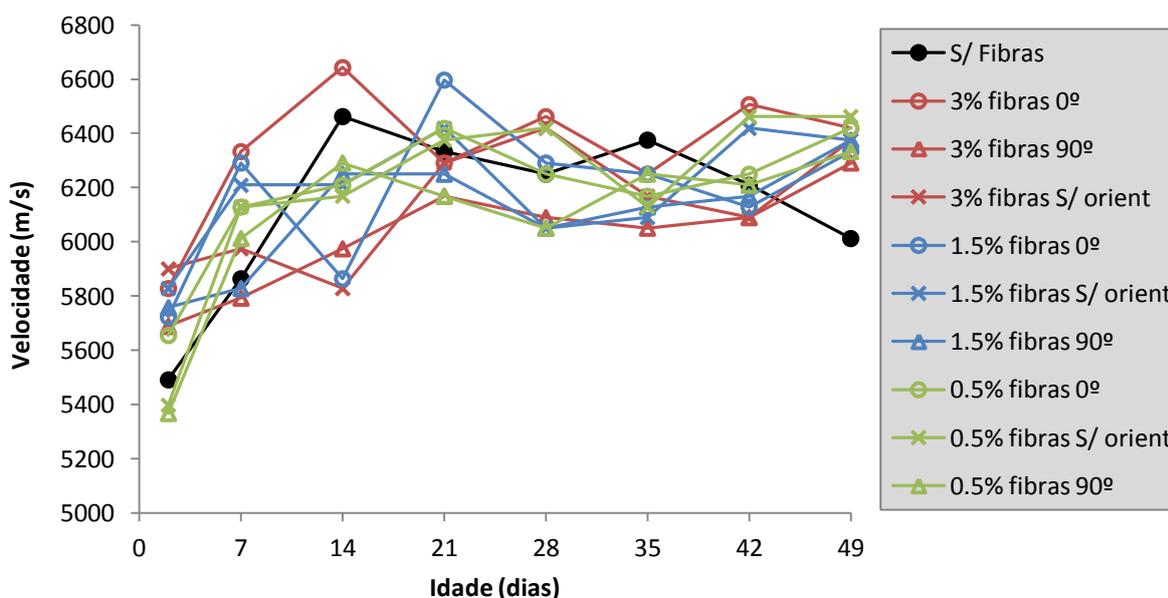


Figura 145 Evolução da velocidade de propagação de ondas ultrassons nas placas com a idade determinada por transmissão indireta com transdutores na posição 10

Pela análise da Figura 145 verifica-se que há uma tendência crescente até aos 21 dias tal como o sucedido por transmissão direta, no entanto, observam-se picos nas medições. A instabilidade nas medições deve-se essencialmente ao método utilizado - Transmissão indireta. Como referido no Capítulo 3, este método pode oferecer resultados não correspondentes ao material em estudo uma vez que as ondas podem sofrer processos de reflexão. Destaca-se ainda que a velocidade de onda em idades superiores a 21 dias por transmissão indireta aproxima-se dos 6200 m/s enquanto que por transmissão direta na mesma direção apresenta valores da ordem dos 4900 m/s. Esta discrepância de valores leva a acreditar que as ondas de chegada por transmissão indireta são as ondas P uma vez que apresentam velocidades elevadas.

No Anexo 5 apresentam-se os resultados da evolução da velocidade de propagação das ondas com a idade por transmissão indireta para as restantes posições dos transdutores (11, 12 e 13). Estes resultados apresentam semelhanças com os resultados para os transdutores na posição 10 uma vez que apresentam picos e uma maior instabilidade nos valores quando comparados ao método por transmissão direta.

5.2.3. PERMEABILIDADE MAGNÉTICA

A permeabilidade magnética foi avaliada apenas nas placas nas duas zonas e em duas direções (0° e 90°). A Figura 146 pretende demonstrar a posição da sonda para a obtenção dos resultados do gráfico da Figura 147 que apresenta a evolução da permeabilidade magnética ao longo do tempo.

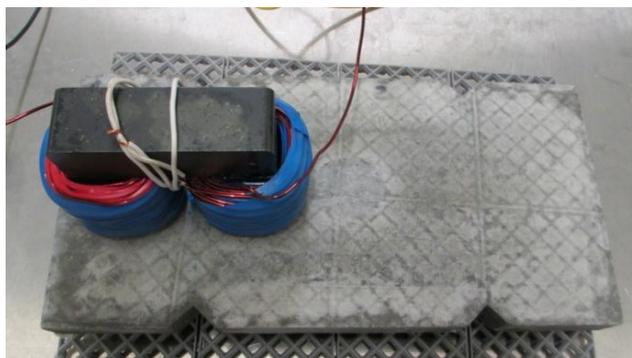


Figura 146 Ensaio realizado para medir a permeabilidade magnética com a sonda na direção 0° e na zona 1

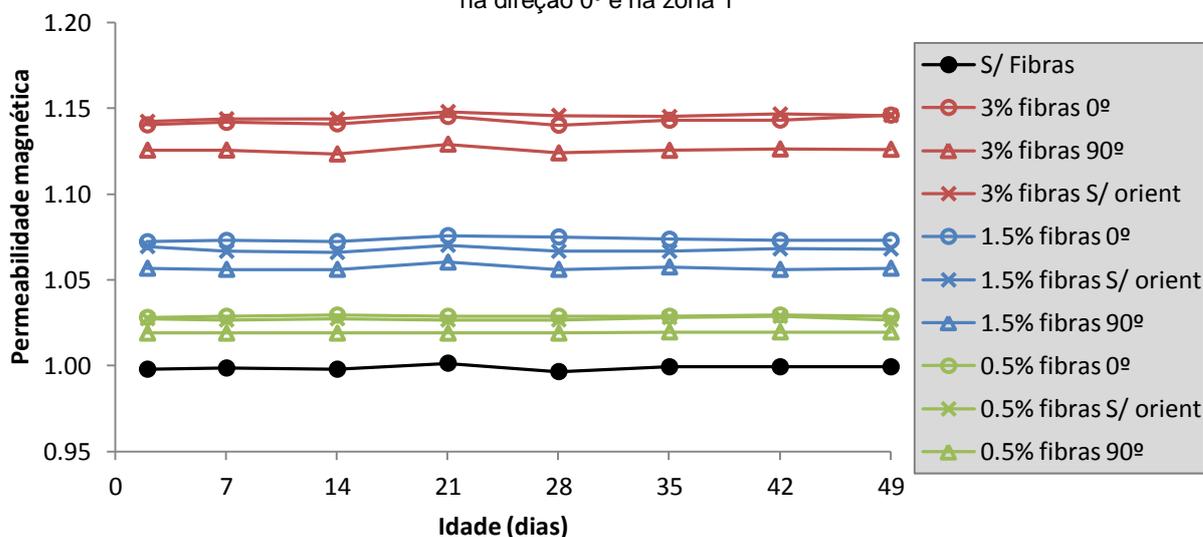


Figura 147 Evolução da permeabilidade nas placas com a idade na zona 1 na direção 0°

Pela análise da Figura 147 conclui-se que a permeabilidade magnética não é influenciada pela evolução da idade do provete uma vez que esta grandeza apenas avalia os materiais com propriedades magnéticas existentes no betão e não variam com as modificações que ocorrem no betão devido ao processo de hidratação. É de destacar que a permeabilidade do betão sem fibras é igual à unidade, ou seja, a indutância medida no betão sem fibras é igual à indutância do ar. Pelo contrário num betão com fibras a permeabilidade magnética é superior à unidade uma vez que existem materiais com propriedades magnéticas que neste caso são as fibras.

No Anexo 5 apresentam-se os gráficos que traduzem a influência da permeabilidade com a evolução da idade para a direção 90° na zona 1 e para as direções 0° e 90° para a zona 2. Os gráficos apresentados em anexo transmitem a mesma conclusão quanto à evolução da permeabilidade com a idade permanecendo constantes ao longo do tempo.

5.3. INFLUÊNCIA DA DOSAGEM DE FIBRAS

5.3.1. RESISTIVIDADE ELÉTRICA

Na Figura 148 apresenta-se um gráfico que relaciona a resistividade elétrica medida nos prismas (ver Figura 133) com a percentagem de fibras correspondente. Os valores de resistividade correspondem a prismas que não estiveram sujeitos a orientação, ou seja, apresentam fibras não orientadas, para que desta forma esta variável não influencia os resultados. Pela análise do gráfico verifica-se que a resistividade diminui exponencialmente com o aumento da percentagem de fibras. A redução da resistividade com o aumento da quantidade de fibras deve-se à menor resistência das fibras à passagem de corrente elétrica. Quando um betão apresenta uma elevada percentagem de fibras, uma parte significativa da corrente elétrica atravessa pelas fibras e portanto a sua resistividade diminui consideravelmente.

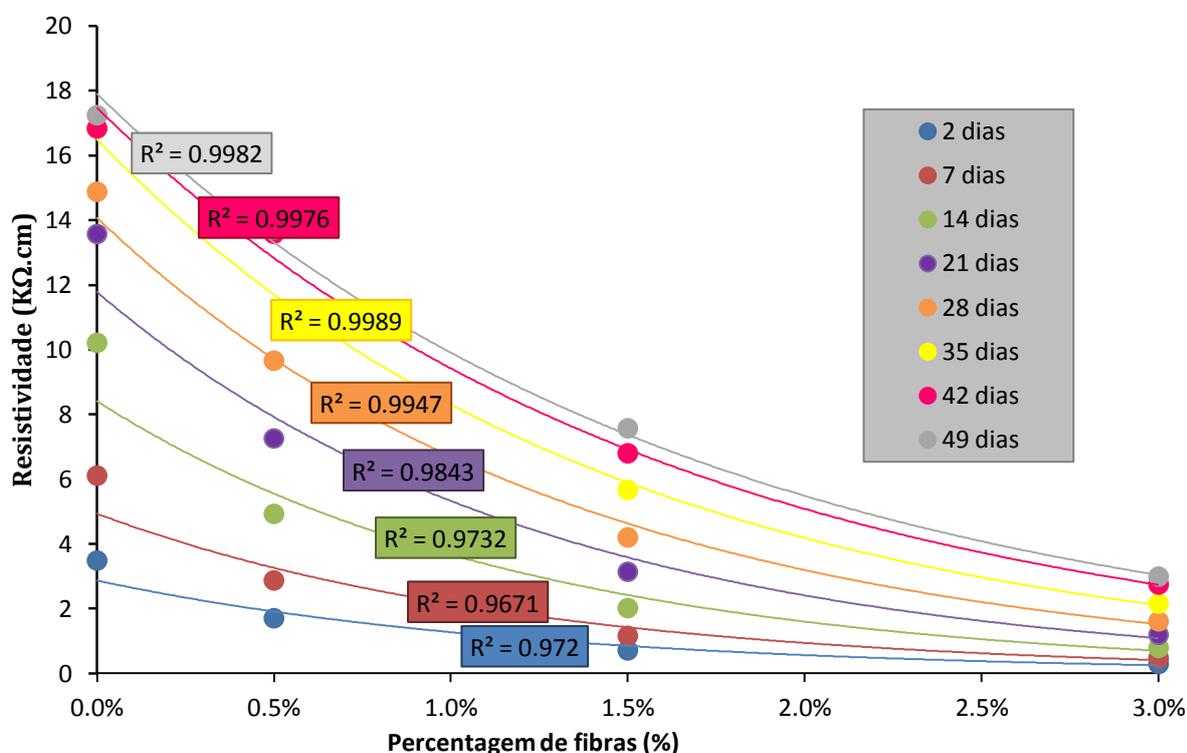


Figura 148 Relação entre a resistividade elétrica medida nos prismas e a percentagem de fibras

No Anexo 6 apresentam-se gráficos semelhantes ao apresentado anteriormente mas para as placas com fibras sem orientação e com a resistividade medida na direção 0° e 90°. Para a direção 0° a correlação entre os valores de resistividade e a percentagem de fibras apresentam uma relação igualmente boa para a tendência exponencial ($R^2 > 0.92$). No que diz respeito à medição das mesmas placas na direção 90° há uma diminuição do coeficiente de determinação ($R^2 > 0.84$).

A influência da percentagem de fibras nos resultados de resistividade pelo método dos quatro elétrodos é apresentada no Anexo 6 e verifica-se que existe uma boa correlação com a função exponencial, tal como verificada para os restantes métodos.

5.3.2. ULTRASSONS

A Figura 149 apresenta um gráfico que relaciona a velocidade de propagação das ondas medida em placas (transmissão direta – ver Figura 142) com a idade do betão e para diferentes percentagens de fibras sem orientação. A escolha de correlacionar a velocidade de propagação nos provetes com fibras sem orientação deve-se essencialmente à eliminação da influência da orientação das fibras. Pela análise do gráfico é possível constatar que o prisma sem fibras (0%) apresenta uma velocidade de propagação mais elevada que os provetes com fibras. Deste estudo, à semelhança do estudo desenvolvido por Glaubitt *et al.* [8], descrito no Capítulo 3, é possível concluir que a diminuição da trabalhabilidade devido à introdução de fibras por vezes pode originar amostras com grandes quantidades de vazios, diminuindo assim, a velocidade de propagação das ondas ultrassons. Assim, pela análise da Figura 149 verifica-se uma diminuição da velocidade de propagação das ondas ultrassons com o aumento da percentagem de fibras, apesar da velocidade das ondas nas fibras ser substancialmente mais elevada. Pelo contrário quando não há introdução de fibras a mistura fica mais homogênea e, portanto, apresenta valores mais elevados da velocidade de propagação das ondas.

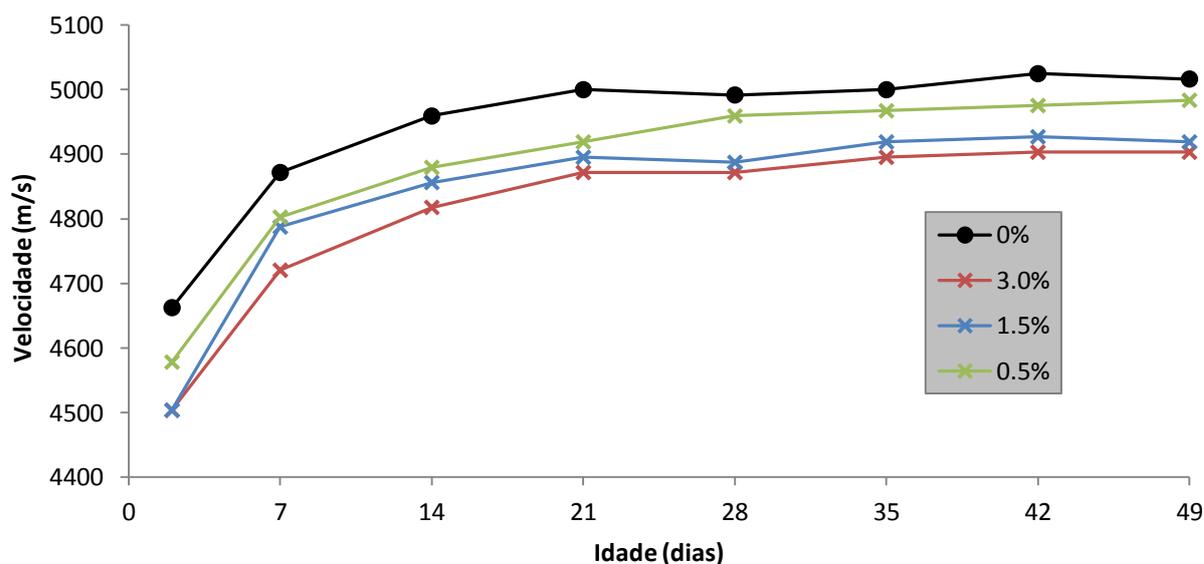


Figura 149 Relação entre a velocidade de propagação dos ultrassons medida nas placas a 0° com a percentagem de fibras

No Anexo 6 apresenta-se a relação discutida anteriormente para os prismas e para as placas medidas a 90°. Constata-se que a forma do gráfico é semelhante ao gráfico apresentado na Figura 149, no entanto, há uma ligeira mistura entre as várias percentagens de fibras, o que não clarifica as causas, uma vez que por um lado a velocidade de propagação das ondas diminui com o aumento de descontinuidades na estrutura (devido à introdução de maior percentagem de fibras) e, por outro lado, as fibras provocam uma maior velocidade de propagação das ondas

O método indireto não foi avaliado quanto à influência da percentagem de fibras uma vez que os resultados do método apresentam erros significativos.

5.3.3. PERMEABILIDADE MAGNÉTICA

Na Figura 150 apresenta-se a relação entre a permeabilidade magnética medida a 0° com a percentagem de fibras, em que o valor apresentado da permeabilidade magnética corresponde à média dos resultados obtidos nas duas zonas medidas na mesma direção 0°. Pela análise do gráfico verifica-se que permeabilidade magnética varia linearmente com a percentagem de fibras contidas na mistura e não varia com a idade. Este resultado deve-se a que a permeabilidade magnética depende apenas das propriedades magnéticas dos materiais inseridos na mistura pelo facto de as linhas de campo magnético serem afetadas com a presença desses materiais. No Anexo 6 é apresentado o gráfico para o ensaio a 90° onde se verifica a mesma tendência.

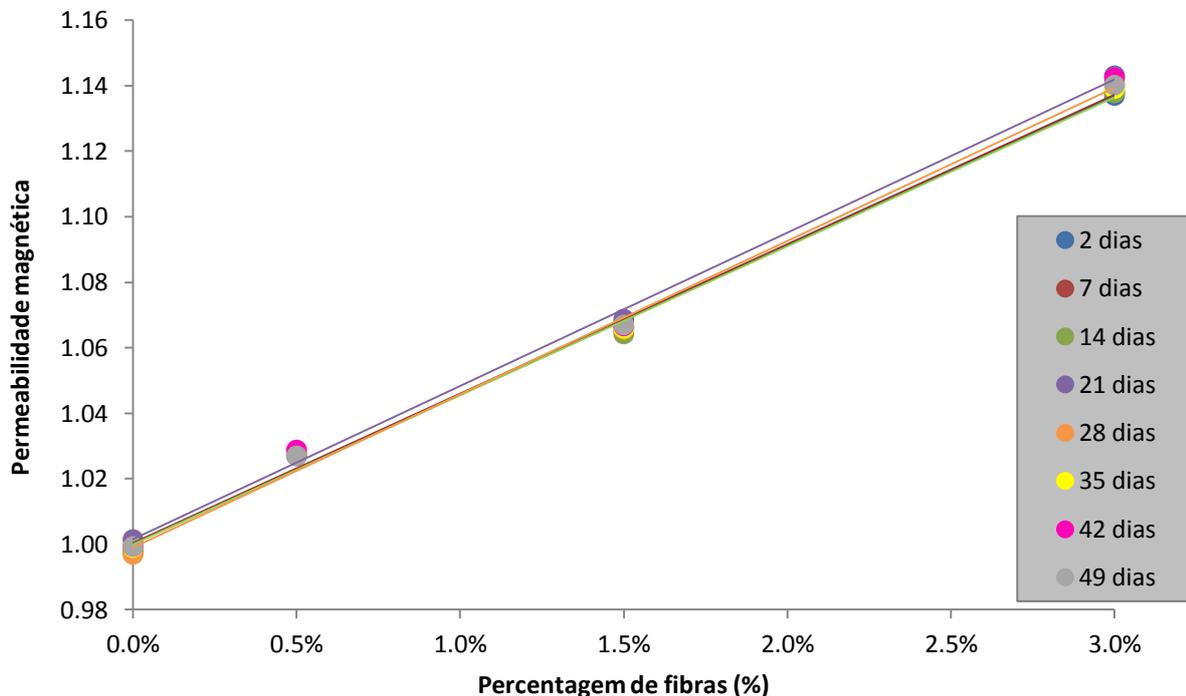


Figura 150 Relação entre a permeabilidade magnética medida a 0° com a percentagem de fibras

5.3.4. MASSA VOLÚMICA

A massa volúmica foi avaliada apenas para as placas e é de esperar que a massa volúmica aumente com o aumento da percentagem de fibras uma vez que para o mesmo volume do provete há uma maior percentagem de fibras, as quais apresentam uma massa volúmica superior à da argamassa. Na Figura 151 apresentam-se os resultados obtidos, onde é possível observar um aumento significativo da massa volúmica. Pela análise da figura verifica-se que os valores para a mesma percentagem de fibras não coincidem, no entanto as diferenças são desprezáveis uma vez que o coeficiente de variação é cerca de 1%.

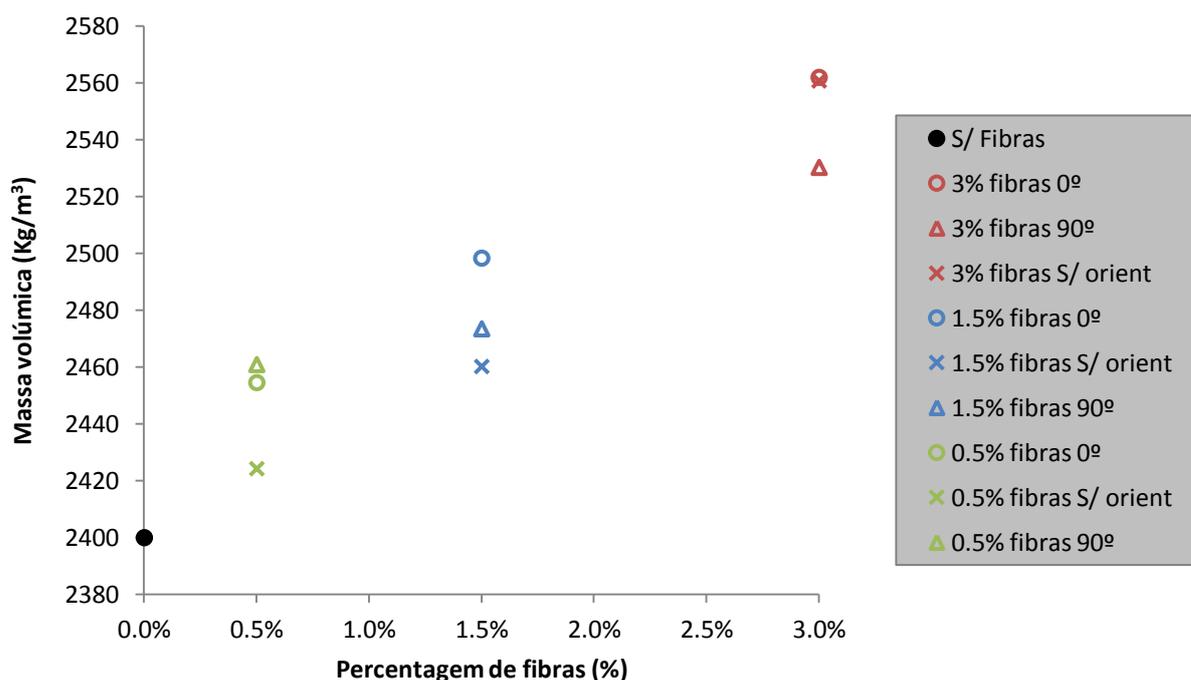


Figura 151 Relação entre a massa volúmica com a percentagem de fibras

5.3.5. ENSAIO À TRAÇÃO POR FLEXÃO DOS PRISMAS

Os ensaios à tração por flexão foram realizados apenas nos prismas e os resultados da força máxima de pico obtida no ensaio de flexão dos prismas apresentam -se na Tabela 22. Os resultados apresentam-se sob forma de gráfico na Figura 152 e é possível concluir que há uma certa tendência para o aumento da resistência com o aumento da percentagem de fibras e com a orientação favorável das fibras (0°). Na Figura 153 apresenta-se um ensaio à tração por flexão de um prisma onde é possível visualizar as fibras a atuarem favoravelmente no aumento da resistência.

Tabela 22 Força máxima obtida no ensaio de flexão dos prismas

	S/ fibras	3% fibras 0°	3% fibras S/ orient	3% fibras 90°	1.5% fibras 0°	1.5% fibras S/ orient	1.5% fibras 90°	0.5% fibras 0°	0.5% fibras S/ orient	0.5% fibras 90°
% fibras	0.0%	3.0%	3.0%	3.0%	1.5%	1.5%	1.5%	0.5%	0.5%	0.5%
Ft (KN)	8.43	28.11	14.55	20.42	19.62	10.55	9.58	9.97	6.66	8.40

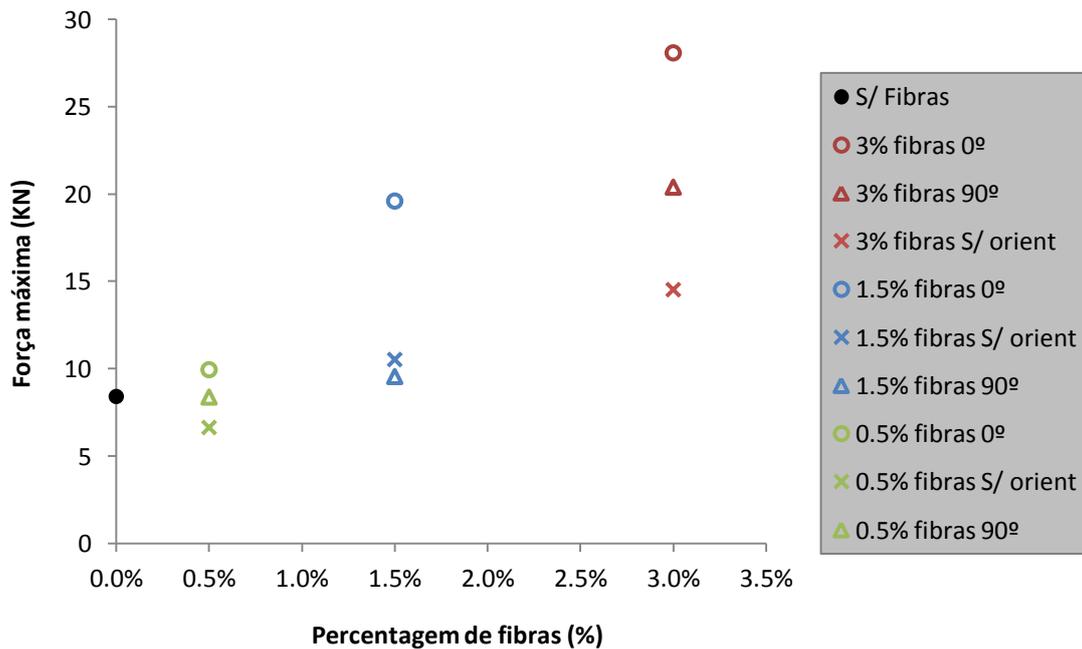


Figura 152 Relação entre a resistência de pico à tração por flexão com a percentagem de fibras



Figura 153 Ensaio à tração por flexão de um prisma com fibras orientadas a 0°

5.3.6. ENSAIO À COMPRESSÃO DOS PRISMAS

A resistência à compressão dos prismas foi avaliada nas duas metades sobrantes do ensaio à flexão e os resultados apresentam-se na Tabela 23. Na Figura 154 apresentam-se os resultados em forma de gráfico e conclui-se que há uma tendência para o melhoramento da resistência à compressão com a inclusão de fibras, no entanto este aumento é mais significativo quando as fibras estão orientadas a 0°.

