

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**JOÃO PEDRO LOPES**

**EFEITO DE NANOTUBOS DE CARBONO (CNT) SOBRE O  
COMPORTAMENTO MECÂNICO DO CONCRETO REFORÇADO  
COM FIBRAS**

MARINGÁ  
2020

**JOÃO PEDRO LOPES**

**EFEITO DE NANOTUBOS DE CARBONO (CNT) SOBRE O  
COMPORTAMENTO MECÂNICO DO CONCRETO REFORÇADO  
COM FIBRAS**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil do Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá.

Orientador Prof. Dr. Vladimir José Ferrari

Coorientador Prof. Dr. Aires Camões

**MARINGÁ**  
2020

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)  
(Biblioteca Central - UEM, Maringá - PR, Brasil)

L864e

Lopes, João Pedro

Efeito de nanotubos de carbono (CNT) sobre o comportamento mecânico do concreto reforçado com fibras / João Pedro Lopes. -- Maringá, PR, 2020.  
120 f.: il. color., figs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Vladimir José Ferrari.

Coorientador: Prof. Dr. Aires Camões.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2020.

1. Concreto reforçado com fibras. 2. Nanotubos de carbono. 3. Tenacidade a flexão. 4. Energia de fratura. I. Ferrari, Vladimir José, orient. II. Camões, Aires, coorient. III. Universidade Estadual de Maringá. Centro de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. IV. Título.

CDD 23.ed. 624.1834

JOÃO PEDRO LOPES

**EFEITO DE NANOTUBOS DE CARBONO (CNT) SOBRE O COMPORTAMENTO  
MECÂNICO DO CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS**

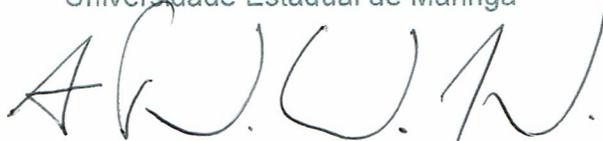
Dissertação apresentada à Universidade  
Estadual de Maringá, como requisito parcial para  
a obtenção do título de mestre.

Aprovado em: 25/05/2020

**BANCA EXAMINADORA**



Prof. Dr. Vladimir José Ferrari  
Universidade Estadual de Maringá



Prof. Dr. Aires Fernando Fernandes Leite Camões de Azevedo  
Universidade do Minho



Prof. Dr. Romel Dias Vanderlei  
Universidade Estadual de Maringá



Prof. Dr. Raúl Manuel Esteves Sousa Figueiro  
Universidade do Minho

*“Tudo Posso Naquele  
que me fortalece”*

Filipenses 4:13

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradecer a Deus pelo dom da vida e as graças concedidas para ser quem sou e chegar onde cheguei.

Agradecer ao meu pai, Paulo Lopes, pelo apoio concedido, por nunca desistir de mim, pelo apoio profissional, pela educação e principalmente por ser a cabeça da família Lopes.

Agradecer à minha mãe, Patrícia Lopes, pela paciência, credibilidade, educação e principalmente por ser o coração da família Lopes.

Agradecer às minhas irmãs, Marianna Lopes e Maria Paula Lopes, pela paciência que tiveram e pelo apoio que me deram.

Agradecer meu cunhado, Guilherme Batata, por estar em nossas vidas e que durante esse processo do mestrado me deu a honra de ser padrinho de meu afilhado Brenno Batata Lopes.

Agradecer meu professor, orientador e amigo Carlos Humberto Martins por todas as dicas, sugestões, conselhos, broncas e risadas.

Agradecer meus amigos, Aloysio Filho, André Pardin e Alex Holtermann, que me auxiliaram muito na jornada em Portugal.

Agradecer a UEM, seus professores e a todos os colaboradores, que me deram os ensinamentos para me formar como engenheiro civil e agora como mestre, em especial Prof. Dr. Vladimir Ferrari.

Agradecer a Universidade do Minho, a Fibrenamics e principalmente aos meus orientadores, Prof. Dr. Raul Figueiro e Prof. Dr. Ayres Camões na trajetória em Portugal.

Agradecer meu colega de profissão Msc. Dionísio Palharini Junior pelos estudos, projetos, planos, conversas e em especial pela nossa amizade.

