

ESTUDO DO COMPORTAMENTO À TRAÇÃO DE BETÃO ARMADO COM FIOS DE CARBONO

Diogo Miguel Pato Gaudêncio Felicíssimo

**Mestrado em Engenharia Civil
Área de Especialização: Estruturas
Dissertação**

ORIENTADOR: Professor Doutor Rui Neves

fevereiro de 2021

Dissertação submetida no Instituto Politécnico de Setúbal

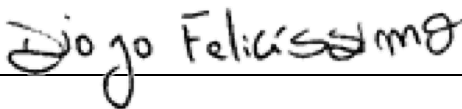
ESTUDO DO COMPORTAMENTO À TRAÇÃO DE BETÃO ARMADO COM FIOS DE CARBONO.

Mestrado em Engenharia Civil

DECLARAÇÃO DE AUTORIA DO TRABALHO

Declaro ser o autor deste trabalho, que é original e inédito. Autores e trabalhos consultados estão devidamente citados no texto e constam da listagem de referências incluída.

Diogo Miguel Pato Gaudêncio Felicíssimo

A handwritten signature in black ink that reads "Diogo Felicissimo". The signature is written in a cursive style and is positioned above a horizontal line.

(assinatura)

DIREITOS DE CÓPIA OU COPYRIGHT

© **Copyright:** Diogo Miguel Pato Gaudêncio Felicíssimo

O Instituto Politécnico de Setúbal tem o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicitar este trabalho através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, de o divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho de mestrado representa não só a conclusão de uma etapa académica, mas de uma etapa de aprendizagem e desenvolvimento pessoal, que não seria possível sem o apoio e acompanhamento de algumas pessoas a quem vou agradecer em seguida.

Aos meus pais, que são, desde sempre os principais impulsionadores de todas os meus sucessos pessoais e académicos. E que, apesar das dificuldades, me proporcionaram sempre as melhores condições possíveis, muitas vezes em detrimento do seu próprio bem-estar e objetivos pessoais.

À minha Avó, que durante a execução desta dissertação passou por vários desafios mais complicados. Obrigado por cuidar de mim desde que me lembro e por fingir, durante 28 anos, que as minhas piadas a fazem rir.

Ao Professor Doutor Rui Neves, por ter sido um mentor extremamente capacitado para esclarecer todas as questões que fui colocando. Pelo acompanhamento ao longo desta jornada. Por ter sido honesto desde início sobre a dimensão e complexidade da campanha experimental e apesar de todas as dificuldades encontradas em laboratório se mostrou sempre disponível para me apoiar, esclarecer as dúvidas e, mais importante, motivar.

Ao Professor Doutor Nelson Carriço, por todo o apoio orientação e por todas as oportunidades de aprendizagem a que tive acesso durante a sua orientação, como bolsheiro de investigação.

Ao Senhor Alexandre Gamito, pela disponibilidade que sempre teve para me ajudar e orientar com os ensaios de laboratório e pela vontade incansável de aprender à cerca de temas novos.

Ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil, por disponibilizar tempo e as instalações para desenvolver os ensaios da campanha experimental, em especial à Engenheira Paula Rodrigues, Engenheira Susana Fonseca e Sr. Nuno Silvestre do Núcleo de Materiais Orgânicos, do Departamento de Materiais.

Aos meus amigos e colegas, que estiveram comigo durante todo o percurso académico, pelas noites a estudar, pelo apoio, incentivo e companheirismo. – em especial ao Bruno Ferreira, ao Nelson Rebelo, ao Flávio Lopes, ao Jorge Anacleto e ao Wilson Lopes por todas as horas de trabalho partilhadas.

Os meus mais sinceros e humildes agradecimentos.

RESUMO

A utilização de fibras de carbono como material de reforço de betão armado apresenta-se como uma alternativa cada vez mais interessante no que diz respeito à sustentabilidade. Este material possui uma elevada resistência à corrosão, ao contrário das armaduras tradicionais de aço e possibilita a construção de peças de betão armado mais leves.

O presente trabalho de mestrado tem como objetivo principal a realização de uma campanha experimental centralizada em ensaios de tração uniaxial com taxa de deslocamento constante, em tirantes de argamassa reforçados com fios de carbono, sem tratamento de resinas, dispostos segundo o eixo longitudinal dos tirantes. O fator chave para avaliação da performance dos provetes é o controlo da fendilhação através dos ensaios de tração.

Foram ensaiadas quatro composições de argamassa diferentes para avaliar a tensão na primeira fenda, o espaçamento entre fendas, a força última e a respetiva extensão média. Com base nos resultados obtidos, observou-se que é possível que a trabalhabilidade da matriz, possa influenciar a carga máxima do compósito. Tal como no betão armado tradicional, é possível fazer o controlo da fendilhação para compósitos reforçados com fios de carbono. No entanto os dois compósitos têm comportamentos especificidades distintas, o que não permite que os modelos existentes para simular o comportamento de elementos reforçados com aço, possam ser utilizados para peças reforçadas com fios de carbono.

PALAVRAS-CHAVE: TRC; Controlo de fendilhação; Ensaio de tração simples; Fibra de carbono; Compósitos cimentícios; Sustentabilidade.

ABSTRACT

The use of carbon-based textiles as a reinforcement for cementitious composites presents itself as an increasingly interesting alternative regarding sustainability. Unlike steel reinforcement, this material provides resistance to corrosion and allows the construction of lighter reinforced concrete structures.

The present master's work has as its main objective the realization of an experimental campaign focused on tensile tests with constant displacement rate, in cementitious composites reinforced with carbon filaments, without resin treatment, arranged according to its longitudinal axis. Control of cracking is considered the key performance factor and is assessed through tensile testing.

Four different mortar compositions were tested to evaluate the stress in the first crack, the spacing between cracks, the ultimate force, and the respective average extension. Based on the results, it was observed that it is possible that the workability of the matrix can influence the maximum load withstood by the composite. As in traditional reinforced concrete it is possible to control the cracking of composites reinforced with carbon wires. However, the two composites tend to be distinct. This fact does not allow the utilization of the established norms for the design of steel reinforced structures in the design of carbon reinforced structures.

Keywords: TRC; crack control; tensile testing; carbon fiber; cementitious composites.

ÍNDICE GERAL

Agradecimentos	i
Resumo	iii
Abstract	v
Índice Geral	vii
Índice de Figuras	xi
Índice de Tabelas	xv
Símbolos e Abreviaturas	xvii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO	1
1.2. MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS	1
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	2
2. BETÃO ARMADO	3
2.1. RETROSPETIVA DO BETÃO NA CONSTRUÇÃO	3
2.2. BETÃO ARMADO	5
2.3. CONTROLO DE FENDILHAÇÃO.....	9
2.3.1 Motivos para controlo de fendilhação	9
2.3.2 TIPOS DE FENDILHAÇÃO.....	12
2.3.3 COMPORTAMENTO DO BETÃO À TRAÇÃO	14
2.3.4 ARMADURA MÍNIMA.....	14
3. FIBRAS DE CARBONO	17

3.1.	NOTA HISTÓRICA.....	17
3.2.	PROCESSO DE FABRICO	18
4.2.1	Fibras à base de pitch	19
4.2.2	Fibras à base de rayon	19
4.2.3	Fibras à base de PAN.....	20
3.3.	FIBRAS DISCRETAS.....	21
3.4.	FIBRAS CONTÍNUAS	23
3.5.	BETÃO REFORÇADO COM TÊXTEIS.....	24
4.	PRÉ-CAMPANHA EXPERIMENTAL	27
4.1.	INTRODUÇÃO	27
4.2.	ENSAIOS DE TRAÇÃO DA FIBRA.....	27
4.3.	EXECUÇÃO DOS PROVETES	32
4.4.	ENSAIOS DE ARRANCAMENTO	36
4.5.	ENSAIOS DE TRAÇÃO DOS TIRANTES.....	37
4.6.	CONCLUSÕES DA CAMPANHA PRÉ-EXPERIMENTAL.....	39
5.	CAMPANHA EXPERIMENTAL	41
5.1.	INTRODUÇÃO	41
5.2.	MATRIZ	43
5.3.	FABRICO DOS PROVETES	43
5.4.	ENSAIOS DE ADERÊNCIA	46
5.5.	DETERMINAÇÃO DA CONSISTÊNCIA POR ESPALHAMENTO	47
5.6.	ENSAIOS DE COMPRESSÃO E FLEXÃO	48
5.7.	ENSAIOS DE TRAÇÃO.....	49
6.	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS.....	53

6.1.	ESPALHAMENTO.....	53
6.2.	ENSAIOS DE FLEXÃO	54
6.3.	ENSAIOS DE COMPRESSÃO	54
6.4.	ENSAIOS DE TRAÇÃO SIMPLES	55
6.5.	TRC: COMPORTAMENTO À TRAÇÃO.....	57
6.5.1	Modos de rotura	58
6.5.2	Composição A35	59
6.5.3	Composição A40	61
6.5.4	Composição A50	63
6.5.5	Composição A60	64
6.6.	CONSIDERAÇÕES GLOBAIS	66
7.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES DE TRABALHO FUTURO	69
7.1.	RECOMENDAÇÕES DE TRABALHO FUTURO	71
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	73
	ANEXO 1	79

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1 - Panteão Romano.....</i>	<i>4</i>
<i>Figura 2 - Farol de John Smeaton.</i>	<i>4</i>
<i>Figura 3 - Barco em betão-armado, Jean-Loius Lambot.</i>	<i>5</i>
<i>Figura 4 - Esquema representativo do sistema Hennebique.....</i>	<i>7</i>
<i>Figura 5 - Fábrica do Caramujo.</i>	<i>8</i>
<i>Figura 6 - Fendilhação causada por ação de agentes presentes no meio ambiente, Fábrica do Caramujo, Cova da Piedade.....</i>	<i>10</i>
<i>Figura 7 - Depósito de água de Poceirão.....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 8 - Exemplo de fendas à vista no interior de um edifício de betão.....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 9 – Esquema de fendilhação devida a deformações impostas/restringidas.....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 10 – Gráfica tensão/extensão do comportamento do betão à tração.</i>	<i>14</i>
<i>Figura 11 - Réplica da primeira lâmpada de Thomas Edison.....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 12 - Precursor de PAN.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 13 - Processo de fabrico de fibras de carbono à base de PAN.</i>	<i>21</i>
<i>Figura 14 - Fibras discretas.</i>	<i>22</i>
<i>Figura 15 - Esquema da orientação das fibras de carbono no betão.</i>	<i>23</i>
<i>Figura 16 - Fibras de carbono contínuas.</i>	<i>23</i>
<i>Figura 17 - Têxtil de fibra de carbono.</i>	<i>24</i>
<i>Figura 18 - Ponte pedonal em Albstadt, na Alemanha.</i>	<i>25</i>
<i>Figura 19 - Casca de cobertura, feita com TRC.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 20 - Projeto do edifício CUBE.</i>	<i>26</i>
<i>Figura 21 – Fibras danificadas pelas garras da prensa.....</i>	<i>28</i>

<i>Figura 22 – Proteção das fibras de carbono, com resina epóxi e chapas compósitas.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 23 - Avaliação da solução escolhida, LNEC (a). Provete após a rotura (b).</i>	<i>29</i>
<i>Figura 24 - Gráfico de tensão, extensão. Ensaio de tração da fibra.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 25 - Esquema da divisão do provete em parcelas para ensaios de tração.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 26 - Gráfico representativo dos ensaios de tração a 100, 50 e 25% dos filamentos..</i>	<i>31</i>
<i>Figura 27 - Esquema ideal da divisão do provete em parcelas para ensaios de tração.</i>	<i>32</i>
<i>Figura 28 - Dimensões dos provetes de ensaio, campanha pré-experimental.</i>	<i>32</i>
<i>Figura 29 - Sistema utilizado para manter as fibras em tensão durante o processo de betonagem.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 30 - Provete com a fibra completamente fora do centroide da peça.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 31 - Segunda iteração dos moldes de betonagem.</i>	<i>34</i>
<i>Figura 32 - Provetes danificados durante e depois da descofragem.</i>	<i>35</i>
<i>Figura 33 - Aplicação da vaselina (a). Fibras intactas após a descofragem (b).....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 34 - Provetes de ensaio, arrancamento e tração.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 35 - Esquematização do ensaio de aderência (a). Ensaio de aderência (b).....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 36 - Ensaio de tração, tirante, campanha pré-experimental.</i>	<i>38</i>
<i>Figura 37 - Rotura do provete pela fibra (a). Gráfico do ensaio de tração de um dos tirantes (b).....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 38 - Ensaio de tração uniaxial ao feixe de fibra.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 39 - Provetes de ensaios de aderência, argamassas.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 40 - Esquema dos tirantes armados com fios de carbono.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 41 - Moldes utilizados para produção dos provetes.</i>	<i>46</i>
<i>Figura 42 - Ensaios de aderência, argamassa.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 43 - Argamassa na mesa de espalhamento após um ensaio.</i>	<i>48</i>

<i>Figura 44 - Ensaio de compressão (a). Ensaio de flexão (b).....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 45 - Esquema de argolas utilizado para garantir tração pura.</i>	<i>50</i>
<i>Figura 46 - Esquema do mecanismo de adaptação do extensómetro (a). Mecanismo de adaptação do extensómetro, aplicado (b).</i>	<i>51</i>
<i>Figura 47 - Trabalhabilidade, resultados dos ensaios de espalhamento.</i>	<i>53</i>
<i>Figura 48 - Relação entre resistência à flexão e resistência à compressão.</i>	<i>55</i>
<i>Figura 49 - Relação entre a resistência à flexão e resistência à tração da matriz.</i>	<i>56</i>
<i>Figura 50 - Relação entre a resistência à compressão e resistência à tração da matriz.</i>	<i>57</i>
<i>Figura 51 - Tipos de modo de rotura.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 52 - Gráfico força-extensão dos provetes da composição A35, ensaiados à tração simples.</i>	<i>60</i>
<i>Figura 53 - Provetes A35, após os ensaios de tração.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 54 - Gráfico força-extensão dos provetes da composição A40, ensaiados à tração simples.</i>	<i>62</i>
<i>Figura 55 - Provetes A40, após os ensaios de tração.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 56 - Gráfico força-extensão dos provetes da composição A50, ensaiados à tração simples.</i>	<i>63</i>
<i>Figura 57 - Provetes A50, após os ensaios de tração.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 58 - Gráfico força-extensão dos provetes da composição A60, ensaiados à tração simples.</i>	<i>65</i>
<i>Figura 59 - Provetes A60, após os ensaios de tração.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 60 - Gráfico força-extensão dos provetes representativos de cada composição.</i>	<i>66</i>

ÍNDICE DE TABELAS

<i>Tabela 1 – Força de rotura, avaliação dos materiais de proteção da fibra.</i>	<i>28</i>
<i>Tabela 2 - Composição do betão, campanha pré-experimental.</i>	<i>33</i>
<i>Tabela 3 - Composições e propriedades das argamassas.....</i>	<i>43</i>
<i>Tabela 4 - Identificação dos provetes de ensaio.</i>	<i>45</i>
<i>Tabela 5 - Resultados dos ensaios de flexão.....</i>	<i>54</i>
<i>Tabela 6 - Resultados dos ensaios de compressão.</i>	<i>54</i>
<i>Tabela 7 - Resistência da matriz à tração simples.</i>	<i>56</i>

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

$\varepsilon_{u,m}$ – Extensão ultima média

σ_{cr} – Tensão na primeira fenda

A35 – Composição com 0,35 de razão água-cimento

A40 – Composição com 0,40 de razão água-cimento

A50 – Composição com 0,50 de razão água-cimento

A60 – Composição com 0,60 de razão água-cimento

ASTM – American Society for Testing and Materials

CFRP – Carbon Fibre Reinforced Polimer

FRCC – Fabric Reinforced Cement Composites

FRCM – Fabric Reinforced Cementitious Matrix

F_u – Força última

PAN – Polyacrylonitrile

PBO – Polyparaphenylene Benzobisoxazole

PVC – Policloreto de Vinil

RBA – Regulamento do Betão Armado

S_m – Espaçamento entre fendas

TRC – Textile Reinforced Roncrete

TRM – Textile Reinforced Mortar

1. INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

O betão é o material, mundialmente, mais utilizado na indústria da construção. É um material que confere uma boa trabalhabilidade e grande resistência a forças de compressão. Porém, o betão tem uma resistência quase nula quando exposto a esforços de tração, debilidade que é normalmente compensada com a adição de varões de aço - armaduras. Mas, o próprio reforço do betão com aço também apresenta pontos menos favoráveis. Para além de ser relativamente difícil de manusear em obra, é bastante propício à corrosão devido a ataques de agentes presentes no ambiente.

As armaduras em compósitos de carbono apresentam-se como uma alternativa bastante apelativa às armaduras em aço, uma vez que para além de serem relativamente fáceis de manusear em obra (mais leves), não apresentam suscetibilidade à corrosão, ao contrário das armaduras de aço, e têm uma resistência mecânica superior a estas.

Todavia, as armaduras em compósitos de carbono são caras e, sendo elementos rígidos, não possuem vantagens em termos de manobrabilidade, de montagem e de relação volume aparente-volume efetivo ocupado em estaleiro, em relação às armaduras tradicionais em aço.

Visando otimizar ritmos de construção e custos de mão-de-obra em situações de projeto que conduzam a elementos fracamente armados, e.g. alguns pavimentos industriais, tem-se substituído o reforço com elementos contínuos e orientação bem definida (reforço tradicional) com elementos discretos aleatoriamente orientados, ou seja, em vez de betão armado, utiliza-se betão reforçado com fibras. No entanto, a capacidade de reforço do betão através da incorporação de fibras é fortemente limitada por questões relacionadas com a amarração das forças que se conseguem mobilizar nas fibras, pela orientação das fibras em relação às solicitações e pela quantidade de fibras que se consegue misturar no betão.

Face ao exposto, julga-se ser de interesse explorar uma solução que permita melhorar ritmos de construção, diminuir custos de mão-de-obra, diminuir espaço ocupado em estaleiro, melhorar a maneabilidade e, ao mesmo tempo, garantir o reforço necessário ao betão.

1.2. MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS

Em termos gerais, o trabalho que se propõe pretende ser uma contribuição para o conhecimento na área do betão armado, mais especificamente na utilização de novos materiais como armadura. Igualmente, pretende-se promover o desenvolvimento de conhecimentos numa área em crescente importância no setor da construção (fibras de carbono).

A avaliação do desempenho do reforço do betão através de fibras contínuas (fios) de carbono para efeitos de controlo de fendilhação (armadura mínima) pode ser identificada como o objetivo principal deste trabalho. Para o atingir, será necessário alcançar previamente outro objetivo que é a caracterização da capacidade resistente do reforço, quando embebido numa matriz cimentícia.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação de mestrado encontra-se estruturada em sete capítulos e um anexo. No capítulo 1, faz-se o enquadramento da dissertação e apresentam-se os objetivos gerais e específicos a serem atingidos. No segundo capítulo (capítulo 2) faz-se a síntese de conhecimentos da evolução da utilização do betão enquanto material de construção até aos tempos de hoje. No capítulo 3 é feita uma retrospectiva da utilização de fibras de carbono, desde a sua produção até aos vários tipos que podem ser utilizados em construção. No capítulo 4 é feita uma descrição de uma pré-campanha experimental que serviu para a preparação e desenvolvimento da campanha experimental apresentada no capítulo 5. No capítulo 5 é feita a descrição de todos os passos da campanha experimental desenvolvida na presente dissertação, que consiste na análise do comportamento mecânico de provetes de argamassa armados com fios de carbono. No capítulo 6 são apresentados e analisados os resultados da campanha experimental do capítulo 5. Finalmente, no capítulo 7 apresentam-se as principais conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

2. BETÃO ARMADO

2.1. RETROSPETIVA DO BETÃO NA CONSTRUÇÃO

Desde há muito tempo e ao longo dos anos, a Engenharia Civil tem sido um dos marcos que define diversas civilizações e os avanços tecnológicos nesta área ajudaram a expandir vastos impérios.

A utilização do betão como material de construção data de há milhares de anos atrás, sendo o registo mais antigo do uso deste material de 5600 AC. Durante escavações na margem do rio Danúbio na antiga Jugoslávia, foram descobertos pavimentos de cabanas, em betão, numa vila construída por pescadores e caçadores da idade da pedra (Stanley, 1979).

De forma similar, grandes civilizações antigas, tais como a civilização egípcia ou grega, limitaram o recurso a betão e argamassas apenas para pavimentos, paredes e fundações.

Os Romanos, por outro lado, exploraram amplamente este recurso, assim como as argamassas com alguma perícia, utilizando materiais como pozolanas, cal e areia, de forma a criarem várias obras que duram até aos tempos de hoje, como casas, templos, e aquedutos, entre outras.

Há ainda registos de que os Romanos tentaram armar o betão com recuso a cabos de bronze, no entanto não foram bem-sucedidos devida à diferença entre coeficientes de dilatação entre o bronze e o betão (Appleton, 2004).

Graças à tentativa frustrada de utilizar o bronze como material de reforço, os Romanos viram-se forçados a conceber as suas construções de modo a que o betão funcionasse em compressão, dada a resistência quase inexistente do betão à tração, o que resultou na construção de estruturas com vãos vencidos por arcos e com paredes de espessuras extremamente elevadas. Na sequência deste problema dá-se o surgimento do betão leve, que seria utilizado em diversas obras de engenharia, como o Coliseu e o Panteão (apresentado na **Figura 1**), este último, das poucas obras Romanas, com a utilização betão leve, que se mantém intacta nos dias de hoje.



Figura 1 - Panteão Romano.¹

Durante centenas de anos, os Romanos desenvolveram inúmeros trabalhos em betão, assumindo-se assim como um dos principais materiais estruturais da época. No entanto, surpreendentemente, com a queda do império Romano, quase todo o conhecimento adquirido durante séculos foi perdido (Stanley, 1979).

A construção em betão entrou assim num período de estagnação, que só teve fim no século XVIII com o desenvolvimento de estudos das propriedades do cimento.

Em 1756, John Smeaton, foi encarregue de construir um terceiro farol num canal Inglês em Eddystone rocks (apresentado na **Figura 2**).



Figura 2 - Farol de John Smeaton.²

Os dois faróis precedentes haviam caído, um, vítima de um incêndio e o outro de um vendaval. Smeaton decidiu construir o 3º farol com blocos de pedras sobrepostas. No entanto, os cimentos existentes para ligarem os blocos de pedra eram fracos e não possuíam

¹ Consultado em <https://cf.bstatic.com/images/hotel/max1024x768/971/97152072.jpg> a 06/01/2021

² Consultado em <https://biclaranja.blogs.sapo.pt/334504.html> a 04/01/2020

propriedades que permitissem resistir aos agentes a que o farol estaria sujeito. Foi então que o engenheiro de Leeds começou a investigar as propriedades do cimento, resultando então no primeiro cimento com propriedades mecânicas adequadas à construção desde a queda do Império Romano (Stanley, 1979).

James Parker em 1776 e Louis Vicat em 1818, deram continuidade ao trabalho de investigação começado por Smeaton, que culminou na aprovação da patente do cimento Portland, obtida por Joseph Aspdin em 1824 e que lançou o mote para um grande desenvolvimento do betão como material de construção (Appleton, 2004).

2.2. BETÃO ARMADO

Os betões e argamassas, têm em geral elevada resistência sollicitações de compressão. Porém, são materiais frágeis e com resistência à tração relativamente reduzida. O betão armado (com varões de aço), é o exemplo globalmente mais utilizado de um material compósito, constituído por uma matriz (betão) reforçada com varões (de aço), para solucionar esta problemática.

A obra mais antiga, reconhecida de betão armado é da autoria do francês Jean-Louis Lambot, em 1848, mais concretamente, um barco (apresentado na **Figura 3**), que foi posto a navegar um ano depois. Este barco foi mostrado na exposição universal de Paris de 1855 e despertou o interesse de Joseph Monier, outro pioneiro e figura de destaque no início do betão armado.



Figura 3 - Barco em betão-armado, Jean-Louis Lambot.³

³ Consultado em <https://www.maisonlambot.com/en/joseph-louis-lambot/#jp-carousel-4161> em 06/01/2021

Monier, jardineiro de profissão, não conseguia ter vasos que correspondessem às suas necessidades. A ideia de associar os dois materiais, surgiu graças à necessidade de reduzir as fendas, que ocorriam frequentemente nas caixas floreiras de betão simples e controlá-las, com a introdução de armaduras de aço.

O interesse nesta área do conhecimento foi-se aguçando até que no final do século XIX, foram publicados vários estudos sobre betão armado, com teorias sobre o comportamento à flexão e foi criada a primeira disciplina de betão armado na ENPC – École National des Ponts et Chaussées, em Paris.

Não foi preciso esperar muito até que no início do século XX, houvesse um grande desenvolvimento na utilização e compreensão do betão armado (Appleton, 2004).

François Hennebique (1842-1921), é sem dúvida uma figura incontornável no que diz respeito a obras de betão armado no século XX, tanto devido ao sistema que desenvolveu (Sistema Hennebique), assim como notáveis obras que realizou durante o início do mesmo.

Através de ensaios realizados num estaleiro que montou especialmente para o efeito, Hennebique, comprovou em 1896 a eficiência da sua solução e método de cálculo (Quintela, 1989).

Um esquema do Sistema Hennebique, encontra-se apresentado na **Figura 4**.

Em 1898, construiu em Paris, fundou a *Maison Hennebique-Bétons*, feita em betão armado, o edifício surgia como um manifesto à potencialidade daquela solução (Quintela, 1989).

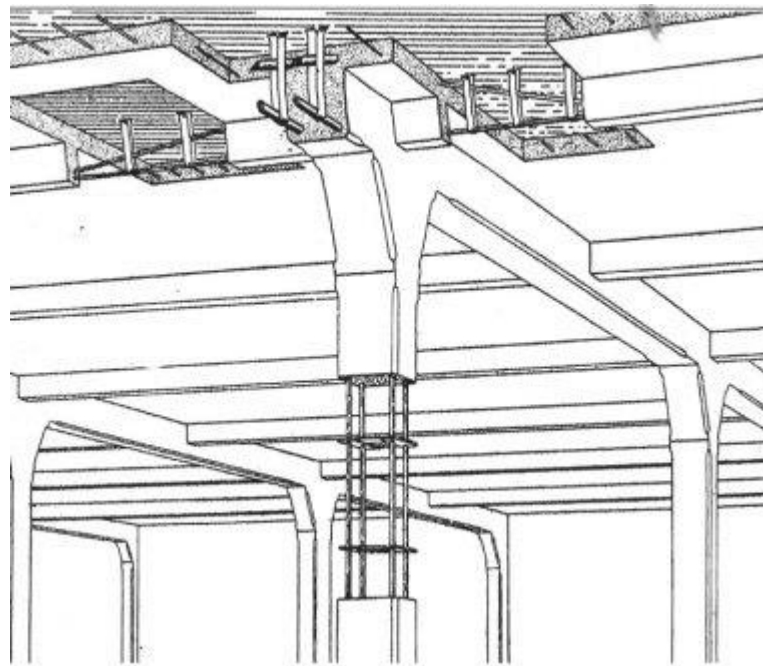


Figura 4 - Esquema representativo do sistema Hennebique.⁴

Este sistema, teve um grande sucesso, muito por causa da sua conceção e preparação de execução de obras, que lhe conferiam uma rapidez e qualidade muito boas aliadas a custos de mercado extremamente competitivos.

A nível nacional, a Fábrica do Caramujo (apresentada na **Figura 5**) é um marco do sistema Hennebique em Portugal, instalada em 1965, na Cova da Piedade. Foi uma das primeiras fabricas moeiras do país. Este edifício de 5 pisos, tem um peso histórico colossal, sendo que foi um dos primeiros edifícios de betão armado construídos em Portugal, o primeiro com o sistema Hennebique (Toscano, 2012).

⁴ Consultado em (Guida et al., 2013)



Figura 5 - Fábrica do Caramujo.⁵

Posteriores à geração de François Hennebique, existem vários nomes de relevo no âmbito do betão armado, devido aos desenvolvimentos alcançados no estudo e aplicação do mesmo.

Dois desses nomes, são Mörsch (1872-1950) e Freyssinet (1879-1962). O livro publicado por Mörsch em 1909, “Le Béton Arme – Études Théorique et Pratique”, serviu para alertar sobre o pouco avanço na área no betão armado nos 100 anos que o antecederam e publicar os estudos que fez em parceria com uma empresa de construção. Estes estudos trouxeram avanços no conhecimento de estruturas, nomeadamente vigas sujeitas a flexão e esforço transversal (Appleton, 2004).

Nas décadas que se seguiram houve uma grande evolução no conhecimento do betão armado e Eugène Freyssinet surge como um dos nomes mais importantes para o desenvolvimento do conhecimento nas estruturas de betão pré-esforçado, realizando a primeira viga em betão pré-esforçado em 1908.

⁵ Consultado em (Toscano, 2012)

Em Portugal, a primeira disciplina de betão de cimento armado surgiu em 1922, na Faculdade Técnica da Universidade do Porto. E em 1935 é publicado o “Regulamento do Betão Armado” (RBA).

Atualmente, o regulamento utilizado é o Eurocódigo 2 EN1992 e servirá como referência para os cálculos efetuados ao longo da presente dissertação.

2.3. CONTROLO DE FENDILHAÇÃO

O betão é o material de construção mais utilizado, graças às várias vantagens conhecidas que oferece, como baixo custo, facilidade geral de obtenção e ampla aplicabilidade. No entanto, é um material que apresenta baixa resistência à tração tal como à abertura e propagação de fissuras (Barhum & Mechtcherine, 2011).

A fendilhação é expectável numa estrutura de betão sujeita a esforços de tração, flexão ou esforço transversal resultantes de ações diretas ou de deformações impostas. No entanto deve ser limitada de modo a que não prejudique o funcionamento correto, durabilidade ou aspeto da estrutura (CEN, 2010).

2.3.1 Motivos para controlo de fendilhação

Um elemento estrutural não tem de resistir apenas a ações mecânicas, mas também a outras ações físicas e químicas. O betão armado com varões de aço é bastante suscetível à corrosão devido a ataques de agentes presentes no ambiente.

Segundo Jaccoud (1987), a fendilhação é um fenómeno que deve ser controlado devido a alguns fatores de risco como corrosão de armaduras (apresentada na **Figura 6**), problemas de estanqueidade e conforto do utilizador.



Figura 6 - Fendilhação causada por ação de agentes presentes no meio ambiente, Fábrica do Caramujo, Cova da Piedade.

Os fenómenos de deterioração por corrosão das armaduras estão associados ao processo mecânico da ação de forças expansivas no interior do betão, as quais geram trações que, ultrapassando a resistência de tração do betão, originam a sua fendilhação (Appleton, 2004).

Embora na situação estudada nesta dissertação este perigo não exista, graças às vantagens fornecidas pelo reforço em carbono, no betão armado com armaduras de aço (betão armado tradicional), a fendilhação constitui um risco para o reforço. Com o aparecimento das fendas as armaduras deixam de estar protegidas e passam a estar expostas ao ambiente, aumentando assim o risco de corrosão. O aumento do revestimento do betão surge como uma das possíveis soluções para responder à necessidade de proteger os varões de aço destas ações físico-químicas.

Outro dos problemas associados à fendilhação é a possibilidade de comprometer a estanqueidade do elemento estrutural. Normalmente o estado limite de fendilhação está associado ao estado limite de serviço de um elemento. No entanto, quando se trata de um elemento que tem como propósito reter um líquido **Figura 7**, onde à partida não podem ocorrer fendas, a fendilhação passa a estar relacionada com o estado limite último do elemento, pois quando ocorre uma fenda, dependendo do tipo de líquido e da abertura da mesma, o elemento passa a não servir para o propósito para que foi dimensionado.



Figura 7 - Depósito de água de Poceirão.

Uma questão amplamente associada à fendilhação está relacionado com a componente estética do elemento. Numa estrutura de betão, o conforto dos utilizadores e proprietários tem de ser uma prioridade, aparecimento de fendas e danos nos elementos (exemplificado na **Figura 8**) são desaconselháveis. A importância de abertura de fendas, neste caso, depende de vários fatores, como: textura, superfície de betão, distância ao observador, tipo de iluminação e tipo de qualidade esperada pelo utilizador (Jaccoud, 1987).

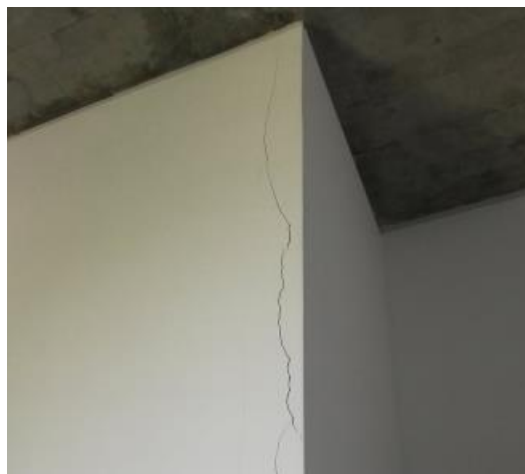


Figura 8 - Exemplo de fendas à vista no interior de um edifício de betão.

2.3.2 TIPOS DE FENDILHAÇÃO

A fendilhação no betão pode ocorrer devido a diversos fatores. Nomeadamente, retração plástica, assentamento plástico, cargas aplicadas, deformações impostas e forças expansivas.

A fendilhação por **retração plástica** ocorre devido à redução de volume do betão, causada pela perda de água à superfície durante a fase de endurecimento. A fendilhação ocorre se a retração exceder a deformação de rotura do betão nesse instante.

Para controlar este processo, pode optar-se por utilizar composições com menos água e com agregados mais grossos, a cura deve ser feita assim que o betão atinge o endurecimento e a superfície do betão deve ser protegida dos agentes agressivos do meio ambiente.