Tabela 23 Resistência à compressão dos prismas

		S/ Fibras	3% fibras 0°	3% fibras S/ orient	3% fibras 90°	1.5% fibras 0°	1.5% fibras S/ orient	1.5% fibras 90°	0.5% fibras 0°	0.5% fibras S/ orient	0.5% fibras 90°
% fibras		0.0%	3.0%	3.0%	3.0%	1.5%	1.5%	1.5%	0.5%	0.5%	0.5%
F _c (KN)	1	190.12	267.05	284.74	220.75	251.39	231.95	210.04	240.97	228.60	212.26
	2	192.82	274.40	277.34	231.68	252.36	236.71	209.19	233.70	236.91	210.39
f _c (MPa)	1	118.82	166.91	177.96	137.97	157.12	144.97	131.28	150.61	142.88	132.66
	2	120.51	171.50	173.34	144.80	157.72	147.94	130.75	146.06	148.07	131.49

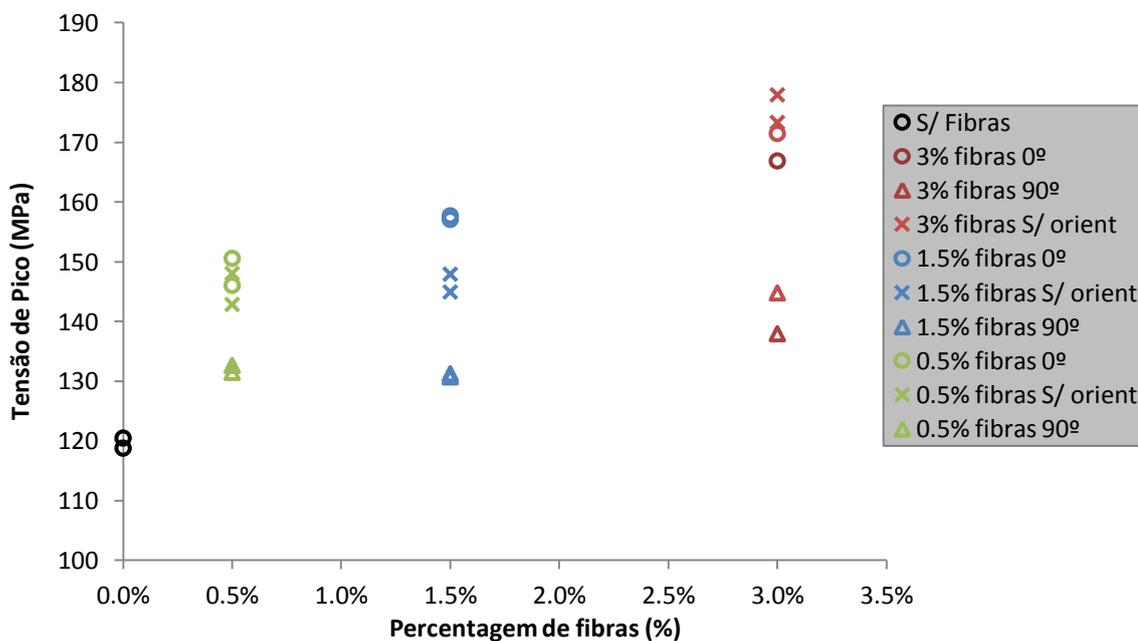


Figura 154 Relação entre a resistência à compressão dos prismas com a percentagem de fibras

5.3.7. ENSAIO DEWST NAS PLACAS

À semelhança do que acontece nos prismas, a tensão de tração máxima nas placas avaliada através do ensaio DEWST tende a aumentar com a percentagem de fibras. O ensaio DEWST pretende a formação de uma força de tração pura no interior da placa originando fendas na secção interior visíveis na Figura 156 que corresponde a uma placa com 3% de fibras orientadas a 0°. Na Figura 155 é possível observar um crescimento da tensão com o aumento da percentagem de fibras, observando-se também que a taxa de crescimento é mais elevada para a orientação das fibras a 0°. No Anexo 7 apresentam-se os resultados dos ensaios DEWST e as dimensões necessárias para o cálculo da tensão de tração máxima.

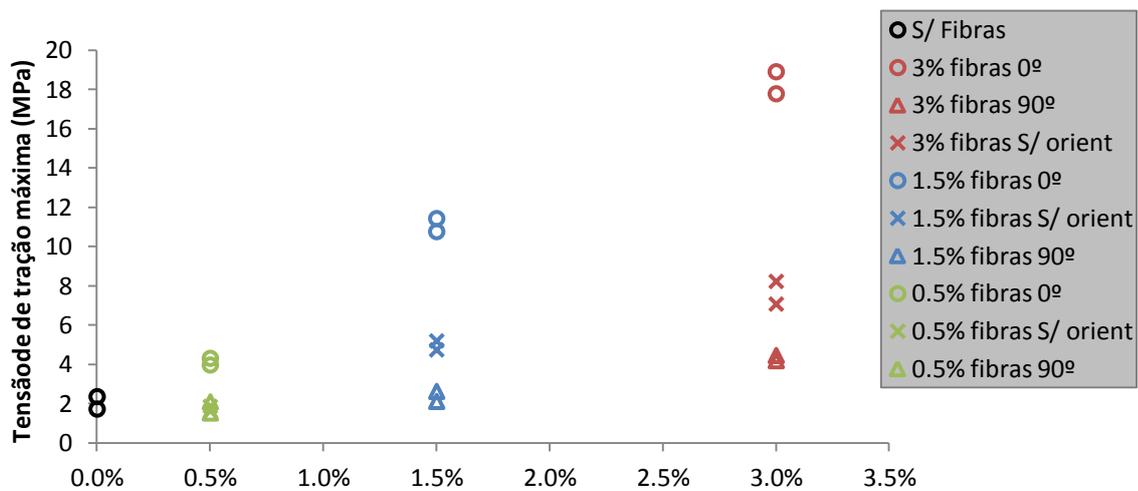


Figura 155 Relação entre a tensão de tração máxima e a percentagem de fibras



Figura 156 Placa com 3% de fibras orientadas a 0° depois de submetida ao ensaio DEWST

5.4. INFLUÊNCIA DA ORIENTAÇÃO DAS FIBRAS

5.4.1. RESISTIVIDADE ELÉTRICA

Na Figura 157 é possível visualizar a relação entre a resistividade das placas medida pelo método dos dois elétrodos nas duas direções: 0° e 90° . A figura pretende demonstrar a eficácia do método em detetar a orientação das fibras e a comparar os valores de resistividade quando as fibras se encontram orientadas a 0° , 90° e sem orientação. Desta forma, na figura foi traçada uma reta com inclinação de 45° onde deverão cair os pontos caso a resistividade na direção 0° e 90° apresentem valores iguais. As placas que contêm fibras sem orientação deveriam apresentar valores nas duas direções coincidentes no entanto, pela análise da figura verifica-se que há uma ligeira tendência para a resistividade destas placas apresentar valores mais elevados na direção a 90° . Na Figura 157 ainda é possível visualizar que a grande maioria dos círculos (orientação das fibras a 0°) apresenta-se na parte superior da reta o que indica uma maior resistividade na direção a 90° . Desta forma pelos resultados da resistividade obtidos é possível identificar a orientação das fibras tal como afirma Lataste *et al* [67].

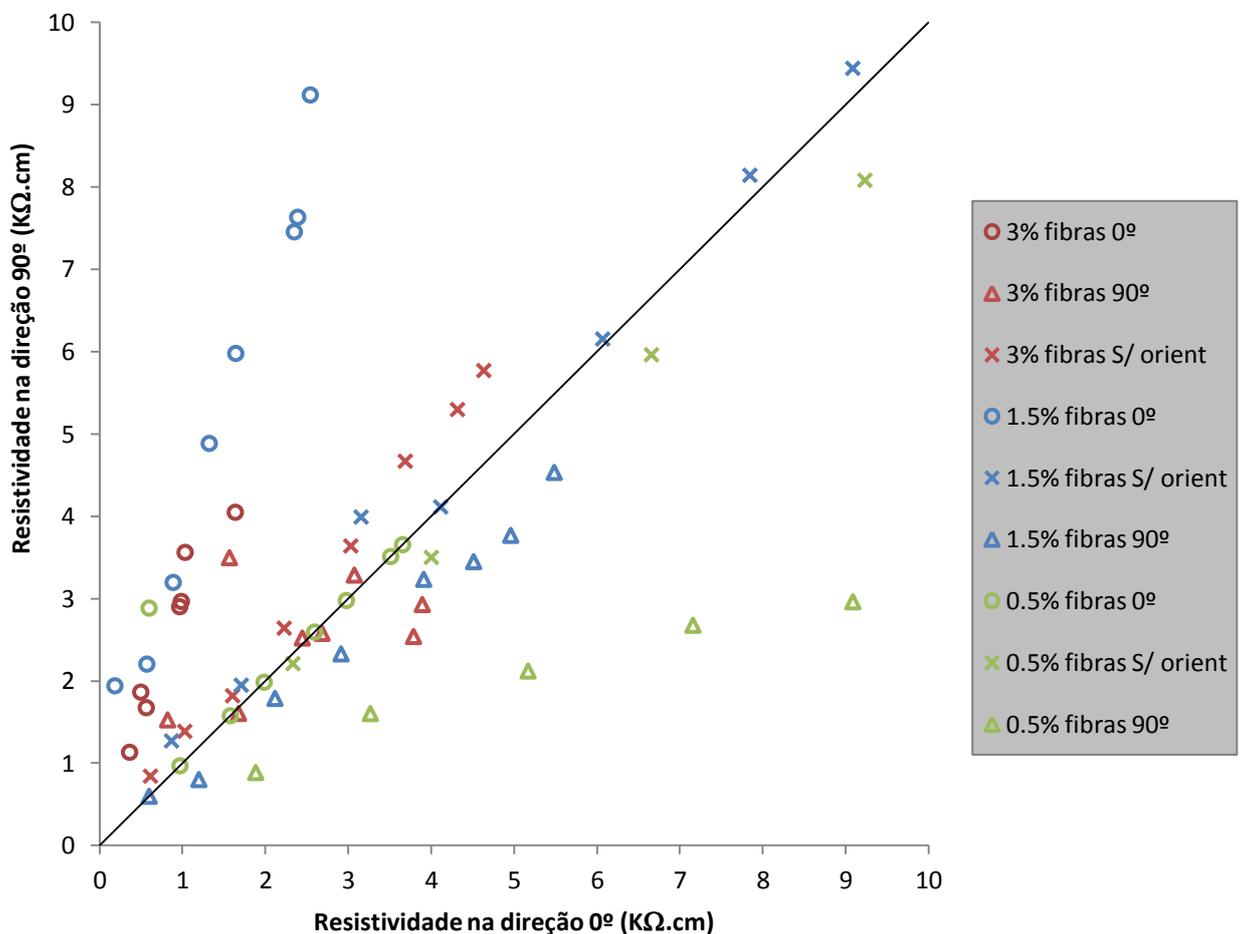


Figura 157 Relação da resistividade medida na direção 0° e 90°

5.4.2. ULTRASSONS

Para detetar a influência da orientação das fibras pelo método dos ultrassons foram utilizados os ensaios de transmissão direta uma vez que apresentam resultados com menor erro. Assim, na Figura 158 apresenta-se um gráfico que correlaciona a velocidade de propagação das ondas de ultrassons na direção 0° e na direção 90° para as várias placas. À semelhança do gráfico anterior traçou-se uma reta com inclinação 45° para que desta forma seja mais perceptível a interpretação dos resultados. As placas com fibras não orientadas (correspondem às cruces) deveriam apresentar valores semelhantes para a direção 0° e para a direção 90°, e desta forma coincidiriam com a reta, no entanto verifica-se que as cruces distribuem-se tanto na parte superior como na parte inferior da reta. No entanto, é possível detetar que todos os círculos (fibras orientadas a 0°) apresentam-se na parte inferior da reta traduzindo numa velocidade superior a 0° o que vai de encontro ao esperado. Pelo contrário os triângulos (fibras orientadas a 90°) apresentam-se com maior variabilidade, ou seja, parte dos triângulos apresentam-se na parte de cima da reta e outros na parte de baixo.

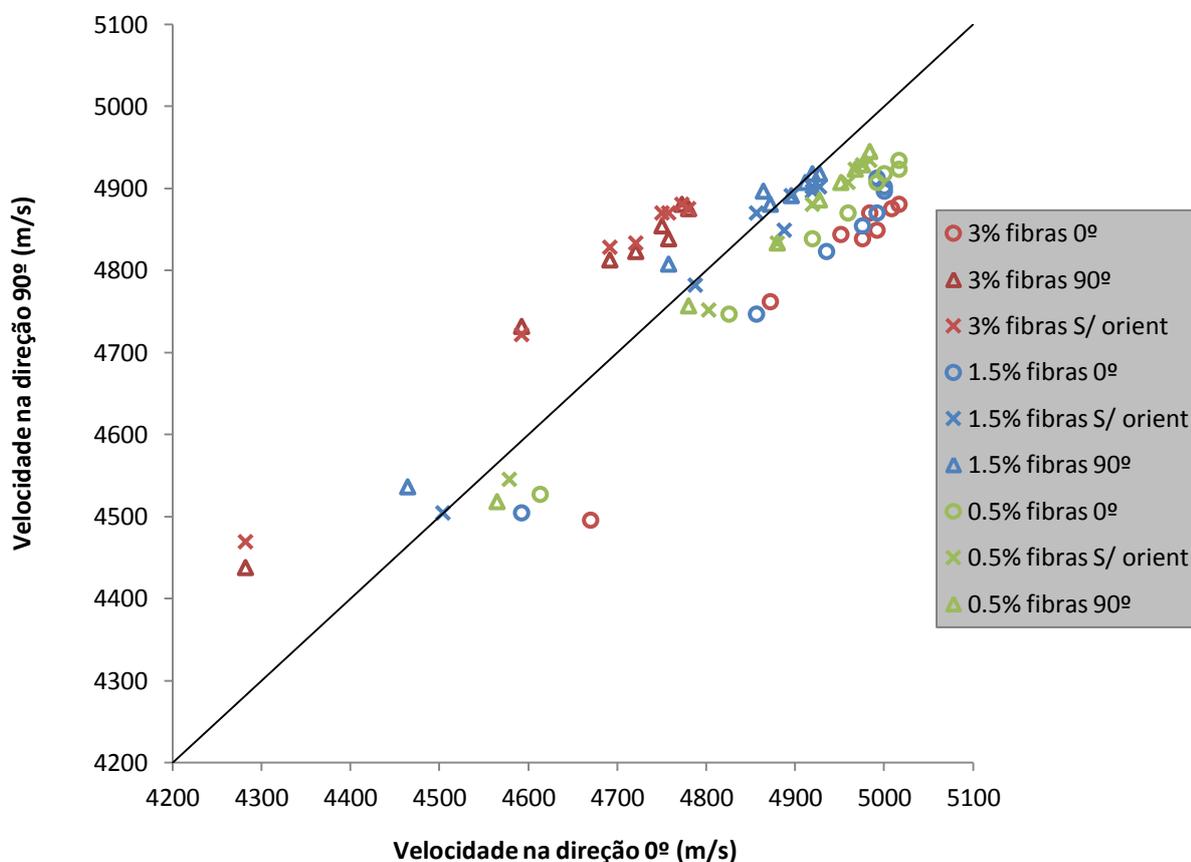


Figura 158 Relação entre a velocidade de propagação de onda ultrassons nas placas medida na direção 0° e medida na direção 90°

5.4.3. PERMEABILIDADE MAGNÉTICA

A relação entre a permeabilidade magnética medida na direção 0° e na direção 90° para as várias placas apresenta-se no gráfico da Figura 159. Pela análise do gráfico verifica-se que todas as placas com fibras orientadas a 0° apresentam valores de permeabilidade magnética superiores na direção 0° e as placas orientadas a 90° apresentam-se igualmente todas com maior permeabilidade magnética a 90°. É de realçar que as placas em que as fibras não estão orientadas apresentam valores superiores na direção 90°, o que parece indicar alguma orientação natural das fibras na direção 90°.

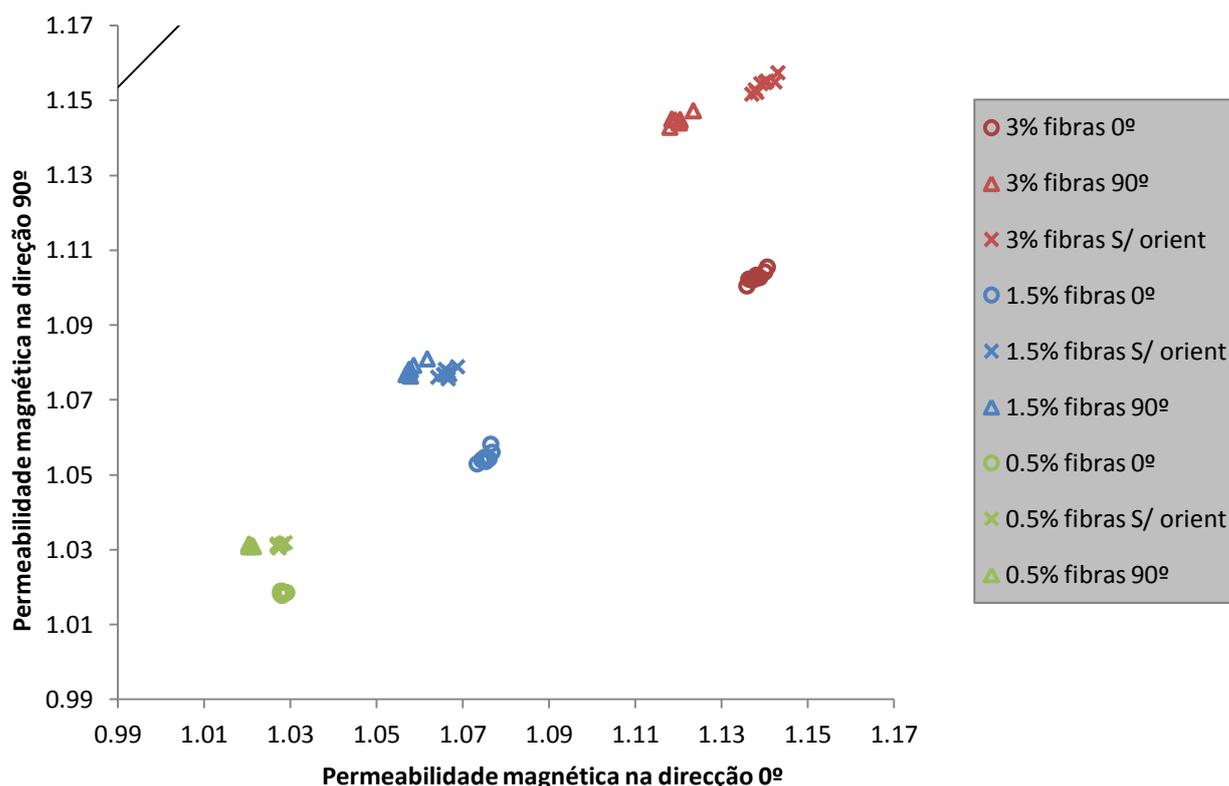


Figura 159 Relação entre a permeabilidade magnética nas placas medida na direcção 0º e medida na direcção 90º

5.4.4. ENSAIO À TRAÇÃO POR FLEXÃO DOS PRISMAS

Na Figura 160 são apresentadas as curvas dos ensaios à tração por flexão nos prismas e verifica-se que para os prismas com fibras orientadas a 0º a resistência à tração é sempre superior quando comparado com as fibras na direcção 90º e sem orientação para a mesma percentagem de fibras. No que diz respeito à orientação de fibras a 90º e sem orientação apresenta resultados distintos dependendo da percentagem de fibras. Para os provetes com 0.5% de fibras verifica-se uma rotura frágil nos prismas com fibras orientadas a 90º e com fibras sem orientação. Para além disso a força máxima atingida é inferior à força máxima conseguida para o betão sem fibras ($F_{m\acute{a}x} = 8.43\text{KN}$), no entanto, para roturas frágeis é frequente haver uma grande variação nos resultados do ensaio à tração por flexão. Os valores da tensão de pico foram apresentados na Tabela 22 na secção 5.3.5.

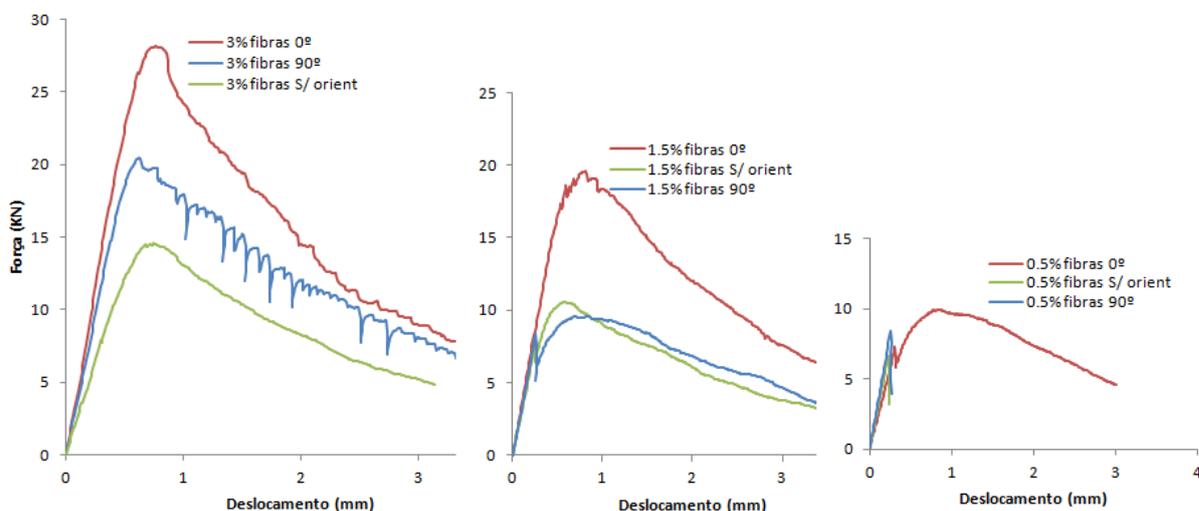


Figura 160 Ensaio à tração por flexão nos prismas

Na Figura 161 apresentam-se os diagramas força deslocamento de prismas com 1.5% de fibras orientadas a 0° e com 3% de fibras não orientadas. Para o provete com 1.5% de fibras com fibras orientadas a 0° a resistência é consideravelmente maior do que para um provete com 3% de fibras mas sem orientação. Com isto, é possível concluir que a orientação das fibras poderá resultar numa diminuição para metade da percentagem de fibras conseguindo ainda uma resistência à tração maior.

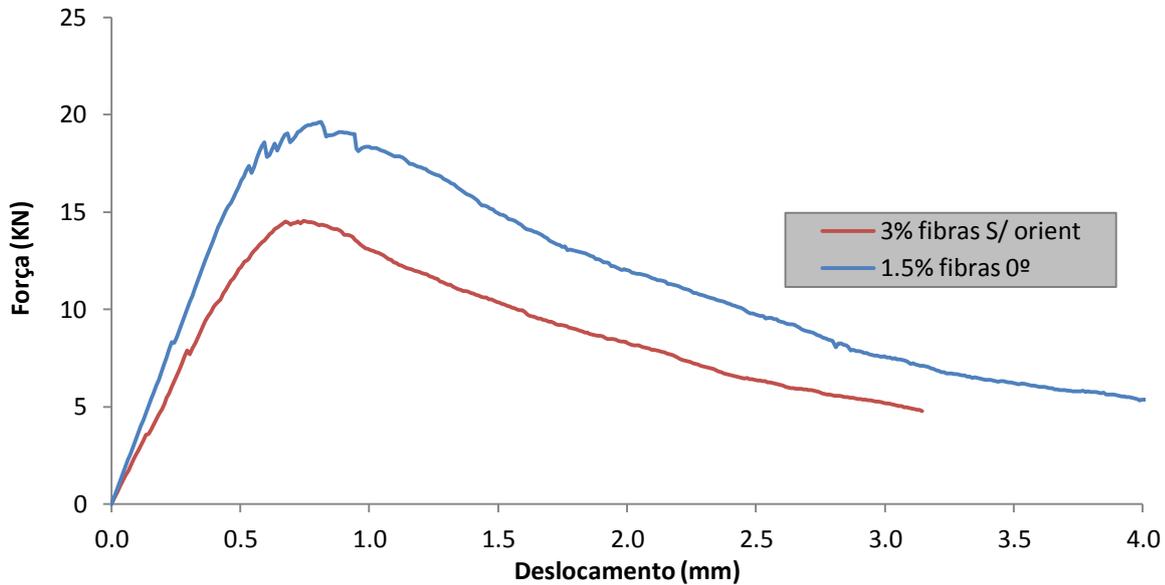


Figura 161 Diagrama Força-Deslocamento comparação entre prismas com fibras orientadas e não orientadas

5.4.5. ENSAIO À COMPRESSÃO DOS PRISMAS

A Figura 162 apresenta os diagramas força deslocamento dos ensaios à compressão dos prismas. A partir do ensaio de compressão é possível concluir que a resistência à compressão varia com a orientação das fibras uma vez que quando as fibras se apresentam orientadas a 0° a força máxima de compressão tende a ser superior. Na Tabela 23 da secção 5.3.6. apresentam-se os resultados do ensaio. Realça-se ainda que a força máxima de compressão verificada para os provetes sem fibras é de aproximadamente 190 KN o que se aproxima de alguns dos provetes que contém fibras.

