



Luís Carlos Martins Guerreiro Machado

CARACTERIZAÇÃO DE CALDA REFORÇADA COM FIBRAS UNIDIRECCIONAIS

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil – Perfil Estruturas

Orientador: Válder José da Guia Lúcio, Professor
Associado, FCT/UNL

Co-orientadora: Ana Rita Faria Conceição de Sousa Gião
Gamito Reis, Professora Assistente, ISEL

Júri:

Presidente: Prof.^a Doutora Ildi Cismasiu
Arguente: Prof. Doutor Fernando Farinha da Silva Pinho
Vogais: Prof. Doutor Válder José da Guia Lúcio
Prof.^a Doutora Ana Rita F. C. de Sousa Gião G. Reis



**FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA**

Maio de 2013

CARACTERIZAÇÃO DE CALDA REFORÇADA COM FIBRAS UNIDIRECCIONAIS

“Copyright”

Luís Carlos Martins Guerreiro Machado, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou de qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

A todas as pessoas que colaboraram para a realização deste trabalho, em especial ao Prof. Válder Lúcio, meu orientador científico, que muito me ajudou através do seu vasto conhecimento, contribuindo com opiniões sempre sábias e oportunas.

Especial destaque, no desenvolvimento desta dissertação, teve também a Prof.^a Ana Gião G. Reis, minha co-orientadora científica. Agradeço-lhe bastante por todo o tempo que disponibilizou, conhecimento que me transmitiu e pela sua valiosa ajuda na realização dos ensaios experimentais, na organização e melhoramento de textos. Agradeço-lhe também pelos estudos que tem vindo a fazer, sem o seu contributo este trabalho não teria sido realizado.

Ao Sr. José Gaspar e Sr. Jorge Silvério, pela amizade e pela colaboração nos trabalhos laboratoriais necessários à realização desta dissertação, o vosso trabalho deve ser bem reconhecido pois assim o merecem.

À Empresa Favir por nos ter disponibilizado as fibras necessárias aos estudos realizados.

À Empresa Secil e ao Eng. Vitor Vermelhudo por nos terem dispensado o cimento necessário à execução dos trabalhos laboratoriais.

À Faculdade de Ciências e Tecnologia, que ao longo dos últimos anos me disponibilizou os meios pedagógicos e físicos, contribuindo para a minha formação.

A toda a minha família pela confiança que sempre tiveram em mim. Em especial aos meus pais, Fernando Machado e Maria de Fátima Machado, que têm dedicado as suas vidas aos meus três irmãos, à minha irmã e a mim, incentivando a nossa formação pessoal e profissional. Merecem, por isso e por tudo o que vai para além do que consigo expressar, o mais profundo agradecimento.

À minha namorada, Raquel Coelho, por todo o apoio e incentivo ao longo dos últimos anos.

A todos os meus amigos, pelos valores, conhecimentos e vivências que me têm proporcionado. Deixo um especial agradecimento aos que colaboraram directamente no desenvolvimento deste trabalho, com sugestões e com o auxílio prestado nos trabalhos laboratoriais.

Resumo

Num estudo recente foi desenvolvida uma Calda Reforçada com Fibras Unidireccionais (CRFU), com o principal intuito de reforçar vigas e pilares (por encamisamento de elevado desempenho sísmico), revelando resultados interessantes (Gião, 2012). Este compósito diverge face aos outros, desenvolvidos até então, por ser reforçado com uma manta não-tecida de fibras de aço contínuas e unidireccionais.

Este trabalho incide na caracterização mecânica deste material, para volumes de fibras até 3% e idades de cura diferentes. Para o efeito realizaram-se 23 ensaios de tracção por compressão diametral a provetes cúbicos e 38 ensaios de compressão e determinação do módulo de elasticidade a provetes tubulares de secção circular. Deste modo, conseguiram-se obter dados relevantes, contribuindo para a definição das características da CRFU, determinando a influência dos vários volumes de fibras e diferentes idades de cura nas características e comportamento deste material.

Posteriormente, efectuou-se uma análise elástica do estado de tensão dos provetes no instante da rotura. Para isso, recorreu-se ao programa de cálculo automático SAP 2000, que permitiu interpretar os modos de rotura expectáveis e retirar alguma informação útil à caracterização do material. Com essa informação, com os resultados obtidos experimentalmente e admitindo o critério de rotura de Mohr-Coulomb, foi possível determinar as resistências à compressão uniaxial aproximadas dos compósitos ensaiados.

Na campanha experimental desenvolvida, concluiu-se que o aumento do volume de fibras conduz ao acréscimo da taxa de vazios. Este facto leva a uma diminuição da resistência à compressão e do módulo de elasticidade do compósito. Na resistência à tracção, revelou-se que a eficácia dum volume de fibras de 2% é superior à dos 3% e observa-se ainda que, a taxa de vazios não a influencia significativamente. Com o aumento da idade de cura, as características mecânicas da calda tendem a melhorar. Contudo, a tensão de rotura à tracção da CRFU não foi influenciada com a idade, evidenciando-se que a resistência das fibras é preponderante na resistência à tracção do compósito.

Palavras Chave

Compósito Cimentício, Fibras Unidireccionais, Calda Reforçada, Caracterização Mecânica

Abstract

In a recent study, an Unidirectional Fiber Reinforced Grout (UFRG) was developed with the main aim of strengthening beams and columns (through high seismic performance jacketing), revealing interesting results (Gião, 2012). This composite diverges from others already developed, due to the fact that it is reinforced with a nonwoven fiber mat of unidirectional and continuous steel fibers.

This paper focuses on the mechanical characterization of this material, to volumes up to 3% of fibers and different curing times. For this purpose 23 splitting tensile tests to cubic specimens and 38 compression and determination tests of the modulus of elasticity to tubular specimens with circular sections were held. Thereby, relevant data were achieved, contributing to the definition of UFRG characteristics and determining the influence of the different fiber amounts and curing times on this material characteristics and behavior.

Subsequently, an elastic analysis of the stress state of the specimens at the time of rupture was made. This was made using the automatic calculation program SAP 2000, which enabled to interpret the expected failure modes and withdraw some useful information to characterize the material. With this information, with the results obtained experimentally and assuming the Mohr-Coulomb failure criterion, it was possible to determine the approximate uniaxial compressive strength of the tested composites.

Throughout this experimental campaign, it was concluded that the increase of fiber volume leads to the increase of void rate. This fact leads to a decrease of the compressive strength and of the modulus of elasticity of the composite. In that tensile strength is concerned, it was revealed that the efficacy of a 2% fiber volume is greater than a 3% and it can be observed that the void rate doesn't influence it significantly. With the increasing of the curing time, the mechanical characteristics of the grout tend to improve. However, the tensile strength of the UFRG was not influenced by age, revealing that the strength of fibers is preponderant in the tensile strength of the composite.

Keywords

Cement Composite, Unidirectional Fibers, Reinforced Slurry, Mechanical Characterization

Índice de texto

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
PALAVRAS CHAVE	III
ABSTRACT	V
KEYWORDS	V
ÍNDICE DE MATÉRIAS	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABELAS	XIII
SIMBOLOGIA	XV

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 ASPECTOS GERAIS	1
1.2 OBJECTIVOS	4
1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	5

CAPÍTULO 2 – COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS DE ELEVADO DESEMPENHO

2.1 ASPECTOS GERAIS	7
2.2 BETÕES DE ELEVADO DESEMPENHO (BED) E BETÕES DE ULTRA ELEVADO DESEMPENHO (BUED)	8
2.3 COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS REFORÇADOS COM FIBRAS (CCRF)	11
2.3.1 Betão Reforçado com Fibras (BRF) ou <i>Fiber Reinforced Concrete</i> (FRC).....	14
2.3.2 Betão de Elevado Desempenho Reforçado Com Fibras (BEDRF) ou <i>High Performance Fiber Reinforced Concrete</i> (HPFRC)	15
2.3.2.1 <i>Compact Reinforced Composite</i> (CRC).....	15
2.3.2.2 <i>Slurry Infiltrated Fiber Concrete</i> (SIFCON)	16
2.3.2.3 <i>Slurry Infiltrated Mat Concrete</i> (SIMCON).....	18
2.3.2.4 <i>Ductil Concrete</i> (DUCON)	20
2.3.2.5 <i>Textile-Reinforced Mortar</i> (TRM)	23
2.3.2.6 Calda de Cimento Reforçada com Fibras Unidireccionais (CRFU)	24

CAPÍTULO 3 – MATERIAIS UTILIZADOS E CAMPANHA EXPERIMENTAL DE CARACTERIZAÇÃO DA CRFU

3.1	DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS.....	43
3.1.1	Calda de cimento.....	43
3.1.1.1	CEM I 42,5R.....	44
3.1.1.2	Aditivos e adjuvantes.....	46
3.1.2	Fibras de aço.....	50
3.1.2.1	Dimensões das fibras.....	50
3.2	DEFINIÇÃO DA CAMPANHA DE ENSAIOS.....	52
3.3	PRODUÇÃO DOS PROVETES EXPERIMENTAIS.....	54
3.4	DEFINIÇÃO DO SISTEMA DE ENSAIO E INSTRUMENTAÇÃO.....	60
3.5	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	64
3.5.1	Caracterização mecânica da calda cimentícia.....	64
3.5.2	Resultados experimentais de caracterização mecânica da CRFU.....	69
3.5.2.1	Ensaio de tracção por compressão diametral.....	69
3.5.2.1	Ensaio de determinação do módulo de elasticidade.....	73
3.5.2.2	Ensaio de compressão.....	74

CAPÍTULO 4 – MODELAÇÃO COMPUTACIONAL EM SAP 2000

4.1	ASPECTOS GERAIS.....	85
4.2	MODELAÇÃO DO ENSAIO DE TRACÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL EM PROVETES CÚBICOS.....	86
4.3	MODELAÇÃO DO ENSAIO DE COMPRESSÃO EM PROVETES TUBULARES.....	91
4.3.1	Determinação da tensão de rotura por compressão simples admitindo o critério de Mohr- Coulomb.....	94

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

5.1	CONCLUSÕES.....	101
5.2	DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	105

REFERÊNCIAS	107
--------------------------	-----

Índice de figuras

Figura 2.1 - Exemplos de fibras de aço utilizadas em compósitos cimentícios	12
Figura 2.2 - Exemplos de fibras de vidro e de polipropileno	12
Figura 2.3 - Comportamento dos FRC à tracção.....	13
Figura 2.4 - Comportamento dos HPFRCC à tracção	13
Figura 2.5 - Produção de SIFCON	17
Figura 2.6 - Manta de fibras não-tecida (SIMCON)	18
Figura 2.7 - Pormenor de infiltração de calda na micro-malha.....	21
Figura 2.8 - Diagrama tensão-deformação para três ajustamentos diferentes de DUCON, A, B e C, em comparação com betão convencional e o típico FRC	22
Figura 2.9 - Reforço de pilar, em estrutura existente, para protecção sísmica.....	22
Figura 2.10 - Encamisamento de pilar com TRM	23
Figura 2.11 – Influência da dosagem de SP na resistência à compressão da calda.....	28
Figura 2.12 - Influência da dosagem de SF na resistência à compressão da calda	29
Figura 2.13 – Curvas granulométricas da SF e do CEMI 42,5R.....	29
Figura 2.14 – Ensaio de tracção por compressão - Modo de rotura da calda.....	31
Figura 2.15 - Ensaio de tracção por compressão - Modo de rotura da CRFU.....	31
Figura 2.16 - Ensaio de compressão - Modo de rotura da CRFU.....	32
Figura 2.17 - Pormenorização da armadura da viga de referência.....	34
Figura 2.18 - Secções transversais dos modelos experimentais	35
Figura 2.19 - Esquema do sistema de ensaio de flexão.....	36
Figura 2.20 - Gráfico força-deslocamento dos modelos experimentais	36
Figura 2.21 - Geometria do modelo experimental	39
Figura 2.22 - Geometria do modelo reforçado com CRFU e pré-esforço (VPEE)	40
Figura 2.23 - Esquema de ensaio - Sistema de aplicação do pré-esforço.....	40
Figura 2.24 - Modo de rotura dos modelos - Alçado lateral e Alçado frontal da zona crítica	41

Figura 3.1 - Instrumentação utilizada nos ensaios a provetes 160x40x40 de CEM I 42,5R	45
Figura 3.2 – Granulometria de 3 tipos de sílica de fumo	48
Figura 3.3 – Diâmetros equivalentes correspondentes a cada uma das 100 fibras de aço medidas .	51
Figura 3.4 - Análise percentual dos diâmetros equivalentes de fibras	51
Figura 3.5 - Preparação da calda de cimento.....	54
Figura 3.6 – Produção de provetes cúbicos de CRFU.....	55
Figura 3.7 - Execução dos provetes tubulares de secção circular	57
Figura 3.8 – Esquema de ensaio de tracção por compressão diametral.....	60
Figura 3.9 - Prensa Form+Test/Seidner modelo 3000D.....	61
Figura 3.10 - Procedimento de ensaio para determinação do módulo de elasticidade	62
Figura 3.11 - Instrumentação utilizada para determinação do módulo de elasticidade.....	63
Figura 3.12 - Modo de rotura dos provetes de calda sujeitos ao ensaio de compressão diametral ..	65
Figura 3.13 - Rotura de provetes de calda, com 28 dias de cura, ensaiados à compressão	67
Figura 3.14 – Diagrama tensão-deslocamento do ensaio de compressão em provetes de calda de cimento com 28 dias de cura	67
Figura 3.15 - Rotura prematura de provetes de calda ensaiados à compressão aos 365 dias	68
Figura 3.16 - Diagrama tensão-deslocamento do ensaio de compressão em provetes de calda de cimento com 365 dias de cura	68
Figura 3.17 - Modo de rotura de provetes com 2% vol de fibras por compressão diametral aos 28 dias de cura.....	71
Figura 3.18 - Rotura por tracção das fibras em provetes com 3% vol. de fibras ensaiados à compressão diametral aos 28 dias de cura.....	71
Figura 3.19 - Rotura por tracção da calda em provetes com 3% vol. de fibras ensaiados à compressão diametral aos 28 dias de cura.....	71
Figura 3.20 - Rotura combinada (por tracção das fibras e por tracção da calda) em provetes com 3% vol. de fibras ensaiados à compressão diametral aos 28 dias de cura	72
Figura 3.21 - Rotura de provetes com 3% vol. de fibras ensaiados aos 315 dias à compressão diametral.....	72
Figura 3.22-Modo de rotura de provetes tubulares com 1% vol. de fibras ensaiados à compressão	75

Figura 3.23 - Diagrama tensão-deslocamento do ensaio de compressão em provetes de CRFU com 1% vol. de fibras e 28 dias de cura.....	75
Figura 3.24- Modo de rotura de provetes tubulares com 2% vol. de fibras ensaiados à compressão	76
Figura 3.25 - Diagrama tensão-deslocamento do ensaio de compressão em provetes de CRFU com 2% vol. de fibras e 28 dias de cura.....	76
Figura 3.26 - Modo de rotura de provetes tubulares com 2,5% vol. de fibras ensaiados à compressão.....	77
Figura 3.27 - Diagrama tensão-deslocamento do ensaio de compressão em provetes de CRFU com 2,5% vol. de fibras e 28 dias de cura.....	77
Figura 3.28- Modo de rotura de provetes tubulares com 3% vol. de fibras ensaiados à compressão	78
Figura 3.29 - Diagrama tensão-deslocamento do ensaio de compressão em provetes de CRFU com 3% vol. de fibras e 28 dias de cura.....	78
Figura 3.30 - Modo de rotura, aos 365 dias, de provetes tubulares com 3% vol. de fibras ensaiados à compressão	79
Figura 3.31 - Diagrama tensão-deslocamento do ensaio de compressão em provetes de CRFU com 3% vol. de fibras e 365 dias de cura.....	79
Figura 3.32 - Diagrama tensão-deslocamento do ensaio de compressão em provetes de CRFU com vários volumes de fibras e 28 dias de cura.....	79
Figura 3.33 – Resistência à compressão – Estimativa da taxa de vazios	83
Figura 3.34 – Módulo de elasticidade – Estimativa da taxa de vazios.....	83
Figura 4.1 - SAP 2000 - "Shell-Thin" - Modelação 2D do ensaio de tracção por compressão diametral.....	87
Figura 4.2 - SAP 2000 – “Solid” - Modelação 3D do ensaio de tracção por compressão diametral	87
Figura 4.3 – SAP 2000 – Estado plano de tensão segundo a direcção 1	88
Figura 4.4 – SAP 2000 – Estado plano de tensão segundo a direcção 2.....	88
Figura 4.5 - SAP 2000 - Modelo Cúbico - Estado de tensão segundo a direcção 1.....	90
Figura 4.6 - SAP 2000 - Modelo Cúbico - Estado de tensão segundo a direcção 2.....	90
Figura 4.7 - SAP 2000 - Modelo Cúbico - Estado de tensão segundo a direcção 3.....	91
Figura 4.8 - SAP 2000 - Modelação do ensaio compressão.....	92

Figura 4.9 – SAP 2000 – Modelo tubular – Estado de tensão segundo a direcção 1	93
Figura 4.10 - SAP 2000 - Modelo tubular - Estado de tensão segundo a direcção 2	93
Figura 4.11 – Critério de Mohr-Coulomb: envolvente de rotura linear	95
Figura 4.12 - Determinação da resistência à compressão simples da calda com $\nu = 0,2$	98
Figura 4.13 - Determinação da resistência à compressão simples da calda com $\nu = 0,05$	98
Figura 4.14 - Determinação da resistência à compressão simples da CRFU com 2% vol. fibras com $\nu = 0,2$	99
Figura 4.15 - Determinação da resistência à compressão simples da CRFU com 2% vol. fibras com $\nu = 0,05$	99
Figura 4.16 - Determinação da resistência à compressão simples da CRFU com 3% vol. fibras com $\nu = 0,2$	100
Figura 4.17 - Determinação da resistência à compressão simples da CRFU com 3% vol. fibras com $\nu = 0,05$	100

Índice de tabelas

Tabela 2.1 – Propriedades especificadas pela PCA segundo as normas ASTM	9
Tabela 2.2 - Características de DUCON	21
Tabela 2.3 - Ensaio de tracção do aço	26
Tabela 2.4-Resultados do ensaio de tracção em flexão de provetes de 160x40x40 mm de CRFU	27
Tabela 2.5 - Resultados do ensaio de compressão, aos 28 dias de cura, de provetes de 160x40x40 mm de CRFU	28
Tabela 2.6 - Composição de Calda Reforçada com Fibras Unidireccionais	30
Tabela 2.7 - Valores de resistência à tracção por compressão diametral em provetes cúbicos da calda de cimento e calda reforçada com fibras.....	31
Tabela 2.8 - Valores do módulo de elasticidade para a calda de cimento e calda reforçada com fibras.....	32
Tabela 2.9-Valores da resistência à compressão da calda de cimento e calda reforçada com fibras	32
Tabela 2.10 - Parâmetros de análise entre modelos	37
Tabela 3.1 - Composição da Calda de Cimento	43
Tabela 3.2 – Resistência à compressão do CEM I 42,5R.....	44
Tabela 3.3 - Provetes 160x40x40 mm ensaiados	44
Tabela 3.4 – Resultados dos ensaios à flexão e compressão de CEM I 42,5R com 2 dias de cura..	45
Tabela 3.5 – Resultados dos ensaios à flexão e compressão de CEM I 42,5R com 28 dias de cura	45
Tabela 3.6 - Provetes cúbicos ensaiados à tracção por compressão diametral.....	53
Tabela 3.7 - Provetes tubulares de secção circular ensaiados para determinação do módulo de elasticidade e da resistência compressão.....	53
Tabela 3.8 - Provetes cúbicos produzidos	55
Tabela 3.9 – Massa dos provetes cúbicos.....	56
Tabela 3.10 - Provetes tubulares de secção circular produzidos	57
Tabela 3.11 – Peso e altura dos provetes tubulares de secção circular	59

Tabela 3.12 - Resultados experimentais de compressão diametral em provetes de calda.....	64
Tabela 3.13 - Valores dos módulos de elasticidade da matriz cimentícia	65
Tabela 3.14 - Valores de tensão de rotura à compressão da matriz cimentícia	66
Tabela 3.15 - Resultados obtidos nos ensaios de compressão diametral.....	69
Tabela 3.16 – Eficiência, na resistência à tracção, dos volumes de fibras adoptados	70
Tabela 3.17 - Valores de resistência à tracção admitindo a tensão de rotura do aço.....	70
Tabela 3.18 – Resultados experimentais de determinação do módulo de elasticidade em provetes tubulares de CRFU com vários volumes de fibras	73
Tabela 3.19 - Resultados experimentais de tensão de rotura à compressão obtidos em provetes tubulares de CRFU com vários volumes de fibras	74
Tabela 3.20 - Determinação de massa volúmica da calda de cimento	81
Tabela 3.21 - Estimativa da taxa de vazios em provetes tubulares de secção circular com 28 dias de cura	81
Tabela 3.22 – Estimativa da taxa de vazios em provetes tubulares de secção circular com 365 dias de cura	82
Tabela 3.23 – Estimativa da taxa de vazios, tensão de rotura à compressão e módulo de elasticidade para cada grupo de provetes	82
Tabela 4.1 - Esforços de tracção experimentais e resultantes da modelação	89
Tabela 4.2 - Estados de tensão a 90 mm de altura extraídos do SAP 2000.....	94
Tabela 4.3 - Mohr-Coulomb-Valores de compressão uniaxial, ângulo de atrito interno e coesão.	100
Tabela 5.1 - Resistência à tracção simples esperada e obtida por compressão diametral	102
Tabela 5.2 - Resistência à tracção simples esperada e obtida em ensaios de tracção em flexão....	103

Simbologia

Alfabeto Latim

A	área de secção transversal
C_o	compressão uniaxial (teórica)
E_c	módulo de elasticidade estático obtido por compressão
E_{cm}	valor médio do módulo de elasticidade
F_u	força última de ensaio
$F_{u,med}$	valor média da força última de ensaio
$F_{u,VRi}$	carga experimental última da viga de referência VR_i
$R_{amostra}$	representatividade da amostra
S_{11}	tensões segundo a direcção 1 extraídas do SAP 2000
S_{22}	tensões segundo a direcção 2 extraídas do SAP 2000
T_o	tracção uniaxial (teórica)
$V_{t,med}$	volume total médio dos provetes
$V_{s,ap}$	volume aproximado de sólidos
$V_{v,ap}$	volume aproximado de vazios
W_{acum}	energia experimental dissipada acumulada
$W_{acum,VRi}$	energia experimental dissipada acumulada, da viga de referência VR_i
$W_{esp,aço}$	massa de aço esperada
$W_{esp,calda}$	massa de calda de cimento esperada
W	massa do provete
$W_{t,esp}$	massa total esperada
W_{med}	massa média dos provetes
b	largura do provete
a/c	relação água/cimento
a/l	relação água/ligante
d_f	diâmetro da fibra
e_v	estimativa da taxa de vazios
f_c	tensão experimental de rotura à compressão
f_{cm}	valor médio da tensão experimental de rotura à compressão

$f_{ct,esp}$	tensão de rotura à tracção simples esperada
f_{ctm}	tensão experimental aproximada de resistência à tracção simples
$f_{ctm,sp}$	valor médio da tensão experimental de rotura à tracção por compressão diametral
$f_{ct,fl}$	tensão experimental de rotura à flexão
$f_{ctm,fl}$	valor médio da tensão experimental de rotura à flexão
$f_{ct,sp}$	tensão experimental de rotura à tracção por compressão diametral ou “splitting”
f_{su}	tensão experimental de rotura à tracção do aço
f_{sum}	tensão experimental de rotura média à tracção do aço
h	altura do provete
h_{med}	altura média dos provetes
l_f	comprimento da fibra
l_f/d_f	coeficiente de forma das fibras

Alfabeto Grego

ϵ_0	extensão inicial do ensaio de determinação do módulo de elasticidade
ϵ_{sr}	valor experimental da extensão experimental máxima do aço
ϵ_{srm}	valor médio da extensão experimental máxima
ϵ_{su}	extensão experimental de rotura do aço
ϵ_{sum}	valor médio da extensão experimental de rotura do aço
ϵ_u	extensão última do ensaio de determinação do módulo de elasticidade
ν	coeficiente de Poisson
σ	tensão normal
σ_1	menor tensão principal
σ_2	tensão principal intermédia
σ_3	maior tensão principal
σ_m	centro do circulo de Mohr
σ_0	tensão inicial do ensaio de determinação do módulo de elasticidade
σ_u	tensão última do ensaio de determinação do módulo de elasticidade
\emptyset_{eq}	diâmetro equivalente da fibra
\emptyset_{eq}^{med}	diâmetro médio equivalente das fibras
\emptyset_{ext}	diâmetro externo dos provetes tubulares

\emptyset_{int}	diâmetro interno dos provetes tubulares
$\rho_{\text{calda,med}}$	massa volúmica média da calda de cimento
τ	tensão tangencial
τ_m	raio do círculo de Mohr
ϕ	ângulo de atrito interno

Siglas

APEB	Associação Portuguesa das Empresas de Betão Pronto
ASTM	American Society for Testing and Materials
BED	Betão de Elevado desempenho
BUED	Betão de Ultra Elevado desempenho
CCRF	Compósito Cimentício Reforçado com Fibras
CRC	Compact Reinforced Concrete
CRFU	Calda Reforçada com Fibras Unidireccionais
DUCON	Ductil Concrete
FHWA	Federal Highway Administration
FRC	Fiber Reinforced Concrete
HPC	High Performance Concrete
HSC	High Strenght Concrete
HPFRC	High Performance Fiber Reinforced Concrete
PCA	Portland CEMENT Association
RPC	Reactive Powder Concrete
SF	Sílica de fumo
SCC	Self-Compacting Concrete
SIFCON	Slurry Infiltrated Fiber Concrete
SIMCON	Slurry Infiltrated Fiber Mat Concrete
SP	Superplastificante
TRM	Textil-Reinforced Mortar
UHPC	Ultra High Performance Concrete
UNL	Universidade Nova de Lisboa

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Aspectos gerais

O conforto e a segurança são cada vez mais uma prioridade em todas as sociedades, das mais às menos desenvolvidas. Os requisitos de segurança estrutural tomam um papel cada vez mais importante na comunidade técnica de todo o mundo, assegurando deste modo a preservação de vidas e bens materiais.

A crescente consciencialização da sociedade global para problemas ambientais é cada vez mais evidente nos nossos dias. É por isso necessário alterar os conceitos que assentam na construção, conservação e sustentabilidade das estruturas existentes. Neste sentido, a importância do reforço e reparação estrutural é evidente, não sendo a demolição de estruturas (salvo situações de carácter especial) uma solução compatível com uma mentalidade ecologicamente activa (Carvalho, 2010).

Por todo o mundo, a degradação dos edifícios, ausência de reabilitação e necessidade de reforço sísmico são uma realidade que pode custar caro no futuro. Em Portugal, embora exista consciência do risco sísmico, não é frequente reabilitar-se estruturalmente edifícios antigos. Segundo estatísticas referentes a 2005, apenas 4 a 5% dos edifícios são reabilitados em Portugal, ao passo que a nível europeu essa estimativa sobe para cerca de 34% (Costa, 2005). Sabe-se que em Portugal continental e no arquipélago dos Açores há um forte risco sísmico, pelo que é necessário reforçar as estruturas cujo dimensionamento anti-sísmico é deficiente ou inexistente, e reabilitar as que se encontram degradadas.

A resistência das estruturas às acções sísmicas é um dos desafios da Engenharia Civil. Em Portugal, embora após o Terramoto de 1755 a consciência sísmica tivesse presente em algumas construções, apenas em 1958 entrou em vigor a primeira legislação que considerava a concepção anti-sísmica. Em 2005, só em Lisboa, cerca de 64% dos edifícios tinham sido construídos anteriormente à existência de qualquer tipo de legislação anti-sísmica (Costa, 2005). Há portanto, a necessidade de tomar medidas, desenvolver e estudar soluções de modo a salvaguardar vidas e bens materiais num futuro que pode estar próximo.

Há um número enorme de patologias e necessidades estruturais. É por isso fundamental compreender de forma pormenorizada as soluções de reparação e reforço, de modo a adaptá-las às necessidades específicas de cada caso, sendo bastante importante o estudo de novas soluções ou mesmo de soluções já existentes.

O uso de adjuvantes, como os plastificantes e superplastificantes, veio permitir a produção de betões com relações água/cimento (*a/c*) optimizadas, tornando-os mais compactos e resistentes. A escolha cuidadosa de materiais, a escolha adequada da granulometria dos agregados e a adição de materiais para melhorar as características mecânicas, como a sílica de fumo, facultam uma melhoria geral do desempenho dos compósitos em termos de resistência, trabalhabilidade e durabilidade (Lange & Roesler, 2003). Actualmente há vários compósitos concebidos a partir de misturas optimizadas. Os *High Performance Concretes* (HPC) são exemplo disso e podem contemplar variadas características. Os HPC são compósitos cimentícios de elevado desempenho que podem apresentar resistências elevadas, módulos de elasticidade elevados, baixa permeabilidade, durabilidade elevadas ou outras propriedades. Contudo, é de salientar que, de forma geral, os compósitos compactos, com resistências à compressão elevadas, apresentam roturas frágeis. A incorporação de fibras nestas misturas, pode conduzir a um aumento da ductilidade, da dissipação de energia, das resistências à tracção e à flexão, prevenindo ou retardando a rotura. É de referir o desenvolvimento de vários compósitos reforçados com fibras, nomeadamente os *High Performance Fiber Reinforced Concrete* (HPFRC), o *Compact Reinforced Composite* (CRC) (Aarup, Karlsen & Lindström, 2000), o *Slurry Infiltrated Fiber Concrete* (SIFCON) (Lankard, 1984), o *Slurry Infiltrated Mat Concrete* (SIMCON) (Hackman, Farrel & Dunham, 1992), o *Ductil Concrete* (DUCON) (Schneide & Reymendt, 2008), entre outros. Estes compósitos vêm introduzir uma vasta gama de soluções, ao nível do reforço e reparação estrutural. Actualmente o fabrico de compósitos deste tipo começa a ser corrente e a sua utilização tende a aumentar.

Ao longo dos últimos anos, os compósitos de elevado desempenho, com ou sem adição de fibras, têm vindo a afirmar-se ao nível da construção mundial. Actualmente há várias construções concebidas com estes materiais inovadores. São exemplo disso, o maior edifício alguma vez construído, o Burj Dubai, concebido com betão de 80 MPa de resistência à compressão, módulo de elasticidade de 43,8 GPa, baixa permeabilidade e alta durabilidade, o edifício Two Union Square Building em Seattle, USA, foi erguido com betão de 145 MPa de resistência à compressão. Os compósitos cimentícios com fibras têm sido utilizados em tabuleiros de pontes, pavimentos de aeroportos, parques de estacionamento, barragens, túneis, hangares antimísseis, búnqueres, no reforço e reparação de estruturas, entre outras aplicações.

Há uma ampla gama de compósitos cimentícios, contudo, alguns carecem de estudos ao nível do seu comportamento mecânico, propriedades físico-químicas e comportamentos em diversas

aplicações e a variadas acções (gelo-degelo, fogo, etc). Além disso, as normas vigentes (NP EN 1992-1-1, 2010; NP EN 1992-1-2, 2010) não contemplam estes novos materiais, sendo por isso bastante importante determinar as capacidades e carências destes materiais. Só assim os Engenheiros poderão considerá-los no dimensionamento, reforço ou reparação de estruturas, permitindo desenvolver e inovar tecnologias de construção com total confiança.

As características mecânicas dos compósitos cimentícios reforçados com fibras dependem essencialmente da matriz cimentícia, das fibras e da ligação fibras-matriz. As características das fibras utilizadas nestes compósitos são diversificadas. Segundo Naaman (Naaman, 2007), as fibras podem ser definidas pela sua natureza (mineral, natural, metal, vidro, polímero, etc.), características físico-químicas (densidade, estabilidade química, resistência ao fogo, etc.), características mecânicas (resistência, rigidez, módulo de elasticidade, ductilidade, etc.) e geometria (comprimento, perímetro, diâmetro, secção transversal e forma). A resistência à compressão depende fortemente da matriz, a resistência à tracção e ductilidade é bastante influenciada pelas características das fibras e o modo de rotura é afectado pela ligação fibra-matriz. O modo de rotura pode estar associado à resistência por tracção nas fibras ou à rotura na interface fibra-matriz. De forma a obter-se um compósito com maior resistência à tracção é preferível que a rotura esteja associada à tracção nas fibras. Para que isso se verifique uma das soluções será o uso de fibras com esbeltezas elevadas. A esbelteza das fibras ou coeficiente de forma é dado pelo quociente entre o comprimento e o diâmetro (l_f/d_f), quanto maior for este valor mais eficaz será a ligação fibra-matriz (para o mesmo ligante), prevenindo-se assim a rotura na interface.

Uma das soluções de reforços estruturais possíveis é o confinamento por encamisamento das zonas comprimidas de vigas e pilares, permitindo, durante uma acção sísmica, aumentar a capacidade de dissipação de energia, prevenir o destacamento do recobrimento, reduzir a encurvadura dos varões comprimidos, minimizando assim os danos na estrutura.

A Calda Reforçada com Fibras Unidireccionais (CRFU) é um compósito cimentício de elevado desempenho desenvolvido recentemente com o intuito de reforçar ou reparar estruturas por encamisamento de reduzida espessura. Este material foi desenvolvido na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, no seguimento da tese de doutoramento da Professora Ana Gião (Gião, 2012), revelando-se um compósito promissor no âmbito do confinamento das zonas comprimidas de vigas e de ligações viga-pilar com encamisamento de CRFU.

No dimensionamento de pilares, quando o betão utilizado é de baixa resistência, podem ser adoptados revestimentos de 7 a 10 cm, aumentando assim as dimensões da secção, a massa e a rigidez, o que pode causar alguns problemas no que diz respeito ao comportamento sísmico (Teran & Ruiz, 1992). O reforço de vigas e pilares para além de ser utilizado no dimensionamento, pode ser utilizado em estruturas existentes por vários motivos, por exemplo, na ausência ou insuficiente

dimensionamento anti-sísmico, devido a erros de projecto ou execução, a acções acidentais, à degradação das estruturas, a novas exigências regulamentares ou de utilização. Em todas estas situações a aplicação de CRFU poderá ser uma solução.