## RESUMO

O comportamento do concreto à tração corresponde aproximadamente à apenas 10% da sua resistência à compressão. Essa limitação tem sido contornada com a incorporação de fibras curtas ao concreto, resultando no denominado CRF – concreto reforçado com fibras. O CRF tem suas características potencializadas consideravelmente pelas fibras, tais como, aumento da resistência à tração direta, resistência à tração na flexão, tenacidade e ductilidade. Pela aplicação das fibras ao concreto é possível melhorar a sua capacidade de resistir a fissuração e de absorção de energia após a fissuração. Este trabalho tem como foco o estudo da avaliação do efeito do conteúdo de nanotubos de carbono (CNT) em um concreto reforçado com fibras de aço (CRFA) sobre a resistência à flexão, tenacidade e resistências residuais do concreto. Para essa finalidade foram desenvolvidos ensaios de flexão em três pontos em corpos de prova prismáticos dotados de entalhe central, seguindo-se as recomendações da EN 14651 (2007). Foram fabricados concretos com 1% de fibras de aço e três adições de nanopartículas (0,05%, 0,10% e 0,15%). Ensaios para caracterização dos materiais como granulometria e absorção de água, caracterização das fibras de aço e nanotubos de carbono, ensaios de compressão axial, arrancamento das fibras de aço na matriz cimentícia também foram realizados. O concreto com nanopartículas e fibras de aço (CRNF) com apresenta uma ligeira melhoria no comportamento a compressão não ultrapassando dos 6%. Já no comportamento a flexão, o CRNF com menor adição de CNT (0,05%) causou uma elevação da resistência máxima a flexão em 9% quando comparada somente com a fibra de aço e mais de 48% com o concreto sem fibras. Não só a resistência máxima, mas também as resistências residuais obtiveram uma elevação. O arrancamento da fibra de aço na matriz do concreto também apresentou uma elevação em seu valor máximo quando com a presença de CNTs, mostrando uma elevação da resistência a ancoragem da fibra de aço em até 21%. Sendo assim, os resultados do trabalho apresentam melhorias no comportamento mecânico a flexão do CRF ao se adicionar os nanotubos de carbono e fibras de aço, garantindo maior rigidez, resistência máxima a flexão, aumento nas resistências residuais e arrancamento da fibra de aço na matriz cimentícia.

**Palavras chave:** concreto reforçado com fibras, nanotubos de carbono, fibras de aço, resistência a flexão, energia de fratura.

## ABSTRACT

The concrete's tensile behavior corresponds to approximately 10% of its compressive strength. This limitation has been overcome with the incorporation of short fibers into the concrete, resulting in the so-called CRF - fiber reinforced concrete. The characteristics of CRF are greatly enhanced by fibers, such as increased direct tensile strength, flexural tensile strength, toughness and ductility. By applying fibers to concrete it is possible to improve its ability to resist cracking and to absorb energy after cracking. This work focuses on the study of the evaluation of the effect of the content of carbon nanotubes (CNT) in a concrete reinforced with steel fibers (CRFA) on the flexural strength, toughness and residual strengths of concrete. For this purpose, flexion tests were developed at three points in prismatic specimens equipped with a central notch, following the recommendations of EN 14651 (2007). Concretes were manufactured with 1% steel fibers and three additions of nanoparticles (0.05%, 0.10% and 0.15%). Tests for characterization of materials such as granulometry and water absorption, characterization of steel fibers and carbon nanotubes, tests of axial compression, pullout of steel fibers in the cementitious matrix were also carried out. The concrete with nanoparticles and steel fibers (CRNF) with presents a slight improvement in the compression behavior not exceeding 6%. In flexural behavior, the CRNF with the lowest addition of CNT (0.05%) caused an increase in maximum flexural strength by 9% when compared only with steel fiber and more than 48% with concrete without fibers. Not only the maximum strength, but also the residual strengths have risen. The pullout of the steel fiber in the concrete matrix also showed an increase in its maximum value when with the presence of CNTs, showing an increase in the anchoring resistance of the steel fiber by up to 21%. Thus, the results of the work show improvements in the flexural mechanical behavior of the CRF by adding carbon nanotubes and steel fibers, ensuring greater rigidity, maximum flexural strength, increase in residual strengths and pullout of the steel fiber in the cementitious matrix.