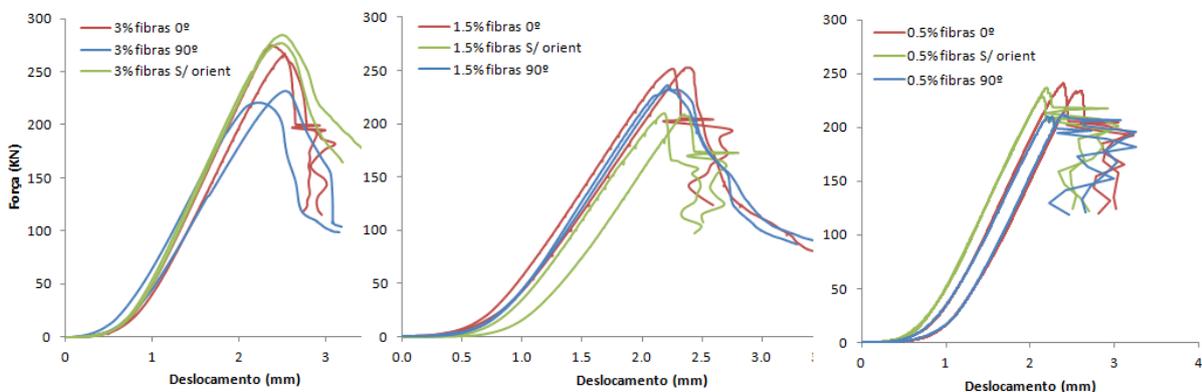


Figura 162 Diagrama Força-Deslocamento dos ensaios à compressão dos prismas

5.4.6. ENSAIO DEWST DAS PLACAS

Na Figura 163 apresentam-se os diagramas de tensão de tração versus abertura de fenda (COD) para as placas com 3%, 1.5% e 0.5% de fibras. Na Figura 163 é possível observar que numa das placas com 3% de fibras orientadas a 0° não se conseguiu conduzir o ensaio até ao fim porque ocorreu o esmagamento do betão na zona de aplicação de carga, o que fez com que a tensão baixasse bruscamente. Pela observação dos diagramas conclui-se que as fibras apresentam uma grande importância no comportamento à tração deste material. Em cada gráfico é possível detetar uma grande diferença nos valores de tensão nas 3 diferentes orientações. Sendo que a orientação a 0° é a que apresenta maior resistência à tração, com valor mais baixo apresenta a resistência à tração das placas com fibras não orientadas e, por último, com resistência menor apresentam-se as placas com fibras na direção 90° independentemente da percentagem de fibras. A exceção são placas com 0.5% de fibras em que a resistência de pico é semelhante para as placas com orientação a 90° e para as placas com fibras não orientadas. No Anexo 7 apresentam-se os valores de tensão máxima de tração das placas, realça-se o facto de nas placas com fibras orientadas a 0° ser atingido mais de o dobro da resistência à tração do que para as placas com a mesma percentagem de fibras mas sem orientação.

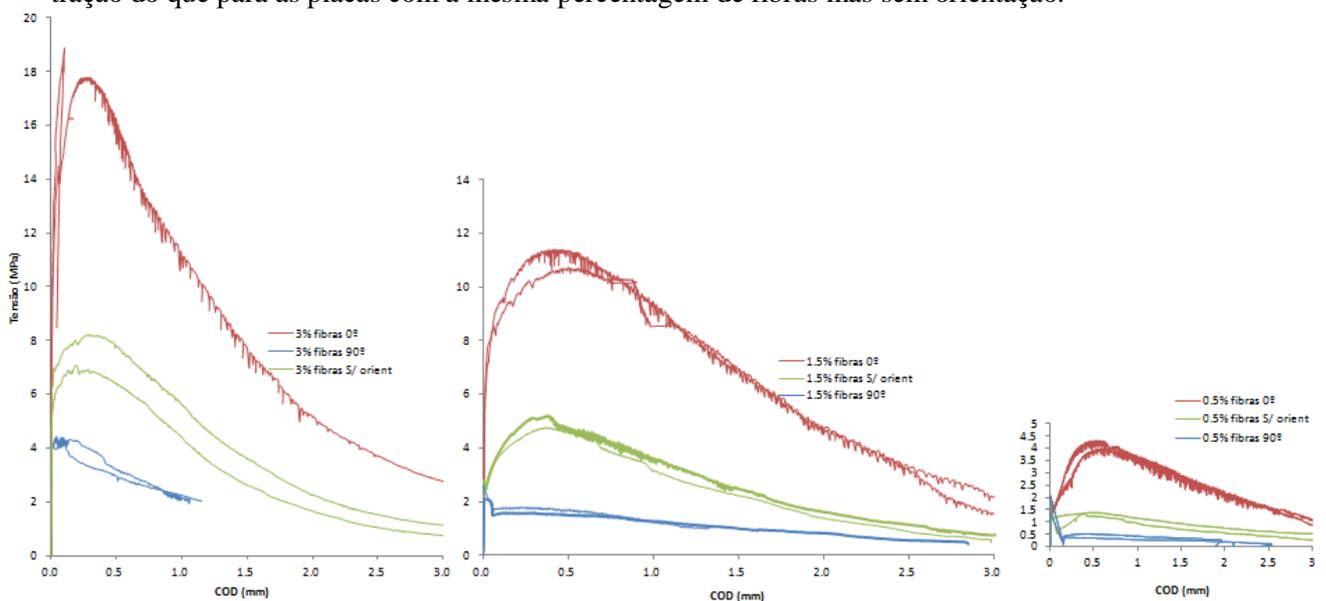


Figura 163 Diagrama tensão-abertura de fendas (COD) para as placas com 3%, 1.5% e 0.5% de fibras

5.5. CORRELAÇÃO ENTRE RESULTADOS

5.5.1. RESISTIVIDADE ELÉTRICA

O método dos dois elétrodos embebidos foi utilizado para medir a resistividade elétrica nos prismas na direção 0°. Este método foi comparado com o método dos dois elétrodos externos aplicado nas placas para a mesma direção, ambos os métodos encontram-se representados na Figura 164. Na Figura 165 apresenta-se a correlação entre os resultados obtidos pelos dois métodos. Os dois métodos apresentam uma boa correlação linear com um coeficiente de determinação (R^2) de 0.95. Na Figura 166 é apresentada a mesma correlação, no entanto, os resultados correspondentes aos provetes sem fibras foram removidos. A remoção destes provetes provoca uma diminuição da correlação, embora a correlação se mantenha elevada em 0.93.

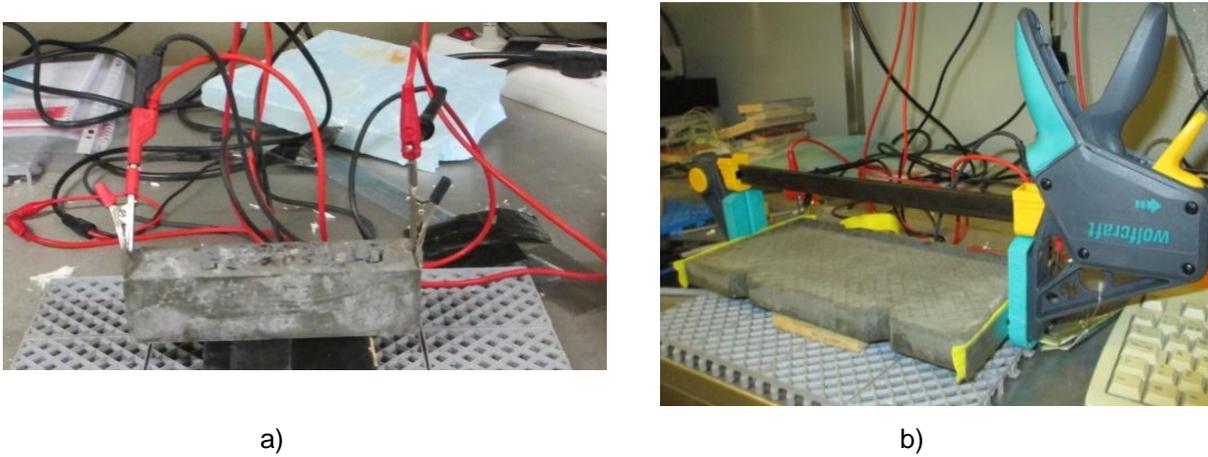


Figura 164 Métodos dos 2 elétrodos: a) elétrodos embebido. b) elétrodos externos

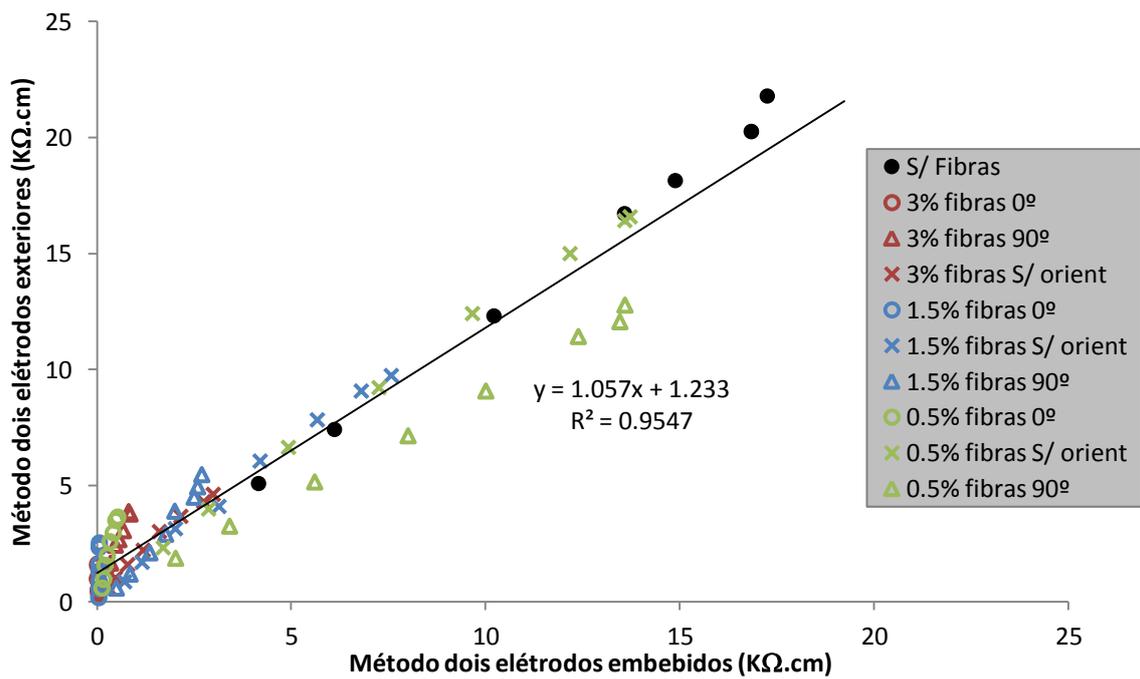


Figura 165 Correlação entre o método dos dois elétrodos embebidos (prismas – direção 0°) e o método dos dois elétrodos exteriores na direção 0° (placas)

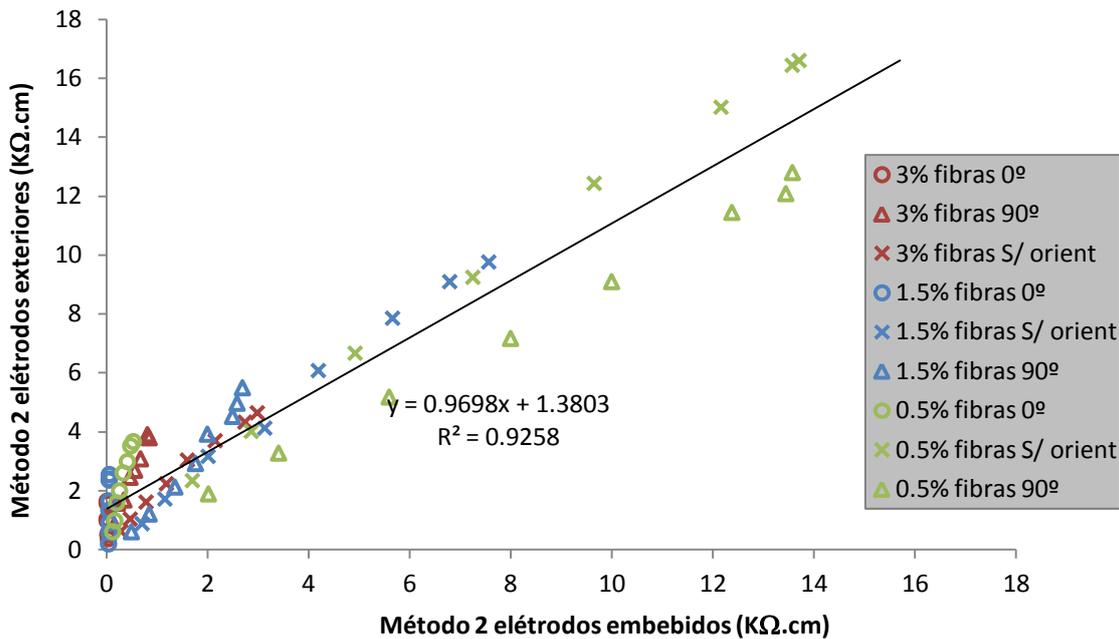


Figura 166 Correlação entre o método dos dois eletrodos embecidos (prismas - direção 0°) e o método dois eletrodos exteriores na direção 0° (placas). Resultados excluindo os provetes sem fibras

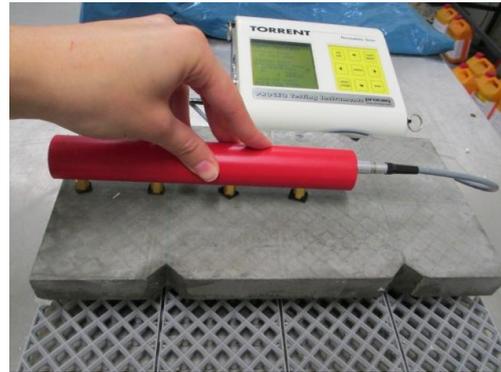
No que diz respeito ao método dos quatro eletrodos apenas é possível compará-lo com os métodos descritos anteriormente na direção 0°, uma vez que este método não foi realizado a 90° por questões geométricas. Note-se que valores da resistividade obtidos pelo método dos quatro eletrodos utilizados para correlacionar com os outros métodos foram obtidos através da média das duas zonas de medições as quais apresentam uma boa correlação ($R^2=0.99$, ver Anexo 8)

Na Figura 168 comparam-se os resultados obtidos com o método dos quatro eletrodos e o método dos dois eletrodos embecidos e visíveis na Figura 167. Na Figura 170 correlaciona-se o método dos quatro eletrodos com o método dos dois eletrodos exteriores visíveis na Figura 169. O coeficiente de determinação é maior para a correlação do método dos quatro eletrodos com o método dos dois eletrodos exteriores sendo de 0.79, no entanto, o coeficiente de determinação para os quatro eletrodos com os dois eletrodos embecidos apresenta um valor próximo ($R^2=0.72$).

No Anexo 10 apresentam-se as correlações mencionadas anteriormente mas retirando os provetes que não contêm fibras verificando-se que para a correlação do método dos quatro eletrodos com o método dos dois eletrodos embecido obtém-se um $R^2=0.76$ e correlacionando com o método dos dois eletrodos exteriores obtém-se um $R^2=0.84$, desta forma conclui-se que retirando os provetes sem fibras há uma melhor correlação entre os métodos. Realça-se que foi correlacionado os diferentes métodos com a eliminação dos provetes sem fibras uma vez que estes apresentam valores de resistividade com uma ordem de grandeza distinta dos provetes com fibras.



a)



b)

Figura 167 a) Métodos dos 2 eléctrosos embebido. b) Método dos 4 eléctrosos

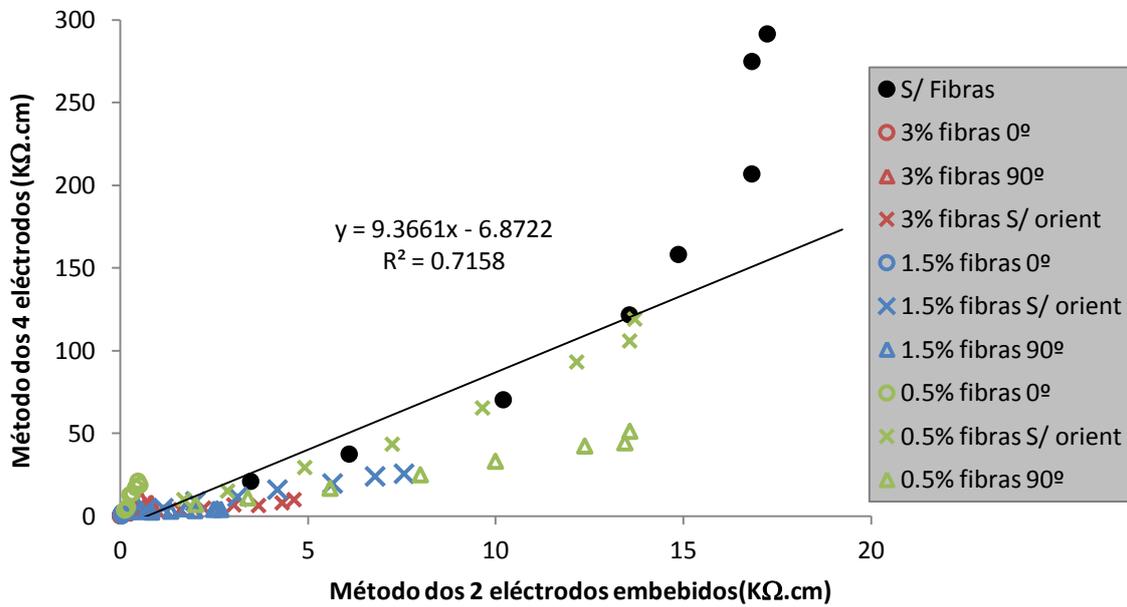
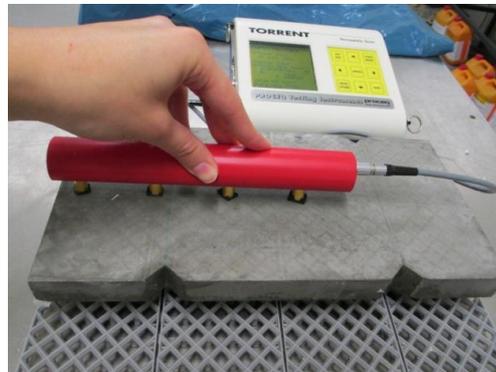


Figura 168 Correlação entre o método dos 2 eléctrosos embebidos e o método dos 4 eléctrosos na direcção 0º



a)



b)

Figura 169 a) Métodos dos 2 eléctrosos exteriores. b) Método dos 4 eléctrosos

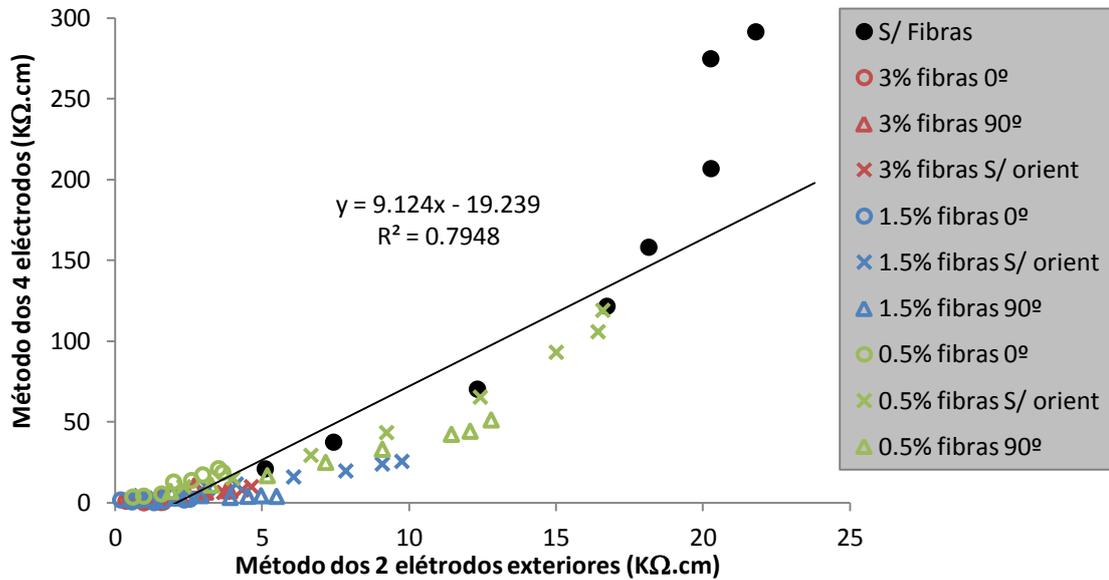


Figura 170 Correlação entre o método 2 eléctrodos exteriores e o método dos 4 eléctrodos para a direcção 0º

5.5.2. ULTRASSONS

A velocidade de ultrassons foi avaliada a partir de dois métodos distintos: transmissão direta e transmissão indireta. Nesta secção pretende-se correlacionar os resultados obtidos pelos diferentes métodos utilizados e nas duas direcções (0º e 90º). Como referido anteriormente o método por transmissão indireta apresenta maiores erros devido ao facto da onda poder estar sujeita a diversas reflexões durante o seu percurso. Desta forma correlacionou-se o método por transmissão direta e o método por transmissão indireta e constatou-se que apresentam uma baixa correlação. Na Figura 172 é possível comprovar a correlação existente entre os métodos na direcção 0º visíveis na Figura 171 apresentando um $R^2=0.6371$. No Anexo 8 apresenta-se ainda a mesma correlação mas para a direcção 90º apresentando uma correlação ainda menor com um $R^2=0.59$.

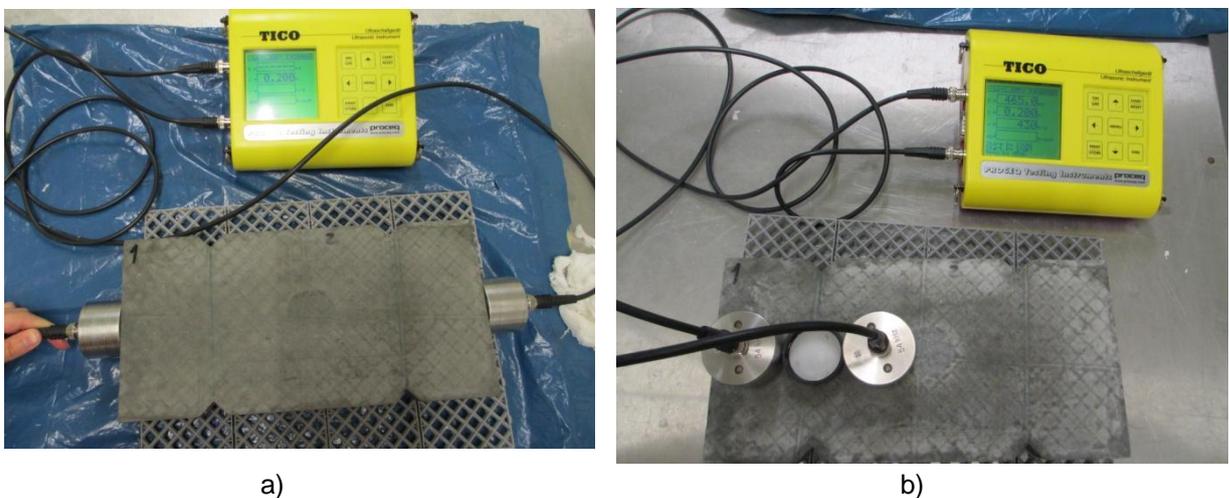


Figura 171 a) Transmissão direta na direcção 0º. b) Transmissão indireta na direcção 0º

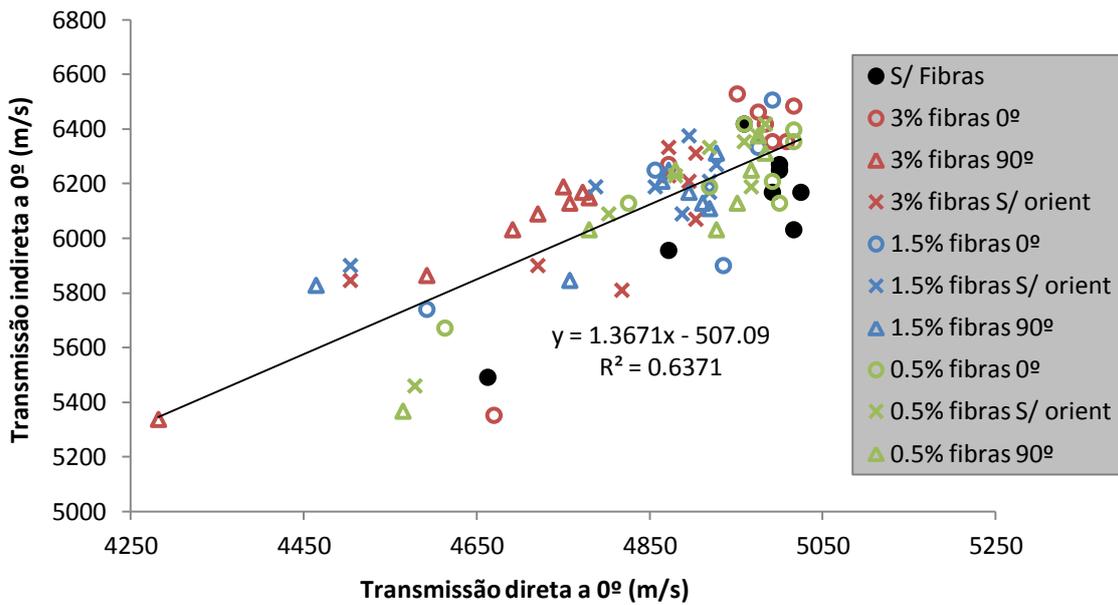


Figura 172 Correlação entre o método por transmissão direta e o método por transmissão indireta para a direção 0º

5.5.3. PERMEABILIDADE MAGNÉTICA

Um das questões relevantes a analisar é a distribuição uniforme das fibras ao longo do provete. O facto de uma das características do material utilizado ser a auto-compactabilidade faz com que à partida as fibras se distribuam uniformemente no molde. No entanto, quando os provetes ficam sujeitos ao campo magnético para orientar as fibras estas poderiam ser encaminhadas para o polo Sul se o campo magnético aplicado fosse demasiado forte. Na Figura 173 é possível observar a correlação entre a permeabilidade magnética na zona 1 e na zona 2 medida a 0º. Pela análise da figura verifica-se que as duas zonas de medição apresentam valores muito próximos e portanto uma boa correlação, constatando-se, desta forma uma uniformidade na distribuição de fibras pelo provete

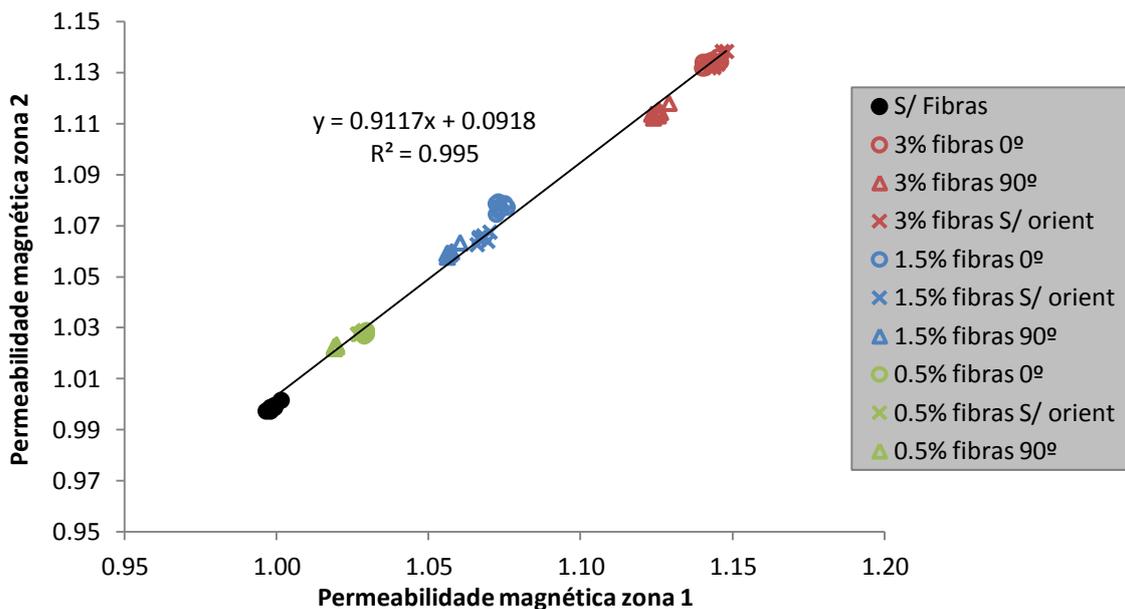


Figura 173 Correlação entre a permeabilidade na zona 1 com a zona 2 para a direção 0º

5.5.4. TENSÃO TRAÇÃO DE PICO E ÁREA ABAIXO DO DIAGRAMA - DEWST

A área abaixo do diagrama apresenta uma ligação com a ductilidade do material, em que quanto maior a área maior a energia de deformação. Desta forma, a área abaixo do diagrama foi calculada como sendo a soma da área de vários retângulos em que a base é a abertura de fenda (mm) entre dois pontos consecutivos e a altura é a média das tensões (MPa) desses dois pontos.