Este novo material é constituído por uma manta não-tecida de fibras de aço contínuas e unidireccionais, à qual é impregnada uma calda cimentícia preparada com cimento, superplastificante e sílica de fumo com uma relação água/ligante (a/l) de 0,3. A esbelteza das fibras tende para infinito ($l_f/d_f = \infty$) pelo que o seu comprimento de embebimento é grande o suficiente para prevenir a rotura ao nível da ligação fibra-matriz. A CRFU foi desenvolvida recentemente e será alvo de estudo neste trabalho de forma a adquirir-se mais informação acerca do seu comportamento mecânico.

1.2 Objectivos

O presente trabalho debruça-se, primordialmente, na caracterização do módulo de elasticidade e resistências à compressão e tracção da matriz cimentícia e da CRFU, para diferentes idades de cura e várias percentagens volumétricas de fibras. Pretende-se determinar a eficácia das fibras no comportamento mecânico do material, avaliar as suas características e adquirir informações que permitam definir as capacidades e eficiência deste material.

De forma mais detalhada, de acordo com os objectivos do presente trabalho, foi necessário estabelecer os seguintes passos:

- a. Reunir informação de compósitos cimentícios de elevado desempenho com e sem adição de fibras a partir da bibliografia existente;
- b. Conceber um plano de ensaios que permitisse avaliar, com algum rigor, as características mecânicas da CRFU para diferentes volumes de fibras;
- c. Preparar em laboratório 24 provetes paralelepípedos (160x40x40 mm) com argamassa de cimento;
- d. Verificar a classe de resistência do cimento utilizado, através da realização de 24 ensaios de flexão e compressão em provetes 160x40x40 mm, registando os resultados obtidos através da instrumentação e equipamento de aquisição de dados preparados para o efeito;
- e. Preparar em laboratório 17 provetes cúbicos de 150x150x150 mm e de 32 provetes tubulares de secção circular com 300 mm de altura, 150 mm e 110 mm de diâmetro externo

- e interno, respectivamente, alguns betonados com calda cimentícia e outros com CRFU com volumes de 2% e 3% de fibras;
- f. Realizar 23 ensaios de tracção por compressão diametral em provetes cúbicos, 17 dos quais a provetes com 28 dias e os restantes 6 com 315 dias de cura, registando os resultados obtidos através da instrumentação e equipamento de aquisição de dados preparados para o efeito;
 - g. Realizar 38 ensaios de elasticidade e compressão em provetes tubulares de secção circular, 32 dos quais a provetes com 28 dias e os restantes 6 com 365 dias de cura, registando os resultados obtidos através da instrumentação e equipamento de aquisição de dados preparados para o efeito;
 - h. Desenvolver modelos de elementos finitos, recorrendo ao programa de cálculo automático SAP2000, de modo a efectuar análises numéricas dos ensaios de tracção em cubos e dos de compressão em provetes tubulares de secção circular; interpretar os campos de tensões e relacioná-los com os respectivos modos de rotura;
 - i. Determinar a resistência à compressão simples aproximada da CRFU e matriz cimentícia, através da interpretação do estado de tensão na rotura dos provetes e admitindo o critério de rotura de Mohr-Coulomb;
 - j. Analisar os resultados obtidos de modo a avaliar as características mecânicas do material, retirando informações necessárias à sua compreensão;
 - k. Obter informações que permitam definir soluções que conduzam ao melhoramento das características da CRFU.

1.3 Organização da dissertação

Incluindo este capítulo introdutório, o presente trabalho é constituído por cinco capítulos. Exibe-se de seguida, sucintamente, os conteúdos presentes em cada um dos capítulos.

No Capítulo 2 é efectuada uma pesquisa dedicada à classificação dos compósitos cimentícios, adquirindo dados que assentam em critérios de resistência, durabilidade e comportamento desses materiais, agrupando-os nas distintas classificações existentes. São apresentados alguns dos desenvolvimentos das últimas décadas, ao nível de compósitos cimentícios de elevado desempenho, referindo alguns estudos que caracterizam estes materiais, particularmente no que se refere aos seus comportamentos mecânicos. É elaborada uma análise do desempenho de vários materiais, frisando com mais ênfase os compósitos com fibras, nomeadamente no que diz respeito

aos seus modos de produção, à influência dos diferentes tipos de fibras nos seus comportamentos e às suas aplicações. É realizada uma apresentação da CRFU revelando os estudos desenvolvidos para a otimização e caracterização desta mistura. São ainda realçados os resultados de alguns estudos referentes ao reforço por encamisamento de CRFU em vigas.

No Capítulo 3 é feita uma descrição aprofundada de todos os materiais utilizados na produção da CRFU, frisando a influência dos seus constituintes. São apresentados os resultados de caracterização mecânica do cimento Portland CEM I 42,5R, utilizado na produção de CRFU, e comparados com os valores característicos fornecidos pelo fornecedor. É realizado um estudo dedicado às dimensões das fibras de aço a fim de se obter o diâmetro equivalente das mesmas. É apresentada toda a campanha experimental desenvolvida neste trabalho, realizando-se uma descrição detalhada do processo de produção da calda de cimento e dos provetes de CRFU assim como da instrumentação utilizada no procedimento de cada um dos ensaios. São apresentados os resultados obtidos da caracterização mecânica efectuada, nomeadamente a resistência à tracção, à compressão e módulo de elasticidade da calda cimentícia e CRFU com vários volumes de fibras, frisando-se algumas conclusões retiradas a partir desses valores e dos modos de rotura observados experimentalmente. É ainda elaborada uma estimativa da taxa de vazios dos provetes de CRFU comparativamente com a calda cimentícia, sendo possível com esses valores justificar alguns dos dados obtidos experimentalmente.

No Capítulo 4 são efectuadas algumas modelações dos ensaios de compressão e de tracção por compressão diametral no programa de cálculo automático SAP 2000, considerando em cada uma delas a média da força última de ensaio, obtidas no seguimento deste trabalho em provetes de calda e CRFU com 2% e 3% vol. de fibras com 28 dias de cura, proporcionando-se, deste modo, uma melhor interpretação dos modos de rotura observados experimentalmente. Através de alguns dados experimentais obtém-se, recorrendo às modelações do ensaio de tracção por compressão diametral, uma aproximação ao coeficiente de Poisson a utilizar nas modelações. Considerando esse coeficiente de Poisson e o considerado para o betão pelo EC2 (NP EN 1992-1-1, 2010), são realizadas aproximações à resistência à compressão simples dos materiais contemplados, admitindo o critério de rotura de Mohr-Coulomb.

No Capítulo 5 apresentam-se todas as conclusões que se obtiveram ao longo do trabalho desenvolvido e referem-se alguns dos desenvolvimentos futuros da CRFU.

CAPÍTULO 2

COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS DE ELEVADO DESEMPENHO

2.1 Aspectos gerais

Os compósitos cimentícios de elevado desempenho, com ou sem adição de fibras, têm vindo a tomar maior relevância na construção mundial e a sua utilização é cada vez mais comum na construção, reforço ou reparação de estruturas. Há, por isso, a crescente necessidade de progredir nesta área da Engenharia, desenvolvendo estudos que determinem e conduzam à optimização das propriedades destes materiais, proporcionando também a criação de novos compósitos dotados de características específicas. Para isso, é bastante importante determinar as suas características mecânicas, físico-químicas e comportamentos em diversas aplicações e a variadas acções (gelo-degelo, fogo, etc). Só assim os engenheiros poderão considerar estes novos materiais (com total segurança), no dimensionamento, reforço ou reparação de estruturas, como alternativa aos materiais e soluções convencionais, conduzindo à inovação e ampliação das soluções construtivas. Neste sentido, diversos estudos têm vindo a ser desenvolvidos. Até há relativamente pouco tempo era difícil produzir um betão com resistências à compressão acima dos 45 MPa, salvo em processo de pré-fabricação (Teixeira & Martins, 2003). Hoje, os betões convencionais possuem resistências características à compressão de 20 a 50 MPa, à tracção de 1,5 a 4 MPa e módulos de elasticidade na ordem dos 25 a 30 GPa. Entre 1960 e 1970 foram desenvolvidos novos adjuvantes, os plastificantes e superplastificantes (Kwan, Ng & Fung, 2010). Estes adjuvantes são redutores de água e com eles foi possível reduzir drasticamente a relação água/cimento, sem que a trabalhabilidade fosse afectada, para valores na ordem dos 0,3 ou inferiores. Surgiram assim betões mais compactos, com menor permeabilidade, maior durabilidade e com classes de resistência muito acima das convencionais. Este desenvolvimento despertou ainda mais os estudos relacionados com a tecnologia do betão. Mais tarde foi descoberta a vantagem da utilização de certos aditivos tais como fibras sintéticas e adições minerais, com propriedades pozolânicas, como as cinzas volantes e sílicas de fumo, possibilitando um aumento ainda maior das resistências (Teixeira & Martins, 2003).

A utilização de aditivos e adjuvantes nos compósitos cimentícios veio contribuir de forma decisiva para o melhoramento das suas características, não só no estado endurecido como também no estado

fresco. Com o contributo destes aditivos e adjuvantes é possível produzir matrizes cimentícias com elevadas resistências químicas e mecânicas. Hoje em dia há uma vasta gama de betões e outros compósitos cimentícios de elevado desempenho, podendo a adição de fibras ser uma mais-valia para o seu comportamento.

2.2 Betões de Elevado Desempenho (BED) e Betões de Ultra Elevado Desempenho (BUED)

Aspectos gerais:

Nesta secção pretende-se distinguir as várias classes de Betão de Elevado Desempenho (BED) (*High Performance Concrete* (HPC)) e de Betão de Ultra Elevado Desempenho (BUED) (*Ultra High Performance Concrete* (HPC)), compreendendo as características que os distingue. São apresentados vários desenvolvimentos e estudos recentes na tecnologia de compósitos cimentícios, sendo também citados alguns dos seus critérios de produção e aplicabilidade.

Os HPC e UHPC são betões concebidos a partir de misturas optimizadas de constituintes de alta qualidade. Tipicamente, possuem relações água/cimento baixas alcançadas através da utilização de plastificantes ou superplastificantes (PCA, 2003).

A classificação destes compósitos ainda é pouco consensual, havendo algumas divergências entre autores. Frequentemente os HPC e UHPC são referidos como betões de alta resistência, designadamente, *High Strength Concrete* (HSC) ou *Ultra High Strength Concrete* (UHSC). Segundo a *Portland Cement Association* (PCA, 2003), fazendo a analogia para os HPC, na realidade estes betões têm quase sempre resistências mais elevadas que os betões convencionais, no entanto, a resistência não é a única propriedade que os caracteriza. Por exemplo, um betão com uma resistência normal, permeabilidade muito baixa e durabilidade muito alta apresenta igualmente propriedades de alto desempenho. Ou seja, um HSC é um HPC, mas o inverso não se verifica.

É de salientar também que a terminologia “*Concrete*” da classificação dos compósitos é substituída, por vários autores, por “*Cement*” ou “*Cement Composites*”.

Betão de Elevado Desempenho (BED) ou *High Performance Concrete* (HPC):

A *Federal Highway Administration* (FHWA) (Goodspeed, Vanikar & Cook, 2011) define os HPC como betões geralmente desenvolvidos para satisfazer um ou mais critérios de resistência e, ou durabilidade, destacando critérios como a resistência à compressão, módulo de elasticidade, resistência aos ciclos gelo-degelo, resistência à abrasão, entre outros.

Segundo a *Portland Cement Association* (PCA, 2003), são considerados como HPC betões cujas propriedades excedem as dos betões convencionais. Esta Associação exhibe uma tabela contendo propriedades de resistência e durabilidade associadas aos HPC, afirmando que nem todas podem ser alcançadas pelo mesmo betão. Contudo, os HPC possuem, geralmente, mais do que uma melhoria das suas propriedades, pois essas propriedades estão frequentemente relacionadas entre si. Os dados obtidos nessa tabela têm em consideração as normas ASTM, e estes são alguns dos valores característicos nela enunciados:

Tabela 2.1 – Propriedades especificadas pela PCA segundo as normas ASTM (PCA,2003)

Propriedade	Norma	Critérios especificados
Elevada resistência à compressão	ASTM C 39 (AASHTO T 22)	70 a 140 MPa entre os 28 e 91 dias de cura
Alta resistência inicial à compressão	ASTM C 39 (AASHTO T 22)	20 MPa entre 3 a 12 horas e 28 MPa entre 1 a 3 dias de cura
Elevada resistência inicial à flexão	ASTM C 78 (AASHTO T 97)	2 MPa entre 3 a 12 horas e a 4 MPa entre 1 a 3 dias de cura
Alto módulo de elasticidade	ASTM C 469	> 40 Gpa
Permeabilidade baixa	ASTM C 1202 (AASHTO T 277)	500 a 2000 coulombs
Baixa absorção	ASTM C 642	2 a 5%
Baixa retracção	ASTM C 157	< 400 milionésimos

A PCA refere ainda características como a baixa permeabilidade aos cloretos, resistência à exposição química e a fluência reduzida.

Como se pode constatar os HPC podem conter uma grande variedade de características, a PCA cita 4 tipos diferentes de HPC, o *High Strength Concrete*, o *High Early Strength Concrete*, o *High-Durability Concrete* e o *Self-Compacting Concrete* (SCC). Como dito anteriormente, de facto os

HPC podem conter diferentes características que os distinguem, não sendo a resistência uma propriedade primordial.

Embora os HPC não sejam aplicáveis à maioria das construções, existem alguns edifícios bastante relevantes que contemplaram a sua utilização. Entre eles pode destacar-se, as torres Petronas em Kuala Lumpur, na Malásia, que foram construídas com HSC com 80 MPa de resistência característica à compressão. No entanto, dada a utilização crescente destes materiais e a ausência de normas que contemplem o seu uso, devem ser efectuados estudos sobre o seu comportamento, que permitam a sua compreensão. Estudos recentes (Castro, Tiba & Pandolfelli, 2011), revelam que os HSC apresentam maior sensibilidade às altas temperaturas. A baixa porosidade destes compósitos dificulta o transporte dos vapores formados na matriz durante o aquecimento, aumentando a pressão conduzindo à perda das propriedades mecânicas (resistência à compressão e módulo de elasticidade) e, para temperaturas entre 100 °C e 400 °C, ao lascamento explosivo. Com estes dados surgem dúvidas da aplicabilidade das normas vigentes no que respeita à resistência ao fogo desses betões, pois elas são amplamente baseadas no comportamento dos betões convencionais. É de salientar também que esse estudo refere que a impregnação de fibras de polipropileno nesses compósitos melhora o seu comportamento sob a acção do fogo, evitando o lascamento. Estas fibras, quando fundidas e parcialmente absorvidas pela matriz de cimento, criam uma rede de canais permeável que permite a migração dos gases para o exterior, reduzindo a pressão nos poros do material e, conseqüentemente, eliminando a possibilidade de ocorrência do lascamento explosivo.

Portanto, é necessário caracterizar estes novos materiais de forma a adquirir o maior número de dados, permitindo, deste modo, o seu desenvolvimento e conhecimento.

Betão de Ultra Elevado Desempenho (BUER) ou *Ultra High Performance Concrete* (UHPC):

Como é óbvio, o termo “*High Performance*” indica que este tipo de betões possui características melhores que as do betão normal e “*Ultra High Performance*” indica que o desempenho destes betões é ainda melhor. Segundo (Schmidt & Fehling, 2004), foi estabelecido um valor mínimo de resistência à compressão de 150 MPa para os UHPC. Este dado remete para uma classificação dos UHPC a partir da sua resistência à compressão, sendo qualquer compósito cimentício com resistência à compressão acima dos 150 MPa considerado de ultra elevado desempenho. Contudo essa característica não é a única que os distingue, parte-se do princípio que todos os compósitos com características de resistência, módulo de elasticidade e durabilidade, mais favoráveis que os HPC são considerados UHPC.

O aparecimento do *Reactive Powder Concrete* (RPC) desenvolvido em França no início de 1990, foi o grande impulsionador dos UHPC. Em 1997 foi erguida a ponte Sherbrooke no Canada concebida com RPC. Este betão é produzido a partir de misturas de materiais ultra-finos, oferecendo resistências à compressão de 200 MPa, resistências à flexão de 40 MPa e módulo de elasticidade até 60 GPa (PCA, 2003).

Num estudo desenvolvido por Allena e Newtonson (Allena & Newtonson, 2010), com o objectivo de produzirem UHSC através da optimização de misturas, foram concebidos dois tipos de UHSC, um com e outro sem impregnação de fibras. Neste estudo, consideraram-se várias misturas, tendo sido alcançadas resistências à compressão, aos 28 dias, de 161,9 MPa para uma mistura sem fibras e de 165,6 MPa para uma mistura com adição de fibras. Embora a maior parte dos UHPC estejam associados a compósitos com fibras, eles podem ser concebidos apenas a partir da selecção e optimização das misturas. Exemplo disso é também o RPC, pois a adição de fibras neste betão é opcional, sendo considerado de ultra elevado desempenho independentemente dessa adição.

A alta resistência dos betões utilizados em estruturas conduz a duas vantagens: redução do volume de material utilizado e conseqüentemente menor peso próprio da estrutura. Contudo a utilização dos UHPC não é corrente por vários motivos. Em primeiro lugar, estes materiais requerem maior controlo de qualidade e equipamentos especiais para garantir a sua exequibilidade. Em segundo lugar, na maioria das construções, a alta resistência normalmente não é muito importante porque os elementos estruturais têm dimensões mínimas para serem exequíveis. Geralmente, o custo associado à construção de estruturas é determinante. No entanto, se o uso destes betões se tornasse mais comum, o processo de fabrico em massa torná-los-ia mais baratos. Mas, para isso, teriam que ser criados novos conceitos estruturais de modo a que a resistência destes betões fosse aproveitada (Baustoffe & Massivbau, 2004).

2.3 Compósitos Cimentícios Reforçados com Fibras (CCRF)

A ideia de reforçar compósitos frágeis com elementos fibrosos data de alguns milhares de anos atrás. Existem registos onde se relata que, no antigo Egipto, se misturava ao barro palhas para confeccionar tijolos, obtendo assim um material compósito com maior qualidade e durabilidade para aplicação nas construções daquela época. Contudo, a utilização da tecnologia de betão reforçado com fibras é incontestavelmente mais recente. Os primeiros estudos nesta área surgem nos anos 50, mas só na década de 60 esta tecnologia ganhou maior impulso; desde então vários

compósitos têm sido desenvolvidos. Hoje em dia, as inovações tecnológicas utilizadas no fabrico de compósitos com fibras permitem uma diversidade de soluções mais ampliada. Existe uma vasta gama de compósitos reforçados com fibras, podendo as fibras ser de diversos materiais e geometrias variadas. Das mais utilizadas, em CCRF, destacam-se as de aço, vidro e polipropileno. Nas figuras seguintes ilustram-se algumas fibras disponíveis para venda em diversos sites.



Figura 2.1 - Exemplos de fibras de aço utilizadas em compósitos cimentícios (Webgrafia)



Figura 2.2 - Exemplos de fibras de vidro e de polipropileno (Webgrafia)

A impregnação de fibras em compósitos cimentícios pode prevenir a fendilhação, contribuir para o aumento das resistências à tracção e flexão, favorecer a capacidade de dissipação de energia e o comportamento sob a acção do fogo. As características dos CCRF dependem da matriz cimentícia e das características mecânicas e geométricas das fibras. Naaman (Naaman, 2007), sugere uma classificação, para estes compósitos, baseada no comportamento à tracção. Nesta classificação consideram-se duas respostas distintas: o amolecimento ou o endurecimento após o aparecimento da primeira fenda. No primeiro caso, imediatamente antes da formação da primeira fenda atinge-se a resistência máxima, posteriormente há um decréscimo abrupto da resistência e aumento da deformação (amolecimento). Segundo Naaman, este é o comportamento característico dos *Fiber Reinforced Cement* (FRC). A Figura 2.3 ilustra o diagrama tensão-deformação na resposta à tracção para compósitos com comportamento de amolecimento. No endurecimento, após a formação da primeira fenda observa-se o aumento da resistência, acompanhado de múltipla

fendilhação e aumento da capacidade de dissipação de energia. Após o pico de resistência o comportamento de tensão-deformação é semelhante ao do amolecimento. Os compostos dotados de endurecimento (Figura 2.4) são designados *High Performance Fiber Reinforced Cement Composites* (HPFRCC).

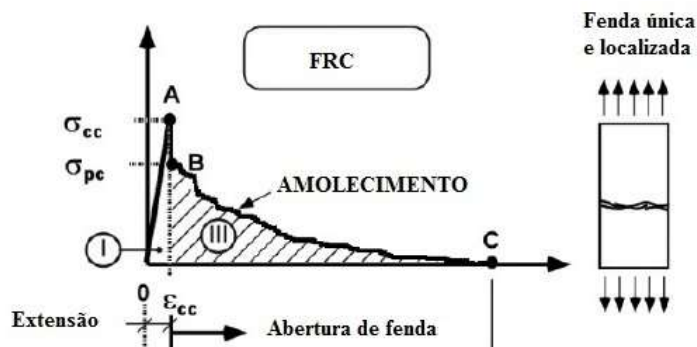


Figura 2.3 - Comportamento dos FRC à tracção (Naaman, 2007)

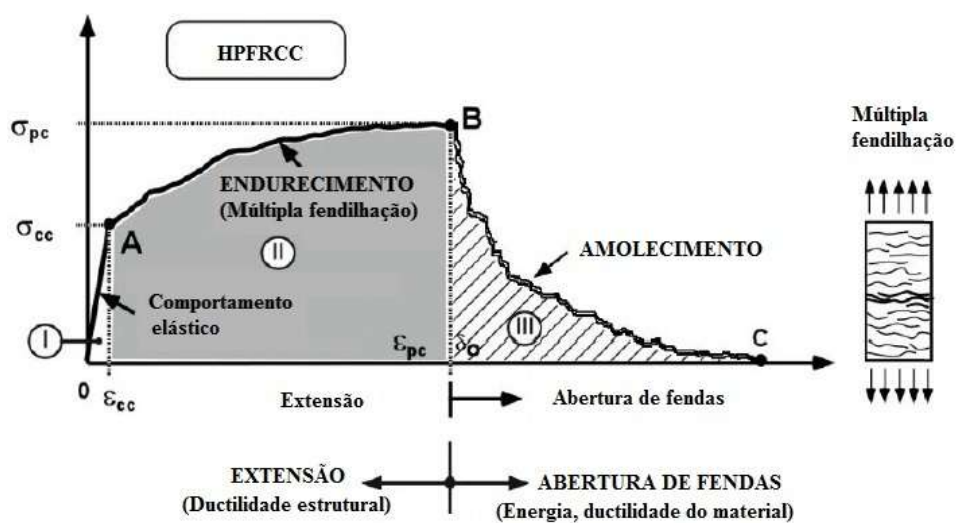


Figura 2.4 - Comportamento dos HPFRCC à tracção (Naaman, 2007)

Como referido anteriormente, a classificação sugerida por Naaman baseia-se no comportamento à tracção. Contudo, diversos autores, tal como as classificações de compostos sem fibras da *Portland Cement Association* e da *Federal Highway Administration*, baseiam-se em critérios de resistência e durabilidade para classificar os CCRF.

Em seguida serão apresentados alguns dos desenvolvimentos mais relevantes nesta área, realçando algumas das características, critérios de concepção e aplicabilidade destes materiais.

2.3.1 Betão Reforçado com Fibras (BRF) ou *Fiber Reinforced Concrete* (FRC)

Segundo (Barros, 1996), os FRC são betões tipicamente concebidos a partir de misturas convencionais de betão com a particularidade de lhes serem adicionadas fibras de aço ou de vidro em volumes máximos de 3% e 6%, respectivamente. Há, no entanto, que ter em especial atenção os factores que condicionam a trabalhabilidade, sendo necessário combinar adequadamente o tipo de agregados, volume e esbelteza das fibras a utilizar. Agregados mais finos e fibras com esbeltezas menores conduzem a misturas com maior trabalhabilidade, não sendo geralmente, neste tipo de betões, utilizadas fibras com esbeltezas (l_f/d_f) acima dos 100. Há também a possibilidade de utilizar plastificantes ou superplastificantes.

Neste tipo de compósitos, as fibras podem apresentar dois modos de rotura: por cedência ou por deslizamento. Numa rotura por cedência, uma vez que a resistência das fibras é totalmente utilizada, a tensão de rotura do compósito aumenta face à resistência correspondente a uma rotura por deslizamento das fibras. Todavia, além de ser necessário garantir um comprimento de embebição das fibras suficiente para que a rotura se dê por cedência, a rotura por deslizamento garante maior capacidade de absorção de energia. No caso do FRC os volumes de fibras adoptados não são muito elevados e as fibras são, tipicamente, curtas e distribuídas aleatoriamente, sendo o tipo de rotura deste material associado ao deslizamento das fibras, obtendo-se assim o principal benefício do reforço das fibras, a capacidade de absorção de energia (Barros, 1996).

A capacidade de absorção de energia, ductilidade, resistência à fendilhação e às acções dinâmicas e estáticas são melhoradas pela correcta adição de fibras à matriz cimentícia.

Há um vasto campo de aplicação de FRC, nomeadamente em tabuleiros de pontes, pavimentos de aeroportos e parques de estacionamento, túneis, barragens, canais, reforço ou reparação de estruturas, etc.

2.3.2 Betão de Elevado Desempenho Reforçado Com Fibras (BEDRF) ou *High Performance Fiber Reinforced Concrete (HPFRC)*

Tanto os HPC como os UHPC exibem características inegavelmente favoráveis à construção, tanto pelas propriedades de resistência como de durabilidade. Contudo os betões de alta resistência apresentam um comportamento mais frágil que os betões normais. A impregnação de fibras nestes compósitos pode prevenir fortemente a fissuração, trazer vantagens ao nível da ductilidade, comportamentos à tracção, flexão e sob a acção do fogo.

Os *High Performance Fiber Reinforced Concretes (HPFRC)* ou *High-Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC)* são compósitos desenvolvidos a partir de misturas cimentícias semelhantes às dos HPC e UHPC mas com a valorização da adição de fibras.

De seguida, faz-se referência a alguns destes compósitos, destacando os seguintes:

- *Compact Reinforced Composite (CRC)*;
- *Slurry Infiltrated Fiber Concrete (SIFCON)*;
- *Slurry Infiltrated Mat Concrete (SIMCON)*;
- *Ductil Concrete (DUCON)*;
- *Textil Reinforced Mortar (TRM)*.

2.3.2.1 *Compact Reinforced Composite (CRC)*

O CRC é um compósito de elevado desempenho desenvolvido em 1986 por Aalborg Portland na Dinamarca. A alta resistência à compressão (150-400 MPa), deste material, é conciliada com a elevada ductilidade proporcionada pela adição de fibras de aço curtas e resistentes. Geralmente é utilizada uma percentagem volumétrica entre 3 a 6% de fibras com 12,5 mm de comprimento e 0,4 mm de diâmetro (Aarup, Karlsen & Lindström, 2000).

Existem CRC desenvolvidos a partir de diferentes misturas e condições de cura. As suas propriedades dependem fundamentalmente do teor em fibras, tipo de agregados e de cura. Estando tipicamente compreendidas entre os seguintes valores:

- Resistência à compressão – 140 a 400 MPa
- Resistência à flexão – 100 a 300 MPa
- Módulo de elasticidade – 40 a 100 GPa
- Densidade – 2600 a 3500 Kg/m³

A composição da mistura típica, ou standard, combina cimento com uma grande quantidade de microsíllica, numa razão água/ligante de apenas 0,16, areia de quartzo com granulometria até aos 4 mm de diâmetro, e 6% de fibras de aço por unidade de volume. Esta composição standard confere a este material uma resistência à compressão da ordem dos 150 MPa, sendo possível a sua aplicação “in-situ” sem necessidade de recorrer a equipamento especial.

Há também misturas de CRC concebidas a partir de agregados de bauxita calcinada, com as quais, através de curas controladas, é possível obter resistências à compressão de 400 MPa, outras com teores elevados de fibras (até aos 12%); contudo, o fabrico destes compósitos requer equipamento especial (Aarup, Karlsen, & Lindström, 2000).

Os compósitos de CRC têm sido utilizados na pré-fabricação de varandas, escadas, vigas, pilares, tampas de esgoto, etc. A aplicação in-situ é feita essencialmente na ligação entre elementos pré-fabricados (“*CRC JointCast*”).

2.3.2.2 Slurry Infiltrated Fiber Concrete (SIFCON)

Em meados de 1979 surgiu o *Slurry Infiltrated Fiber Concrete* (SIFCON), desenvolvido pelo Professor Lankard (Dagar, 2012). Mais tarde foi desenvolvido *Slurry Infiltrated Mat Concrete* (SIMCON) (Coskun, 2003). Geralmente são utilizadas caldas de alta resistência e grandes volumes de fibras no fabrico destes materiais.

Ao contrário de outros CCRF, cujas misturas são realizadas com ligantes, agregados e fibras, tanto no SIFCON como no SIMCON não é possível misturar a seco as fibras com os restantes elementos, pois a elevada quantidade e/ou morfologia das fibras não permite que uma mistura deste tipo seja bem-sucedida. Como tal, as fibras são colocadas nos respectivos moldes e posteriormente é realizada a betonagem com calda de baixa viscosidade, de modo a penetrar os elevados volumes de fibras, Figura 2.5.



Figura 2.5 - Produção de SIFCON [7]

A betonagem pode ser feita por gravidade, recorrendo à vibração externa, ou por injeção; e para que seja eficaz é necessário que a calda seja fluida e que a maior dimensão das partículas nela contidas, seja inferior à menor abertura entre fibras, não sendo usualmente utilizados agregados. Para garantir a trabalhabilidade e a alta resistência da calda, são utilizados adjuvantes como os plastificantes ou superplastificantes que proporcionam, como citado anteriormente, baixas relações água/ligante e as adições como as cinzas volantes e a sílica de fumo, a um aumento da resistência da matriz.

Ao contrário da maioria dos CCRF (compósitos cimentícios reforçados com fibras), que contêm percentagens volumétricas de fibras até 3%, o SIFCON é concebido com altos teores em fibras, com volumes de 5% a 25%, dependendo da geometria das fibras e tipo de aplicação (Dagar, 2012). As fibras utilizadas podem ser de aço ou vidro. Geralmente são utilizadas fibras de aço com 30 mm de comprimento e 0,5 mm de diâmetro (Lankard, 1984). Embora as fibras sejam curtas e a sua distribuição aleatória, a elevada percentagem contida por unidade de volume neste material permite que o contributo das fibras seja fortemente evidenciado na sua resistência.

O SIFCON é um material de elevada resistência, resistente à fendilhação, à penetração de projecteis e aos impactos. Segundo Kuldeep Dagar (Dagar, 2012), tipicamente, aos 28 dias, a resistência à tracção varia entre 20 e 50 MPa, a resistência à compressão entre 90 e 160 MPa, e à flexão entre 25 e 75 MPa, dependendo da mistura utilizada.

Devido à sua resistência aos impactos e explosões, este compósito tem sido alvo de estudo na indústria militar. É utilizado em aplicações militares como hangares antimísseis e búnqueres. Tem ainda uma vasta gama de aplicações, como em plataformas de lançamento aeroespaciais, reabilitação de pavimentos, reparação, reabilitação e reforço de estruturas, havendo, entre outras aplicações, vários produtos pré-fabricados.

2.3.2.3 Slurry Infiltrated Mat Concrete (SIMCON)

A esbelteza das fibras utilizadas noutros CCRF é tipicamente de 40 a 100, enquanto no SIMCON são utilizadas fibras com esbeltezas acima dos 500, resultando numa manta de fibras longas não-tecida, Figura 2.6. O volume de fibras utilizado no SIMCON é substancialmente inferior aos valores usualmente utilizados no SIFCON.

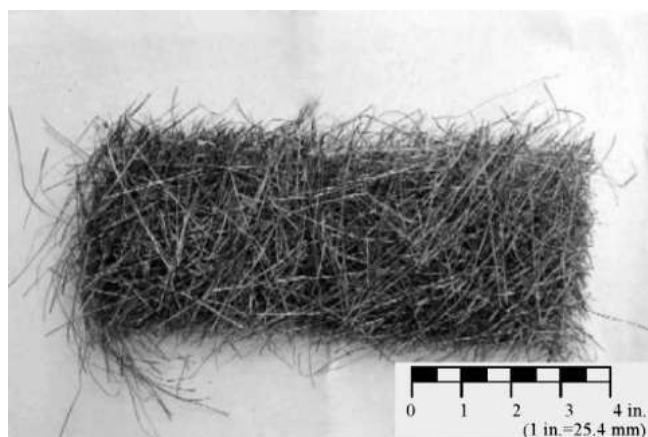


Figura 2.6 - Manta de fibras não-tecida (SIMCON) (Coskun, 2003)

Hackman, *et al* (Hackman, Farrel & Dunham, 1992) desenvolveram uma campanha experimental para determinar a resistência à flexão e capacidade de absorção de energia do SIMCON, utilizando diferentes percentagens, geometrias e tipos de fibras. Os resultados obtidos foram comparados com os valores obtidos para o SIFCON e betão convencional reforçado com fibras de aço (*Steel Fiber Reinforced Concrete - SFRC*).

Foram preparadas vigas, de 51x103x510 mm, utilizando SIMCON com volumes de 1,2 a 3,6 % de fibras de aço carbono-manganês e de 5,7% de fibras de aço inoxidável. As fibras apresentavam todas, aproximadamente, 241 mm de comprimento, as fibras de aço carbono-manganês diâmetros de 0,25, 0,33 e 0,53 mm e as fibras de aço inoxidável de 0,61 mm, ou seja, esbeltezas compreendidas entre 960 e 400.

As vigas preparadas com SIFCON continham um volume de 14 % de fibras de aço inoxidável de 25 mm de comprimento e aproximadamente 0,8 mm de diâmetro ($l_f/d_f = 31$). Tanto as vigas de SIMCON como de SIFCON foram betonadas com a mesma calda, variando apenas as percentagens e características de fibras. O SFRC utilizado continha 0,75% de fibras de aço inoxidável com 51 mm de comprimento e 1 mm de diâmetro ($l_f/d_f = 51$).