**Keywords:** fiber reinforced concrete, carbon nanotubes, steel fibers, flexural strength, fracture energy.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ilustração da forma dos CNTs .....	14
Figura 2 – Microestrutura pelo MEV .....	20
Figura 3 - Fibras de aço .....	23
Figura 4 - Concreto com fibras x concreto sem fibras .....	24
Figura 5 - Dispersão das fibras na matriz do concreto .....	26
Figura 6 - Resistência a compressão do concreto reforçado com fibras	31
Figura 7 - Distribuição de tensões no concreto fissurado .....	32
Figura 8 - Caminho das Tensões.....	33
Figura 9 - Gráficos de Tensão x Deformação .....	34
Figura 10 - Tenacidade de curvas carga x deslocamento .....	36
Figura 11 - Volume de fibras e tenacidade .....	37
Figura 12 - Aspecto visual dos dois tipos de agregados miúdos utilizados .....	40
Figura 13 - Gráfico da curva granulométrica da areia fina .....	41
Figura 14 - Gráfico da curva granulométrica da areia grossa .....	42
Figura 15 - Aspecto visual do agregado graúdo brita .....	42
Figura 16 - Ensaio de absorção de água dos agregados .....	43
Figura 17 - Ensaio de granulometria dos agregados .....	43
Figura 18 - Gráfico da curva granulométrica da brita.....	44
Figura 19 - Aspecto das fibras de aço .....	45
Figura 20 - Ensaio de dobramento da fibra de aço .....	47
Figura 21 - Imperfeições contidas nas fibras de aço .....	48
Figura 22 - Aspecto visual dos NanoTubos de Carbono (CNTs) .....	49
Figura 23 - Aspecto visual do dispersante Pluronic F-127.....	50
Figura 24 - Soluções de CNT e Pluronic.....	51
Figura 25 – Equipamento para agitação mecânica das soluções.....	51
Figura 26 - Equipamento para a ultrassonificação.....	52
Figura 27 - Temperatura para realização do procedimento de ultrassonificação.....	52
Figura 28 - Ensaio de UV - VIS.....	53

Figura 29 - Absorvância com variação da taxa de Dispersante .....	54
Figura 30 - Absorvância com variação de tempo de ultrassonificação ..	56
Figura 31 - Argamassadeira utilizada na produção dos concretos .....	58
Figura 32 - Ensaio de espalhamento do concreto fresco.....	59
Figura 33 – Fôrmas metálicas e aspecto dos corpos de prova após a moldagem.....	59
Figura 34 – Corpos de prova com entalhe.....	60
Figura 35 – Processo de obtenção da massa hidrostática dos corpos de prova .....	61
Figura 36 - Ensaio de compressão axial.....	61
Figura 37 - Ensaio de Flexão.....	62
Figura 38 - Microscópio eletrônico de varredura (MEV).....	63
Figura 39 – Representação gráfica para carregamento do corpo de prova .....	64
Figura 40 - Ensaio de Ultrassonificação .....	65
Figura 41 - Execução dos entalhes nos corpos de prova prismáticos segundo a EN 14651 (2007) .....	65
Figura 42 - Execução do ensaio de flexão.....	66
Figura 43 – Corpo de prova e execução do ensaio de arrancamento da fibra ( <i>Pull out</i> ).....	67
Figura 44 – Comparativo dos resultados do espalhamento dos concretos .....	68
Figura 45 - Influência das nanopartículas na trabalhabilidade.....	69
Figura 46 - Comparativos dos valores médios do grau de absorção dos concretos.....	70
Figura 47 - Influência das nanopartículas na absorção de água .....	71
Figura 48 - Comparativo da resistência à compressão axial .....	73
Figura 49 - Influência das nanopartículas na resistência à compressão	74
Figura 50 - Curvas médias Tensão-CMOD dos concretos CN .....	75
Figura 51 - Curvas médias Tensão-CMOD dos concretos CRNF .....	75
Figura 52 – Curva típica Força x CMOD.....	77
Figura 53 – Comparação gráfica entre $f_{ct,L}$ e $f_{R,j}$ para os concretos CRNF .....	79

Figura 54 – Valores das resistências $f_{ct,L}$ e $f_{R,j}$ dos concretos .....	80
Figura 55 – Presença dos CNTs nas microfissuras (CN005) .....	83
Figura 56 - Gráfico da resistência a compressão axial .....	85
Figura 57 - Gráfico das curvas médias do ensaio de flexão da EN 14651 .....	85
Figura 58 - Curva força-deslizamento da fibra de aço – concreto de referência .....	88
Figura 59 - Curva força-deslizamento da fibra de aço – concreto CRNF005 .....	88
Figura 60 - Gráfico das curvas médias do ensaio de <i>Pull out</i> .....	89
Figura 61 - Interface fibra de aço e matriz cimentícia .....	89
Figura 62 - Ilustração do mecanismo de arrancamento da fibra de aço	90
Figura 63 - Ilustração do mecanismo de arranchamento da fibra ao longo do do histórico de carregamento .....	90