A Figura 174 apresenta a correlação entre a área abaixo do diagrama tensão de tração – abertura de fenda das placas o que traduz a forma dos diagramas apresentados na secção 5.3.6. Pela análise do gráfico da Figura 174 verifica-se que há uma correlação muito boa ($R^2=0.98$) entre a área e a tensão de pico, ou seja, os gráficos apresentam comportamentos semelhantes visíveis nas curvas da secção 5.3.6.

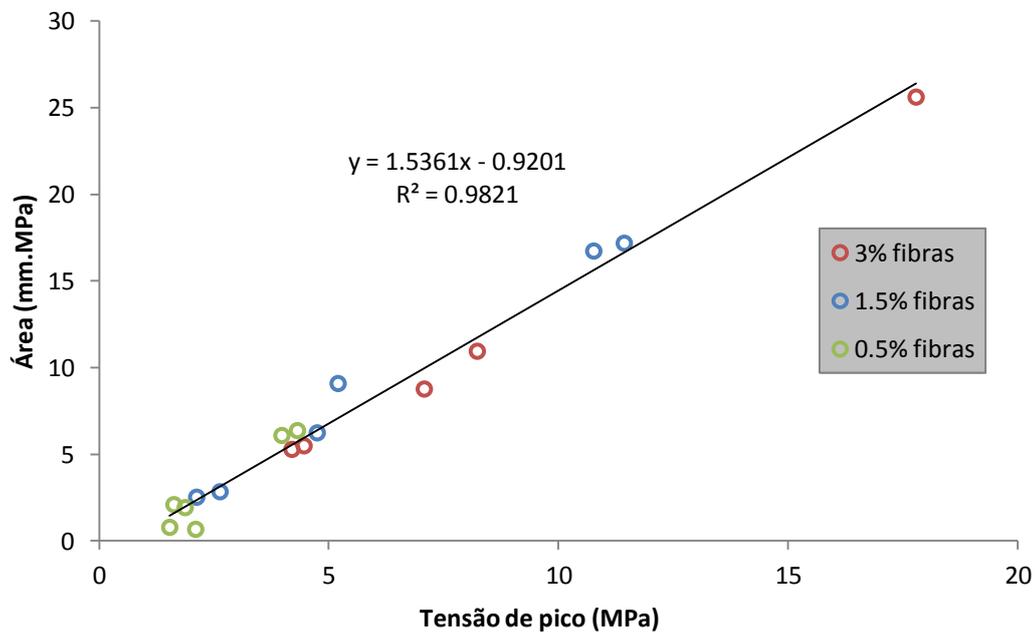


Figura 174 Correlação entre a área abaixo do diagrama e a tensão de pico

5.5.5. ENSAIO DEWST E O ENSAIO DE INDUTÂNCIA

Na Figura 175 apresenta-se a relação entre a área abaixo do diagrama resultante do ensaio DEWST e a permeabilidade magnética resultante do ensaio não-destrutivo o qual se registou a indutância do material. Pela análise da Figura 175 conclui-se que há um crescimento simultâneo da área abaixo do diagrama e da permeabilidade, sendo, este aumento de permeabilidade devido à maior percentagem das fibras. As tendências de crescimento variam dependendo da orientação das fibras, verificando-se que há um crescimento maior quando as fibras estão orientadas a 0° e um crescimento menor quando as fibras estão orientadas a 90° . Assim, é possível concluir que para obter um dado aumento da energia de fratura é necessária uma menor percentagem de fibras quando orientadas a 0° do que para outra orientação.

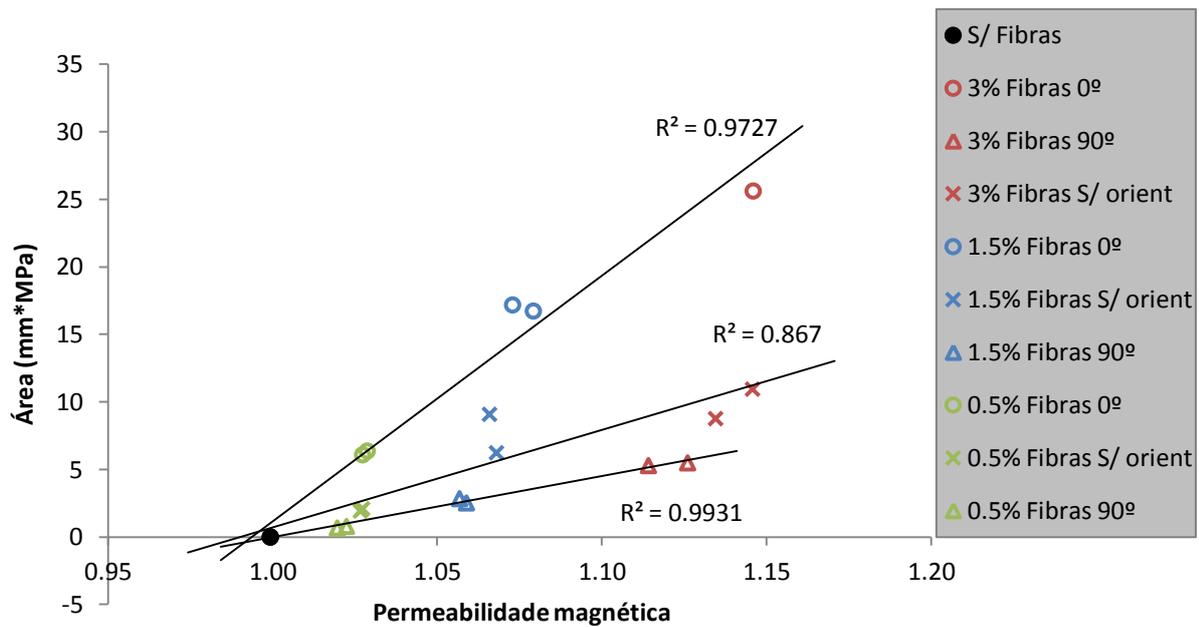


Figura 175 Correlação entre a área abaixo do diagrama DEWST e a permeabilidade magnética (direção 0°)

5.5.6. ENSAIO DEWST NAS PLACAS E O ENSAIO DE FLEXÃO NOS PRISMAS

Na Figura 176 é possível observar a correlação entre a área do DEWST das placas e a força máxima de pico no ensaio de flexão dos prismas obtendo-se um coeficiente de determinação de 0.76. No que diz respeito à correlação entre a tensão de pico do DEWST das placas e a força máxima de pico no ensaio de flexão dos prismas verifica-se uma correlação bastantes semelhante com um fator de determinação de 0.7855 (ver Figura 177).

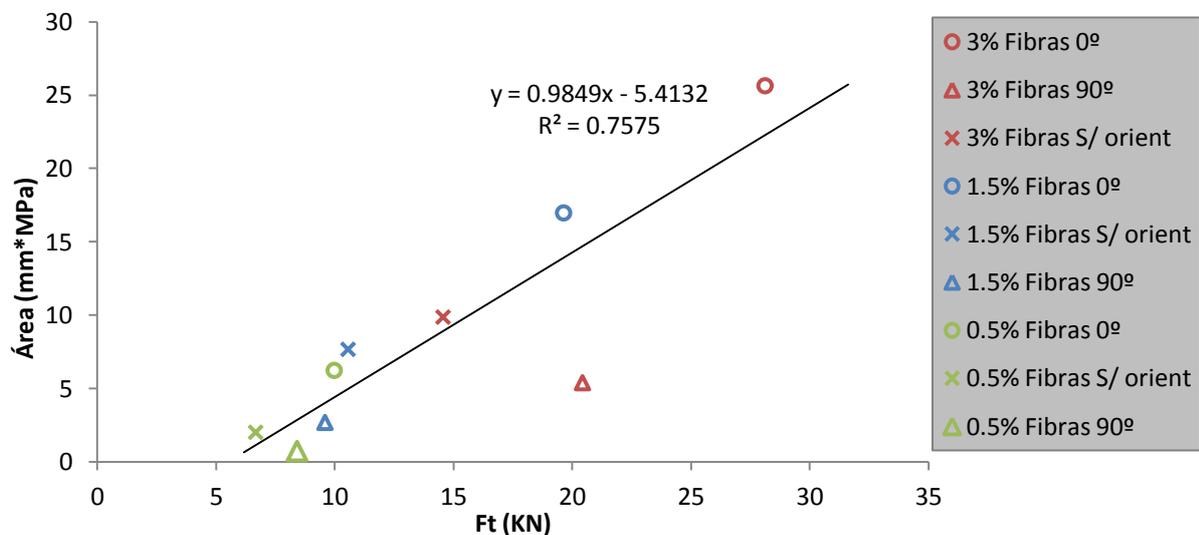


Figura 176 Correlação entre a área do DEWST das placas e a força máxima de pico no ensaio de flexão dos prismas

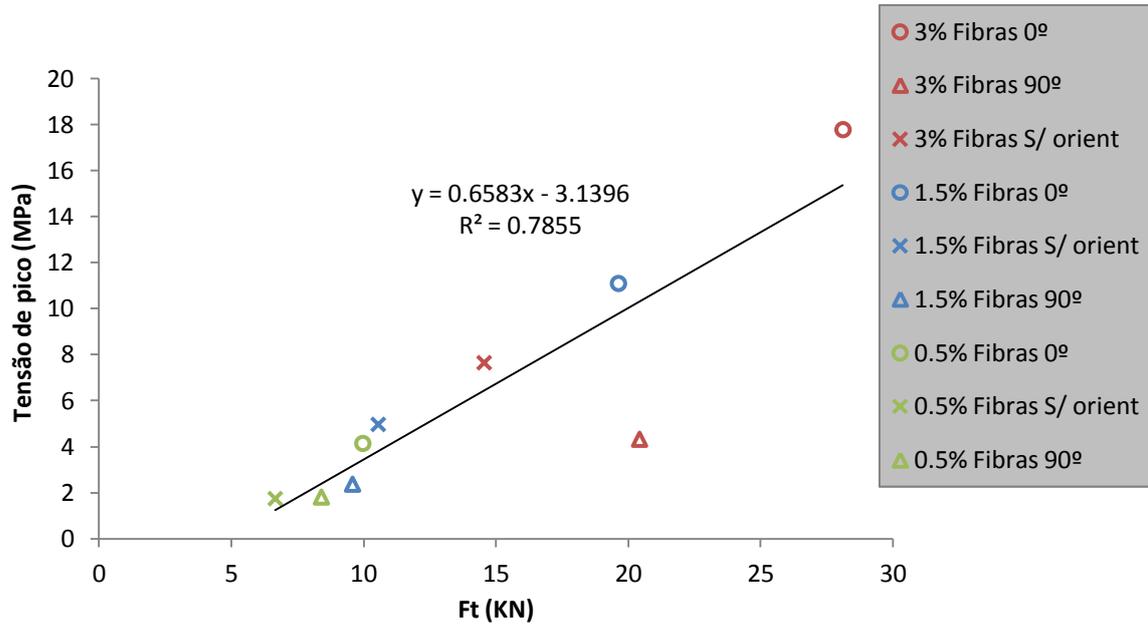


Figura 177 Correlação entre a tensão de pico do DEWST das placas e a força máxima de pico no ensaio de flexão dos prismas

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

6.1. CONCLUSÕES

Os estudos apresentados no decorrer da dissertação permitiram uma melhor compreensão e caracterização do betão de elevado desempenho reforçado com fibras (HPFRC), onde foi possível verificar que este material apresenta uma elevada resistência à tração bem como uma elevada ductilidade. O estudo incidiu na construção de um equipamento capaz de orientar as fibras no interior da mistura através de um campo magnético. Foram realizadas 10 combinações de misturas que se diferenciaram na percentagem de fibras (0.5%, 1.5% e 3%) e na direção da orientação das fibras provocada pelo campo magnético (fibras na direção 0°, 90° e sem orientação). Cada uma das 10 combinações deu origem a dois tipos de provetes: placas e prismas, os quais foram sujeitos a ensaios não-destrutivos até aos 49 dias de idade e de seguida procedeu-se à realização dos ensaios destrutivos obtendo-se resistências consideravelmente elevadas.

Os ensaios não-destrutivos utilizados na avaliação do HPFRC foram: a resistividade, ultrassons e indutância. Os ensaios realizaram-se com o intuito de avaliar a sua evolução ao longo do tempo, a influência da percentagem de fibras e a influência da orientação. No que diz respeito à resistividade verifica-se uma tendência para o crescimento do seu valor ao longo do tempo devido ao processo de hidratação da mistura. O método de medição da resistividade mostra-se capaz de identificar a concentração de fibras presente na mistura uma vez que os resultados variam exponencialmente com a percentagem de fibras. Pelo contrário, este método não é tão eficaz para detetar a orientação das fibras.

Quanto ao ensaio por ultrassons há uma evolução dos seus resultados apenas até aos 21 dias de idade, a partir desta idade os resultados mantiveram-se praticamente constantes. Os resultados mostram que a introdução das fibras pode causar descontinuidades no betão afetando a compacidade e homogeneidade da mistura levando a resultados de velocidade de propagação das ondas menores. No que diz respeito à orientação das fibras este ensaio não é o mais conclusivo, no entanto, observaram-se maiores velocidades na direção coincidente à orientação das fibras.

Por outro lado, a indutância apresenta resultados promissores no que diz respeito à identificação da orientação das fibras e à dosagem de fibras. No que diz respeito à evolução da permeabilidade magnética com a idade verifica-se que não há alterações uma vez que esta grandeza apenas é função dos materiais com propriedade magnéticas presentes na mistura: as fibras.

No âmbito desta dissertação realizaram-se três tipos de ensaios destrutivos: ensaios à tração por flexão, ensaios de compressão e o ensaio DEWST. Os primeiros realizaram-se nos prismas e o terceiro nas placas. Como esperado, os resultados dos três métodos variam com a percentagem de fibras na medida em que quanto maior a percentagem de fibras maior é a resistência. A orientação das fibras influencia também os resultados dos três ensaios no entanto tendo um impacto maior na resistência à tração por flexão dos prismas e na resistência à tração nas placas.

A força máxima do ensaio à tração por flexão nos prismas foi atingida para uma composição com 3% de fibras orientadas a 0° e apresenta um valor de 28.11 KN. Por outro lado, o prisma que atingiu uma menor força máxima apresenta uma percentagem de fibras de 0.5% sem orientação e foi de 6.66 KN. O valor máximo atingido pelo prisma sem fibras foi de 8.43 KN no entanto, para a composição sem fibras, este ensaio apresenta uma variação elevada uma vez que exibe uma rotura frágil.

A força de compressão máxima atingida pelos prismas foi de 284.74 KN correspondendo a um prisma com 3% de fibras não orientadas, esta força de compressão apresenta-se muito próxima da força atingida para a mesma percentagem de fibras mas com orientação a 0° ($F_c=274.40$ KN). No que diz respeito à resistência à tração avaliada pelo ensaio DEWST verifica-se que há uma grande influência da percentagem de fibras e da orientação das fibras. A maior tensão de tração observada ocorre para uma placa com 3% de fibras orientadas na direção das tensões principais, ou seja, a 0° e foi de 17.8 MPa. A segunda placa com as mesmas características atingiu uma tensão de tração maior ($f_t=18.9$ MPa), no entanto, não se conseguiu conduzir o ensaio até ao fim porque ocorreu o esmagamento do betão na zona de aplicação de carga.

6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

O HPFRC tem sido alvo de grandes avanços recentes na tecnologia do betão mostrando-se com grandes vantagens na sua aplicação e por isso merece um estudo aprofundado para uma boa caracterização do material com o intuito de que num futuro próximo seja possível projetar e desenvolver estruturas de HPFRC tirando partido da sua elevada durabilidade, resistência e da ductilidade deste material. Portanto, a continuação da investigação e do desenvolvimento para além do estudo apresentado nesta dissertação é indispensável para a caracterização plena do material.

O programa de processamento de imagem utilizado no estudo mencionado no Capítulo 2 realizado por Kang *et al.* [30] mostra-se capaz de avaliar a dispersão e a orientação das fibras no betão sendo uma mais-valia para a interpretação dos resultados dos ensaios realizados. Desta forma, o passo seguinte à presente investigação consistiria no desenvolvimento de um programa capaz de fornecer a dispersão e a orientação das fibras para que desta forma seja possível correlacionar estes dados com os ensaios não-destrutivos e destrutivos realizados.

No que respeita à medição de resistividade pelo método dos dois elétrodos, no presente estudo utilizaram-se placas com forma retangular o que afeta significativamente os resultados devido à medição a 0° e a medição a 90° apresentarem distâncias entre elétrodos e áreas de contacto distintas. Para evitar os erros relativos às dimensões das placas propõe-se o uso de placas com forma quadrada.

O uso do método dos quatro elétrodos torna-se mais vantajoso relativamente ao método dos dois elétrodos uma vez que este último apresenta dificuldades no contacto dos elétrodos com o betão, necessitando de placas de aço e panos humedecidos interferindo no valor de resistividade. Desta forma, e para retirar partido das vantagens associadas à medição pelo método dos quatro elétrodos torna-se necessário realizar o ensaio adotando as suas recomendações. Uma vez que a espessura da placa é um parâmetro fixo devido à necessidade de realização do ensaio DEWST, propõe-se o uso de um equipamento capaz de ajustar a distância entre elétrodos. Assim, para além de o ensaio se realizar segundo as recomendações era possível a realização da medição a 90° uma vez que a distância entre elétrodos extremos encurtava.

No que diz respeito à medição da indutância é necessário um reforço da sonda de medição uma vez que se trata de um equipamento sensível, podendo originar erros devido ao uso contínuo.

Destaca-se ainda a necessidade de um maior número de provetes de cada mistura para que com isso se obtenha resultados com maior credibilidade e desta forma se possa avaliar o desvio padrão existente nos resultados obtidos. Para isso é necessário o investimento numa misturadora com uma maior capacidade e que permita uma boa uniformização da mistura uma vez que o betão com fibras está sujeito a uma maior segregação devido à dificuldade de junção das fibras com a pasta.

Outro fator relevante a ser estudado seria a durabilidade do betão uma vez que este betão apenas apresenta vantagens económicas se compensar a longo prazo o investimento inicial. Desta forma seria importante procurar quais os métodos utilizados para avaliar a durabilidade deste tipo de betão e os métodos utilizados para os betões convencionais procurando respostas se são ou não aplicáveis ao betão em causa. Dois dos métodos possíveis de serem aplicados ao betão de ultra-elevado desempenho reforçado com fibras é o método de intrusão de mercúrio e a avaliação da resistência ao ataque químico mencionados no Capítulo 2 os quais foram estudados por Scheydle *et al.* [24].

É importante também o desenvolvimento de métodos de modelação numérica associados às características do material para que seja possível prever a resistência do material face às ações impostas. O desenvolvimento de métodos de modelação numérica pode ser realizado também ao equipamento de orientação das fibras com o objetivo do controlo completo do campo magnético gerado e da resistência oferecida pelo betão e pelas fibras na sua orientação paralela às linhas de campo.

No que diz respeito ao material utilizado na mistura é necessário a pesquisa de outros materiais, nomeadamente substitutos da sílica e das fibras de tal forma que não comprometam a eficiência do material e que minimizem o custo total do mesmo, uma vez que o custo destes dois materiais tende a ser elevado devido às suas características.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Shah, A., Ribakov, Y. *Recent trends in steel fibered high-strength concrete*. Materials and Design, 21/03/2011, 4122 – 4151.
- [2] Domone, P., Illston, J. *Construction Materials: their nature and behaviour*. Spon Press, EUA e Canada, 2010.
- [3] Coutinho, J. *Materiais de Construção 2*, 2010. (apontamentos Materiais de construção, conteúdos).
- [4] Falcão, L. *Materiais de construção 1*. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, Rio De Janeiro, 2001.
- [5] Singh, N. *Highly reactive β -Dicalcium silicate for ultra high performance concrete*. Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete. Setembro 13-15, 2004, Kassel
- [6] Ferrara, L., Faifer, Toscani, S. *A magnetic method for non destructive monitoring of fiber dispersion and orientation in steel fiber reinforced cementitious composites-part 1: method calibration*. Materials and Design, 12/11/2011, 575-589
- [7] Bartkowiak, R. *Circuitos elétricos*. Makron Editores, São Paulo, 1995.
- [8] Glaubitt, A. Middendorf, B. *Non-destructive ultrasonic testing methods for quality control of UHPC*, Proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete. March 05-07, 2008, Kassel
- [9] Hassan, A., Jones, S. *Non-destructive testing of Ultra high performance fiber reinforced concrete (UHPRC): A feasibility study for using ultrasonic and resonant frequency testing techniques*. Construction and building Materials, 2012, 361-367, Liverpool
- [10] Bungey, J., Millard, S. Grantham, M. *Testing of concrete in structures, 4th Edition*. Taylor & Francis e-Library, 2006.
- [11] Jayakumar, K. *Role of silica fume Concrete in Concrete Technology*. Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete. Setembro 13-15, 2004, Kassel
- [12] Breugel, K., Guang, Y., *Analyses of hydration processes and microstructural development of UHPC through numerical simulation*. University of Kassel, 2004.
- [13] Cho, Y., Lin F. *Non-destructive evaluation of in-place cement mortar compressive strength using spectral analysis of surface waves*, Construction and Building Materials, 2005, 738-745
- [14] Pereira, E., Barros, J., Cunha, V., Santos, S. *Compression and bending behavior of steel fiber reinforced self-compacting concrete*. University of Minho
- [15] Walraven J. *On the way to design recommendations for UHPRC*. Proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete. March 05-07, 2008, Kassel
- [16] Prakash R. *Non-Destructive Testing Techniques*. New Academic Science, Kent, GBR, 2012.
- [17] Wentworth, S. *Fundamentals of Electromagnetics with Engineering Applications*. John Wiley & Sons, Inc. United States of America, 2005.
- [18] Brandt A. M. Influence of the optimal direction of short metal fibres in brittle matrix composites. Journal of Materials science 20, 1985, 3831 - 3841, Poland

- [19] Naaman, A. *High Performance Fiber Reinforced Cement Composites*. University of Michigan, U.S.A. Chapter 3.
- [20] Naaman, A., Wille, K. *The Path to Ultra-high Performance Fiber Reinforced Concrete (UHP-FRC): Five Decades of Progress*. Proceedings of Hipermat 2012 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials. March 7-9, 2012, Kassel
- [21] Schmidt, M. *Sustainable Building with Ultra-High-Performance Concrete (UHPC) – Coordinated Research Program in Germany*. Proceedings of Hipermat 2012 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials. March 7-9, 2012, Kassel
- [22] http://www.ductal-lafarge.com/wps/portal/ductal/2_3_1-Detail?WCM_GLOBAL_CONTEXT=/wps/wcm/connect/lib_ductal/Site_ductal/English_version/Page.Navigation.Structural.Footbridges/KeyProjectDuctal%20Page/KeyProjectDuctal_1278712507168#editoEncartVide000000000020887
- [23] Resplendino, J. *State of the art of design and construction of UHPFRC Structures in France*. Proceedings of Hipermat 2012 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials. March 7-9, 2012, Kassel
- [24] Scheydt, J., Muller, H. *Microstructure of Ultra High Performance Concrete P(UHPC) and its Impact on Durability*. Proceedings of Hipermat 2012 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials. March 7-9, 2012, Kassel
- [25] Vera, M. *Caracterização de Meios Porosos. Porosimetria, Modelização 3D e Tomografia Seriada. Aplicação a Suportes Catalíticos* Dissertação de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1998.
- [26] Graybeal, B., Baby, F., Marchand, P., Toutlemonde, F. *Direct and Flexural Tension Test Methods for determination of Tensile Stress-Strain Response of UHPFRC*. Proceedings of Hipermat 2012 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials. March 7-9, 2012, Kassel
- [27] Markovic, I. *High-Performance Hybrid-Fibre Concrete- Development and Utilization*. Delft University
- [28] McCann, D., Forde, M. *Review of NDT methods in the assessment of concrete and masonry structures*. NDT&International, 2001, 71-84, Elsevier, UK
- [29] Norma Portuguesa: Métodos de ensaio de cimentos, Parte 6: Determinação da finura. NP EN 196-6, 2010
- [30] Kang, S., Lee, B., Kim, J., Kim, Y. *The effect of fibre distribution characteristics on the flexural strength of steel fibre-reinforced ultra high strength concrete*. Construction and Building Materials, 15/08/2008, 2450-2457, Elsevier
- [31] Köksal, F., Altun, F., Yiğit, I., Şahin, Y. *Combined effect of silica fume and steel fiber on the mechanical properties of high strength concretes*. Construction and Building Materials, 05/09/2006, 1874-1880, Elsevier, Turkey.
- [32] Siddique, R. *Utilization of silica fume in concrete: Review of hardened properties*, Resources, Conservation and Recycling, 20/03/2011, 1874-1880, Elsevier, India.
- [33] Coutinho, J.S. *Materiais de Construção 2* Faculdade da Universidade do Porto, 2010.