Na resistência à flexão verificou-se que o SIFCON com 14% de volume de fibras apresenta uma tensão de rotura de 44,4 MPa, sendo este valor cerca de 11 vezes superior ao alcançado pelo betão convencional (4MPa). Os valores adquiridos pelo SIMCON com 3,3% e 3,6% vol. de fibras, cerca de 25% do volume de fibras utilizadas no SIFCON, são superiores a 33 MPa, o que corresponde a cerca de 75% da resistência à flexão do SIFCON. Para o SIMCON com 5,7% de volume de fibras de aço inoxidável, cerca de 41% do volume de fibras utilizado nas vigas de SIFCON, constatou-se uma tensão de rotura de 85% da obtida nas vigas de SIFCON. Com valores mais reduzidos de fibras o SIMCON continua a apresentar resultados impressionantes; com apenas um volume de 1,7% de fibras alcança-se uma tensão de rotura à flexão de cerca de 50% da tensão dada para o SIFCON.

Com estes dados verificou-se que a eficiência das fibras (dada pela relação entre os valores de tensão de rotura por flexão e a percentagem de fibras) da malha utilizada no SIMCON é mais elevada que das fibras de SIFCON e de SFRC. Exceptuando a eficiência das fibras no SIMCON com maior volume de fibras (5,7%), pois embora o SFRC exprima uma tensão de rotura por flexão de apenas 6 MPa verifica-se que a eficiência dos 0,75 % é superior aos 5,7% no SIMCON. Isto aponta para uma dualidade entre resistência e eficiência que convém ser devidamente interpretada no que respeita à concepção de CCRF. Deve encontrar-se um equilíbrio entre a resistência pretendida e a eficiência das fibras. Deste modo, pode alcançar-se a percentagem de fibras necessária para que o material atinja as características desejadas e ao mesmo tempo se esteja a tirar o máximo partido da sua adição.

No que diz respeito à capacidade de absorção de energia, o SIMCON possui maior capacidade de absorção de energia que o SIFCON e que o SFRC. Para SIMCON com apenas 25% do volume de fibras utilizadas no SIFCON alcança-se uma capacidade de absorção de energia cerca de 15 % superior à atingida pelo SIFCON. Ao analisar-se o tipo de rotura das vigas verificou-se que as vigas de SIFCON apresentavam uma rotura localizada, ao passo que as vigas de SIMCON exibiram várias fendas ao longo da envolvente de rotura. Devido ao curto comprimento de embebimento das fibras de SIFCON (25 mm) a rotura por flexão deu-se pelo deslizamento das fibras, sendo apenas essa rotura localizada responsável pela energia absorvida. Nas vigas de SIMCON as múltiplas fendas evidenciam a eficiente ligação entre as fibras e a matriz cimentícia, sendo a resistência à tracção das fibras preponderante na resistência do compósito.

É de referir que, segundo Barros (Barros, 1996), como enunciado anteriormente, nos FRC quando a rotura se dá por deslizamento das fibras há maior capacidade de absorção de energia comparativamente a uma rotura por cedência das fibras. Há, portanto, uma divergência entre o que este autor refere e os resultados obtidos nos ensaios de flexão a vigas de SIMCON e SIFCON realizados por Hackman, *et al.* Conclui-se assim que, não se pode admitir para todas as situações

que uma rotura por deslizamento das fibras conduz a maior capacidade de absorção de energia. Cada caso deve ser analisado individualmente, pois as condições de ensaio, os materiais utilizados, nomeadamente, as características geométricas e mecânicas das fibras, podem condicionar as conclusões obtidas.

Segundo os resultados obtidos na campanha experimental desenvolvida por Hackman, *et al*, não só o volume de fibras mas também as suas características, nomeadamente o comprimento e diâmetro são factores decisivos no comportamento dos CCRF.

No que se refere ao reforço estrutural com recurso ao SIMCON há também alguns estudos já realizados, nomeadamente, estudos relacionados com o reforço por encamisamento com SIMCON - Coskun, 2003 e Dogan & Krstulovic-Opara, 2003. Sucintamente, nestes trabalhos pretendeu-se avaliar o melhoramento do reforço por encamisamento com SIMCON no comportamento de vigas e pilares de betão armado sujeitas a solicitações sísmicas. Pôde constatar-se a importância da espessura do encamisamento na capacidade de carga axial de pilares. Concluiu-se que o encamisamento com SIMCON previne a deterioração e propagação de fendas conduzindo ao aumento da ductilidade, da capacidade de absorção de energia e da resistência à flexão.

Dado a elevada ductilidade, capacidade de absorção de energia, resistência à fendilhação, resistência à flexão e tracção, o SIMCON é um compósito inegavelmente apropriado no melhoramento do comportamento de estruturas face às solicitações sísmicas. Noutras aplicações como militares ou industriais, com requerimentos de elevado desempenho, o SIMCON pode ser a alternativa quando o tipo de reforço ou materiais convencionais não são suficientes.

2.3.2.4 *Ductil Concrete (DUCON)*

Segundo Schneide & Reymendt, 2008, o DUCON é o resultado da combinação entre uma micro-malha tridimensional e HPC ou UHPC auto-compactáveis, nomeadamente os *Self-Compacting High Performance Concrete (SCHPC)* e os *Self-Compacting Ultra High Performance Concrete (SCUHPC)*, Figura 2.7. A micro-malha ou micro-reforço resulta de trabalhos de pré-fabricação e é constituída por múltiplas camadas de malhas de aço, com espaçamentos variáveis (entre 6 e 35 mm), ligadas tridimensionalmente entre si, sendo esta distribuída uniformemente ao longo de todo o volume a betonar. A percentagem de aço utilizada varia entre 1 a 10% por unidade de volume, sendo tipicamente utilizados 6%.



Figura 2.7 - Pormenor de infiltração de calda na micro-malha (Schneide & Reymendt, 2008)

O DUCON combina a elevada ductilidade com a alta resistência, resultando num material com uma capacidade de absorção de energia excepcional.

Na Tabela 2.2 apresentam-se algumas das características deste material:

Tabela 2.2 - Características de DUCON (Schneide & Reymendt, 2008)

Característica	Valor
Resistência à compressão	90-180 MPa (cubo)
Resistência à flexão	16-75 MPa
Resistência à tracção	9-20 MPa
Resistência ao corte	3-16 MPa
Módulo de elasticidade	> 35 GPa
Espessura	≥ 10 mm - 500 mm

Uma das grandes vantagens deste material resulta da ajustabilidade do seu desempenho. As várias características do micro-reforço permitem adequar o desempenho deste material à especificidade da aplicação. Na Figura 2.8, estão representadas as curvas de tensão-deformação, resultantes de ensaios de resistência à flexão, apresentando três possibilidades diferentes de ajustamento do desempenho do DUCON, A, B e C. Note-se que as curvas associadas ao betão convencional (cinzento) e ao FRC (azul) estão deslocadas horizontalmente para tornar o gráfico legível.

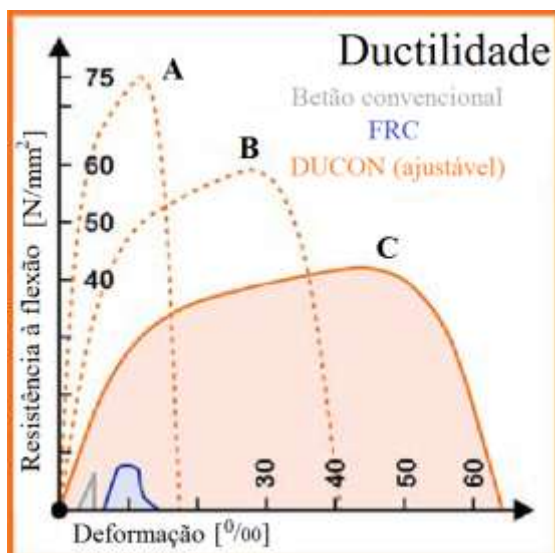


Figura 2.8 - Diagrama tensão-deformação para três ajustamentos diferentes de DUCON, A, B e C, em comparação com betão convencional e o típico FRC (Schneide & Reymendt, 2008)

Este material tem sido alvo de estudo no que respeita à resistência aos impactos, sendo considerado um material com excelente comportamento nesta área; por isso, há já algumas aplicações neste ramo. DUCON é utilizado no reforço estrutural por encamisamento às acções sísmicas e impactos, em estruturas existentes (Figura 2.9), sendo também utilizadas cofragens colaborantes deste material em pilares.



Figura 2.9 - Reforço de pilar, em estrutura existente, para protecção sísmica (Schneide & Reymendt, 2008)

As características deste compósito permitem também uma grande variedade de soluções arquitectónicas, sendo possível adaptar o micro-reforço a várias geometrias e conceber elementos bastante esbeltos.

2.3.2.5 *Textile Reinforced Mortar (TRM)*

Embora a investigação do reforço com materiais cimentícios com têxteis se tenha iniciado no início da década de 80, a evolução nesta área progrediu muito lentamente até ao final da década de 90. Contudo, nos últimos anos a comunidade científica dedicou um esforço considerável na utilização deste tipo de compósitos no reforço estrutural, surgindo assim o Textile-Reinforced Mortar. (Bournas & Triantafillou, 2008)

O TRM é um material essencialmente desenvolvido para o reforço estrutural por encamisamento. Este tipo de reforço é feito a partir da aplicação, nos elementos a reforçar, de uma longa malha têxtil unidireccional ou em trama com fibras dispostas no mínimo em duas direcções (geralmente ortogonais), sendo tipicamente utilizadas malhas de fibras de vidro ou de carbono. As fibras são, posteriormente, impregnadas por argamassa concebida à base de ligantes inorgânicos (por exemplo, argamassa de cimento), Figura 2.10. A argamassa deverá apresentar baixa retracção, trabalhabilidade elevada (a aplicação deve ser possível com recurso a talocha), alta viscosidade e baixa taxa de perda de trabalhabilidade.



Figura 2.10 - Encamisamento de pilar com TRM (Bournas & Triantafillou, 2008)

A malha de fibras é orientada consoante a direcção mais conveniente e pode ser ajustável através da quantidade, do espaçamento e da largura de tiras de fibras utilizadas em cada direcção, influenciando assim as características mecânicas do material e a facilidade de impregnação da argamassa, através das aberturas da malha. (Triantafillou, 2011)

A maioria dos estudos desenvolvidos nesta área têm-se centrado no reforço à flexão ou ao corte. Num destes estudos, Brueckner, *et al*, (Brueckner, Ortlepp & Curbach, 2006), concluíram que o

TRM tem um bom potencial no que respeita ao reforço de elementos de betão, verificando-se o aumento da resistência ao corte e flexão, diminuição das deformações e da abertura de fendas.

Bournas, *et al* (Bournas & Triantafillou, 2008) desenvolveram uma campanha experimental para determinar a eficiência deste material, no reforço de pilares de betão armado com deficiências (encurvadura da armadura longitudinal ou ligações deficientes nas zonas de emendas), solicitados a ações cíclicas. Segundo este estudo, o reforço com TRM permite aumentar a capacidade de deformação cíclica e dissipação de energia, retardando a encurvadura e prevenindo a rotura nas zonas de emendas.

Todos os resultados obtidos nestes estudos indicam que o reforço estrutural com TRM é bastante promissor. De forma a determinar mais campos de aplicação e capacidades do TRM, vários estudos têm sido desenvolvidos nos últimos anos. Estes estudos podem ser consultados em várias bibliografias, nomeadamente, Häußler-Combe & Hartig, 2007, Hegger & Voss, 2008, Larbi, Contamine, Ferrier & Hamelin, 2010, Contamine, Larbi & Hamelin, 2011, Schladitz, Frenzel, Ehlig & Curbach, 2012, Larbi, Contamine & Hamelin 2012.

2.3.2.6 Calda de Cimento Reforçada com Fibras Unidireccionais (CRFU)

A CRFU é um material que, ao contrário dos outros CCRF desenvolvidos até então, é, como referido anteriormente, reforçado com uma manta não-tecida de fibras de aço contínuas e unidireccionais. Dado o comprimento e reduzido diâmetro das fibras, a sua esbelteza tende para infinito ($l_f/d_f = \infty$). Como já referido, este compósito foi desenvolvido em 2012 por Ana Gião G. Reis, na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, com o principal intuito de reforçar, por encamisamento de reduzida espessura, vigas e pilares de betão armado. Este material será alvo de estudo neste trabalho, pelo que se dará especial destaque a esta secção.

A CRFU consiste em calda de cimento de elevado desempenho reforçada com fibras unidireccionais, sendo a calda produzida com cimento Portland CEMI 42,5R, sílica de fumo (SF), superplastificante (SP) com uma relação a/l de 0,3.

Calda de Cimento

A eficiência da reparação ou reforço estrutural com CRFU dependerá directamente da qualidade da calda de cimento, sendo, além das suas propriedades mecânicas, a sua penetrabilidade, uma das características mais relevantes. Pretende-se que a calda penetre uma manta densa de fibras e para se obter uma matriz compacta é indispensável que a calda tenha uma boa capacidade de preencher vazios. Além da viscosidade e características mecânicas, factores como a retracção, a taxa de perda de trabalhabilidade e a influência da temperatura na trabalhabilidade são também decisivos na escolha do tipo de calda a utilizar.

As propriedades da calda de cimento dependem dos componentes utilizados e suas dosagens, sendo as suas propriedades no estado fresco influenciadas também pela metodologia de produção. A calda adoptada na produção de CRFU é o resultado da optimização dessas dosagens e metodologia de concepção, efectuada através de vários estudos recentemente desenvolvidos por diversos autores. As campanhas experimentais, neste sentido, foram levadas a cabo pelas Professoras Ana A. Brás e Ana Gião G. Reis e pelos Professores Válter Lúcio e Carlos Chastre, na Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNL.

Segundo Brás, Gião, Lúcio & Chastre, 2012, pretendeu-se que o compósito cimentício fosse dotado das seguintes características:

- Comportamento autocompactável;
- Alta resistência à compressão e à tracção;
- Baixa retracção;
- Facilidade de aplicação na cofragem que confina as fibras para o reforço.

Foram testadas caldas de cimento para relações de água/ligante (a/l) de 0,4, 0,3 e 0,28, diferentes dosagens de sílica de fumo (0; 2%; 4%) e de superplastificantes (0; 0,2%; 0,4%; 0,5%; 0,7%). Os trabalhos debruçaram-se sobre estudos reológicos, de retracção, caracterização mecânica, modo e condições de execução, nomeadamente, a temperatura, o tempo e sequência da mistura. No seguimento dos estudos concluiu-se que a composição da calda com CEM I 45,2R+2%SF+0,5%SP e uma relação $a/l=0,3$ exprime as melhores propriedades, tanto no estado fresco como no estado endurecido, em que as adições utilizadas foram o SP Sika Viscocrete 3005 e a SF Mapeplast SF.

Verificou-se nessa mistura, uma acentuada perda da trabalhabilidade para temperaturas acima dos 35°C, no entanto, abaixo deste limite, a calda de cimento apresenta um comportamento autocompactável e um tempo útil para aplicação de 45 minutos, sendo também obtidos resultados satisfatórios de retracção e resistência à compressão.

Fibras de aço

As fibras de aço, utilizadas na produção de CRFU (cedidas pela Favir), são produzidas a partir da laminação de varões de aço com 3,1 mm de diâmetro, resultando numa malha não-tecida de finos filamentos de aço contínuos e unidireccionais (Gião; Lúcio; Chastre & Brás, 2012).

Durante a fase de execução pode orientar-se as fibras segundo a direcção mais conveniente e a geometria das mesmas garante que o comprimento de embebimento é suficiente para prevenir uma rotura por deslizamento. Por esse facto a tensão de rotura das fibras é preponderante na resistência do compósito, havendo por isso, comparativamente com uma rotura por deslizamento, segundo Barros (Barros, 1996), um aumento da capacidade resistente.

Caracterização mecânica do aço

A caracterização mecânica do varão de aço, utilizado na produção da CRFU, foi realizada por Ana Gião, *et al* (Gião; Lúcio; Chastre & Brás, 2012). Na tabela seguinte, apresentam-se os resultados dos ensaios de tracção realizados a três fios de aço com 3,1 mm de diâmetro.

Tabela 2.3 - Ensaio de tracção do aço (Gião; Lúcio; Chastre & Brás, 2012)

\emptyset (mm)	Amostras	A (mm ²)	f_{su} (Mpa)	f_{sum} (Mpa)	ϵ_{su} (%)	ϵ_{sum} (%)	ϵ_{sr} (%)	ϵ_{srm} (%)
3,1	1		892,68		1,6		2,7	
	2	7,55	847,41	908,2	1,7	1,8	3,5	3,2
	3		984,64		2,0		3,3	

Em que A – área de secção dos fios de aço;

f_{su} - tensão de rotura do aço;

f_{sum} - valor médio da tensão de rotura do aço;

ϵ_{su} - extensão de rotura do aço;

ϵ_{sum} - valor médio da extensão de rotura do aço;

ϵ_{sr} - valor da extensão máxima do aço;

ϵ_{srm} - valor médio da extensão máxima do aço.

Estudos preliminares de caracterização e determinação do volume máximo de fibras

Uma das precauções a ter em consideração na concepção deste tipo de compósitos cimentícios é a devida ligação fibras-calda. Para isso é necessário compreender qual o volume máximo de fibras a impregnar no compósito, assegurando a distribuição homogénea das mesmas, garantindo uma ligação fibra-calda adequada e uma matriz compacta.

Com o objectivo de determinar o volume máximo de fibras, foi elaborada uma campanha experimental por Ana Gião (Gião, 2012), pretendendo-se testar a incorporação de volumes até 5% de fibras. Foram executados vários provetes de 160x40x40 mm utilizando duas caldas distintas, uma com uma relação água/cimento (a/c) de 0,28 e outra de 0,4, ambas com 3% de superplastificante. Após a execução dos mesmos constatou-se, para volumes de fibras superiores a 3%, que os provetes apresentavam deficiências, verificando-se o aumento de vazios. Concluiu-se assim que o volume máximo de fibras a utilizar na produção de CRFU é de 3%. Os provetes executados foram ensaiados à flexão e à compressão, nas tabelas seguintes apresentam-se os resultados dos mesmos:

Tabela 2.4 - Resultados do ensaio de tracção em flexão de provetes de 160x40x40 mm de CRFU (Gião, 2012)

a/c	t(dias)	% Vol. de fibras	$f_{ct,f}$ (Mpa)
0,28	7	0	10,0
		1	12,6
		2	26,0
		3	41,6
	28	1	12,9
		2	30,2
		2	26,4
0,4	7	1	13,1
		2	26,5
		2	27,4
		3	34,6
		3	30,3
	28	4	43,6
		4	41,3
		1	17,8
		2	26,2
		2	32,7
	3	43,4	
	3	37,1	

Tabela 2.5 - Resultados do ensaio de compressão, aos 28 dias de cura, de provetes de 160x40x40 mm de CRFU (Gião, 2012)

a/c	% Vol. de fibras	f_c (Mpa)
0,28	0	84,8
	1	87,7
	1	86,4
	2	76,3
	2	84,5
	3	86,8
	3	89,1
0,4	1	80,0
	1	79,4
	2	69,9
	2	69,8
	3	64,9
	3	69,0
	4	73,5
4	64,9	

Verifica-se que a resistência à tracção por flexão é proporcional ao volume de fibras utilizado. Na resistência à compressão os dados não evidenciam uma relação com o volume de fibras adoptado, esse facto poderá ser justificado pelo índice de vazios.

Com o intuito de otimizar a mistura, foram elaborados ensaios para determinar a influência das dosagens de superplastificante (SP) e sílica de fumo (SF) na resistência à compressão da calda, com uma relação água/ligante (a/l) de 0,3 (Brás, Gião, Lúcio & Chastre, 2012). Nas figuras seguintes apresentam-se os gráficos resultantes desse estudo:

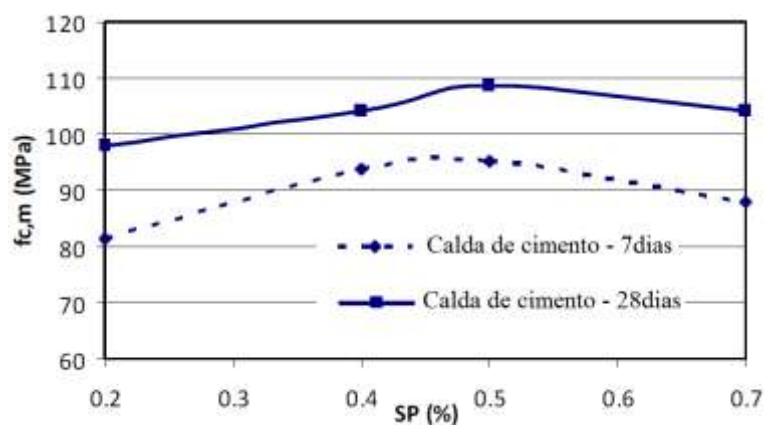


Figura 2.11 – Influência da dosagem de SP na resistência à compressão da calda (Brás, Gião, Lúcio & Chastre, 2012)

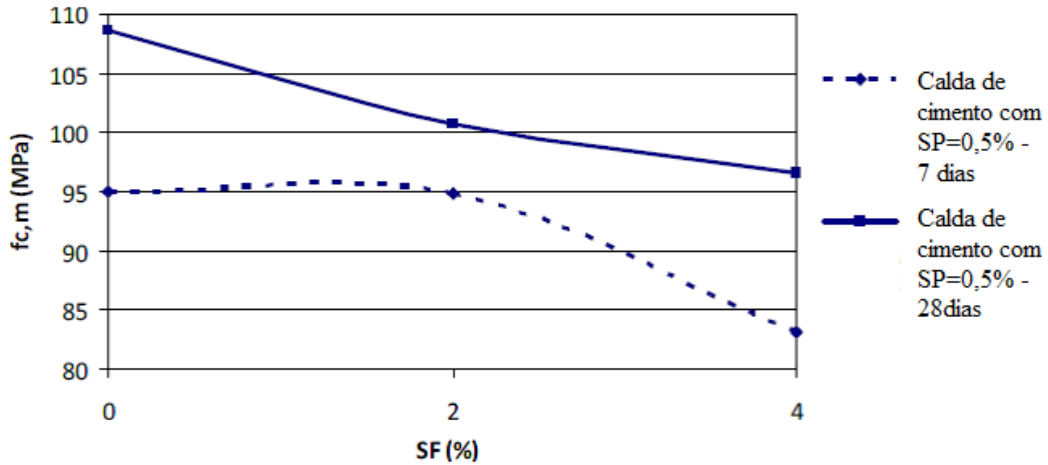


Figura 2.12 - Influência da dosagem de SF na resistência à compressão da calda (Brás, Gião, Lúcio & Chastre, 2012)

Segundo estudos reológicos efectuados no seguimento deste trabalho, o melhor comportamento da calda no estado fresco é dado para 0,5% de SP e como se pode verificar pela Figura 2.11, essa dosagem, também conduz ao melhor desempenho à compressão. Verificou-se que o aumento da dosagem de SF leva à diminuição da resistência à compressão aos 7 e 28 dias de cura. Isto poderá ser justificado por a sua granulometria ser superior à do cimento CEM I 42,5R, Figura 2.13, conduzindo a uma matriz menos densa. Estudos neste âmbito foram efectuados verificando-se que, em provetes com 365 dias, a adição de SF aumenta a porosidade da calda (Brás, Gião, Lúcio & Chastre, 2012). No entanto, para essa idade de cura a calda com 2% de SF apresenta um ligeiro aumento da resistência face à calda sem SF. Além disso, a SF proporciona melhor comportamento no estado fresco e menor retracção (Gião; Lúcio; Chastre & Brás, 2012), sendo por isso considerada uma dosagem de 2% nesta mistura.

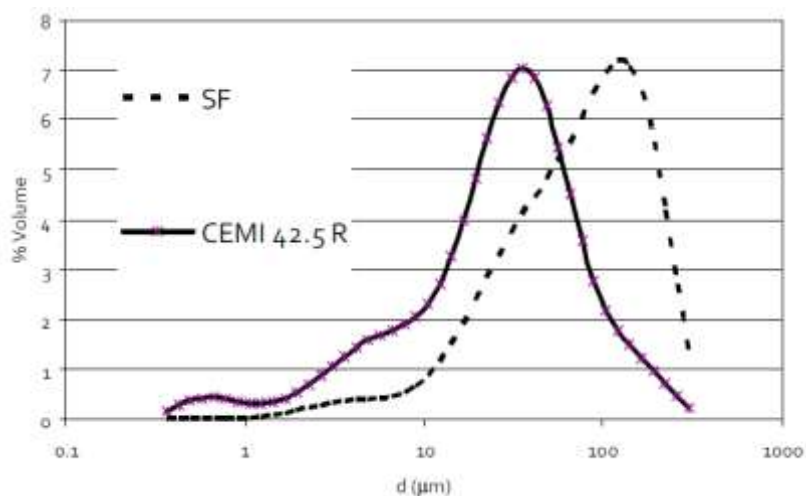


Figura 2.13 – Curvas granulométricas da SF e do CEMI 42,5R (Brás, Gião, Lúcio & Chastre, 2012)

Caracterização mecânica de CRFU

Com base nos resultados das campanhas experimentais preliminares, enunciadas anteriormente, obteve-se a composição óptima do compósito, cujas dosagens estão enunciadas na seguinte tabela:

Tabela 2.6 - Composição de Calda Reforçada com Fibras Unidireccionais (Gião, 2012)

Composição de CRFU		
Cimento Portland Tipo I Classe 42,5R	-	1536 Kg/m ³
Sílica de fumo	2%	31 Kg/m ³
Rácio água-ligante	0,3	470 Kg/m ³
Superplastificante Sika Viscocrete 3005	0,5%	8 Kg/m ³
Fibras de aço vol. (%)	3%	

Com a composição referida, foi elaborada por Ana Gião G. Reis (Gião, 2012), uma campanha experimental que visou a caracterização mecânica deste material. Neste sentido, foram elaborados alguns ensaios de determinação do módulo de elasticidade, resistências à compressão e tracção.

Uma vez que, a norma Alemã DIN 1048-5 (1991), prevê a utilização de provetes cúbicos 150 x 150 x 150 mm nos ensaios de tracção por compressão diametral recorreu-se a este tipo de provetes por facilidade de execução. Os procedimentos seguidos foram elaborados segundo os critérios preconizados nesta norma.

Para determinar o módulo de elasticidade e resistência à compressão produziram-se provetes tubulares de secção circular com 300 mm de altura, 150 mm e 110 mm de diâmetro externo e interno, respectivamente. O que motivou a execução de provetes deste tipo, foi a facilidade de execução e o facto de este material ser concebido para aplicação de encamisamento de reduzida espessura no reforço estrutural.

Foram ensaiados 6 provetes tubulares de secção circular e 6 provetes cúbicos, em que, para cada um dos tipos, a matriz cimentícia foi caracterizada em 3 dos provetes sendo os outros 3 ensaiados com CRFU com volume de 3% de fibras. Os resultados desses ensaios apresentam-se nas Tabelas 2.7, 2.8 e 2.9 e nas Figuras 2.14, 2.15 e 2.16 são apresentados os modos de rotura dos provetes de calda e CRFU com 3% vol. de fibras ensaiados à compressão diametral e os modos de rotura verificados nos ensaios de compressão para a CRFU com 3% de fibras, respectivamente.

Tabela 2.7 - Valores de resistência à tracção por compressão diametral em provetes cúbicos da calda de cimento e calda reforçada com fibras (Gião; Lúcio; Chastre & Brás 2012)

% Vol. de fibras.	Provete	F_u (KN)	$f_{ct,sp}$ (MPa)	f_{ctm} (MPa)
0	1	53	1,50	1,35
	2	61	1,73	1,56
	3	52	1,47	1,32
3	1	474	13,41	12,07
	2	489	13,84	12,46
	3	*		

(*) O provete 3 apresentava deficiências, o que conduziu à sua rotura prematura

Em que F_u - força última de ensaio

$f_{ct,sp}$ - tensão de rotura à tracção por compressão diametral ou “splitting”

f_{ctm} - tensão aproximada de rotura à tracção simples



Figura 2.14 – Ensaio de tracção por compressão - Modo de rotura da calda (Gião, 2012)



Figura 2.15 - Ensaio de tracção por compressão - Modo de rotura da CRFU (Gião, 2012)

Tabela 2.8 - Valores do módulo de elasticidade para a calda de cimento e calda reforçada com fibras (Gião; Lúcio; Chastre & Brás, 2012)

% Vol. de fibras.	Provete	E_c (GPa)	E_{cm} (GPa)
0	1	25,03	
	2	23,58	25,06
	3	26,56	
3	1	22,65	
	2	23,17	23,13
	3	23,58	

Em que E_c - módulo de elasticidade estático obtido por compressão

E_{cm} - módulo de elasticidade médio

Tabela 2.9 - Valores da resistência à compressão da calda de cimento e calda reforçada com fibras (Gião; Lúcio; Chastre & Brás, 2012)

% Vol. de fibras.	Provete	f_c (MPa)
0	1	95,08
	2	*
	3	97,20
3	1	56,22
	2	68,49
	3	72,64

(*) Durante o ensaio de compressão o provete 2 apresentou uma rotura prematura

Em que f_c - tensão de rotura à compressão



Figura 2.16 - Ensaio de compressão - Modo de rotura da CRFU (Gião, 2012)

Da caracterização mecânica efectuada verificou-se, para a matriz cimentícia, uma tensão média de rotura por tracção simples de 1,42 MPa, 25,06 GPa de módulo de elasticidade e 96,14 MPa de

tensão de rotura à compressão. Comparando estes dados experimentais com os obtidos para a CRFU com 3% vol. fibras constata-se um aumento da resistência à tracção de 88,4%. Contudo, ao contrário do esperado, no que respeita ao módulo de elasticidade e resistência à compressão verifica-se uma diminuição de 7,7% e de 31,6%, respectivamente. Este facto pode resultar do aumento do índice de vazios da CRFU comparativamente com matriz cimentícia.

Ensaios de compressão em cubos confinados com CRFU

Outra das campanhas, levadas a cabo por Ana Gião G. Reis (Gião, 2012), foi elaborada com o intuito de determinar o acréscimo de resistência à compressão, proporcionado pelo confinamento de CRFU. Nessa campanha foram elaborados 9 ensaios de compressão a provetes cúbicos de betão com 150 mm de aresta. Foram ensaiados 3 provetes reforçados com 20 mm de CRFU para cada um dos volumes de fibras: 0%, 1% e 3%. É de salientar que este tipo de ensaios não simula uma situação real de confinamento (em que o material confinante é solicitado na direcção perpendicular ao carregamento devido às deformações verificadas no material confinado), uma vez que ambos os materiais são solicitados à compressão. Neste estudo, verificou-se que os modos de rotura se deram por tracção do material numa das facetas do cubo, constatando-se uma boa aderência entre o compósito e o betão.

Os resultados obtidos em provetes confinados com CRFU com 3% vol. de fibras, comparativamente com os provetes reforçados com compósito sem fibras, apontam para acréscimos de resistência à compressão na ordem dos 17%. Face aos resultados obtidos apenas com reforço de calda, a incorporação de 1% de vol. de fibras no compósito revelou-se pouco significativa, obtendo-se a mesma gama de resultados de resistência à compressão. Tal facto indicou que a resistência à tracção da calda é semelhante à do compósito com 1% vol. de fibras. Ainda assim, com a adição de fibras, verificou-se um modo de rotura menos frágil.

Campos de aplicação da CRFU

Como referido anteriormente, a Calda Reforçada com Fibras Unidireccionais é um material desenvolvido para reforçar, por encamisamento, vigas e pilares de betão armado, havendo a possibilidade de fazê-lo “in-situ” ou em processo de pré-fabricação, recorrendo a cofragens colaborantes deste material.

Há alguns estudos, recentemente desenvolvidos por Ana Gião G. Reis (Gião, 2012), no que respeita à aplicabilidade de CRFU no reforço estrutural, nomeadamente no reforço por encamisamento das zonas comprimidas de vigas e de ligações viga-pilar.

Reforço das zonas comprimidas de vigas

Com o objectivo de avaliar a eficiência deste material, foi desenvolvida, por Ana Gião (Gião, 2012), uma campanha experimental de ensaios à flexão de vigas que apresentavam cintagem insuficiente. Nestes ensaios pretendeu-se determinar a melhoria da ductilidade, capacidade de absorção de energia e resistência, resultante do encamisamento e da substituição do recobrimento por encamisamento na zona comprimida das vigas.

Realizaram-se ensaios monotónicos de flexão em 4 pontos das vigas de betão armado. Na Figura 2.17 apresenta-se a pormenorização da armadura de referência. Foram ensaiados 4 modelos de vigas diferentes que apresentavam armadura interna semelhante mas com soluções de recobrimento e encamisamento diferentes, Figura 2.18. O modelo de referência das vigas foi dimensionado admitindo rotura do betão antes da cedência das armaduras traccionadas.