A fendilhação pode ocorrer por **assentamento plástico**, quando o betão tem um assentamento em estado fresco. Se este assentamento for impedido por algum elemento, como cofragens ou armaduras, dá-se a fendilhação. O betão é um material com uma grande resistência à compressão, e o seu comportamento depende altamente da solicitação que lhe é imposta, este tipo de fendilhação está associada às tensões de tração que se formam no betão.

Outro tipo de fendilhação que pode ocorrer, é a fendilhação devida a **deformações impostas/restringidas** que pode ser observado no esquema da **Figura 9**. Este tipo de fendilhação não se deve a cargas aplicadas no betão, mas sim a deformações que podem originar esforços autoequilibrados, como retração do betão, fluência e variações de temperatura. Um bom dimensionamento e betonagem faseada da estrutura são essenciais para controlar a fendilhação por deformações impostas.

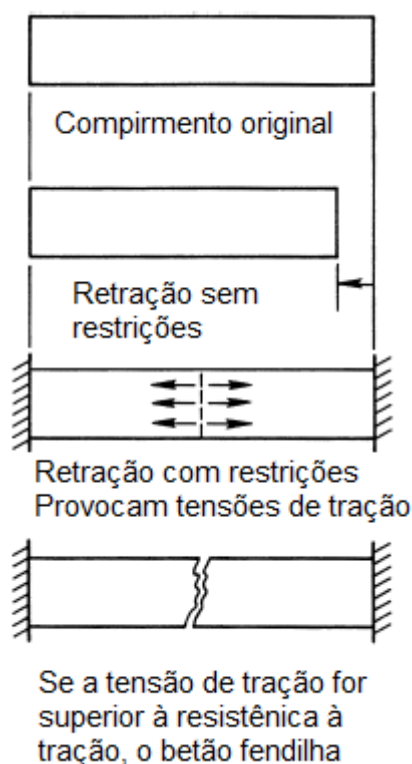


Figura 9 – Esquema de fendilhação devida a deformações impostas/restringidas.⁶

As fendas podem originar-se ainda pela ação de **forças expansivas** no interior do betão que ultrapassam a resistência do betão à tração. Este fenómeno pode acontecer devido à corrosão das armaduras, ou a reações expansivas no interior da peça de betão.

A fendilhação devida a **cargas aplicadas** ocorre devido às tensões de tração que se geram nas peças de betão e que excedem a resistência à tração do elemento. O controlo deste tipo de fendilhação é um dos objetivos principais do dimensionamento de estruturas de betão. Para limitar ou anular o aparecimento de fendas pode recorrer-se a armaduras pré-esforçadas. O conceito de armadura mínima, tem como objetivo garantir que a tensão instalada na armadura não atinja a cedência quando ocorre uma fenda de forma a redistribuir as tensões, podendo gerar outras fendas e controlar a abertura das mesmas (Appleton, 2004).

⁶ Consultado em (ACI, 2010)

2.3.3 COMPORTAMENTO DO BETÃO À TRAÇÃO

O comportamento do betão depende em grande parte da solicitação que lhe é imposta. O presente trabalho foca-se no comportamento do betão, quando sujeito a esforços de tração. No caso de tensões de tração, considera-se que o betão tem um comportamento elástico linear. Quando se dá a fendilhação o betão passa a ter um comportamento não linear. Na **Figura 10** pode ver-se um gráfico representativo desse comportamento.

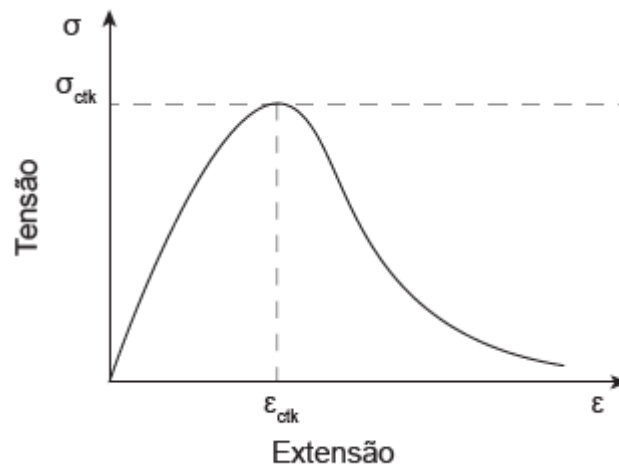


Figura 10 – Gráfica tensão/extensão do comportamento do betão à tração.

2.3.4 ARMADURA MÍNIMA

Segundo (Appleton, 2004), a armadura mínima deve ser tal que a sua resistência garanta, após a fendilhação, uma capacidade resistente maior, ou igual à força que estava instalada no betão, no instante da fendilhação, ou seja:

$$A_r^{min} \geq \frac{F_c^{tr}}{f_{rk}}$$

Em que:

A_r^{min} – Área mínima de armadura de reforço

f_{rk} – Tensão característica de cedência do reforço

F_c^{tr} – Tração no betão, no instante em que ocorre a fendilhação

De acordo com o Eurocódigo 2 (CEN, 2010), a área mínima de reforço é calculada pela seguinte equação:

$$A_{s,min} \cdot \sigma_s = k_c \cdot k \cdot f_{ct,eff} \cdot A_{ct}$$

Em que:

$A_{s,min}$ – Área mínima de armaduras para betão armado na zona tracionada;

σ_s – Valor absoluto de tensão máxima admissível na armadura imediatamente depois da formação da fenda;

k_c – Coeficiente que tem em conta a distribuição de tensões na secção imediatamente antes da fendilhação:

Para tração simples, $k_c = 1,0$;

k – Coeficiente que considera o efeito das tensões não uniformes autoequilibradas:

Para almas com $h \leq 300\text{mm}$ ou para banzos com larguras inferiores a 300mm, $k = 1,0$;

Para almas com $h \geq 800\text{mm}$ ou para banzos com larguras superiores a 800mm, $k = 0,65$;

$f_{ct,eff}$ – Valor médio da resistência do betão à tração à data que se prevê que se possam formar as primeiras fendas;

A_{ct} – Área de betão tracionada.

3. FIBRAS DE CARBONO

Segundo a ASTM International (2020), o termo fibra é utilizado para descrever um material que tenha um rácio de comprimento-diâmetro de filamento de 10 para 1 e com uma área transversal abaixo de $0,005 \text{ mm}^2$ e uma espessura abaixo de $0,25 \text{ mm}$.

Fibra de carbono é uma fibra inorgânica. Estas, são fibras que não podem ser encontradas na natureza, sendo apenas obtida através de processos de produção. As fibras de carbono são fibras pretas usadas como fios ou monofilamentos curtos com diâmetros menores do que $10 \text{ }\mu\text{m}$ (Fitzer et al., 2000).

3.1. NOTA HISTÓRICA

A utilização mais antiga, de que há conhecimento, de fibras de carbono, data de 1879. Thomas Edison, recorreu pela primeira vez a filamentos de bambo carbonizados, na criação da sua lâmpada incandescente. O cientista americano usava eletricidade para aquecer o filamento até que ele ficasse incandescente produzindo assim luz (**Figura 11**).

Mais tarde, em 1880, sendo estas fibras resistentes ao fogo, o que fazia delas um condutor ideal na altura, Thomas Edison patenteou o uso de fibras de carbono como material para a sua lâmpada elétrica. Sendo a sua utilização substituída posteriormente pelo tungsténio (Morgan, 2005).



Figura 11 - Réplica da primeira lâmpada de Thomas Edison.⁷

A utilização de fibras de carbono por Thomas Edison abriu o caminho para o uso de mais materiais eficientes e com maior durabilidade nos anos que se seguiram. Em particular, materiais compostos de fibras acabaram por ter um grande importância para desenvolvimentos nos setores aeroespacial e automóvel devido às suas propriedades altamente resistentes e serem, ao mesmo tempo, um material leve (Park, 2015).

Todos estes fatores fizeram com que em 1970 se previsse um rápido crescimento no mercado global, que apesar das previsões, não fora atingido até 1995 (Donnet et al., 1998).

A utilização de fibras de carbono como material de reforço em diversas indústrias é recorrente já há algumas décadas. Mas só em cerca de 1980 se despertou o interesse neste material como reforço para o betão (Park, 2015).

3.2. PROCESSO DE FABRICO

Todos os processos de produção comercial de fibras de carbono são baseados na carbonização de precursores de fibra de polímero.

⁷ Consultado em (Park, 2015)

Fibras precursoras termoplásticas (i.e., poliacrilonitrilo) devem ser convertidas numa forma não fundível antes da carbonização. Isso é chamado de tratamento de estabilização.

Os três tipos de precursores historicamente mais utilizados são: 1) À base de pitch; 2) À base de Rayon; 3) À base de poliacrilonitrilo (PAN), sendo este último o mais utilizado comercialmente (Morgan, 2005).

4.2.1 Fibras à base de pitch

As fibras à base de pitch, são produzidas através de um processo de *melt-spinning*. Este processo consiste em derreter e homogeneizar a matéria prima, à base de alcatrão (i.e., Carvão e PVC) (Morgan, 2005).

Os processos de produção para fibras à base de pitch, são baseados na investigação de Otani em 1963, que observou que alguns materiais derivados do alcatrão, podem ser convertidos em fibras de carbono através do processo *melt-spinning* (Otani, 1981).

Este tipo de fibras começou a ser produzido em 1970 pela Kureha Chemical Industries e ainda em 2000 eram as únicas a serem comercializadas na forma de filamentos contínuos (Fitzer et al., 2000). Em 1976 Lewis e Singer et al. aperfeiçoaram o processo de fabrico, conseguindo comercializar assim fibras com capacidades mecânicas superiores às que lhes antecederam (Singer, 1977).

4.2.2 Fibras à base de rayon

As fibras de carbono baseadas em rayon são produzidas através de pasta de celulose, que é um subproduto da madeira (Park, 2015).

Como descrito em 3.1, o primeiro registo da utilização de fibras de carbono foi a sua aplicação como filamento condutor na lâmpada de Thomas Edison. Estas fibras foram obtidas através da utilização de um precursor celulósico (à base de rayon).

Nos anos 50, Abbott desenvolveu um processo para converter rayon em fibras de carbono (Abbott, 1962). Em 1959, seguindo o exemplo de Union Carbide (Ford & Mitchell, 1963), várias empresas Norte-Americanas começaram a produção e comercialização de fibras de carbono semelhantes às estudadas por Abbott. Uma das principais aplicações deste tipo de fibras foi a sua utilização enquanto reforço de materiais utilizados na indústria aeroespacial (Fitzer et al., 2000).

Apesar dos avanços conseguidos nesta área, nomeadamente por pesquisas incentivadas pela força aérea Norte-Americana nos anos 1960 e mais tarde por Hitco (Fitzer et al., 2000), as fibras baseadas em precursores PAN, apresentam melhor desempenho em relação às outras opções e acabaram por se solidificar no mercado como a alternativa mais utilizada (Morgan, 2005).

4.2.3 Fibras à base de PAN

As fibras de carbono à base de PAN (**Figura 12**) para além de, como referido anteriormente, serem as fibras comercialmente mais utilizadas, foram também as adotadas como reforço da matriz cimentícia na presente dissertação.

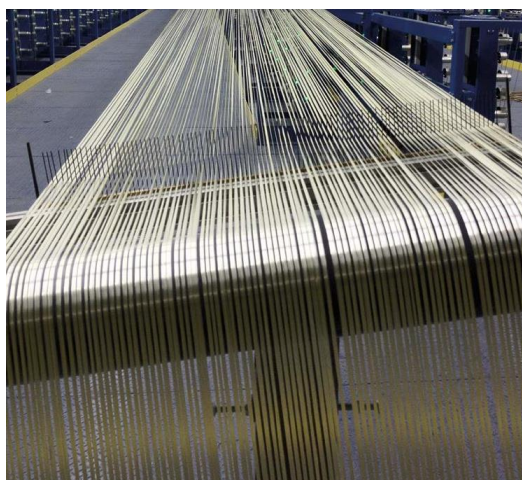


Figura 12 - Precursor de PAN.⁸

Estas fibras são obtidas através do processo de carbonização do precursor de PAN, um derivado do crude, que é obtido através da refinação do propileno, que passa do estado líquido para um estado fibroso (precursor, PAN). De seguida o precursor passa por um processo de estabilização que consiste num aquecimento num forno de oxidação a cerca de 250 °C. O processo de oxidação tem como objetivo rearranjar as moléculas de carbono do precursor, tornando-o mais resistente a altas temperaturas. É neste processo que o precursor passa a ter uma cor escura. Finalmente, o PAN é transformado em fibras de carbono através da sua carbonização em forno com temperaturas de cerca de 1200°C, com ausência de oxigénio. Este processo de fabrico está apresentado graficamente, na **Figura 13**.

⁸ Consultado em [https://cygnet-texkimp.com/product/precursor-pan-creel/#iLightbox\[product-gallery\]/1](https://cygnet-texkimp.com/product/precursor-pan-creel/#iLightbox[product-gallery]/1), a 12/11/2020

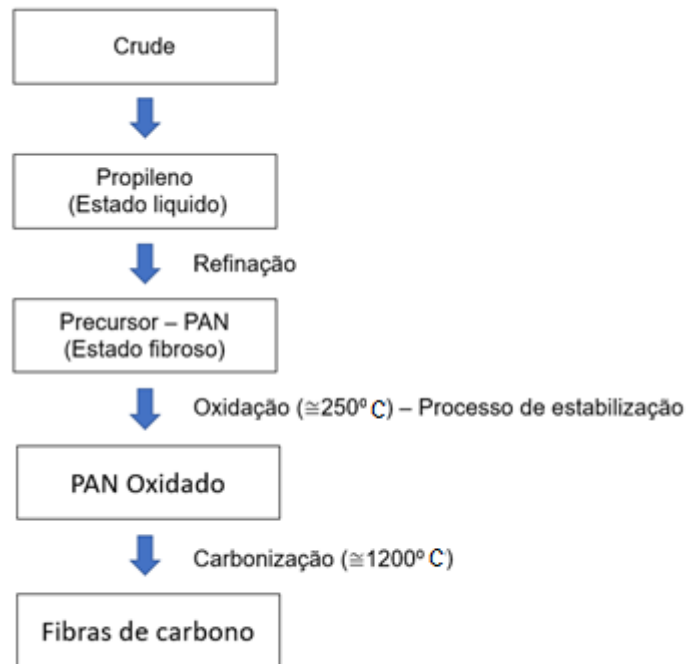


Figura 13 - Processo de fabrico de fibras de carbono à base de PAN.

Em 1950 Houtz percebeu que era possível converter fibras de poliacrilonitrilo em fibras escuras, resistentes ao fogo, aquecendo-as a temperaturas de 300°C. Ainda assim, só em 1960 começaram a ser produzidas e comercializadas as primeiras fibras resistentes ao fogo, comercializadas como *Black Orlon*. Estas fibras eram produzidas através do processo de oxidação do precursor. As primeiras fibras produzidas com processo de carbonização como complemento à oxidação inicial são atribuídas a Shindo em 1959. O processo de produção que se tornou a norma para a produção de fibras à base de precursores de PAN, foi desenvolvido em 1965 por Johnson, Philip e Watts (Fitzer et al., 2000).

3.3. FIBRAS DISCRETAS

A utilização de fibras de carbono como reforço do betão começou a ser explorada perto de 1980. As fibras discretas (**Figura 14**) são pequenos pedaços de fibra de carbono obtidos através dos feixes de fibra de carbono provenientes dos precursores. O reforço é feito misturando as fibras discretas no betão, durante o processo de amassadura.



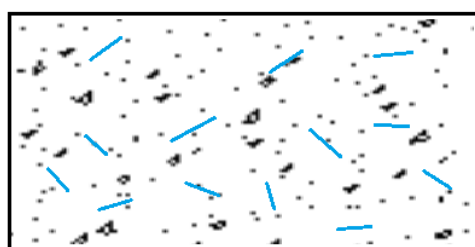
Figura 14 - Fibras discretas.⁹

Este tipo de solução apresenta várias vantagens relativamente ao reforço com varões de aço, tais como: 1) Maior resistência mecânica; 2) Redução da retração de secagem (Chen & Chung, 1993) e contribuição para a diminuição da abertura de fendas (Mohammadi et al., 2008); 3) O processo de produção do betão (reforçado) é mais rápido e expedito; 4) Maior resistência à corrosão; 5) Maior facilidade de manobrar e armazenar no estaleiro em obra, devida às suas características físicas.

Chen e Chung, (1993) utilizaram fibras discretas como reforço de um betão condutor elétrico. Já Xiong *et al.*, (2020), estudaram a viabilidade da utilização de um reforço composto por fibra de carbono reciclada e borracha de pneus descartados. Este estudo concluiu que as propriedades mecânicas do betão, são significativamente aumentadas, confirmando a viabilidade da utilização de fibras de carbono recicladas como material de reforço.

No entanto, este tipo de material apresenta também desvantagens relativamente ao reforço tradicional, nomeadamente: 1) É impossível garantir a orientação das fibras durante o processo de amassadura, pelo que não é possível ter 100% das fibras orientadas da direção exata para responder à solicitação, como esquematizado na **Figura 16**. Este facto faz com que a quantidade de reforço necessária seja superior à armadura normal de aço. 2) Este reforço é mais caro do que o reforço com varões de aço.

⁹ Consultado em <https://ru.all.biz/en/discrete-carbon-fibers-g1152491> a 13/11/2020



— Fibras discretas

Figura 15 - Esquema da orientação das fibras de carbono no betão.

3.4. FIBRAS CONTÍNUAS

Os varões de fibras contínuas de carbono (**Figura 17**) são um material polímero, produzido através de fibras de carbono e resina epoxy (Stoiber et al., 2020).



Figura 16 - Fibras de carbono contínuas.¹⁰

O betão reforçado com armaduras não metálicas contínuas apresenta-se como uma solução bastante apetecível relativamente às armaduras de aço, esta solução apresenta várias vantagens: 1) Resistência mecânica superior; 2) Resistência aos agentes corrosivos do meio ambiente superior. Dada a sua geometria, (idêntica aos varões tradicionais), é mais fácil adaptar as fórmulas de dimensionamento normalizadas do aço para esta solução, do que para soluções de reforço com fibras discretas.

No entanto, esta solução também apresenta algumas desvantagens: 1) Contrariamente à solução de fibras discretas, esta é composta por elementos rígidos que não apresentam

¹⁰ Consultado em <https://www.zacarbon.com/cfrp-rebar> a 13/11/2020

grandes vantagens em termos de manobrabilidade, sobretudo nas zonas de ligação e dobragens, e armazenamento em estaleiro; 2) Tem um custo elevado; 3) Dada a especificidade do material, o tempo e mão-de-obra necessários para montagem e colocação de armaduras podem ser condicionantes.

Posto isto, na presente investigação, foi utilizada a solução apresentada no **subcapítulo 3.5**.

3.5. BETÃO REFORÇADO COM TÊXTEIS

O betão reforçado com têxteis (TRC, de *textile reinforced concrete*), é um compósito de fibras de elevada resistência, tecidas em malhas abertas (espaçamentos entre fios de 7 a 45 mm), como exemplificado na **Figura 18**, embebidas numa matriz de base cimentícia.

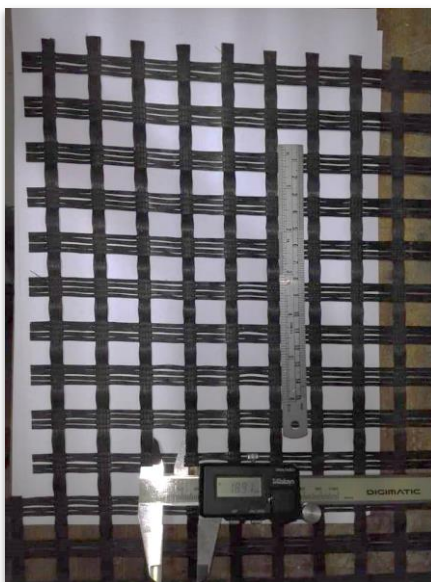


Figura 17 - Têxtil de fibra de carbono.

O (TRC), foi a solução utilizada na presente investigação porque apresenta diversas vantagens relativamente às alternativas apresentadas anteriormente e ao reforço tradicional de varões de aço, tais como: 1) Resistência mecânica superior às armaduras tradicionais. 2) Resistência à corrosão. 3) Facilidade de manobrar e armazenar em estaleiro de obra. 4) Facilidade de aplicação em estruturas com formas geométricas mais complexas. 5) Permite obter estruturas mais leves, uma vez que a espessura de revestimento, deve ser só tal que, seja garantida a aderência entre o reforço e a matriz.

Apesar de a designação mais comum ser betão reforçado com têxteis, na generalidade das situações encontradas, quer a nível de investigação, quer a nível de aplicação, a dimensão

máxima do agregado utilizado indica que a matriz é efetivamente uma argamassa. Daí que se encontrem outras designações para estes compósitos, tais como TRM (textile reinforced mortar), FRCC (fabric reinforced cement composites) ou FRCM (fabric reinforced cementitious matrix). O reforço de compósitos cimentícios com fibras, discretas ou contínuas, já vem sendo investigado desde a década de 60 do século passado, mas no final desse século o TRC ainda era considerado um material inovador (Curbach & Jesse, 1999). No início do Séc. XXI constituíram-se na Alemanha dois centros de investigação específicos para o estudo e desenvolvimento de TRC (Hegger et al., 2007). Esta investigação tem-se centrado na utilização de têxteis em fibra de carbono, vidro, aramida, basalto e mais recentemente PBO (Arboleda, 2014). O interesse no conhecimento sobre o comportamento do TRC visa a sua aplicação em substituição de outros materiais, com potenciais vantagens.

Em resultado da investigação desenvolvida, o TRC tem sido aplicado em algumas situações, sendo as mais comuns a reparação e reforço de estruturas e painéis de fachada e as mais interessantes, ou arrojadas, a substituição da armadura convencional em pontes pedonais constituídas por elementos pré-fabricados e pré-esforçados (Hegger et al., 2010) e fabrico de cascas para coberturas com dimensão de 7x7 m² apoiadas no centro (Scholzen et al., 2015).

Em baixo, nas **Figuras 19 e 20**, podem ser observadas a ponte pedonal de Albstadt, na Alemanha e a casca para cobertura no campus da *RWTH Aachen University*, também na Alemanha, respetivamente.



Figura 18 - Ponte pedonal em Albstadt, na Alemanha.¹¹

¹¹ Consultada em <http://www.portasnavegantes.com.br/concreto-textil-o-futuro-do-concreto-armado/> a 23/12/2020



Figura 19 - Casca de cobertura, feita com TRC.¹²

Em abril de 2020, foi apresentado o projeto para a construção de um edifício de dois andares nas imediações da *Technical University Dresden*, que está previsto ser o primeiro edifício feito totalmente com betão reforçado com fibras de carbono TRC's e complementado em algumas peças estruturais por CFRP's, (**Figura 15**) (Gärtner, 2020).



Figura 20 - Projeto do edifício CUBE.¹³

¹² Consultado em (Scholzen et al., 2015)

¹³ Consultado em <https://www.bauen-neu-denken.de/en/the-project-building-the-cube-objectives-and-use-concept/> a 22/12/2020

4. PRÉ-CAMPANHA EXPERIMENTAL

4.1. INTRODUÇÃO

A obtenção dos resultados exigiu o desenvolvimento de uma campanha experimental que, devido às dificuldades e obstáculos encontrados, foi sendo iterativamente aperfeiçoada. Este processo, doravante denominado por **pré-campanha experimental**, permitiu a estabilização das metodologias de ensaio utilizadas posteriormente na campanha experimental apresentada no **Capítulo 5**.

O objetivo do ensaio experimental consiste em apurar a área de armadura mínima de tração para provetes de betão armado com fios de carbono. Para tal, e de forma a caracterizar as propriedades mecânicas dos materiais utilizados, foram realizados ensaios de aderência e tração simples.

O presente capítulo tem como objetivo descrever as todas as decisões tomadas, todos os obstáculos registados, bem como as soluções encontradas durante esta etapa preliminar da campanha experimental.

4.2. ENSAIOS DE TRAÇÃO DA FIBRA

Inicialmente a solução passava por aplicar a força de tração fixando o fio de carbono diretamente às garras da prensa. No entanto, numa tentativa de ensaio para avaliação da resistência à tração do fio a utilizar, verificou-se que o fio não apresenta resistência suficiente ao corte/esmagamento. Durante o ensaio as garras danificaram o material que acabou por não desenvolver o comportamento pretendido, pois a rotura não ocorre por tração, mas sim pelo corte das fibras que constituem o fio na zona das garras, como esta representado na **Figura 21**.



Figura 21 – Fibras danificadas pelas garras da prensa.

Sawada e Shindo, (1981), descreveram uma campanha de ensaios que se focou em avaliar diferentes métodos de proteção da fibra em ensaios de tração.

Na altura já eram utilizados materiais como lixa, borracha ou mesmo cabedal para proteção das fibras. Sawada e Shindo, analisaram 4 materiais distintos que serviam de almofada entre o provete e a máquina: **chapas de alumínio, placas de resina, lã de aço e lixa.**

Os resultados dessa campanha são apresentados na **Tabela 1.**

Tabela 1 – Força de rotura, avaliação dos materiais de proteção da fibra¹⁴.

	Três chapas de alumínio	Placas de resina	Lã de aço	Lixa
Número de ensaios	27	16	45	12
Média (N)	316,3	303,3	299,1	263,5
Desvio Padrão (N)	10,8	36,2	107,7	92,6
Coefficiente de Variação (%)	3,4	11,9	36,0	35,1

Com este estudo, Sawada e Shindo concluíram que para efeitos de controle de qualidade, a utilização de lã de aço como material de proteção é recomendada, dado o bom desempenho e ser muito menos morosa que os métodos como placas de resina ou chapas de alumínio.

¹⁴ Adaptado de (Sawada & Shindo, 1981)

Como tal, para otimizar da melhor forma os tempos de ensaio, após os primeiros ensaios em que foram utilizadas chapas compostas com resina epóxi, como exemplificado pela **Figura 22**, passaram a ser utilizadas proções de lã de aço para proteger os provetes e transmitir a tensão das garras à fibra, evitando assim o contacto direto com as fibras e protegê-las das forças de corte exercidas.



Figura 22 – Proteção das fibras de carbono, com resina epóxi e chapas compósitas.

Antes de colocar o provete na máquina, as placas foram envolvidas com uma lixa P80, para assim garantir um maior atrito e evitar o escorregamento das chapas em relação às garras. O propósito da técnica utilizada foi atingido, uma vez que nos ensaios feitos no Laboratório Nacional de Engenharia Civil se conseguiu levar o feixe à rotura por tração sem danificar as fibras nas zonas de contacto com as garras. A **Figura 23 (a)** apresenta o ensaio em execução. O provete após ensaio pode ser observado na **Figura 23 (b)**.



(a)



(b)

Figura 23 - Avaliação da solução escolhida, LNEC (a). Proвете após a rotura (b).

O resultado deste ensaio comprovou a validade da opção tomada e dos resultados obtidos.

Embora a metodologia se tenha comprovado válida, os resultados de resistência da fibra obtidos, eram consideravelmente mais baixos relativamente aos resultados do catálogo. **Ver capítulo 5 (secção 5.1).**

Uma das razões consideradas para este comportamento deve-se ao facto de, embora as fibras tenham sido tensionadas quando se colocavam as chapas nas extremidades, estas não estejam a atingir a rotura em simultâneo, conferindo assim ao provete um comportamento dúctil, como pode ser observado na **Figura 24**.

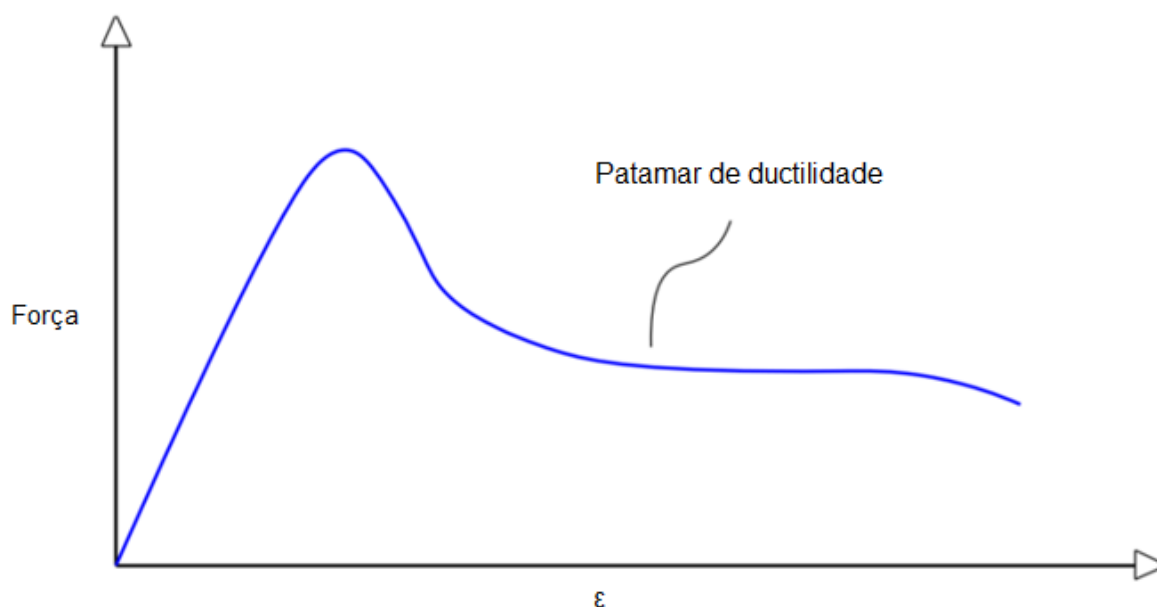


Figura 24 - Gráfico de tensão, extensão. Ensaio de tração da fibra.

Para tentar anular esse problema optou-se por dividir o filamento em 50% e 25% do mesmo, como esquematizado na **Figura 25** e posteriormente ensaiar, o comportamento do mesmo à tração e comparar com os resultados obtidos para a totalidade do filamento.

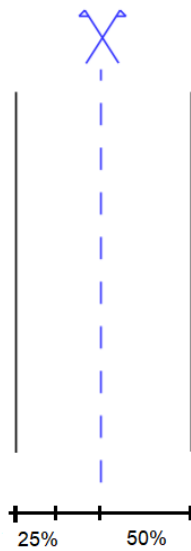


Figura 25 - Esquema da divisão do provete em parcelas para ensaios de tração.

Quando comparados com os valores obtidos para a totalidade do filamento e como pode ser observado na **Figura 26** a ordem de grandezas manteve-se coerente com as percentagens ensaiadas.

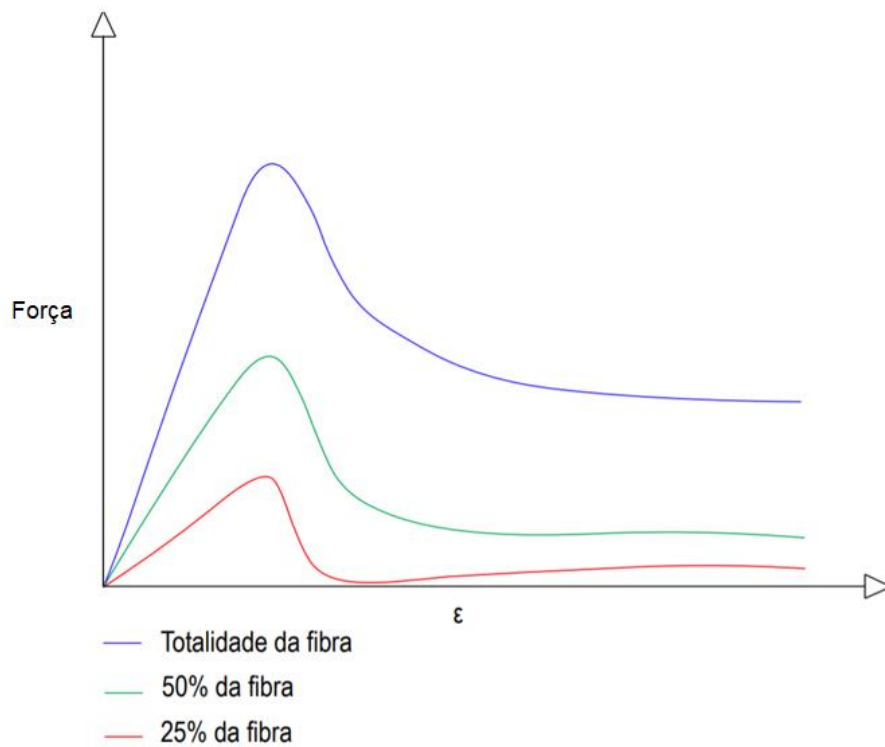


Figura 26 - Gráfico representativo dos ensaios de tração a 100, 50 e 25% dos filamentos.

Ainda que reduzindo o provete a metade, ou um quarto, este continua a ser composto por várias camadas de filamentos, e no meio destas ainda existem filamentos que não estão a ser tensionados em simultâneo com os restantes, fazendo com que a rotura não ocorra ao mesmo tempo em todo o provete. Podemos concluir que para obter resultados mais próximos do comportamento real do provete, quando 100% tracionado, o provete devia ter sido dividido transversalmente como esquematizado na **Figura 27**, no entanto, dadas as dimensões muito reduzidas dos filamentos esta tarefa revelou-se impossível de realizar com a mínima fiabilidade.