- [34] Lee, S., Hooton, R., Jung, H., Park, D., Choi, C. *Effect of limestone filler on the deterioration of mortars and pastes exposed to sulfate solutions at ambient temperature*, Cement and Concrete Research, 29/07/2005, 68-76, Elsevier, South Korea.
- [35] Lowke, D., Stengel, T., SchiBel, P., Gehlen, C. *Control of Rheology, Strength and Fibre Bond of UHPC with Additions – Effect of Packing Density and Addition Type*, Proceedings of Hipermat 2012 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials. March 7-9, 2012, Kassel
- [36] Azenha, M. *Comportamento do betão nas primeiras idades. Fenomenologia e análise termo-mecânica*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2004.
- [37] Beek, A. *Dielectric properties of young concrete*, Tese de doutoramento, Technische Universiteit Delft, 2000.
- [38] Ye, G., Liu, X., Schutter, G., Poppe, A. Taerwe, L. *Influence of limestone powder used as filler in SCC on hydration and microstructure of cement pastes*. Cement & Concrete Composites, 22/11/2005, 94-102 Elsevier, Netherlands
- [39] Sobolev, K. *The development of a new method for the proportioning of high-performance concrete mixtures*. Cement & Concrete Composites, 03/09/2003, 901-907 Elsevier, Mexico.
- [40] Damineli, B., Kemeid, F., Aguiar P., John V. *Measuring the eco-efficiency of cement use*. Cement & Concrete Composites, 09/02/2010, 555-562 Elsevier, São Paulo.
- [41] Rougeau, P., Borys B. *Ultra High Performance Concrete with ultrafine particles other than silica fume*. Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete. Setembro 13-15, 2004, Kassel
- [42] Taфраoui, A., Escadeillas, G., Lebaili S., Vidal, T. *Metakaolin in the formulation of UHPC*. Construction and Building Materials, 17/07/2007, 669-674, Elsevier,
- [43] Hassan, A., Lachemi, M., Hossain, K. *Effect of metakaolin and silica fume on the durability of self-consolidating concrete*. Cemen & Concrete Composites, 06/01/2011, 801-807, Elsevier
- [44] Guneyisi, E., Gesoglu, M., Karaoglu, S., Mermerdas, K. *Strength, permeability and shrinkage cracking of silica fume and metakaolin concretes*, Construction and Building Materials, 12/12/2011, 120-130, Elsevier, Turquia
- [45] Corinaldesi, V., Moriconi, G. *Mechanical and thermal evaluation of Ultra High Performance Fiber Reinforced Concretes for engineering applications*, Construction and Building Materials, 31/01/2011, 289-294, Elsevier, Itália
- [46] Tue, N., Ma J, Orgass, M. *Influence of addition method of superplasticizer on the properties of fresh UHPC*. Proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete. March 05-07, 2008, Kassel
- [47] Plank, J., Hirsch, C. *Impact of zeta potential of early cement hydration phases on superplasticizer adsorption*, Cement and Concrete Research, 10/01/2006, 537-542, Elsevier, Alemanha
- [48] Richard, P., Cheyrezy, M. *Composition of reactive powder concrete*, Cement and Concrete Research, 05/01/1995, 1501-1511, Elsevier, France
- [49] Corvez, D., Mazzacane, P. *Material performance control on two large projects: Jean-Bouin stadium and MUCEM museum*, Proceedings of Hipermat 2012 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials. March 7-9, 2012, Kassel

- [50] Park, J., Kang, Su., Koh, K., Kim, S. *Influence of the Ingredients on the Compressive Strength of UHPC as a Fundamental Study to Optimize the Mixing Proportion*. Proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete. March 05-07, 2008, Kassel
- [51] Resplendino, J. *First recommendations for Ultra-High-Performance Concrete and examples of application*. Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete. Setembro 13-15, 2004, Kassel
- [52] Setra, Association Française de Génie Civil, Bétons fibrés à ultra-haute performances – ultra high performance fiber-reinforced concretes, janeiro, 2002
- [53] Abdalla, H., Karihaloo, B. *Determination of size independent specific fracture energy of concrete from three-point bend and wedge splitting tests*. Magazine of Concrete Research, 04/2013 133-141, Thomas Telford, Cardiff
- [54] Skoček, J., Henrik, S. *Inverse analysis of the wedge-splitting test*, Engineering Fracture Mechanics, 13/04/2007, 3173-3188, Elsevier
- [55] Prisco, M., Ferrara, L. *Double edge wedge splitting (DEWS): an indirect tension test to identify post-cracking behavior of the fibre reinforced cementitious composites*. Material and Structures, 02/08/2012
- [56] Randl, N., Arnold, P., Schneider, W., Joachim, J. *Study on the Application of UHPC for Precast Tunnel Segments*, Proceedings of Hipermat 2012 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials. March 7-9, 2012, Kassel
- [57] Resplendino, J. *State of the art of design and construction of UHPC structures in France*, Proceedings of Hipermat 2012 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials. March 7-9, 2012, Kassel
- [58] Barnett, S., Lataste, J. Parry, T., Millard, S., Soutsos, M. *Assessment of fibre orientation in ultra high performance fibre reinforced concrete and its effect on flexural strength*. Materials and Structures, 10/04/2009, 55-61, Rilem
- [59] Ferreira, R., Jalali, S. *NDT measurements for the prediction of 28-day compressive strength*. NDT&International, 30/01/2009, 1009-1023, Elsevier, Guimarães, Portugal
- [60] Malhotra, V., Carinas, N. *Handbook on nondestructive testing of concrete*, Second edition, CRC Press, 2004
- [61] Sengul, O., Gjörv, E. *Effect of Embedded Steel on Electrical Resistivity Measurements on Concrete Structures*, ACI Materials Journal, 29/04/2008, 11-18
- [62] Figueiras, H., Martínez, P., Nunes, S., Silva, P. *Sistema de medição dos parâmetros de durabilidade em estruturas de betão armado e pré-esforçado*, Relatório técnico-Científico elaborado no âmbito do projecto N° 013 675, 03/2011, Porto
- [63] Polder, R. *Test methods for on site measurement of resistivity of concrete-a RILEM TC-154 technical recommendation*, Construction and Building Materials, 2001, 125-131, Elsevier, Países Baixos
- [64] Silva, P., Ferreira, R., Figueiras, H. *Electrical Resistivity as a Means of Quality Control of Concrete – Influence of Test Procedure*, International Conference on Durability of Building Materials and Components, 12 a 15 /04/2011, Porto-Portugal

- [65] Gowers, K., Millard, S. *Measurement of Concrete Resistivity for Assessment of Corrosion Severity of Steel Using Wenner Technique*, ACI Materials Journal, 20/03/1998, 536-541, Copyright
- [66] Hughes, B., Soleit, A., Brierley, R. *New technique for determining the electrical resistivity of concrete*, Magazine of concrete Research, 12/1985, 243-248
- [67] Lataste, J., Behloul, M., Breysse, D. *Characterisation of fibres distribution in a steel fibre reinforced concrete with electrical resistivity measurements*, NDT&E International, 31/10/2007, 638-647, França
- [68] Banthia, N., Djeridance, S., Pigeon, M. *Electrical Resistivity of Carbon and Steel Micro-fiber Reinforced Cements*, Cement and Concrete Research, 3/10/1991, 804-814, Canada
- [69] Faifer, M., Ottoboni, R., Toscani, S., Ferrara, L. *Nondestructive Testing of Steel-Fiber-Reinforced Concrete Using a Magnetic Approach*. IEEE Transactions on instrumentation and measurement, 16/06/2010, 1709-1717, IEEE
- [70] Breugel, K., Guang, Y. *Analyses of hydration processes and microstructural development of UHPC through numerical simulation*. Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete. Setembro 13-15, 2004, Kassel
- [71] Lawson, I., Danso, K., Odoi, H., Adjei, C., Quashie, F. *Non-Destructive Evaluation of Concrete using Ultrasonic Pulse Velocity*, Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 10/02/2011, 499-504, Maxwell Scientific Organization,
- [72] Zhang, Y., Zhang, W., She, W., Ma, L., Zhu, W. *Ultrasound monitoring of setting and hardening process of ultra-high performance cementitious materials*, NDT&E International, 12/05/2009, 177-184, Elsevier, China
- [73] Qixian, L., Bungey, J. *Using compression wave ultrasonic transducers to measure the velocity of surface waves and hence determine dynamic modulus of elasticity for concrete*, Construction and Building Materials, 16/06/1995, 237-242, Elsevier.
- [74] Miranda, L., Rio, J., Guedes, J., Costa, A. *Sonic Impact Method – A new technique for characterization of stone masonry walls*, Construction and Building Materials, 11/04/2012, 27-35, Elsevier.
- [75] Sumangala, R. *Investigations on Ultrasonic Transducer*. Dissertação de Doutoramento, Cochin University of Science and Technology, 1996.
- [76] Ribeiro, F., Nunes, S. *Betão de Elevado Desempenho Reforçado com Fibras*, Encontro Nacional Betão Estrutural – BE2012, 24-26 de outubro 2012, FEUP, Porto.
- [77] Camacho, E., López, J., Ros, P. *Definition of three levels of performance for UHPFRC-VHPFRC with available materials*, Proceedings of Hipermat 2012 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials. March 7-9, 2012, Kassel
- [78] Ribeiro, F. *Betão de Elevado Desempenho Reforçado com Fibras*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2012
- [79] Nunes, S., Matos, A., Duarte, T., Figueiras, H., Countinho, J. *Argamassa auto-compactável com incorporação de pó de vidro*, 3º Congresso Iberoamericano sobre betão auto-compactável, 3 e 4 de Dezembro de 2012, Madrid
- [80] http://www.graitec.com/en/ref_info.asp?RefID=354

[81] Pansuk, W., Sato, H., Sato, Y., Shionaga, R. *Tensile Behaviors and Fiber Orientation of UHPC*. Proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete. March 05-07, 2008, Kassel

[82] Nunes, S., Ribeiro, F., Azevedo, D., Rio, J. *Betofibra-Betões de elevado desempenho reforçado com fibras em soluções inovadoras: conceção, caracterização e controlo de qualidade*, Relatório técnico, 15/03/2013

ANEXOS

A1 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTIVIDADE

A2 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ULTRASSONS

A3 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE INDUTÂNCIA E PERMEABILIDADE MAGNÉTICA

A4 – TEMPO DE CURA E IDADE DE REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS DESTRUTIVOS

A5 – EVOLUÇÃO COM A IDADE

A6 – INFLUÊNCIA DA DOSAGEM DE FIBRAS

A7 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DEWST

A8 – CORRELAÇÕES

ÍNDICE DE ANEXOS

A1

A1. 1 Resultados de resistividade elétrica - método dos dois elétrodos

A1. 2 Resultados de resistividade elétrica – Métodos dos quatro elétrodos

A2

A2. 1 Resultados utilizados para avaliar a influência da distância entre transdutores no tempo de propagação de onda por transmissão indireta

A2. 2 Posições dos transdutores para a medição de ultrassons

A2. 3 Resultados do tempo de propagação da onda ultrassom

A3

A3. 1 Resultados de Indutância

A4

A4. 1 Tempo de cura e idade da realização do ensaio

A5

A5. 1 Evolução da resistividade elétrica nas placas com a idade determinada pelo método dos dois elétrodos na direção 90°

A5. 2 Evolução da resistividade elétrica nas placas com a idade pelo método dos dois elétrodos na direção 90°. Placas com valores de resistividade mais baixos.

A5. 3 Evolução da resistividade nas placas com a idade. Medições realizadas pelo método dos quatro elétrodos na zona 2 na direção 0°

A5. 4 Evolução da resistividade nas placas com a idade determinada pelo método dos quatro elétrodos na zona 2 na direção 0°. Placas com valores de resistividade mais baixos

A5. 5 Evolução da resistividade nas placas com a idade. Medições realizadas pelo método dos quatro elétrodos na zona 1 na direção ≈85°

A5. 6 Evolução da resistividade nas placas com a idade determinada pelo método dos quatro elétrodos na zona 1 na direção ≈85°. Placas com valores de resistividade mais baixos

A5. 7 Evolução da resistividade nas placas com a idade. Medição realizada pelo método dos quatro elétrodos na zona 2 na direção ≈85°

A5. 8 Evolução da resistividade nas placas com a idade determinada pelo método dos quatro elétrodos na zona 2 na direção ≈85°.

A5. 9 Evolução da velocidade de propagação de ondas ultrassons nas placas com a idade determinada por transmissão direta na direção 0°

A5. 10 Evolução da velocidade de propagação de ondas ultrassons nas placas com a idade determinada por transmissão direta na direção 90°

A5. 11 Evolução da velocidade de propagação de ondas ultrassons nas placas com a idade determinada por transmissão indireta com transdutores na posição 12 (direção a 0°)

A5. 12 Evolução da velocidade de propagação de ondas ultrassons nas placas com a idade determinada por transmissão indireta com transdutores na posição 11 (direção a 90°)

A5. 13 Evolução da velocidade de propagação de ondas ultrassons nas placas com a idade determinada por transmissão indireta com transdutores na posição 13 (direção a 90°)

A5. 14 Evolução da permeabilidade nas placas com a idade na zona 1 na direção 90°

A5. 15 Evolução da permeabilidade nas placas com a idade na zona 2 na direção 0°

A5. 16 Evolução da permeabilidade nas placas com a idade na zona 2 na direção 90°

A6

A6. 1 Relação entre a resistividade elétrica medida nas placas (fibras S/ orient) na direção 0° com a percentagem de fibras – Método dos dois elétrodos

A6. 2 Relação entre a resistividade elétrica medida nas placas (fibras S/ orient) na direção 90° com a percentagem de fibras – Método dos dois elétrodos

A6. 3 Relação entre a resistividade elétrica medida nas placas (fibras S/ orient) na direção 0° com a percentagem de fibras – Método dos quatro elétrodos

A6. 4 A5. 20 Relação entre a velocidade de propagação dos ultrassons medida nos prismas (fibras S/ orient) com a percentagem de fibras

A6. 5 Relação entre a velocidade de propagação dos ultrassons medida nas placas (fibras S/ orient) na direção 90° com a percentagem de fibras

A6. 6 Relação entre a permeabilidade magnética medida a 90° com a percentagem de fibras

A7

A7. 1 Resultados dos ensaios DEWST e dimensões necessárias para o cálculo da tensão de tração máxima

A8

A8. 1 Correlação entre o método dos quatro elétrodos na zona 1 e a zona 2

A8. 2 Correlação entre o método dos dois elétrodos embebidos e o método dos quatro elétrodos na direção 0°

A8. 3 Correlação entre o método dos dois elétrodos exteriores e o método dos quatro elétrodos na direção 0°

A8. 4 Correlação entre o método por transmissão direta e o método por transmissão indireta para a direção 90°

A1 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTIVIDADE

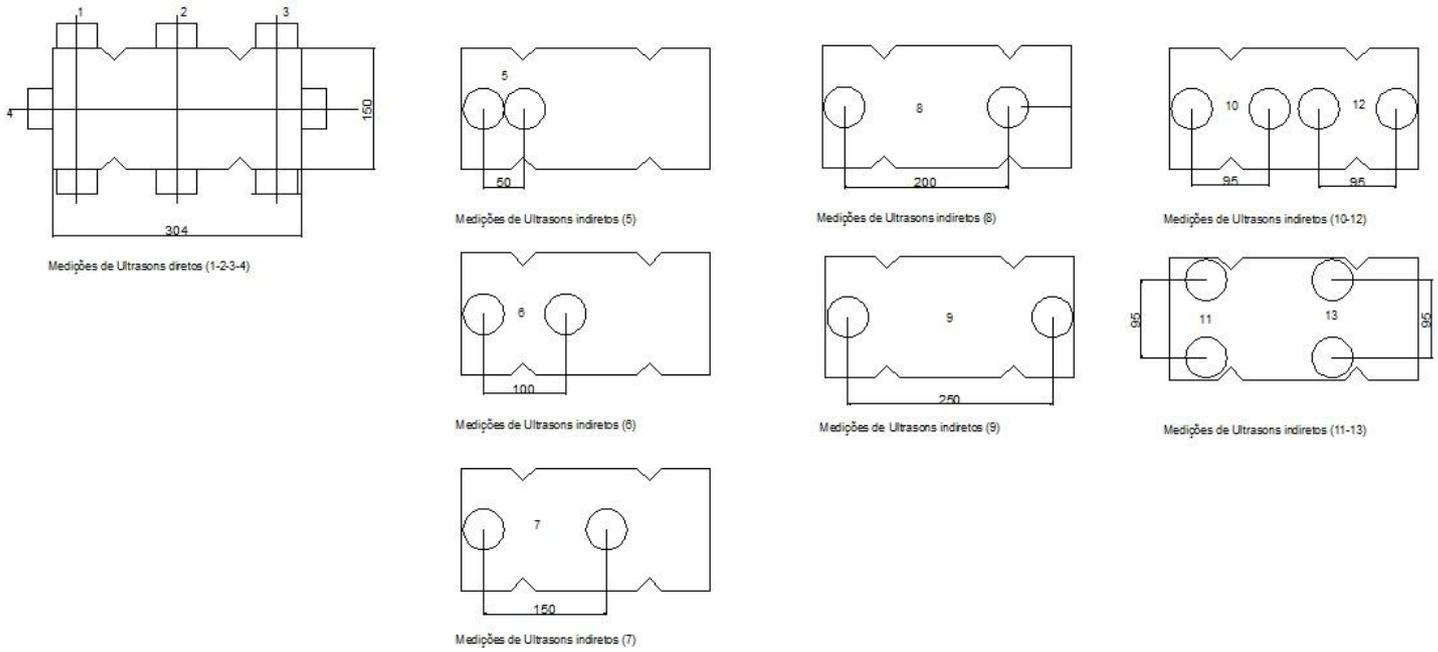
Resistividade - Método dos 2 elétrodos (KΩ.cm)			Dias								
			2	3	7	14	21	28	35	42	49
S/ Fibras	Placa	0°	/	5.101	7.429	12.321	16.729	18.150	20.270	20.260	21.794
		90°	/	5.108	8.015	12.697	20.189	26.465	33.683	40.363	43.435
	Prisma	0°	3.478	4.148	6.102	10.206	13.567	14.871	16.826	16.829	17.238
3% fibras 0°	Placa	0°	/	0.362	0.563	0.497	0.966	0.985	1.032	1.637	1.561
		90°	/	1.134	1.676	1.865	2.901	2.966	3.562	4.049	4.618
	Prisma	0°	0.034	0.034	0.035	0.024	0.012	0.010	0.009	0.010	0.010
3% fibras 90°	Placa	0°	/	0.820	1.566	1.675	2.445	2.683	3.072	3.892	3.787
		90°	/	1.527	3.498	1.606	2.522	2.578	3.286	2.928	2.540
	Prisma	0°	0.129	0.151	0.215	0.343	0.462	0.554	0.670	0.807	0.841
3% fibras S/orient	Placa	0°	0.614	/	1.027	1.604	2.226	3.030	3.687	4.317	4.634
		90°	0.844	/	1.388	1.820	2.641	3.639	4.669	5.297	5.771
	Prisma	0°	0.281	/	0.466	0.781	1.183	1.599	2.149	2.738	2.982
1.5% fibras 0°	Placa	0°	0.184	/	0.570	0.888	1.323	1.642	2.348	2.389	2.542
		90°	1.941	/	2.205	3.197	4.885	5.978	7.455	7.632	9.118
	Prisma	0°	0.037	/	0.047	0.048	0.043	0.047	0.049	0.052	0.053
1.5% fibras S/ orient	Placa	0°	0.868	/	1.708	3.154	4.114	6.068	7.844	9.085	9.752
		90°	1.272	/	1.949	3.991	4.114	6.154	8.142	9.441	10.060
	Prisma	0°	0.702	/	1.153	2.010	3.130	4.191	5.660	6.792	7.564
1.5% fibras 90°	Placa	0°	0.597	/	1.198	2.115	2.913	3.909	4.512	4.959	5.484
		90°	0.600	/	0.803	1.789	2.329	3.235	3.449	3.769	4.533
	Prisma	0°	0.489	/	0.842	1.351	1.758	1.994	2.492	2.582	2.688
0.5% fibras 0°	Placa	0°	0.597	/	0.970	1.578	1.985	2.594	2.977	3.511	3.655
		90°	2.885	/	5.044	7.580	10.325	13.951	17.355	19.585	21.576
	Prisma	0°	0.120	/	0.162	0.199	0.256	0.328	0.410	0.477	0.527
0.5% fibras S/ orient	Placa	0°	2.332	/	4.002	6.657	9.231	12.420	15.004	16.426	16.589
		90°	2.211	/	3.501	5.962	8.081	11.431	14.910	17.570	19.722
	Prisma	0°	1.697	/	2.864	4.919	7.250	9.653	12.163	13.573	13.710
0.5% fibras 90°	Placa	0°	1.883	/	3.266	5.169	7.157	9.086	11.435	12.072	12.788
		90°	0.888	/	1.605	2.121	2.677	2.962	4.191	4.031	4.564
	Prisma	0°	2.015	/	3.404	5.593	7.997	9.997	12.377	13.446	13.576

A1. 1 Resultados de resistividade elétrica - método dos dois elétrodos

Resistividade - Método dos 4 elétrodos (K Ω .cm)			Dias																	
			2	7	14	21	28	35	42	49	Resistividade - Método dos 4 elétrodos (K Ω .cm)									
S/Fibras	1	0º	21.0	38.0	71.7	123.3	159.3	206.3	266.3	279.3				1	0º	4.2	5.2	9.7	10.2	14.4
		≈85º	21.0	37.0	70.0	115.0	152.8	207.0	284.0	286.3	≈85º	3.9	4.4		7.5	12.0	14.0	21.5	19.8	26.8
	2	0º	21.0	37.0	69.0	120.0	157.0	207.3	283.3	303.7	2	0º	4.7	4.4	8.1	13.0	17.6	22.0	23.5	27.8
		≈85º	20.3	35.3	66.3	114.3	153.3	181.7	272.0	301.3		≈85º	3.7	3.5	6.5	7.8	13.8	18.3	24.0	28.0
3% fibras 0º	1	0º	21.0	37.5	70.3	121.6	158.2	206.8	274.8	291.5	1	0º	4.4	4.8	8.9	11.6	16.0	19.7	24.0	25.6
		≈85º	20.7	36.2	68.2	114.6	153.0	194.3	278.0	293.8		≈85º	3.8	4.0	7.0	9.9	13.9	19.9	21.9	27.4
	2	0º	1.0	1.0	0.8	0.1	0.2	1.4	0.8	0.3	2	0º	2.8	2.9	3.3	3.5	3.5	3.9	4.9	4.4
		≈85º	1.0	1.0	1.3	0.1	1.4	3.9	0.1	0.1		≈85º	1.9	1.2	1.9	1.9	1.7	2.6	1.9	2.7
3% fibras 90º	1	0º	1.0	1.0	1.4	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	1	0º	2.6	1.9	2.6	5.4	3.1	4.2	3.8	3.5
		≈85º	1.0	1.0	1.0	0.1	0.6	0.1	0.1	0.1		≈85º	1.9	1.0	1.1	2.7	1.3	2.7	2.3	2.6
	2	0º	1.0	1.0	1.1	0.1	0.2	0.8	0.4	0.2	2	0º	2.7	2.4	2.9	4.5	3.3	4.0	4.4	4.0
		≈85º	1.0	1.0	1.2	0.1	1.0	2.0	0.1	0.1		≈85º	1.9	1.1	1.5	2.3	1.5	2.6	2.1	2.6
3% fibras S/orient	1	0º	1.9	2.6	3.5	3.1	9.2	5.1	5.3	6.3	1	0º	3.6	2.8	3.4	6.7	11.8	16.8	21.0	17.3
		≈85º	1.9	1.9	2.6	1.8	4.8	3.0	4.2	4.5		≈85º	4.9	5.9	9.7	16.0	22.0	25.8	31.5	26.3
	2	0º	1.9	2.9	4.4	6.4	11.8	8.2	9.7	9.0	2	0º	3.6	5.4	7.6	19.0	15.8	17.8	21.3	20.3
		≈85º	1.9	1.5	2.7	1.0	2.6	1.9	3.5	3.9		≈85º	5.4	7.8	14.0	9.8	25.5	29.4	32.0	24.5
3% fibras S/orient	1	0º	1.9	2.8	4.0	4.8	10.5	6.6	7.5	7.6	1	0º	3.6	4.1	5.5	12.9	13.8	17.3	21.1	18.8
		≈85º	1.9	1.7	2.7	1.4	3.7	2.5	3.8	4.2		≈85º	5.2	6.8	11.9	12.9	23.8	27.6	31.8	25.4
	2	0º	1.9	2.9	3.5	5.2	7.3	5.6	8.4	11.8	2	0º	10.0	14.8	30.5	43.7	66.0	95.6	101.8	113.2
		≈85º	1.9	1.9	2.9	3.7	5.5	4.4	7.3	5.4		≈85º	7.8	12.4	23.5	32.7	47.3	56.6	59.5	88.2
1.5% fibras 0º	1	0º	2.6	1.9	4.4	4.6	6.3	7.2	7.6	8.1	1	0º	10.0	15.5	28.3	43.3	64.8	90.8	110.0	125.0
		≈85º	1.9	1.9	2.9	3.1	3.5	4.4	5.6	6.0		≈85º	7.3	11.8	23.2	34.3	49.0	65.3	67.0	78.6
	2	0º	2.3	2.4	4.0	4.9	6.8	6.4	8.0	9.9	2	0º	10.0	15.1	29.4	43.5	65.4	93.2	105.9	119.1
		≈85º	1.9	1.9	2.9	3.4	4.5	4.4	6.4	5.7		≈85º	7.5	12.1	23.4	33.5	48.1	60.9	63.3	83.4
Método dos 4 elétrodos (K Ω .cm)	1	0º	1.6	1.0	1.9	0.1	0.8	1.8	2.2	2.4	1	0º	8.2	13.3	19.0	30.0	40.0	49.8	49.2	61.8
		≈85º	1.9	1.0	2.6	1.0	2.2	2.9	3.0	2.3		≈85º	3.6	5.9	9.6	11.8	15.8	18.0	20.5	24.5
	2	0º	1.9	0.1	1.9	0.1	1.4	1.8	2.2	2.1	2	0º	5.9	8.8	14.6	20.0	26.3	35.0	39.4	40.8
		≈85º	1.9	1.0	2.7	1.8	2.6	3.0	3.6	1.9		≈85º	3.5	4.4	11.0	13.5	19.8	21.8	26.3	34.5
Método dos 4 elétrodos (K Ω .cm)	Média das zonas	0º	1.8	0.6	1.9	0.1	1.1	1.8	2.2	2.3	Média das zonas	0º	7.1	11.0	16.8	25.0	33.2	42.4	44.3	51.3
		≈85º	1.9	1.0	2.7	1.4	2.4	2.9	3.3	2.1		≈85º	3.5	5.2	10.3	12.6	17.8	19.9	23.4	29.5