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação das fibras de aço .....	28
Tabela 2 - Limites de fator de forma .....	28
Tabela 3 - Características do cimento conforme fabricante .....	39
Tabela 4 - granulometria da areia .....	40
Tabela 5 - granulometria da areia .....	41
Tabela 6 - granulometria da brita .....	44
Tabela 7 - Absorção de água dos agregados miúdos .....	45
Tabela 8 - Absorção de água do agregado graúdo .....	45
Tabela 9 – Propriedades das fibras de aço conforme fabricante .....	46
Tabela 10 - caracterização das fibras de aço pela ABNT NBR 15530:2007 .....	46
Tabela 11 – Resultados da caracterização das fibras de aço.....	48
Tabela 12 - Característica dos nanotubos de carbono conforme informações do fabricante .....	49
Tabela 13 - Característica do dispersante Pluronic F-127 conforme informações do fabricante .....	49
Tabela 14 - Listagem das amostras para ultrassonificação .....	54
Tabela 15 – Grupos de concreto .....	57
Tabela 16 – Quantidade de Materiais para a fabricação de concreto....	64
Tabela 17 - Espalhamento médio dos concretos .....	68
Tabela 18 – Resultados da Absorção água dos concretos.....	70
Tabela 19 - Resultados do ensaio de compressão axial .....	72
Tabela 20 – Resistências médias dos concretos.....	78
Tabela 21 - energia de fratura dos compósitos sem fibras de aço .....	81
Tabela 22 - valores de resistências à compressão axial .....	84
Tabela 23 – Resistência à flexão dos concretos conforme EN 14651 (2007).....	86
Tabela 24 - Energia de fratura dos concretos CRF e CRNF005.....	87

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
1.1	JUSTIFICATIVA.....	15
1.2	OBJETIVOS.....	16
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>17</b>
2.1	O CONCRETO .....	17
2.2	CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS .....	18
<b>2.2.1</b>	<b>Nanopartículas .....</b>	<b>19</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Concreto Reforçado com Nanopartículas.....</b>	<b>22</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Macro Fibras .....</b>	<b>23</b>
2.3	COMPORTAMENTO MECÂNICO.....	29
<b>2.3.1</b>	<b>Resistência a compressão .....</b>	<b>30</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Resistência a flexão .....</b>	<b>31</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Comportamento pós fissuração .....</b>	<b>33</b>
<b>2.3.4</b>	<b>Tenacidade.....</b>	<b>36</b>
<b>2.3.5</b>	<b><i>Pull out</i>.....</b>	<b>37</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>39</b>
3.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	39
<b>3.1.1</b>	<b>Cimento .....</b>	<b>39</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Agregados.....</b>	<b>40</b>
3.2	FIBRAS DE AÇO.....	45
3.3	NANOTUBOS DE CARBONO .....	48
<b>3.3.1</b>	<b>Definição da taxa de dispersante.....</b>	<b>50</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Definição do tempo de Ultrassonificação .....</b>	<b>53</b>
<b>3.3.3</b>	<b>Resultados da caracterização das dispersões dos nanotubos de carbono</b>	<b>54</b>
3.4	FABRICAÇÃO DOS CONCRETOS CN E CRNF .....	56

3.5	ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO.....	60
3.6	ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL .....	61
3.7	ENSAIO DE FLEXÃO EM TRÊS PONTOS .....	62
3.8	ENSAIO MEV .....	63
3.9	PRODUÇÃO DOS CONCRETOS REF, CRF E CRNF005.....	63
3.10	ENSAIO DE FLEXÃO EM TRÊS PONTOS.....	65
3.11	ENSAIO DE ARRANCAMENTO DA FIBRA: ENSAIO DE <i>PULL</i> <i>OUT</i>	66
<b>4</b>	<b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>68</b>
4.1	TRABALHABILIDADE DOS CONCRETOS.....	68
4.2	ABSORÇÃO DE ÁGUA DOS CONCRETOS.....	69
4.3	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL.....	72
4.4	RESISTÊNCIA À FLEXÃO .....	74
4.4.1	<b>Energia de Fratura.....</b>	<b>80</b>
4.5	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	82
4.6	ENSAIOS DE FLEXÃO EM TRÊS PONTOS: CONCRETOS CRF E CRNF005	84
4.6.1	<b>Energia de Fratura.....</b>	<b>87</b>
4.7	<i>PULL OUT</i> .....	87
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>92</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>94</b>
	<b>ANEXO A .....</b>	<b>101</b>
	<b>ANEXO B .....</b>	<b>107</b>
	<b>ANEXO C .....</b>	<b>108</b>
	<b>ANEXO D .....</b>	<b>111</b>
	<b>ANEXO E.....</b>	<b>119</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O concreto é um material largamente aplicado na engenharia principalmente por exibir uma excelente resistência à compressão. No entanto, seu comportamento à tração, que corresponde somente a aproximadamente 10% da sua resistência à compressão, o caracteriza como um material frágil, isto é, com baixa capacidade de se deformar até a ruptura. Para contornar essa característica, o concreto é reforçado com materiais capazes de conferir ductilidade e resistência à tração após a fissuração.

Mohammadi et. al (2018) comentam que a adição de fibras ao concreto melhora consideravelmente as suas características como a resistência à flexão, resistência ao impacto, resistência à tração, ductilidade e tenacidade flexional. Segundo Lee et al. (2017), pela aplicação de fibras curtas ao concreto é possível aumentar a sua capacidade de resistir a fissuras por tração e melhorar a absorção de energia.