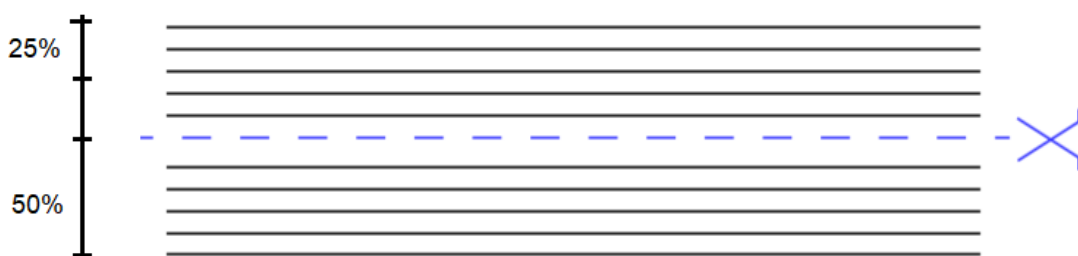


Figura 27 - Esquema ideal da divisão do provete em parcelas para ensaios de tração.

4.3. EXECUÇÃO DOS PROVETES

Foram produzidos 6 provetes de betão reforçado com fibra, com o objetivo de testar a aderência entre os dois materiais bem como o comportamento do compósito quando sujeito a esforços de tração simples. A **Figura 28** apresenta as dimensões dos provetes de ensaio utilizados na campanha pré-experimental e a **Tabela 2** apresenta a composição do betão.

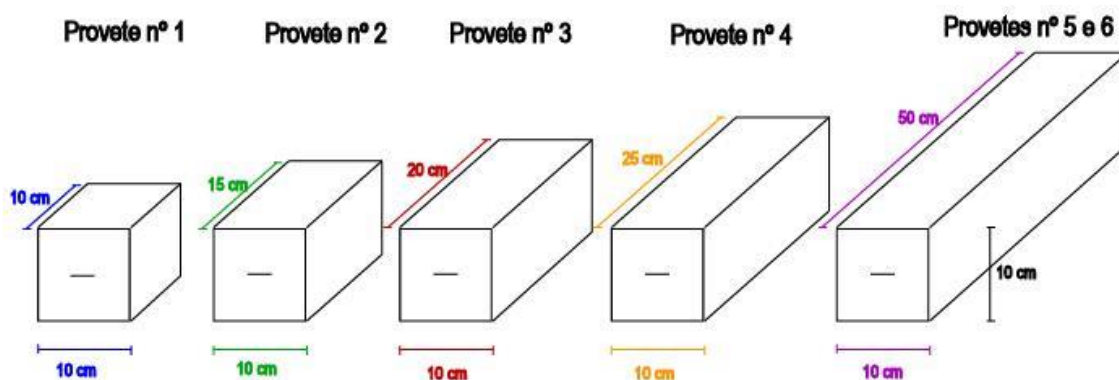


Figura 28 - Dimensões dos provetes de ensaio, campanha pré-experimental.

Tabela 2 - Composição do betão, campanha pré-experimental.

Cimento (kg/m³)	300
Água (l/m³)	156
Brita 5/15 (kg/m³)	654
Brita 15/25 (kg/m³)	299
Areia grossa (kg/m³)	512
Areia fina (kg/m³)	430

O processo de execução dos moldes e posterior betonagem dos provetes de betão também passou por diversas fases experimentais.

As primeiras iterações dos moldes consistiam em 6 caixas de madeira com 15x15x30[cm], que por sua vez seriam cheias até 10, 15, 20, 25 e duas com 30 cm de betão, respetivamente. Os provetes com 10, 15, 20 e 25 cm de comprimento seriam sujeitos a ensaios de arrancamento enquanto que as duas vigas com 30 cm de comprimento serão sujeitas a ensaios de tração.

A maior dificuldade associada a este processo trava-se com a dificuldade de manter a fibra tracionada e centrada durante o processo de betonagem. A solução utilizada foi o sistema ilustrado na **Figura 29**, que passa por colocar um peso na extremidade do feixe para tentar garantir que a mesma se mantém tensionada durante a betonagem.



Figura 29 - Sistema utilizado para manter as fibras em tensão durante o processo de betonagem.

Os resultados destas amassaduras não foram os pretendidos visto que é difícil garantir que o feixe se mantenha num estado de tensão durante a betonagem, o que acarreta consequências na posição e tensão das fibras, como pode ser observado na **Figura 30**, em que a fibra se encontra completamente fora do centroide da peça.



Figura 30 - Provede com a fibra completamente fora do centroide da peça.

Desta forma, tornou-se necessário o desenvolvimento de novos moldes e de um novo sistema de betonagem. Os novos moldes desenvolvidos, com dimensões de 10x10x50[cm], são constituídos por chapas de metal laterais e na base e duas placas de madeira nas extremidades. As placas de madeira têm ambas uma ranhura no centro, com uma borracha, permitindo assim a passagem da fibra de uma ponta à outra do molde e que a mesma se mantenha tracionada e centrada durante o processo de betonagem e ao mesmo tempo, tem como propósito proteger a fibra de possíveis danos durante a betonagem, como ilustrado na **Figura 31**. A compactação foi feita utilizando uma mesa de vibração.



Figura 31 - Segunda iteração dos moldes de betonagem.

Durante o processo de descofragem da primeira amassadura reparou-se que alguma da água de amassadura se acumulou nas extremidades dos moldes. Este fenómeno, que pode ser observado na **Figura 32**, impossibilitou uma descofragem sem danificar a fibra durante o processo, comprometendo assim todos os provetes dessa amassadura.



Figura 32 - Provetes danificados durante e depois da descofragem.

Com o objetivo de resolver este problema, numa nova amassadura, foi aplicada vaselina nas extremidades dos moldes (i.e., nas zonas em contacto com as fibras). Assim, a fibra não ficou envolvida por betão nas extremidades do provete e, durante a descofragem, não foi danificada. A **Figura 33 (a)** apresenta o processo de aplicação da vaselina nas extremidades. O provete após descofragem pode ser observado na **Figura 33 (b)**.

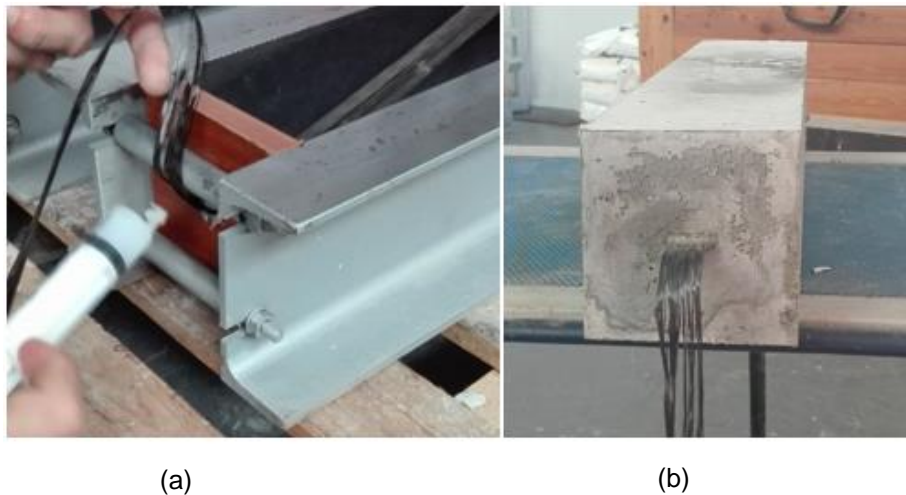


Figura 33 - Aplicação da vaselina (a). Fibras intactas após a descofragem (b).

Na **Figura 34** podem ser observados os seis provetes a serem submetidos aos ensaios de aderência e tração, apresentados na secção seguinte.



Figura 34 - Provetes de ensaio, arrancamento e tração.

4.4. ENSAIOS DE ARRANCAMENTO

Os ensaios de aderência, esquematizados na **Figura 35 (a)** e representados na **Figura 35 (b)**, foram realizados aos quatro provetes (1,2,3 e 4) com o objetivo de avaliar se, perante tração da fibra, a rotura ocorre por destacamento desta em relação ao betão, ou por rotura da mesma.

Para realizar os ensaios a extremidade da fibra foi preparada para se proteger do contacto com as garras do extensómetro conforme **4.2**, uma vez que a força será exercida sobre o espigão do pórtico e o reforço.

Os resultados obtidos foram os esperados, sendo que para todos os provetes (com diversas dimensões), a rotura se deu sempre pela fibra e nunca por destacamento. Com valores de tensão de rotura, na ordem dos 1,7kN, semelhantes aos obtidos nos ensaios de tração ao feixe isolado.

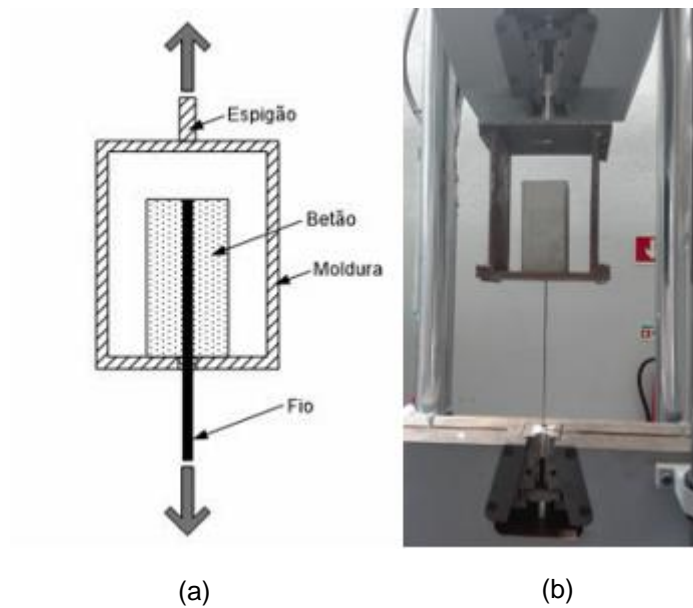


Figura 35 - Esquematização do ensaio de aderência (a). Ensaio de aderência (b).

4.5. ENSAIOS DE TRAÇÃO DOS TIRANTES

Bento, (2013) desenvolveu um sistema para transmitir as forças de tração aos seus provetes de betão, reforçados com fibra de vidro, através do reforço. O sistema de ensaio desenvolvido para os ensaios de tração na presente dissertação foi também ele desenvolvido de modo a que as forças de tração fossem aplicadas a partir do reforço de fibra de carbono, estando estas protegidas nas extremidades como descrito em 4.2. Na **Figura 36** pode ser observado o ensaio em curso, a caixa de madeira em volta serve para sustentar o provete após a rotura para que não se danifique na queda.



Figura 36 - Ensaio de tração, tirante, campanha pré-experimental.

Os resultados obtidos nos ensaios de tração com as vigas (provetes 5 e 6) não foram os esperados e a rotura dos provetes ocorreu sempre pela fibra, sem abrir qualquer fenda no betão. Este fenómeno pode ser observado na **Figura 37 (a)** enquanto que a **Figura 37 (b)** apresenta o gráfico representativo de um dos ensaios. Este, ocorre, porque não é possível obter em laboratório as propriedades esperadas, catalogadas.

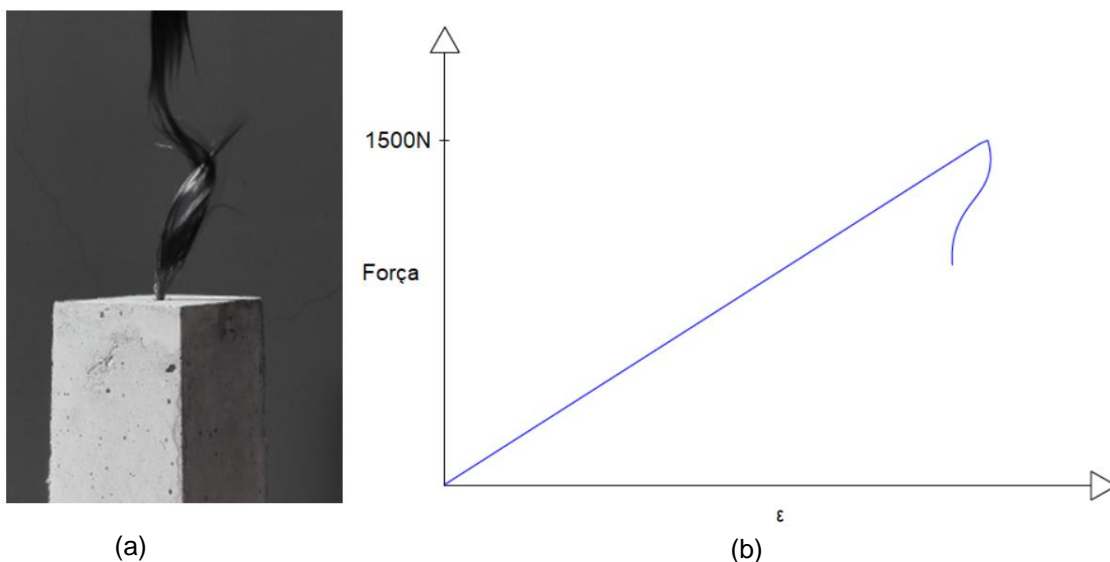


Figura 37 - Rotura do provete pela fibra (a). Gráfico do ensaio de tração de um dos tirantes (b).

4.6. CONCLUSÕES DA CAMPANHA PRÉ-EXPERIMENTAL

Tendo em conta os resultados obtidos, concluiu-se que a força que a fibra consegue suportar, é consideravelmente inferior à que o betão consegue suportar.

Visto que a área de armadura utilizada é uma área catalogada, surgiu a necessidade de reduzir resistência da matriz, efetuando mudanças na sua composição.

Uma vez que a área do reforço de fibra não apresenta capacidade para redistribuir os esforços de tração para a área de matriz considerada, torna-se necessário reduzir a área da matriz de forma a beneficiar-se da capacidade resistente do feixe de fibra. O dimensionamento da nova área de matriz, bem como os novos provetes de ensaio serão explicados de seguida, no **capítulo 5**.

5. CAMPANHA EXPERIMENTAL

Para avaliar o comportamento do TRC sob tração uniaxial, utilizaram-se provetes reforçados com um feixe de fibras, uma vez que este constitui o elemento base de um têxtil (grelha), tendo-se considerado como matriz 4 composições de argamassa diferentes, cujas características se abordam a seguir.

Foram também produzidos prismas de controlo para cada composição, para serem submetidos a ensaios de compressão e flexão.

5.1. INTRODUÇÃO

As fibras utilizadas foram fibras de carbono, produzidas por oxidação e carbonização de poliacrilonitrilo (PAN), fornecida em feixe com massa linear de 3300 tex, constituído por 50000 filamentos com 7 μm de diâmetro. Segundo informação do fabricante, as fibras têm uma densidade de 1.80 g/cm³, módulo de elasticidade de 240 GPa, tensão e deformação na rotura de 4 GPa e 1.7%, respetivamente.

A fibra recebida foi ensaiada à tração em feixe, com o intuito de avaliar a sua resistência. Para evitar a rotura por corte transversal das fibras pelas garras da máquina de tração, intercalou-se lã de aço entre as fibras e as maxilas, este processo, que se encontra explicado em 4.2 que constitui uma alternativa, expedita e suficientemente precisa, a outros processos de proteção e fixação dos feixes (Sawada & Shindo, 1981). No ensaio aplicou-se uma taxa de deslocamento de 0.5 mm/minuto, à imagem dos ensaios de tração a fibras de carbono isoladas, em (Naito et al., 2009). Na **Figura 38** pode ser observado o ensaio de tração uniaxial ao feixe de fibra.



Figura 38 - Ensaio de tração uniaxial ao feixe de fibra.

Do conjunto de ensaios efetuado, obteve-se para a força de rotura do feixe um valor representativo de 1.94 kN. Dividindo este valor pela área da secção transversal do feixe (A_f), obtém-se uma tensão. De acordo com Colombo *et al.* (Colombo *et al.*, 2013), a área da secção transversal pode ser calculada utilizando a massa linear do feixe (T_{ex}) e a densidade das fibras (m_v):

$$A_f = \frac{T_{ex}}{m_v \left[\frac{g}{mm^3} \right]} [mm^2]$$

Destes cálculos resultaram uma área de 1.83 mm² e uma tensão de rotura do feixe de 1.06 GPa, ou seja, cerca de 25% da tensão de rotura de um filamento. A perda de resistência do feixe em relação ao filamento é normal, uma vez que no início do ensaio existem fibras que se encontram frouxas e outras até poderão já estar tracionadas, ou seja, o nível de tensão não é idêntico em todos os filamentos. Esta situação faz com que a resposta do feixe seja diferente da soma de um conjunto de respostas idênticas da totalidade dos filamentos que constituem o feixe (Ilankeeran *et al.*, 2012; Toshiaki Ohta, Djameluddin, Hino, *et al.*, 2002; T Ohta *et al.*, 2001). Outra situação que pode ocorrer e que prejudica a resistência do feixe é o desalinhamento e até a torção de alguns filamentos (Ilankeeran *et al.*, 2012). Na literatura encontram-se graus de eficiência do feixe em relação ao filamento entre 10% (Ohta *et al.*, 2001) e 67% (Toshiaki Ohta, Djameluddin, Seo, *et al.*, 2002).

5.2. MATRIZ

O estudo foi realizado ensaiando 4 composições de argamassa diferentes de forma a analisar a variação do comportamento das fibras consoante a resistência da argamassa. Na produção das argamassas foram utilizados como constituintes: cimento CEM I 42.5R, de acordo com a EN 197-1 (Comité Européen de Normalisation, 2001); duas areias siliciosas, uma com dimensão nominal 0/2 e outra com dimensão nominal 0/4; água da rede pública; e, nas misturas em que se utilizou adjuvante, o superplastificante Glenium SKY 510. Para cada mistura realizaram-se determinações de espalhamento, resistência à compressão, flexão e resistência à tração, de acordo com as normas EN 1015-3 (CEN, 1999), EN 12390-3 (CEN, 2009), EN 12390-5 (CEN, 2009) e EN 12390-6 (CEN, 2003) respetivamente. Na **Tabela 3** apresentam-se as formulações e as propriedades das diferentes composições de argamassa ensaiadas.

Tabela 3 - Composições e propriedades das argamassas.

Argamassa	A35	A40	A50	A60
Proporção mássica Cimento:Areia fina:Areia grossa	1:0.4:2.1	1:0.4:2.1	1:0.4:2.1	1:0.5:2.5
Razão água-cimento	0.35	0.41	0.5	0.60
Dosagem de adjuvante (ml/kg de cimento)	12	8	-	-

5.3. FABRICO DOS PROVETES

Inicialmente foram produzidos 6 provetes de diferentes dimensões, para verificar a aderência entre a fibra e a matriz (**Figura 39**), as dimensões diferem na dimensão x, com comprimentos de, 3,7cm, 5cm, 7cm, 8cm, 10cm e 12cm.

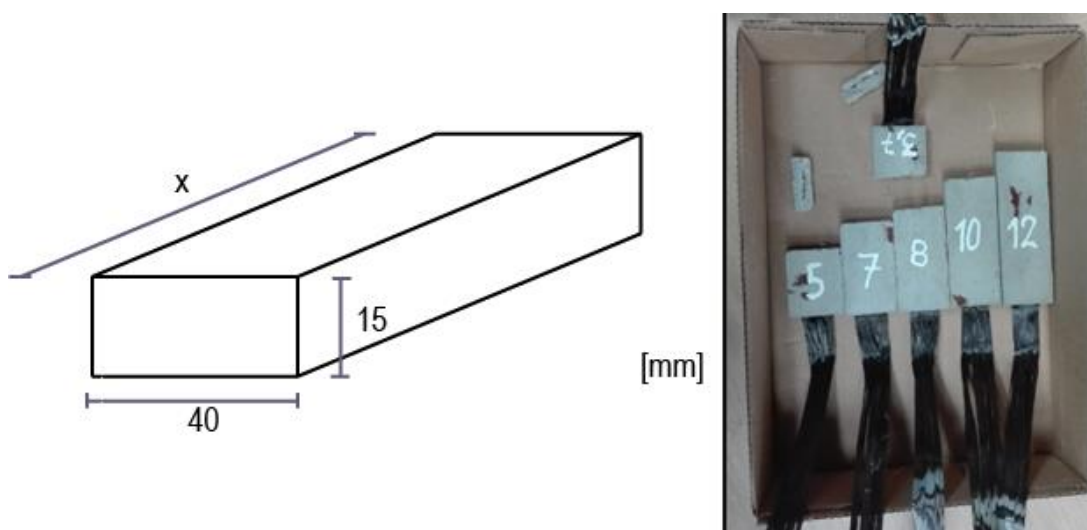


Figura 39 - Provetes de ensaios de aderência, argamassas.

Para cada amassadura foram produzidos 3 prismas com $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ para os ensaios de compressão e flexão e 4 tirantes de $15 \times 35 \times 500 \text{ mm}^3$, para serem ensaiados à tração (**Quadro 2**).

A secção foi dimensionada para uma área de matriz que estivesse no limite do controlo de fendilhação para uma força de rotura de 1490 N no feixe de fibra.

$$A_m = \frac{F_{\text{máximo.r}}}{f_{ctm}} = \frac{1490N}{3MPa} = 500mm^2$$

Os tirantes de ensaio, foram então produzidos com uma dimensão de $15 \times 35 \times 500 \text{ mm}^3$.

Um dos prismas não foi armado com fibra de carbono e será utilizado para aferir a resistência da matriz à tração simples. Nos topos de cada tirante ficou embebido, num comprimento de 100 mm um varão roscado, com 5 mm de diâmetro, posicionado no centroide da secção transversal. O diâmetro do varão foi calculado para garantir a resistência às forças previstas durante os ensaios e o comprimento no interior do tirante de forma a garantir a amarração dessas forças.

Tabela 4 - Identificação dos provetes de ensaio.

Composição	Provete
	A35I
A35	A35II
	A35III
	A35C
	A40I
A40	A40II
	A40III
	A40C
	A50I
A50	A50II
	A50III
	A50C
	A60I
A60	A60II
	A60III
	A60C

O esquema da **Figura 40**, representado abaixo, é representativo dos provetes produzidos para ensaios de tração.

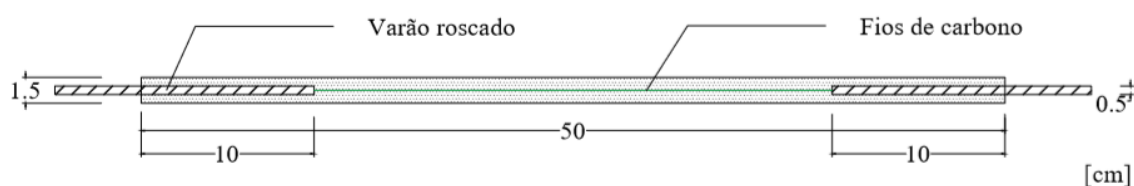


Figura 40 - Esquema dos tirantes armados com fios de carbono.

A produção dos provetes foi realizada por um processo designado por laminagem (Simonsson, 2017). Este processo consiste na deposição alternada de camadas de argamassa e de fibra (Colombo et al., 2013; De Munck et al., 2018; Barhum & Mechtcherine, 2011; Barhum & Mechtcherine, 2013). Utilizaram-se moldes construídos especificamente para este efeito, em aço inox, com rigoroso controlo dimensional (**Figura 41**). A compactação foi efetuada por camadas com vibração externa (mesa VêBê). Os tirantes foram desmoldados aos 2 dias após o fabrico e posteriormente curados em água a 20 °C até aos 28 dias de idade. Três dos quatro tirantes são armados com fios de carbono e o quarto não é reforçado.



Figura 41 - Moldes utilizados para produção dos provetes.

5.4. ENSAIOS DE ADERÊNCIA

Os ensaios de aderência foram realizados à imagem dos ensaios de aderência da campanha pré-experimental, conforme o esquema da **Figura 35 (a)** e representados na **Figura 42**, e tem como objetivo, também verificar se, quando expostos a forças de tração simples, a rotura ocorre por destacamento, ou pelo reforço.

Novamente, para realizar os ensaios a extremidade da fibra foi preparada para se proteger do contacto com as garras do extensómetro conforme **4.2**.

Para este ensaio verificaram-se problemas na resistência transversal dos provetes, pelo que o comprimento de amarração foi definido com base nos resultados dos ensaios feitos no

capítulo 4 em que nos ensaios a provetes de betão reforçados com fibra se verificou que para comprimentos de amarração de 10cm, a rotura ocorre sempre pela fibra, com forças na mesma ordem de grandezas do feixe isolado.



Figura 42 - Ensaio de aderência, argamassa.

5.5. DETERMINAÇÃO DA CONSISTÊNCIA POR ESPALHAMENTO

A determinação da resistência por espalhamento foi feita com base na norma EN 1015-3 (CEN, 1999) e foi feita imediatamente após a produção da argamassa. Tendo todas as argamassas apresentado um comportamento fluido, a **Figura 43** apresenta a argamassa na mesa de espalhamento após um ensaio.



Figura 43 - Argamassa na mesa de espalhamento após um ensaio.

5.6. ENSAIOS DE COMPRESSÃO E FLEXÃO

A verificação da resistência de flexão foi realizada a partir do ensaio de 3 prismas trapezoidais com $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ com 28 dias de cura, onde foi aplicado um aumento de carga de 50N/s a meio vão da peça. O ensaio foi realizado de acordo com a norma europeia, EN 12390-5 (CEN, 2009).

Em seguida, os 6 meio-prismas resultantes foram submetidos a ensaios de compressão. O ensaio foi executado de acordo com a norma europeia EN 12390-3 (CEN, 2009), e foi aplicado um aumento de carga de 2400N/s.

O equipamento utilizado para a realização de ambos os ensaios foi uma prensa de flexão/compressão (Cyber-Tronic), que se encontra apresentada na **Figura 44 (a) e (b)**.

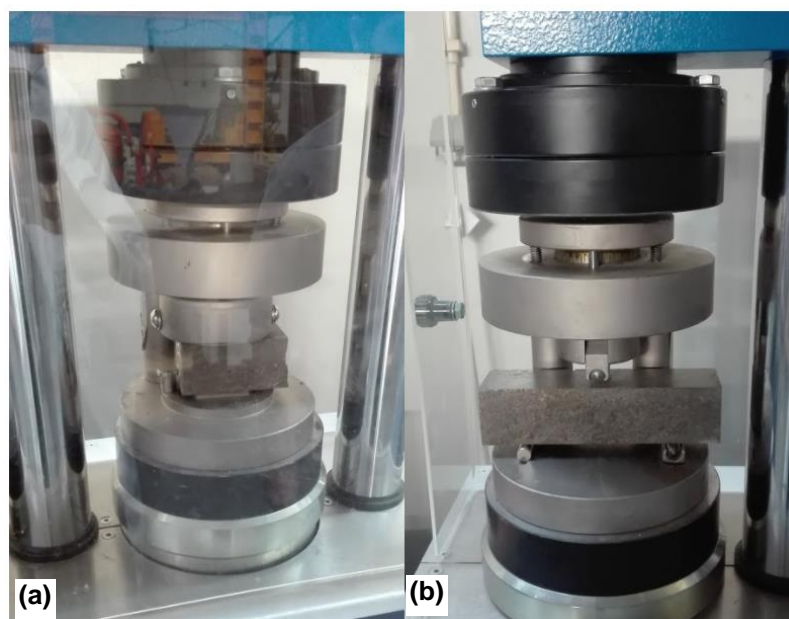


Figura 44 - Ensaio de compressão (a). Ensaio de flexão (b).

5.7. ENSAIOS DE TRAÇÃO

Os ensaios de tração uniaxial são de difícil execução (Akita et al., 2003; ACI, 2004; Kim & Taha, 2014; Neves, 2000). Como tal, ainda que existam recomendações (Brameshuber et al., 2016), não são efetuados com frequência e não existe uma norma para a sua realização.

No caso da presente dissertação, a transmissão de carga da máquina ao provete foi efetuado através de um varão parcialmente embebido no tirante, seguindo o princípio aplicado por (Jaccoud, 1987).

Existem alguns métodos para evitar efeitos secundários como, flexão ou torção quando é aplicada a carga ao provete (D'Antino & Papanicolaou, 2017; Donnini et al., 2016; RILEM Technical Committee 232-TDT & Brameshuber, 2016). Nesta campanha, estes varões foram ligados à máquina através de rótulas tridimensionais, materializadas através de duas argolas (**Fig. 45 (a) e (b)**), para prevenir o aparecimento de outros esforços, para além do esforço axial. Os ensaios foram realizados numa máquina universal Instron 5900-R, equipada com um grupo hidráulico servo-controlado, em circuito fechado, que permitiu realizar os ensaios por imposição de uma taxa de deslocamento. A taxa de deslocamento adotada foi de 0.5 mm/minuto, valor frequentemente encontrado neste tipo de ensaios (Arboleda, 2014; Barhum & Mechtcherine, 2011; Redaelli, 2006; Reisgen et al., 2010).

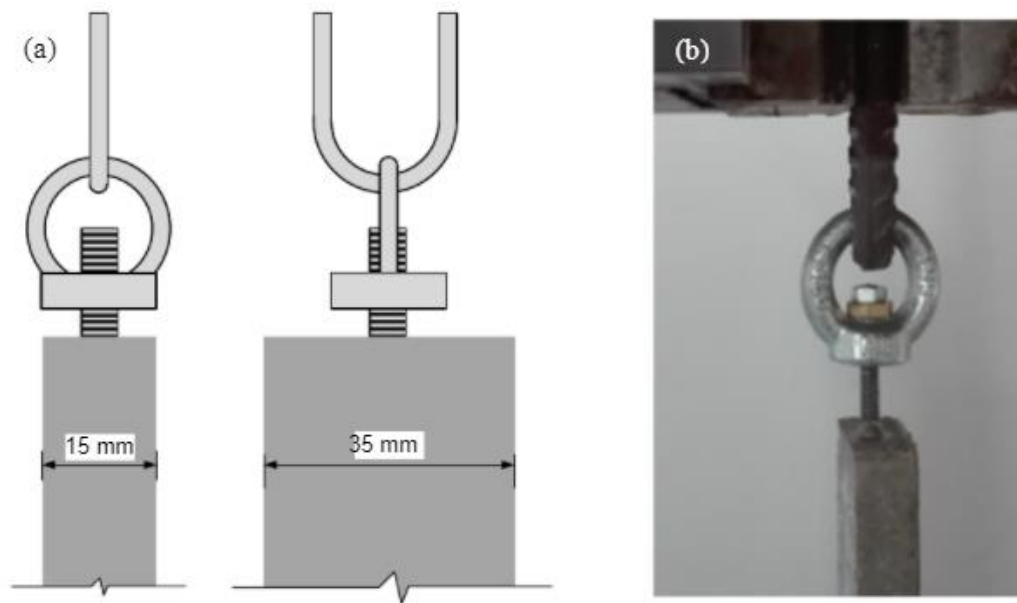


Figura 45 - Esquema de argolas utilizado para garantir tração pura.¹⁵

De acordo com (Santis et al., 2017), os parâmetros mais importantes a extrair dos ensaios de tração em TRC são: tensão de fendilhação, distância entre fendas, carga máxima e deformação correspondente.

Assim, procedeu-se à aquisição sincronizada da força e deformação medidos com recurso a uma célula de carga de 10 kN da classe 0.5 e a um extensómetro Instron 2630-112, com campo de medida -5 a +25 mm e base de medida de 50 mm. Como o comprimento de medição pretendido são 300mm, foi necessário desenvolver um mecanismo de adaptação. O extensómetro foi colocado sobre placas de plástico, que se encontram ancoradas nos limites de medição pretendidos, como pode ser observado pela **Figura 46 (a) e (b)**.

¹⁵ Consultado em (Neves & Felicíssimo, 2020)

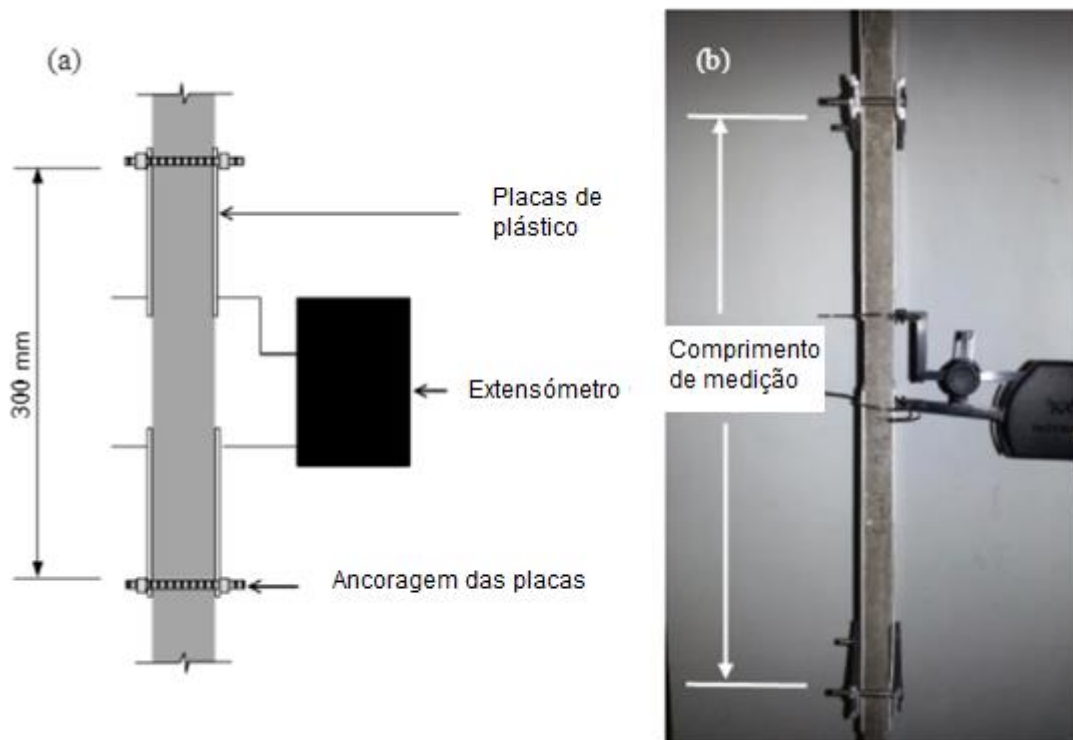


Figura 46 - Esquema do mecanismo de adaptação do extensómetro (a). Mecanismo de adaptação do extensómetro, aplicado (b).¹⁶

¹⁶ Adaptado de (Neves & Felicíssimo, 2020)

6. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

No presente capítulo são apresentados os resultados da campanha experimental, nomeadamente, referentes aos ensaios da matriz e do TRC.