A1.2 Resultados de resistividade elétrica – Métodos dos quatro elétrodos

A2 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ULTRASSONS



A2. 2 Posições dos transdutores para a medição de ultrasons

Tempo de propagação da onda nas placas (μ s)	2 Dias						
	S/ Fibras	3% Fibras 0º	3% Fibras 90º	3% Fibras S/ orient	1.5% Fibras 0º	1.5% Fibras S/ orient	1.5% Fibras 90º
1	32.3	33.4	33.8	33.5	33.1	33.4	33.2
2	32.2	33.6	33.7	34.1	33.4	33.2	33.0
3	32.3	33.1	33.9	33.1	33.4	33.3	33.0
4	65.2	65.1	71.0	67.5	66.2	67.5	68.1
5	17.4	13.3	19.2	18.0	33.3	18.6	18.7
6	15.9	17.3	17.9	18.1	19.1	18.3	18.9
7	27.9	26.5	29.4	28.4	28.4	29.1	29.6
8	35.8	37.6	39.4	40.1	40.5	39.8	40.3
9	48.1	48.4	53.4	50.3	49.6	51.3	52.4
10	17.3	16.3	16.7	16.1	16.6	16.3	16.5
11	17.2	18.3	17.1	16.3	19.0	16.4	17.1
12	17.3	19.2	18.9	16.4	16.5	15.9	16.1
13	16.5	18.1	17.3	17.9	19.4	16.4	16.1

A2. 1 Resultados utilizados para avaliar a influência da distância entre transdutores no tempo de propagação de onda por transmissão indireta

Tempo de propagação da onda (µs)		Posição	Dias									
			2	7	14	21	28	35	42	49		
S/ Fibras	Placa	1	32.3	30.9	30.4	30.1	30.3	30.3	30.2	30.2		
		2	32.2	31.2	30.5	30.2	30.5	30.5	30.4	30.3		
		3	32.3	31.1	30.5	30.1	30.4	30.4	30.2	30.2		
		4	65.2	62.4	61.3	60.8	60.9	60.8	60.5	60.6		
		10	17.3	16.2	14.7	15.0	15.2	14.9	15.3	15.8		
		11	17.2	16.0	14.7	15.2	15.7	15.4	15.7	15.8		
		12	17.3	15.7	14.9	15.4	15.6	15.4	15.5	15.7		
		13	16.5	18.2	15.3	15.2	16.7	16.6	15.2	15.7		
		prisma	0º	35.3	33.3	32.7	32.4	32.7	32.4	32.4	32.2	
		3% Fibras 0º	Placa	1	33.4	31.7	31.0	30.7	31.0	30.9	30.7	30.8
				2	33.6	31.4	31.0	30.9	31.1	31.0	30.8	30.8
				3	33.1	31.4	30.9	30.8	30.9	30.9	30.7	30.7
				4	65.1	62.4	61.4	61.0	61.1	60.9	60.6	60.7
	10			16.3	15.0	14.3	15.1	14.7	15.2	14.6	14.8	
11	18.3			16.0	15.4	15.3	14.8	14.8	15.2	15.6		
12	19.2			15.3	14.8	14.5	14.7	14.7	14.7	15.1		
13	18.1			15.4	15.2	15.2	15.1	15.2	15.5	16.0		
prisma	0º			35.2	33.4	33.0	32.6	33.0	32.7	32.6	32.5	
3% Fibras 90º	Placa			1	33.8	31.7	31.2	30.9	31.1	31.0	31.0	31.0
				2	33.7	31.6	31.1	30.8	31.0	31.0	30.9	30.9
				3	33.9	31.8	31.2	31.0	31.2	31.0	30.9	30.9
				4	71.0	66.2	64.8	64.0	64.4	63.9	63.7	63.6
			10	16.7	16.4	15.9	15.4	15.6	15.7	15.6	15.1	
		11	17.1	15.4	14.8	14.9	15.2	15.2	14.9	14.8		
		12	18.9	16.0	15.6	15.3	15.6	15.3	15.2	15.8		
		13	17.3	15.1	14.5	15.1	15.1	15.2	14.8	14.9		
		prisma	0º	37.9	35.4	34.8	34.1	34.5	34.2	34.1	34.0	
		3% Fibras S/ orient	Placa	1	33.5	31.8	31.0	30.7	31.0	30.9	30.8	30.9
				2	34.1	31.7	31.1	30.9	31.1	30.9	30.8	30.8
				3	33.1	31.8	31.1	30.8	31.0	30.6	30.6	30.6
				4	67.5	64.4	63.1	62.4	62.4	62.1	62.0	62.0
	10			16.1	15.9	16.3	15.1	14.8	15.4	15.6	14.9	
11	16.3			15.3	16.1	14.8	15.0	15.2	15.1	15.3		
12	16.4			16.3	16.4	14.9	15.7	15.2	15.7	15.2		
13	17.9			15.4	15.8	14.4	14.9	15.1	15.4	15.6		
prisma	0º			36.0	33.4	33.3	32.7	33.0	32.9	32.7	32.7	
1.5% Fibras 0º	Placa			1	33.1	31.7	31.1	30.5	30.9	30.8	30.6	30.6
				2	33.4	31.6	31.1	30.6	30.9	30.8	30.7	30.6
				3	33.4	31.5	31.1	30.5	30.9	30.8	30.6	30.6
				4	66.2	62.6	61.6	60.9	61.1	60.9	60.8	60.8
			10	16.6	15.1	16.2	14.4	15.1	15.2	15.5	15.0	
		11	19.0	15.9	17.0	15.1	15.4	15.3	15.7	16.4		
		12	16.5	15.3	16.0	14.8	14.9	14.9	15.1	15.4		
		13	19.4	15.9	16.1	14.8	15.8	15.2	15.8	15.8		
		prisma	0º	35.6	33.7	33.3	32.9	33.0	32.8	32.7	32.7	
		1.5% Fibras S/ orient	Placa	1	33.4	31.5	30.8	30.6	30.9	30.7	30.7	30.7
				2	33.2	31.3	30.8	30.7	31.0	30.6	30.6	30.6
				3	33.3	31.3	30.8	30.7	30.9	30.6	30.5	30.5
				4	67.5	63.5	62.6	62.1	62.2	61.8	61.7	61.8
	10			16.3	15.3	15.3	14.8	15.7	15.6	14.8	14.9	
11	16.4			15.6	15.3	15.0	15.2	15.2	14.8	15.2		
12	15.9			15.4	15.4	15.0	15.5	15.2	15.5	15.7		
13	16.4			15.1	15.3	14.9	15.3	15.4	14.8	15.6		
prisma	0º			35.8	33.6	33.1	33.2	33.0	32.9	32.8	32.7	
1.5% Fibras 90º	Placa			1	33.2	31.4	30.8	30.8	30.7	30.7	30.6	30.6
				2	33.0	31.0	30.5	30.6	30.6	30.4	30.4	30.4
				3	33.0	31.2	30.6	30.8	30.7	30.6	30.5	30.5
				4	68.1	63.9	62.5	62.4	62.1	61.9	61.8	61.7
			10	16.5	16.3	15.2	15.2	15.7	15.5	15.4	14.9	
		11	17.1	15.4	14.9	15.1	15.1	15.3	15.3	14.7		
		12	16.1	16.2	15.4	15.2	15.1	15.5	15.7	15.2		
		13	16.1	15.3	15.3	15.5	15.6	15.3	15.8	14.9		
		prisma	0º	36.3	34.2	33.8	33.8	33.5	33.7	33.6	33.3	
		0.5% Fibras 0º	Placa	1	33.2	31.6	31.0	30.8	30.6	30.5	30.4	30.5
				2	33.1	31.6	31.0	30.8	30.6	30.5	30.4	30.5
				3	33.1	31.6	31.0	30.8	30.5	30.5	30.4	30.4
				4	65.9	63.0	61.8	61.3	60.9	60.8	60.6	60.6
	10			16.8	15.5	15.3	14.8	15.2	15.4	15.2	14.8	
11	17.4			15.7	15.4	15.5	15.6	15.3	15.5	15.1		
12	16.7			15.5	15.4	14.8	15.4	15.6	14.7	14.9		
13	16.5			15.7	15.4	15.8	15.1	15.7	15.6	15.2		
prisma	0º			35.9	34.1	33.3	33.2	32.9	32.8	32.7	32.6	
0.5% Fibras S/ orient	Placa			1	33.0	31.5	31.1	30.7	30.5	30.5	30.4	30.4
				2	33.0	31.6	31.0	30.8	30.7	30.5	30.5	30.5
				3	33.0	31.6	31.0	30.7	30.5	30.4	30.4	30.3
				4	66.4	63.3	62.3	61.8	61.3	61.2	61.1	61.0
			10	17.6	15.5	15.4	14.9	14.8	15.5	14.7	14.7	
		11	17.5	15.3	15.4	14.9	14.6	15.7	14.7	14.7		
		12	17.2	15.7	15.1	15.1	15.1	15.2	15.1	14.9		
		13	17.3	15.8	15.2	15.3	14.8	15.1	15.2	14.8		
		prisma	0º	35.7	33.9	33.2	33.0	32.9	32.8	32.7	32.5	
		0.5% Fibras 90º	Placa	1	33.2	31.6	31.1	30.8	30.6	30.6	30.4	30.5
				2	32.9	31.4	31.0	30.6	30.5	30.3	30.2	30.3
				3	33.5	31.6	31.0	30.7	30.6	30.5	30.4	30.5
				4	66.6	63.6	62.3	61.7	61.4	61.2	61.0	61.1
	10			17.7	15.8	15.1	15.4	15.7	15.2	15.3	15.0	
11	17.6			15.6	14.9	15.8	15.2	15.3	14.5	14.8		
12	17.7			15.7	15.3	16.1	15.3	15.2	14.8	14.8		
13	17.8			15.1	15.1	15.3	14.8	14.9	14.9	14.5		
prisma	0º			35.8	34.1	33.6	33.5	33.2	33.0	33.0	33.0	

A2. 3 Resultados do tempo de propagação da onda ultrassom

A3 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE INDUTÂNCIA E PERMEABILIDADE MAGNÉTICA

Permeabilidade Magnética		Dias										
		2	7	14	21	28	35	42	49			
S/Fibras	Ar (mH)	14.26	14.25	14.27	14.26	14.28	14.26	14.26	14.26	14.26	14.27	14.27
		0º	0.998	0.999	0.998	1.001	0.996	0.996	0.999	0.999	0.999	0.999
	1	90º	0.997	0.999	0.999	1.001	0.996	0.996	0.999	0.999	0.999	1.000
		0º	0.997	0.999	0.999	1.001	0.997	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999
	2	90º	0.997	0.999	0.999	1.001	0.996	0.996	0.999	0.998	0.999	0.999
		0º	0.998	0.999	0.998	1.001	0.997	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999
	média das zonas	90º	0.997	0.999	0.999	1.001	0.996	0.999	0.999	0.998	1.000	1.000
		0º	14.26	14.25	14.27	14.26	14.28	14.27	14.27	14.26	14.25	14.25
	Ar (mH)	1	1.140	1.142	1.141	1.145	1.140	1.143	1.143	1.143	1.146	1.146
		90º	1.102	1.102	1.102	1.106	1.101	1.104	1.103	1.103	1.104	1.104
2	0º	1.134	1.134	1.132	1.136	1.132	1.133	1.135	1.135	1.134	1.134	
	90º	1.102	1.102	1.102	1.105	1.100	1.103	1.102	1.102	1.105	1.105	
média das zonas	0º	1.137	1.138	1.136	1.141	1.136	1.138	1.139	1.139	1.140	1.140	
	90º	1.102	1.102	1.102	1.106	1.100	1.103	1.103	1.103	1.104	1.104	
3% fibras 0º	Ar (mH)	14.26	14.25	14.27	14.26	14.28	14.27	14.27	14.26	14.26	14.28	14.28
		0º	1.126	1.126	1.123	1.129	1.124	1.125	1.126	1.126	1.126	1.126
	1	90º	1.148	1.147	1.148	1.151	1.146	1.147	1.147	1.147	1.147	1.147
		0º	1.113	1.115	1.114	1.118	1.112	1.115	1.114	1.114	1.114	1.114
	2	90º	1.142	1.142	1.142	1.144	1.140	1.141	1.142	1.142	1.141	1.141
		0º	1.119	1.120	1.118	1.123	1.118	1.120	1.120	1.120	1.120	1.120
	média das zonas	90º	1.145	1.145	1.145	1.147	1.143	1.144	1.144	1.144	1.144	1.144
		0º	14.27	14.26	14.26	14.26	14.27	14.27	14.27	14.26	14.27	14.27
	Ar (mH)	1	1.142	1.144	1.144	1.148	1.146	1.145	1.147	1.147	1.146	1.146
		90º	1.146	1.147	1.147	1.152	1.151	1.150	1.150	1.150	1.150	1.150
2	0º	1.132	1.133	1.132	1.138	1.135	1.133	1.138	1.138	1.135	1.135	
	90º	1.157	1.157	1.158	1.163	1.160	1.159	1.160	1.160	1.160	1.160	
média das zonas	0º	1.137	1.138	1.138	1.143	1.141	1.139	1.142	1.142	1.140	1.140	
	90º	1.152	1.152	1.153	1.157	1.155	1.155	1.155	1.155	1.155	1.155	
3% fibras S/orient	Ar (mH)	14.27	14.26	14.26	14.26	14.27	14.26	14.27	14.26	14.27	14.27	14.27
		0º	1.072	1.073	1.072	1.076	1.075	1.074	1.073	1.073	1.073	1.073
	1	90º	1.052	1.053	1.052	1.057	1.055	1.053	1.053	1.053	1.053	1.053
		0º	1.078	1.076	1.074	1.077	1.078	1.076	1.077	1.077	1.079	1.079
	2	90º	1.055	1.055	1.054	1.060	1.057	1.056	1.055	1.055	1.056	1.056
		0º	1.075	1.074	1.073	1.076	1.077	1.075	1.075	1.075	1.076	1.076
	média das zonas	90º	1.054	1.054	1.053	1.058	1.056	1.055	1.055	1.054	1.054	1.054
		0º	14.27	14.26	14.26	14.26	14.27	14.26	14.27	14.26	14.27	14.27
	Ar (mH)	1	1.019	1.019	1.019	1.019	1.019	1.019	1.019	1.020	1.020	1.020
		90º	1.029	1.029	1.029	1.030	1.029	1.029	1.029	1.029	1.029	1.029
2	0º	1.022	1.022	1.022	1.022	1.022	1.022	1.022	1.022	1.022	1.022	
	90º	1.032	1.033	1.032	1.033	1.033	1.032	1.032	1.032	1.033	1.033	
média das zonas	0º	1.020	1.021	1.021	1.020	1.021	1.021	1.021	1.021	1.021	1.021	
	90º	1.031	1.031	1.031	1.032	1.031	1.031	1.032	1.032	1.031	1.031	

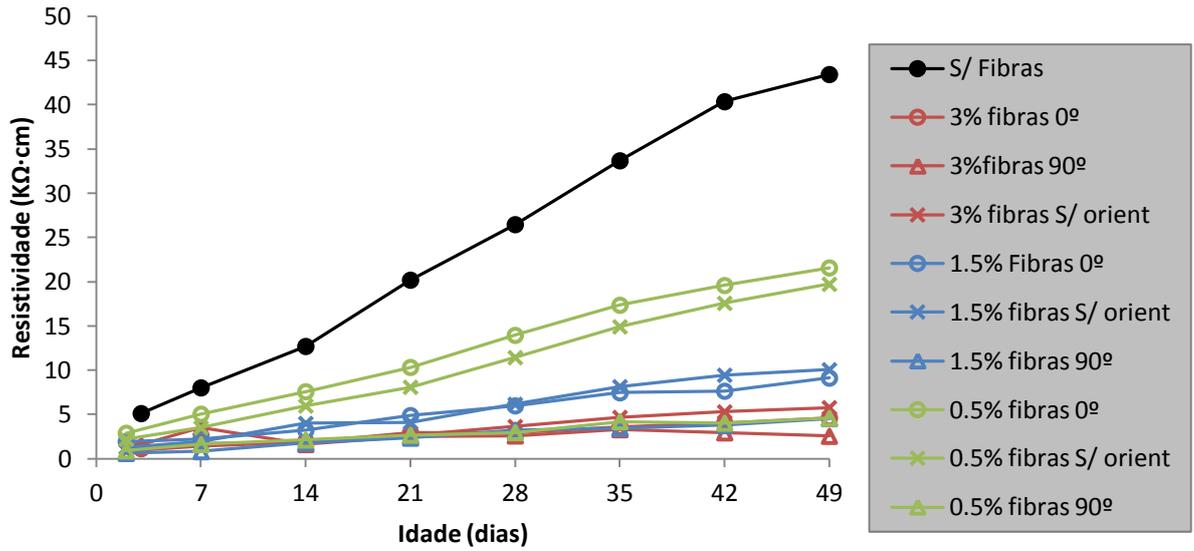
A3. 1 Resultados de Indutância

A4 - TEMPO DE CURA E IDADE DE REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS DESTRUTIVOS

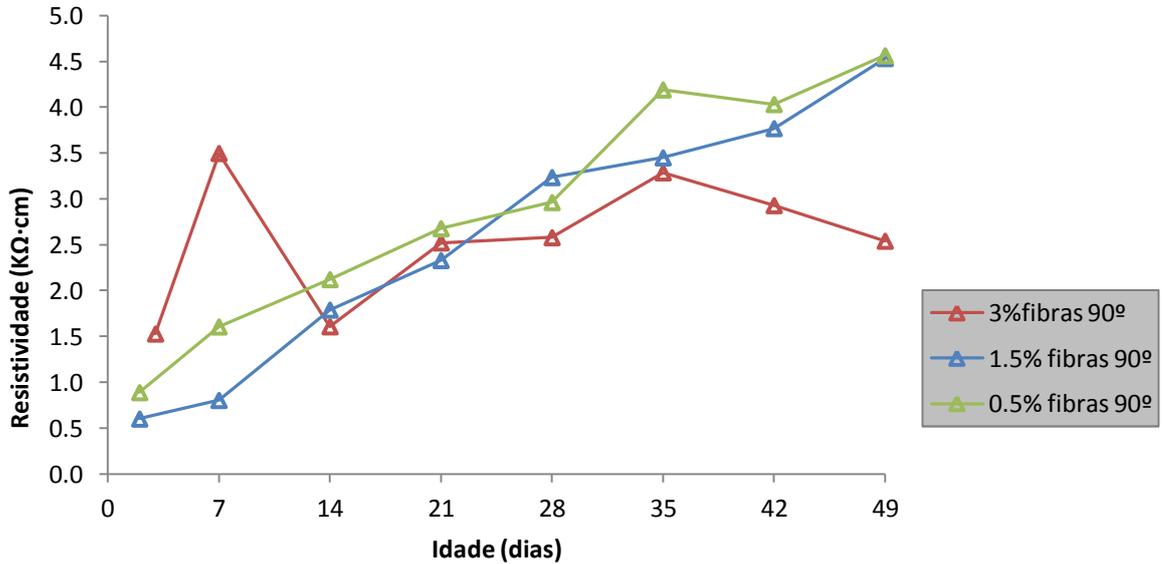
Provetes	Tempo de cura (a 18°C) (dias)	Idade de ensaio (dias)
Placa – S/ Fibras	49	67
Prisma – S/ Fibras	66	66
Placa – 3% Fibras 0°	49	67
Prisma – 3% Fibras 0°	66	66
Placa – 3% Fibras 90°	49	67
Prisma – 3% Fibras 90°	66	66
Placa – 3% Fibras S/ orient	49	69
Prisma – 3% Fibras S/ orient	65	65
Placa – 1.5% Fibras 0°	49	69
Prisma – 1.5% Fibras 0°	65	65
Placa – 1.5% Fibras S/ orient	49	68
Prisma – 1.5% Fibras S/ orient	64	64
Placa – 1.5% Fibras 90°	49	68
Prisma – 1.5% Fibras 90°	64	64
Placa – 0.5% Fibras 0°	49	63
Prisma – 0.5% Fibras 0°	63	63
Placa – 0.5% Fibras S/ orient	49	63
Prisma – 0.5% Fibras S/ orient	63	63
Placa – 0.5% Fibras 90°	49	63
Prisma – 0.5% Fibras 90°	63	63

A4. 1 Tempo de cura e idade da realização do ensaio

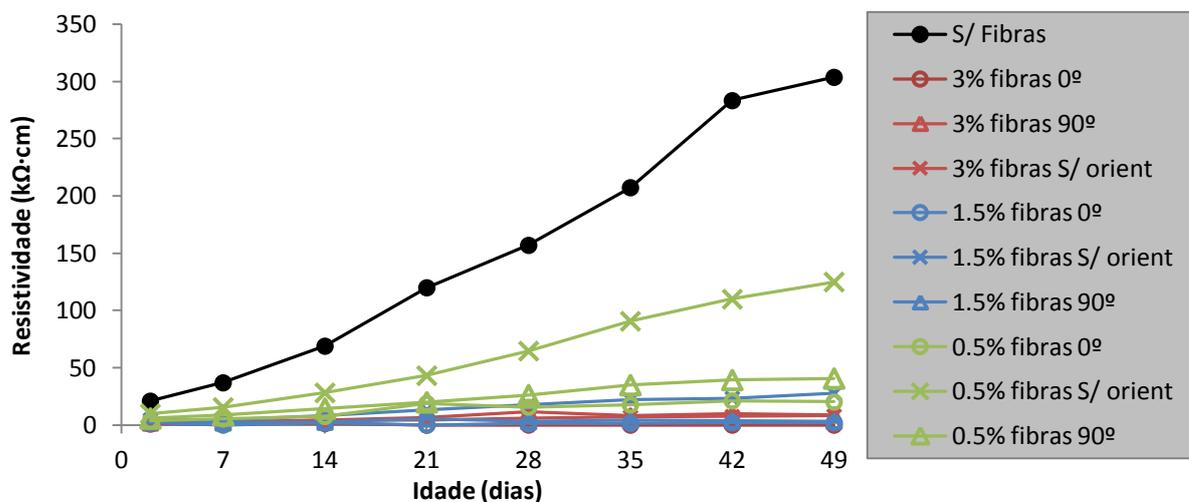
A5 - EVOLUÇÃO COM A IDADE



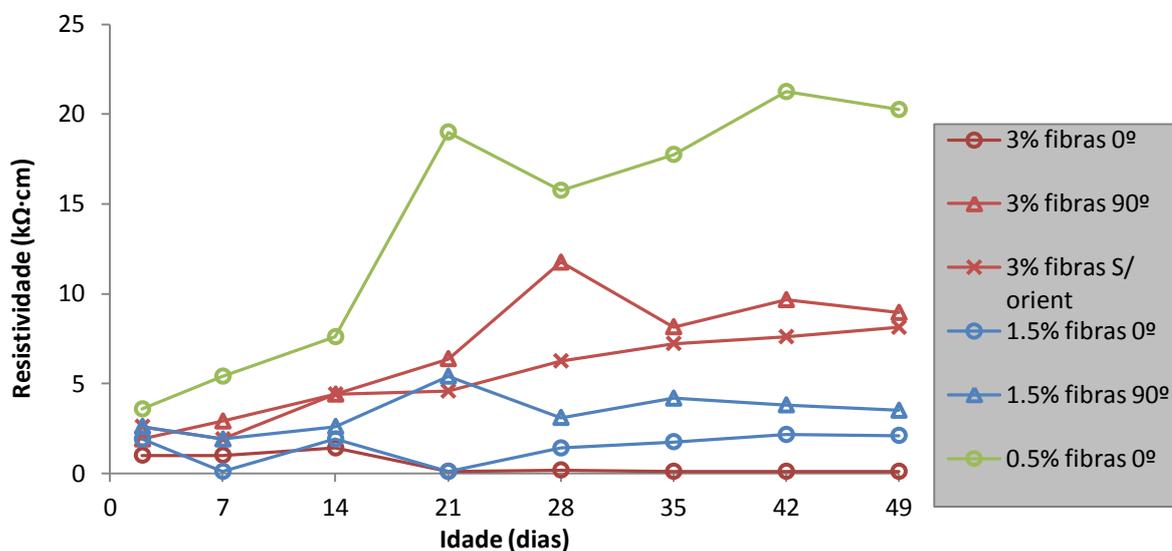
A5. 1 Evolução da resistividade elétrica nas placas com a idade determinada pelo método dos dois elétrodos na direção 90°



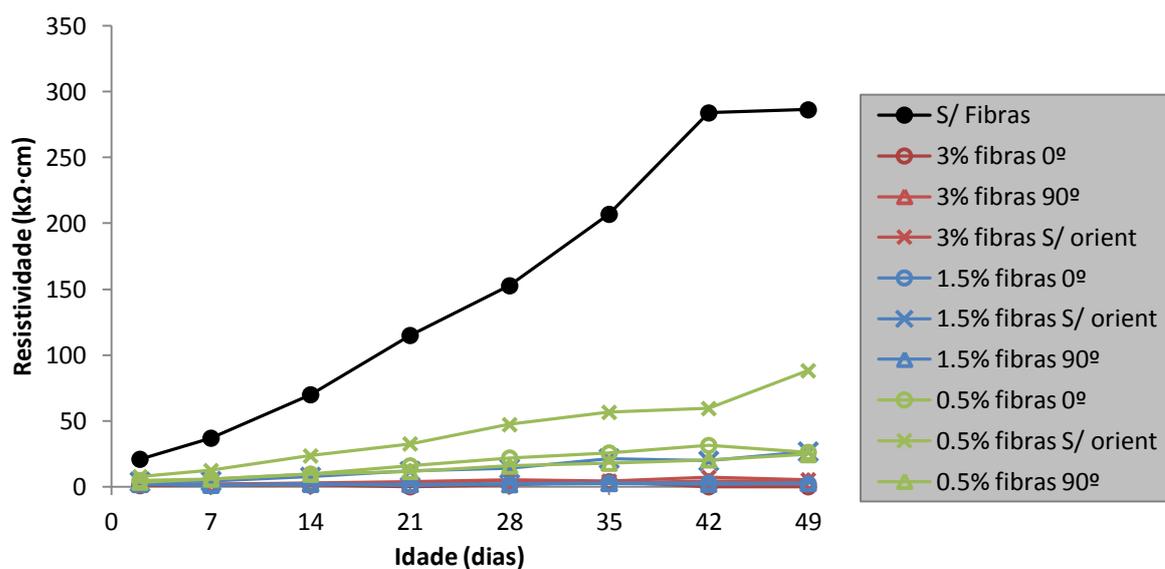
A5. 2 Evolução da resistividade elétrica nas placas com a idade pelo método dos dois elétrodos na direção 90°. Placas com valores de resistividade mais baixos.