Lee (2017) afirma que as fibras curtas quando incorporadas ao concreto podem resultar em resistência ao início e a propagação da fissuração e ainda melhorar a resistência à tração e a sua ductilidade. Segundo Maida et. al (2018), quando comparado ao concreto simples, o CRF (concreto reforçado com fibras) exibe maior tenacidade (capacidade de absorção de energia durante o processo de fratura) e maior resistência à tração após a fissuração.

O concreto reforçado com fibras de aço (CRFA) vêm sendo desenvolvido desde o ano de 1960, principalmente pelo fato de melhorar a ductilidade do concreto (Zan & Meschke, 2013). O CRFA é utilizado largamente na prática da engenharia, particularmente como concreto projetado em túneis e na indústria de pavimentos e lajes. No Brasil, tal tecnologia ingressou como material de construção na década de 90, principalmente na aplicação de pisos industriais.

O conceito da dispersão de nanopartículas na matriz cimentícia é diretamente aplicável ao concreto pois, com ele, busca-se desenvolver um material mais resistente à fissuração e conseqüentemente mais durável.

Nesse sentido, segundo Parveen et al. (2013), Nanotubos de carbono (CNTs – do inglês *Carbon nanotubes*) têm ganhado especial atenção quando se fala em melhorar o desempenho de compósitos cimentícios.

Segundo Bani-Hani et al. (2015), os CNTs são os nanomateriais mais comuns utilizados em aplicações na indústria da construção. Podem ser formados por parede única (*single walled nanotubes* – *SWNTs*) ou por múltiplas paredes (*multi walled nanotubes* – *MWCNTs*) conforme ilustrado na Figura 1, com diâmetro variando na faixa de 0,4 a 10 nm e 4-100 nm, respectivamente. O comprimento pode situar-se na faixa do micrômetro ou milímetro.

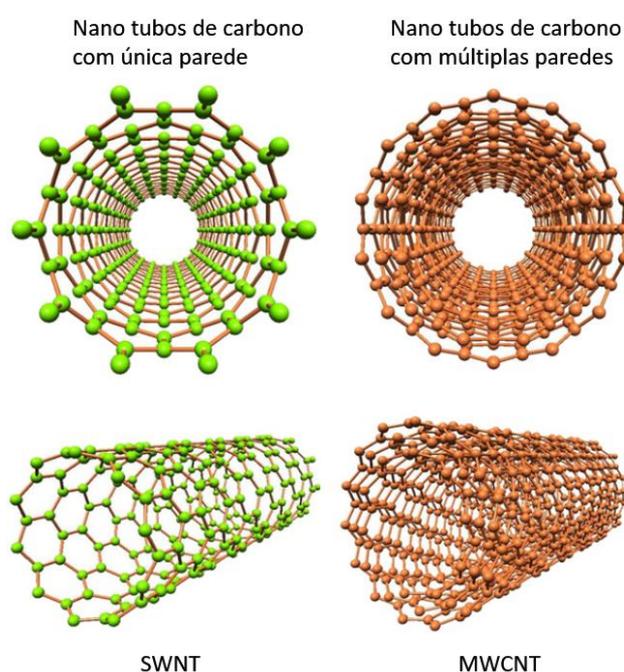


Figura 1 - Ilustração da forma dos CNTs  
Adaptado de Bani-Hani et al. (2015)

Segundo Ferro et al. (2011), os CNTs possuem flexibilidade, alta resistência à tração e elevado módulo de deformação. Yu et al. (2000), ao comparar CNTs com aço afirma que, o módulo de elasticidade, a resistência à tração e a ductilidade dos primeiros são da ordem de cinco vezes, cem vezes e sessenta vezes maior do que o aço, respectivamente.

Conforme Ferrari et al. (2013), as modificações resultantes da adição de fibras de aço ao concreto ficam restritas a fase pós-pico após a fissuração da

matriz. As fibras de aço não são suficientes para inibir o processo de formação e de crescimento da fissura que antecede a carga máxima, é o denominado crescimento sub-crítico das fissuras conforme relatado em Ferreira et al (2012).

A pesquisa aqui proposta tem como foco melhorar a resposta mecânica de um CRFA procurando-se modificar o comportamento já na fase de pré-pico e também na fase pós pico de carregamento por meio da adição de CNTs à matriz de concreto. Para essa finalidade foram desenvolvidas e analisadas as respostas obtidas através de ensaios de flexão em três pontos em corpos de prova prismáticos dotados de entalhe central reto passante conforme as recomendações da EN 14651 (2007), conforme ANEXO A. Foram também realizados ensaios de compressão axial de arrancamento das fibras de aço (*Pull out*).