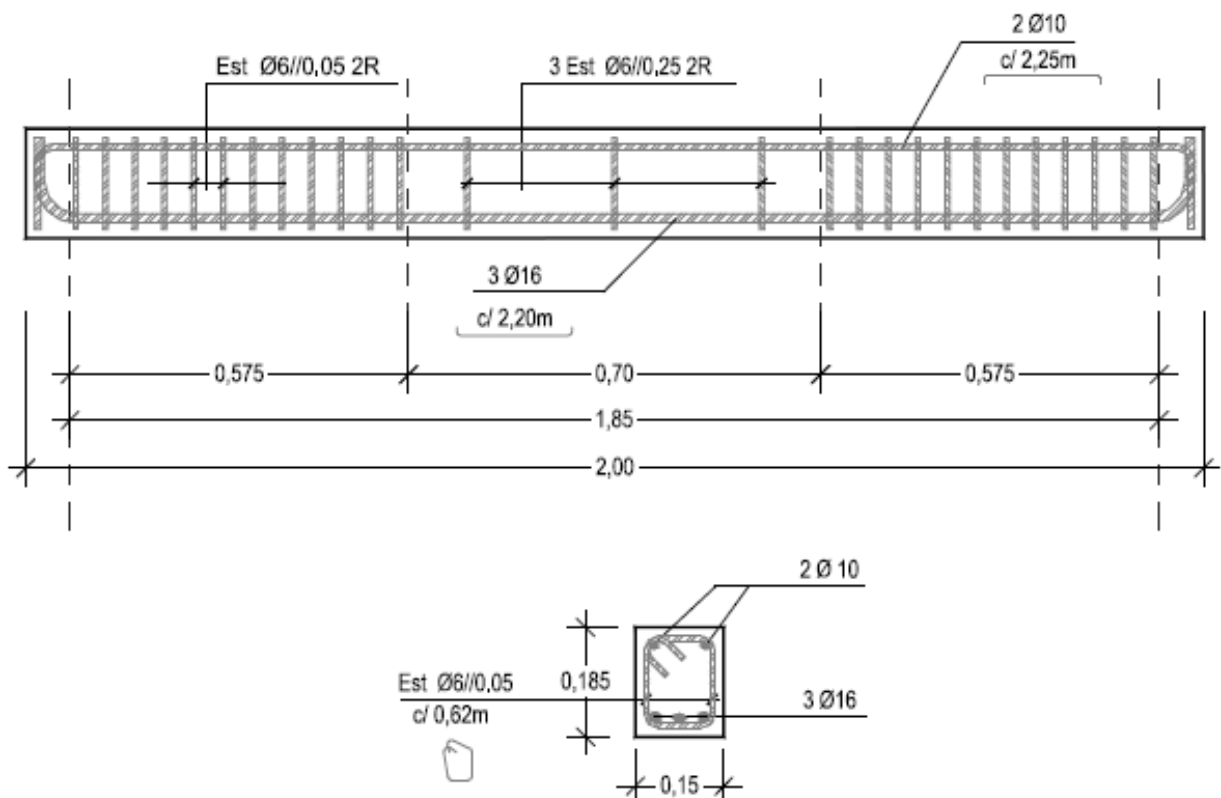


Figura 2.17 - Pormenorização da armadura da viga de referência (Gião, 2012)

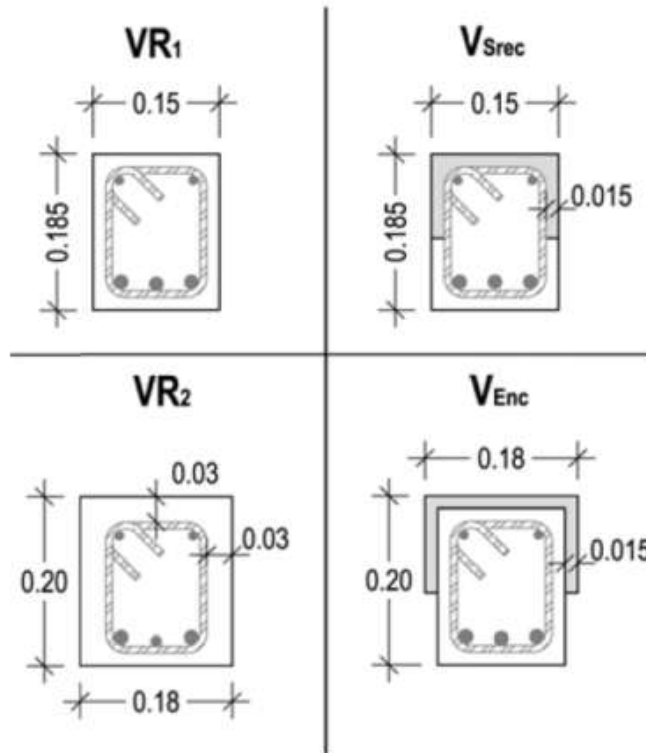


Figura 2.18 - Secções transversais dos modelos experimentais (Gião, 2012)

- **VR₁**: viga de referência com uma secção transversal de 0,15x0,185 m;
- **V_{Srec}**: modelo que substitui o recobrimento da zona comprimida do troço central, com CRFU com um volume de 3% de fibras dispostas paralelamente à secção transversal;
- **VR₂**: viga de referência com secção transversal 0,18x0,20 m;
- **V_{Enc}**: modelo com encamisamento da zona comprimida do troço central, com uma camada de 15mm de espessura de CRFU com um volume de 3% de fibras (apresentando uma secção transversal com uma altura de 0,20 m e uma largura da zona comprimida de 0,18 m, semelhante ao modelo VR₂).

O esquema do sistema de ensaio monotónico de flexão sob 4 pontos de carga é ilustrado pela Figura 2.19.

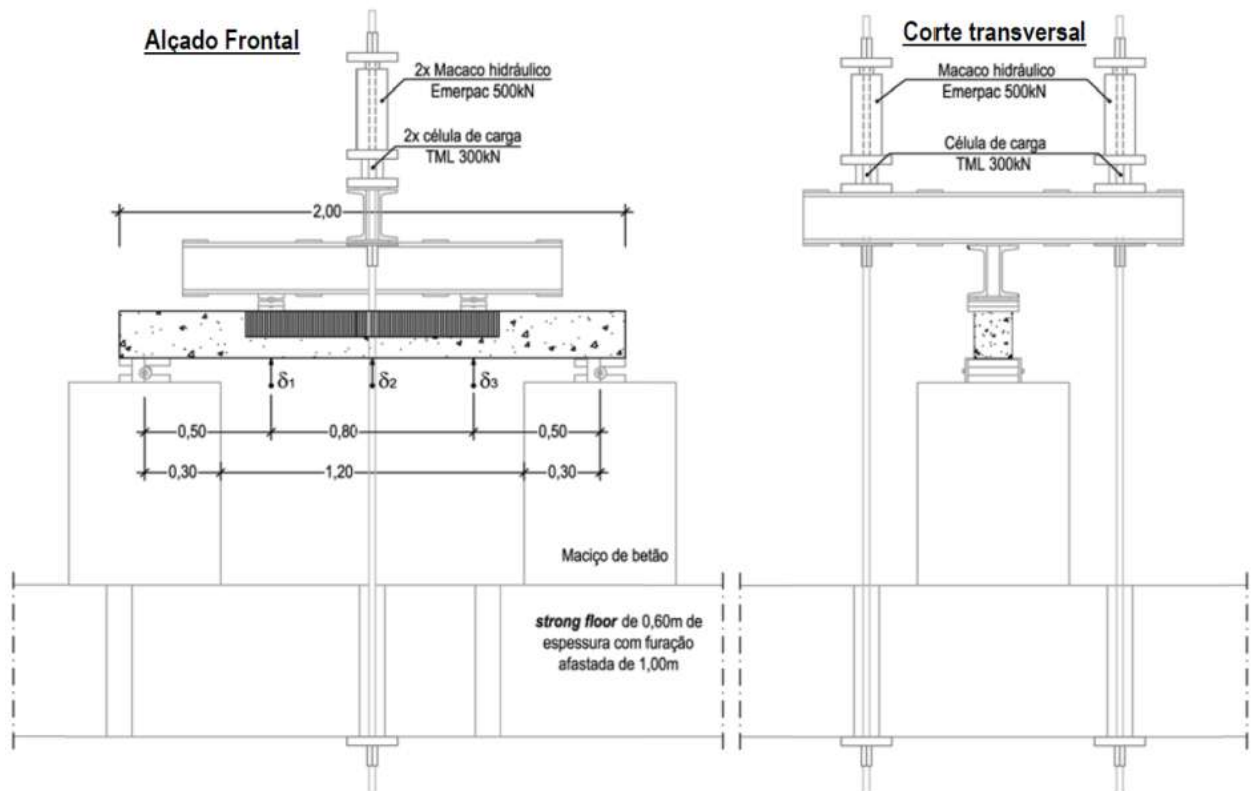


Figura 2.19 - Esquema do sistema de ensaio de flexão (Gião, 2012)

A rotura dos modelos ocorreu por compressão do betão no tramo central da viga. Verificou-se, na face superior da zona central, o destacamento progressivo do recobrimento, que foi acentuado com a encurvadura dos varões longitudinais da armadura superior ao longo da sua extensão livre (entre cintas).

A Figura 2.20 ilustra os gráficos força-deslocamento resultantes dos ensaios efectuados.

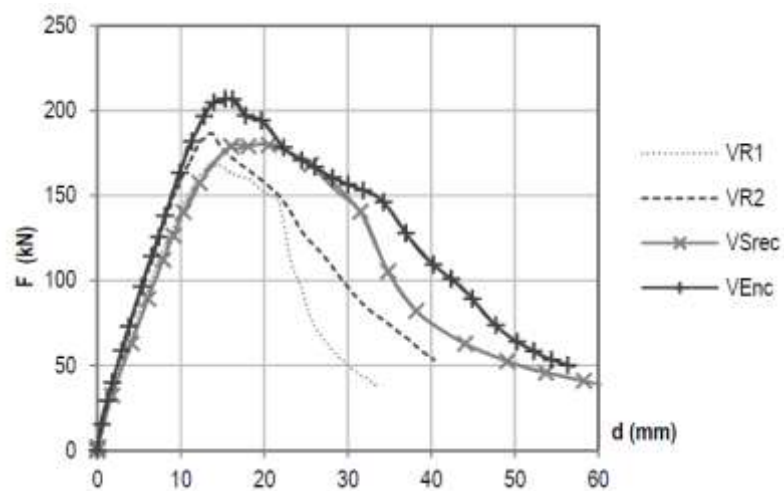


Figura 2.20 - Gráfico força-deslocamento dos modelos experimentais (Gião, 2012)

Para avaliar a eficiência da solução de reforço em termos de resistência, ductilidade e/ou dissipação de energia foram analisados alguns parâmetros. A Tabela 2.10 ilustra esses parâmetros.

De modo a proceder à análise dos resultados experimentais, admitiu-se como critério de rotura o instante em que a força atingiu 85% da força máxima.

Tabela 2.10 - Parâmetros de análise entre modelos (Gião, 2012)

	F_u (KN)	$F_u/F_{u,VRi}$	W_{acum} (KNm)	$W_{acum}/W_{acum,VRi}$
VR ₁	169,3	-	2,5	-
V _{Srec}	180,5	1,07	3,9	1,56
VR ₂	186,6	-	2,5	-
V _{Enc}	207,1	1,11	3,4	1,36

Em que F_u – carga experimental última

$F_{u,VRi}$ – carga experimental última da viga de referência VR_i

W_{acum} – energia dissipada acumulada durante o ensaio até ao instante em que a força atinge 85% da força máxima

$W_{acum,VRi}$ – energia dissipada acumulada, da viga de referência VR_i, durante o ensaio até ao instante em que a força atinge 85% da força máxima

Analisando o quociente $F_u/F_{u,VRi}$ (que traduz o acréscimo de capacidade resistente comparativamente com o modelo de referência) pode concluir-se que ao substituir o recobrimento, da viga de referência VR₁, por CRFU se obtém um aumento de 7 % e o encamisamento da viga de referência VR₂ conduz a um aumento de 11%.

Dado o comportamento pouco dúctil do recobrimento de betão, a capacidade de dissipação de energia dos modelos de referência é semelhante. No entanto, verifica-se um ganho de energia dissipada nos modelos reforçados com CRFU, havendo um aumento de 56% e 36% comparativamente com as vigas de referência VR₁ e VR₂, respectivamente.

Com os resultados obtidos neste estudo, pode concluir-se que o reforço com CRFU conduziu ao aumento da resistência, da capacidade de dissipação de energia e a um comportamento mais dúctil.

Reforço de ligações viga-pilar

Um dos princípios de concepção sísmica em estruturas porticadas previsto no Eurocódigo 8 (NP EN 1998-1, 2010), consiste em garantir que as rótulas plásticas, onde se desenvolve o comportamento não-linear, se formem nas vigas e não nos pilares. Este é o chamado princípio do pilar forte – viga fraca. Do ponto de vista do comportamento das estruturas porticadas esta deverá ser a metodologia de concepção a adoptar, pois a formação de rótulas ao nível dos pilares pode conduzir a mecanismos de rotura indesejáveis e com menor dissipação de energia.

De modo a avaliar a eficácia do reforço da ligação viga-pilar foi elaborada, por Ana Gião G. Reis (Gião, 2012), uma campanha experimental que prevê o reforço na zona comprimida da viga com CRFU com um volume de 3% de fibras. Pretendeu-se nesta campanha simular a acção sísmica num pórtico concebido a partir do princípio pilar forte – viga fraca. Para o efeito foram realizados ensaios quasi-estáticos recorrendo a um procedimento de ensaio cíclico para reproduzir a resposta da zona crítica das vigas, simulando as acções horizontais em simultâneo com as verticais. Numa primeira fase, desenvolveu-se um modelo com pré-esforço exterior (VPE) e posteriormente, adicionalmente ao pré-esforço, desenvolveu-se uma solução de reforço da zona comprimida da viga por encamisamento com CRFU (VPEE). O modelo concebido simula um pórtico com 4,5 m de vão. Contudo, o modelo simplificado corresponde a uma viga em consola com 1,5 m de comprimento. Em todos os elementos de ambos os modelos foi garantido um recobrimento de 20 mm, a pormenorização das armaduras seguiu as regras usuais e as características geométricas desses modelos estão ilustradas na Figura 2.21

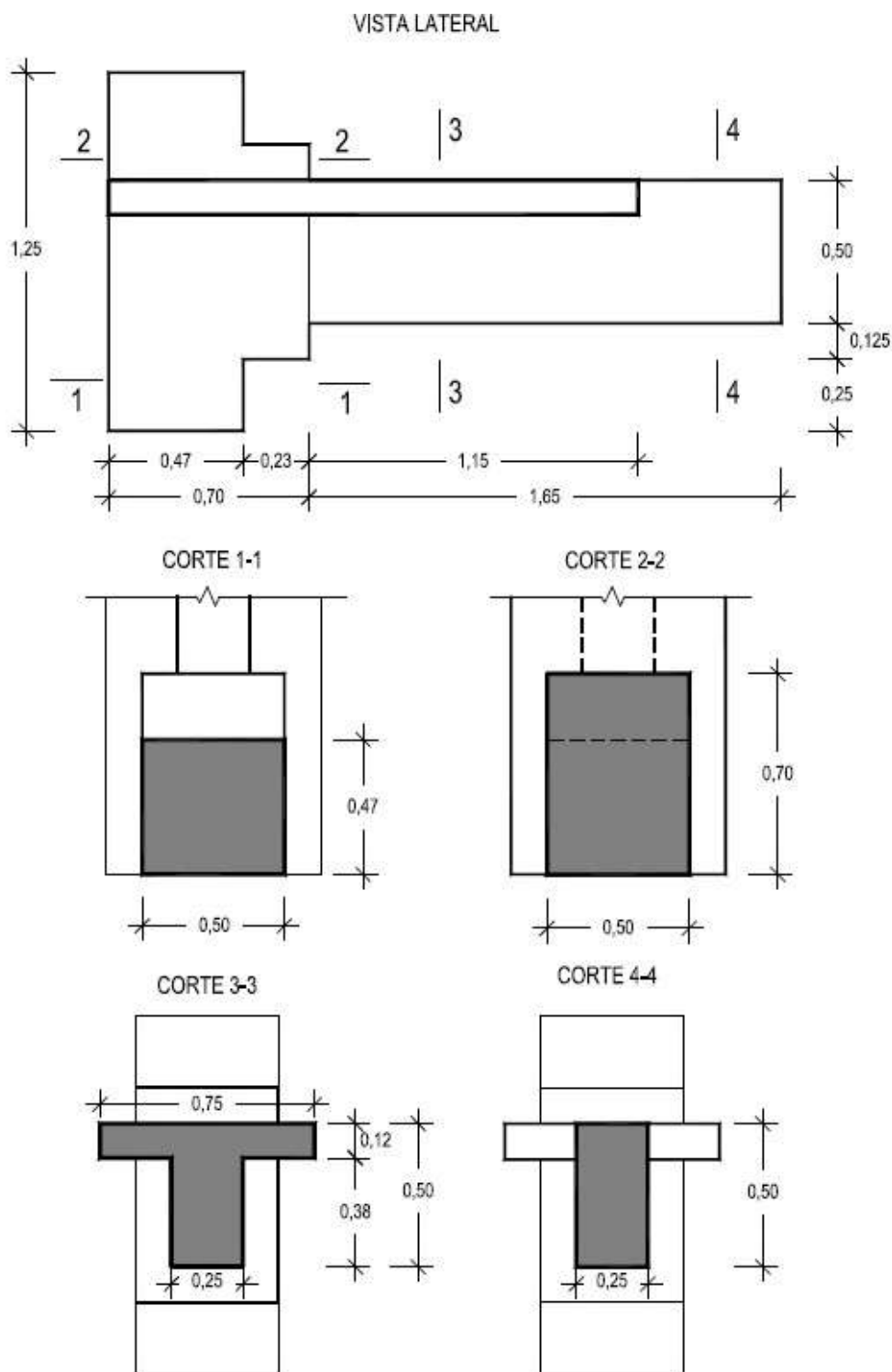


Figura 2.21 - Geometria do modelo experimental (Gião, 2012)

No modelo reforçado, o encamisamento com 20 mm de espessura foi sobreposto ao recobrimento e envolveu toda a alma da viga numa extensão de 600 mm. Na Figura 2.22 está ilustrada a geometria do reforço por encamisamento com CRFU bem como a disposição do pré-esforço.

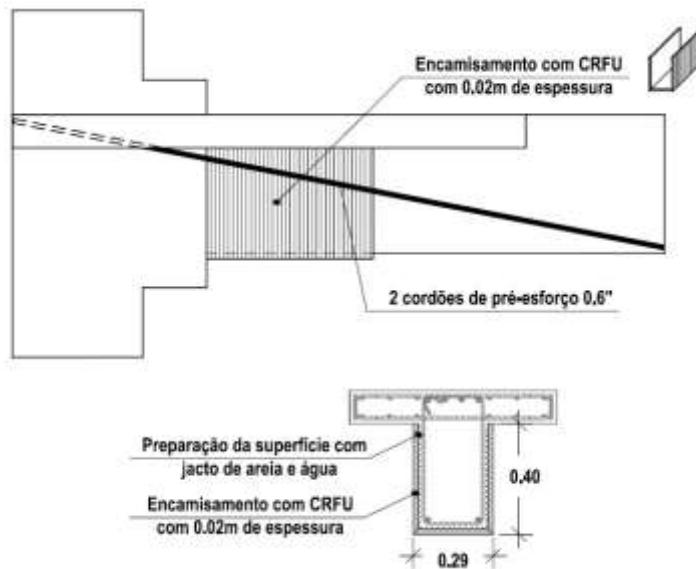


Figura 2.22 - Geometria do modelo reforçado com CRFU e pré-esforço (VPEE) (Gião, 2012)

O esquema de ensaio utilizado e o sistema de aplicação do pré-esforço é ilustrado na figura seguinte.

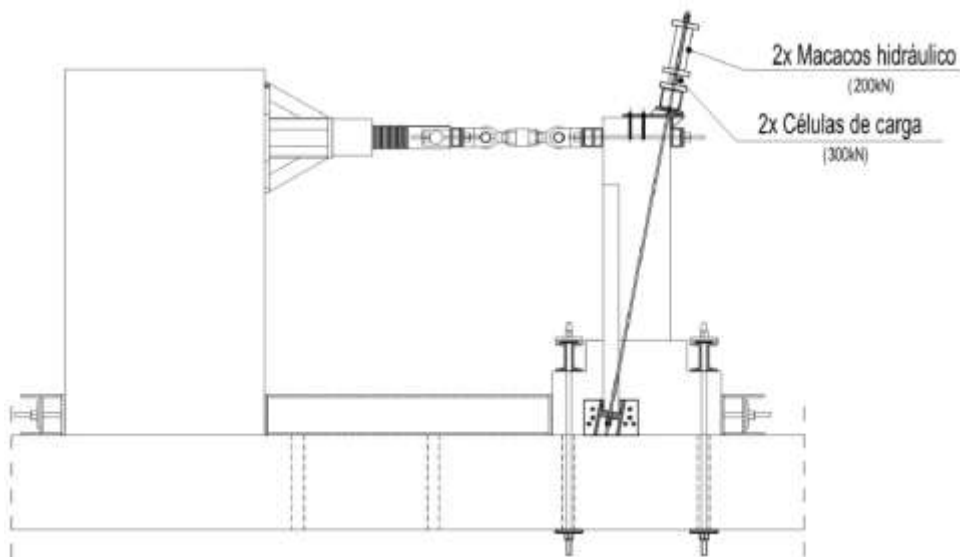


Figura 2.23 - Esquema de ensaio - Sistema de aplicação do pré-esforço (Gião, 2012)

O modelo VPEE (correspondente ao modelo reforçado por encamisamento com CRFU da zona comprimida da viga) apresentou uma resistência superior e deformações residuais menores em relação ao modelo apenas com pré-esforço. O encamisamento com CRFU permitiu retardar o esmagamento do betão, garantindo níveis elevados de deformação associados a extensões

significativas das armaduras sem perda significativa da resistência. Observou-se um aumento de resistência à flexão de 13%, uma redução da deformação residual de 53% e um incremento de energia dissipada de 31%. Os danos observados após a rotura foram inferiores ao do modelo reforçado apenas com pré-esforço, não se verificando a encurvadura dos varões da armadura inferior, Figura 2.24

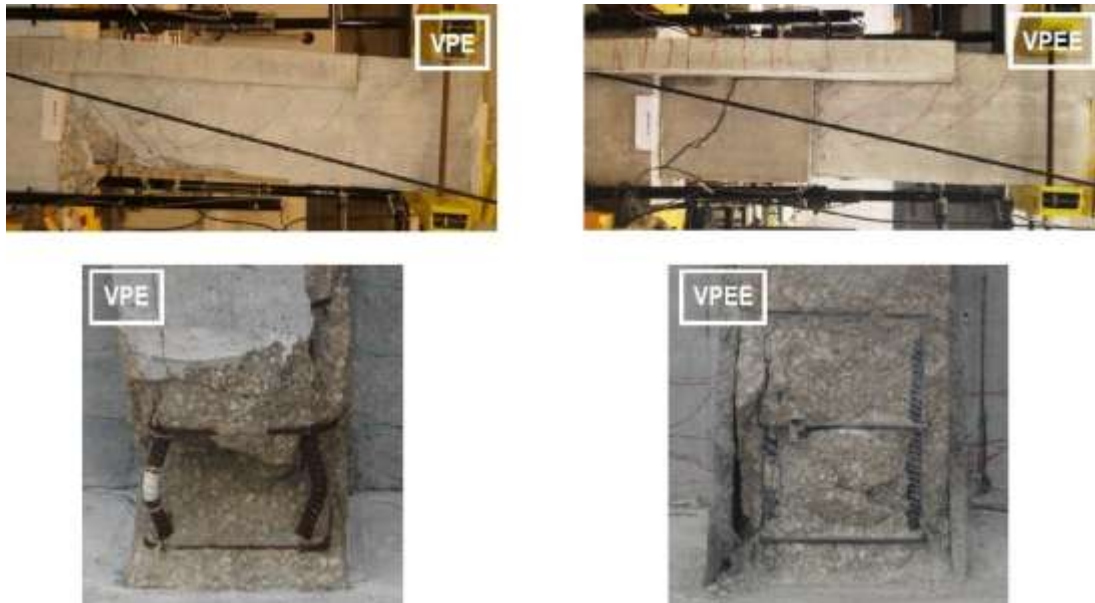


Figura 2.24 - Modo de rotura dos modelos - Alçado lateral e Alçado frontal da zona crítica (Gião, 2012)

CAPÍTULO 3

MATERIAIS UTILIZADOS E CAMPANHA EXPERIMENTAL DE CARACTERIZAÇÃO DA CRFU

3.1 Descrição dos materiais utilizados

Os materiais utilizados na produção de CRFU foram os seguintes:

- Cimento Portland CEMI 42,5 R (Secil);
- Sílica de fumo (Mapeplast SF);
- Superplastificante (Sika Viscocrete 3005);
- Fibras de aço (Favir).

Seguidamente será efectuada a descrição destes materiais referindo algumas das suas propriedades.

3.1.1 Calda de cimento

Como referido no capítulo anterior, pretende-se que a calda de cimento seja autocompactável, apresente elevada resistência mecânica, exiba retracção controlada e seja penetrável em grandes volumes de fibras. Salvaguardando estas características, adoptou-se, no âmbito deste trabalho, uma mistura e procedimento de amassadura semelhantes à desenvolvida em trabalhos anteriormente referidos (Gião; Lúcio; Chastre & Brás, 2012).

A mistura utilizada na calda encontra-se descrita na tabela seguinte:

Tabela 3.1 - Composição da Calda de Cimento (Gião, 2012)

Calda de Cimento		
Cimento Portland Tipo I Classe 42,5R	-	1536 Kg/m ³
Sílica de fumo	2%	31 Kg/m ³
Rácio água-ligante	0,3	470 Kg/m ³
Superplastificante Sika Viscocrete 3005	0,5%	8 Kg/m ³

3.1.1.1 CEM I 42,5R

Neste trabalho, o cimento utilizado foi o cimento Portland CEM I 42,5R, produzido em Portugal pela Secil, produzido de acordo com a NP EN 197-1 e cujas características mecânicas, fornecidas pelo fabricante, são as apresentadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Resistência à compressão do CEM I 42,5R (Secil)

Resistência à compressão (Mpa) - NP EN 196-1	
Resistência nos primeiros dias	Resistência de referência
2 dias	28 dias
≥ 20	$\geq 42,5$ e $\leq 62,5$

Na produção da matriz cimentícia foram utilizados dois lotes de cimento (lote 1 e lote 2), ambos apresentavam indícios de hidratação, pois assumiam na sua composição cimento granulado, sendo, no entanto, mais evidente no primeiro lote. Dada a elevada quantidade de cimento granulado que o lote 1 apresentava, quando se procedeu à produção de CRFU, efectuou-se a peneiração do mesmo de modo a eliminar o cimento que poderia estar hidratado.

Para verificar se as características mecânicas do cimento utilizado se enquadravam nas fornecidas pelo fabricante, executaram-se 24 provetes de argamassa de cimento de 160x40x40 mm, segundo os procedimentos de produção e cura preconizados na norma NP EN 196-1.

Embora o fornecedor contemple apenas a resistência à compressão do cimento como referência, efectuaram-se também ensaios de flexão, reunindo assim mais dados. Os ensaios realizados contemplaram os provetes enunciados na seguinte tabela:

Tabela 3.3 - Provetes 160x40x40 mm ensaiados

	Provetes (nº)	Cura (dias)
Lote 1 e Lote 2	9	28
	3	2

Os ensaios seguiram os procedimentos presentes na NP EN 196-1 e foram levados a cabo no Departamento de Engenharia Civil da UNL. Os ensaios de flexão foram realizados na máquina universal de tracção Zwick com 50 kN de capacidade de carga e uma célula de carga de 2 KN. Para

os ensaios de compressão recorreu-se à prensa Form+Test/Seidner modelo 3000D (actualizada pela *walter+bai*) com capacidade de carga até 3000 kN ou imposição de deslocamentos até 50 mm, Figura 3.1.



Figura 3.1 - Instrumentação utilizada nos ensaios a provetes 160x40x40 de CEM I 42,5R

Os resultados dos ensaios apresentam-se nas seguintes tabelas:

Tabela 3.4 – Resultados dos ensaios à flexão e compressão de CEM I 42,5R com 2 dias de cura

Cimento Lote 1						Cimento Lote 2				
Cura	Provete	$f_{ct,fl}$ (MPa)	$f_{ctm,fl}$ (MPa)	f_c (MPa)	f_{cm} (MPa)	Provete	$f_{ct,fl}$ (MPa)	$f_{ctm,fl}$ (MPa)	f_c (MPa)	f_{cm} (MPa)
2 dias	1	2,91		19,38		1	3,48		19,38	
	2	3,22	3,1	17,50	18,3	2	2,97	3,2	19,38	19,4
	3	3,04		18,13		3	3,07		19,38	

Tabela 3.5 – Resultados dos ensaios à flexão e compressão de CEM I 42,5R com 28 dias de cura

Cimento Lote 1						Cimento Lote 2				
Cura	Provete	$f_{ct,fl}$ (MPa)	$f_{ctm,fl}$ (MPa)	f_c (MPa)	f_{cm} (MPa)	Provete	$f_{ct,fl}$ (MPa)	$f_{ctm,fl}$ (MPa)	f_c (MPa)	f_{cm} (MPa)
28 dias	1	7,88		58,13		1	5,36		51,88	
	2	7,92		63,13		2	7,53		50,63	
	3	7,39		58,13		3	7,44		48,75	
	4	7,08		56,88		4	7,11		49,38	
	5	7,93	7,6	62,50	58,1	5	7,00	7,04	49,38	48,8
	6	8,06		54,38		6	6,74		50,63	
	7	7,57		55,00		7	7,61		46,88	
	8	7,05		57,50		8	7,52		45,63	
	9	7,81		57,50		9	7,10		46,25	

Em que $f_{ct,fl}$ – tensão experimental de rotura à flexão

$f_{ctm,fl}$ – valor médio da tensão experimental de rotura à flexão

f_c – tensão experimental de rotura à compressão

f_{cm} – valor médio da tensão experimental de rotura à compressão

Analisando os resultados de resistências à compressão verifica-se que, os valores obtidos em provetes com 2 dias de cura são ligeiramente inferiores ao valor fornecido pelo fabricante. Constata-se também que há alguma dispersão entre os valores obtidos para cimentos de lotes diferentes. No lote 1 o valor médio de resistência à compressão é 16% superior ao do lote 2. É de salientar, que essa dispersão poderá ser justificada pelo facto do cimento do lote 1 ter sido peneirado ao passo que o cimento do lote 2 não passou por esse processo. No entanto, todos os valores de resistência à compressão obtidos em provetes com 28 dias de cura apresentam-se compreendidos entre os valores indicados pelo fornecedor ($42,5 \text{ MPa} \leq f_c \leq 62,5 \text{ MPa}$).

O facto do cimento se apresentar alterado poderia condicionar os dados obtidos no seguimento deste trabalho, tornando-os inválidos. Contudo, embora os resultados obtidos aos 2 dias de cura não tenham sido satisfatórios, uma vez que os ensaios a realizar no seguimento deste trabalho serão efectuados aos 28 dias, presume-se que ambos os lotes de cimento são válidos, perspectivando-se (comparativamente com os resultados obtidos em estudos anteriormente desenvolvidos) resultados aceitáveis no domínio da caracterização mecânica da matriz cimentícia e da CRFU.

3.1.1.2 Aditivos e adjuvantes

Aditivos:

Os aditivos são utilizados na mistura de compósitos com a finalidade de melhorar certas propriedades ou mesmo alcançar propriedades especiais.

Estes produtos são, geralmente, adicionados às misturas em quantidades superiores a 5% da massa de cimento. A NP EN 206-1 contempla dois tipos de adições inorgânicas:

- Tipo I – Adições quase inertes (por exemplo, filler calcário);
- Tipo II – Adições pozolânicas ou hidráulicas latentes (por exemplo, pozolanas, cinzas volantes, escória de alto-forno, sílica de fumo).

Adjuvantes:

Os adjuvantes são materiais adicionados aos compósitos, em pequenas quantidades (inferiores a 5% da massa de cimento), durante o processo de amassadura, com o fim de modificar certas propriedades, quer no estado fresco, endurecido ou ainda na transição de um para o outro. Permitem alterar as propriedades dos materiais, por exemplo, através do aumento da resistência, redução da permeabilidade, manutenção da consistência e redução da razão a/l. Os retentores de água (plastificantes e superplastificantes), os hidrófugos, os aceleradores e retardadores de presa são alguns dos adjuvantes frequentemente utilizados na construção.

Sílica de fumo

A sílica de fumo (SF) ou microssílica é uma pozolana obtida através da captação em filtros, antes da saída para a atmosfera, dos gases de escape resultantes da preparação de metal silício ou de ligas de silício (Coutinho, 2006).

Tal como todas as pozolanas, a SF não endurece por si própria quando misturada com a água. Quando na presença de água, reage à temperatura normal com o hidróxido de cálcio formando silicato de cálcio e aluminato de cálcio, desenvolvendo resistência. Regra geral, a introdução desta adição na mistura de compósitos, embora faça aumentar a dosagem de água para manter a trabalhabilidade constante, usando plastificantes ou superplastificantes, a quantidade de água de amassadura é pouco afectada pela sua introdução (Coutinho, 2006).

Tipicamente, a sílica de fumo diminui a exsudação e a segregação dos compósitos. A diminuição da exsudação pode aumentar o risco de fissuração durante a cura, pois facilmente a velocidade de evaporação da água é superior àquela que chega à superfície, havendo a necessidade redobrada de manter as superfícies húmidas. O calor de hidratação também é menor, o que conduz a uma secagem mais lenta e conseqüentemente menor retracção (Coutinho, 2006).

No estado sólido, a introdução de SF proporciona, geralmente, algumas mais-valias. O facto da granulometria deste aditivo ser, geralmente, inferior à do cimento, proporciona o efeito de filer (refinando a rede porosa), diminuindo a porosidade, aumentando a impermeabilidade e a durabilidade, sendo também a resistência à compressão melhorada com a sua introdução em percentagem adequada (Coutinho, 2006).

Contudo, segundo ensaios preliminares enunciados anteriormente, foi efectuada uma análise granulométrica ao cimento (CEM I 42,5R) e à sílica de fumo (Mapeplast SF fornecida pela Mapei), constatando-se que a granulometria do cimento é inferior à da SF utilizada (Brás, Gião, Lúcio & Chastre, 2012). Por esse facto, a adição desta SF conduz ao aumento da porosidade e leva à

diminuição da resistência à compressão aos 7 e 28 dias de cura. No entanto, os efeitos da SF na capacidade resistente da calda são visíveis mais tarde. Aos 365 dias de cura, segundo Ana Brás, *et al.*, (Brás, Gião, Lúcio & Chastre, 2012), a calda com 2% de SF apresenta um ligeiro aumento da resistência face à calda sem SF.

Os resultados de resistência à compressão da matriz cimentícia podem ser justificados pela reactividade pozolânica da SF, isto é, a capacidade deste aditivo se combinar com o hidróxido de cálcio, que é tanto maior quanto maior for a sua superfície específica.