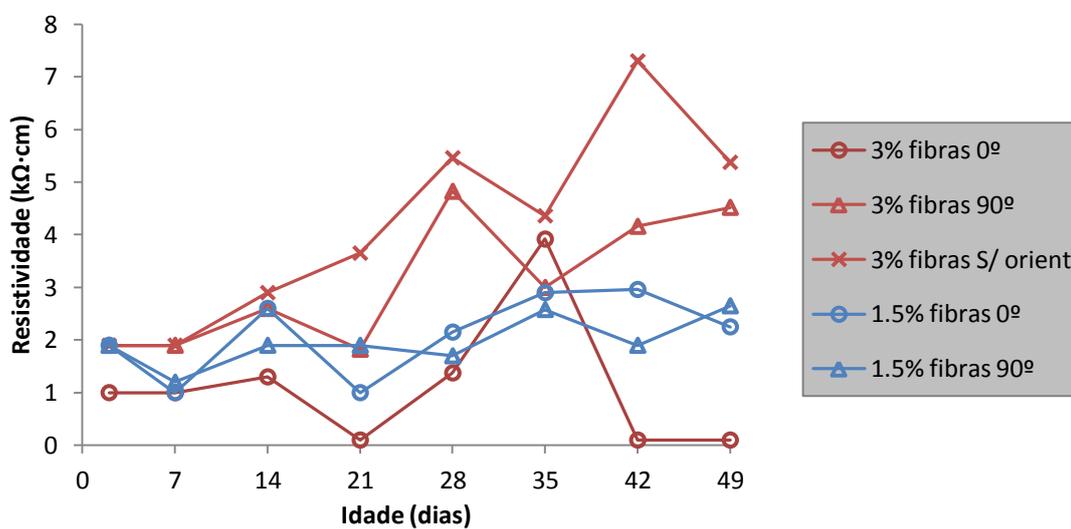
A5. 3 Evolução da resistividade nas placas com a idade. Medições realizadas pelo método dos quatro elétrodos na zona 2 na direção 0°



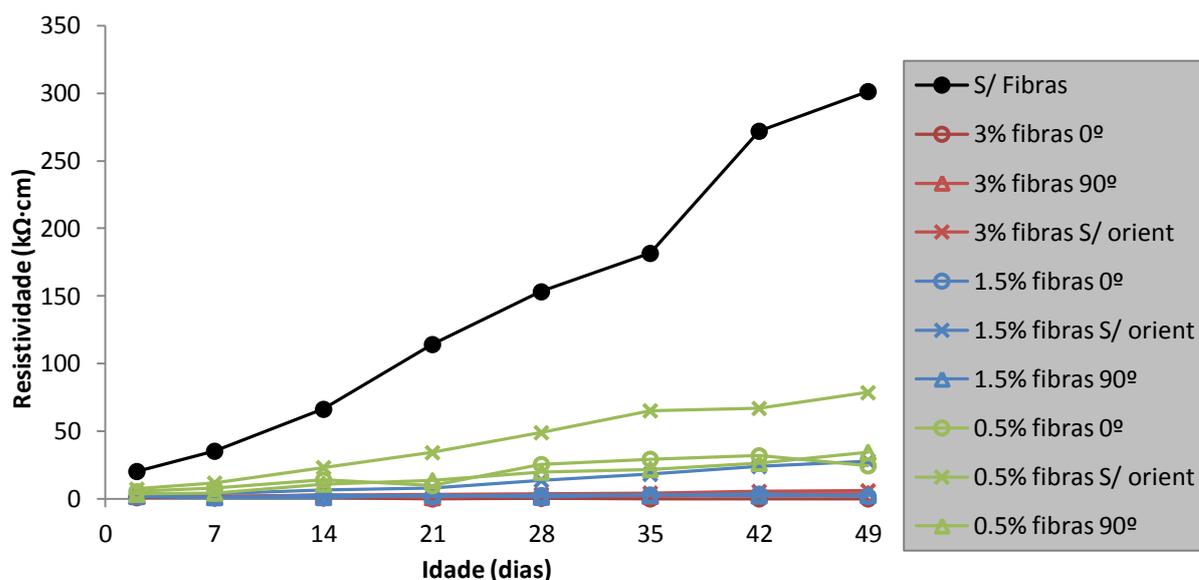
A5. 4 Evolução da resistividade nas placas com a idade determinada pelo método dos quatro elétrodos na zona 2 na direção 0°. Placas com valores de resistividade mais baixos



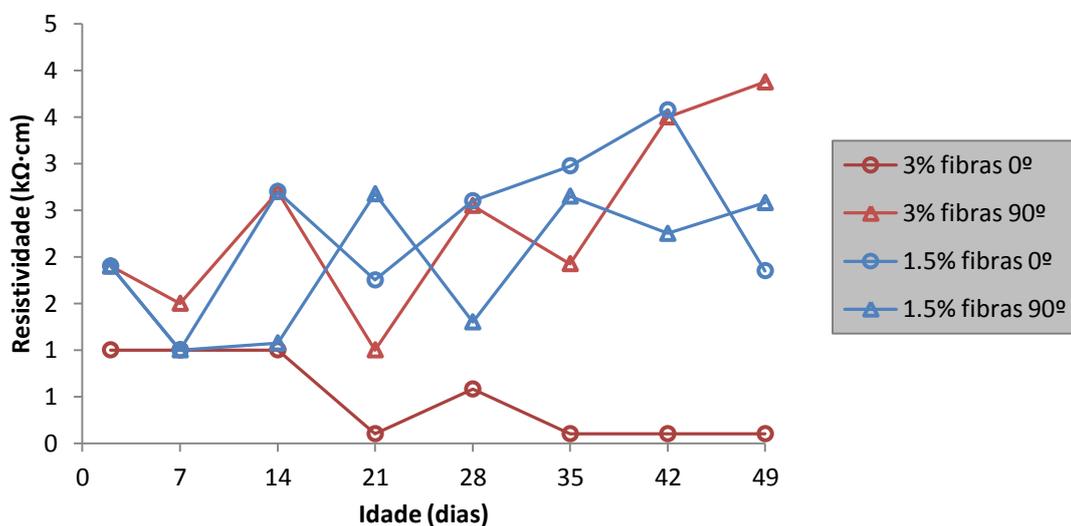
A5. 5 Evolução da resistividade nas placas com a idade. Medições realizadas pelo método dos quatro elétrodos na zona 1 na direção $\approx 85^\circ$



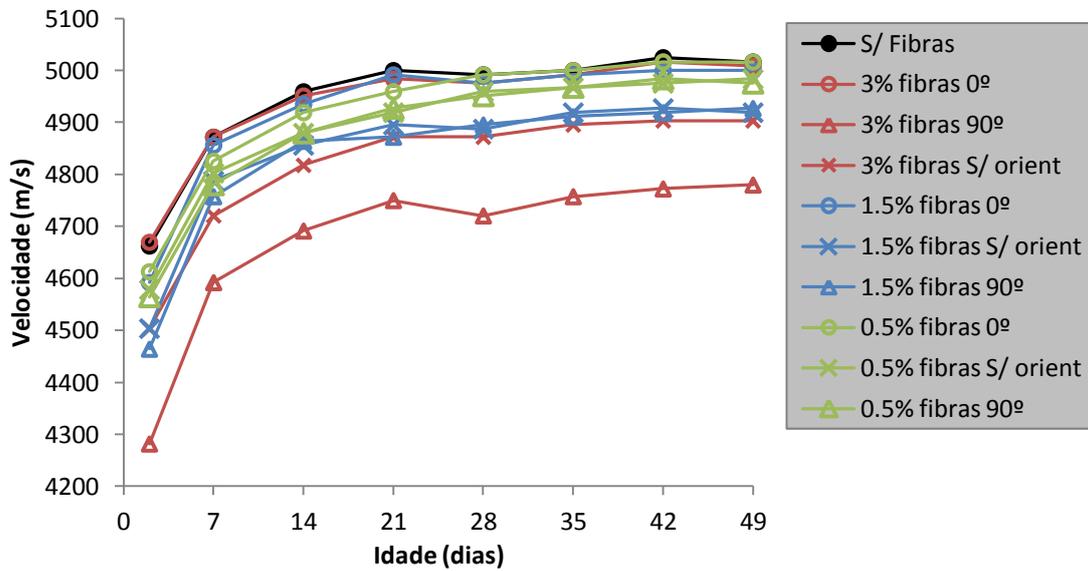
A5. 6 Evolução da resistividade nas placas com a idade determinada pelo método dos quatro elétrodos na zona 1 na direção $\approx 85^\circ$. Placas com valores de resistividade mais baixos



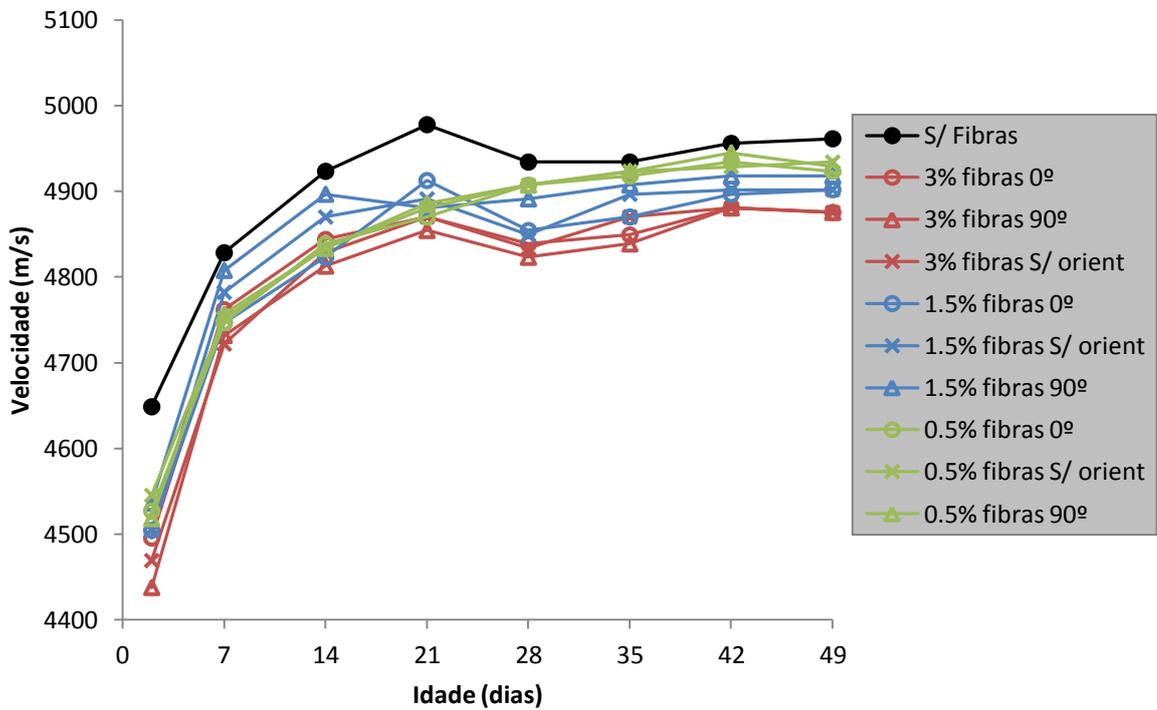
A5. 7 Evolução da resistividade nas placas com a idade. Medição realizada pelo método dos quatro elétrodos na zona 2 na direção $\approx 85^\circ$



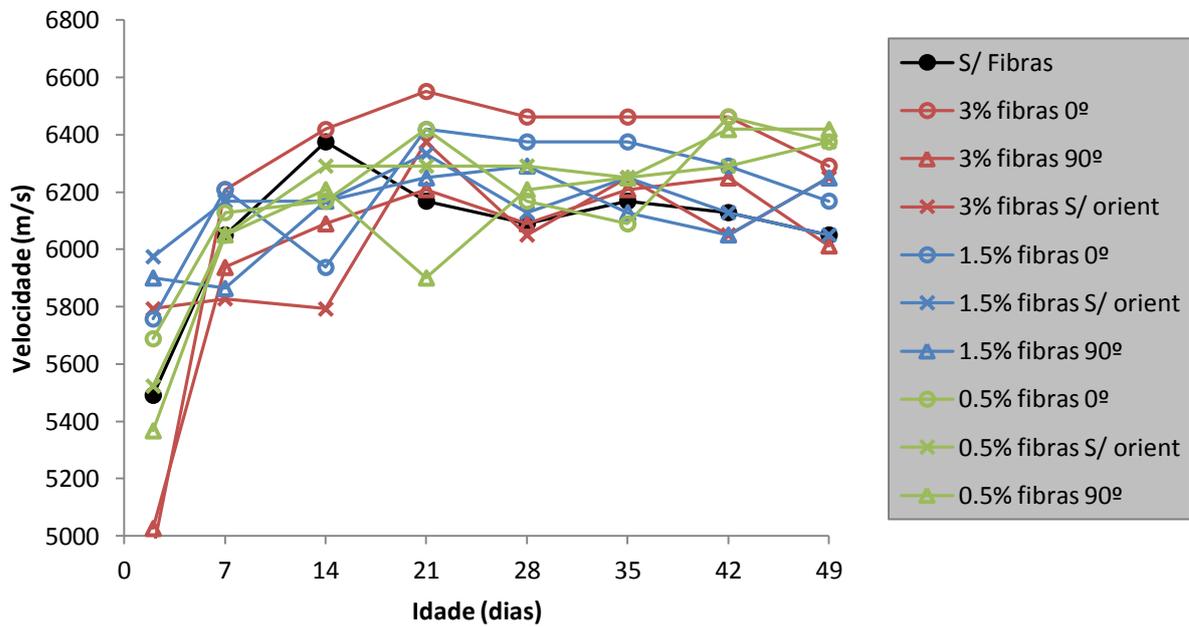
A5. 8 Evolução da resistividade nas placas com a idade determinada pelo método dos quatro elétrodos na zona 2 na direção $\approx 85^\circ$.



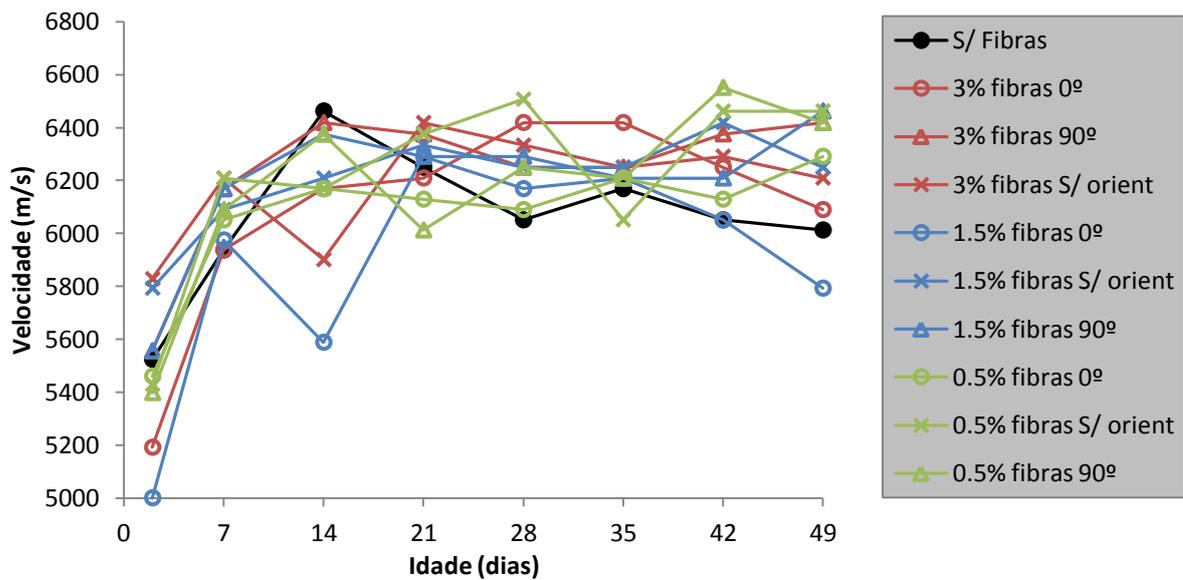
A5. 9 Evolução da velocidade de propagação de ondas ultrassons nas placas com a idade determinada por transmissão direta na direção 0°



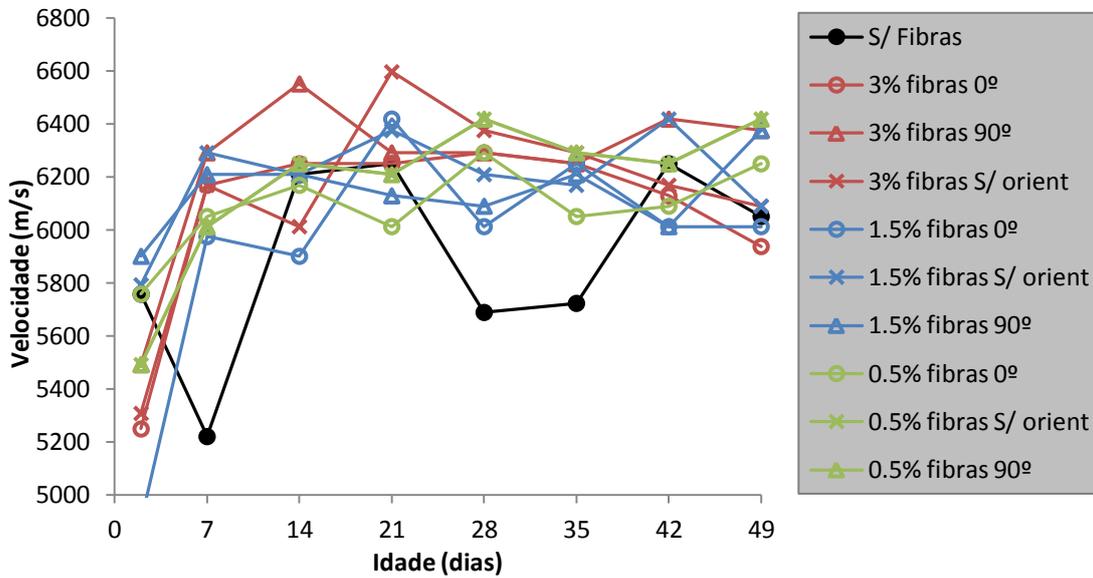
A5. 10 Evolução da velocidade de propagação de ondas ultrassons nas placas com a idade determinada por transmissão direta na direção 90°



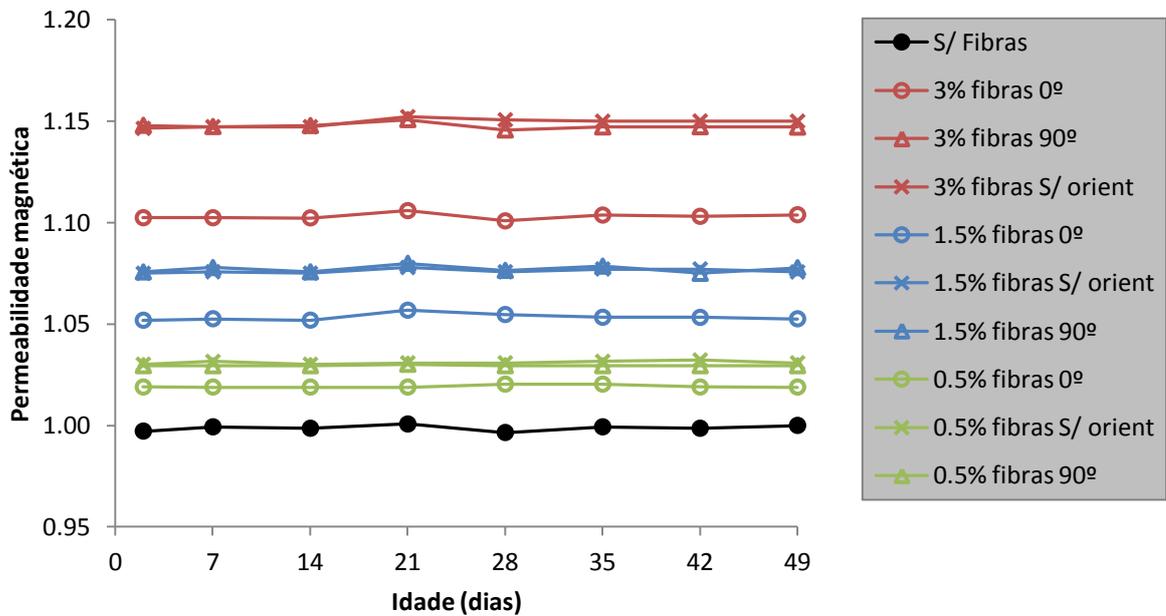
A5. 11 Evolução da velocidade de propagação de ondas ultrassons nas placas com a idade determinada por transmissão indireta com transdutores na posição 12 (direção a 0°)



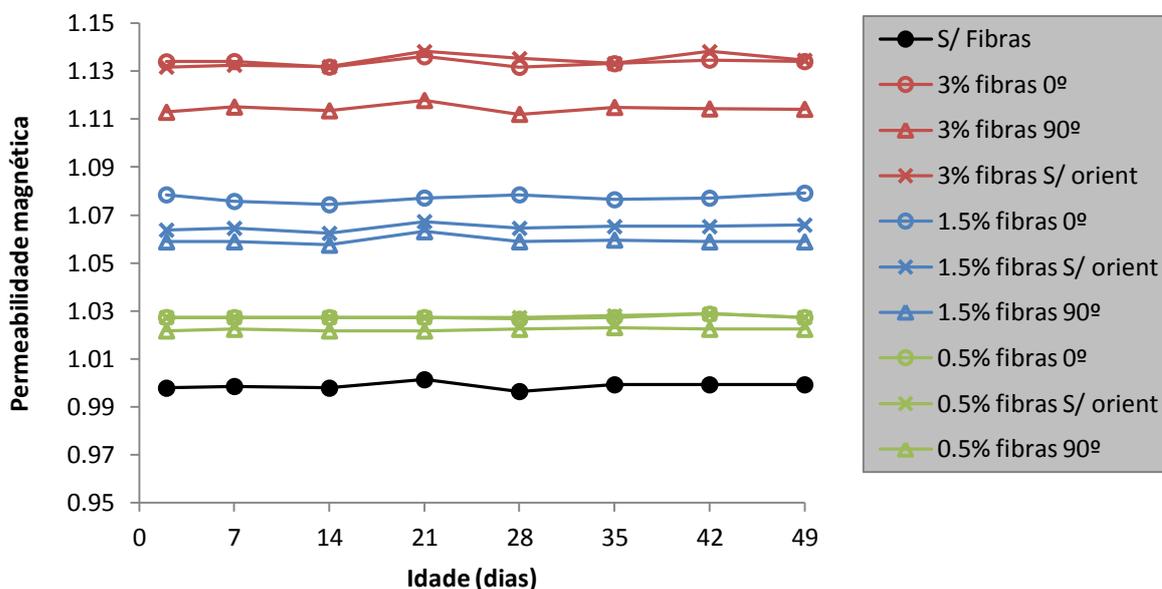
A5. 12 Evolução da velocidade de propagação de ondas ultrassons nas placas com a idade determinada por transmissão indireta com transdutores na posição 11 (direção a 90°)



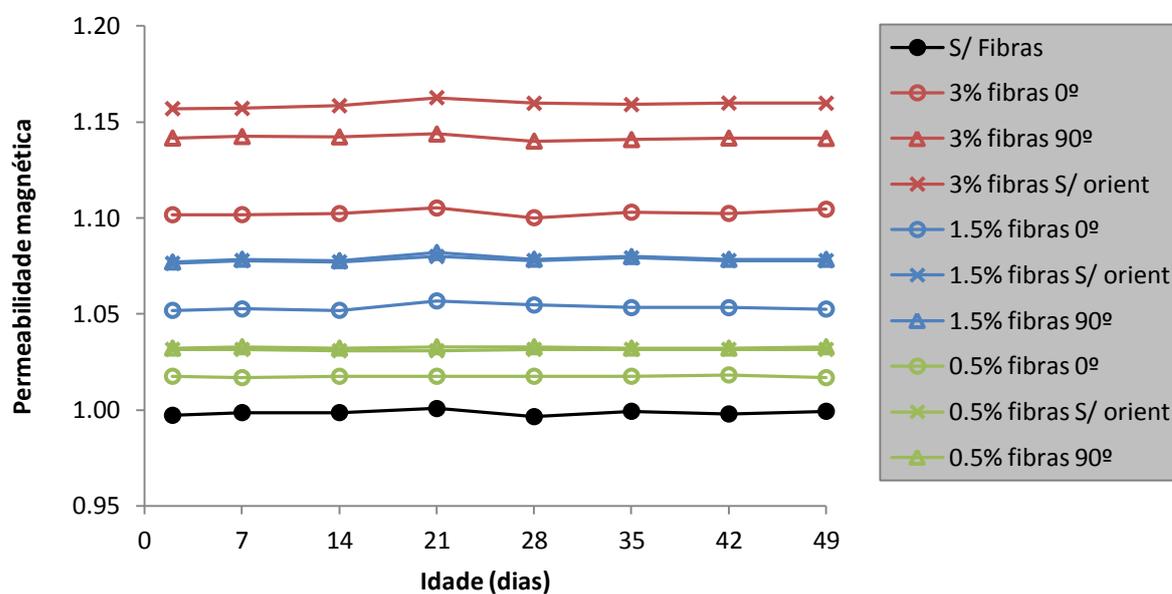
A5. 13 Evolução da velocidade de propagação de ondas ultrassons nas placas com a idade determinada por transmissão indireta com transdutores na posição 13 (direção a 90°)



A5. 14 Evolução da permeabilidade nas placas com a idade na zona 1 na direção 90°