## 1.1 JUSTIFICATIVA

O concreto é o material de construção mais utilizado pelo homem no mundo. Conhecido como um material tipicamente frágil, as fibras vêm sendo empregadas em concreto para contornar tais características, fornecendo maior ductilidade, resistência a tração e maior controle de fissuração. Neste sentido, a justificativa deste trabalho é a obtenção de um concreto reforçado com fibras.

Para tal, dois tipos de fibras foram elencadas para reforçar o concreto, as fibras de aço e os Nanotubos de Carbono. As fibras de aço foram escolhidas para serem as macrofibras do compósito por serem as fibras mais comuns a reforçar estruturas de concreto. Já os Nanotubos de Carbono foram adicionados à matriz de concreto devido às suas características mecânicas e por serem alvo de estudo por diversos pesquisadores nos últimos anos.

## 1.2 OBJETIVOS

A pesquisa tem como objetivo geral a avaliação do efeito da adição de nanotubos de carbono (CNTs) sobre as propriedades mecânicas de um concreto reforçado com fibras de aço (CRFA).

Para isso, os objetivos específicos associados com a pesquisa podem ser assim reunidos:

- Avaliar o comportamento do CRF a compressão a partir dos resultados dos ensaios de compressão axial;
- Avaliar o comportamento do CRF a flexão, resistências flexionais e energia de fratura a partir da construção das curvas P-CMOD dos ensaios de flexão conforme as da EN 14651 (2007);
- Analisar as correlações das resistências flexionais com o conteúdo de fibras de aço e nanotubos de carbono;
- Avaliar a influência dos nanotubos de carbono na interface das fibras de aço e matriz de concreto por meio do ensaio de *Pull out*.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo, serão abordados algumas especificações e definições do concreto reforçado com fibras. Inicialmente, será definido o concreto convencional utilizado em estruturas como em concreto armado e será efetuado o levantamento de tipos de fibras que são utilizadas no concreto a fim de melhorar algumas características do concreto convencional. Será efetuado um levantamento bibliográfico de pesquisas realizadas com a utilização de nanotubos de carbono e fibras de aço em concreto. Por fim, será abordada a caracterização do concreto reforçado com fibras e a influência da presença das fibras na matriz do concreto sobre as propriedades mecânicas do material.

### 2.1 O CONCRETO

O concreto convencional é um material utilizado na construção há milhares de anos. Atualmente, é composto por cimento Portland, materiais granulares miúdos e graúdos e água. Assim, o concreto já pode ser considerado um material compósito (FIGUEIREDO, 2000). Todos esses materiais são encontrados em abundância na natureza. Para fabricação do cimento Portland ocorre a extração em pedreiras e seu processamento em fábricas, na extração da areia (agregado miúdo) nomeadamente nos rios, na extração da brita (agregado graúdo) em rochas basálticas, granitos ou provenientes de calcário e na água por meio de concessionárias da região, águas de rio ou lençóis freáticos. Pode-se dizer que isso é uma de suas vantagens, pois o concreto pode ser produzido em qualquer lugar bem como ser moldado por infinitas variações de forma.

Entre as diversas vantagens que o concreto convencional possui, pode-se citar que é um material barato para emprego na construção civil, apresenta boas características mecânicas para emprego em estruturas e sua facilidade de aplicação. No entanto, o concreto apresenta algumas limitações, como sua baixa resistência a tração quando comparada com a resistência a compressão, baixa capacidade de deformabilidade e sua fragilidade.

Para aplicação em estruturas, diversos códigos normativos trazem procedimentos para fabricação e aplicação deste material. Dentre elas, a ABNT NBR 6118:2014 fornece parâmetros, coeficientes, procedimentos de cálculo, análises, dimensionamento e detalhamento de estruturas de concreto armado. O concreto armado provém da combinação do concreto convencional de cimento Portland com a armadura de aço.

No concreto armado, os materiais são combinados para que cada um possa melhorar as características do outro. Sendo que o concreto não apresenta boa resistência a tração, o aço é o responsável por resistir a toda resistência a tração na estrutura, visto que a NBR 6118:2014 traz que pode-se considerar a resistência a tração do concreto igual a zero. Outra vantagem é sua deformabilidade, enquanto que para concreto com resistências normais de até 50 MPa a deformação específica máxima para o concreto é de 0,35%, o do aço chega a 1% (ABNT NBR 6118:2014).

Sendo assim, o concreto armado é um material composto pela combinação do concreto e do aço. Diversos materiais são estudados para serem adicionados ao concreto a fim de melhorar suas capacidades resistentes e seu comportamento, nomeadamente em fase fissurada. Dentre eles, o estudo da adição de fibras em concreto propõe melhorias a essas características. A grande diferença para o concreto armado é que a barra de aço se encontram em regiões predeterminadas em projeto, enquanto que as fibras se encontram dispersas, distribuídas ao longo do elemento estrutural de maneira aleatória (FIGUEIREDO, 2017).