Ao analisar os resultados obtidos na análise granulométrica, e tendo em consideração outros estudos granulométricos realizados a diferentes tipos de sílica de fumo (Figura 3.2), constata-se que a sílica de fumo utilizada não está finamente pulverizada, tendo por isso menor reactividade pozolânica, menor capacidade cimentante, não contribuindo como filler. Além disso, para a mesma relação *a/l*, ao adicionar-se SF está a diminuir-se a quantidade de clínquer na mistura, resultando assim, para idades de cura prematuras, um compósito menos resistente. Porém as reacções pozolânicas dão-se ao longo do tempo, ocasionando melhorias da resistência aos 365 dias de cura face à calda sem SF.

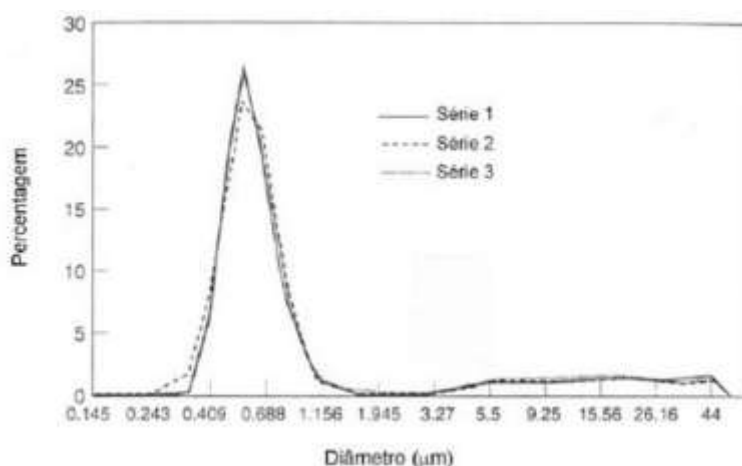


Figura 3.2 – Granulometria de 3 tipos de sílica de fumo (Fidjestöl & Lewis, 1998)

Embora a incorporação de sílica de fumo (Mapeplast SF) não induza melhorias significativas na capacidade resistente da matriz cimentícia, e segundo o estudo de granulometria anteriormente referido, aumente a porosidade do compósito, gera melhorias no estado fresco, nomeadamente no que diz respeito à viscosidade. Além disso, como já referido, na transição do estado fresco para o endurecido, a calda de cimento com SF apresenta menor retracção.

Como já referido, geralmente, os aditivos são introduzidos em quantidades superiores a 5% da massa de cimento. Contudo, na calda utilizada na produção de CRFU adoptou-se apenas 2% de SF,

pois para percentagens superiores verifica-se, segundo os estudos anteriormente referidos, um aumento da porosidade e uma diminuição da resistência à compressão.

Superplastificante

O adjuvante introduzido na mistura utilizada na concepção de CRFU é o superplastificante Sika Viscocrete 3005, este produto é um forte redutor de água. Permite uma elevada redução de água de amassadura ou um aumento marcado da trabalhabilidade. Segundo as características fornecidas pelo fabricante, este superplastificante (SP) é composto à base de uma solução aquosa de policarboxilatos modificados e conduz a um nível de redução de água de 20% a 30%.

A dosagem de SP introduzida na calda de cimento, utilizada para produzir CRFU, à semelhança da dosagem de sílica de fumo, foi obtida, como já referido na secção 0, através de estudos preliminares desenvolvidos por Ana Brás, *et al* (Brás, Gião, Lúcio & Chastre, 2012).

Para determinar a dosagem de superplastificante a adoptar foram realizados estudos reológicos com o intuito de otimizar a mistura, contemplando as características de fluidez desejáveis. Numa das campanhas experimentais foi avaliado o tempo de escoamento no funil de Marsh para caldas com concentrações de 0,2%, 0,4%, 0,5% e 0,7% de SP (em função da massa de cimento), verificando-se uma acentuada diminuição da viscosidade entre as dosagens de 0,2% a 0,5% e uma viscosidade semelhante entre concentrações de 0,5% e 0,7%. Noutra campanha experimental, já enunciada, foram efectuados ensaios de compressão das matrizes cimentícias, para curas de 7 e 28 dias, com as várias percentagens de SP, concluindo-se que as matrizes com 0,5% de SP apresentam maior resistência. Com base nestes estudos foi considerada uma dosagem de 0,5% de superplastificante na mistura.

Como anteriormente citado, neste trabalho, serão utilizadas as dosagens obtidas na optimização da calda levada a cabo nos estudos referidos.

3.1.2 Fibras de aço

Segundo os estudos preliminares, já enunciados (Gião, Válder, Chastre, & Brás, 2012), com o objectivo de concluir qual o volume máximo de fibras que a CRFU suportaria, foi avaliada a penetrabilidade da calda de cimento, a presença de vazios e as propriedades mecânicas de provetes com volumes de fibras de 1% a 5% infiltradas por caldas de cimento com relações de água/cimento de 0,28 e 0,4 e 3% de superplastificante. Neste estudo, para uma relação a/c de 0,4, observou-se a segregação da matriz cimentícia em provetes com 4% de volume de fibras. Constatou-se que, para caldas de cimento com relações a/c de 0,28 não é possível infiltrar volumes acima de 3%. Concluindo-se, como já referido, que o volume máximo de fibras a utilizar, para o material de reforço em causa, é de 3%, sendo, posteriormente, no âmbito desse trabalho, todos os ensaios de caracterização mecânica e de reforço por encamisamento efectuados com essa quantidade.

O presente trabalho terá a importância de estudar o comportamento mecânico de CRFU também para outras percentagens de fibras.

3.1.2.1 Dimensões das fibras

De forma a obter o máximo de informação e compreender o melhor possível as características e comportamento da CRFU, considera-se também necessário determinar as dimensões das fibras nela contidas.

Recorrendo a um paquímetro, com precisão de centésima de milímetro, foi medida a secção transversal de 100 fibras retiradas aleatoriamente de uma amostra. Devido ao facto das fibras apresentarem forma laminar foi necessário realizar a medição segundo duas direcções. Com essa informação foi possível calcular o diâmetro equivalente (\emptyset_{eq}) correspondente a cada uma das fibras.

A dispersão dos diâmetros equivalentes correspondentes às 100 medições efectuadas, apresentam-se na Figura 3.3:

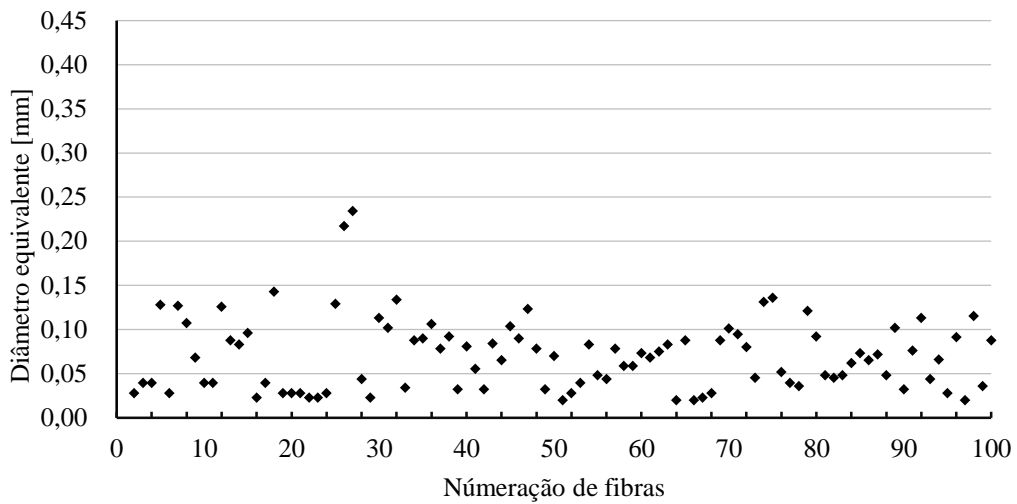


Figura 3.3 – Diâmetros equivalentes correspondentes a cada uma das 100 fibras de aço medidas

Na sequência, e como complemento, dos dados apresentados anteriormente, exibe-se a análise percentual dos dados, para diâmetros compreendidos entre os valores enunciados.

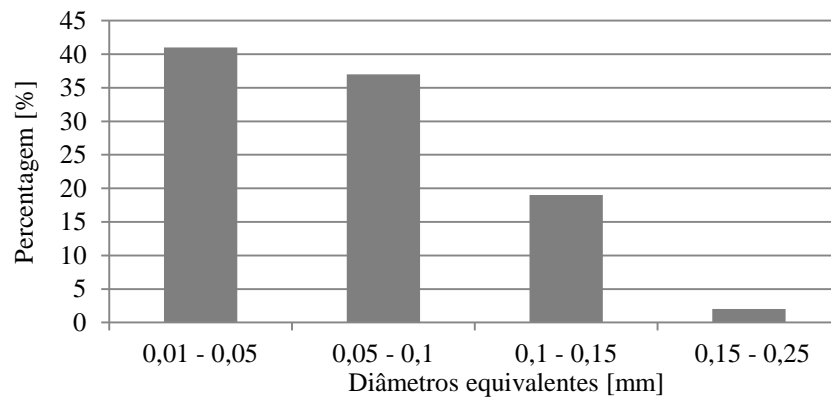


Figura 3.4 - Análise percentual dos diâmetros equivalentes de fibras

A secção transversal destes filamentos metálicos é bastante reduzida, verifica-se que 78% da amostra apresenta um diâmetro equivalente inferior a 0,1 mm.

Realizando a média aritmética dos 100 valores adquiridos neste estudo, obteve-se o diâmetro médio equivalente,

$$\varnothing_{eq}^{med} = 0,07\text{mm}$$

3.2 Definição da campanha de ensaios

A campanha experimental foi definida com o intuito de caracterizar mecanicamente a CRFU, contemplando três tipos de ensaios:

- Ensaios de tracção por compressão diametral;
- Ensaios de determinação do módulo de elasticidade;
- Ensaios de compressão.

Os ensaios foram levados a cabo no Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNL e seguiram os procedimentos preconizados na norma DIN 1048-5 (1991). Os ensaios de tracção por compressão diametral foram efectuados a provetes cúbicos e os de compressão e determinação do módulo de elasticidade a provetes tubulares de secção circular. Para a realização dos mesmos recorreu-se à prensa Form+Test/Seidner modelo 3000D (actualizada pela *walter+bai*) com capacidade de carga até 3000 kN ou imposição de deslocamentos até 50 mm.

Inicialmente, a campanha experimental foi definida com o intuito de caracterizar mecanicamente o material aos 28 dias de cura e para diferentes volumes de fibras, contemplando para os ensaios de tracção por compressão diametral 15 provetes cúbicos de 150 mm de aresta, 6 provetes para cada um dos volumes de fibras adoptados (2% e 3%) e 3 sem incorporação de fibras. Para os ensaios de determinação do módulo de elasticidade e resistência à compressão, definiu-se, inicialmente, 6 provetes tubulares de secção circular com 300 mm de altura, 150 mm e 110 mm de diâmetro externo e interno, respectivamente, para cada um dos volumes adoptados (0%, 1%, 2%, 2,5%, perfazendo 30 ensaios. No entanto, devido a problemas durante a produção de 2 provetes cúbicos e 2 tubulares, os números foram aumentados de 15 para 17 e de 30 para 32, perfazendo assim o número de ensaios válidos, pretendidos inicialmente. Os provetes produzidos, no âmbito deste trabalho, foram ensaiados aos 28 dias de cura. Adicionalmente, também foram ensaiados 6 provetes cúbicos e 6 provetes tubulares com idades de cura mais avançadas (com 315 e 365 dias de cura, respectivamente), em que 3 provetes, de cada uma das geometrias, eram de CRFU com um volume de 3% de fibras e os restantes continham apenas a matriz cimentícia. Estes provetes foram produzidos no seguimento da tese de doutoramento de Ana Gião G. Reis (Gião, 2012), pretendeu-se assim obter a evolução da resistência e módulo de elasticidade ao longo do tempo, da calda de cimento e CRFU com 3% vol. de fibras.

Sumarizando, os provetes ensaiados nesta campanha experimental foram apresentados nas seguintes tabelas:

Tabela 3.6 - Provetes cúbicos ensaiados à tracção por compressão diametral

Provetes cúbicos: 150x150x150 mm		
% Vol. de fibras	Provetes (n°)	Cura (dias)
0	3	28
0	3	315
2	6	28
3	8	28
3	3	315

Nesta campanha foi previamente estabelecido um número de provetes cúbicos de calda de cimento inferior ao número de provetes de CRFU. Essa decisão prendeu-se pelo facto de serem esperados resultados com menor dispersão. Como referido anteriormente, estava previsto o ensaio de 6 provetes de CRFU para cada um dos volumes de fibras adoptados, contudo, a betonagem de 2 provetes com um volume de 3% de fibras foi deficiente e, por esta razão produziram-se 8 provetes em vez de 6.

Tabela 3.7 - Provetes tubulares de secção circular ensaiados para determinação do módulo de elasticidade e da resistência compressão

Provetes tubulares: h=300mm; \emptyset_{ext} =150mm; \emptyset_{int} =110mm		
% Vol. de fibras	Provetes (n°)	Cura (dias)
0	6	28
0	3	365
1	6	28
2	7	28
2,5	6	28
3	7	28
3	3	365

É de referir que na produção de provetes tubulares existem várias condicionantes, entre as quais se podem destacar: a própria geometria do provete, em garantir a uniformidade da espessura do provete e a devida impregnação da calda nas fibras. No trabalho anteriormente desenvolvido (Gião, 2012) não foi avaliada a influência dos vários volumes de fibras no módulo de elasticidade, pelo que, nos provetes testados, se adoptou por uma gama de volumes de fibras mais alargada que nos provetes cúbicos. Por estas razões, também foi previamente estabelecido o mesmo número de provetes independentemente da adição de fibras (6 provetes). No entanto, como referido anteriormente, foi necessário proceder à produção de mais 2 provetes de CRFU. De facto, devido a

problemas durante a betonagem de 1 provete com 3% vol. de fibras e à fendilhação, durante a descofragem, de outro com 2% vol. de fibras, foi necessário produzir mais provetes para substituir os defeituosos, 1 com um volume de 2% de fibras e outro de 3%.

3.3 Produção dos provetes experimentais

Produção da calda de cimento:

O procedimento de produção da calda de cimento contemplou os seguintes passos:

- Mistura a seco de todo o cimento com sílica de fumo (CEM I 42,5R + 2% de Sílica de fumo);
- Introdução de 90% da água de amassadura;
- Mistura durante 3 minutos com auxílio de uma misturadora de eixo vertical, mantendo uma velocidade angular constante de aproximadamente 2100 rpm;
- Adição do superplastificante e os restantes 10% de água;
- Mistura durante mais 3 minutos mantendo a velocidade angular de 2100 rpm.



Mistura do ligante e 90% de água



Aspecto final da calda de cimento

Figura 3.5 - Preparação da calda de cimento

Produção de provetes cúbicos 150x150x150mm:

Para determinar a resistência à tracção, aos 28 dias de cura, da matriz cimentícia e da calda reforçada com volumes de 2% e 3% de fibras, produziram-se os provetes cúbicos apresentados na seguinte tabela:

Tabela 3.8 - Provetes cúbicos produzidos

Provetes cúbicos 150x150x150 mm	
% Vol. de fibras	Provetes (n°)
0	3
2	6
3	8

A execução de provetes cúbicos compreendeu os seguintes passos:

- Colocação da manta de fibras no molde, dispondo-as unidireccionalmente até perfazer o volume de fibras adoptado- ver Figura 3.6 a);
- Colmatação de todas as juntas do molde metálico com silicone;
- Produção da calda de cimento;
- Betonagem da calda, efectuada por gravidade paralelamente à direcção das fibras, com auxílio de vibração exterior (agulha) até à impregnação total das fibras – ver Figura 3.6 b).

É de referir que a vibração foi efectuada com recurso a um vibrador de agulha, quando seria mais conveniente utilizar uma mesa vibratória. É de salientar também que na produção de provetes sem fibras, a betonagem foi realizada sem vibração.



a) Colocação da manta de fibras



b) Betonagem com auxílio de vibração exterior do molde

Figura 3.6 – Produção de provetes cúbicos de CRFU

A norma DIN 1048-5 (1991) sugere, para provetes a ensaiar à compressão diametral, uma cura imersa em água até à hora do ensaio, contudo, para evitar a corrosão das fibras, efectuou-se apenas uma cura húmida.

Imediatamente antes de se efectuarem os ensaios procedeu-se à pesagem dos provetes. Na Tabela 3.9 apresenta-se os dados adquiridos nessas pesagens.

Tabela 3.9 – Massa dos provetes cúbicos

% Vol. fibras	Provetes	W (g)	W_{med} (g)	Cura (dias)
0	1	7177	7068	28
	2	7057		
	3	6970		
2	1	7557	7574	
	2	7543		
	3	7505		
	4	7600		
	5	7613		
	6	7627		
3	1	7940	7779	
	2(*)	-		
	3	7730		
	4	7651		
	5	7770		
	6	7745		
	7(*)	-		
0	1	7020	7005	315
	2	7029		
	3	6966		
3	1	7858	7856	
	2	7948		
	3	7763		

(*) Provetes defeituosos

Em que W – massa do provete;

W_{med} – média das massas.

Produção de provetes tubulares de secção circular:

No estudo de caracterização da CRFU levado a cabo por Ana Gião G. Reis (Gião, 2012), pretendeu-se efectuar ensaios de compressão e determinação do módulo de elasticidade em provetes de reduzida espessura, aproximando assim o comportamento do material ao do reforço por encamisamento. Dando continuidade a esse estudo, foram produzidos provetes tubulares de secção circular com 20 mm de espessura. Estes provetes são executados em moldes metálicos, habitualmente utilizados na produção de cilindros de Ø150 mm por 300 mm de altura, com recurso

a negativos constituídos por PVC de 110 mm de diâmetro exterior, fixos e posicionados no centro da base dos moldes, perfazendo a espessura desejada de 20 mm.

Com o intuito de determinar a resistência à compressão e módulo de elasticidade, aos 28 dias de cura, da matriz cimentícia e da calda reforçada com volumes de fibras de 1%, 2%, 2,5% e 3%, produziram-se provetes tubulares de secção circular apresentados na seguinte tabela:

Tabela 3.10 - Provetes tubulares de secção circular produzidos

Provetes tubulares: $h=300\text{mm}$; $\varnothing_{\text{ext}}=150\text{mm}$; $\varnothing_{\text{int}}=110\text{mm}$	
% Vol. de fibras	Provetes (nº)
0	6
1	6
2	7
2,5	6
3	7

A execução destes provetes compreendeu os seguintes passos:

- Colocação das fibras envolvendo o tubo de PVC, garantindo uma distribuição homogénea das mesmas, até perfazer o volume de fibras adoptado;
- Colagem do tubo de PVC, posicionando-o no centro da base do molde;
- Colmatação de todas as juntas do molde metálico com silicone;
- Produção de calda de cimento;
- Betonagem da calda, efectuada por gravidade perpendicularmente à direcção das fibras, com auxílio de vibração exterior (agulha) até à impregnação total das fibras, Figura 3.7.



Figura 3.7 - Execução dos provetes tubulares de secção circular

À semelhança dos provetes cúbicos, a betonagem de provetes tubulares com calda de cimento realizou-se sem vibração. Após a desmoldagem foi necessário rectificar ambas as faces dos provetes, garantindo assim a planura necessária para se proceder aos respectivos ensaios. A

rectificação das faces dos provetes foi levada a cabo pela APEB (Associação Portuguesa das Empresas de Betão Pronto) em Lisboa.

A norma DIN 1048-5 (1991) sugere, para provetes destinados a ensaios de determinação do módulo de elasticidade e de compressão uma cura húmida durante os primeiros 7 dias, após a execução dos mesmos, os restantes dias de cura devem permanecer num local arejado com uma temperatura de 15 a 22°C. Contudo, durante a permanência dos provetes nas instalações da APEB estes foram armazenados numa câmara, utilizada para o efeito, com humidade relativa do ar de 95%, houve por isso variações no critério de cura, dependendo do tempo de permanência nas instalações. Dois dos provetes com 1% de vol. de fibras e todos os provetes com um volume de 2,5% de fibras permaneceram mais tempo nesta câmara saturada, sendo por isso, evidente nestes provetes, alguma corrosão das fibras. No entanto, não se verificou nenhuma dispersão dos resultados destes provetes face aos outros.

Durante o processo de cura de provetes tubulares sem fibras, os cuidados foram redobrados, uma vez que a retracção dos mesmos induz facilmente à fendilhação. Foi, por isso, necessário garantir que a superfície destes provetes fosse humedecida constantemente, caso contrário os provetes fendilhavam.

Com o intuito de compreender o melhor possível o comportamento da CRFU, julgou-se necessário proceder à pesagem e medição destes provetes, obtendo assim dados que possam justificar os resultados experimentais. Na Tabela 3.11 apresentam-se os dados de todas as pesagens e medições efectuadas a provetes tubulares imediatamente antes dos ensaios.

Tabela 3.11 – Peso e altura dos provetes tubulares de secção circular

% Vol. fibras	Provetes	W (g)	W_{med} (g)	h (mm)	h_{med} (mm)	Cura (dias)
0	1	5123	5137	295,5	296,7	
	2	5117		297,5		
	3	5186		297,0		
	4	5078		297,0		
	5	5182		296,0		
	6	5135		297,0		
1	1	5190	5157	298,0	297,2	
	2	5176		296,0		
	3	4947		290,0		
	4	5202		299,0		
	5	5226		300,0		
	6	5202		300,0		
2	1	5388	5354	298,0	296,7	28
	2	5363		297,0		
	3	5339		296,0		
	4	5391		298,0		
	5(*)	-		-		
	6	5356		296,0		
	7	5287		295,0		
2,5	1	5419	5420	298,5	298,8	
	2	5407		298,3		
	3	5423		299,2		
	4	5420		298,0		
	5	5434		299,0		
	6	5415		300,0		
3	1	5410	5413	296,0	296,5	
	2	5417		296,0		
	3	5300		293,0		
	4(*)	-		-		
	5	5418		296,0		
	6	5453		298,0		
	7	5477		300,0		
0	1	4946	4936	292,5	292,6	365
	2	4959		294,0		
	3	4902		291,3		
3	1	5533	5421	301,0	298,5	
	2	5386		297,0		
	3	5344		297,5		

(*) Provetes desprezados.

Em que h – altura do provete;

h_{med} - altura média dos provetes.

3.4 Definição do sistema de ensaio e instrumentação

Ensaio de compressão diametral ou “splitting”:

Segundo a norma (DIN 1048-5, 1991), os provetes a utilizar neste tipo de ensaio deverão ser, preferencialmente, cilíndricos, contudo também podem ser utilizados provetes prismáticos. Atendendo à disposição unidireccional pretendida para a manta de fibras, por facilidade de execução, foi necessário optar por provetes prismáticos. Estes provetes devem respeitar as seguintes relações geométricas: a relação entre o comprimento e a largura da secção transversal não deverá ser superior a 1,5 e o ponto de aplicação da carga deve estar a uma distância da extremidade do provete igual ou superior da metade da altura do provete. Optou-se assim pela execução de provetes cúbicos por cumprirem os requisitos exigidos pela norma.

O ensaio de compressão diametral consiste na imposição de um carregamento linearmente distribuído, aplicado em toda a largura da zona central das faces carregadas. Esse carregamento é imposto através de tiras de madeira, com 10 mm de largura, colocadas em ambas as faces. Para que o ensaio fosse exequível, as tiras de madeira foram sobrepostas com chapas metálicas da mesma largura. A necessidade de sobrepor as tiras de madeira com chapa metálica prendeu-se pelo facto da madeira utilizada não resistir aos valores de compressão alcançados neste ensaio. Embora a norma não contemple a utilização de tiras metálicas, recorreu-se a esta solução alternativa, caso contrário, as tiras de madeira esmagar-se-iam e toda a face do provete ficaria à compressão.

Na Figura 3.8 ilustra-se o esquema de ensaio de tracção por compressão diametral em provetes cúbicos.

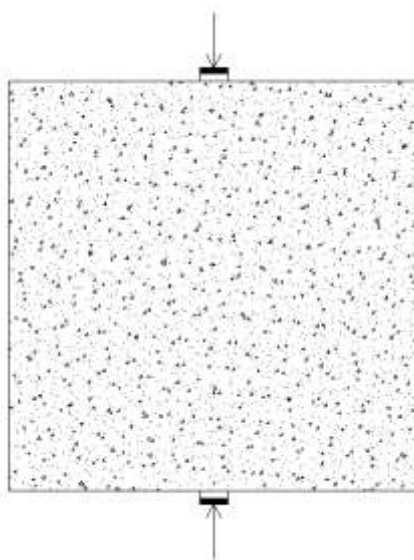


Figura 3.8 – Esquema de ensaio de tracção por compressão diametral

Os ensaios foram realizados na prensa Form+Test/Seidner modelo 3000D por imposição de força com um acréscimo de carga constante de 1750 N/s, sendo, para os provetes de CRFU, o carregamento exercido perpendicularmente à direcção das fibras. Na figura que se segue ilustra-se a prensa utilizada nos ensaios de caracterização mecânica da CRFU e da matriz cimentícia.



Figura 3.9 - Prensa Form+Test/Seidner modelo 3000D

Os valores de tensão de rotura à tracção por compressão diametral, apresentados nas Tabelas 3.12 e 3.15, são obtidos a partir da força última do ensaio através da seguinte expressão:

$$f_{ct,sp} = \frac{2 \cdot F_u}{\pi \cdot b \cdot h} \quad (3.1)$$

Em que $f_{ct,sp}$ - tensão de rotura à tracção por compressão diametral ou “splitting”;

F_u - força última de ensaio;

b – largura do provete;

h – altura do provete.

De acordo com o Eurocódigo 2 (NP EN 1992-1-1, 2010), o valor aproximado da tensão de tracção simples do material (f_{ctm}) é igual a:

$$f_{ctm} = 0,9 \cdot f_{ct,sp} \quad (3.2)$$

Ensaio para determinação do módulo de elasticidade:

Segundo a norma DIN 1048-5 (1991), o ensaio para determinação do módulo de elasticidade é realizado em controlo de força, por imposição de 3 ciclos de carga-descarga entre uma tensão inicial de 0,5 MPa (σ_0), contemplando um acréscimo e decréscimo de carga constante de $0,5 \pm 0,2$ N/mm²/s até 1/3 da tensão de rotura (σ_u). Sendo o módulo de elasticidade obtido por compressão (E_c) através da seguinte expressão:

$$E_c = \frac{\sigma_u - \sigma_0}{\varepsilon_u - \varepsilon_0} \quad (3.3)$$

Em que σ_u é a maior tensão alcançada durante o terceiro ciclo;

σ_0 é a tensão inicial lida no início do terceiro ciclo;

ε_u é a maior extensão alcançada durante o terceiro ciclo;

ε_0 é a extensão inicial registrada no início do terceiro ciclo.

Na Figura 3.10 apresenta-se o diagrama que representa os ciclos de carga-descarga conforme preconizado na norma.

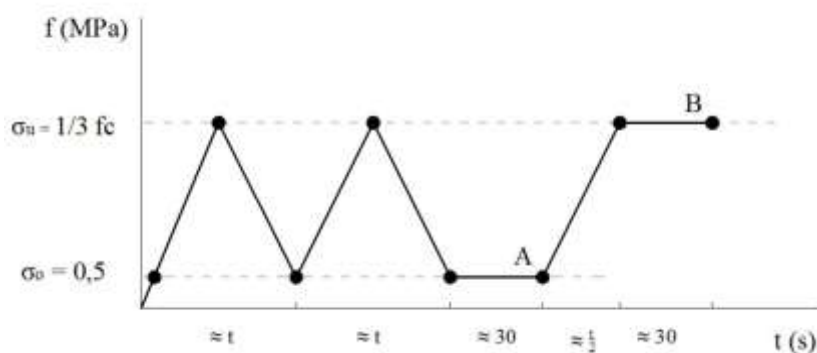


Figura 3.10 - Procedimento de ensaio para determinação do módulo de elasticidade (DIN 1048-5 , 1991)

Em que, no diagrama da Figura 3.10: A é o ponto de leitura da tensão σ_0 e da extensão ε_0 ;

B é o ponto de leitura da tensão σ_u e da extensão ε_u .

Os provetes foram devidamente centrados na prensa e tendo em consideração a área carregada, induziu-se um acréscimo e decréscimo de carga de 4000 N/s. A leitura das deformações axiais foram realizadas na zona central dos provetes através de dois transdutores de deslocamento colocados simetricamente e fixos no anel metálico superior do compresómetro da Microtest utilizado para o efeito, Figura 3.11. Os deslocamentos obtidos resultam da deformação axial ao longo da distância entre os dois anéis do compresómetro fixos ao provete. Os dados foram adquiridos através de um Datalogger Spider8 e do software associado (Catman da HBM).



Figura 3.11 - Instrumentação utilizada para determinação do módulo de elasticidade

Ensaio de compressão:

Após cada provete ter sido submetido à determinação do módulo de elasticidade, seguiu-se a determinação da tensão de rotura por compressão dos mesmos. O ensaio de compressão preconizado na norma DIN 1048-5 (1991) é obtido levando o provete à rotura por imposição de um estado de tensão com um acréscimo de carga constante de $0,5 \pm 0,2 \text{ N/mm}^2/\text{s}$. À semelhança do ensaio de determinação do módulo de elasticidade, tendo em consideração a área carregada destes provetes, foi imposto um acréscimo de carga constante de 4000 N/s.

A tensão de rotura à compressão é obtida pela seguinte expressão:

$$f_c = \frac{F_u}{A} \quad (3.4)$$

Em que f_c – tensão de rotura à compressão

F_u – força última de ensaio

A – área da secção transversal

A expressão 3.4 é utilizada na determinação da tensão de rotura por compressão, não sendo possível obter a resistência à compressão simples do material, para isso pressupõe-se um estado de tensão uniaxial e uniformemente distribuído na secção transversal. Contudo, o estado de tensão ao longo do provete não é uniaxial; além disso não existem normas que preconizem a utilização de provetes tubulares nos ensaios de compressão. Será, por isso, no capítulo 4, efectuada a modelação deste ensaio recorrendo ao programa de cálculo automático SAP 2000, pretende-se assim interpretar o estado de tensão a que estes provetes estão sujeitos no instante da rotura. Posteriormente, poder-se-á, considerando um estado de tensão biaxial, determinar algumas

aproximações à resistência por compressão uniaxial (simples), admitindo o critério de rotura Mohr-Coulomb.

3.5 Apresentação dos resultados experimentais

3.5.1 Caracterização mecânica da calda cimentícia

De modo a classificar a calda de cimentícia e determinar a eficácia que a incorporação de fibras pode trazer para o seu comportamento, é indispensável conhecer as características mecânicas da matriz.

Ensaio de compressão diametral:

Na Tabela 3.12 são apresentados os resultados experimentais de resistência à tracção por compressão diametral de 3 provetes 150x150x150 mm de calda ensaiados aos 28 dias de cura, e de outros 3 ensaiados aos 315 dias de cura.

Tabela 3.12 - Resultados experimentais de compressão diametral em provetes de calda

% Vol. fibras	Provetes	F_u (kN)	$f_{ct,sp}$ (MPa)	CV (%)	$f_{ctm,sp}$ (MPa)	f_{ctm} (MPa)	Cura (dias)
0	1	74	2,09	15,24	2,53	2,27	28
	2	100	2,83				
	3	94	2,66				
0	1	107	3,03	14,27	3,41	3,07	315
	2	115	3,25				
	3	140	3,96				

Em que CV é o coeficiente de variação.

Verificaram-se modos de rotura semelhantes em todos os provetes, constatando-se roturas frágeis com a formação de fendas na direcção do carregamento, Figura 3.12. Analisando os resultados verifica-se, nos provetes com 315 dias de cura, um acréscimo de resistência à tracção de cerca de 26% face aos provetes ensaiados aos 28 dias de cura, podendo esta diferença entre resultados estar associada não só à hidratação do cimento, mas também ao efeito das reacções pozolânicas da sílica de fumo.

Nos provetes ensaiados aos 28 dias, no estudo desenvolvido por Ana Gião (Gião, 2012), verificou-se uma tensão média de rotura à tracção simples de 1,41 MPa. Há portanto, uma variação de 33,2% entre a média das resistências alcançadas nesses provetes e nos ensaiados aos 28 dias no seguimento deste trabalho. Sabendo que as condições de ensaio foram as mesmas, tal dispersão entre provetes com a mesma idade de cura poderá estar relacionada com condições de cura diferentes.



Figura 3.12 - Modo de rotura dos provetes de calda sujeitos ao ensaio de compressão diametral

Resultados da determinação do módulo de elasticidade:

Na Tabela 3.13 são apresentados os resultados experimentais da determinação do módulo de elasticidade por compressão em provetes tubulares de calda de cimento.

Tabela 3.13 - Valores dos módulos de elasticidade da matriz cimentícia

Dimensões	% Vol. fibras	Provetes	E_c (GPa)	CV (%)	E_{cm} (GPa)	Cura (dias)
$h = 300$ mm $\emptyset_{ext} = 150$ mm	0	1	24,34	0,81	24,51	28
		2	24,35			
		3	24,79			
		4	24,71			
		5	24,51			
		6	24,35			
$\emptyset_{int} = 110$ mm	0	1	25,54	1,32	25,42	365
		2	25,68			
		3	25,04			

Em que h é a altura, \emptyset_{ext} e \emptyset_{int} são o diâmetro externo e interno da secção dos provetes tubulares.

Verifica-se uma dispersão muito pequena entre os valores de módulo de elasticidade obtidos em provetes com a mesma idade de cura. O módulo de elasticidade da matriz cimentícia, com 365 dias de cura, sofre um aumento de cerca de 3,6% comparativamente com os resultados obtidos aos 28

dias de cura. No âmbito da tese doutoramento de Ana Gião (Gião, 2012), os módulos de elasticidade obtidos aos 28 dias revelaram-se ligeiramente superiores aos registados neste estudo, havendo uma variação de cerca de 1,6%.