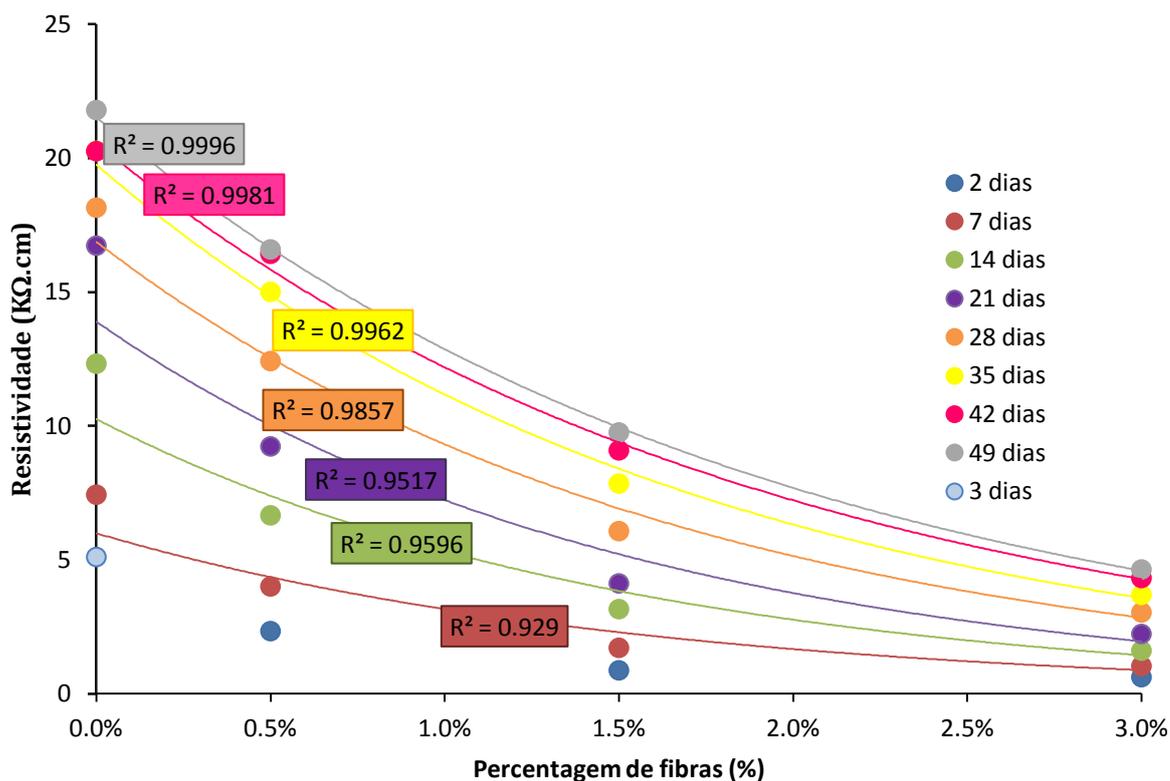


A5. 15 Evolução da permeabilidade nas placas com a idade na zona 2 na direção 0°

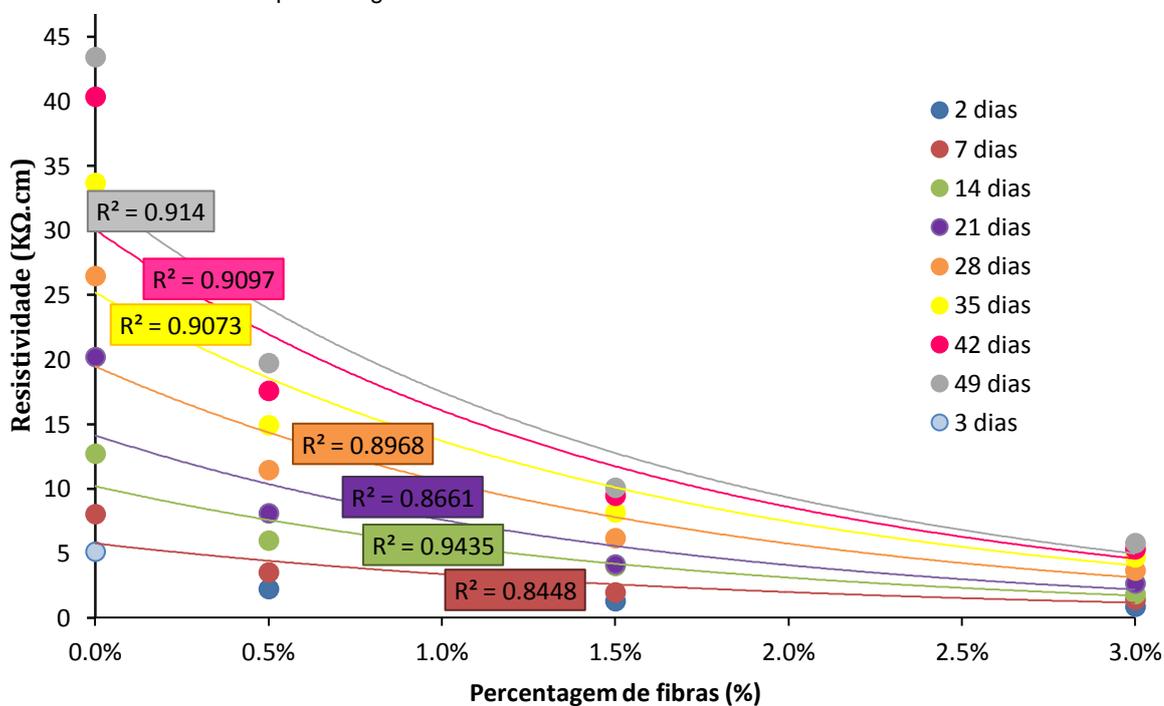


A5. 16 Evolução da permeabilidade nas placas com a idade na zona 2 na direção 90°

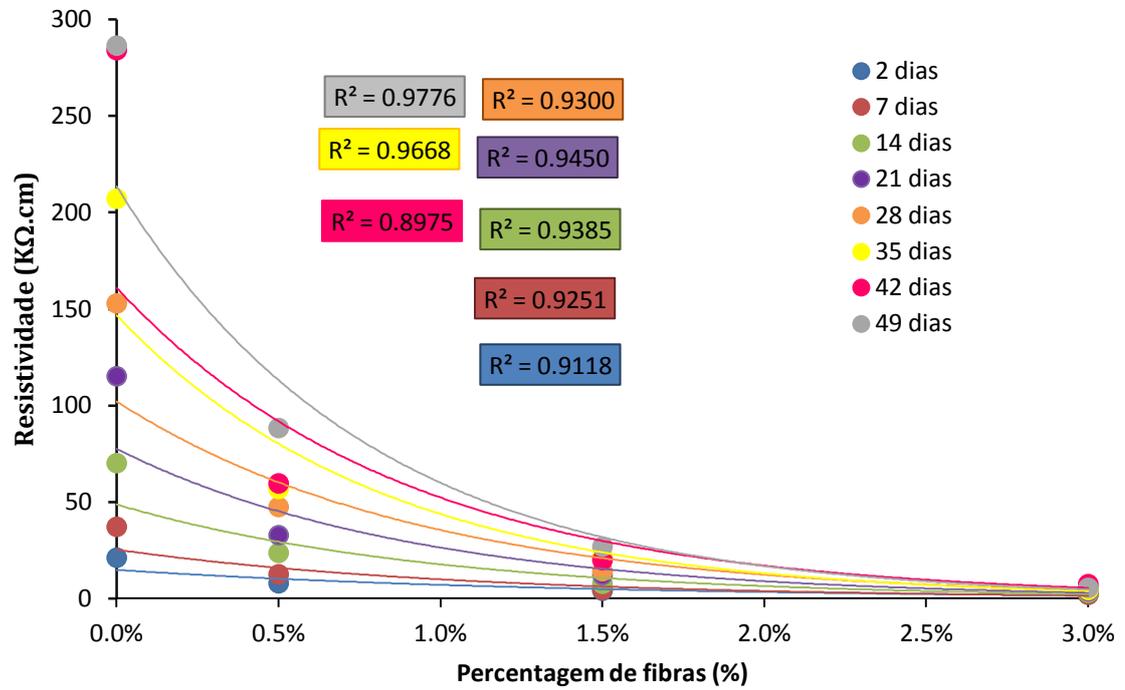
A6 - INFLUÊNCIA DA DOSAGEM DE FIBRAS



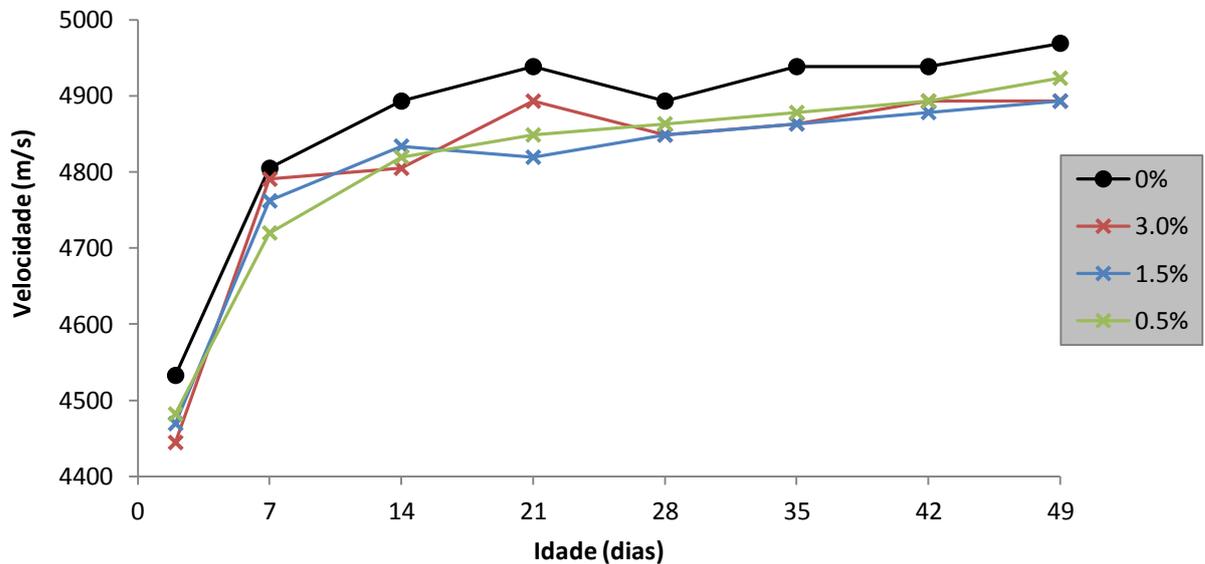
A6. 1 Relação entre a resistividade elétrica medida nas placas (fibras S/ orient) na direção 0° com a percentagem de fibras – Método dos dois elétrodos



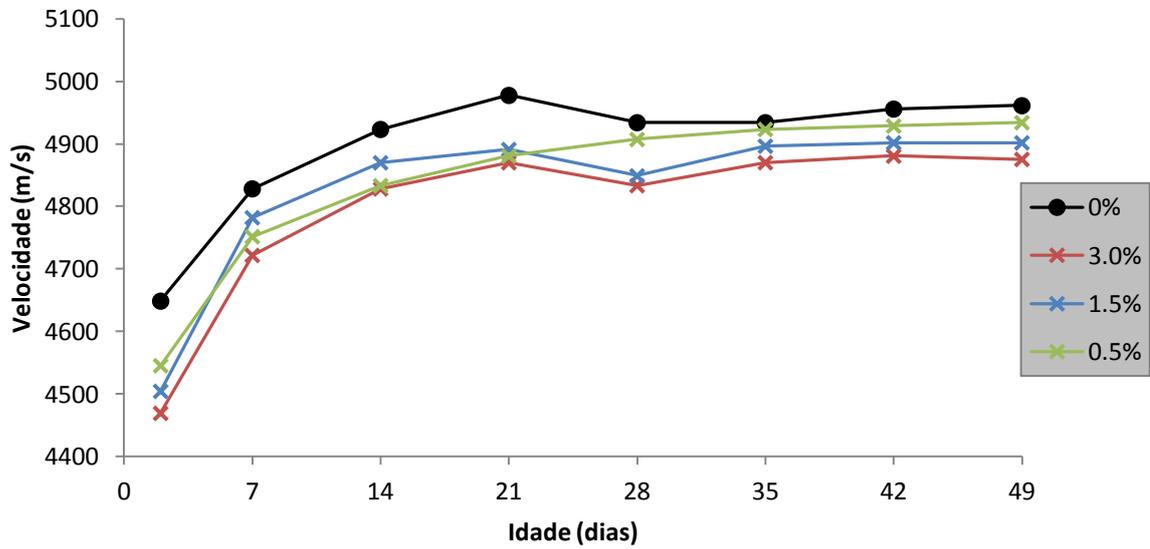
A6. 2 Relação entre a resistividade elétrica medida nas placas (fibras S/ orient) na direção 90° com a percentagem de fibras – Método dos dois elétrodos



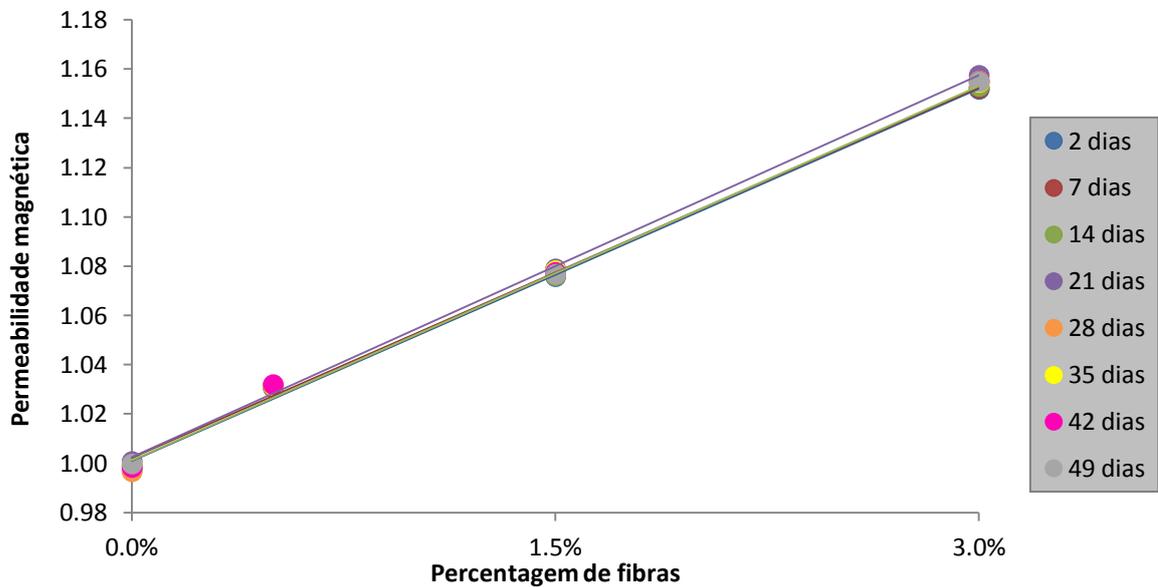
A6. 3 Relação entre a resistividade elétrica medida nas placas (fibras S/ orient) na direção 0° com a percentagem de fibras – Método dos quatro elétrodos



A6. 4 A5. 20 Relação entre a velocidade de propagação dos ultrassons medida nos prismas (fibras S/ orient) com a percentagem de fibras



A6. 5 Relação entre a velocidade de propagação dos ultrassons medida nas placas (fibras S/ orient) na direção 90° com a percentagem de fibras



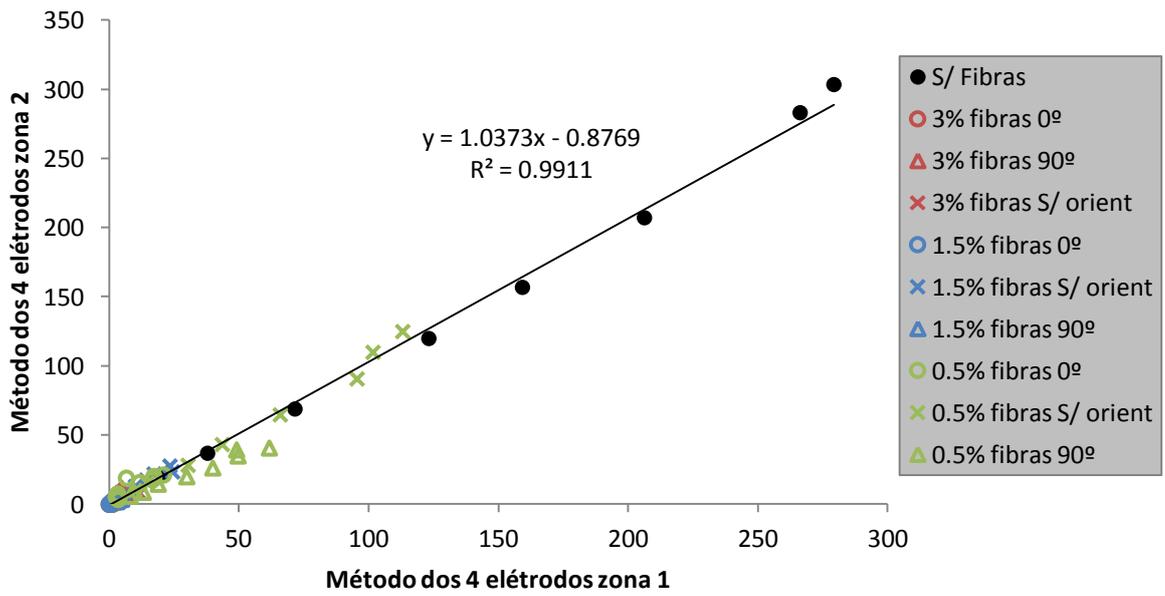
A6. 6 Relação entre a permeabilidade magnética medida a 90° com a percentagem de fibras

A7 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DEWST

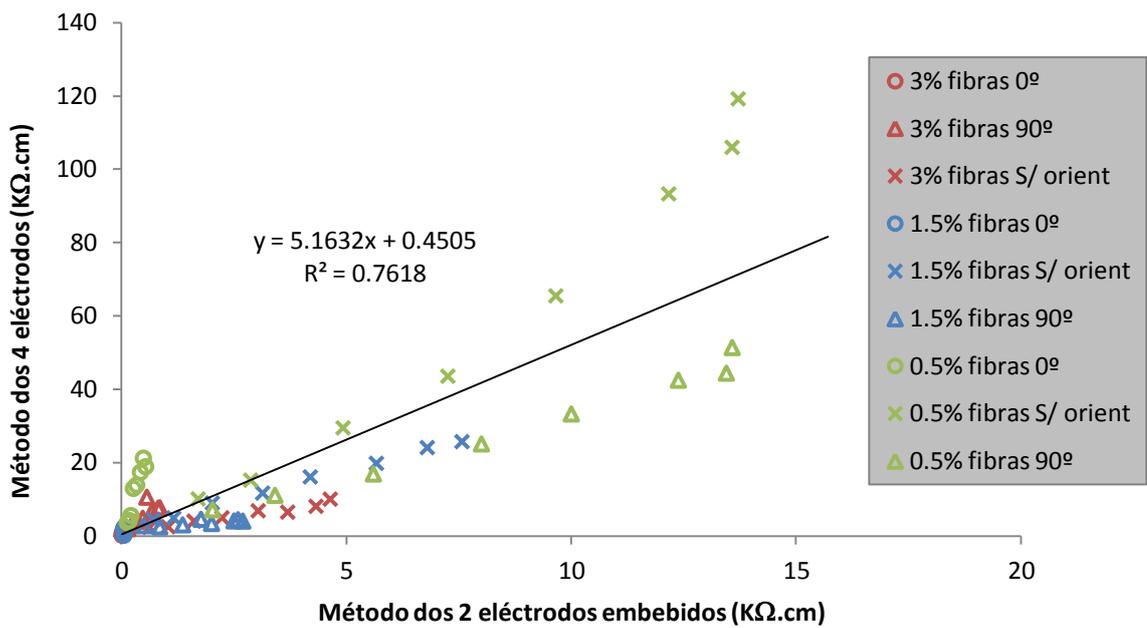
		Comprimento crítico (mm)	Espessura (mm)	Força de pico (kN)	Tensão de tração máxima (MPa)
S/ Fibras	1	106.85	24.07	6.823	2.361
	2	110.02	25.23	5.390	1.728
3% fibras 0°	1	107.27	24.05	51.545	17.786
	2	107.90	24.19	55.456	18.908
3% fibras 90°	1	106.86	24.51	13.115	4.456
	2	107.60	24.25	12.292	4.193
3% fibras S/ orient	1	106.92	24.23	23.955	8.229
	2	107.46	25.09	21.433	7.075
1.5% fibras 0°	1	107.59	24.87	34.365	11.430
	2	107.54	24.90	32.391	10.766
1.5% fibras S/ orient	1	107.57	24.87	14.255	4.743
	2	106.65	23.83	14.844	5.198
1.5% fibras 90°	1	107.19	25.24	7.985	2.626
	2	107.08	24.52	6.246	2.118
0.5% fibras 0°	1	106.61	25.18	13.006	2.067
	2	106.86	24.02	11.459	2.117
0.5% fibras S/ orient	1	107.05	24.92	5.593	1.866
	2	106.28	24.62	4.770	1.623
0.5% fibras 90°	1	107.14	25.42	6.414	2.096
	2	105.17	24.90	4.505	1.531

A7. 1 Resultados dos ensaios DEWST e dimensões necessárias para o cálculo da tensão de tração máxima

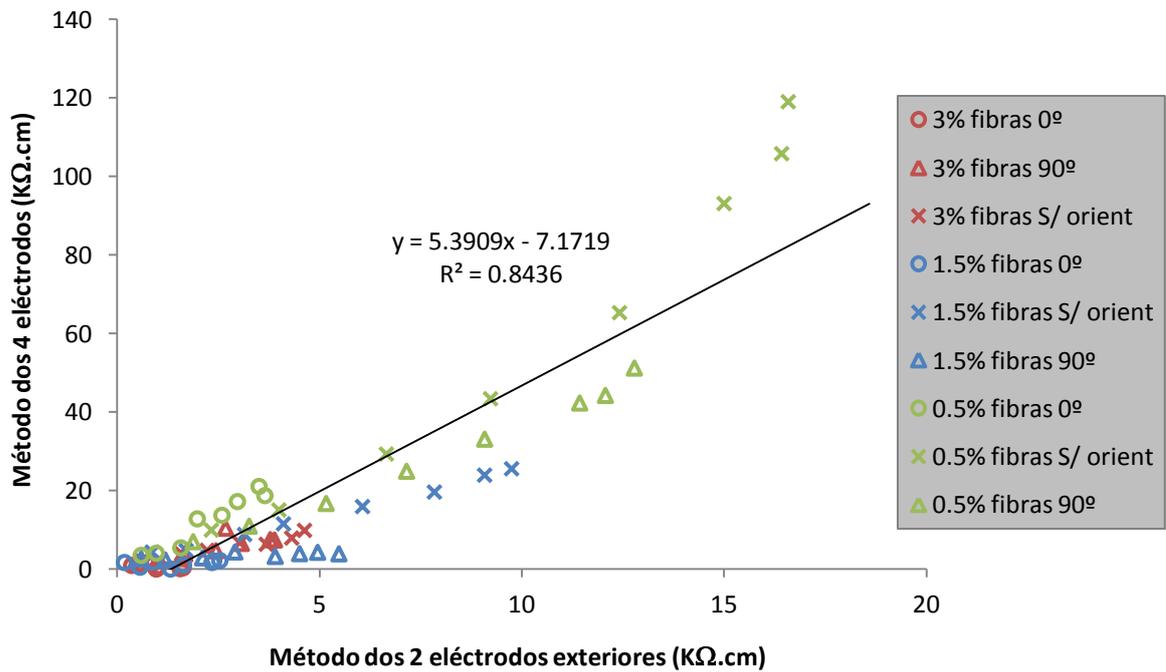
A8 - CORRELAÇÕES



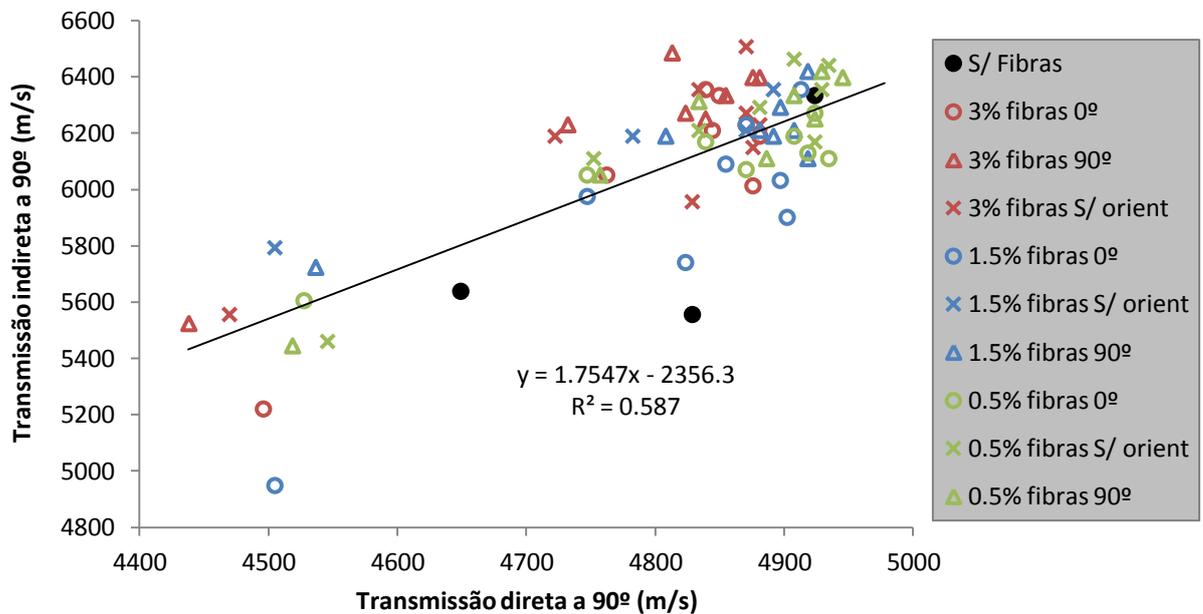
A8. 1 Correlação entre o método dos quatro eléctrodos na zona 1 e a zona 2



A8. 2 Correlação entre o método dos dois eléctrodos embecidos e o método dos quatro eléctrodos na direção 0°



A8. 3 Correlação entre o método dos dois eléctrodos exteriores e o método dos quatro eléctrodos na direcção 0°



A8. 4 Correlação entre o método por transmissão direta e o método por transmissão indireta para a direcção 90°