## 2.2 CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS

Fibras são elementos descontínuos que podem ser adicionados ao concreto. Esses elementos melhoram a resistência, rigidez, resistência ao impacto e resistência a fadiga (SONMEZ et al., 2015). Essas fibras podem ser classificadas segundo seu material, geometria, processo de fabricação,

composição química e física, características mecânicas e resistência a meios agressivos (CARNIO, 2017).

### **2.2.1 Nanopartículas**

A adição de nanopartículas em matrizes cimentícias, como os nanotubos de carbono, nano fibras de carbono, micro celulose, entre outros, vêm sendo estudadas devido a sua elevada rigidez e resistência (Al Rub et al., 2012).

As nanopartículas atuam na matriz cimentícia tanto antes a fissuração da matriz quanto após. Trabalhos realizados pelos pesquisadores Alshaghel et al. (2018) trazem que essas partículas aumentam a resistência e módulo de elasticidade, características mecânicas que antecedem a fissuração, bem como a tenacidade e a capacidade de absorção de energia, o que precede a fissuração. Os pesquisadores ressaltam a otimização de tais benefícios com a importância da dispersão das nanopartículas no compósito cimentício.

No trabalho de Parveen et al. (2015), os autores apresentaram ganhos significativos na resistência a flexão, módulo de elasticidade e resistência a compressão com a presença de CNT na matriz cimentícia. Com isso, há um aumento significativo na rigidez do compósito, fornecendo maior resistência e na capacidade de absorção de energia.

Para visualização do campo de atuação dessas nanopartículas a microscopia eletrônica de varredura (MEV) é necessária. De acordo com a Figura 2 apresentada por Alshaghel et al. (2018), é possível observar a interface da matriz cimentícia com as nanopartículas de Micro Celulose Cristalina (MCC) e Nano tubos de Carbono Multi Paredees, do inglês, *Multi Walls Carbon Nano Tubes* (MWCNT). Os autores trazem que os CNT atuam individualmente ou em pequenos grupos, sem formação de aglomeração, quando estes são bem dispersos na solução.

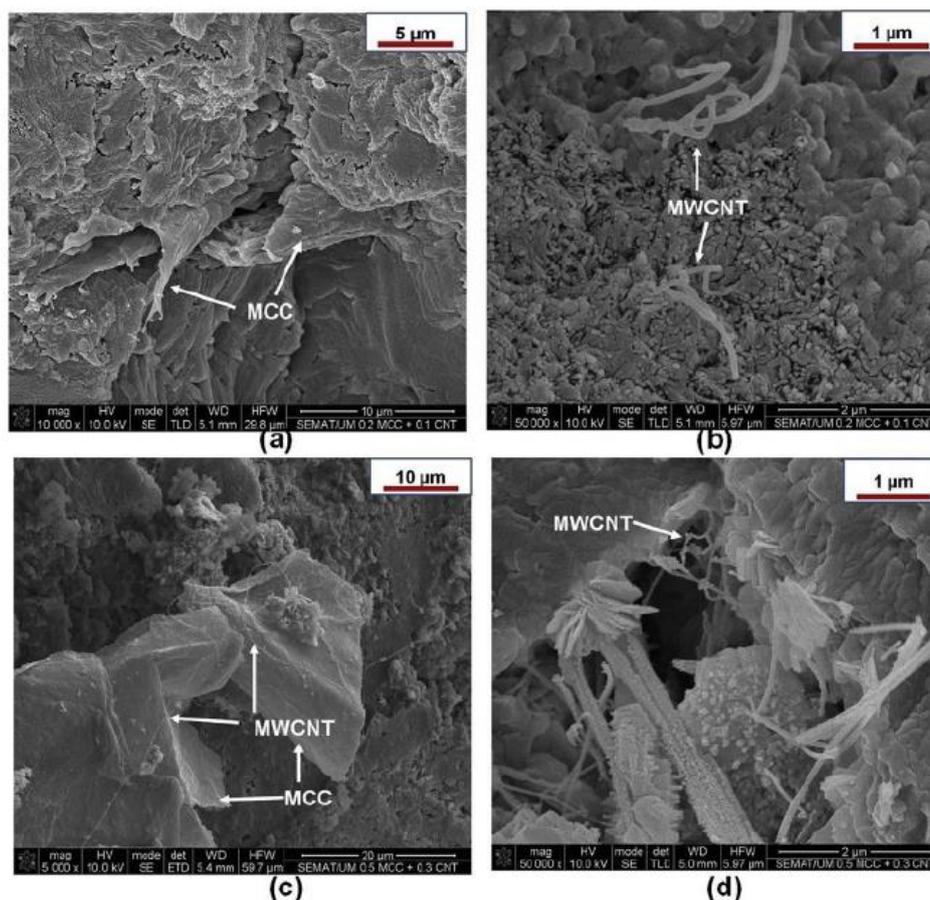


Figura 2 – Microestrutura pelo MEV  
Adaptado de Alshaghel et al. (2018)