Resultados de tensão de rotura à compressão:

No seguimento dos ensaios de compressão realizados a provetes de calda de cimento obtiveram-se os valores de tensão de rotura (f_c) bem como a média desses valores (f_{cm}). Os resultados destes ensaios são apresentados na Tabela 3.14.

Tabela 3.14 - Valores de tensão de rotura à compressão da matriz cimentícia

Dimensões	% Vol. fibras	Provetes	F_u (KN)	f_c (MPa)	CV (%)	f_{cm} (MPa)	Cura (dias)
$h = 300$ mm	0	1	789	96,59	6,91	94,61	28
		2	697	85,33			
		3 (*)	516	-			
		4	829	101,49			
		5	808	98,92			
		6	741	90,72			
$\emptyset_{ext} = 150$ mm	0	1	506	61,95	10,78	55,75	365
		2	452	55,34			
		3	408	49,95			

(*) O provete apresentou uma rotura prematura e o ensaio foi desprezado

O provete 3, ensaiado aos 28 dias, foi desprezado na contabilização dessa média uma vez que apresentou uma rotura prematura, sugerindo que apresentava alguma deficiência. Nas Figuras 3.14 e 3.16 ilustram-se os diagramas tensão-deslocamento para cada um dos conjuntos de provetes de calda de cimento ensaiados.

Nos provetes ensaiados aos 28 dias de cura, verificaram-se roturas frágeis e explosivas, ficando, à excepção do provete 3, todos os provetes reduzidos a pequenos pedaços, Figura 3.13. O provete 3 apresentou uma rotura prematura, constatando-se, ao contrário dos outros provetes, uma rotura faseada, sugerindo que apresentava alguma deficiência. Por esse facto, como já referido, desprezou-se o resultado obtido neste provete. No diagrama tensão-deslocamento é perceptível a rotura faseada deste provete, Figura 3.14.

Nos diagramas tensão-deslocamento apresentados verificam-se grandes deformações no início do ensaio, essas deformações devem ser desprezadas uma vez que resultam de ajustamentos do deflectómetro e do esmagamento de grãos de calda ou pequenas partículas em contacto com os pratos da prensa.



Figura 3.13 - Rotura de provetes de calda, com 28 dias de cura, ensaiados à compressão

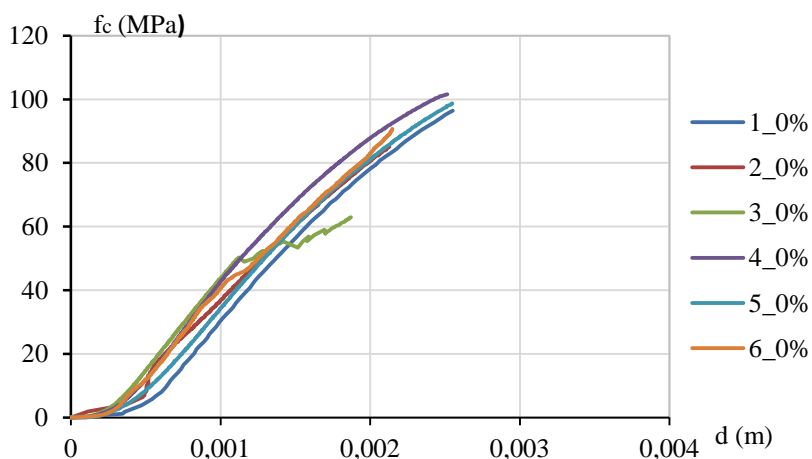


Figura 3.14 – Diagrama tensão-deslocamento do ensaio de compressão em provetes de calda de cimento com 28 dias de cura

Todos os provetes ensaiados aos 365 dias de cura apresentaram roturas prematuras, sendo evidente que apresentavam algum tipo de deficiência. Embora não fosse visível a olho nu, o tipo de rotura sugeriu que estes provetes estariam fendilhados, pois a rotura deu-se com a desagregação faseada de pequenas porções de calda. Na Figura 3.15 estão ilustradas as imagens correspondentes ao aspecto final destes provetes após o ensaio. Nos diagramas tensão-deslocamento da Figura 3.16, a partir dos 50 MPa, são evidentes os patamares de tensão-deslocamento resultantes da desagregação faseada da calda. É notória a diferença entre as tensões de rotura destes provetes comparativamente com os ensaiados aos 28 dias, verificando-se um decréscimo de 41,1%. Considera-se, por isso, que os valores obtidos nos ensaios de compressão da matriz aos 365 dias de cura, não são

representativos da tensão de rotura à compressão do material sem deficiências. Estando presente que o intuito destes ensaios é ter uma base de comparação com a CRFU, sabendo que a tendência para a fendilhação da CRFU é reduzida e partindo do pressuposto que estes provetes de calda estariam fendilhados, os seus resultados de resistência à compressão devem ser desprezados.



Figura 3.15 - Rotura prematura de provetes de calda ensaiados à compressão aos 365 dias

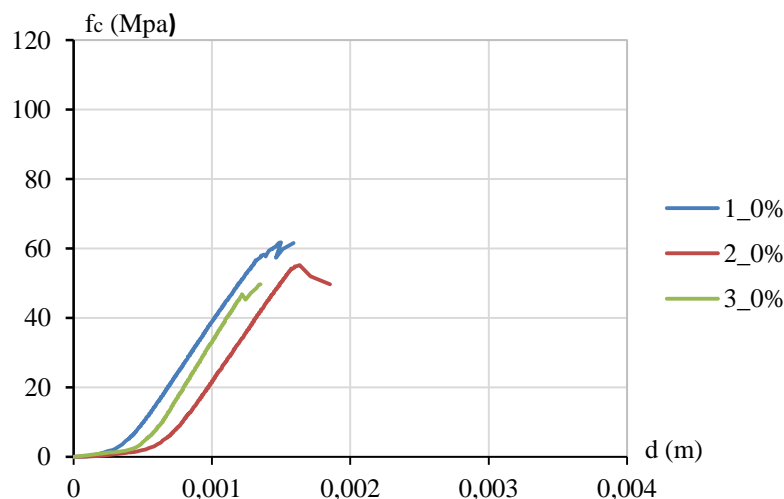


Figura 3.16 - Diagrama tensão-deslocamento do ensaio de compressão em provetes de calda de cimento com 365 dias de cura

A tensão de rotura por compressão de provetes tubulares de calda foi de 94,6 MPa, os dois provetes ensaiados no âmbito da tese de doutoramento de Ana Gião consolidam os resultados obtidos, uma vez que, nesse trabalho, a média de tensão de rotura à compressão per fez 96,1 MPa. Considerando que a resistência para ensaios distintos não varia abruptamente, uma vez que, a *Portland Cement Association* (PCA, 2003) considera betões de elevadas resistências à compressão, aos 28 dias, para valores superiores a 70 MPa, admitindo que essa classificação é válida para compósitos cimentícios, então, esta calda insere-se nos compósitos de elevado desempenho, mais precisamente,

segundo as classificações existentes, pode dizer-se que este é um Compósito Cimentício de Alta Resistência, designadamente, *High Strenght Cement Composite* (HSCC).

3.5.2 Resultados experimentais de caracterização mecânica da CRFU

Dada a orientação unidireccional das fibras na CRFU, este material tem um comportamento anisotrópico. É de salientar que, a caracterização do mesmo, realizada no seguimento deste trabalho, contempla apenas a resistência à tracção na direcção das fibras e o módulo de elasticidade e resistência à compressão na direcção perpendicular.

3.5.2.1 Ensaio de tracção por compressão diametral

Na Tabela 3.15 estão apresentados os valores de tensão de rotura à tracção por compressão diametral de cada provete ensaiado (150x150x150 mm), aos 28 e 315 dias de cura, assim como a média resultante desses valores ($f_{ctm,sp}$) e a média do valor aproximado da tensão de tracção simples (f_{ctm}).

Tabela 3.15 - Resultados obtidos nos ensaios de compressão diametral

% Vol. fibras	Provetes	F_u (kN)	$f_{ct,sp}$ (MPa)	CV (%)	$f_{ctm,sp}$ (MPa)	f_{ctm} (MPa)	Cura (dias)
2	1	445	12,59	5,86	12,38	11,15	28
	2	402	11,37				
	3	441	12,48				
	4	416	11,77				
	5	447	12,65				
	6	475	13,44				
3	1	497	14,06	10,50	15,00	13,50	28
	2(*)	474	-				
	3	545	15,42				
	4	467	13,21				
	5	485	13,72				
	6	604	17,09				
	7(*)	454	-				
	8	582	16,47				
3	1	571	16,16	9,04	14,72	13,25	315
	2	478	13,52				
	3	512	14,49				

(*) Tratando-se de provetes defeituosos, optou-se por desprezar estes ensaios.

Nos provetes 2 e 7, com 3% vol. de fibras e 28 dias de cura, constatou-se que a betonagem dos mesmos foi deficiente, verificando-se a presença de vazios após a desmoldagem, pelo que resultados obtidos nesses ensaios foram desprezados.

O coeficiente de variação dos resultados obtidos nos provetes com 3% vol. de fibras é quase duas vezes superior ao verificado nos resultados dos provetes com 2% vol. de fibras, esse facto pode estar associados à qualidade de produção dos mesmos. É de salientar que, a betonagem dos provetes com maior volume de fibras (3%) é mais difícil de executar, sendo, por isso, expectável uma dispersão maior dos valores obtidos nesses provetes.

Quando à matriz cimentícia lhe são adicionadas fibras, a tensão de rotura à tracção sofre um aumento de, aproximadamente, 79,6% para um volume de 2% de fibras e de 83,2% para 3% vol. de fibras, verificando-se assim que o aumento da resistência à tracção não é proporcional ao volume de fibras adoptado. Na Tabela 3.16 estão apresentados os valores correspondentes a uma análise da eficiência, na resistência à tracção, dos volumes de fibras adoptados.

Tabela 3.16 – Eficiência, na resistência à tracção, dos volumes de fibras adoptados

% Vol. fibras	$F_{u,med}$ (kN)	Eficiência
2	437,7	218,8
3	530,0	176,7
3 (*)	520,3	173,4

(*) Provetes com 315 dias de cura

Sendo a eficiência é dada pelo quociente entre o valor médio da força última de ensaio ($F_{u,med}$) e o volume de fibras adoptado.

Verifica-se, portanto, que a eficiência de 2% de fibras é maior que os 3%. De facto, a resistência à tracção por compressão diametral não é proporcional ao volume de fibras, na **Erro! A origem da eferência não foi encontrada.** apresentam-se os valores de resistência à tracção esperados para a CRFU admitindo a tensão de rotura do aço.

Tabela 3.17 - Valores de resistência à tracção admitindo a tensão de rotura do aço

f_{sum}	% Vol. fibras	$f_{ct,esp}$ (MPa)	$f_{ctm,sp}$ (Mpa)
908,2	1	9,08	-
	2	18,16	12,38
	3	27,25	15,00

Em que $f_{ct,esp}$ – tensão de rotura à tracção simples esperada

Os provetes com um volume de 2% de fibras, apresentaram na rotura uma fenda singular na direcção da carga, evidenciou-se portanto uma rotura por tracção das fibras, ilustrado na Figura 3.17.



Figura 3.17 - Modo de rotura de provetes com 2% vol de fibras por compressão diametral aos 28 dias de cura

Dado o comportamento anisotrópico da CRFU, nos ensaios efectuados aos provetes cúbicos, com um volume de 3% de fibras e 28 dias de cura, verificou-se a ocorrência de dois tipos de rotura, um que se dá por tracção das fibras e outro, na direcção perpendicular, por efeito de Poisson, ou seja, por tracção da calda de cimento. Em dois desses provetes a rotura deu-se por tracção das fibras, noutros dois por tracção da calda (efeito Poisson) e nos restantes dois ocorreram roturas combinadas, constatando-se em simultâneo os dois tipos de rotura, ilustra-se nas Figuras 3.18, 3.19 e 3.20, respectivamente, essas roturas.



Figura 3.18 - Rotura por tracção das fibras em provetes com 3% vol. de fibras ensaiados à compressão diametral aos 28 dias de cura



Figura 3.19 - Rotura por tracção da calda em provetes com 3% vol. de fibras ensaiados à compressão diametral aos 28 dias de cura



Figura 3.20 - Rotura combinada (por tracção das fibras e por tracção da calda) em provetes com 3% vol. de fibras ensaiados à compressão diametral aos 28 dias de cura

Nos 3 provetes com 3% vol. de fibras e 315 dias de cura verificaram-se, à semelhança dos provetes com 2% vol. de fibras, roturas por tracção das fibras – ilustrado na Figura 3.21. Neste caso, não se evidenciaram roturas por tracção da calda (efeito Poisson), possivelmente, resultado do aumento da resistência à tracção da calda comparativamente com os provetes ensaiados aos 28 dias de cura. Também se constataram, em alguns provetes, fendas paralelas à envolvente das zonas carregadas. No seguimento deste trabalho, será efectuada, no capítulo 4, a modelação deste ensaio recorrendo ao programa de cálculo automático SAP 2000 para interpretar aprofundadamente os modos de rotura referidos.

Os valores de tensão de rotura, alcançados nestes provetes, estão muito próximos dos resultados obtidos nos provetes com 28 dias de cura e o mesmo volume de fibras, tal facto pode ser justificado pelo tipo de rotura. Uma vez que a rotura se dá por tracção das fibras, embora a resistência à compressão da calda de cimento aumente com a idade, a resistência destes provetes é condicionada pela resistência à tracção das fibras, não havendo por isso um aumento da tensão de rotura à tracção para idades de cura mais avançadas.



Figura 3.21 - Rotura de provetes com 3% vol. de fibras ensaiados aos 315 dias à compressão diametral

3.5.2.1 Ensaio de determinação do módulo de elasticidade

Os valores obtidos na determinação do módulo de elasticidade em provetes tubulares de secção circular de CRFU para volumes de fibras de 1%, 2%, 2,5% e 3% com 28 dias de cura e de CRFU com 3% vol. de fibras e 365 dias de cura, são apresentados na Tabela 3.18.

Tabela 3.18 – Resultados experimentais de determinação do módulo de elasticidade em provetes tubulares de CRFU com vários volumes de fibras

Dimensões	% Vol. fibras	Provetes	E_c (GPa)	CV (%)	E_{cm} (GPa)	Cura (dias)
$h = 300$ mm $\emptyset_{ext} = 150$ mm $\emptyset_{int} = 110$ mm	1	1	22,56	2,35	21,76	28
		2	21,62			
		3	21,25			
		4	22,18			
		5	21,64			
		6	21,32			
	2	1	22,93	4,05	23,69	28
		2	25,22			
		3	22,54			
		4	24,02			
		5(*)	-			
		6	24,08			
	2,5	1	22,45	8,17	24,46	28
		2	22,73			
		3	27,91			
		4	25,37			
		5	24,20			
		6	24,09			
3	1	26,02	5,94	23,75	28	
	2	23,95				
	3	22,88				
	4(*)	-				
	5	21,80				
	6	23,64				
3	1	28,66	3,14	27,68	365	
	2	27,00				
	3	27,39				

(*) Tratando-se de provetes defeituosos, optou-se por desprezar estes ensaios.

Entre provetes com o mesmo volume de fibras e idade de cura não se verifica uma dispersão significativa entre os valores experimentais de módulo de elasticidade alcançados, contudo, não é possível encontrar um padrão que relacione a variação dos resultados com os diferentes volumes de fibras adoptados. Para provetes com um volume de 3% de fibras e 365 dias de cura constata-se um

aumento de 14,2% do módulo de elasticidade comparativamente com o obtido em provetes com 28 dias de cura e a mesma dosagem de fibras.

3.5.2.2 Ensaios de compressão

Os valores de tensão de rotura obtidos nos ensaios de compressão em provetes tubulares de secção circular de CRFU com vários volumes de fibras, são apresentados na Tabela 3.19.

Tabela 3.19 - Resultados experimentais de tensão de rotura à compressão obtidos em provetes tubulares de CRFU com vários volumes de fibras

Dimensões	% Vol. fibras	Provetes	F _u (KN)	f _c (MPa)	CV (%)	f _{cm} (MPa)	Cura (dias)
h = 300 mm Ø _{ext} = 150 mm	1	1	495	60,60	3,52	63,40	28
		2	530	64,89			
		3	511	62,56			
		4	529	64,76			
		5	501	61,34			
		6	541	66,23			
	2	1	610	74,68	5,55	75,23	28
		2	562	68,80			
		3	642	78,60			
		4	641	78,48			
		5(*)	629	-			
		6	644	78,84			
Ø _{int} = 110 mm	2,5	1	529	64,76	9,10	64,56	28
		2	508	62,19			
		3	467	57,17			
		4	610	74,68			
		5	507	62,07			
		6	543	66,48			
	3	1	599	73,33	9,36	64,23	28
		2	572	70,03			
		3	483	59,13			
		4(*)	455	-			
		5	482	59,01			
		6	511	62,56			
3	1	590	72,23	3,71	70,11	365	
	2	579	70,89				
	3	549	67,21				

(*) Tratando-se de provetes defeituosos, optou-se por desprezar estes ensaios.

Verificam-se para todos os provetes de CRFU, independentemente do volume de fibras adoptado, roturas frágeis e tensões de rotura inferiores aos da matriz. Na generalidade dos provetes a rotura

localiza-se, aproximadamente, a um terço da altura, Figuras 3.22, 3.24, 3.26, 3.28 e 3.30. Este modo de rotura pode ser induzido por um campo de tracções transversais à espessura nessa zona.

Os diagramas de tensão-deslocamento de cada um dos conjuntos de provetes podem ser consultados nas Figuras 3.23, 3.25, 3.27, 3.29 e 3.31 e na Figura 3.32 podem ser analisados, no mesmo gráfico, os diagramas tensão-deslocamento de provetes com os vários volumes de fibras adoptados. É de salientar que não constam nesses diagramas os ensaios que se consideraram inválidos.

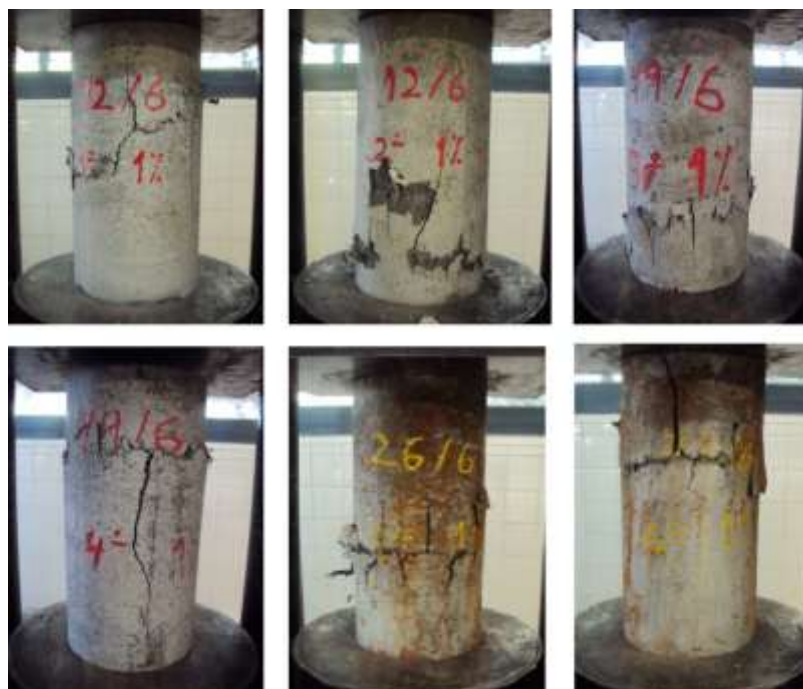


Figura 3.22 - Modo de rotura de provetes tubulares com 1% vol. de fibras ensaiados à compressão

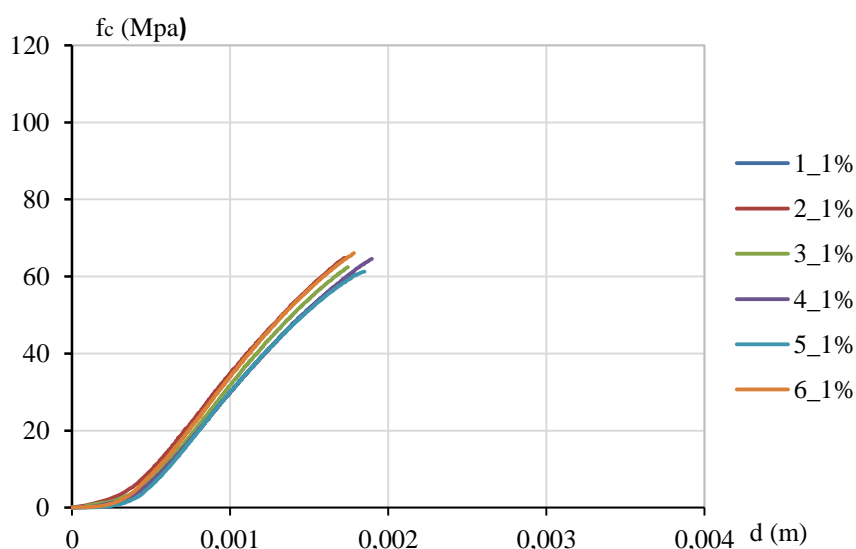


Figura 3.23 - Diagrama tensão-deslocamento do ensaio de compressão em provetes de CRFU com 1% vol. de fibras e 28 dias de cura



Figura 3.24 - Modo de rotura de provetes tubulares com 2% vol. de fibras ensaiados à compressão

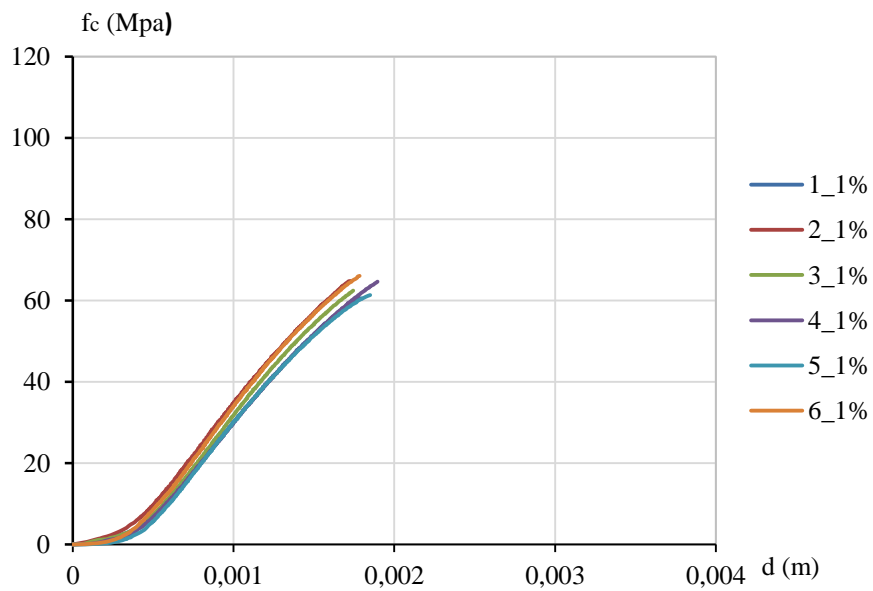


Figura 3.25 - Diagrama tensão-deslocamento do ensaio de compressão em provetes de CRFU com 2% vol. de fibras e 28 dias de cura



Figura 3.26 - Modo de rotura de provetes tubulares com 2,5% vol. de fibras ensaiados à compressão

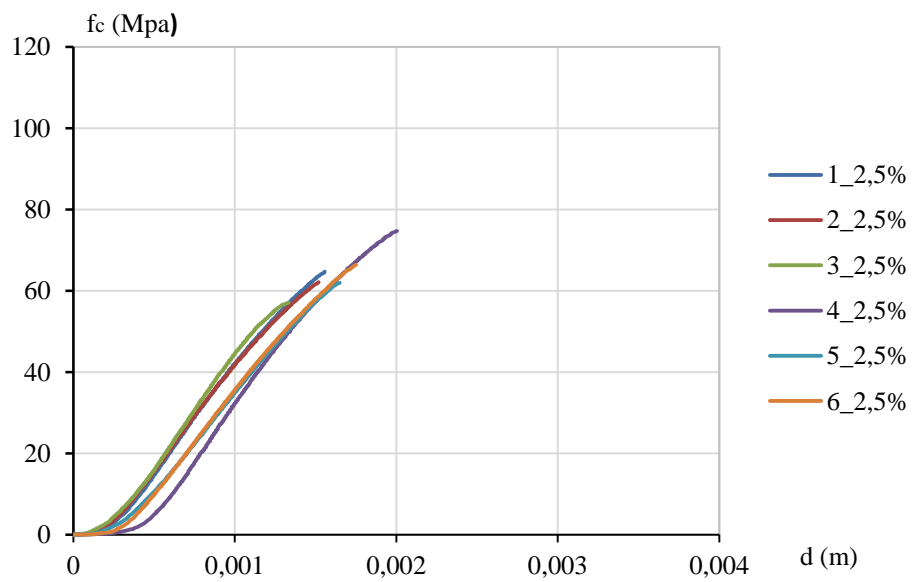


Figura 3.27 - Diagrama tensão-deslocamento do ensaio de compressão em provetes de CRFU com 2,5% vol. de fibras e 28 dias de cura



Figura 3.28 - Modo de rotura de provetes tubulares com 3% vol. de fibras ensaiados à compressão

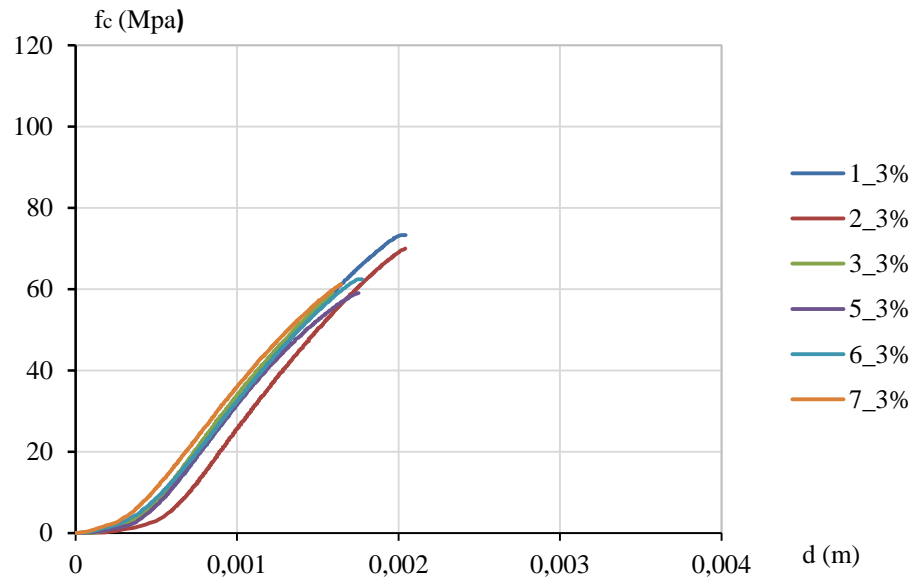


Figura 3.29 - Diagrama tensão-deslocamento do ensaio de compressão em provetes de CRFU com 3% vol. de fibras e 28 dias de cura



Figura 3.30 - Modo de rotura, aos 365 dias, de provetes tubulares com 3% vol. de fibras ensaiados à compressão

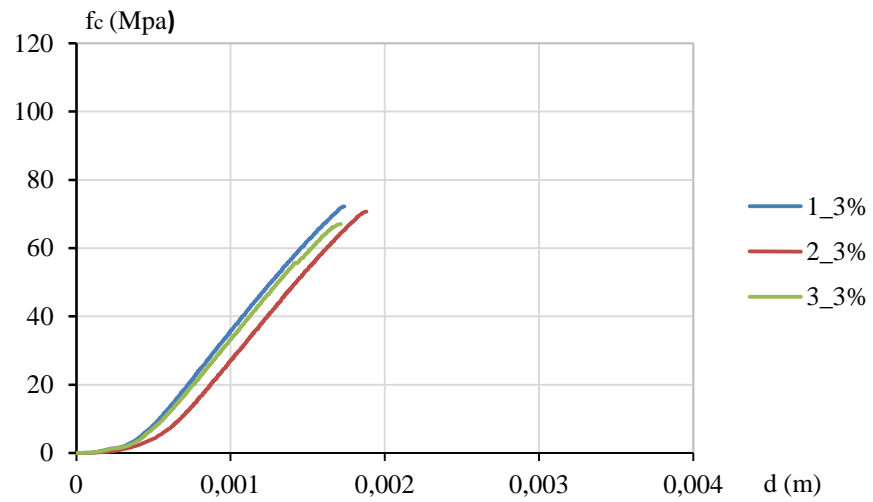


Figura 3.31 - Diagrama tensão-deslocamento do ensaio de compressão em provetes de CRFU com 3% vol. de fibras e 365 dias de cura

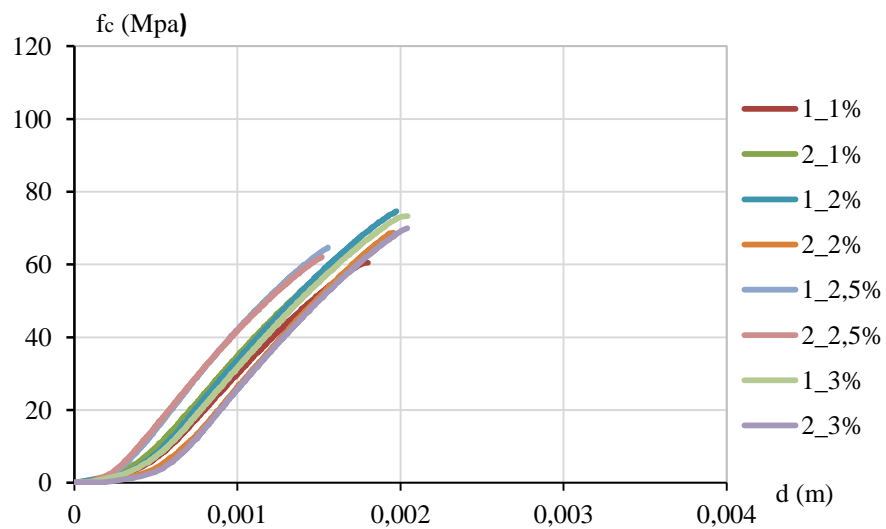


Figura 3.32 - Diagrama tensão-deslocamento do ensaio de compressão em provetes de CRFU com vários volumes de fibras e 28 dias de cura

À semelhança dos diagramas tensão-deslocamento das Figuras 3.14 e 3.16, nos diagramas anteriormente apresentados também se verificam grandes deformações no arranque do ensaio, como já referido essas deformações devem ser desprezadas.

Tal como nos resultados obtidos na determinação dos módulos de elasticidade, embora não se verifique uma dispersão significativa entre os valores obtidos, não é possível encontrar uma relação entre os resultados obtidos para os diferentes volumes de fibras utilizados. Esse facto pode estar relacionado com os vazios, pelo que será efectuada uma abordagem neste sentido.

Estimativa da taxa de vazios

De modo a compreender se se verifica, ou não, uma diferença relevante de vazios entre os vários grupos de provetes ensaiados, efectuou-se uma análise, pouco rigorosa, mas que pode justificar a dispersão de valores entre as CRFU com diferentes volumes de fibras. Esta análise consiste na estimativa da taxa de vazios, de cada grupo de provetes, tendo em consideração apenas a altura, o peso de cada provete e a massa volúmica aproximada da calda cimentícia (sem desprezar o peso da água nem o volume de vazios nela contida). É de salientar que neste estudo os resultados obtidos reflectem apenas a estimativa de vazios da CRFU comparativamente com os provetes de calda. Para determinação da estimativa da taxa de vazios (e_v) recorreu-se à seguinte expressão 3.5.

$$e_v = \frac{V_{v,ap}}{V_{s,ap}} \quad (3.5)$$

Em que $V_{v,ap}$ – volume de vazios aproximado;

$V_{s,ap}$ – volume de sólidos aproximado

Para determinar a massa volúmica aproximada da calda de cimento consideraram-se os 6 provetes tubulares e os 3 provetes cúbicos de calda de cimento produzidos no seguimento deste trabalho. Na Tabela 3.20 exibem-se os resultados obtidos neste âmbito. De seguida, foram calculadas as estimativas da taxa de vazios, para cada conjunto de provetes com o mesmo volume de fibras, Tabelas 3.21 e 3.22.

Tabela 3.20 - Determinação de massa volúmica da calda de cimento

Tipo	% vol. fibras	Provetes	W_{med} (g)	V_{med} (mm ³)	$R_{amostra}$ (%)	$\rho_{calda,med}$ (g/mm ³)
Tubulares	0	1	5137	2423215	59,24	0,00211
		2				
		3				
		4				
		5				
		6				
Cúbicos	0	1	7068	3375000	40,76	
		2				
		3				

Em que W_{med} – massa média dos provetes;

V_{med} – volume médio dos provetes;

$R_{amostra}$ – representatividade da amostra;

$\rho_{calda,med}$ – massa volúmica média da calda de cimento.

Tabela 3.21 - Estimativa da taxa de vazios em provetes tubulares de secção circular com 28 dias de cura

% Vol. fibras	Provete	W_{med} (g)	V_{med} (mm ³)	$W_{esp,aço}$ (g)	$W_{esp,calda}$ (g)	$W_{t_{esp}}$ (g)	$W_{t_{esp}} - W_{med}$ (g)	$V_{v,ap}$ (mm ³)	$V_{s,ap}$ (mm ³)	e_v
1	1	5157	2427299	191	5069	5260	103	48622	2378677	0,0204
	2									
	3									
	4									
	5									
	6									
2	1	5354	2423215	381	5009	5390	36	17175	2406040	0,0071
	2									
	3									
	4									
	5 (*)									
	6									
	7									
2,5	1	5420	2440913	480	5020	5500	80	37979	2402934	0,0158
	2									
	3									
	4									
	5									
	6									
3	1	5413	2421854	571	4955	5526	114	54031	2367823	0,0228
	2									
	3									
	4 (*)									
	5									
	6									
	7									

(*) Tratando-se de provetes defeituosos, optou-se por desprezar estes ensaios.