As propriedades das fibras foram essenciais para a determinação das dimensões e fabrico dos provetes de ensaio, os valores resultantes dos ensaios das mesmas foram apresentados no **Capítulo 5**.

6.1. ESPALHAMENTO

A Figura 47 apresenta o espalhamento médio obtido para cada mistura. Neste caso, são considerados dois grupos de composições. Duas em que foi utilizado superplastificante (A35, A40) e duas em que este não foi utilizado (A50, A60).

Em cada grupo os resultados são os esperados, sendo que as misturas com menor razão água-cimento apresentam valores de espalhamentos médios inferiores.

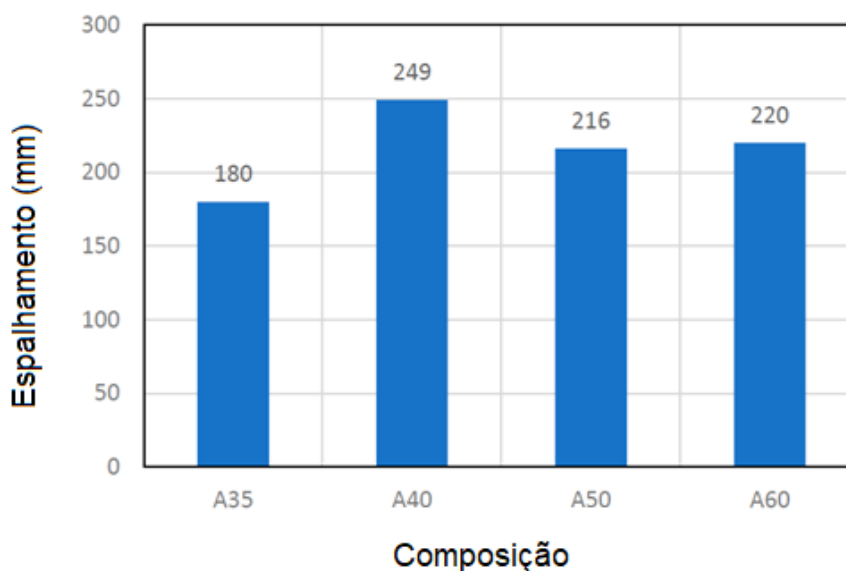


Figura 47 - Trabalhabilidade, resultados dos ensaios de espalhamento.

6.2. ENSAIOS DE FLEXÃO

A **Tabela 5** apresenta os resultados dos ensaios efetuados para determinar a resistência à tração por flexão das composições de argamassa, ensaiadas conforme **5.6**.

Tabela 5 - Resultados dos ensaios de flexão.

	Composição			
	A60	A50	A40	A35
Média (MPa)	6,8	7,7	8,5	11,4
Coefficiente de variação (%)	4,8	2,8	10,6	1,7
Desvio-padrão (MPa)	0,3	0,2	0,9	0,2
Contagem (n.º)	3	3	3	3

6.3. ENSAIOS DE COMPRESSÃO

Os resultados dos ensaios descritos em **5.6** encontram-se apresentados na **Tabela 6**.

Tabela 6 - Resultados dos ensaios de compressão.

	Composição			
	A60	A50	A40	A35
Média (MPa)	30,0	34,0	46,8	67,3
Coefficiente de variação (%)	0,2	4,3	3,4	1,6
Desvio-padrão (MPa)	0,1	1,5	1,6	1,1
Contagem (n.º)	6	6	6	6

Na **Figura 48** pode ser observada a relação entre os resultados obtidos para os ensaios de compressão e flexão. Os valores obtidos encontram-se dentro dos limites teóricos definidos por Gonnerman e Shuman, (1928).

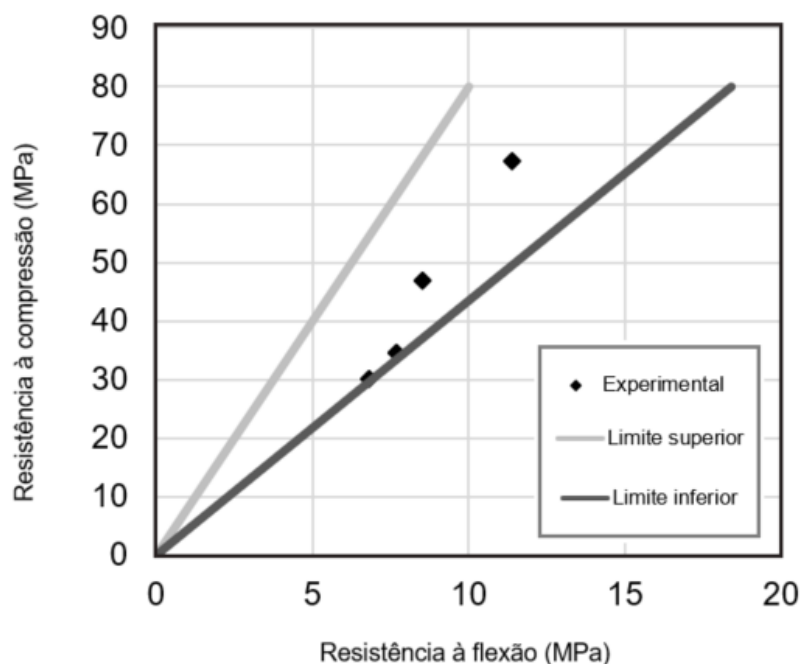


Figura 48 - Relação entre resistência à flexão e resistência à compressão.

6.4. ENSAIOS DE TRAÇÃO SIMPLES

Como descrito em 5.3 foram produzidos quatro tirantes de cada amassadura para realização dos ensaios de tração. Desses quatro tirantes, três foram reforçados com fibra de carbono e o outro foi utilizado para determinar a resistência à tração simples da matriz. Os resultados dos ensaios sobre os tirantes não reforçados, descritos em 5.7, encontram-se apresentados na Tabela 7.

Nas Figuras 49 e 50, são apresentadas as relações entre a resistência à flexão e tração e resistência à compressão e tração, respetivamente.

Os valores de resistência obtidos para cada composição, serão apresentados mais à frente, nos gráficos respetivos do subcapítulo 6.2, como F_{ctm} (N).

Tabela 7 - Resistência da matriz à tração simples.

Composição	Tensão de rotura (MPa)
A35	5,4
A40	4,0
A50	2,8
A60	2,5

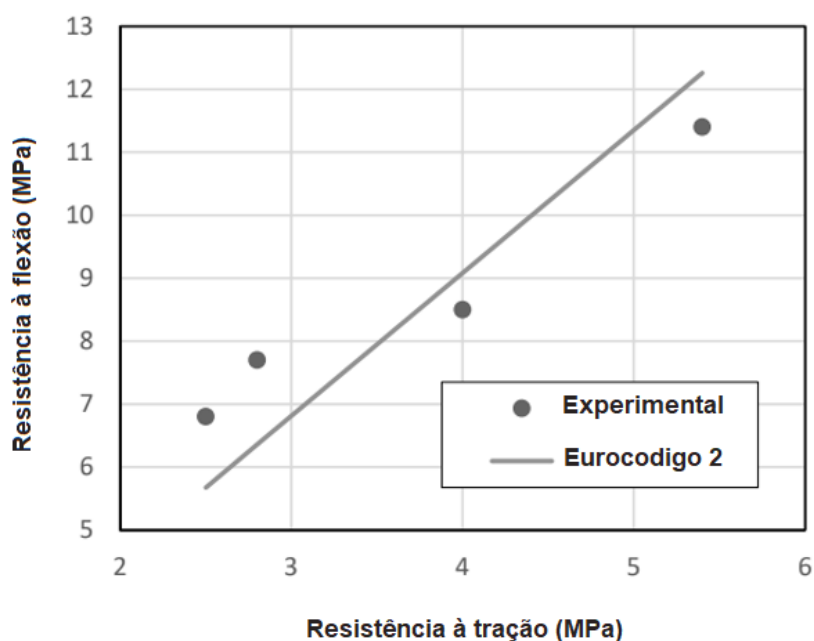


Figura 49 - Relação entre a resistência à flexão e resistência à tração da matriz.¹⁷

Conforme seria expectável, os valores de resistência à flexão obtidos durante a presente campanha experimental apresentam uma relação inversa à razão água-cimento. Para além disso, quando relacionamos os resultados obtidos com os resultados dos ensaios de tração, verificamos que se encontram dentro da ordem de valores teórica do EC 2 (CEN, 2010).

¹⁷ Consultado em (CEN, 2010)

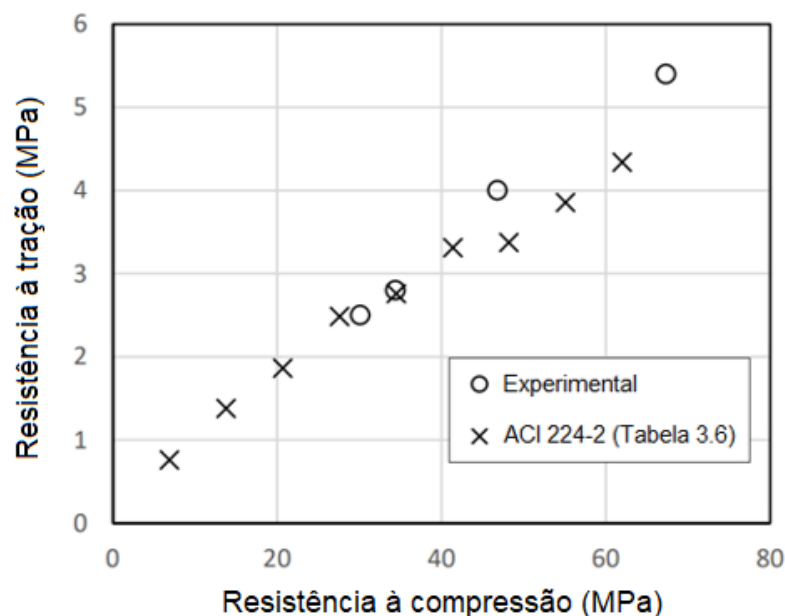


Figura 50 - Relação entre a resistência à compressão e resistência à tração da matriz.¹⁸

De forma similar, os resultados obtidos dos ensaios de compressão variam em conformidade com a maior ou menor razão água-cimento das composições, sendo logicamente as composições com menor razão água-cimento a apresentar valores de resistência maiores. Quando relacionados com a resistência à tração, os resultados obtidos para a resistência à compressão, enquadram-se bem com os pares definidos no ACI (2004).

6.5. TRC: COMPORTAMENTO À TRAÇÃO

Este ponto apresenta-se como a parte principal desta investigação. De acordo com Santis et al.,(2017), os parâmetros mais importantes para ter em conta em ensaios de tração são: a tensão na primeira fenda (σ_{cr}), o espaçamento entre fendas (S_m), a força última (F_u) e a respetiva extensão média (ϵ_u). Os ensaios na presente campanha tiveram como objetivo avaliar e interpretar estes valores para todos os provetes de cada composição.

¹⁸ Consultado em (ACI, 2004)

6.5.1 Modos de rotura

Os ensaios à tração de TRC's podem apresentar vários tipos de roturas. Desta forma, Carozzi *et al.*,(2017), identificam três tipos de modo de rotura possíveis para TRC's submetidos a tração simples, nomeadamente:

Tipo A – Rotura na zona de transmissão da carga;

Tipo B – Rotura de tração pelo feixe de fibras;

Tipo C – Rotura por deslizamento das fibras, nas extremidades.

Na **Figura 51** apresentam-se esquematicamente cada um dos modos de rotura.



Figura 51 - Tipos de modo de rotura.¹⁹

Na presente dissertação, não é possível observar roturas 100% do **Tipo B**. Os fatores que poderão estar atribuídos a este tipo de comportamento são os seguintes: 1) A dificuldade de impregnar a matriz no feixe de fibras, (dificultando assim uma homogeneidade na aderência entre os dois materiais ao longo dos provetes); 2) Dificuldade em garantir que todos os filamentos estejam simultaneamente e uniformemente tensionados; 3) Problemas na produção dos provetes e execução dos ensaios.

Em princípio não se verificaram roturas do **Tipo C**, uma vez que o comprimento de amarração foi definido para que tal não acontecesse. No entanto, não é possível garantir que não tenha havido deslizamento de filamentos na zona interior do feixe, não envolvidos pela matriz. Neste ponto, vale apenas notar que estes modos foram definidos para TRC's com fibras pré-

¹⁹ Adaptado de (Carozzi *et al.*, 2017)

impregnadas, ou seja, com utilização de resinas. No caso da presente investigação, foram utilizados feixes de fibra não impregnados.

As roturas do **Tipo A** foram as que ocorreram com menor frequência. Uma das razões atribuídas para este modo de rotura foi uma possível inclinação do varão roscado nas extremidades dos provetes, provocando assim esforços de flexão não pretendidos. Estes esforços de flexão provocam então a cedência do provete na zona de transmissão da carga (zona do varão roscado). Adicionalmente, os ensaios de tração só são considerados válidos se a rotura ocorrer dentro da zona de mediação. Se não, os valores do ensaio só são válidos até à concentração da deformação na fenda final (Brameshuber et al., 2016).

De seguida é apresentada uma discussão preliminar dos resultados obtidos na campanha.

6.5.2 Composição A35

A **Figura 52** apresenta o comportamento dos provetes da composição A35 quando submetidos a ensaios de tração simples.

As roturas nestes provetes foram todas do tipo B ou C, uma vez que nenhum cedeu na zona de ancoragem. Como descrito no ponto anterior não é possível garantir que as roturas sejam do tipo B ou C. Concluímos assim que não ocorreu nenhuma rotura 100% do tipo B, como descrito no ponto **6.5.1**, uma vez que em nenhum dos provetes o feixe ficou dividido em dois. No entanto embora o comprimento de amarração tenha sido calculado para impedir roturas do tipo C, é possível que se tenha dado o escorregamento de alguns filamentos do feixe de fibra. Podemos concluir assim que os provetes tiveram roturas mistas do tipo B e C. Carozzi *et al.*, (2017), apresentam uma campanha experimental onde foram atribuídas roturas mistas a vários dos seus provetes.

O provete **A35III** atinge a rotura imediatamente após a primeira fenda. Por outro lado, os provetes **A35I** e **A35II** sustentam uma força próxima de F_{ctm} , acabando por abrir pequenas fendas que podem ser observadas à direita, no provete **A35II** na **Figura 53** e no comportamento subsequente ao aparecimento das primeiras fendas nos gráficos. O provete **A35III** fendilhou para uma força superior à capacidade resistente do reforço e, conseqüentemente, o feixe não teve capacidade de absorver e redistribuir a energia libertada, resultando assim na rotura imediata do provete.

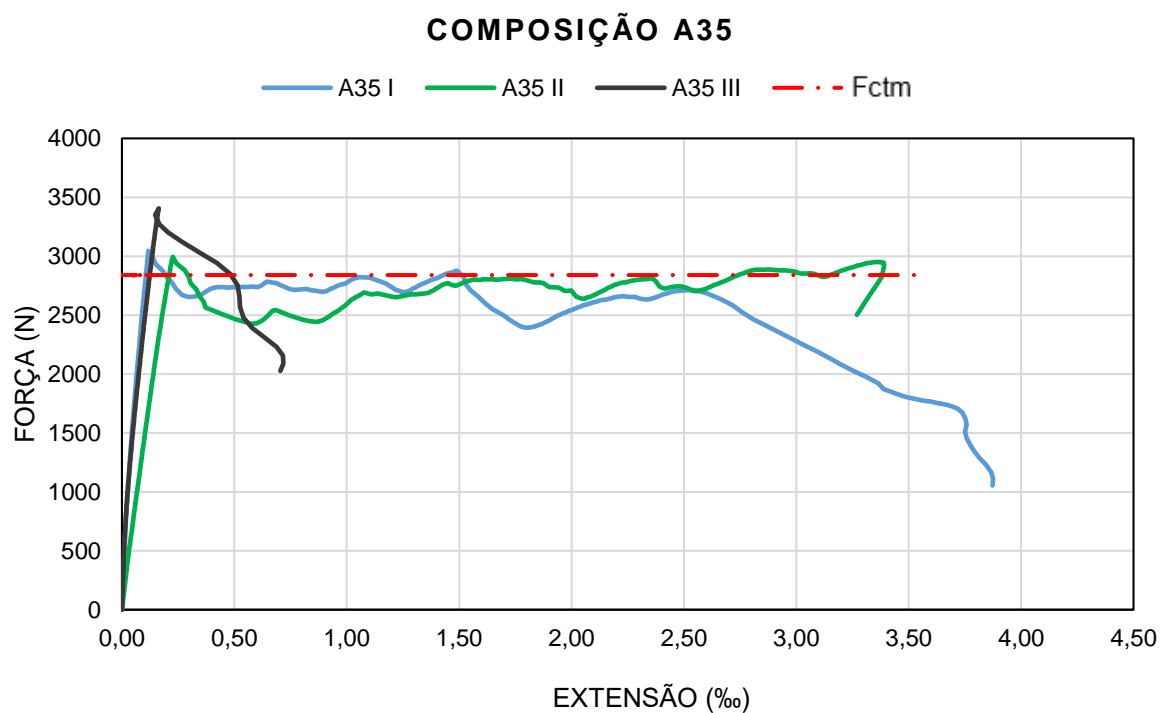


Figura 52 - Gráfico força-extensão dos provetes da composição A35, ensaiados à tração simples.

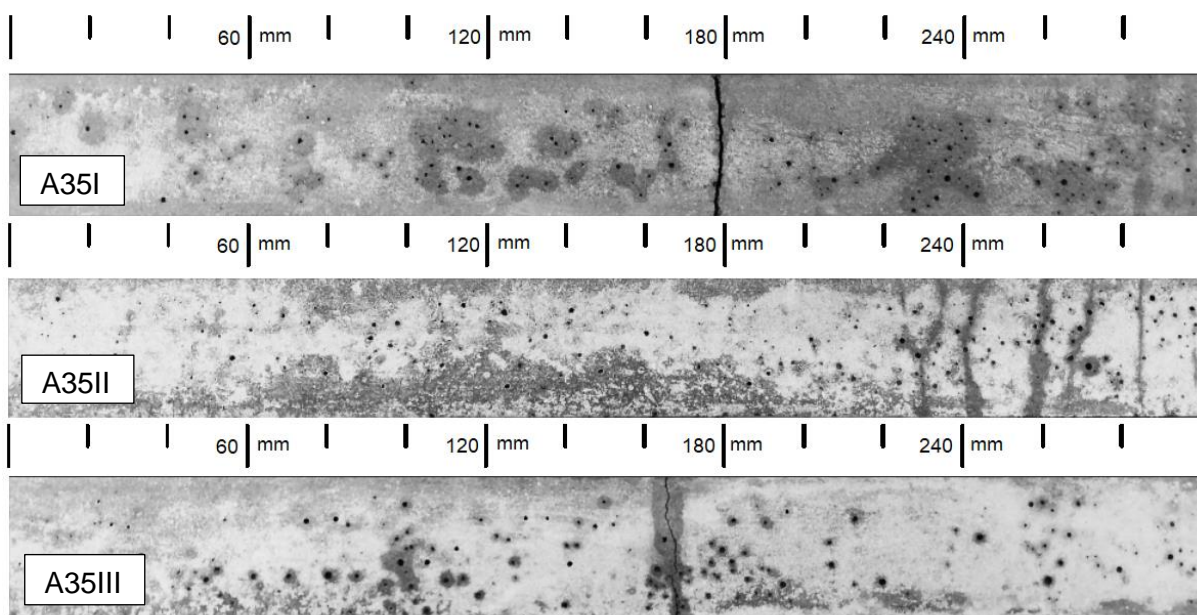


Figura 53 - Provetes A35, após os ensaios de tração.

6.5.3 Composição A40

A **Figura 54** apresenta o comportamento dos provetes da composição **A40**, quando submetidos a ensaios de tração simples.

À semelhança da composição **A35**, os provetes **A40II** e **A40III** tiveram modos de rotura do tipo B e tipo C. No entanto o provete **A40I** cedeu pela zona de transmissão da carga (zona onde acaba o varão roscado), tendo assim uma rotura do tipo A. Sendo esta a primeira fenda visível durante o ensaio, este provete não é considerado representativo do comportamento do compósito.

Embora o aparecimento das primeiras fendas seja coerente com o F_{ctm} (2,1kN), os provetes **A40I** e **A40III** apresentaram um comportamento longe do espectável, atingindo forças últimas muito inferiores à resistência do feixe de fibra. Este comportamento pode dever-se a vários fatores, tais como: 1) Problemas na betonagem e/ou desmoldagem destes provetes; 2) O aparecimento da primeira fenda ocorrer na zona de transmissão de força da máquina para o tirante (como pode ser observado na **Figura 55**, à esquerda no provete **A40I**).

Como tal, para esta composição foram considerados os valores de ensaio do provete **A40II**. Neste provete foi conseguida uma redistribuição de esforços após o aparecimento da primeira fenda e conseqüente formação de várias fendas subseqüentes (**Figuras 54 e 55**).

Neste tirante obteve-se uma força última de 3,1kN, portanto, comparável à que se observou nos compósitos **A50** e **A60**, que se assume como a força máxima resistida pelo reforço quando embebido na matriz.

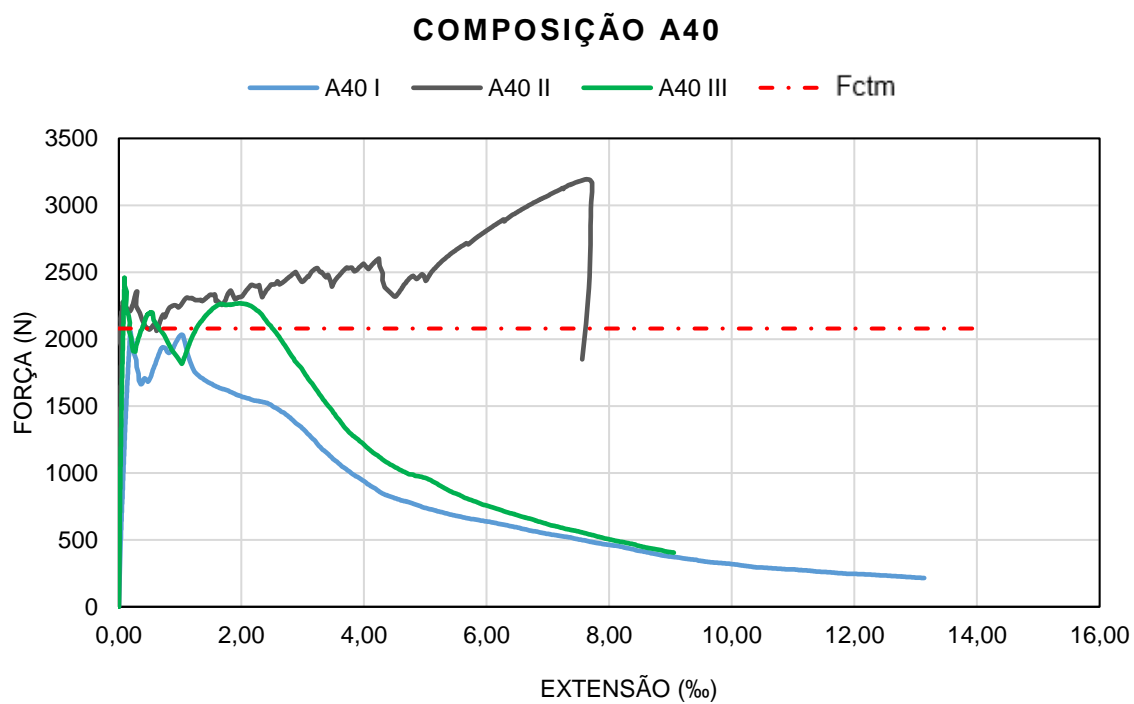


Figura 54 - Gráfico força-extensão dos provetes da composição A40, ensaiados à tração simples.

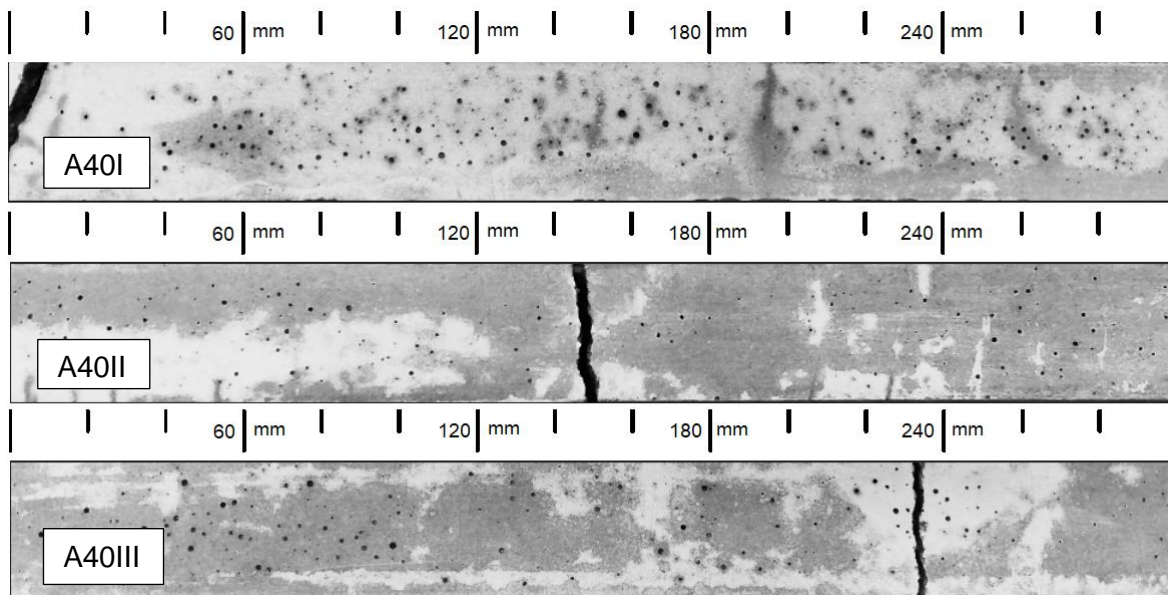


Figura 55 - Provetes A40, após os ensaios de tração.

6.5.4 Composição A50

A **Figura 56** apresenta o comportamento dos provetes da composição **A50**, quando submetidos a ensaios de tração simples.

Os provetes **A50I** e **A50III** apresentam um modo de rotura do tipo B e C. Já o provete **A50II** apresenta um modo de rotura do tipo A. Tendo sido esta a primeira fenda visível, o ensaio é considerado inválido.

No caso da composição **A50**, os provetes **A50I** e **A50II** apresentaram comportamentos diferentes do esperado. Este facto foi atribuído a problemas durante o fabrico dos provetes, ou durante o processo de ensaio. Desta forma, o provete **A50III** foi definido como provete representativo do comportamento desta composição.

Para o tirante **A50III** o aparecimento da primeira fenda foi coerente com o valor de F_{ctm} (1,5kN) e apresentou uma força última de 3kN.

Neste provete foi conseguida uma redistribuição de esforços após o aparecimento da primeira fenda e consequente formação de várias fendas subseqüentes (**Figuras 56 e 57**). Quando se esgotou a capacidade de fendilhação, observou-se um endurecimento e a concentração da deformação numa fenda principal.

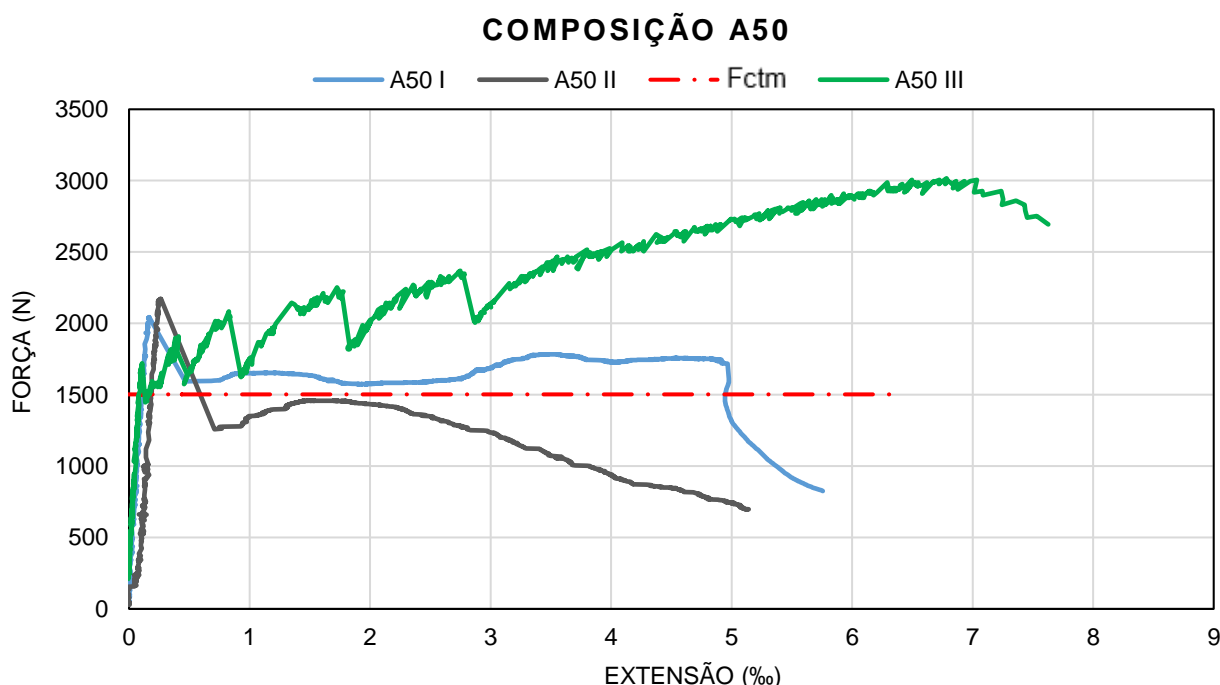


Figura 56 - Gráfico força-extensão dos provetes da composição A50, ensaiados à tração simples.

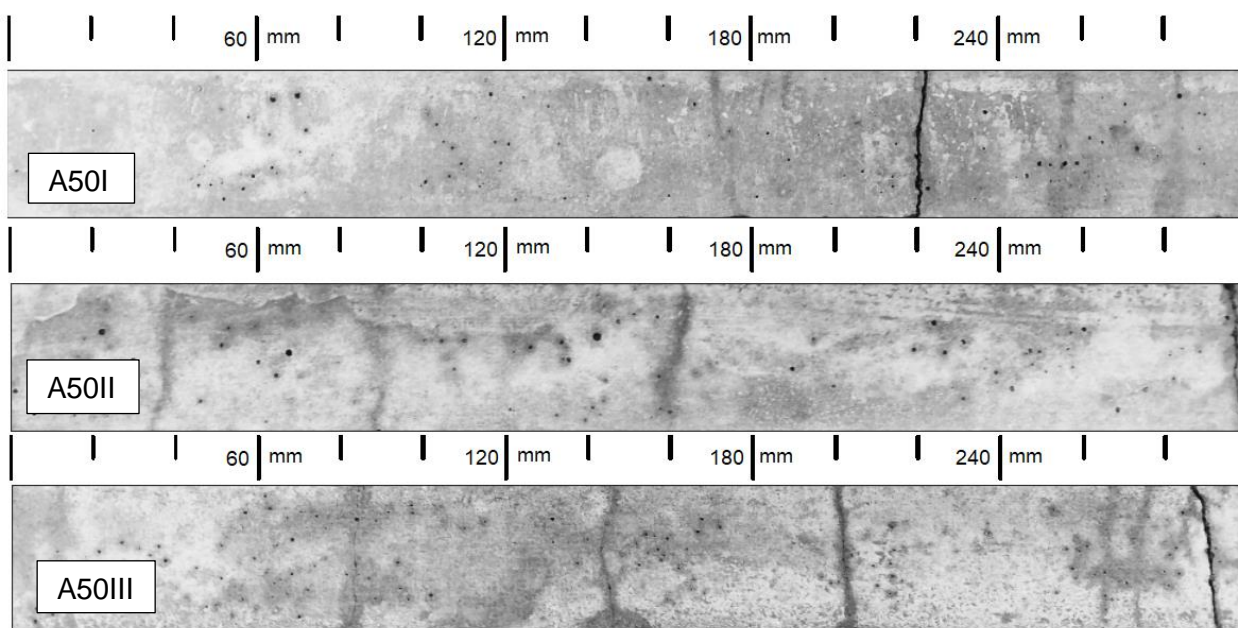


Figura 57 - Provetes A50, após os ensaios de tração.

6.5.5 Composição A60

A **Figura 58** apresenta o comportamento dos provetes da composição **A60**, quando submetidos a ensaios de tração simples.

O provete **A60II** apresenta um modo de rotura do tipo B e C. Já os provetes **A60I** e **60III**, apresentam modos de rotura do tipo A. Apesar disto, o provete **A60I**, apresentou um comportamento esperado durante o ensaio e, em contraste com o provete **A60III**, só se observou uma concentração da deformação na última fenda após o provete atingir a extensão última. Assim sendo, os resultados do ensaio ao provete **A60I**, são considerados válidos até ao momento da concentração da deformação na fenda (Brameshuber et al., 2016).