Tabela 3.22 – Estimativa da taxa de vazios em provetes tubulares de secção circular com 365 dias de cura

% Vol. fibras	Provete	W_{med} (g)	V_{med} (mm ³)	$W_{esp,aço}$ (g)	$W_{esp,calda}$ (g)	$W_{t_{esp}}$ (g)	$W_{t_{esp}} - W_{med}$ (g)	$V_{v,ap}$ (mm ³)	$V_{s,ap}$ (mm ³)	e_v
3	1	5421	2438190	575	4989	5564	143	67673	2370517	0,0285
	2									
	3									

Em que $W_{esp,aço}$ – massa de aço esperada

$W_{esp,calda}$ – massa de calda de cimento esperada

$W_{t_{esp}}$ – massa total esperada

$V_{v,ap}$ – volume aproximado de vazios

$V_{s,ap}$ – volume aproximado de sólidos

e_v – estimativa da taxa de vazios

Na produção de provetes de CRFU a betonagem é mais ou menos demorada consoante o volume de fibras utilizado, sendo necessário vibrar os provetes com maior volume de fibras durante mais tempo. Por esta razão seria de esperar um aumento da taxa de vazios com o aumento do volume de fibras, devido à maior dificuldade de produção. Contudo, a presença de vazios pode estar relacionada com a qualidade do processo de produção, nomeadamente, a vibração adequada dos provetes. Constatou-se que a betonagem dos provetes com 1% de fibras não foi realizada devidamente. De facto, após a desmoldagem, verificou-se que a calda não impregnou devidamente as fibras e os resultados revelam que estes provetes apresentam maior estimativa da taxa de vazios que os provetes de 2% e 2,5%.

Analisando os resultados da estimativa da taxa de vazios, verifica-se, tal como nos valores obtidos nos ensaios de compressão e determinação do módulo de elasticidade, que não há uma relação de proporcionalidade entre os valores e os volumes de fibras adoptados. No entanto, nesta análise pode comprovar-se que as variações dos resultados de tensão de rotura à compressão e módulo de elasticidade podem estar relacionados com a taxa de vazios, Tabela 3.23.

Tabela 3.23 – Estimativa da taxa de vazios, tensão de rotura à compressão e módulo de elasticidade para cada grupo de provetes

% vol. fibras	e_v	f_{cm} (MPa)	E_{cm} (GPa)
0	0	94,6	24,5
1	0,0204	63,4	21,8
2	0,0071	75,2	23,7
2,5	0,0158	64,6	24,5
3	0,0228	64,2	23,7
3 (*)	0,0285	70,1	27,7

(*) Provetes ensaiados aos 365 dias

Nas figuras que se seguem ilustram-se os gráficos de dispersão com os dados apresentados na tabela anterior.

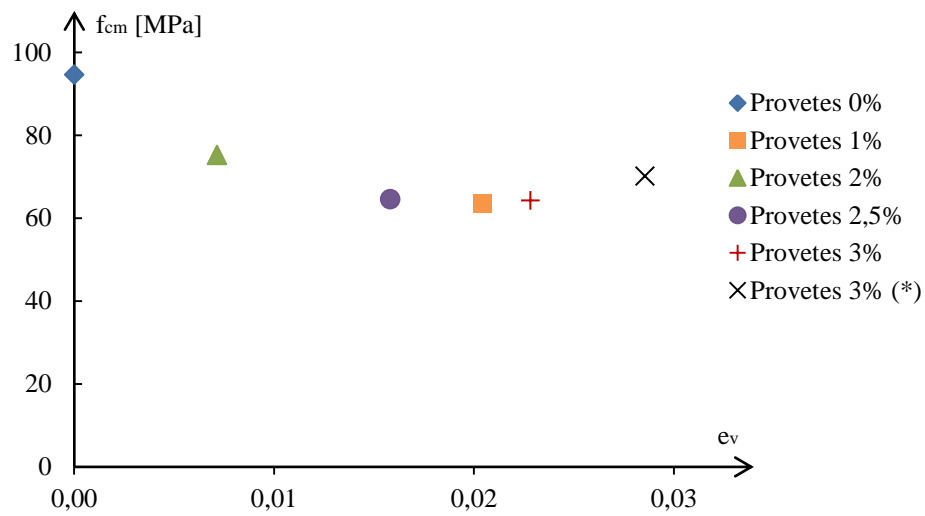


Figura 3.33 – Resistência à compressão – Estimativa da taxa de vazios

(*)Provetes ensaiados aos 365 dias

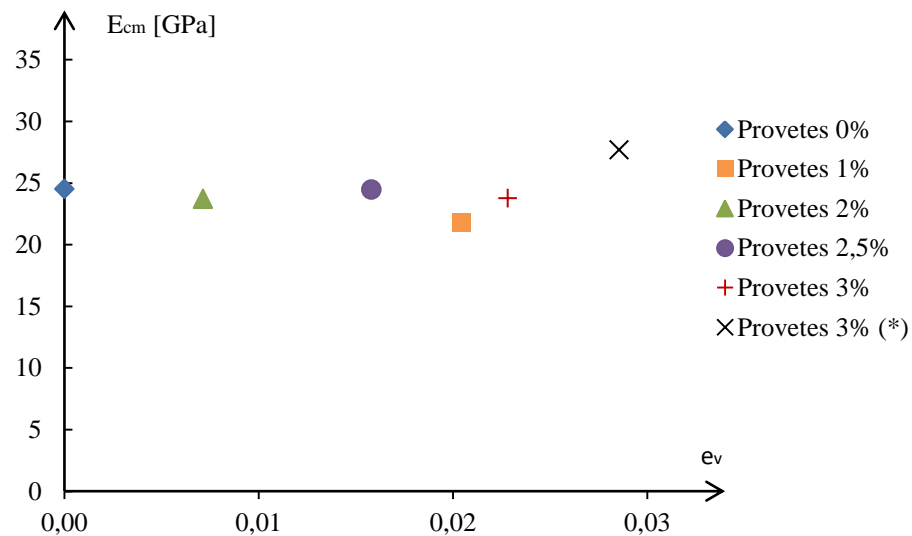


Figura 3.34 – Módulo de elasticidade – Estimativa da taxa de vazios

(*)Provetes ensaiados aos 365 dias

Analisando os resultados, verifica-se que, para provetes de CRFU ensaiados aos 28 dias, os que apresentam menores taxas de vazios, comparativamente com os provetes de calda, (provetes de 2% e 2,5% vol. fibras) são os que possuem maior resistência, havendo, no entanto, para taxas de vazios

diferentes, uma semelhança muito grande entre as tensões médias obtidas em provetes com volumes de fibras de 1%, 2,5% e 3%. Essa semelhança pode estar relacionada, não só com os vazios, mas também com a variação da dosagem de fibras. Embora não seja conclusivo a influência das fibras na tensão de rotura à compressão, de facto, os valores de módulo de elasticidade obtidos suscitam que a sua variação tende a aumentar com o volume de fibras, contudo, a influência da taxa de vazios é bastante condicionante.

Os provetes de CRFU com um volume de 3% de fibras ensaiados aos 365 dias exibem o maior taxa de vazios, todavia, comparativamente com a CRFU com a mesma dosagem de fibras e 28 dias de cura, verifica-se um melhoramento significativo com o aumento do tempo de cura, tanto na resistência à compressão como no módulo de elasticidade.

CAPÍTULO 4

MODELAÇÃO NUMÉRICA EM SAP 2000

4.1 Aspectos gerais

Com o intuito de aprofundar o estudo de caracterização da CRFU efectuado, pretende-se, neste capítulo, realizar uma análise elástica dos ensaios realizados, aos 28 dias de cura, à calda cimentícia e CRFU com um volume de 2% e 3% de fibras. Esta análise é motivada pelo facto dos provetes ensaiados apresentarem geometrias diferentes das habitualmente contempladas nos ensaios de compressão e tracção por compressão diametral. Contudo, é de salientar que a generalidade dos compósitos não apresentam um comportamento elástico no instante da rotura devendo por isso considerar-se uma análise não linear. Ainda assim, numa primeira análise, e uma vez que o material apresenta um comportamento frágil efectuou-se uma análise elástica de ambos os ensaios (compressão e “splitting”), considerando os carregamentos que os levaram à rotura, permitindo a compreensão do estado de tensão dos provetes e a interpretação dos modos de rotura observados experimentalmente.

Pretende-se, com esta análise, considerando o critério de rotura de Mohr-Coulomb e admitindo um comportamento elástico até à rotura, obter algumas aproximações à compressão simples. Admitiu-se, simplificadaamente, um material isotrópico nas modelações efectuadas no SAP 2000. Porém, é de salientar que, como referido anteriormente, dada a orientação unidireccional das fibras, o comportamento da CRFU é anisotrópico e o critério de rotura de Mohr-Coulomb é válido apenas para materiais isotrópicos. No entanto, o estudo efectuado no seguimento deste trabalho, contemplou apenas a avaliação da resistência à tracção na direcção das fibras e à compressão na direcção perpendicular. Além disso, ao admitir-se que a CRFU tem um comportamento isotrópico, segundo Christensen [8], uma vez que, o quociente entre o módulo de elasticidade na direcção transversal à orientação das fibras e o módulo de elasticidade na direcção das fibras (considerando este como o módulo de elasticidade da calda) é, para todos os volumes de fibras adoptados, compreendido entre 1 e 0,9, então a aproximação realizada é razoável e próxima do caso anisotrópico.

4.2 Modelação do ensaio de tracção por compressão diametral em provetes cúbicos

Objectivos:

Com esta modelação pretende-se analisar o estado de tensão da CRFU e da matriz cimentícia próximo da rotura, permitindo estudar o estado de tensão nas zonas das roturas. Com essa análise e com os dados obtidos experimentalmente, pretende-se obter um valor do coeficiente de Poisson (ν) aproximado a utilizar nas modelações a efectuar no SAP 2000. Posteriormente, tenciona-se comparar os resultados de resistência à compressão simples obtidos, admitindo o critério de rotura Mohr-Coulomb com o coeficiente de Poisson considerado, pelo EC2, para betão não fendilhado ($\nu = 0,2$) e o coeficiente de Poisson obtido na modelação conseguida, a partir da interpretação dos dados experimentais nos ensaios de tracção por compressão diametral.

Descrição da modelação efectuada no programa de cálculo automático SAP 2000:

Para o ensaio de tracção por compressão diametral foram efectuadas duas modelações no programa de cálculo automático SAP 2000, uma recorrendo a elementos “Shell-Thin” (2D) e outra a elementos “Solid” (3D). A modelação com elementos “Shell-Thin” permite interpretar o estado plano de tensão na direcção do carregamento, contudo, não possibilita a análise do estado de tensão provocado pelo efeito de Poisson. Por esse motivo, efectuou-se também uma modelação 3D com elementos “Solid” proporcionando-se assim essa interpretação. A modelação com elementos “Shell-Thin” foi discretizada em elementos de 10x10 mm, à excepção da zona central onde foram considerados elementos de 5x10 mm, na face superior foram aplicadas três forças (numa extensão correspondente à largura da aplicação do carregamento no ensaio) equivalentes ao carregamento médio que conduziu à rotura dos materiais, sendo de referir que, a face inferior foi simplesmente apoiada – ver Figura 4.1. Na modelação 3D, ilustrada na Figura 4.2, considerou-se uma discretização semelhante, com elementos de 10 mm de aresta excepto na zona central do provete onde foram considerados elementos de 5x10x10 mm, a face inferior também foi simplesmente apoiada (simulando a tira de madeira utilizada entre o provete e o prato da prensa). Foi aplicado um carregamento correspondente à média das forças últimas obtidas experimentalmente. É de salientar que os referenciais admitidos em cada uma das modelações são distintos e que as tensões de tracção, obtidas no SAP 2000 são positivas e as de compressão negativas. Nas figuras seguintes ilustram-se as modelações efectuadas e os referenciais considerados em cada uma delas.

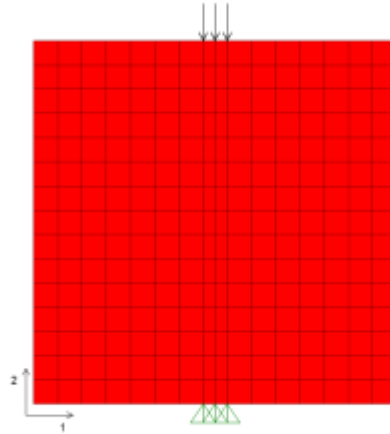


Figura 4.1 - SAP 2000 - "Shell-Thin" - Modelação 2D do ensaio de tracção por compressão diametral

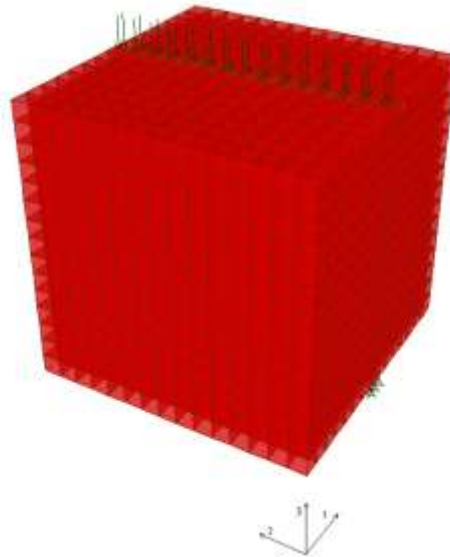


Figura 4.2 - SAP 2000 – “Solid” - Modelação 3D do ensaio de tracção por compressão diametral

Modelação 2D:

Verifica-se que os valores médios de tensão de rotura por compressão diametral ou “splitting” ($f_{ctm,sp}$) adquiridos experimentalmente são muito próximos dos obtidos nesta modelação. Como esperado, as maiores tracções transversais ao carregamento verificam-se na zona central do provete, tendo-se constatado experimentalmente uma envolvente de rotura semelhante à obtida na modelação. Durante o ensaio, também se verificou a fendilhação de alguns provetes nas imediações da zona carregada. De facto, nesta modelação evidencia-se o desenvolvimento de tracções nessa zona.

Nas Figuras 4.3 e 4.4 são ilustrados os estados de tensão segundo a direcção 1 e 2, respectivamente, para a modelação efectuada com “Shell-Thin”, admitindo a aplicação de uma força correspondente à média da tensão de rotura dos provetes de calda cimentícia ensaiados (considerando $\nu = 0,2$).

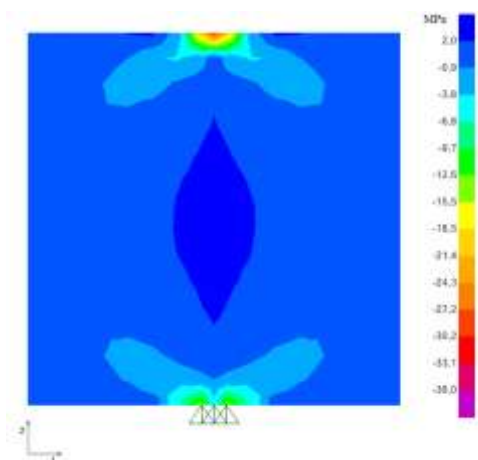


Figura 4.3 – SAP 2000 – Estado plano de tensão segundo a direcção 1

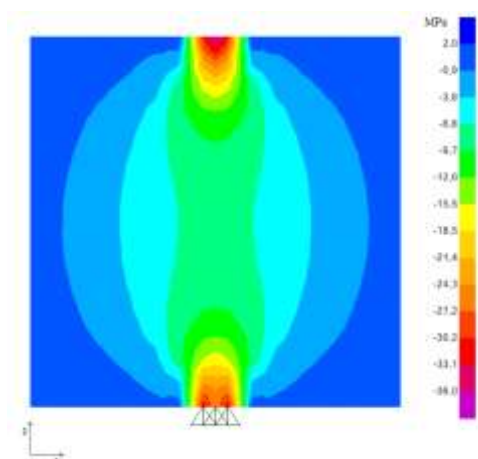


Figura 4.4 – SAP 2000 – Estado plano de tensão segundo a direcção 2

Ao analisar-se o estado de tensão segundo a direcção 2 constata-se, como seria de esperar, que as tracções segundo esta direcção são inferiores às desenvolvidas na direcção 1, sendo que experimentalmente não se verificaram roturas provocadas por estas tracções. Na tabela seguinte apresentam-se os resultados das tracções médias obtidas experimentalmente segundo a norma DIN 1048-5 ($f_{ctm,sp}$), o valor aproximado de tracção simples (f_{ctm}) sugeridas pelo EC2 (NP EN 1992-1-1, 2010) e as tracções máximas segundo a direcção 1 (S_{11}) para o carregamento considerado em cada uma das modelações.

Tabela 4.1 - Esforços de tracção experimentais e resultantes da modelação

% Vol. fibras	$f_{ctm,sp}$ (MPa)	f_{ctm} (MPa)	S_{11} (MPa)
0	2,53	2,27	2,47
2	12,38	11,15	12,17
3	15,00	13,50	14,72

Modelação 3D:

Com a interpretação dos estados planos de tensão fornecidos pela modelação 2D é possível explicar-se o modo de rotura observado na maioria dos provetes ensaiados. Contudo, em quatro provetes de CRFU com um volume de 3% de fibras observaram-se roturas por efeito Poisson, e através da modelação anterior, não é possível retirar qualquer interpretação a este respeito. A modelação 3D, além de conduzir a uma aproximação do coeficiente de Poisson (admitindo um material isotrópico), também possibilita a compreensão do campo de tensões que conduz a roturas por efeito de Poisson.

Como já referido, constatou-se que, na rotura, os provetes tanto poderiam apresentar uma rotura por resistência à tracção das fibras como por efeito Poisson (admitindo que a resistência na direcção perpendicular à orientação das fibras é dada pela resistência à tracção da calda cimentícia - $f_{ctm,sp}$). Então, considerando que o coeficiente de Poisson é o mesmo em todas as direcções, foi possível encontrar um valor aproximado do mesmo. Para se obter esse valor bastou variar o coeficiente na modelação, de modo a que as tensões verificadas na envolvente de rotura da calda (segundo a direcção 1) fossem iguais às tensões verificadas na envolvente de rotura por efeito de Poisson da CRFU com 3% de volume de fibras (segundo a direcção 2), obtendo-se assim um coeficiente de Poisson de 0,05. O facto de se ter obtido um coeficiente de Poisson de apenas 0,05 pode estar associado à fendilhação dos provetes antes da rotura.

Nas Figuras 4.5, 4.6 e 4.7 estão ilustrados os estados de tensão segundo a direcção 1, 2 e 3, respectivamente, para a modelação 3D considerando o carregamento de rotura dos provetes de calda e $\nu = 0,2$.

Na Figura 4.6 é evidente que segundo a direcção 2 surgem tracções nas imediações das zonas carregadas, sendo este campo de tensões que conduz a roturas deste tipo nos provetes. Também se constatou, em alguns provetes, fendilhação paralela às zonas carregadas (tanto na superfície superior como na inferior), na Figura 4.5 verifica-se de facto tracções elevadas nessas zonas.

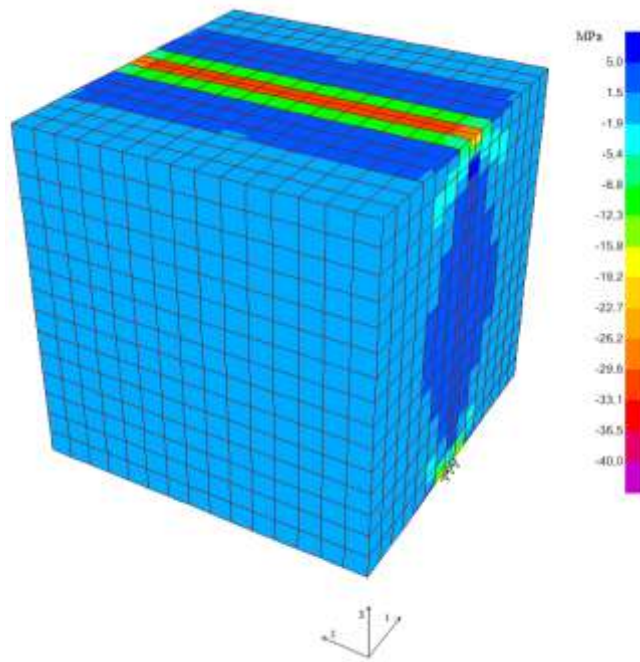


Figura 4.5 - SAP 2000 - Modelo Cúbico - Estado de tensão segundo a direcção 1

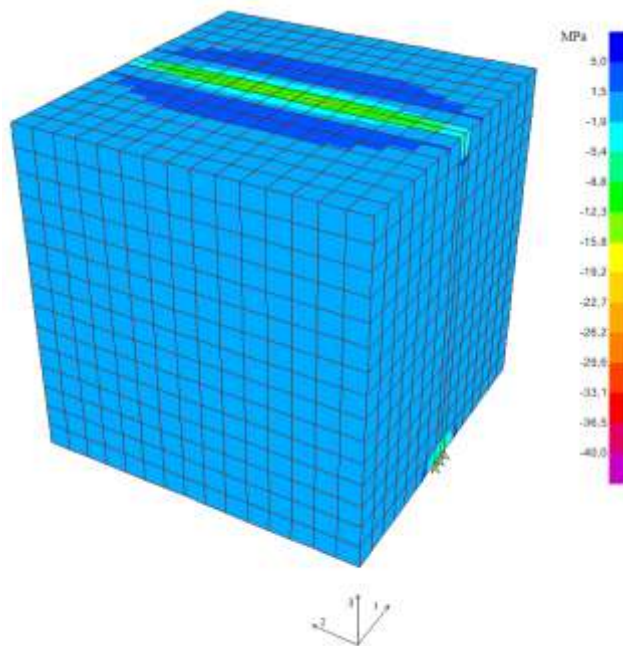


Figura 4.6 - SAP 2000 - Modelo Cúbico - Estado de tensão segundo a direcção 2

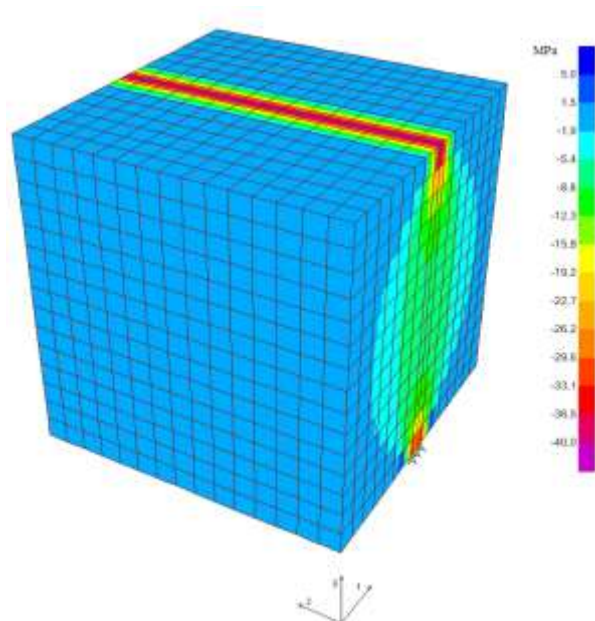


Figura 4.7 - SAP 2000 - Modelo Cúbico - Estado de tensão segundo a direcção 3

Considerando $\nu = 0,2$ verificam-se tracções segundo a direcção 1 superiores às obtidas experimentalmente (segundo a norma DIN 1048-1, 1992), alterando o coeficiente de 0,2 para 0,05 os valores numéricos aproximam-se mais dos experimentais.

A aplicação do valor médio da força última experimental da calda, verificaram-se tracções na envolvente de rotura segundo a direcção 1 na ordem dos 3 a 4 MPa com $\nu = 0,2$ e dos 2 a 2,6 MPa admitindo $\nu = 0,05$. Para as modelações dos ensaios da CRFU com um volume de 2% e 3% de fibras, as tracções verificadas segundo a direcção 1 e admitindo $\nu = 0,05$ também são próximas das obtidas pela norma DIN 1048-5 (1991).

4.3 Modelação do ensaio de compressão em provetes tubulares

Objectivos:

Uma vez que a rotura dos provetes tubulares se localizou, predominantemente, a cerca de um terço da altura, pretende-se com esta modelação compreender esses modos de rotura. Dado o facto de não existirem normas que contemplem provetes com geometria tubular nos ensaios de compressão, tenciona-se estimar a resistência à compressão simples a partir da modelação numérica. Com o

estado de tensão de rotura adquirido pela análise computacional, admitindo o critério de rotura de Mohr-Coulomb e sabendo a resistência à tracção simples da CRFU com um volume de 2% e 3% de fibras e da matriz cimentícia, pretende-se determinar a resistência à compressão simples aproximada.

Descrição da modelação efectuada no programa de cálculo automático SAP 2000:

Na modelação contemplada consideraram-se elementos de “Shell-Thin” com uma discretização quadrangular com elementos de 10x10 mm, consideraram-se as bases inferior e superior encastradas libertando-se apenas o deslocamento vertical da face superior, ou seja, com essas restrições, admitiu-se que o atrito entre o provete e os pratos da prensa tende para infinito. O modelo numérico foi submetido a um carregamento correspondente à média da força última obtida experimentalmente para a CRFU com 2% e 3% vol. de fibras e para a matriz cimentícia. Na Figura 4.8 ilustra-se a modelação do ensaio de compressão a provetes tubulares de secção circular.



Figura 4.8 - SAP 2000 - Modelação do ensaio compressão

Resultados obtidos:

É de salientar que, nesta modelação, as tensões obtidas segundo a direcção 1 representam as tensões transversais ao folheto médio e segundo a direcção 2 obtêm-se as tensões na direcção do carregamento. Nas Figuras 4.9 e 4.10 são ilustrados os diagramas de tensões segundo a direcção 1 e segundo a direcção 2, respectivamente, para o carregamento que conduziu à rotura da calda (94,6 MPa) e admitindo $\nu = 0,2$.

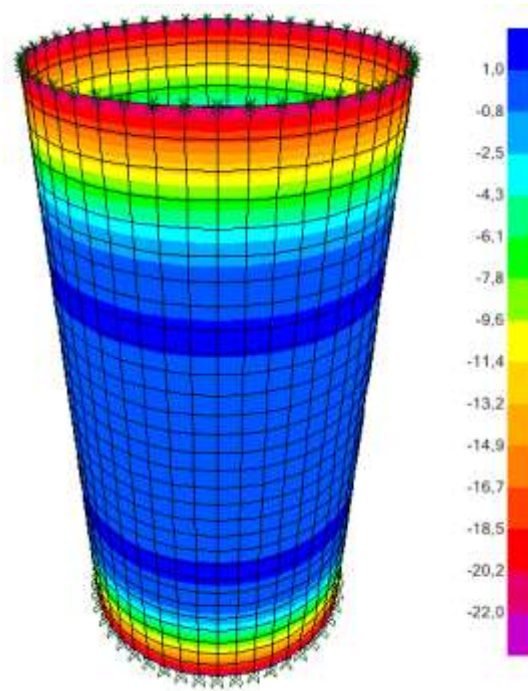


Figura 4.9 – SAP 2000 – Modelo tubular – Estado de tensão segundo a direcção 1

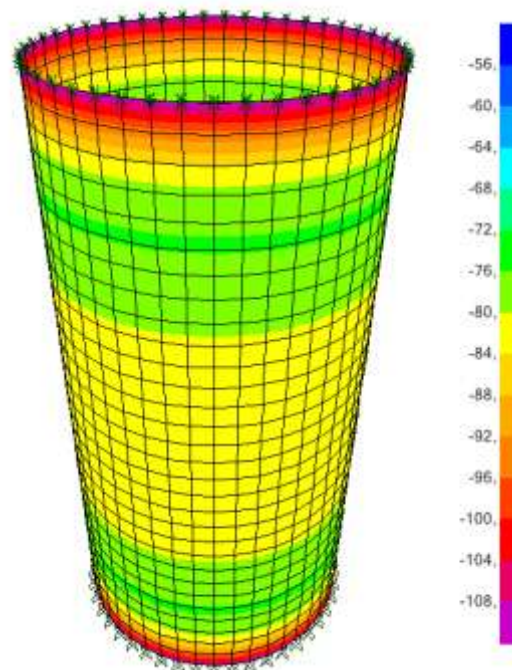


Figura 4.10 - SAP 2000 - Modelo tubular - Estado de tensão segundo a direcção 2

Ao analisar-se o estado de tensão nestes modelos verifica-se que, as maiores tracções (segundo a direcção 1) surgem a 90 mm de altura. Sabendo que a rotura dos provetes submetidos a este ensaio, como referido anteriormente, se observou, aproximadamente, a um terço da altura, então, admitiu-se que o estado de tensão que conduz à rotura dos provetes é obtido onde as tracções transversais são maiores (90 mm de altura). Dada a geometria do provete, o campo de tensões verificado nas faces exterior e interior são diferentes. Na tabela seguinte apresentam-se as maiores e as menores tensões principais (S_{22} e S_{11} , respectivamente), extraídas da análise computacional a 90 mm de altura e admitindo coeficientes de Poisson de 0,2 e de 0,05.

Tabela 4.2 - Estados de tensão a 90 mm de altura extraídos do SAP 2000

% Vol. fibras	$\nu = 0,2$				$\nu = 0,05$			
	Face exterior		Face interior		Face exterior		Face interior	
	S_{11} (MPa)	S_{22} (MPa)	S_{11} (MPa)	S_{22} (MPa)	S_{11} (MPa)	S_{22} (MPa)	S_{11} (MPa)	S_{22} (MPa)
0	1,03	-80,52	0,42	-83,58	0,20	-81,70	0,17	-82,42
2	0,82	-64,02	0,35	-66,46	0,16	-64,96	0,13	-65,51
3	0,70	-55,67	0,29	-56,77	0,14	-55,47	0,11	-55,96

Com estes dados e com os valores médios de resistência à tracção simples aproximada (f_{ctm}), obtidos experimentalmente, é possível definir pelo critério de Mohr-Coulomb a envolvente que possibilita definir os estados de tensão que conduzem o material à rotura. Na secção seguinte será apresentado com maior detalhe este critério.

4.3.1 Determinação da tensão de rotura por compressão simples admitindo o critério de Mohr-Coulomb

Critério de rotura Mohr-Coulomb:

O critério de rotura de Mohr-Coulomb pode ser definido por equações lineares que descrevem o estado de tensão de rotura de um material isotrópico, sem contemplar a tensão principal intermédia (σ_2). Aplica-se a materiais frágeis, quando a resistência à compressão uniaxial teórica (C_o) é muito maior que a tracção uniaxial teórica (T_o) (Labuz & Zang, 2012).

Coulomb definiu uma envolvente de rotura do material a partir do ângulo de atrito interno das partículas que o constituem (ϕ) e da sua coesão (c). Os círculos de Mohr permitem a representação

gráfica do estado de tensão num ponto. Este critério é definido por uma envolvente de rotura expressa por equações lineares e os círculos de Mohr, tangentes a essa envolvente, representam os estados de tensão para os quais se dá a rotura no material. Admitindo que as tensões de tracção são negativas e as de compressão positivas, a envolvente definida por Coulomb pode ser expressa como:

$$|\tau| = \sigma \tan(\phi) + c \quad (4.1)$$

Em que τ - tensão tangencial
 σ - tensão normal

Na Figura 4.11 representa-se a envolvente de rotura considerada por este critério, em que os círculos de Mohr a tracejado representam o estado de tensão de rotura de compressão e de tracção uniaxiais (teóricas) e C e D representam estados de tensão para os quais se dá a rotura.

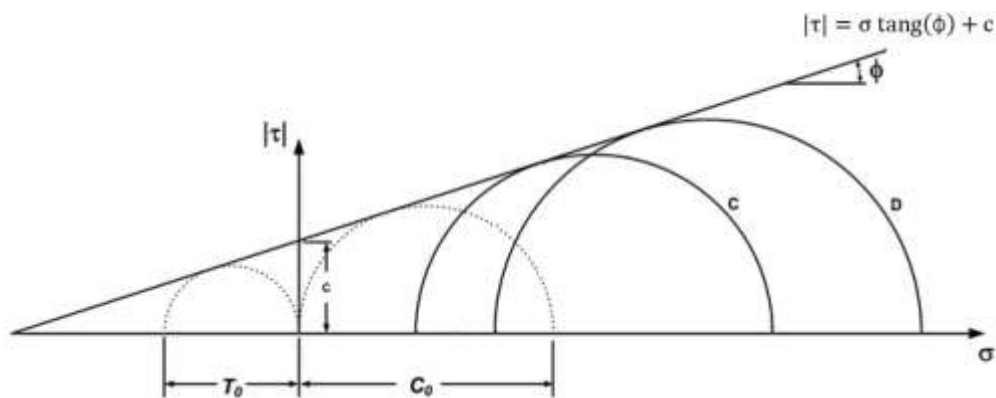


Figura 4.11 – Critério de Mohr-Coulomb: envolvente de rotura linear (Labuz & Zang, 2012)

A envolvente de rotura também pode ser expressa a partir das tensões principais. Do círculo de Mohr sabe-se que:

$$\tau_m = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad (4.2)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \quad (4.3)$$

Em que,

$$\tau_m = \sigma_m \sin(\phi) + c \cos(\phi) \quad (4.4)$$

Substituindo 4.2 e 4.3 em 4.4 resulta,

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_3 (\sin(\phi) + 1) + 2c \cos(\phi)}{1 - \sin(\phi)} \quad (4.5)$$

Onde τ_m – raio do círculo de Mohr

σ_m – centro do círculo de Mohr

σ_1 – menor tensão principal

σ_3 – maior tensão principal

Onde, da equação 4.5, com $\sigma_3 = 0$ e $\sigma_1 = C_o$ se obtém:

$$C_o = \frac{2c \cos(\phi)}{1 - \sin(\phi)} \quad (4.6)$$

E com $\sigma_3 = -T_o$ e $\sigma_1 = 0$ resulta:

$$T_o = \frac{2c \cos(\phi)}{1 + \sin(\phi)} \quad (4.7)$$

Determinação da tensão de rotura por compressão simples aproximada:

De facto, o estado de tensão a que os provetes ensaiados à compressão estão sujeitos não é uniaxial. As tensões de rotura obtidas nos vários ensaios de compressão normalizados são representativas apenas da resistência à compressão para cada ensaio em questão, sendo que, essa resistência nunca se trata da resistência à compressão uniaxial (salvo ensaios de compressão triaxial). As tensões de compressão e tracção uniaxiais admitidas no critério de Mohr-Coulomb são teóricas uma vez que resultam de ensaios de tracção e de compressão normalizados. Contudo, a geometria dos provetes adoptada no presente estudo não está contemplada em nenhuma norma e os provetes estão sujeitos a estados de tensão de rotura diferentes dos alcançados em ensaios de compressão normalizados. Julga-se por isso necessário efectuar uma determinação aproximada da resistência à compressão simples dos provetes ensaiados, só assim será possível comparar os resultados obtidos com outros ensaios.