Os provetes **A60I** e **A60II** apresentam um comportamento bastante semelhante entre si. No entanto o provete **A60III** apresenta um comportamento muito diferente. Isto deve-se ao facto de ter sido cometido um erro no ensaio do provete. Durante a fase inicial do ensaio, em vez de se aplicar tração, por engano, aplicou-se compressão o que danificou o provete, tornando o ensaio e os seus resultados inválidos.

Em ambos os provetes **A60I** e **A60II**, é conseguida uma redistribuição de esforços após a ocorrência da primeira fenda e conseqüente formação de novas fendas (**Figuras 58 e 59**). Tal como nos outros compósitos com reforço suficiente, observa-se endurecimento após se esgotar a capacidade de fendilhação. Ambos os provetes apresentam forças de aparecimento

das primeiras fendas coerentes com o F_{ctm} (1,3kN). No entanto, enquanto que o provete **A60I** atinge uma força última de 3,2kN, o provete **A60II** apenas atinge uma força de 2,6kN. Este resultado é atribuído a uma ligação mais pobre entre o reforço e a matriz no provete **A60I**, resultante do processo de fabrico/betonagem.

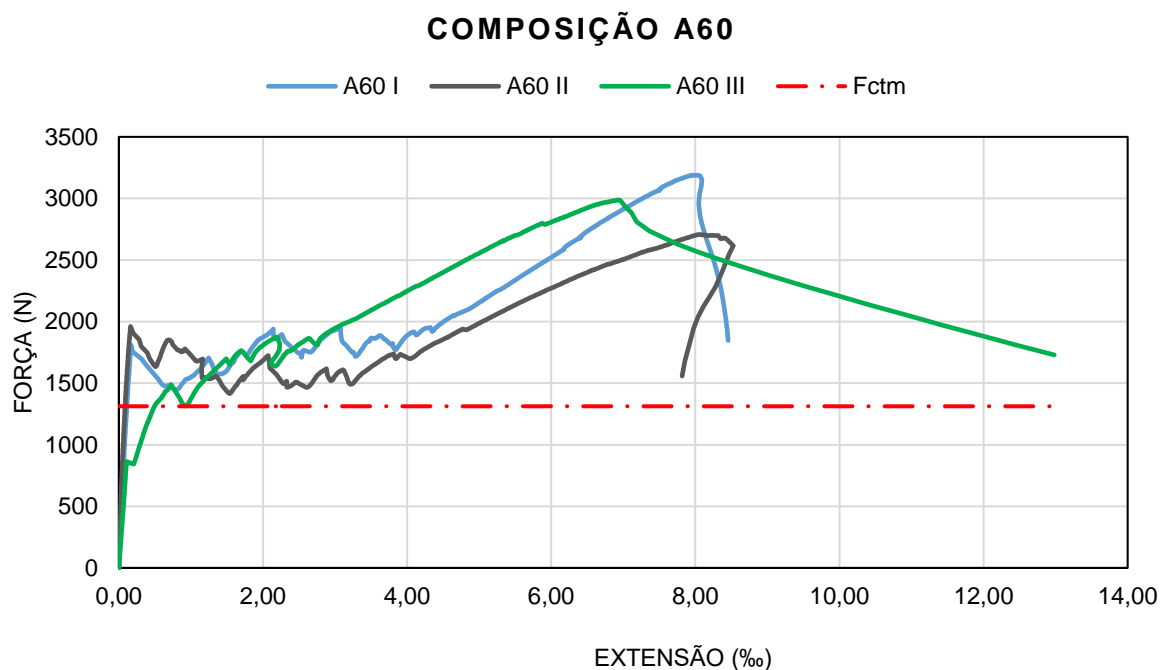


Figura 58 - Gráfico força-extensão dos provetes da composição A60, ensaiados à tração simples.

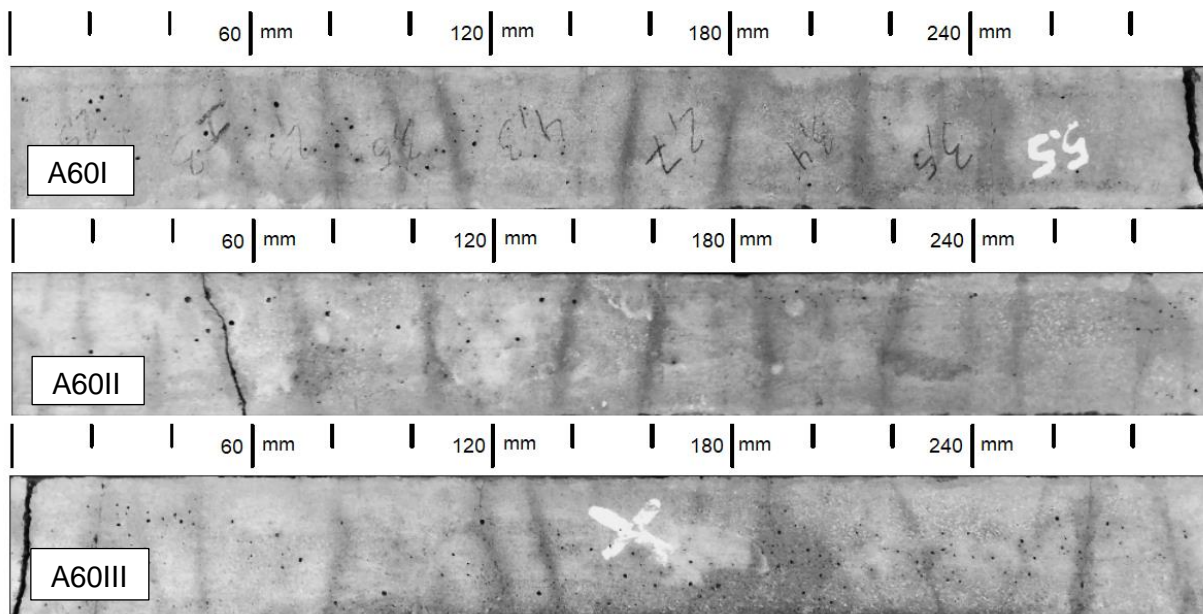


Figura 59 - Provetes A60, após os ensaios de tração.

6.6. CONSIDERAÇÕES GLOBAIS

Os resultados apresentados na **Figura 60**, que consistem nas curvas força-deformação dos provetes representativos de cada compósito apontam, geralmente, para uma variação da carga fendilhação de acordo com a resistência das matrizes. A exceção dá-se na composição A50, que apresenta uma carga de fendilhação inferior à norma. Este resultado é assumido como um defeito na produção do provete, uma vez que após o aparecimento da primeira fenda há um endurecimento e a segunda fenda já tem uma tensão superior à primeira fenda da composição A60.

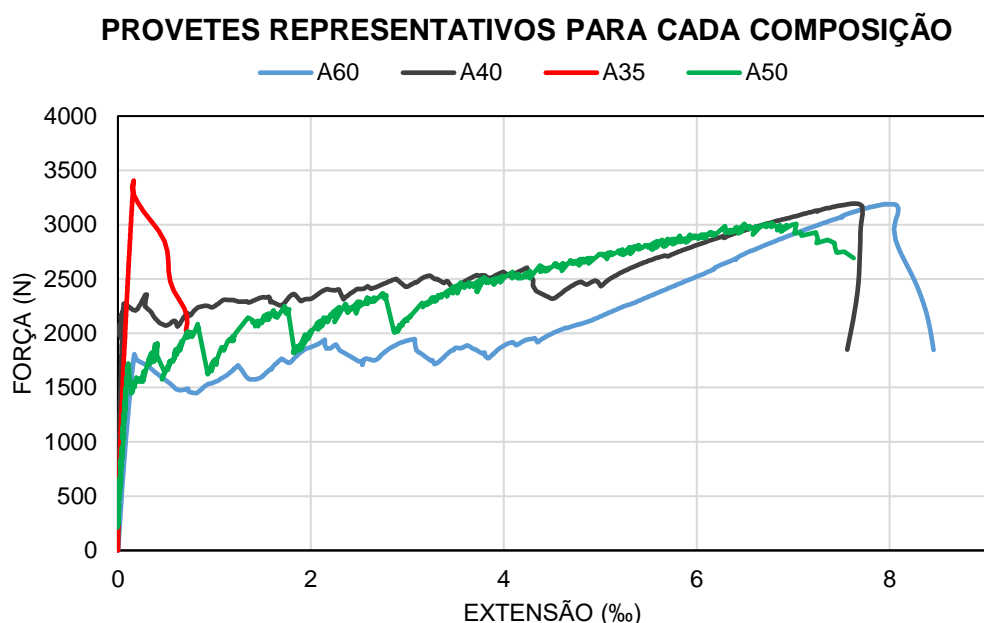


Figura 60 - Gráfico força-extensão dos provetes representativos de cada composição.

A força última nas composições A40 e A60 é semelhante e ocorre pela cedência do feixe de fibra. Pode concluir-se que o feixe de fibra, quando trabalha em conjunto com uma matriz cimentícia, tem uma resistência de cerca de 3kN.

O valor mais reduzido de força última é obtido para a composição A50, ainda que próxima dos resultados obtidos para A40 e A60. Esta diferença é atribuída a uma aderência mais pobre entre a matriz e o feixe de fibra. Das composições sem superplastificante (A50 e A60), a A50 é a que apresenta uma menor relação água-cimento. Este facto confere uma menor fluidez à matriz e conseqüentemente um menor envolvimento e aderência entre os dois materiais (dado o espaçamento muito reduzido entre filamentos).

A força na matriz no provete A35, aquando da ocorrência da primeira fenda, era superior à capacidade resistente do feixe de fibra. Desta forma, não existiu redistribuição de esforços ocorrendo apenas uma fenda.

Como pode ser observado em diversos exemplos nas **Figuras 56 a 59**, a deformação concentra-se numa fenda em particular, de maior abertura que as outras. Este tipo de comportamento é comum em TRC's (Carozzi et al., 2017; Mantzaridis et al., 2013). Imediatamente após os ensaios são também visíveis algumas pequenas fendas, não observáveis a olho nu após secagem do provete. Este tipo de variação na abertura das fendas é normal nos TRC's (Hartig et al., 2012); dado o espaçamento reduzido entre os filamentos de fibra, é praticamente impossível garantir que a totalidade do feixe seja penetrado pela matriz, pelo que é praticamente impossível garantir uma homogeneidade de aderência entre a matriz e o reforço ao longo de toda a dimensão do provete.

Nas composições A60 e A40, os valores de deformação média no pico de carga são semelhantes, enquanto que para A50 o valor é um pouco menor. O valor de deformação última da composição A35, é obviamente inferior às restantes composições, uma vez que tirante cedeu na formação da primeira fenda.

Todos os compósitos falharam por *pull-out* da fibra. Após o pico de carga, houve uma queda de capacidade resistente que ditou a paragem dos ensaios. Embora a deformação se tenha concentrado numa só fenda, o feixe não se separou em dois. No betão reforçado com TRC's, o estado de deformação não é o mesmo para todos os filamentos do feixe de fibra, pois é impossível garantir uma tensão homogénea durante o processo de produção dos provetes. Existe um comportamento *pull-out* do tipo telescópico (Colombo et al., 2013). Os filamentos externos estão mais em contato com a matriz do que os internos. Os últimos tendem a escorregar, transferindo força apenas por fricção. Isso possibilita que um compósito constituído por dois materiais frágeis possa apresentar um comportamento dúctil. Para além disso, é observável um acréscimo de cerca de 50% na capacidade de carga do feixe de fibras quando embebido na matriz, em comparação com o feixe isolado. Isso é atribuído ao fato de que quando as fibras são incorporadas noutro material, existem mais filamentos a resistir à carga simultaneamente.

Ainda que o TRC tenha um comportamento diferente em alguns aspetos do betão armado convencional, também tem algumas semelhanças. Ambos têm um valor de taxa de armadura que permite evitar a rotura frágil. A quantidade de reforço deve ser tal que a sua capacidade resistente seja maior ou igual à força na matriz imediatamente antes da ocorrência da primeira fenda (Appleton, 2013).

No entanto, o menor diâmetro das fibras, e o facto do reforço ser um conjunto de filamentos agrupados, com espaçamento muito reduzido entre “armaduras”, não permite que sejam aplicados nos TRC’s os modelos analíticos para controlo de fendilhação utilizados no betão armado convencional. O facto de o reforço ser composto por um grupo de filamentos tem influência no envolvimento pela matriz. As propriedades da matriz no estado fresco desempenham um papel importante na facilidade com que esta pode envolver as fibras, com consequências diretas na transmissão de força entre fibras e matriz. Além disso, o número de filamentos num feixe também influencia a facilidade com que se dá o envolvimento pela matriz (Wiberg, 2003).

Como discutido em (Felicíssimo & Neves, 2018) e (Neves & Felicíssimo, 2020), as soluções em TRC, para peças pouco solicitadas constituem uma solução económica e ambientalmente vantajosa, comparativamente ao reforço tradicional de varões de aço.

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES DE TRABALHO FUTURO

O objetivo da presente dissertação foi avaliar o comportamento de tirantes de compósitos cimentícios armados com fios de carbono. No **capítulo 3** do documento foi feita uma comparação das alternativas para reforço do betão, tendo-se destacado as vantagens do reforço com fibras contínuas, que já vem sendo investigado e aplicado noutros países, sob a designação de TRC. Durante a redação do documento considerou-se importante a introdução do **capítulo 4**. Foi durante esta fase de pré-campanha que foram detetados vários processos que se mostraram trabalhosos e alguns deles impossíveis de contornar com os recursos possuídos. Durante os primeiros ensaios de tração observou-se que a fibra, embora tenha uma grande resistência a esforços de tração, é pouco resistente quando submetida a forças de corte, pelo que quando se tentaram realizar os primeiros ensaios de tração, sem proteger as extremidades de contacto, observou-se que a fibra rompia no contacto com a máquina e não por tração. Uma das soluções encontradas na bibliografia foi proteger as zonas da fibra em contacto com as garras com lã de aço. Esta solução, para além de eficaz, mostrou-se muito expedita no sentido em que possibilitou a montagem simples dos provetes na máquina sem ter de recorrer à utilização de placas de metal com resinas, que consumiria muito mais tempo. Os moldes para os provetes utilizados na pré-campanha passaram por várias iterações, isto deve-se ao facto dos fios de carbono serem um material que precisa de ser trabalhado com muito minúcia e os processos de betonagem, normalmente, não são muito favoráveis ao manuseamento da fibra. A iteração final destes moldes mostrou-se capaz de contornar esta dificuldade e proceder à amassadura do betão sem danificar as fibras, mantendo-as tracionadas durante a betonagem. Dos ensaios de tração realizados à fibra, observou-se que o material não se comporta como seria expectável pelos valores de catálogo. Na realidade, os filamentos não atingem a rotura em simultâneo, conferindo assim ao material um comportamento dúctil e não frágil, como seria expectável. O que faz com que, na prática, seja impossível mobilizar 100% da resistência dos filamentos. De modo a contornar esta problemática, a campanha inicial teve de ser revista, dando assim origem à metodologia praticada no **capítulo 5**.

Durante a campanha experimental e para resolver questões relacionadas com esforços não pretendidos, foi criado um sistema para garantir que os ensaios aos provetes, tivessem esforços 100% de tração, (**Figura 45**). Foi ainda desenvolvido um sistema para transferir a carga para provetes sem danificar os mesmos. Todavia, alguns provetes apresentaram comportamentos que podem sugerir a existência de esforços de flexão, este facto foi atribuído a uma possível inclinação do varão roscado, que poderia não estar completamente alinhado

com o centroide. Pode concluir-se assim que o mecanismo de duas argolas desenvolvido, foi utilizado com sucesso e que as colocações dos varões roscados têm de ser feitas com uma minúcia que nem sempre foi possível garantir em laboratório. Foi desenvolvido ainda um mecanismo para adaptar o extensómetro utilizado ao comprimento de medição pretendido que foi utilizado com sucesso.

No **capítulo 6** é feita uma interpretação dos resultados obtidos nos ensaios experimentais e são apresentados os diferentes modos de rotura, encontrados na bibliografia, e utilizados para melhor descrever os resultados dos ensaios (**Figura 51**). Concluiu-se que não foi possível obter roturas, idealmente, 100% do Tipo B. Os fatores que poderão estar atribuídos a este tipo de comportamento são os seguintes: 1) A dificuldade de impregnar a matriz no feixe de fibras, (dificultando assim uma homogeneidade na aderência entre os dois materiais ao longo dos provetes); 2) Dificuldade em garantir que todos os filamentos estejam simultaneamente e uniformemente tensionados; 3) Problemas na produção dos provetes e execução dos ensaios. Como foi observado na bibliografia, para este tipo de provetes as deformações concentram-se geralmente numa fenda com maior abertura do que as outras. Este é um comportamento comum em TRC's.

Todos os provetes falharam por *pull-out*. Embora tenha havido uma queda da capacidade resistente após o pico de carga, que ditou a paragem dos ensaios e a deformação se tenha concentrado numa fenda só, o feixe nunca se separou em dois. Isto deve-se a vários fatores: 1) No betão armado com TRC's é impossível garantir uma tensão homogénea em todos os filamentos do feixe durante a produção dos provetes, pelo que o estado de deformação não é o mesmo para todos os filamentos; 2) Os filamentos externos estão mais em contacto com a matriz do que os internos, pelo que estes últimos tendem a escorregar. Isso possibilita que um compósito constituído por dois materiais frágeis possa apresentar um comportamento dúctil.

Foi observado também que o feixe de fibras tem uma capacidade de carga cerca de 50% superior, quando impregnado na matriz, em comparação com o seu comportamento isolado.

Embora tenha um comportamento diferente do betão reforçado com aço, o que impossibilita a utilização de normas de dimensionamento existentes para o mesmo, é possível fazer o controlo da fendilhação em compósitos reforçados com fibra de carbono, se a capacidade resistente da armadura de fibra de carbono não for inferior à tensão de fendilhação do provete.

Nesta pesquisa, a taxa de reforço mecânico da composição A35 está abaixo desse limite, enquanto que a das A40, A50 e A60 está acima.

7.1. RECOMENDAÇÕES DE TRABALHO FUTURO

A composição A50 apresentou um comportamento inferior ao que seria de esperar dada a tendência dos resultados apresentados pelas outras composições. Este facto foi atribuído a um pior envolvimento entre o provete e a matriz. Dado este facto, considera-se interessante o desenvolvimento de uma campanha experimental focada no envolvimento entre as fibras de carbono e as argamassas. Como variáveis, poderão ser consideradas a trabalhabilidade da matriz e o número de camadas num feixe de fibras.

Seria também interessante estudar o desenvolvimento de fendilhação em tirantes com outras geometrias, nomeadamente, com uma maior distância do feixe às faces do tirante. Para que exista um conjunto de dados que permita aferir a sensibilidade de modelos analíticos para o comportamento à tração do TRC, ou desenvolver modelos empíricos, é desejável que existam resultados de campanhas em que se faça variar a taxa geométrica de reforço, quer seja através da variação da área da secção transversal, quer seja através da quantidade de reforço. Em relação à taxa mecânica de reforço, no presente trabalho a mesma variou em função da variação da resistência da matriz, pelo que também será necessário promover essa variação através da resistência da fibra.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbott, W. F. (1962). *Method for carbonizing fibers*. U.S. Patent 3,053,775.
- ACI. (2010). Control of cracking. In *Design aids for EC2* (pp. 140–151). Taylor & Francis. https://doi.org/10.4324/9780203476390_chapter_12
- Akita, H., Koide, H., Tomon, M., & Sohn, D. (2003). A practical method for uniaxial tension test of concrete. *Materials and Structures*, 36(6), 365–371. <https://doi.org/10.1007/BF02481061>
- American Concrete Institute. (2004). *Cracking of Concrete Members in Direct Tension (ACI 224.2R-92)*.
- Appleton, J. (2004). *Estruturas de Betão* (Vol. 1). Orion, Editions.
- Appleton, J. (2013). Avaliação do comportamento em serviço e verificação da segurança aos estados limites de utilização. In *Estruturas de betão* (pp. 463–536). ORION.
- Arboleda, D. (2014). *Fabric Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) Composites for Infrastructure Strengthening and Rehabilitation: Characterization Methods*. University of Miami.
- ASTM International. (2020). ASTM D3878-20b, Standard Terminology for Composite Materials. In *West Conshohocken*. <https://doi.org/10.1520/D3878-20B>
- Barhum, R., & Mechtcherine, V. (2011). Mechanical Behaviour under Tensile Loading of Textile Reinforced Concrete with Short Fibres. *6th Colloquium on Textile Reinforced Structures (CTRS6)*, 175–186.
- Barhum, R., & Mechtcherine, V. (2013). Multi-Level Investigations on Behaviour of Textile Reinforced Concrete With Short Fibres Under Tensile Loading. *VIII International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures*.
- Bento, G. A. L. (2013). *Tirantes de Betão Armado com Varões de Fibra de Vidro*. Instituto Superior de Engenharia de Coimbra.
- Brameshuber, W., Hinzen, M., Dubey, A., & Peled, A. (2016). Recommendation of RILEM TC 232-TDT: test methods and design of textile reinforced concrete. *Materials and Structures*, 49(12), 4923–4927. <https://doi.org/10.1617/s11527-016-0839-z>
- Carozzi, F. G., Bellini, A., D'Antino, T., de Felice, G., Focacci, F., Hojdys, Ł., Laghi, L., Lanoye, E., Micelli, F., Panizza, M., & Poggi, C. (2017). Experimental investigation of tensile and bond properties of Carbon-FRCM composites for strengthening masonry elements. *Composites Part B: Engineering*, 128, 100–119. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.06.018>
- Chen, P., & Chung, D. D. L. (1993). Carbon fiber reinforced concrete for smart structures capable of non-destructive flaw detection. *Smart Mater. Struct.*, 1916(2), 22.
- Colombo, G. I., Magri, A., Zani, G., Colombo, M., & di Prisco, M. (2013). Textile Reinforced

- Concrete : experimental investigation on design parameters. *Materials and Structures*, 1933–1951. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0017-5>
- Comité Européen de Normalisation. (1999). Methods of test for mortar for masonry - Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table). *European Standard EN 1015-3*.
- Comité Européen de Normalisation. (2001). Cement–Part 1: Composition, specification and conformity criteria for common cements. *European Standard EN 197-1*.
- Comité Européen de Normalisation. (2003). *NP EN 12390-6: Ensaio do betão endurecido - Parte 6: Resistência à tração por compressão de provetes* (p. 14).
- Comité Européen de Normalisation. (2009a). Testing hardened concrete - Part 3: Compressive strength of test specimens. *European Standard EN 12390-3*.
- Comité Européen de Normalisation. (2009b). Testing hardened concrete - Part 5: Flexural strength of test specimens. *European Standard EN 12390-5*.
- Comité Européen de Normalisation. (2010). *NP EN 1992-1-1:2010. Eurocódigo 2 – Projeto de Estruturas de Betão – Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios*.
- Curbach, M., & Jesse, F. (1999). High-Performance Textile-Reinforced Concrete. *Structural Engineering International*, 4, 289–291.
- D’Antino, T., & Papanicolaou, C. (2017). Mechanical characterization of textile reinforced inorganic-matrix composites. *Composites Part B: Engineering*, 127, 78–91. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.02.034>
- De Munck, M., El Kadi, M., Tsangouri, E., Vervloet, J., Verbruggen, S., Wastiels, J., Tysmans, T., & Remy, O. (2018). Influence of environmental loading on the tensile and cracking behaviour of textile reinforced cementitious composites. *Construction and Building Materials*, 181, 325–334. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.045>
- Donnet, J. B., Wang, T. K., Peng, J. C. M., & Rebouillat, S. (1998). Carbon Fibers Third Edition, Revised and Expanded. In *Marcel Dekker, New York*.
- Donnini, J., Corinaldesi, V., & Nanni, A. (2016). Mechanical properties of FRCM using carbon fabrics with different coating treatments. *Composites Part B: Engineering*, 88, 220–228. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.11.012>
- Felicíssimo, D., & Neves, R. (2018). Compósitos cimentícios armados com fios de carbono – Avaliação experimental da armadura mínima de tração. *Encontro Nacional BETÃO ESTRUTURAL - BE2018*, 550–559.
- Fitzer, E., Kleinholz, R., Tiesler, H., Stacey, M. H., De Bruyne, R., Lefever, I., & Heine, M. (2000). Fibers, 5. Synthetic Inorganic. In *Ullmann’s Encyclopedia of Industrial Chemistry* (6th, compl ed.). Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. https://doi.org/10.1002/14356007.a11_001
- Ford, C., & Mitchell, C. (1963). *Fibrous Graphite*. U.S. Patent 3,107,152.

<https://doi.org/10.1145/178951.178972>

- Gärtner, von C. (2020). *The project building – the CUBE: Objectives and use concept*. <https://www.bauen-neu-denken.de/en/the-project-building-the-cube-objectives-and-use-concept/>
- Gonnerman, H. F., & Shuman, E. C. (1928). Compression, Flexure, and Tension Tests of Plain Concrete. *ASTM Proc.*, 28, 527–552.
- Guida, A., Mecca, I., & Pagliuca, A. (2013). Recovery intervention of two theatres in Basilicata (Italy): history and techniques. *WIT Transactions on the Built Environment*, 131(June 2016), 279–289. <https://doi.org/10.2495/STR130241>
- Hartig, J., Jesse, F., Shicktanz, K., & Häußler-Combe, U. (2012). Influence of experimental setups on the apparent uniaxial tensile load-bearing capacity of Textile Reinforced Concrete specimens. *Materials and Structures*, 45, 433–446. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.06.018>
- Hegger, J., Goralski, C., & Kulas, C. (2010). A slender pedestrian bridge made of textile reinforced concrete. *Large Structures and Infrastructures for Environmentally Constrained and Urbanised Areas*, 156–157. <https://doi.org/10.2749/222137810796024033>
- Hegger, J., Will, N., & Rüberg, K. (2007). Textile Reinforced Concrete – A new Composite Material. *Advances in Construction Materials*, 147–156.
- Ilankeeran, P. K., Mohite, P. M., & Kamle, S. (2012). Axial Tensile Testing of Single Fibres. *Modern Mechanical Engineering*, 2(4), 151–156.
- Jaccoud, J.-P. (1987). *Armatura Minimale Pour Le Contrôle De La Fissuration Des Structures En Béton*. École Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Kim, J. J., & Taha, M. R. (2014). Experimental and Numerical Evaluation of Direct Tension Test for Cylindrical Concrete Specimens. *Advances in Civil Engineering*, 2014, 1–8. <https://doi.org/10.1155/2014/156926>
- Mantzaridis, C., Brocas, A. L., Llevot, A., Cendejas, G., Auvergne, R., Caillol, S., Carlotti, S., & Cramail, H. (2013). Rosin acid oligomers as precursors of DGEBA-free epoxy resins. *Green Chemistry*, 15(11), 3091–3098. <https://doi.org/10.1039/c3gc41004h>
- Mohammadi, Y., Singh, S. P., & Kaushik, S. K. (2008). Properties of steel fibrous concrete containing mixed fibres in fresh and hardened state. *Construction and Building Materials*, 22(5), 956–965. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.12.004>
- Morgan, P. (2005). Carbon Fibers and Their Composites. In *Springer Series in Materials Science* (Vol. 210). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420028744>
- Naito, K., Tanaka, Y., Jm, Y., & Kagawa, Y. (2009). Tensile and Flexural Properties of Single Carbon Fibres. *Seventeenth International Conference on Composite Materials*, 1–10.
- Neves, R. (2000). *Betões reforçados com fibras de aço. Modelação do comportamento à*

- compressão uniaxial*. Instituto Superior Técnico.
- Neves, R., & Felicíssimo, D. (2020). Control of cracking in textile reinforced concrete with unresin carbon fibers. *Materials*, 13(14). <https://doi.org/10.3390/ma13143209>
- Ohta, T, Yamaguchi, K., Samizo, K., Ohta, A., & Harada, K. (2001). Fundamental studies on mechanical properties of UCCF cables for UCAS methodn Singapore. *26th Conference on OUR WORLD IN CONCRETE & STRUCTURES*, 521–526.
- Ohta, Toshiaki, Djamaluddin, R., Hino, S., Yamaguchi, K., & Harada, K. (2002). Flexural properties of concrete beams reinforced with UCAS. *Journal of Structural Engineering*, 48, 1229–1238.
- Ohta, Toshiaki, Djamaluddin, R., Seo, S., Sajima, T., & Harada, K. (2002). Evaluation of Tensile Strength of Unresin Continuous Carbon Fiber Cables as Tensile Reinforcement for Concrete Structures. *Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyushu University*, 62(4), 180–190.
- Otani, S. (1981). Carbonaceous Mesophase and Carbon Fibers. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 63(1–4), 249–263. <https://doi.org/10.1080/00268948108071999>
- Park, S.-J. (2015). *Carbon Fibers* (Vol. 210). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-9478-7>
- Quintela, A. de C. (1989). Contribuição para a História do Betão Armado em Protugal: Primeiras Obras. *Revista Portuguesa Engenharia de Estruturas (RPEE)*.
- Redaelli, D. (2006). Testing of reinforced high performance fibre concrete members in tension. *6th Int. Ph.D. Symposium in Civil Engineering*, 1–8.
- Reisgen, U., Schoene, J., Schleser, M., Keil, A., & Jeřábek, J. (2010). Theoretical And Experimental Investigations On Textile-Reinforced Concrete Spalling Behavior. *International RILEM Conference on Material Science - MARSCI, I*, 153–162.
- RILEM Technical Committee 232-TDT, & Brameshuber, W. (2016). Recommendation of RILEM TC 232-TDT: test methods and design of textile reinforced concrete. *Materials and Structures*, 49(12), 4923–4927. <https://doi.org/10.1617/s11527-016-0839-z>
- Santis, S. De, Giulia, F., Felice, G. De, & Poggi, C. (2017). Test methods for Textile Reinforced Mortar systems. *Composites Part B*, 127, 121–132. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.03.016>
- Sawada, Y., & Shindo, A. (1981). Clamping Methods for Tensile Test of Carbon fiber Strand. *J. Composite Materials*, 15(November), 582–590.
- Scholzen, A., Chudoba, R., & Hegger, J. (2015). Thin-walled shell structures made of textile-reinforced concrete: Part I: Structural design and construction. *Structural Concrete*, 16(1), 106–114. <https://doi.org/10.1002/suco.201300071>
- Simonsson, E. (2017). *Complex shapes with textile reinforced concrete*. Chalmers University of Technology.

- Singer, L. (1977). *High modulus, high strength carbon fibres produced from mesophase pitch*. U.S. Patent 4,005,183. [https://doi.org/10.1016/0010-4361\(78\)90685-7](https://doi.org/10.1016/0010-4361(78)90685-7)
- Stanley, C. (1979). *Highlights in The History of Concrete*. Cement and Concrete Association.
- Stoiber, N., Hammerl, M., & Kromoser, B. (2020). Cradle-to-gate life cycle assessment of CFRP reinforcement for concrete structures: Calculation basis and exemplary application. *Journal of Cleaner Production*, 280, 124300. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124300>
- Toscano, M. (2012). *A fábrica de moagem do Caramujo – património industrial da Cova da Piedade : Percursos de salvaguarda e reutilização. I*.
- Wiberg, A. (2003). *Strengthening of Concrete Beams Using Cementitious Carbon Fibre Composites*.
- Xiong, C., Li, Q., Lan, T., Li, H., Long, W., & Xing, F. (2020). Sustainable use of recycled carbon fiber reinforced polymer and crumb rubber in concrete: mechanical properties and ecological evaluation. *Journal of Cleaner Production*, 279, 123624. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123624>

ANEXO 1

Compósitos cimentícios armados com fios de carbono – Avaliação experimental da armadura mínima de tração



Diogo Felicíssimo ¹



Rui Neves ²

RESUMO

A utilização de fibras sintéticas, nomeadamente as minerais (vidro e carbono), como reforço de compósitos cimentícios, constitui uma alternativa ao tradicional reforço com varões de aço. No presente trabalho avaliou-se o desempenho de fios de carbono no controlo da fendilhação de elementos de argamassa cimentícia. Efetuaram-se ensaios de tração uniaxial, com taxa de deslocamento constante, em tirantes de argamassa reforçados com fios de carbono dispostos segundo o eixo longitudinal dos tirantes. De acordo com os resultados obtidos, a percentagem de armadura mínima em fios de carbono é 3 vezes inferior à necessária quando a armadura é constituída por varões de aço (S500). A ausência de suscetibilidade à corrosão deste tipo de reforço, pode permitir a redução de dimensões dos elementos estruturais, tornando a utilização de fios de carbono como armadura uma solução tecnicamente e economicamente viável para o controlo da fendilhação.

Palavras-chave: Controlo de fendilhação; Betão reforçado com têxteis (TRC); Fibras de carbono; Tração simples; Ensaios experimentais

1. INTRODUÇÃO

Os materiais de base cimentícia, nomeadamente os betões e argamassas, têm em geral elevada resistência sollicitações de compressão. Porém, são materiais frágeis e com resistência à tração relativamente reduzida. O betão armado (convencional), é o exemplo de um material compósito, constituído por uma matriz (betão) reforçada com varões (de aço). O facto de os reforços serem contínuos e de serem dispostos de forma convenientemente escolhida, traduz-se numa vantagem. Todavia, o tempo e a mão-de-obra necessários para a montagem e colocação das armaduras podem ser condicionantes em algumas aplicações. O betão reforçado com fibras (FRC, de *fiber reinforced concrete*), que consiste na incorporação de fibras curtas (comprimento inferior a 76 mm) no betão, tem um processo de produção mais simples e rápido, uma vez que dispensa o procedimento da montagem e da colocação, sendo as fibras misturadas aleatoriamente em conjunto com os outros constituintes do betão. No entanto, a questão da transmissão de força entre as fibras e o betão e o facto de nem todas as fibras

¹ Escola Superior de Tecnologia do Barreiro, Instituto Politécnico de Setúbal. diogo.felicissimo@estudantes.ips.pt

² ESTBarreiro/IPS, CERIS, CDP2T. rui.neves@estbarreiro.ips.pt

estarem alinhadas na direção da solicitação faz com que o volume de reforço (taxa de armadura) requerido para resistir a uma determinada solicitação seja superior ao do betão armado convencional.

Um elemento estrutural não tem só que resistir a ações mecânicas, mas também a outras ações físicas e químicas, e o betão armado com varões de aço é bastante suscetível à corrosão devido a ataques de agentes presentes no ambiente [1]. Para mitigar essa suscetibilidade existem diversas medidas, como a melhoria da resistência do betão à ação dos agentes causadores da corrosão, o aumento do recobrimento, o revestimento da superfície do betão com películas protetoras ou a utilização de armaduras resistentes à corrosão (aço inox, CFRP, GFRP), sendo que todas elas envolvem um investimento monetário considerável.

As armaduras em varões compósitos de fibras de vidro (GFRP) e de fibras de carbono (CFRP) apresentam-se como uma alternativa bastante apelativa às armaduras em aço[2,3]. Para além de serem relativamente fáceis de manusear em obra, por serem mais leves, também não apresentam suscetibilidade à corrosão, ao contrário das armaduras de aço, apresentando ainda uma resistência mecânica superior. Contudo, as armaduras em varões compósitos apresentam custos elevados comparativamente à solução tradicional de varões de aço. Para além disso, e tratando-se de elementos rígidos, não possuem vantagens em termos de manobrabilidade, de montagem e de armazenamento.

1.1 Betão reforçado com têxteis

O betão reforçado com têxteis (TRC, de *textile reinforced concrete*), é um compósito de fibras de elevada resistência, tecidas em malhas abertas (espaçamentos entre fios de 7 a 45 mm), embebidas numa matriz de base cimentícia. Apesar de a designação mais comum ser betão reforçado com têxteis, na generalidade das situações encontradas, quer a nível de investigação, quer a nível de aplicação, a dimensão máxima do agregado utilizado indica que a matriz é efetivamente uma argamassa. Daí que se encontrem outras designações para estes compósitos, tais como TRM (*textile reinforced mortar*), FRCC (*fabric reinforced cement composites*) ou FRCM (*fabric reinforced cementitious matrix*).

O reforço de compósitos cimentícios com fibras, discretas ou contínuas, já vem sendo investigado desde a década de 60 do século passado, mas no final desse século o TRC ainda era considerado um material inovador [4]. No início do Séc. XXI constituíram-se na Alemanha dois centros de investigação específicos para o estudo e desenvolvimento de TRC [5]. Esta investigação tem-se centrado na utilização de têxteis em fibra de carbono, vidro, aramida, basalto e mais recentemente PBO [6].

O interesse no conhecimento sobre o comportamento do TRC visa a sua aplicação em substituição de outros materiais, com potenciais vantagens. Em relação ao betão armado convencional, o TRC tem a vantagem de ser um material mais resistente às ações mecânicas e à corrosão, permitindo assim obter estruturas mais leves. Tem ainda facilidade em adaptar-se a formas geométricas mais complexas. Na Fig.1 ilustra-se a diferença de comportamento de dois tirantes com a mesma secção transversal, a mesma matriz e a mesma taxa de armadura, um de betão armado convencional e outro em TRC com fibra de carbono. As formulações em que se baseou o cálculo destes comportamentos podem ser encontradas em [7].

Em resultado da investigação desenvolvida, o TRC tem sido aplicado em algumas situações, sendo as mais comuns a reparação e reforço de estruturas e painéis de fachada e as mais interessantes, ou arrojadas, a substituição da armadura convencional em pontes pedonais constituídas por elementos pré-fabricados e pré-esforçados [8,9] e fabrico de cascas para coberturas com dimensão de 7×7 m² apoiadas no centro [10].

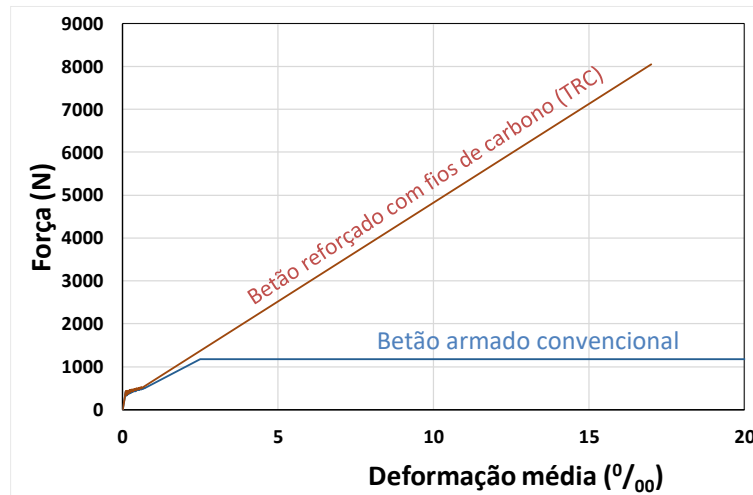


Figura 1. Comportamento ideal de tirantes em betão armado convencional e em TRC

1.2 Motivação e objetivos

Efetivamente, a ausência de problemas de corrosão no TRC e a consequente possibilidade de redução do recobrimento, traduz-se numa enorme vantagem em elementos levemente solicitados. Nestes elementos a armadura de cálculo é geralmente condicionada pela armadura mínima para controlo da fendilhação e a sua espessura pelo recobrimento mínimo das armaduras, se estas forem em aço. Existem referências a situações em que se conseguiram reduções de volume do betão da ordem de 75% [8,11,12]. Apesar de toda a investigação desenvolvida, que tem sido mais dirigida para a utilização do TRC como material de reforço de elementos existentes do que para a construção de elementos novos, ainda persistem lacunas no conhecimento [13,14] e, nomeadamente, nas regras de dimensionamento [15].

No TRC a transmissão da força entre os feixes e a matriz depende sobretudo da capacidade de penetração da matriz no interior do feixe e do número de filamentos que esta consegue envolver. A importância da questão da transmissão de força entre o feixe e a matriz, e a sua variação com as características da matriz, quando esta é de base cimentícia, dificulta o desenvolvimento de regras de cálculo para este material. Assim, a tendência atual é a avaliação das soluções em TRC através do ensaio de protótipos [14] ou, a avaliação, através de ensaios de tração, da resistência do têxtil numa determinada matriz, e utilizar as regras de cálculo para secções de betão armado, considerando-a como força da armadura [13,16].

Na pesquisa bibliográfica efetuada foi encontrado um único trabalho português [17] que aborda, ainda que de forma descritiva e sumária, os TRC e é somente na perspetiva do reforço de estruturas existentes, pelo que, tendo em conta o anteriormente exposto, importará desenvolver investigação sobre TRC em Portugal.

O principal objetivo deste trabalho é a avaliação do desempenho do reforço de argamassas cimentícias com de fibras contínuas (fios) de carbono para efeitos de controlo de fendilhação (armadura mínima), utilizando materiais produzidos em Portugal.

2. CAMPANHA EXPERIMENTAL

Para avaliar o comportamento do TRC sob tração uniaxial, utilizaram-se provetes reforçados com um feixe de fibras, uma vez que este constitui o elemento base de um têxtil (grelha), tendo-se considerado como matriz 3 composições de argamassa diferentes, cujas características se abordam a seguir.

2.1 Fibra

As fibras utilizadas foram fibras de carbono, produzidas por oxidação e carbonização de poliácridonitrilo (PAN), fornecidas em feixe com massa linear de 3300 tex, constituído por 50000 filamentos com 7 μm de diâmetro. Segundo informação do fabricante, as fibras têm uma densidade de 1.80 g/cm^3 , módulo de elasticidade de 240 GPa, tensão e deformação na rotura de 4 GPa e 1.7%, respetivamente.

A fibra recebida foi ensaiada à tração em feixe, com o intuito de avaliar a sua resistência. Para evitar a rotura por corte transversal das fibras pelas maxilas da máquina de tração, intercalou-se lã de aço entre as fibras e as maxilas, que constitui uma alternativa, expedita e suficientemente precisa [18], a outros processos de proteção e fixação dos feixes. Do conjunto de ensaios efetuado, obteve-se para a força de rotura do feixe um valor representativo de 1.94 kN. Dividindo este valor pela área da secção transversal do feixe (A_f), obtém-se uma tensão. De acordo com Colombo *et al.* [19], a área da secção transversal pode ser calculada utilizando a massa linear do feixe (Tex) e a densidade das fibras (m_v):

$$A_f = \frac{Tex}{m_v \left[\frac{\text{g}}{\text{mm}^3} \right]} [\text{mm}^2] \quad (1)$$

Destes cálculos resultaram uma área de 1.83 mm^2 e uma tensão de rotura do feixe de 1.06 GPa, ou seja, cerca de 25% da tensão de rotura de um filamento. A perda de resistência do feixe em relação ao filamento é normal, uma vez que no início do ensaio existem fibras que se encontram frouxas e outras até poderão já estar tracionadas, ou seja, o nível de tensão não é idêntico em todos os filamentos. Esta situação faz com que a resposta do feixe seja diferente da soma de um conjunto de respostas idênticas da totalidade dos filamentos que constituem o feixe [20,21]. Outra situação que pode ocorrer e que prejudica a resistência do feixe é o desalinhamento e até a torção de alguns filamentos [20]. Na literatura encontram-se graus de eficiência do feixe em relação ao filamento entre 10% [21] e 67% [22].

2.2 Matriz

O estudo foi realizado ensaiando 3 composições de argamassa diferentes de forma a analisar a variação do comportamento das fibras consoante a resistência da argamassa. Na produção das argamassas foram utilizados como constituintes: cimento CEM I 42.5R, de acordo com a EN 197-1 [23]; duas areias siliciosas, uma com dimensão nominal 0/2 e outra com dimensão nominal 0/4; água da rede pública; e, nas misturas em que se utilizou adjuvante, o superplastificante Glenium SKY 510. Para cada mistura realizaram-se determinações de espalhamento, resistência à compressão e resistência à flexão, de acordo com as normas EN 1015-3 [24], EN 12390-3 [25] e EN 12390-5 [26], respetivamente. No Quadro 1 apresentam-se as formulações e as propriedades das diferentes composições de argamassa ensaiadas.

Quadro 1. Composições e propriedades das argamassas

Argamassa	A35	A40	A60
Proporção mássica Cimento:Areia fina:Areia grossa	1:0.4:2.1	1:0.4:2.1	1:0.5:2.5
Razão água-cimento	0.35	0.41	0.60
Dosagem de adjuvante (ml/kg de cimento)	12	8	-
Espalhamento (mm)	>254	>254	196
Resistência à compressão (MPa)	67.3	46.8	30.1
Resistência à flexão (MPa)	11.4	8.5	6.8

2.3 Fabrico dos provetes

Para além dos provetes de controlo (ver 2.2), em cada amassadura foram moldados quatro tirantes de 15 \times 35 \times 500 mm^3 (Fig.2) para serem ensaiados à tração. Nos topos de cada tirante ficou embebido, num comprimento de 100 mm um varão roscado, com 5 mm de diâmetro, posicionado no centroide da secção

transversal. O diâmetro do varão foi calculado para garantir a resistência às forças previstas durante os ensaios e o comprimento no interior do tirante de forma a garantir a amarração dessas forças.

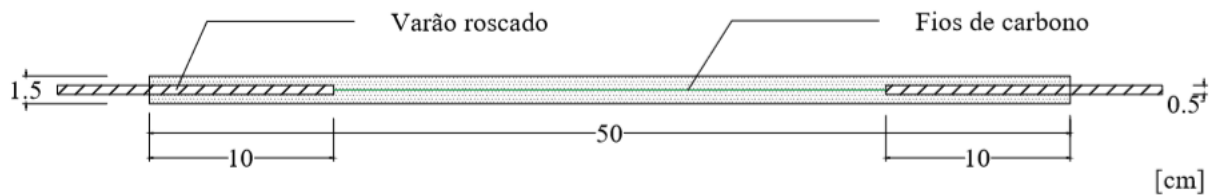


Figura 2. Esquema dos tirantes armados com fios de carbono

A produção dos provetes foi realizada por um processo designado por laminagem [13]. Este processo consiste na deposição alternada de camadas de argamassa e de fibra. Utilizaram-se moldes construídos especificamente para este efeito, em aço inox, com rigoroso controlo dimensional. A compactação foi efetuada por camadas com vibração externa (mesa VêBê). Os tirantes foram desmoldados 2 dias após o fabrico e posteriormente curados em água a 20 °C até aos 28 dias de idade. Três dos quatro tirantes são armados com fios de carbono e o quarto não é reforçado.

2.4 Ensaios de tração

Os ensaios de tração uniaxial são de difícil execução [27,28]. Como tal, não são efetuados com frequência e não existe uma norma para a sua realização.

Neste caso, a transmissão de carga da máquina ao provete foi efetuado através de um varão parcialmente embebido no tirante, seguindo o princípio aplicado por Jaccoud [1]. No presente trabalho estes varões foram ligados à máquina através de rótulas tridimensionais, materializadas através de duas argolas (Fig. 3), para prevenir o aparecimento de outros esforços, para além do esforço axial. Os ensaios foram realizados numa máquina universal mecânica Instron 5900-R, que permitiu realizar os ensaios por imposição de uma taxa de deslocamento. A taxa de deslocamento adotada foi de 0.5 mm/minuto, valor frequentemente encontrado neste tipo de ensaios [6,29].

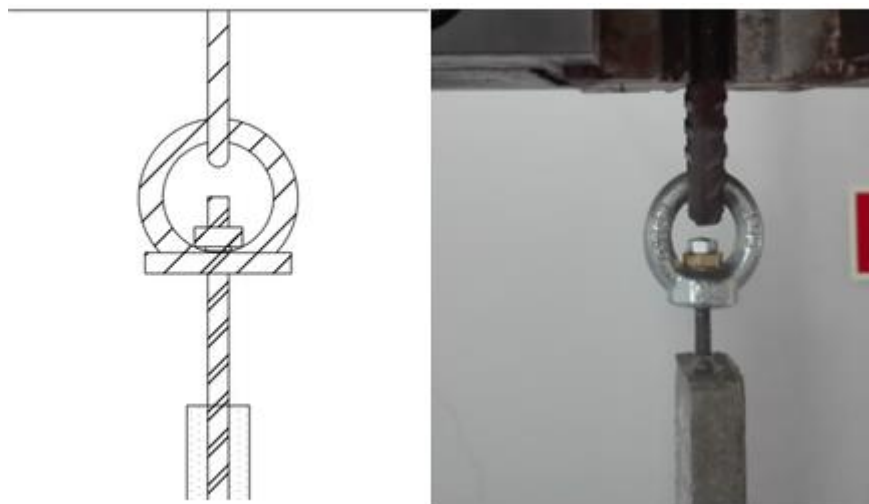


Figura 3. Esquema de argolas utilizado para garantir tração pura

De acordo com De Santis *et al.* [14], os parâmetros mais importantes a extrair dos ensaios de tração em TRC são: tensão de fendilhação, distância entre fendas, carga máxima e deformação correspondente. Assim, procedeu-se à aquisição sincronizada da força e deformação medidos com recurso a uma célula de carga de 10 kN da classe 0.5 e a um extensómetro Instron 2630-112, com campo de medida -5 a +25 mm e base de medida de 50 mm, adaptada para 300 mm, respetivamente.

3. RESULTADOS E ANÁLISE

No Quadro 2 apresentam-se os valores representativos da tensão de fendilhação (σ_{cr}), da carga última (F_u), da extensão última (ε_u) e da distância média entre fendas (S_m), obtidas para os 3 compósitos ensaiados. Na Fig.4 encontram-se as curvas força-deformação média dos provetes representativos de cada compósito ensaiado, enquanto que na Fig.5 se mostra a fendilhação numa das faces dos provetes.

Quadro 2. Resultados dos ensaios de tração dos tirantes

Matriz	σ_{cr} (MPa)	F_u (N)	ε_u (‰)	S_m (mm)
A35	6.5	3406	0.17	-
A40	4.1	3128	7.2	14
A60	3.4	3189	8.0	13

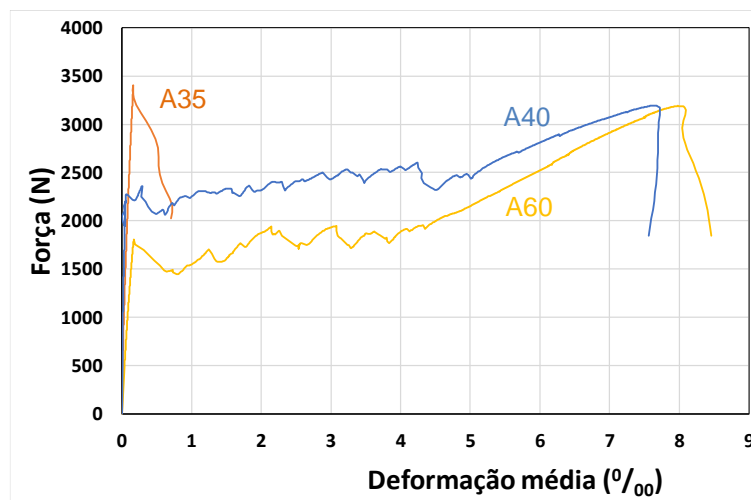


Figura 4. Curvas força-deformação dos provetes representativos de cada compósito

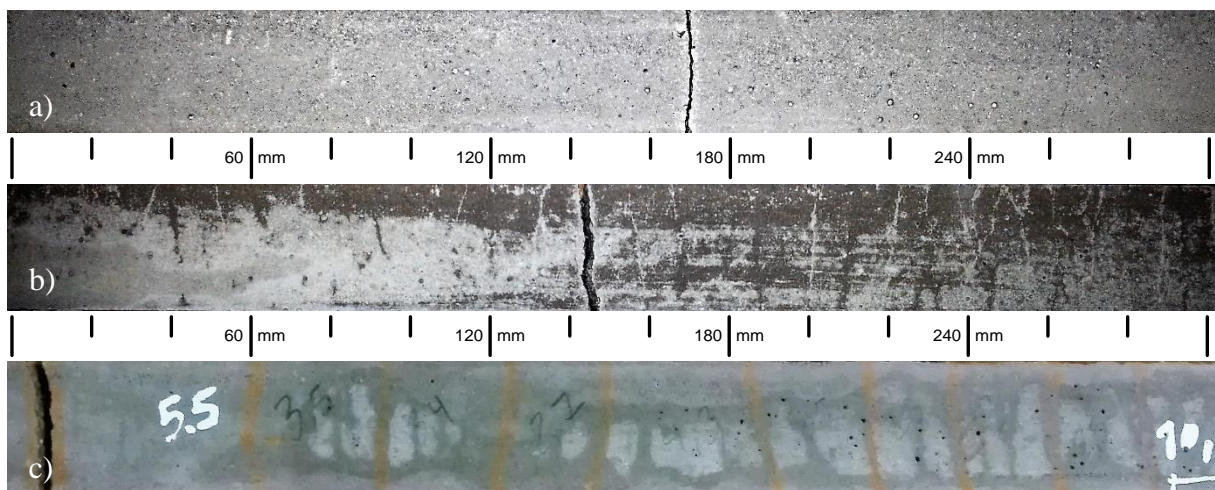


Figura 5 – Aspeto dos tirantes após o ensaio (zona central): a) A35; b) A40; c) A60

A carga de fendilhação dos compósitos variou em conformidade com a resistência (à compressão e à flexão) da matriz, tendo-se obtido o maior valor para o A35 e o menor para o A60. Em relação à força última, o maior valor foi exibido pelo A35, enquanto que os A40 e A60 apresentaram valores bastante semelhantes. Na extensão última, os maiores valores verificaram-se nos compósitos A40 e A60, com uma grande diferença para o A35. No padrão de fendilhação observa-se uma grande semelhança entre

os compósitos A40 e A60 e uma grande diferença entre estes e o A35, onde só se formou uma fenda, enquanto que nos A40 e A60 se formaram fendas muito próximas, mas algumas delas só foram detetadas numa fase intermédia de secagem dos provetes. No compósito A35 só é possível observar resposta em regime elástico, enquanto que nos outros dois, para além desta, se observam as fases de fendilhação múltipla e de *strain-hardening* após a estabilização da fendilhação.

A tensão de fendilhação do compósito, como era expectável, foi condicionada pela resistência do material com menor deformação na rotura, ou seja, pela resistência à tração da matriz. A resistência da matriz condicionou igualmente a carga última para o compósito A35, enquanto que nos compósitos A40 e A60 foi a resistência da fibra. Nos compósitos A40 e A60, após se ter atingido a carga de fendilhação, as fibras conseguiram continuar a suportar o deslocamento imposto sem perda significativa de capacidade resistente do compósito, transferindo tensões para a matriz que originaram a abertura de novas fendas. Quando se esgotou a capacidade de formação de novas fendas, ao contrário do que deverá suceder no betão armado convencional - abertura das fendas existentes -, nestes compósitos a deformação concentrou-se essencialmente numa das fendas. Esta situação tem sido reportada noutros trabalhos sobre TRC [30,31]. Outra questão reportada na literatura, e que também se verificou nestes ensaios, é um espaçamento menor entre fendas no betão reforçado com fibras de carbono do que no betão reforçado com varões de aço [30].

O grau de envolvimento das fibras pela matriz é diferente de fibra para fibra na mesma secção transversal do feixe e também na mesma fibra ao longo do seu comprimento. Assim, será natural que as fendas que se venham a formar tenham aberturas diferentes. A diminuição do diâmetro dos elementos de reforço reduz o espaçamento entre fendas [28], pelo que, quando se utilizam fibras, o espaçamento entre fendas será menor do que quando se utilizam varões. Valores de espaçamento entre fendas similares aos obtidos neste trabalho podem encontrar-se em [15,32]. Nos presentes ensaios, a maioria das fendas que se formaram não eram visíveis a olho nu e foram detetadas observando os provetes no processo de secagem. Estas microfendas, correspondem no gráfico carga-deformação (Fig.4) a pequenas flutuações, enquanto que às fendas visíveis a olho nu correspondem as maiores oscilações observadas nessas curvas (5 no A60 e 2 no A40).

3.1 Modo de rotura

Os tirantes de TRC ensaiados falharam por escorregamento das fibras. Apesar da queda acentuada de rigidez após se ter atingido a força máxima de ensaio, que aliás acionou a paragem automáticas dos mesmos, os provetes não se separaram. De facto, em ensaios preliminares observou-se uma pequena retoma de rigidez, seguida de uma perda progressiva. Esta situação corresponde a um escorregamento progressivo das fibras. No reforço com feixes de fibras não se consegue atingir a tensão resistente que se observa num filamento, porque o estado de deformação não é o mesmo em todas as fibras, existe um *strain lag* [33], e porque existe um fenómeno de arrancamento telescópico [19]: os filamentos do exterior para o interior do feixe estão progressivamente menos envolvidos pela matriz, pelo que escorregam, transmitindo força somente por atrito. Ainda assim, verificou-se um melhor comportamento de conjunto dos filamentos embebidos na matriz do que no ensaio do feixe, tendo-se obtido uma resistência 1.5 vezes superior.

3.2 Armadura mínima

Um conceito usual de armadura mínima para controlo da fendilhação, em estruturas de betão armado, é que esta deve ser tal que a sua resistência garantida, após a fendilhação, uma capacidade resistente, pelo menos igual à força que estava instalada no betão em tração, no instante da fendilhação [34]. Utilizando o mesmo princípio para um compósito de matriz cimentícia, a taxa de armadura mínima (ρ_{min}) será:

$$\rho_{min} = \frac{f_{ctm}}{\sigma_r} \quad (2)$$

Em que f_{cm} será a resistência à tração da matriz e σ_r é a tensão máxima que se consegue mobilizar no têxtil quando embebido na matriz.

Tendo em conta os resultados obtidos no programa experimental, considera-se uma a força máxima resistida pelo têxtil de 3 kN, o que conduz a um valor de $\sigma_r = 1639$ MPa. Considerando uma resistência à tração $f_{cm} = 3$ MPa, obtém-se uma taxa de armadura mínima de 0.18%. Para um aço S500 na mesma matriz, a taxa de armadura correspondente seria 0.6%.

Do cálculo anterior resulta um rácio entre armadura mínima em fios de carbono e armadura mínima em varões de aço de 0.3. O rácio aproximado do custo entre 1 kg de fibra de carbono e 1 kg de aço é 50. O rácio de massa entre a fibra de carbono e o aço é 0.23. Então, o rácio entre o custo do controlo da fendilhação, pelo critério considerado, com armaduras em fios de carbono e com armaduras em varões de aço será 3.45, ou seja, reforçar com fios de carbono é 3.45 vezes mais caro do que reforçar com varões de aço. Portanto, em geral, o reforço com fios de carbono será menos económico de que o reforço convencional. No entanto, como referido no início, nas peças onde a espessura seja condicionada pelo recobrimento a garantir para prevenir a corrosão das armaduras convencionais, as soluções em TRC podem reduzir o peso das peças em 75%, o que, mesmo tendo em conta que o rácio entre o custo da matriz de TRC e o betão seja 1.5, se consiga reduzir os custos de uma solução em TRC em 47% face a uma solução tradicional, considerando apenas os custos com os materiais.

O valor de força máxima obtido para o feixe de fibras de carbono embebidas na matriz poderá ser aumentado. Embora neste trabalho se tenham obtido valores muito semelhantes em duas matrizes distintas, é aceite que a força máxima resistida pelo têxtil numa matriz depende composição da matriz e a mesma pode ser melhorada pela utilização de adições minerais [15], como sílica de fumo e cinzas volantes. Se a fibra for aplicada na forma de têxtil, situação corrente, os feixes dispostos transversalmente às fibras tracionadas contribuem para a diminuição do escorregamento destas na matriz, por efeito de ancoragem. A impregnação do feixe com uma resina, previamente à sua aplicação no betão, permitiria aumentar também a força máxima, porque melhoraria o funcionamento conjunto dos filamentos e limitaria escorregamento dos filamentos no interior do feixe. No entanto, esta solução encarece o reforço em cerca de 5 vezes [21].

4. CONCLUSÕES

O reforço de matrizes cimentícias com fibras contínuas constitui um compósito designado por TRC, que tem um potencial interessante, com aplicações conhecidas e investigação específica desde o início do século. Não obstante, segundo a pesquisa bibliográfica efetuada, não se tem desenvolvido investigação em Portugal sobre este material.

Neste trabalho analisou-se o comportamento à tração uniaxial de 3 matrizes distintas, com taxas de reforço em fios de carbono idênticas, com materiais produzidos em Portugal. Verificou-se que nas matrizes menos resistentes o reforço adotado permitiu obter uma distribuição de fendas após se ter atingido a carga de fendilhação, enquanto que na matriz mais resistente tal não aconteceu. Apesar de não se conseguir mobilizar toda a resistência do feixe de fibras, por falta de aderência e de uniformidade de deformação nas fibras, a força máxima suportada pelo feixe no interior da matriz foi cerca de 3 vezes superior ao que teoricamente se obteria num varão de aço S500 com a mesma área. Ainda assim, essa força não foi suficiente para evitar a falha imediata do tirante com a matriz mais resistente quando este atingiu a carga de fendilhação.

Com base nos resultados experimentais e no custo dos materiais, foi efetuada uma análise económica onde se verificou que reforço com fibras contínuas de carbono não é só por si economicamente competitivo com o reforço tradicional em varões de aço, mas que a redução das dimensões dos elementos de betão armado convencional, cujo recobrimento mínimo condiciona a espessura, permitida pela ausência de problemas de corrosão dos fios de carbono, torna este tipo de reforço no solução mais económica, com reduções no custo do material até 47%.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a participação empenhada e eficiente do Sr. Alexandre Gamito, na conceção dos elementos necessários à realização dos ensaios e fabrico dos provetes, a colaboração do Núcleo de Materiais Orgânicos do Departamento de Materiais do LNEC na realização dos ensaios finais de tração e à Fisipe, S.A. pela cedência das fibras de carbono utilizadas nesta investigação.

REFERÊNCIAS

- [1] J.-P. Jaccoud, (1987)“Armatura Minimale Pour Le Contrôle De La Fissuration Des Structures En Béton,” École Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- [2] P. Santos, G. Laranja, P. M. França, and J. R. Correia, (2013)“Ductility and moment redistribution capacity of multi-span T-section concrete beams reinforced with GFRP bars,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 49, pp. 949–961.
- [3] A. F. Ashour and M. N. Habeeb, (2008)“Continuous concrete beams reinforced with CFRP bars,” *Proc. Inst. Civ. Eng. - Struct. Build.*, vol. 161, no. 6, pp. 349–357.
- [4] M. Curbach and F. Jesse, (1999)“High-Performance Textile-Reinforced Concrete,” *Struct. Eng. Int.*, vol. 4, pp. 289–291.
- [5] J. Hegger, N. Will, and K. Rüberg, (2007)“Textile Reinforced Concrete – A new Composite Material,” *Advances in Construction Materials*, pp. 147–156.
- [6] D. Arboleda, (2014)“Fabric Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) Composites for Infrastructure Strengthening and Rehabilitation: Characterization Methods,” University of Miami.
- [7] J. Appleton, (2013)“Avaliação do comportamento em serviço e verificação da segurança aos estados limites de utilização,” in *Estruturas de betão*, Amadora: ORION, pp. 463–536.
- [8] B. Plaggenborg and S. Weiland, (2008)“Textile-reinforced concrete with high-performance carbon fibre grids,” *JEC Compos.*, no. 44, pp. 32–35.
- [9] J. Hegger, C. Goralski, and C. Kulas, (2010)“A slender pedestrian bridge made of textile reinforced concrete,” *Large Struct. Infrastructures Environ. Constrained Urban. Areas*, pp. 156–157.
- [10] A. Scholzen, R. Chudoba, and J. Hagger, (2014)“Thin-walled shell structures made of textile-reinforced concrete Part I: Structural design and construction,” *Structural Concrete*, pp. 106–114.
- [11] P. Hajek, M. Novotna, A. Chira, C. Fiala, T. Vlach, and L. Laiblova, (2015)“Challenge of textile reinforced high performance concrete for sustainable construction,” *Concr. Innov. Des. fib Symp. Copenhagen*.
- [12] M. Curbach, S. Ortlepp, P. Offermann, T. Engler, A. Brückner, and M. Kratz, (2003)“Development of a large-sized , thin-walled , textile reinforced façade panel,” *Concr. Reinf. Concr.* 98, no. 6, pp. 345–350.
- [13] E. Simonsson, (2017)“Complex shapes with textile reinforced concrete,” Chalmers University of Technology.
- [14] S. De Santis, F. Giulia, G. De Felice, and C. Poggi, (2017)“Test methods for Textile Reinforced Mortar systems,” *Compos. Part B*, vol. 127, pp. 121–132.
- [15] J. Hegger, N. Will, O. Bruckermann, and S. Voss, (2006)“Load – bearing behaviour and simulation of textile reinforced concrete,” *Mater Struct*, pp. 765–776.
- [16] A. Scholzen, R. Chudoba, and J. Hegger, (2014)“Thin-walled shell structures made of textile-reinforced concrete Part II : Experimental characterization , ultimate limit state assessment and numerical simulation,” *Structural Concrete*, pp. 115–124.
- [17] C. Chastre, (2014)“Materiais e tecnologias de reforço de estruturas de betão-potencialidade e limitações,” in *REHABEND 2014-Congresso Latinoamericano" Patología de la construcción, Tecnología de la rehabilitación y gestión del patrimonio"*.
- [18] Y. Sawada and A. Shindo, (1981)“Clamping Methods for Tensile Test of Carbon fiber Strand,”

- J. Compos. Mater.*, vol. 15, no. November, pp. 582–590.
- [19] G. I. Colombo, A. Magri, G. Zani, M. Colombo, and M. di Prisco, (2013)“Textile Reinforced Concrete : experimental investigation on design parameters,” *Mater. Struct.*, pp. 1933–1951.
- [20] P. K. Ilankeeran, P. M. Mohite, and S. Kamle, (2012)“Axial Tensile Testing of Single Fibres,” *Modern Mechanical Engineering*, vol. 2, no. 4, pp. 151–156.
- [21] T. Ohta, K. Yamaguchi, K. Samizo, A. Ohta, and K. Harada, (2001)“Fundamenteal studied on mechanical properties of UCCF cables for UCAS methodn Singapore,” *26th Conf. OUR WORLD Concr. Struct.*, pp. 521–526.
- [22] T. Ohta, R. Djamaluddin, S. Seo, T. Sajima, and K. Harada, (2001)“Evaluation of Tensile Strength of Unresin Continuous Carbon Fiber Cables as Tensile Reinforcement for Concrete Structures,” *Mem. Fac. Eng. Kyushu Univ.*, vol. 62, no. 4, pp. 180–190.
- [23] Comité Européen de Normalisation, (2001)“Cement–Part 1: Composition, specification and conformity criteria for common cements,” *Eur. Stand. EN 197-1*.
- [24] Comité Européen de Normalisation, (1999)“Methods of test for mortar for masonry - Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table),” *Eur. Stand. EN 1015-3*.
- [25] Comité Européen de Normalisation, (2009)“Testing hardened concrete - Part 3: Compressive strength of test specimens,” *Eur. Stand. EN 12390–3*.
- [26] Comité Européen de Normalisation, (2009)“Testing hardened concrete - Part 5: Flexural strength of test specimens,” *Eur. Stand. EN 12390–5*.
- [27] R. Neves, (2000)“Betões reforçados com fibras de aço. Modelação do comportamento à compressão uniaxial,” Instituto Superior Técnico.
- [28] American Concrete Institute, (2004)“Cracking of Concrete Members in Direct Tension,” *ACI Committee 224*.
- [29] U. Reisgen, J. Schoene, M. Schleser, A. Keil, and J. Jeřábek, (2010)“Theoretical And Experimental Investigations On Textile-Reinforced Concrete Spalling Behavior,” *Int. RILEM Conf. Mater. Sci. - MARSCI*, vol. I, pp. 153–162.
- [30] T. Ohta, R. Ojamaluddin, S. Hino, and A. Ohta, (2001)“Studies on behaviour of concrete beam reinforced by UCAS method,” *26th Conf. OUR WORLD Concr. Struct.*, pp. 513–520.
- [31] F. G. Carozzi *et al.*, (2017)“Experimental investigation of tensile and bond properties of Carbon-FRCM composites for strengthening masonry elements,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 128, pp. 100–119.
- [32] M. De Munck *et al.*, (2018)“Influence of environmental loading on the tensile and cracking behaviour of textile reinforced cementitious composites,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 181, pp. 325–334.
- [33] T. Brockmann, (2007)“Mechanical and Fracture Mechanical Properties of Fine Grained Concrete for TRC Structures,” *Adv. Constr. Mater. 2007*, vol. Part II, pp. 119–129.
- [34] Comité Euro-international du Béton and R. Favre, (1985)*CEB Design Manual on Cracking and Deformations*. Lausanne: École polytechnique fédérale de Lausanne.