Como referido anteriormente, admitiu-se que a rotura dos provetes se dá na região onde se verificam as maiores tracções transversais ao folheto médio, ou seja, segundo a modelação efectuada, a 90 mm de altura. Considerando esse estado de tensão e admitindo as resistências à tracção simples obtidas no seguimento deste trabalho segundo a NP EN 1992-1-1, 2010, ou seja, com $T_o = f_{ctm}$, foi possível determinar a resistência à compressão simples aproximada da matriz cimentícia e da CRFU com 2% e 3% vol. de fibras. Para o efeito foram considerados dois coeficientes de Poisson distintos, o correntemente considerado para o betão (0,2) e o obtido neste trabalho através da análise numérica (0,05). É de salientar que, como já referido, o estado de tensão das faces exterior e interior dos provetes ensaiados à compressão são distintos, pelo que, se considerou a face onde se verifica a maior compressão simples pelo critério de rotura admitido.

Matriz cimentícia:

Dos estudos de caracterização efectuados, aos 28 dias de cura, à matriz utilizada na produção de CRFU sabe-se que, segundo Ana Bras, *et al*, (Gião; Lúcio; Chastre & Brás, 2012), a resistência à compressão alcançada em provetes de 160x40x40 mm foi de aproximadamente 100 MPa. Segundo um estudo efectuado por Ana Gião foram realizados ensaios a provetes tubulares obtendo-se uma tensão média de rotura de 96,1 Mpa. Já no seguimento deste trabalho, foram efectuados 5 ensaios válidos a provetes tubulares de calda, resultando uma tensão de rotura de 94,6 MPa, sendo este o valor de carregamento utilizado na modelação realizada no SAP 2000. É de salientar que ao contrário da CRFU, a calda cimentícia é homogénea e apresenta um comportamento isotrópico, pelo que ao admitir-se um material isotrópico na modelação e considerando o critério de Mohr-Coulomb aplicado a este material, a aproximação assim efectuada será, à partida, mais fiável do que quando aplicamos os mesmos princípios à CRFU.

Nas Figuras 4.12 e 4.13 apresentam-se os gráficos obtidos para determinação da resistência à compressão simples da calda cimentícia admitindo o critério de Mohr-Coulomb e um coeficiente de 0,2 e de 0,05, respectivamente.

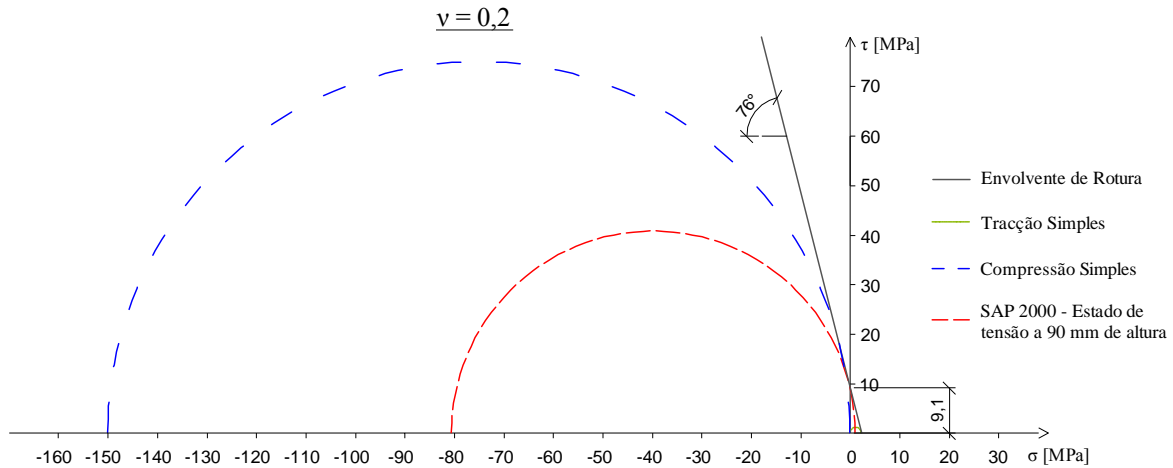


Figura 4.12 - Determinação da resistência à compressão simples da calda com $\nu = 0,2$

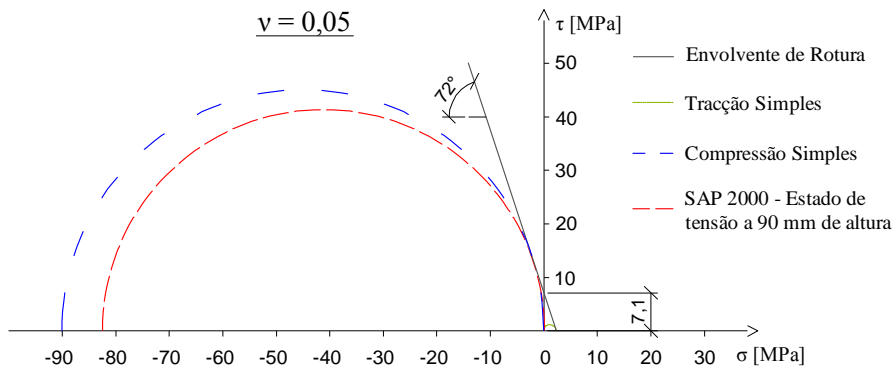


Figura 4.13 - Determinação da resistência à compressão simples da calda com $\nu = 0,05$

Como se pode constatar, os valores de resistência à compressão simples obtidos admitindo diferentes coeficientes de Poisson são muito distintos (150 e 90 MPa). Esse facto deve-se à reduzida resistência à tracção da calda cimentícia, pelo que, uma pequena variação no estado de tensão (proveniente da análise numérica) corresponde a uma grande diferença entre as resistências à compressão obtidas pelo critério admitido. Contudo, tendo em consideração todos os dados de resistência à compressão disponíveis, o resultado alcançado admitindo $\nu = 0,05$ julga-se mais realista.

CRFU com 2% vol.de fibras:

Neste caso, a modelação numérica contemplou um carregamento de 75,3 MPa (obtido experimentalmente em 6 provetes tubulares). Nas figuras seguintes apresentam-se os resultados:

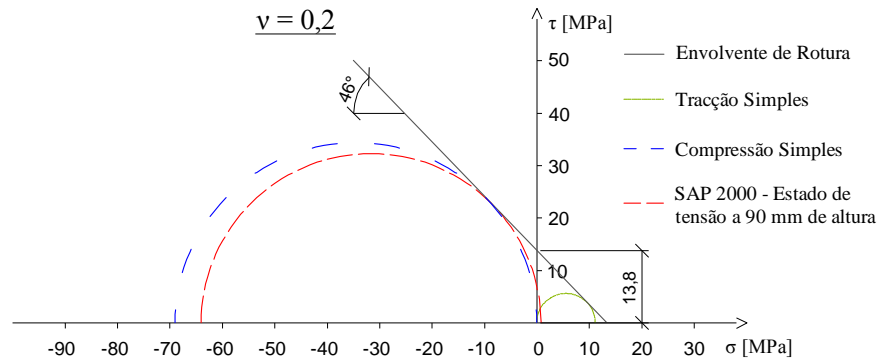


Figura 4.14 - Determinação da resistência à compressão simples da CRFU com 2% vol. fibras com $\nu = 0,2$

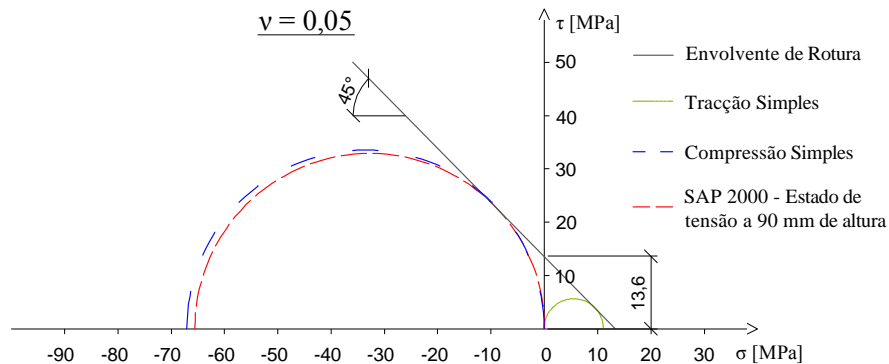


Figura 4.15 - Determinação da resistência à compressão simples da CRFU com 2% vol. fibras com $\nu = 0,05$

Dada a maior resistência à tracção do material, os valores obtidos admitindo coeficientes de Poisson distintos são muito próximos.

CRFU com 3% vol.de fibras:

Nas seguintes figuras apresentam-se os resultados obtidos nesta análise:

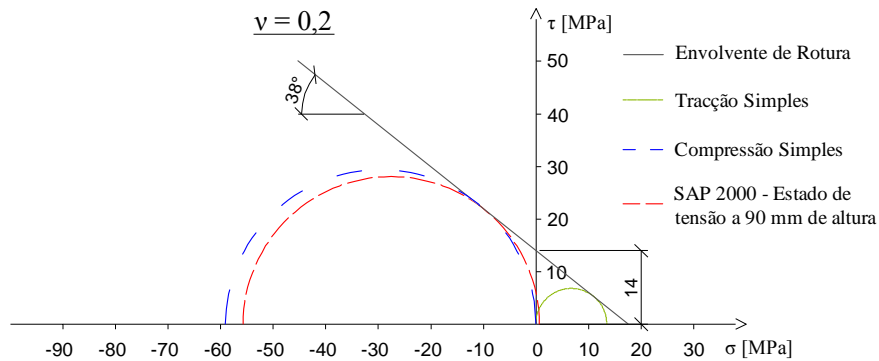


Figura 4.16 - Determinação da resistência à compressão simples da CRFU com 3% vol. fibras com $\nu = 0,2$

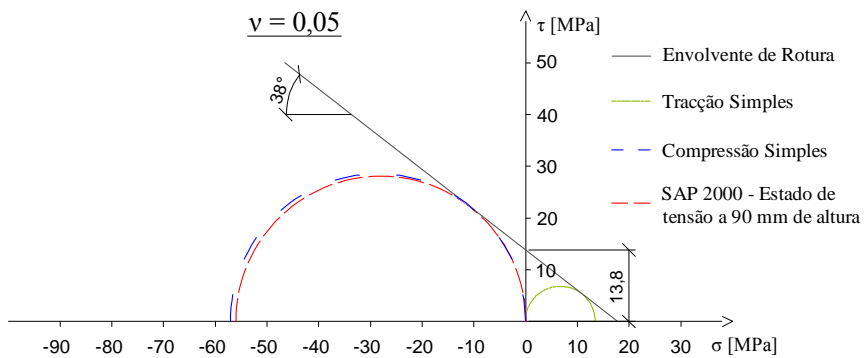


Figura 4.17 - Determinação da resistência à compressão simples da CRFU com 3% vol. fibras com $\nu = 0,05$

O carregamento considerado nesta modelação foi de 64,23 MPa e à semelhança dos resultados obtidos para a CRFU com um volume de 2%, os valores obtidos com coeficientes de Poisson distintos são muito próximos.

Com o aumento da dosagem de fibras verifica-se a diminuição do ângulo de atrito interno e o aumento da coesão. Na Tabela 4.3 apresentam-se os valores de compressão uniaxial (C_o), ângulo de atrito interno (ϕ) e coesão (c) obtidos pelo critério de Mohr-Coulomb.

Tabela 4.3 – Mohr-Coulomb - Valores de compressão uniaxial, ângulo de atrito interno e coesão.

% vol. de fibras	$\nu = 0,2$			$\nu = 0,05$		
	C_o (MPa)	ϕ (°)	c (MPa)	C_o (MPa)	ϕ (°)	c (MPa)
0	150	75,9	9,1	90	71,9	7,1
2	69	46,0	13,8	67	45,4	13,6
3	59	38,5	14,0	57	37,9	13,8

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

5.1 Conclusões

O trabalho efectuado incidiu no estudo de caracterização mecânica da CRFU com vários volumes de fibras e idades de cura diferentes. O principal objectivo recaiu sobre a determinação dos módulos de elasticidade e das resistências à compressão e tracção deste compósito, avaliando o contributo dos vários volumes de fibras e idades de cura nas suas características e comportamento.

Foram efectuados 23 ensaios a provetes cúbicos com 150 mm de aresta para caracterização da resistência à tracção por de compressão diametral. Com o intuito de definir o módulo de elasticidade e resistência à compressão foram realizados 38 ensaios a provetes tubulares de secção circular com 300 mm de altura, 150 mm e 110 mm de diâmetro externo e interno, respectivamente.

No desenvolvimento do trabalho foi possível quantificar a resistência à tracção simples da calda cimentícia e da CRFU para volumes de 2% e 3% de fibras, aos 28 dias de cura, e determinar a influência de curas mais prolongadas (315 dias) através do ensaio de provetes de calda e de CRFU para volumes de 3% de fibras. Avaliou-se também a eficiência dos volumes de fibras adoptados na resistência à tracção.

Quantificaram-se as tensões de rotura à compressão e módulos de elasticidade, no entanto, verificou-se o aumento da estimativa da taxa de vazios com a adição de fibras, condicionando estas características mecânicas.

Dado o facto de não existirem normas que contemplem provetes com geometria tubular nos ensaios de compressão, efectuou-se uma análise para determinar a resistência à compressão simples. Com o estado de tensão de rotura adquirido pela análise computacional, admitindo o critério de rotura de Mohr-Coulomb, e sabendo a resistência à tracção simples da matriz cimentícia e da CRFU com um volume de 2% e 3% de fibras, determinaram-se algumas aproximações às resistências à compressão simples, considerando um comportamento isotrópico e coeficientes de Poisson distintos.

Em seguida são descritas detalhadamente todas as conclusões obtidas no seguimento do trabalho desenvolvido.

Caracterização da resistência à tracção da CRFU:

Nos estudos de caracterização da resistência à tracção efectuados, verificaram-se, para idades de cura de 28 dias, resistências à tracção simples de 2,27 MPa, 11,15 MPa e 13,5 MPa para a CRFU com volumes de 0%, 2% e 3% de fibras, respectivamente. Para idades de cura de 315 dias, constataram-se resistências de 3,07 MPa e de 13,25 MPa para a matriz cimentícia e CRFU com 3% de volume de fibras, respectivamente. Verifica-se, portanto, que há um aumento significativo da tensão de rotura à tracção da calda para idades de cura mais avançadas, contudo, para a CRFU com 3% de fibras, os resultados revelaram-se muito próximos. Concluiu-se, como seria de esperar, que a resistência à tracção das fibras de aço é preponderante na resistência à tracção da CRFU.

O volume de vazios não condiciona significativamente a resistência à tracção da CRFU. Neste âmbito, não foi efectuada uma estimativa da taxa de vazios devido à irregularidade da face de betonagem (dada a incorporação às fibras), pelo que os dados obtidos estariam sujeitos a um erro muito grande. No entanto, durante a produção de 2 provetes houve problemas de betonagem, nomeadamente com a avaria do vibrador, e após a desmoldagem apresentavam vazios visíveis a olho nu. Estes ensaios não foram validados, contudo, estes provetes apresentaram tensões de rotura obtidas são próximas da média.

A CRFU com 28 dias e 3% vol. de fibras apresentou roturas por efeito Poisson, no entanto, com o aumento da resistência da calda, aos 315 dias, já não se constataram roturas deste tipo. Verificou-se também que as tensões de rotura não são proporcionais aos volumes de fibras adoptados e que a eficácia de 2% de fibras é superior à dos 3%.

Sabendo os resultados dos ensaios efectuados a varões de aço utilizados na produção das fibras (Tabela 2.3 (Gião; Lúcio; Chastre & Brás, 2012)), e que a resistência das fibras é preponderante na tensão de rotura à tracção, pode provar-se que a resistência à tracção, obtida nos ensaios de compressão diametral, não é proporcional aos volumes de fibras adoptados. Na tabela seguinte apresentam-se os resultados de tracção simples esperados ($f_{ct,esp}$), considerando que a resistência da CRFU é dada apenas pela resistência do volume de aço adoptado, e os obtidos (f_{ctm}) aos 28 dias de cura:

Tabela 5.1 - Resistência à tracção simples esperada e obtida por compressão diametral

f_{sum}	% Vol. fibras	$f_{ct,esp}$ (MPa)	f_{ctm} (MPa)
908,2	2	18,16	11,15
	3	27,25	13,50

Verifica-se, portanto, que a resistência à tracção simples aproximada, obtida por compressão diametral, fica aquém das expectativas. No entanto, segundo os resultados obtidos por Ana Gião (Gião, 2012), em ensaios de tracção em flexão a provetes 40x40x160 mm (Tabela 2.4), verifica-se que os valores são proporcionais aos volumes de fibras adoptados. Na Tabela 5.2 efectuou-se a média dos valores, obtidos nesse trabalho, considerando nesse cálculo os dados obtidos para ambas as caldas consideradas (a/c de 0,28 e de 0,4), aos 28 dias de cura.

Tabela 5.2 - Resistência à tracção simples esperada e obtida em ensaios de tracção em flexão

f_{sum}	% Vol. fibras	$f_{ct,esp}$ (MPa)	$f_{ct,fl}$ (Mpa)
908,2	1	9,08	15,35
	2	18,16	28,88
	3	27,25	40,25

Os valores de tracção obtidos em flexão são muito superiores aos obtidos por compressão diametral, e, como referido anteriormente, em flexão a resistência da CRFU é proporcional aos volumes de fibras adoptados.

Caracterização do módulo de elasticidade da CRFU:

O valor médio do módulo de elasticidade da calda de cimento, obtido por compressão aos 28 dias de cura, foi de 24,5 GPa, verificando-se que todos os provetes de CRFU com o mesmo tempo de cura apresentaram valores menores, independentemente do volume de fibras adoptado. Esse facto pode ser justificado com o aumento da taxa de vazios, contudo, se não fosse esse aumento, os dados sugerem que o módulo de elasticidade tende a aumentar com o acréscimo do volume de fibras.

Verificou-se que o módulo de elasticidade sofre um acréscimo dos 28 para os 365 dias de cura, constatando-se um aumento de 3,6% na calda cimentícia e de 14,2% na CRFU com um volume de 3% de fibras. Posteriormente, nos ensaios de compressão a provetes de calda com 365 dias, detectou-se que estes apresentavam alguma deficiência. Ainda assim, constatou-se um acréscimo do módulo de elasticidade nestes provetes comparativamente com os de 28 dias de cura. No entanto, o acréscimo do módulo de elasticidade da CRFU com um volume de 3% de fibras foi muito superior (14,2%) e estes provetes apresentaram maior taxa de vazios que os de CRFU com o mesmo volume de fibras ensaiados aos 28 dias, perspectivando-se que o acréscimo do módulo de elasticidade da CRFU com 3% de fibras e 365 dias de cura seria ainda superior se estes provetes tivessem menor taxa de vazios. Por estes factos, supõe-se também que o acréscimo do módulo de

elasticidade da calda, dos 28 para os 365 dias de cura, seria muito superior a 3,6% caso estes provetes não apresentassem nenhuma deficiência.

Caracterização da resistência à compressão da CRFU:

O valor médio de tensão de rotura à compressão obtido para a calda cimentícia aos 28 dias foi de 94,6 MPa, sendo todos os valores obtidos para a CRFU inferiores. Esse facto, tal como nos valores do módulo de elasticidade, pode ser justificado pelo aumento da taxa de vazios, verificando-se pela análise dos dados que esta resistência é fortemente influenciada com esse aumento. Nos provetes ensaiados aos 365 dias detectou-se que os resultados obtidos para a calda não são representativos da tensão de rotura real do material, uma vez que apresentavam deficiências. Já nos provetes de CRFU com um volume de 3% de fibras constatou-se, mesmo para uma estimativa da taxa de vazios superior (0,0285) à dos ensaiados aos 28 dias (0,0228), um acréscimo da resistência à compressão de 8,4%. A CRFU com 1% de volume de fibras apresentou a menor resistência à compressão (63,4 MPa), no entanto, dos provetes ensaiados aos 28 dias, foi nestes que se evidenciou a maior estimativa da taxa vazios (0,0204). Os provetes de CRFU com 2% vol. de fibras apresentaram a taxa de vazios mais baixa (0,0071) e o valor de tensão de rotura registrado foi o mais elevado (75,2 MPa). A CRFU com volumes de 2,5% e 3% apresentaram valores de resistência à compressão de 64,6 MPa e 64,2 MPa para taxas de vazios de 0,0158 e 0,0228, respectivamente. Embora, não seja evidente, os resultados sugerem que, se não houvesse um aumento de vazios, a incorporação de fibras tenderia a melhorar o comportamento à compressão.

Determinação aproximada da resistência à compressão simples:

Com base na análise numérica, o valor aproximado de compressão simples obtido para a calda cimentícia, admitindo um coeficiente de Poisson de 0,2, foi de 150 MPa. Este valor é muito elevado e o critério de rotura utilizado pode não ser aplicável à calda de cimento por apresentar uma resistência à compressão mais de 30 vezes superior à resistência à tracção. Contudo, admitindo o coeficiente de Poisson obtido (0,05) o resultado parece mais real (90 MPa). Para a CRFU, os valores obtidos para um coeficiente de Poisson de 0,2 e de 0,05 são próximos, verificando-se que são ligeiramente superiores para o primeiro, obtendo-se 69 e 67 MPa para 2% vol. de fibras e de 59 e 57 para 3% vol. de fibras.

5.2 Desenvolvimentos Futuros

Uma vez que nas modelações numéricas efectuadas foi admitido o comportamento elástico do material, poder-se-á realizar uma análise não-linear de modo a adquirir-se dados para uma situação mais próxima do instante da rotura dos provetes.

Face aos resultados obtidos, a taxa de vazios é preponderante na resistência à compressão e módulo de elasticidade do material estudado. Para mitigar o volume de vazios presente na CRFU é conveniente otimizar este compósito, melhorando assim o seu comportamento. Embora a produção deste material em laboratório não tenha sido efectuada com o equipamento de vibração adequado, uma vez que se recorreu a um vibrador de agulha quando o mais conveniente seria vibrar os provetes numa mesa vibratória, a produção de CRFU em obra é menos controlada e sujeita a mais condicionantes. Como tal, face aos resultados obtidos e experiência de produção adquirida ao longo dos trabalhos laboratoriais desenvolvidos, recomenda-se a adição de um volume de fibras até 2% de modo a facilitar a aplicação da manta de fibras e minimizar o risco do aumento da porosidade no compósito. No entanto, as fibras utilizadas neste estudo possuíam um diâmetro equivalente muito reduzido (0,07 mm). Estas fibras (com diâmetros reduzidos) minoram a tendência à fendilhação, mas dificultam a impregnação da calda. Sugere-se por isso, em trabalhos futuros, a utilização de fibras com maiores diâmetros, facilitando a betonagem, conduzindo a um compósito mais compacto e com maior durabilidade, no qual se poderão testar volumes de fibras acima dos 3%. O desenvolvimento de uma calda mais fluída e com sílica de fumo de menor granulometria pode melhorar também a qualidade de produção e o comportamento deste compósito.

Entre as vantagens da CRFU face aos outros, desenvolvidos até então, pode destacar-se o facto da resistência das fibras ser preponderante na tensão de rotura à tracção e o encamisamento de vigas e pilares com este material ser de fácil execução. Contudo, a produção em obra pode condicionar a sua qualidade, por isso a pré-fabricação de cofragens colaborantes apresenta potencialidades, demonstrando-se necessário testar a aderência na interface, e sua importância no confinamento de elementos estruturais solicitados à acção sísmica.

Além do referido anteriormente, poder-se-ia ainda aprofundar mais o estudo de caracterização da calda reforçada com fibras unidireccionais (CRFU), no que se refere aos seguintes aspectos:

- Quantificar a porosidade do material para vários volumes e espessuras de fibras diferentes;
- Estudar a durabilidade da CRFU;
- Realizar uma campanha experimental de ensaios para avaliar a eficiência do confinamento conferido pelo encamisamento com CRFU, para diferentes volumes de fibras.

REFERÊNCIAS

- Aarup, B.; Karlesen, J.; Lindström, G. (2000). Fiber Reinforced High Performance Concrete for in-situ Cast Joints. Article for Conference Orlando, 2000.
- Allena, S. & Newton, C. (2010). Ultra-High Strength Concrete Mixtures Using Local; National Ready Mixed Concrete Association. Concrete Sustainability Conference. New Mexico, USA, 2010.
- Barros, J. (1996). Estado-da-arte dos Betões Reforçados com Fibras. Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Artigo - ISSN 0873-1152. 3, p. 29-47, 1996.
- Baustoffe, S. & Massivbau (2004). Ultra High Performance Concrete (UHPC). International Symposium on Ultra High Performance Concrete. Deutsche Nationbibliografie. Kassel, Germany, 2004.
- Bournas, D. & Triantafyllou, T. (2008). Innovative seismic retrofitting of old-type RC columns through jacketing: Textile-Reinforced Mortars (TRM) versus Fiber-Reinforced Polymers (FRP). The 14th World Conference on Earthquake Engineering. Beijin, China, 2008.
- Brás, A.; Gião, A.; Lúcio, V. & Chastre, C. (2012). Development of an injectable grout for concrete repair, Elsevier, Cement & Concrete Composites. Lisboa, 2012.
- Brueckner, A.; Ortlepp, R. & Curbach, M. (2006). Textile reinforced concrete for strengthening in bending and shear. Materials and Structures. Dresden, germany, 2006.
- Carvalho, T. (2010). Reforço à Flexão de Vigas de Betão Armado com Compósito de CFRP. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil - Estruturas e Geotecnia, Faculdade de Ciências e Tecnologia, UNL. Lisboa, 2010.
- Castro, A.; Tiba, P. & Pandolfelli, V. (2011). Fibras de polipropileno e sua influência no comportamento de concretos. Grupo de Engenharia de Microestrutura de Materiais (GEMM), Departamento de Engenharia de Materiais. Cerâmica, Vol. 57, pp. 22-31, 2011.
- Contamine, R.; Larbi, A. & Hamelin, P. (2011). Contribution to direct tensile testing of textile reinforced concrete (TRC). Materials Science and Engineering. Elsevier Science. Lyon, France, 2011.
- Coskun, H. (2003). The effects of constuction practices on the Slurry Infiltrated Mat Concrete (SIMCON) strengthened R- C column. Fifth National Conference on Earthquake Engineering. Istanbul, Turkia, 2003.
- Costa, J. (2005). Prevenção e protecção das construções contra riscos sísmicos. Fundação Luso-Americana. Lisboa, 2005.

- Coutinho, J. (2006). *Materiais de construção 2 - 1ª Parte- Ligantes e caldas*. Departamento de Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2006.
- Dagar, K. (2012). *Slurry Infiltrated Fibrous Concrete (SIFCON)*. *International Journal of Applied Engineering and Technology*, Vol. 2, pp 99-100. Chittorgarh, Rajasthan, 2012.
- DIN 1048-5 (1991): *Testing concrete; Testing of hardened concrete (specimens prepared in mould)*, 1991.
- Dogan, E. & Krstulovic-Opara, N. (2003). *Seismic Retrofit with Continuous Slurry-Infiltrated Mat Concrete Jackets*. *ACI Structural Journal*, Vol. 100, Nº 6. North Carolina, USA, 2003.
- Fidjestöl, P. & Lewis, R. (1998). *Microsílica as an addition*. *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*. Chapt. 12, Fourth Edt. Ed. By Peter C. Hewlett, Arnold, 1998
- Gião, A. (2012). *Ligação Viga-Pilar de Alto Desempenho Sísmico*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Especialidade Estruturas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, UNL, 2012.
- Gião, A.; Lúcio, V.; Chastre, C. & Brás, A. (2012). *UFRG - Unidirectional Fiber Reinforced Grout as strengthening material for reinforced concrete structures*. Lisboa: BEFIB2012, 2012.
- Goodspeed, C.; Vanikar, S. & Cook, R. (2011). *High-Performance Concrete (HPC) Defined for Highway Structures*. Administration, Federal Highway, 2011.
- Hackman, L.; Farrel, M. & Dunham, O. (1992). *Slurry Infiltrated Mat Concrete (SIMCON)*. *Concrete International*, 1992.
- Häußler-Combe, U. & Hartig, J. (2007). *Bond and failure mechanisms of textile reinforced concrete (TRC)*. *Cement & Concrete Composites*. Elsevier Vol. 29, pp. 279–289. Dresden, 2007.
- Hegger, J. & Voss, S. (2008). *Investigations on the bearing behaviour and application potential of textile*. *Engineering Structures*. Elsevier, Vol. 30, pp. 2050–2056. Aachen, 2008.
- Kwan, A., Ng, P. & Fung, W. (2010). *Research Directions For High-Performance Concrete*. Department of Civil Engineering. The University of Hong Kong. Pokfulam, Hong Kong, 2010.
- Labuz, J. & Zang, A. (2012). *Mohr-Coulomb Failure Criterion - Rock Mechanics and Rock Engineering*. POTSDAM, 2012.
- Lange, D. & Roesler, J. (2003). *High Performance Concrete for Transportation Structures*. Illinois: Civil Engineering Studies. Illinois, 2003.

- Lankard, D. (1984). Slurry Infiltrated Fiber Concrete (SIFCON). Concrete International. Ohio, 1984.
- Larbi, A.; Contamine, R. & Hameline, P. (2012). TRC and hybrid solutions for repairing and/or strengthening reinforced. Elsevier Science Vol. 45, pp. 12–20. Lyon, France, 2012.
- Larbi, A.; Contamine, R.; Ferrier, E. & Hamelin, P. (2010). Shear strengthening of RC beams with textile reinforced concrete (TRC) plate. Construction and Building Materials. Elsevier, Vol. 24, pp. 1928–1936. Cedex, France, 2010.
- Naaman, A. E. (2007). High Performance Fiber Reinforced Cement Composites: Classification and Applications. CBM-CI International Workshop. Karachi, Pakistan, 2007.
- NP EN 1992-1-1 (2010): Eurocódigo 2: Projecto de estruturas de betão. Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios, 2010.
- NP EN 1998-1. (2010): Eurocódigo 8: Projecto de estruturas para resistência aos sismos. Parte 1: Regras gerais, acções sísmicas e regras para edifícios, 2010.
- NP EN 206-1 (2007): Betão - Parte1: Especificação, desempenho e conformidade, 2007.
- Mapei (2001). Mapeplast SF - Silica fume-based additive with pozzolanic action. 2001
- PCA, (2003). Design and Control of Concrete Mixtures, Chapter 17 High-Performance Concrete. Portland Cement Association, 2003.
- Schladitz, F.; Frenzel, M.; Ehlig, D. & Curbach, M. (2012). Bending load capacity of reinforced concrete slabs strengthened with textile. Engineering Structures. Elsevier, Vol. 40, pp. 317–326. Dresden, Germany, 2012.
- Schmidt, M.; Fehling, E. (2004). Ultra-High-Performance Concrete: Research and Application in Europe. Germany, 2004.
- Schneider, B. & Mondragon, R. (1989). Design and Construction Techniques for SIFCON. Albuquerque: New Mexico Engineering Research Institute, University of New Mexico, AFWL, 1989.
- Schneider, J. & Reymendt, J. (2008). Properties and applications of DUCON® A micro-reinforced. Tailor Made Concrete Structures – Walraven & Stoelhorst. Frankfurt, Germany, 2008.
- Secil (2004). CEM I 42,5 R Cimento Portland - Certificação, V.3, 2004.
- Sika (2011). Sika ViscoCrete 3005 - Superplastificante de elevado desempenho. V.1, 2011
- Teixeira, A. & Martins, J. (2003). Sebenta - Betões de Elevado Desempenho. Materiais de Construção, Vol. 1, 2003.

Teran, A. & Ruiz, J. (1992). Reinforced concrete jacketing of existing structures. Earthquake Engineering, Tenth World Conference. Mexico City, 1992.

Triantafillou, T. (2011). Chapter 5 - Textile-Reinforced Mortar (TRM) - A New Generation of Composite Materials as Alternative to Fibre-reinforced Polymers (FRP) for Strengthening and Seismic Retrofitting of Structures. Composite Materials - A Vision for the Future. Patras, Greece, 2011.

Webgrafia

[1] <http://www.traderscity.com/board/products-1/offers-to-sell-and-export-1/steel-fiber-for-reinforcement-concrete-85670/> [Acedido a 20 de Março de 2013]

[3] http://www.china-139.com/prouducts/products_fen.asp?keyword=%D0%C2%CC%D8%BD%A8%B2%C4 [Acedido a 21 de Março de 2013]

[4] <http://www.macauhub.com.mo/en/2011/03/10/chinese-state-company-chongqing-polycomp-international-corporation-buys-factory-in-brazil/> [Acedido a 21 de Março de 2013]

[5] http://www.serraciments.com/fibras-para-mortero-y-hormigon/fibras-de-polipropileno/fibra-de-polipropileno-multifilamento_17.html [Acedido a 21 de Março de 2013]

[6] http://www.serraciments.com/fibras-para-mortero-y-hormigon/fibras-de-polipropileno/fibra-durfort_18.html [Acedido a 21 de Março de 2013]

[7] Katzer, J. (2009). Współczesne fibrokompozyty cementowe. Politechnika Koszalińska, 2009. Disponível em http://www.inzynierbudownictwa.pl/technika,materiały_i_technologie,artykuł,wspolczesne_fibrokompozyty_cementowe,2701 [Acedido a 2 de Fevereiro de 2013]

[8] Christensen, R. (2008). III - Failure Criteria for Anisotropic Fiber Composite Materials. Disponível em <http://www.failurescriteria.com> [Acedido a 10 de Fevereiro de 2013]