Article

Control of Cracking in Textile Reinforced Concrete with Unresin Carbon Fibers

Rui Neves * and Diogo Felicíssimo

Barreiro Technology School, Polytechnic Institute of Setúbal, Barreiro, R. Américo Silva Marinho, 2839-001 Lavradio, Portugal; diogo.felicissimo@estudantes.ips.pt

* Correspondence: rui.neves@estbarreiro.ips.pt

Received: 1 July 2020; Accepted: 13 July 2020; Published: 18 July 2020



Abstract: Textile reinforced concrete (TRC) is an emerging construction material with interesting potential concerning sustainability, providing corrosion-free and lightweight solutions. Ordinarily, fiber bundles, impregnated with resin, are used. In this research the performance of reinforcement with unresin fibers is investigated. Control of cracking is considered the key performance factor and is assessed through tensile testing. However, economic and environmental aspects are addressed as well. Then, four different mixes/matrices were considered, without the addition of special/expensive admixtures. TRC ties were subject to direct tension tests, with load and deformation monitoring to assess the influence of mechanical reinforcement ratio on the cracking, failure and toughness of these composites, as well as of the matrix properties on the maximum load. It was observed that at a macro-level TRC behaves like conventional reinforced concrete, concerning crack control. Based on the maximum loads attained at the different composites, it was found that this particular TRC is economically viable. It is suggested that matrix workability may influence the maximum load.

Keywords: TRC; crack control; tensile testing; carbon fiber; concrete; sustainability

1. Introduction

1.1. Background

Reinforced concrete structures have a major role in the construction of buildings and infrastructures. Ordinary concrete is a very versatile material, adaptable to complex geometries, economic and manufacturable on site. However, it has a brittle behavior and limited tensile strength. To overcome these drawbacks, it is often reinforced with steel, which is ductile and has good tensile strength. In conventional reinforced concrete, steel bars are embedded in concrete in strategic positions, to optimize its reinforcing effect. This solution makes the production process more complex, as it is necessary to properly place the reinforcement and brings a significant problem: steel corrosion, which impairs the durability of conventional reinforced concrete elements. To mitigate these problems, several alternatives have been tried.

To diminish the complexity of the production process, long/continuous reinforcing bars may be replaced by short/discontinuous fibers, added to the concrete at the mixing stage, together with the other concrete constituents. This solution is called fiber reinforced concrete. Although it eases the production of concrete and provides some tensile strength, the reinforcement efficiency is limited, as fibers are randomly dispersed in the concrete, while the acting stress fields generally have preferential directions. Thus, to have an equal resisting bending moment in a conventional reinforced concrete beam and in a fiber reinforced concrete beam, a higher reinforcing ratio is required in the latter. Furthermore, the mixing and placing of fiber reinforced concrete with fiber volumes required to achieve current resistant bending moments is impractical. Only special production techniques, like SIFCON [1],

allow structural fiber reinforced concrete elements to be produced. Another handicap of fiber reinforced concrete is that due to the short length of the reinforcements, it is often not possible to mobilize their full strength, because they debond and slip before they yield or break.

To avoid corrosion problems, stainless steel or epoxy-coated steel bars or fiber reinforced polymer (FRP) rods have been used instead of carbon steel rebars [2,3]. The two first alternatives shorten deterioration by corrosion but do not fully eliminate corrosion problems once iron is still present. The latter option is corrosion-free and provides higher strength-to-weight ratios. Nevertheless, under high temperatures, FRP properties are quite impaired [4] and FRP cannot be bent in the field (the same is for epoxy-coated steel bars) [5]. Finally, all these alternatives have a high initial cost [6].

1.2. Textile Reinforced Concrete

Textile reinforced concrete (TRC) is a composite material that consists of conveniently aligned continuous high strength fibers and fine-grained concrete (matrix). Even though the most common designation is TRC, the usual maximum aggregate grading ranges between 1 and 2 mm [7,8]. Then, it is actually textile reinforced mortar (TRM), a designation that is also found in the literature. As fibers are usually arranged as woven or knitted fabrics, designations like fabric reinforced cement composites (FRCC) and fabric reinforced cementitious matrix (FRCM) can also be found.

Research on the reinforcement of cement-based matrices with long/continuous fibers started on the 1960s [9]. Scheerer et al. [10] mention that the first patents for this new building material were issued in the 1980s. At the beginning of the 21st century, two research centers were established in Germany, with the purpose of carrying out research and development on TRC [11].

Within the major features of TRC are the absence of corrosion problems and the ability to adapt to complex shapes, due to reinforcement flexibility [12]. The fact of being corrosion-free allows volume cutbacks, as the reinforcement cover is ruled by bond requirements instead of requirements for the protection of reinforcement against the action of corrosive agents. The spared volume is considerable in elements where the cross-section thickness is constrained just by cover requirements, as is the case for lightly-loaded and non-load-bearing elements. Savings up to 75% have been claimed by Curbach et al. [13]. Laiblová et al. [14], in a comparison between TRC and conventional reinforced concrete, through Life Cycle Assessment, have considered a volume reduction of 70%. They defend the idea that TRC has potential for use in sustainable construction, as well as the claim that, besides reducing production costs, TRC also brings savings in transportation costs as the elements are lighter.

TRC has been applied in the production of façades, roofing and wall panels [11,15,16], parapets [17], balcony slabs [10] and permanent formworks [12]. Still within the frame of non-load-bearing and lightly-loaded elements, it is also believed that TRC is suitable for the production of fencing elements. Bold applications of TRC also exist: the Döllnitz Creek Bridge [18], the Lautlingen Bridge [19], the Bridge over the Rotach River [20] and a set of four roof shells with 3.5 m cantilever spans at the campus of RWTH Aachen University [21]. The most popular application of TRC is the retrofitting of existing structural elements [22–24], which encompasses slightly different concepts from the previous examples and therefore is considered outside of the scope of the present research.

1.3. Aims and Scope

Commonly, reinforcement in TRC is provided by prepreg fibers. This means that the fibers are pre-impregnated with a resin. With this, a group effect is generated within a bundle of filaments and higher strengths are attained. The strength of an unresin bundle ranges between 10 and 25% of a single filament strength [25,26]. This happens because there is no uniform state of stress within the bundle. Some fibers are slack while others may be already tensioned [25,27,28]. Further, some filaments may be misaligned, and others twisted [27]. Therefore, it is not possible that the response of a bundle with n filaments is n times the response of a filament. If the bundle is impregnated with resin, its strength varies from 35 to 60% of the strength of a single filament [7], depending on the weight content of resin in the prepreg [29]. Besides the strength increase, in relation to unresin fibers, fiber impregnation makes

the reinforcement placing (in regular elements, e.g., walls) easier, due to the increase in transverse stiffness, and it is also claimed to improve the bond with the cementitious matrix [24,30,31].

However, unresin carbon fibers have some advantages over impregnated fibers, such as being less costly, lighter, less susceptible to high temperatures and easier to adapt to complex geometries. Moreover, the use of resins raises eco- and human toxicity concerns. Studies have proven that Bisphenol A, used in the production of resins, even in low doses, causes alteration in brain chemistry and the immune system, among others, in several animal species [32].

At the beginning of the 2000s, there was some investigation of concrete reinforcement with unresin continuous carbon fibers [25,28,33–35], which has since been discontinued. One may speculate that this was due to the results not being very promising. Still speculating, such discouraging results may be linked to the fact that the research was oriented to the application of unresin carbon fibers in heavy-loaded elements. At this point, it shall be emphasized that the existing TRC bridges are footbridges.

One key for sustainability is the optimization of civil engineering materials. This optimization must be fostered through application and design.

Concerning application, different materials can be considered for one construction. The advantages and disadvantages of each solution will be weighed, to ensure the most appropriate choice. Lightly-loaded or non-load-bearing elements, where element thickness is ruled by minimum reinforcement cover requirements (if reinforcement is provided by steel bars), is where the replacement of conventional reinforced concrete by TRC brings more benefits. Further, these elements are generally precast. One of limitations of TRC is that its production on site is not recommended [36]. Therefore, this type of application is the optimal cluster for TRC.

In the context of fiber reinforced concrete design, a common parameter is the critical fiber volume. This parameter, the amount of fiber per unit volume required to resist the cracking load, is also considered for TRC. According to Hartig et al. [37], if the fiber volume is 30% more than the critical, it is ensured that the tensile stress-strain curve is trilinear. This type of load-bearing behavior is the prevailing one among the results found in the literature. Thus, this means that the tested TRC has, at least, 30% more reinforcement volume than the minimum required for control of cracking. The ruling criterion for the design of lightly-loaded or non-load-bearing elements is that the existence of a minimum reinforcement ratio is required, just to ensure the physical integrity and the functionality of the element, as well as the avoidance of unsightly appearance, through control of cracking. If TRC is to be used in such elements, then its minimum reinforcement ratio should be investigated.

Still fostering sustainability, the current design will also seek materials inherently nontoxic to biological systems and for the reduction of waste.

Therefore, the aim of this investigation is to resume the research on TRC with unresin fibers, instead of prepreg fibers, which are hazardous to health and more difficult to recycle. Contrary to what has been found in the literature, the main focus is set on the minimum reinforcement ratio for control of cracking, as it is the ruling design criterion for the excellence cluster of TRC applications. Still aiming at the optimization of benefit vs. cost, and also in opposition to what has been found in the literature, the addition of special admixtures to the matrix and even microfibers, which have been proven to enhance TRC performance [8,21,38–41] but also contribute to increasing the initial cost per unit volume of TRC, will be avoided in this research.

Developing suitable TRC with unresin fibers is expected to bring economic, environmental and health benefits. This suitability will be evaluated through the tensile behavior of the tested composites. An original system to transfer the load from the testing machine to the specimens is essayed.

Although it is claimed that TRC may be more economical than conventional reinforced concrete, a literature review did not reveal any explicit cost analysis. Therefore, the experimental assessment of the tensile behavior is followed by an analysis of economic and environmental costs.

2. Materials and Methods

Hereunder, the most relevant characteristics of the materials used in this research are presented. Information is also provided about specimen manufacturing and testing.

2.1. Materials

2.1.1. Matrix (Concrete/Mortar)

Cementitious matrices composed of cement, sand, water and superplasticizer were designed. The cement type was CEM I, ordinary portland cement, of the strength class 42.5R, conforming to EN 197-1 [42], with a specific gravity of 3.14 g/cm³. Fine and coarse natural siliceous sands with a specific gravity of 2.63 g/cm³ were used. Figure 1 depicts the particle size distribution of both sands. To prevent scale effects, the maximum aggregate size, 4 mm, was less than 1/3 of the least dimension of the specimens. The larger than usual grain size also allows matrix shrinkage to be limited [15].

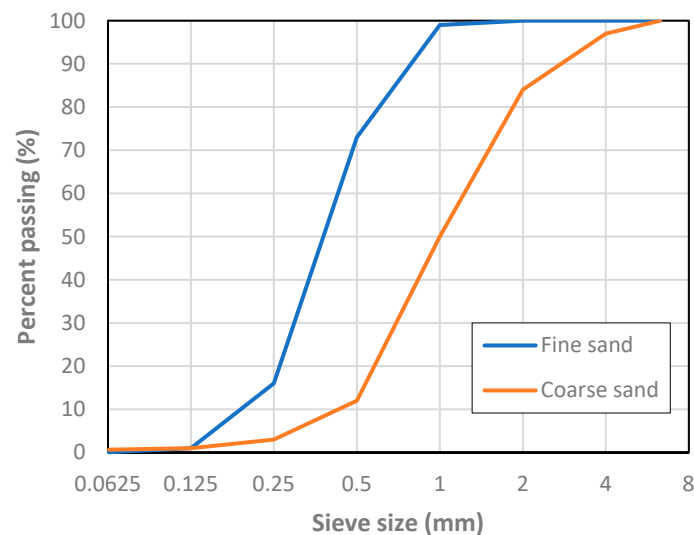


Figure 1. Aggregate particle size distribution.

The criterion to define the different mixes was to obtain an increasing matrix strength (from A60 to A35). In this way, decreasing mechanical reinforcement ratios were achieved, keeping the tensile specimen dimensions constant and the amount of reinforcement as well (see Section 2.2). The proportions of the mix constituents are reported in Table 1. A superplasticizer was used in the two mixes with the lower water-cement ratios.

Table 1. Mix proportions (wt./wt.).

Mix	Cement:Fine Sand:Coarse Sand:Water
A35 ¹	1:0.4:2.1:0.35
A40 ²	1:0.4:2.1:0.41
A50	1:0.4:2.1:0.50
A60	1:0.5:2.5:0.60

¹ 12 mL of superplasticizer per kg of cement; ² 8 mL of superplasticizer per kg of cement.

2.1.2. Reinforcement (Carbon Fiber)

To reinforce the matrix, carbon fibers (Fisipe, Lavradio, Portugal) were used. These fibers were produced from oxidation and carbonization of polyacrylonitrile (PVA) fibers, supplied in a bundle with linear mass of 3300 tex, containing 50k filaments with a 7 µm diameter. According to the producer

information, these fibers have a specific gravity of 1.81 g/cm^3 , elasticity modulus of 240 GPa and tensile strength and elongation at break of 4 GPa and 1.7% , respectively.

The received fiber was subject to direct tension tests, carried out on bundle sections. To prevent shear rupture of the fiber, steel wool bits were placed between the bundle and grips [43]. A displacement ratio of 0.5 mm/min was applied [44]. From the tests, a characteristic value of 1.94 kN for ultimate load was obtained. An average stress may be calculated dividing this load by the area of the bundle cross-section (A_f). Following Colombo et al. [45], that area can be obtained from the bundle linear mass (m_l) and fiber specific gravity (γ_f) through

$$A_f [\text{mm}^2] = \frac{m_l [\text{tex}]}{1000 \times \gamma_f \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right]} \quad (1)$$

From this, a value of 1.83 mm^2 for A_f is found, and a corresponding tensile stress of 1.06 GPa is computed. Therefore, the bundle efficiency is 0.25 .

2.2. Preparation of Specimens

For each mix, three prisms of $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ were cast in steel molds, compacted by means of a vibrating table. After demolding (at 24 h) these specimens were kept in water at $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Further, four $15 \times 35 \times 500 \text{ mm}^3$ ties were cast for uniaxial tensile testing. The dimensions of the ties are within the range found in the literature [37,45–51]. The thickness is more than three times the maximum aggregate size, to avoid scale effects. The width-to-length ratio of the ties ensures the development of stabilized cracking, if the reinforcement ratio accomplishes the minimum required for control of cracking and makes the Poisson effect quite limited [47]. Based on the approach followed by Jaccoud [52], at both tops threaded rods with 5 mm diameter were embedded in the specimen to a length of 100 mm (Figure 2). The rod diameter and embedded length were designed to ensure a proper load transfer from the universal machine clamps to the specimens.

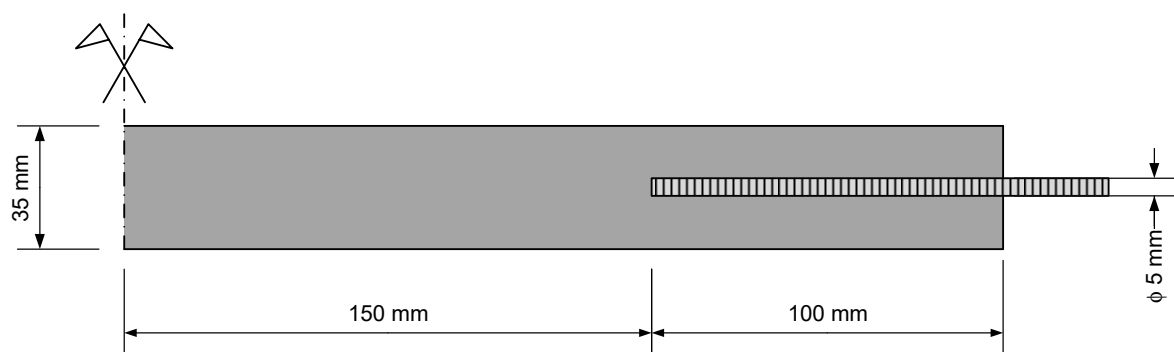


Figure 2. Sketch of the ties.

Three of the four ties were reinforced with unresin carbon fiber, at a fiber content of 0.35% (vol./vol.), provided by a single bundle, from top to top, thus overlapping with the rods. The required anchorage length of the fiber bundle was assessed through preliminary pull-out tests. The manufacturing process was the hand-lay-up or laminating [40,41,45], i.e., the matrix was poured into the molds up to the intended position of the reinforcement layer, then the reinforcement was placed, and afterwards another layer of matrix was poured until the matrix started to flow out of the molds. After pouring each matrix layer, the specimens were compacted using a vibrating table. Finally, the casting surface was finished using troweling, eliminating the surplus of matrix all over, so that the thickness of the ties is homogeneous.

Due to the slenderness of the ties, to avoid accidental microcracking at formwork removal, these specimens were demolded only 48 hours after casting. Then, the ties were kept in water at $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

2.3. Test Methods

In the following, the procedures to characterize matrix workability and strength and to assess tensile behavior of TRC are described.

2.3.1. Workability

The workability of the fresh mixes was measured according to ASTM C1437-13 [53]. The spread of a truncated cone of mortar in a flow table subject to jolting was measured in two orthogonal directions. Due to mortar fluidity, the number of strokes was limited to ten, so that the spread did not overflow the table.

2.3.2. Matrix Strength

The compressive, flexural and tensile strength of the cementitious mixes was evaluated.

Flexural strength was assessed through testing of three prisms of $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ per mix at an age of 28 days, following EN 196-1 [54]. The specimens were subject to three-point bending, applying a load rate of 50 N/s at mid-span. Afterwards, the resulting six half-prisms were subject to compression tests, at a load rate of 2400 N/s, following the same standard. Both tests were run on a Matest cement compression flexural testing machine (Matest, Treviolo, Italy), equipped with a load cell with a maximum capacity of 250 kN for compression testing and with a load cell with a maximum capacity of 15 kN for flexure testing.

The tensile strength was evaluated through a direct tension test on unreinforced ties, whose details are described next (Section 2.3.3).

2.3.3. Direct Tension

Direct tensile testing is arduous and therefore not very common [55–57]. Although there are reference guidelines for tensile testing of TRC [58], there is no standard. There are several techniques to apply the tension load to the specimen and to prevent secondary effects like bending and shear [30,58,59]. In the present research, 3D hinges were introduced between the threaded rod and the testing machine clamps. These 3D hinges were materialized by means of assembling two bidimensional hinges in orthogonal planes (Figure 3).

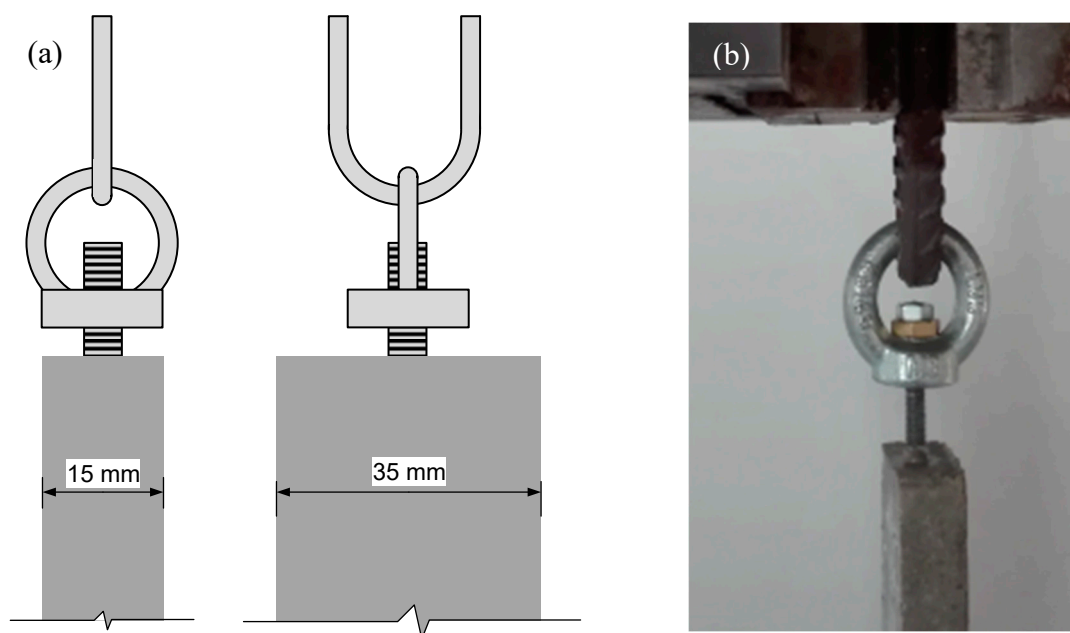


Figure 3. Sketch (a) and view (b) of the specimen-clamps connection.

Tests were conducted using a screw-driven universal test frame Instron 5900-R (Instron, Norwood, MA, USA), equipped with a 10 kN load cell capacity (class 0.5). The tension load was applied under displacement control at a rate of 0.5 mm/min, common within this type of testing [33,40,50]. To improve the accuracy of the axial deformation measurement, a clip-on extensometer Instron 2630-112 (Instron, Norwood, MA, USA) with a gauge length of 50 mm and a travel range between -2.5 and $+25$ mm was used. The accuracy (0.5%) is relative to the gauge length. Thus, an accuracy of ± 25 μm is ensured. The measuring length was 300 mm, to encompass any crack formed during the test. Given the difference between the gauge length and the measuring length, the extensometer was clipped over plastic sheets, which were anchored to the specimen at the limits of the measuring length, as depicted in Figure 4.

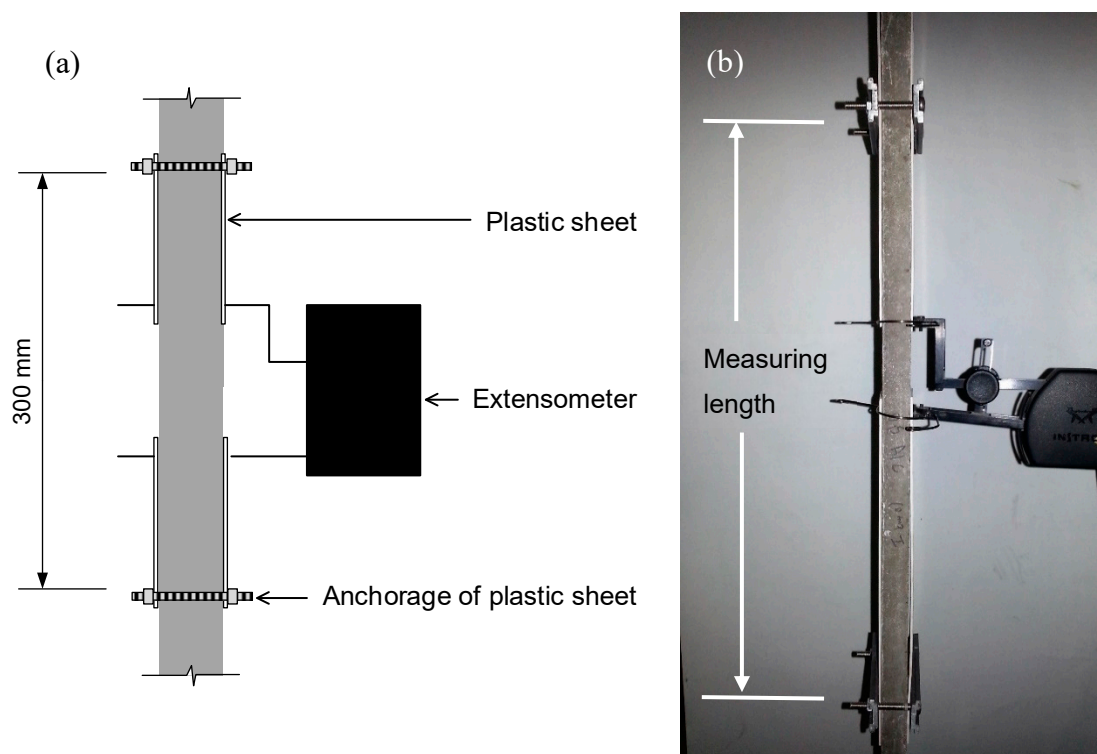


Figure 4. Sketch (a) and view (b) of the deformation measurement setup.

All direct tension tests were carried out when the specimens were 28 days old.

3. Results

In this section, the results obtained in the different experiments are reported. Those related with the matrix properties are briefly discussed here, while tensile behavior is the object of a detailed discussion in 4.1.

3.1. Matrix Properties

Figure 5 shows the average spread diameter of each mix. Considering two groups of mixes, one for mixes with superplasticizer (A35, A40) and the other from mixes without superplasticizer (A50, A60), in each group the workability increases with the water-cement ratio as expected.

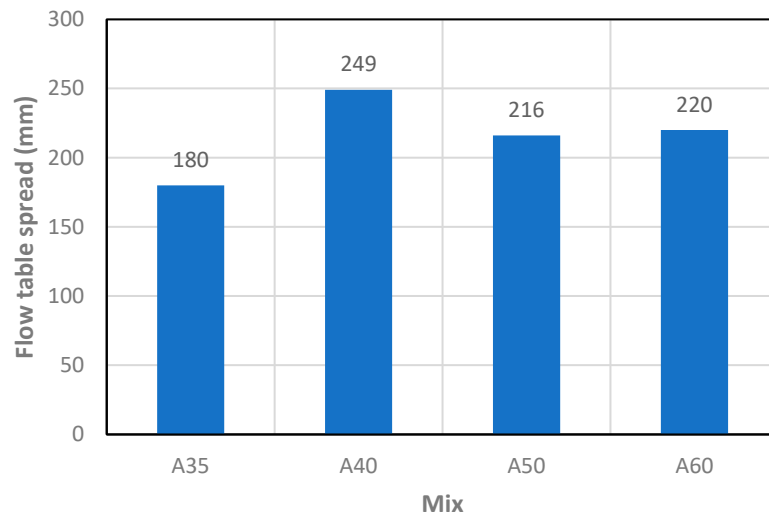


Figure 5. Matrix workability obtained from flow table test.

The strength results are summarized in Table 2. There are consistent increases in strength with the reduction of the water-cement ratio. Further, in Figures 6 and 7, the relationship between the tensile strength and the flexural and compressive strengths are shown, respectively.

Table 2. Matrix strength (MPa).

Mix	Compressive Strength	Flexural Strength	Tensile Strength
A35	67.3	11.4	5.4
A40	46.8	8.5	4.0
A50	34.4	7.7	2.8
A60	30.1	6.8	2.5

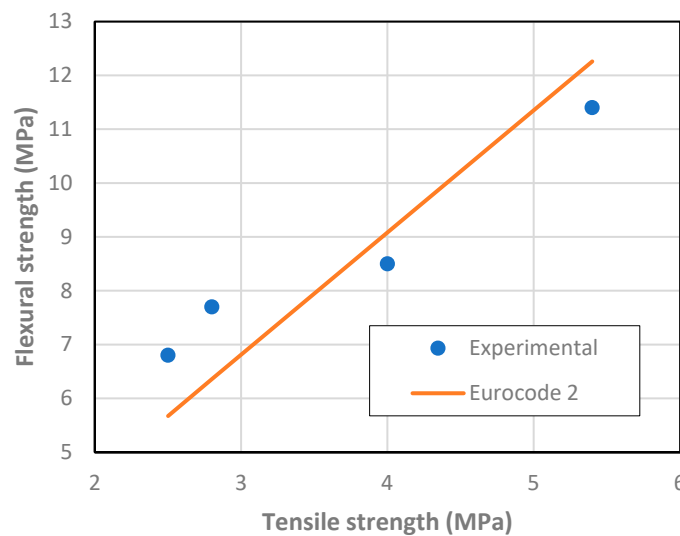


Figure 6. Relationship between matrix tensile and flexural strength.

A good agreement is found with existing relationships in reference documents [60,61]. From Figure 7 it can be roughly estimated that tensile strength corresponds to 8% of the compressive strength.

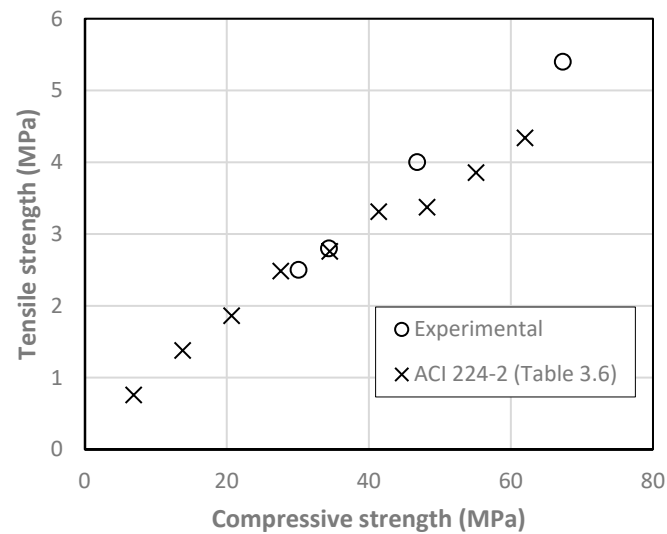


Figure 7. Relationship between matrix compressive and tensile strength.

3.2. Tensile Behavior of TRC

According to De Santis et al. [36], the most important parameters from TRC tensile testing are the stress at first crack (σ_{cr}), the crack spacing (S_{rm}), the ultimate load (F_u) and the corresponding deformation (ε_u). These values are presented in Table 3 and are taken from the load-deformation curves (Figure 8) and from the cracking pattern of the ties after testing (Figure 9). It must be mentioned that in one or two ties from each mix, crack localization occurred, near the limit of the measuring length. This type of failure also occurred in the experimental investigation of Carozzi et al. [62] and here is attributed to a difference between the estimated and the required anchorage length. As reported in 2.2, the design of the anchorage length was based on pull-out tests. However, the thickness of the pull-out specimens was higher than the thickness of the ties. It is judged that the higher thickness of the former caused some confinement at the developing microcracks on the reinforcement-matrix interface. That did not happen on the thinner ties, allowing the microcracks to develop more easily and limiting the bond strength between the reinforcement and the matrix. Nevertheless, the ties where there was no crack localization (before saturation crack spacing) had quite similar behavior if composed of the same matrix. Figure 8 depicts data from one tie for each matrix and Figure 9 the view of that tie after testing.

Table 3. Results from direct tension test on textile reinforced concrete (TRC).

Matrix	σ_{cr} (MPa)	F_u (N)	ε_u (‰)	S_{rm} (mm)
A35	6.5	3406	0.17	-
A40	4.1	3128	7.2	14
A50	3.2	3016	6.8	50
A60	3.4	3189	8.0	13

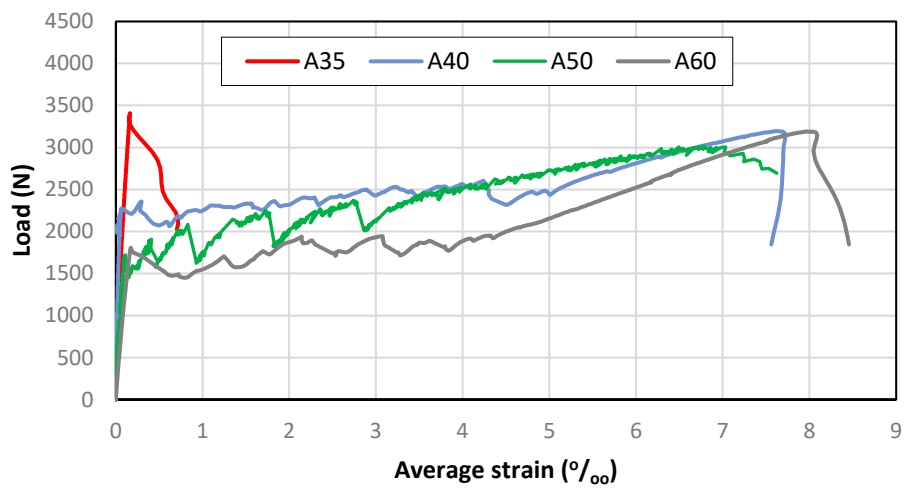


Figure 8. Load-deformation curves of TRC ties.

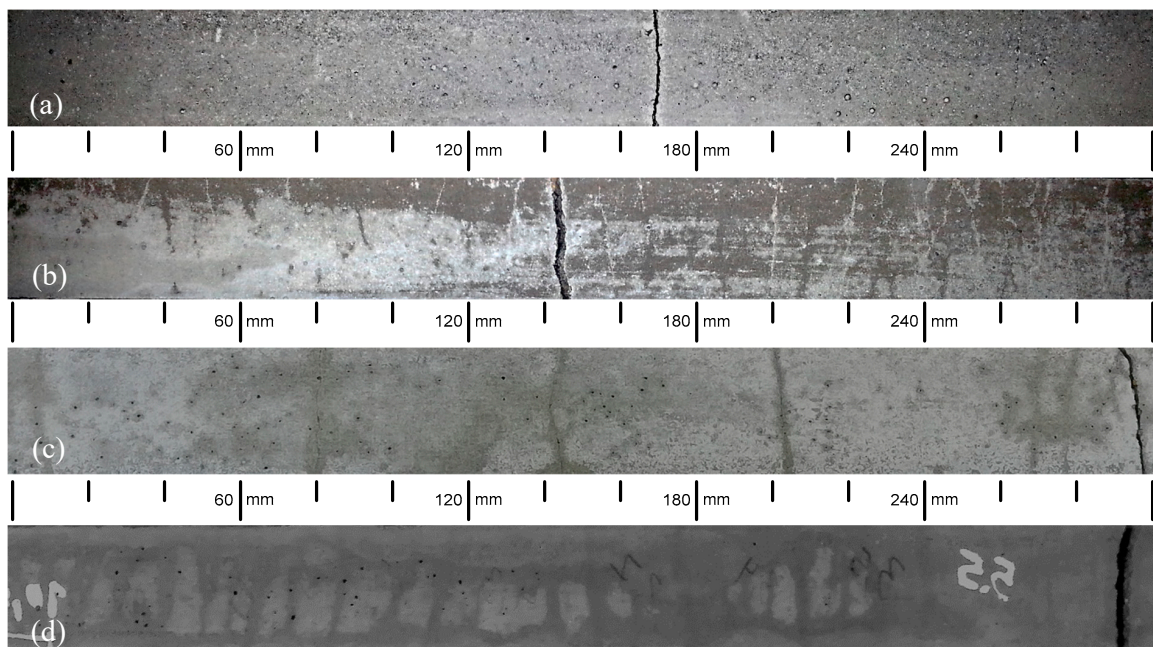


Figure 9. View of the ties after tensile testing: (a) A35, (b) A50, (c) A40, (d) A60.

The energy absorption capacity and ductility are also important in several TRC applications. Therefore, strain energy and ductility are evaluated. Strain energy (U) is computed as the integral of the load-elongation product until 70% of the ultimate load at the softening branch. Ductility is quantified through the ratio between the average strain at the ultimate load and the strain at cracking. The results of these two parameters are presented in Table 4.

Table 4. Strain energy and ductility.

Matrix	U (J)	Ductility (-)
A35	677	1
A40	7765	83
A50	5533	68
A60	7945	50

4. Discussion

4.1. Tensile Behavior

The cracking load of the different TRC varied generally according to the matrix strength. As expected, this parameter was controlled by the lowest ultimate strain of the composite constituents, which was the matrices' ultimate strain. However, the lowest cracking load was observed in A50. This is attributed to a presumable defect in the tie, as the response after cracking was hardening and the second crack appeared at a load already superior to that of A60 cracking load.

Concerning the ultimate load, the highest value was for A35, while A40 and A60 composites had quite similar ultimate loads. The ultimate load of A50 was a bit lower but still comparable with those of A40 and A60. The difference between these two groups lies in the controlling factor of the ultimate load. For A35 it was matrix strength, whereas for the others it was reinforcement load-bearing capacity. In A40, A50 and A60, after cracking, the fibers were able to withstand the imposed strain without a significant loss of load-bearing capacity, transferring stress to the matrix that caused further cracking. In contrast, in A35, the cracking load was too high to be sustained by the fiber bundle alone at the cracked section, causing the composite to fail without further cracking. Furthermore, in A35 a single crack was formed, while in the others there were multiple cracks.

Observing the ultimate loads of A40, A50 and A60 composites, it is estimated that the fiber bundle can sustain a load of around 3 kN when embedded in cementitious matrices. The ultimate load of A50 being lower than those of A40 and A60 is attributed to a poorer fiber-matrix bond. It is judged that the inferior bonding is caused by a lower fluidity of the matrix that has less penetrated the fiber bundle. The mix A50 was the one with the lowest water-cement ratio of those without superplasticizer. Nevertheless, a similar value is found for the fiber bundle in A35. At cracking of A35, the load transferred to the bundle (3.4 kN) was higher than its load-bearing capacity, which led to the immediate failure, without further cracking.

In A40, A50 and A60, cracks were formed successively until crack saturation was attained. Afterwards, there was strain hardening and the deformation became concentrated in one of the already existing cracks, as can be observed in Figure 9, where there is a wider crack in every specimen. This crack localization is common in TRC [33,62] and may be attributed to the unevenness of reinforcement efficiency at the different cracks, causing a larger deformation in the crack where the stiffness/reinforcement efficiency is lower. These three composites exhibited a load-deformation behavior that fits high modulus/medium bond reinforcement TRC [7]. Still within the frame of cracking pattern, it is noticed that crack development comprised regular cracks and microcracks, some of them could only be visually detected for a short timeframe during the drying phase after wetting the specimens. This microcracking is usual in TRC subjected to tension and corresponds to the minor load drops in multiple crack formation phase present in Figure 8. The bundle is not fully penetrated by the fresh matrix due to filtering effects caused by the narrow spacing between filaments [37], and therefore, some filaments are not in contact with the matrix throughout and are poorly bonded to the matrix at some parts. Furthermore, the number of filaments poorly or not bonded to the matrix may also vary from section to section. The degree of bonding is not therefore homogeneous along the ties' length. Thus, it will be natural for cracks to form with different widths. The strain hardening increased with the mechanic reinforcement ratio, as suggested in [37].

Similar crack spacing was observed in A60 and A40, while A50 showed a smaller number of cracks, thus a wider spacing. This is attributed to the already discussed weaker fiber-matrix bond, which requires longer lengths to transfer the load carried by the fiber at cracks to the matrix. Crack spacings in TRC like those obtained in this research have already been reported [37,49,63].

Regarding average strain at peak load, similar values are present in A60 and A40, while for A50 the value is a bit smaller (in agreement with the ultimate load variation). Obviously, the strain at peak load for A35 is a lot smaller because it corresponds to matrix strain at maximum tensile stress.

Therefore, there is a significant difference between the tensile behavior of A35 and the other tested solutions, regarding ductility. This is evidenced by the large differences in strain energy and in the ratio considered to quantify ductility between A35 and the other TRC composites.

All TRC composites failed by fiber pull-out. After the peak-load there was a stiffness drop that triggered automatic stop of the test. Although the crack localization caused local strains that were higher than the fiber ultimate strain, the ties were still not in separated pieces. This happens because when the reinforcement is provided by fiber bundles, the state of strain is not the same at all filaments. There is a strain lag [64] and further a telescopic pull-out behavior [45]. The outer filaments are more in contact with the matrix than the inner ones. The latter tend to slip, transferring strength only by friction. This makes it possible that a composite constituted by two fragile materials can present a ductile behavior. Furthermore, it is noticed that the load-bearing capacity of the considered fiber bundle is increased by around 50% when embedded in the matrix as compared with the bare bundle. This is attributed to the fact that the strain lag is less when the fibers are embedded in other material, thus resulting in more filaments resisting the load simultaneously.

Comparing the tensile behavior of TRC with that of conventional reinforced concrete, there are similarities and differences. In both, there is a mechanic reinforcement ratio threshold that enables control of cracking. The amount of reinforcement should be capable of withstanding the energy that is released when the matrix cracks. In this research, the mechanical reinforcement ratio of A35 is under that threshold, while that for A40, A50 and A60 is above.

The smaller reinforcement diameter of TRC, accompanied by a group effect (narrower reinforcement spacing), does not allow the application of the existing analytical models for the simulation of crack behavior of conventional reinforced concrete to TRC. Furthermore, the group effect also causes heterogeneity concerning the fiber involvement by the matrix. This is a complex issue, as the fresh state matrix properties also play an important role in the ease with which it can surround fibers. Moreover, the number of filaments in a bundle also influences the ease by which the matrix penetrates the bundle [65]. Nevertheless, the decrease of crack spacing with the reinforcement (fiber in TRC) diameter is still valid [60]. Likewise, the condition of avoiding brittle behavior at cracking, through ensuring a minimum amount of reinforcement for which load at first cracking is not higher than the reinforcement ultimate load, is applicable to TRC and will be used next.

4.2. Economic and CO₂ Emission Analysis

The economic analysis will not be linked to any particular currency, as it will be based on relative costs. Let us consider steel as the reference material concerning cost. Following Meredith et al. [66], the ratio between carbon fiber and steel cost (wt./wt.) is 22. According to Ohta et al. [25], the cost of impregnated fiber is five times higher than the cost of unresin fibers. Based on the cost data from Alreshaid et al. [67], the cost ratio between concrete and steel is 0.09 (wt./wt.). Once structural design is based on geometric quantities, the cost ratios of carbon fiber-steel and concrete-steel will be converted to (vol./vol.), considering densities of 1.81, 2.32 and 7.85 for carbon fiber, concrete and steel, respectively. The information is summarized in Table 5.

Table 5. Materials relative cost per unit volume.

Material	Relative Cost
Steel	1
Concrete	0.23
Unresin Carbon Fiber	5
Impregnated Carbon Fiber	25

For the mechanical properties, it is assumed that concrete has a tensile strength $f_{ct} = 3$ MPa and that the yield stress of steel is 500 MPa. Based on the present experimental work, it will be fair to assume an ultimate load $F_u = 3$ kN for a bundle of unresin carbon fibers totaling 1.83 mm² of fiber cross-section

embedded in the cementitious matrix. Based on the results from Donnini et al. [30], a ratio of 1.7 between the tensile strength of embedded unresin and impregnated carbon fibers is roughly estimated.

The structural element is assumed to be lightly-loaded and its thickness is ruled by durability constraints, for conventional reinforced concrete, and ruled by bond requirements in TRC. Then, as in [14], thicknesses of 60 mm and 18 mm are considered for the conventional reinforced concrete and for the TRC solutions, respectively. For the sake of simplicity, the remaining dimensions of the element (width and length) are 1 m.

To ensure control of cracking, the reinforcement must be capable of bearing the force that is transferred when a crack opens in the matrix. Therefore, for the conventional reinforced concrete, a concrete cross-section, $A_{c,CRC}$, requires a steel area $A_s = (3/500) \times A_{c,CRC}$. As for this solution, $A_{c,CRC} = 0.06 \text{ m}^2$, then $A_s = 35 \times 10^{-5} \text{ m}^2$.

Following the same principle for TRC, a concrete cross-section, $A_{c,TRC}$, requires a number of unresin carbon fiber bundles $N_{UCF} = (f_{ct} \times A_{c,TRC})/F_u = (3 \times 10^3 \times A_{c,TRC})/3$. As for this solution $A_{c,TRC} = 0.018 \text{ m}^2$, then $N_{UCF} = 18$, which corresponds to an area of 32.94 mm^2 . Considering the previously estimated efficiency of impregnated carbon fiber, still for the TRC solution the required reinforcement area with impregnated fibers is calculated through $A_{ICF} = A_{UCF}/1.7$, which returns $A_{ICF} = 19.38 \text{ mm}^2$. The quantities and solution costs of the materials are presented in Table 6.

Table 6. Cost analysis.

Solution	CRC ¹		TRC w/UCF ¹		TRC w/ICF ¹	
Material	Quantity (m ³)	Cost	Quantity (m ³)	Cost	Quantity (m ³)	Cost
Steel	35×10^{-5}	35×10^{-5}				
Concrete	0.060	1.38×10^{-2}	0.018	4.14×10^{-3}	0.018	4.14×10^{-3}
Carbon Fiber			32.94×10^{-6}	16.47×10^{-5}		
Impregnated Carbon Fiber					18.38×10^{-6}	45.95×10^{-5}
Total Cost		14.15×10^{-3}		4.30×10^{-3}		4.60×10^{-3}

¹ CRC: conventional reinforced concrete; UCF: unresin carbon fibers; ICF: impregnated carbon fibers.

The results in Table 6 indicate that TRC with unresin carbon fibers is the most competitive solution in terms of cost, with savings of 70% in relation to conventional reinforced concrete and of 7% when compared to TRC with impregnated carbon fibers.

Regarding CO₂ emissions, the ratios presented in Table 7 are based on information collated from the literature [68,69]. Then, the quantities in Table 6 are converted from m³ to kg, using the previous densities. Within this frame, a 45% content (wt./wt.) of resin in the impregnated carbon fibers is assumed. Finally, total CO₂ emissions for each solution are computed and presented in Table 8.

TRC with unresin fibers reduces CO₂ emissions by 70% when compared with conventional reinforced concrete. However, the solution with the lowest CO₂ emissions is TRC with impregnated fibers, which has 10% less emissions than TRC with unresin fibers. Nevertheless, the use of resin encompasses additional environmental issues, as stated in 1.3, whose quantification falls outside of the scope of the present research.

Table 7. CO₂ emission ratios (wt./wt.).

Material	CO ₂ Emission Ratio
Steel	1.91
Concrete	0.1
Carbon Fiber	28.7
Impregnation Resin	5.7

Table 8. Comparative analysis of CO₂ emissions (kg).

Solution	CRC ¹		TRC w/UCF ¹		TRC w/ICF ¹	
Material	Quantity (kg)	CO ₂ Emission	Quantity (kg)	CO ₂ Emission	Quantity (kg)	CO ₂ Emission
Steel	2.75	5.25				
Concrete	139.2	13.92	41.8	4.18	41.8	4.18
Carbon Fiber			0.060	1.72	0.033	0.95
Impregnation Resin					0.027	0.15
Total CO₂ emission		19.17		5.90		5.28

¹ CRC: conventional reinforced concrete; UCF: unresin carbon fibers; ICF: impregnated carbon fibers.

5. Conclusions

A brief retrospective of concrete reinforcement was provided. Textile reinforced concrete was identified as a solution that meets sustainability criteria. Precast lightly-loaded or non-load-bearing elements, whose thickness, in the case when they are made of conventional reinforced concrete, is ruled by durability concerns, have been identified as a cluster of excellence for the application of textile reinforced concrete. The potential hazardousness of the resin used in the impregnation of the fibers commonly applied in textile reinforced concrete was recalled.

The performance of TRC with unresin carbon fibers, concerning control of cracking was assessed through tensile testing. It was found that control of cracking is possible, using unresin carbon fibers, if the load bearing capacity of embedded reinforcement is not less than the cracking load. The tensile behavior of the tested composites was similar to other TRC found in the literature.

A novel system to transfer the load from the testing machine to the specimens was introduced and has proven effective.

The economic and environmental analysis demonstrated a similar performance of TRC with prepreg and with unresin fibers, and both clearly outperformed conventional reinforced concrete. However, TRC with unresin fibers is considered preferable, due to the benefits concerning health, ease of recycling and resistance to deterioration under high temperatures.

The subpar performance of A50 must have been due to less fiber involvement by the matrix. This will be further investigated through a dedicated experimental program encompassing matrices with different workability and cross-section observation using microscopy. Anyway, unlike in conventional reinforced concrete, it is recommended that the mechanical performance of each TRC solution (fiber-matrix combination) should be experimentally evaluated. Such assessment must provide the reinforcement bearing capacity when embedded in the matrix, a fundamental parameter for control of cracking, as addressed in the present research, but also for other design criteria, e.g., the bending ultimate limit state.

Author Contributions: Conceptualization, R.N. and D.F.; methodology, R.N.; validation, R.N. and D.F.; formal analysis, R.N.; investigation, R.N. and D.F.; data curation, D.F.; writing—original draft preparation, R.N.; writing—review and editing, R.N. and D.F.; supervision, R.N. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding.

Acknowledgments: The authors acknowledge Alexandre Gamito's commitment and useful participation in the design and manufacture of the direct tension test accessories, as well as in the specimen production. The support for the tensile testing provided by LNEC's Organic Materials Unit is also acknowledged. The authors are grateful to Fisipe, S.A. for supplying the carbon fiber.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Lankard, D.R. Slurry Infiltrated Fiber Concrete (SIFCON): Properties and Applications. *Mrs Proc.* **1984**, *42*, 277. [[CrossRef](#)]

2. Cramer, S.; Covino, B.; Bullard, S.; Holcomb, G.; Russell, J.; Nelson, F.; Laylor, H.; Soltesz, S. Corrosion prevention and remediation strategies for reinforced concrete coastal bridges. *Cem. Concr. Compos.* **2002**, *24*, 101–117. [[CrossRef](#)]
3. Shrive, P.L.; Brown, T.G.; Newhook, J.P.; Kroman, J.; Tadros, G.S.; Shrive, N.G. Initial performance of the lower deck of the Centre Street Bridge, Calgary. *Can. J. Civ. Eng.* **2009**, *36*, 50–62. [[CrossRef](#)]
4. Kodur, V.K.R.; Bhatt, P.P.; Naser, M.Z. High temperature properties of fiber reinforced polymers and fire insulation for fire resistance modeling of strengthened concrete structures. *Compos. Part B Eng.* **2019**, *175*, 107104. [[CrossRef](#)]
5. Mermigas, K.K. Evolution of Bridge Practices in Ontario, Canada. In Proceedings of the TAC 2018: Innovation and Technology: Evolving Transportation-2018 Conference and Exhibition of the Transportation Association of Canada, Saskatoon, SK, Canada, 25 October 2018.
6. Younis, A.; Ebead, U.; Suraneni, P.; Nanni, A. Cost effectiveness of reinforcement alternatives for a concrete water chlorination tank. *J. Build. Eng.* **2020**, *27*, 100992. [[CrossRef](#)]
7. Peled, A.; Mobasher, B.; Bentur, A. *Textile Reinforced Concrete*; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2017; ISBN 9781482282481.
8. Mechtcherine, V.; Schneider, K.; Brameshuber, W. Mineral-based matrices for textile-reinforced concrete. In *Textile Fibre Composites in Civil Engineering*; Triantafillou, T.C., Ed.; Woodhead Publishing: Cambridge, UK, 2016; pp. 25–43.
9. Ohno, S.; Hannamant, D.J. Modeling the Stress-Strain Response of Continuous Fiber Reinforced Cement Composites. *Aci Mater. J.* **1994**, *9*, 306–312.
10. Scheerer, S.; Schladitz, F.; Curbach, M. Textile reinforced concrete – From the idea to a high-performance material. In Proceedings of the FERRO-11—11th International Symposium on Ferrocement and 3rd ICTRC—International Conference on Textile Reinforced Concrete, Aachen, Germany, 7–10 June 2015; Brameshuber, W., Ed.; RILEM Publications SARL: Bagneux, France, 2015; pp. 15–34.
11. Hegger, J.; Will, N.; Rüberg, K. *Advances in Construction Materials*; Springer Science & Business Media: Berlin, Germany, 2007; pp. 147–156.
12. Papanicolaou, C.G.; Papantoniou, I.C. Mechanical Behavior of Textile Reinforced Concrete (TRC)/Concrete Composite Elements. *J. Adv. Concr. Technol.* **2010**, *8*, 35–47. [[CrossRef](#)]
13. Curbach, M.; Ortlepp, S.; Offermann, P.; Engler, T.; Brückner, A.; Kratz, M. Development of a large-sized, thin-walled, textile reinforced façade panel. *Concr. Reinf. Concr.* **2003**, *98*, 345–350.
14. Laiblová, L.; Pešta, J.; Kumar, A.; Hájek, P.; Fiala, C.; Vlach, T.; Kočí, V. Environmental Impact of Textile Reinforced Concrete Facades Compared to Conventional Solutions—LCA Case Study. *Materials (Basel)* **2019**, *12*, 3194. [[CrossRef](#)]
15. Shams, A.; Horstmann, M.; Hegger, J. Experimental investigations on Textile-Reinforced Concrete (TRC) sandwich sections. *Compos. Struct.* **2014**, *118*, 643–653. [[CrossRef](#)]
16. Hegger, J.; Zell, M.; Horstmann, M. Textile reinforced concrete—realization in applications. In Proceedings of the International Fib Symposium Tailor Made Concrete Structures: New Solutions for Our Society, Amsterdam, The Netherlands, 19–21 May 2008; Walraven, J., Stoelhorst, D., Eds.; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2008; pp. 357–362.
17. Arockiasamy, M.; Jones, J.; Reddy, D.V.; Balaguru, P.N.; McConaghy, J.R.; Shah, S.P.; Ball, H.P.; Mobasher, B.; Shao, Y.; Banthia, N.; et al. *Report on Thin Reinforced Cementitious Products*; ACI: Farmington Hills, MI, USA, 2004.
18. Plaggenborg, B.; Weiland, S. Textile-reinforced concrete with high-performance carbon fibre grids. *Jec Compos.* **2008**, 32–35.
19. Hegger, J.; Goralski, C.; Kulas, C. A slender pedestrian bridge made of textile reinforced concrete. *Large Struct. Infrastruct. Env. Constrained Urban. Areas* **2010**, 156–157. [[CrossRef](#)]
20. Rempel, S.; Kulas, C.; Will, N.; Bielak, J. Extremely Light and Slender Precast Pedestrian-Bridge Made Out of Textile-Reinforced Concrete (TRC). In *High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet*; Springer International Publishing: Cham, Germany, 2018; pp. 2530–2537.
21. Scholzen, A.; Chudoba, R.; Hegger, J. Thin-walled shell structures made of textile-reinforced concrete. *Struct. Concrete* **2015**, *16*, 115–124. [[CrossRef](#)]
22. Triantafillou, T.C.; Papanicolaou, C.G. Shear strengthening of reinforced concrete members with textile reinforced mortar (TRM) jackets. *Mater. Struct.* **2007**, *39*, 93–103. [[CrossRef](#)]

23. Raoof, S.M.; Koutas, L.N.; Bournas, D.A. Textile-reinforced mortar (TRM) versus fibre-reinforced polymers (FRP) in flexural strengthening of RC beams. *Constr. Build. Mater.* **2017**, *151*, 279–291. [[CrossRef](#)]
24. Kim, H.-Y.; You, Y.-J.; Ryu, G.-S.; Koh, K.-T.; Ahn, G.-H.; Kang, S.-H. Flexural Strengthening of Concrete Slab-Type Elements with Textile Reinforced Concrete. *Materials (Basel)* **2020**, *13*, 2246. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
25. Ohta, T.; Yamaguchi, K.; Samizo, K.; Ohta, A. Fundamental studies on mechanical properties of UCCF cables for UCAS method Fundamental studies on mechanical properties of UCCF cables for UCAS method. In Proceedings of the 26th Conference on Our World in Concrete & Structures, Singapore, 27–28 August 2001; pp. 521–526.
26. Felicissimo, D.; Neves, R. Compósitos Cimentícios Armados Com Fios De Carbono—Avaliação Experimental Da Armadura Mínima De Tração. Proceedings of The Encontro Nacional BETÃO ESTRUTURAL—BE2018, Lisboa, Portugal, 7–9 November 2018; GPBE: Lisboa, Portugal, 2018; pp. 550–559.
27. Ilankeeran, P.K.; Mohite, P.M.; Kamle, S. Axial tensile testing of single fibers. *Mod. Mech. Eng.* **2012**, *2*, 151–156. [[CrossRef](#)]
28. Ohta, T.; Djameluddin, R.; Hino, S.; Yamaguchi, K.; Harada, K. Flexural properties of concrete beams reinforced with UCAS. *J. Struct. Eng.* **2002**, *48*, 1229–1238.
29. Mader, E.; Plonka, R.; Schiekkel, M.; Hempel, R. Coatings on Alkali-Resistant Glass Fibres for the Improvement of Concrete. *J. Ind. Text.* **2004**, *33*, 191–207. [[CrossRef](#)]
30. Donnini, J.; Corinaldesi, V.; Nanni, A. Mechanical properties of FRCM using carbon fabrics with different coating treatments. *Compos. Part. B Eng.* **2016**, *88*, 220–228. [[CrossRef](#)]
31. Flansbjerg, M.; Williams Portal, N.; Vennetti, D. Verification of the Structural Performance of Textile Reinforced Reactive Powder Concrete Sandwich Facade Elements. *Appl. Sci.* **2019**, *9*, 2456. [[CrossRef](#)]
32. Mantzaridis, C.; Brocas, A.-L.; Llevot, A.; Cendejas, G.; Auvergne, R.; Caillol, S.; Carlotti, S.; Cramail, H. Rosin acid oligomers as precursors of DGEBA-free epoxy resins. *Green Chem.* **2013**, *15*, 3091. [[CrossRef](#)]
33. Ohta, T.; Ojameluddin, R.; Hino, S.; Ohta, A. Studies on behaviour of concrete beam reinforced by UCAS method. In Proceedings of the 26th Conference on Our World in Concrete & Structures, Singapore, 27–28 August 2001; pp. 513–520.
34. Ohta, T.; Djameluddin, R.; Seo, S.; Sajima, T.; Harada, K. Evaluation of Tensile Strength of Unresin Continuous Carbon Fiber Cables as Tensile Reinforcement for Concrete Structures. *Mem. Fac. Eng. Kyushu Univ.* **2001**, *62*, 180–190.
35. Djameluddin, R.; Kobayashi, Y.; Nagahama, T.; Ohta, T. Application of unresin continuous carbon fibers as flexural reinforcement in concrete structure. *Proc. Jpn. Concr. Inst.* **2000**, *22*, 283–288.
36. De Santis, S.; Giulia, F.; De Felice, G.; Poggi, C. Test methods for Textile Reinforced Mortar systems. *Compos. Part B* **2017**, *127*, 121–132. [[CrossRef](#)]
37. Hartig, J.; Jesse, F.; Schick Tanz, K.; Häußler-Combe, U. Influence of experimental setups on the apparent uniaxial tensile load-bearing capacity of Textile Reinforced Concrete specimens. *Mater. Struct. Constr.* **2012**, *45*, 433–446. [[CrossRef](#)]
38. Sueki, S.; Soranakom, C.; Mobasher, B.; Peled, A. Pullout-Slip Response of Fabrics Embedded in a Cement Paste Matrix. *J. Mater. Civ. Eng.* **2007**, *19*, 718–727. [[CrossRef](#)]
39. You, J.; Park, J.; Park, S.-K.; Hong, S. Experimental Study on the Flexural Behavior of Steel-Textile-Reinforced Concrete: Various Textile Reinforcement Details. *Appl. Sci.* **2020**, *10*, 1425. [[CrossRef](#)]
40. Barhum, R.; Mechtcherine, V. Mechanical Behaviour under Tensile Loading of Textile Reinforced Concrete with Short Fibres. In Proceedings of the 6th Colloquium on Textile Reinforced Structures, Berlin, Germany, 19–20 September 2011; pp. 175–186.
41. Barhum, R.; Mechtcherine, V. Multi-Level Investigations on Behaviour of Textile Reinforced Concrete with Short Fibres Under Tensile Loading. In Proceedings of the VIII International Conference on Fracture Mechanics Of Concrete and Concrete Structures, Toledo, Spain, 10–14 March 2013; pp. 1430–1440.
42. Comité Européen de Normalisation Cement—Part 1: Composition, Specification and Conformity Criteria for Common Cements. Eur. Stand. En 197-1 2001. Available online: <https://infostore.saiglobal.com/preview/is/en/2011/i.s.en197-1-2011.pdf?sku=1492629> (accessed on 13 July 2020).
43. Sawada, Y.; Shindo, A. Clamping Methods for Tensile Test of Carbon fiber Strand. *J. Compos. Mater.* **1981**, *15*, 582–590. [[CrossRef](#)]
44. Naito, K.; Tanaka, Y.; Jm, Y.; Kagawa, Y. Tensile and Flexural Properties of Single Carbon Fibres. In Proceedings of the 17th International Conference on Composite Materials, Edinburgh, UK, 27–31 July 2009; pp. 1–10.

45. Colombo, G.I.; Magri, A.; Zani, G.; Colombo, M.; di Prisco, M. Textile Reinforced Concrete: Experimental investigation on design parameters. *Mater. Struct.* **2013**, *46*, 1933–1951. [CrossRef]
46. Chandrathilaka, E.R.K.; Baduge, S.K.; Mendis, P.; Thilakarathna, P.S.M. Flexural Performance of Prefabricated Ultra-High-Strength Textile Reinforced Concrete (UHSTRC): An Experimental and Analytical Investigation. *Buildings* **2020**, *10*, 68. [CrossRef]
47. Contamine, R.; Si Larbi, A.; Hamelin, P. Contribution to direct tensile testing of textile reinforced concrete (TRC) composites. *Mater. Sci. Eng. A* **2011**, *528*, 8589–8598. [CrossRef]
48. Mobasher, B.; Peled, A.; Pahilajani, J. Distributed cracking and stiffness degradation in fabric-cement composites. *Mater. Struct.* **2007**, *39*, 317–331. [CrossRef]
49. De Munck, M.; El Kadi, M.; Tsangouri, E.; Vervloet, J.; Verbruggen, S.; Wastiels, J.; Tysmans, T.; Remy, O. Influence of environmental loading on the tensile and cracking behaviour of textile reinforced cementitious composites. *Constr. Build. Mater.* **2018**, *181*, 325–334. [CrossRef]
50. Reisinger, U.; Schoene, J.; Schleser, M.; Keil, A.; Jeřábek, J. Theoretical And Experimental Investigations on Textile-Reinforced Concrete Spalling Behavior. *Int. Rilem Conf. Mater. Sci. Marsci* **2010**, *1*, 153–162.
51. de Andrade Silva, F.; Butler, M.; Mechtcherine, V.; Zhu, D.; Mobasher, B. Strain rate effect on the tensile behaviour of textile-reinforced concrete under static and dynamic loading. *Mater. Sci. Eng. A* **2011**, *528*, 1727–1734. [CrossRef]
52. Jaccoud, J.P. *Armature Minimale Pour Le Contrôle De La Fissuration Des Structures En Béton*; École Polytechnique Fédérale de Lausanne: Lausanne, Switzerland, 1987.
53. ASTM C1437-13. *Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar*; ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2013.
54. Comité Européen de Normalisation Methods of Testing cement—Part 1: Determination of Strength. Eur. Stand. En 196-1 2005. Available online: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwi275jq_MnqAhVo2aYKHTZxDnoQFjABegQIBBAB&url=https%3A%2F%2Fshop.standards.ie%2Fstore%2FPreviewDoc.aspx%3FsaleItemID%3D2929277&usq=AOvVaw1gjfve8EYSWODvZs1q-DMu (accessed on 13 July 2020).
55. Kim, J.J.; Taha, M.R. Experimental and Numerical Evaluation of Direct Tension Test for Cylindrical Concrete Specimens. *Adv. Civ. Eng.* **2014**, *2014*, 1–8. [CrossRef]
56. Akita, H.; Koide, H.; Tomon, M.; Sohn, D. A practical method for uniaxial tension test of concrete. *Mater. Struct.* **2003**, *36*, 365–371. [CrossRef]
57. Walvaren, J. Model Code 2010, final drafts. *Fib Bull.* **2012**, *1–2*, 105.
58. Brameshuber, W. Recommendation of RILEM TC 232-TDT: Test methods and design of textile reinforced concrete. *Mater. Struct.* **2016**, *49*, 4923–4927.
59. D’Antino, T.; Papanicolaou, C. Mechanical characterization of textile reinforced inorganic-matrix composites. *Compos. Part B Eng.* **2017**, *127*, 78–91. [CrossRef]
60. ACI Committee 224 ACI 224.2R-92 Cracking of Concrete Members in Direct Tension. 2004. Available online: http://civilwares.free.fr/ACI/MCP04/2242r_92.pdf (accessed on 13 July 2020).
61. CEN/TC 250 EN 1992-1 Eurocode 2: Design of Concrete structures—Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings. 2004. Available online: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1992.1.1.2004.pdf> (accessed on 13 July 2020).
62. Carozzi, F.G.; Bellini, A.; D’Antino, T.; de Felice, G.; Focacci, F.; Hojdys, Ł.; Laghi, L.; Lanoye, E.; Micelli, F.; Panizza, M.; et al. Experimental investigation of tensile and bond properties of Carbon-FRCM composites for strengthening masonry elements. *Compos. Part B Eng.* **2017**, *128*, 100–119. [CrossRef]
63. Hegger, J.; Will, N.; Bruckermann, O.; Voss, S. Load—Bearing behaviour and simulation of textile reinforced concrete. *Mater Struct* **2006**, *39*, 765–776. [CrossRef]
64. Brockmann, T. Mechanical and Fracture Mechanical Properties of Fine Grained Concrete for TRC Structures. In *Advances in Construction Materials 2007*; Grosse, C.U., Ed.; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2007; pp. 119–130. ISBN 9783540724476.
65. Wiberg, A. *Strengthening of Concrete Beams Using Cementitious Carbon Fibre Composites*; Royal Institute of Technology (KTH): Stockholm, Sweden, 2003.
66. Meredith, J.; Bilson, E.; Powe, R.; Collings, E.; Kirwan, K. A performance versus cost analysis of prepreg carbon fibre epoxy energy absorption structures. *Compos. Struct.* **2015**, *124*, 206–213. [CrossRef]

67. Alreshaid, K.H.; Mahdi, I.M.; Soliman, E. Cost optimization of reinforced concrete elements. *Asian J. Civ. Eng. (Build. Hous.)* **2004**, *5*, 161–174.
68. Hammond, G.; Jones, C. *Embodied Carbon—The Inventory of Carbon and Energy*; Lowrie, F., Tse, P., Eds.; University of Bath: Bath, UK, 2011; ISBN 9780860227038.
69. Das, S. Life cycle assessment of carbon fiber-reinforced polymer composites. *Int. J. Life Cycle Assess.* **2011**, *16*, 268–282. [[CrossRef](#)]



© 2020 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).