Alshaghel et al. (2018) relatam que na Figura 2 (a) e (c), há conexão dos nanotubos de carbono com a superfície da micro celulose cristalina. Eles ressaltam que na interface da fissura, esses compósitos se aderem entre eles tão bem quanto na matriz cimentícia. Na Figura 2 (d) é possível verificar que os CNT agem na interface da fissura, podendo assim, aumentar significativamente a absorção de energia após a fissuração e sua tenacidade (Parveen et al. 2018).

Além do comportamento mecânico, há outro campo de aplicação dos CNTs na matriz cimentícia. Alshaghel et al. (2018) traz que esses compósitos podem ser projetados para serem auto sensíveis, isto é, capazes de detectar deformações e fissurações sob carregamentos na estrutura.

### 2.2.1.1 Dispersão

No que se diz respeito a nano estrutura, os nanotubos de carbono atuam como fibras em uma escala nanométrica junto ao compósito cimentício. De acordo com Hu et al. (2014), os CNTs tendem a formar aglomerações de partículas devido às forças de van der Waals entre as superfícies dos CNTs.

Para dispersão dos CNTs e outras nanopartículas por exemplo, pode-se apontar dois tipos de métodos, o físico e o mecânico (Hu et al., 2014). Diversos trabalhos como os de Hu et al. (2014), Tyson e Yazdanbakhsh (2011), Parveen et al. (2015) apresentam ambos os métodos para uma melhor dispersão dos CNTs em meio aquoso para aplicação em compósitos cimentícios.

De acordo com o trabalho realizado por Parveen et al. (2015), para a preparação das soluções de água e nanotubos, foi adicionado um dispersante com o nome comercial de Pluronic F-127. As concentrações de Puronic foram variadas para o estudo da influência deste dispersante em relação a dispersão dos CNTs. Seguido da adição do dispersante, a solução foi misturada por um misturador magnético por 10 minutos. Por fim, a solução foi levada para ultrassonificação por 1 hora.

Como conclusões do trabalho, Parveen et al. (2015) apresentaram que o Pluronic F-127, quando usados para dispersão do CNT em água para aplicação em compósitos cimentícios, exibe boas dispersões. Os autores trazem que tal método apresenta boa homogeneidade na mistura. No que se diz respeito a microestrutura do compósito, os autores trazem que com uma boa dispersão das nanopartículas, há uma melhora na microestrutura do cimento, densidade e propriedades mecânicas.

Em um trabalho mais recente de Alshaghel et al. (2018) apresentam a mesma técnica utilizada por Parveen et al. (2015) para a dispersão de MCC e CNT com a utilização de Pluronic e brometo de cetiltrimetilamônio, do inglês, *cetyltrimethylammonium bromide* (CTAB). Os autores referem também que para a utilização desta solução em compósitos cimentícios, também foi adicionado a

mistura o fosfato de tributila (TBP). O TBP foi adicionado para suprir a formação de espuma que os dispersantes causam. A quantidade de TBP utilizada no trabalho foi de 50% da quantidade de Pluronic e 75% e 100% da quantidade de CTAB.

No trabalho de Wang, Han e Liu (2013) a preparação da solução não foi diferente dos apresentados. O dispersante utilizado pelos pesquisadores foi o Goma Arabica (GA), e este foi adicionado à água e os CNTs para a ultrassonificação. Os autores indicam que a razão utilizada de TBP foi de 0,13% em relação a água para a redução de bolhas na solução.

### **2.2.2 Concreto Reforçado com Nanopartículas**

A incorporação de Nanotubos de carbono (CNTs) em concretos vêm sendo estudado por diversos pesquisadores para melhorar suas propriedades mecânicas, devido seu alto módulo de elasticidade e elevada resistência, e no desenvolvimento de concretos auto sensíveis. Por exemplo, Lee, Kim e Yoo (2018) apresentaram que a hibridização de fibras de aço e nanotubos de carbono, para a produção de um concreto auto sensível de ultra alta performance, apresentaram ganhos na resistência a compressão, módulo de elasticidade e resistência a tração.

Os autores Meng e Khayat (2016) avaliaram a adição de nanoplaquetas de grafite e nanofibras de carbono na avaliação das propriedades mecânicas de um concreto de ultra alta performance. As taxas de adição das nanopartículas variam de 0 a 0,3%, com uma taxa fixa de 0,5% de fibras de aço. Como resultado, os autores obtiveram aumento de 56% na resistência a tração e mais de 100% na absorção de energia. Para os resultados a flexão, os autores trazem que a resistência a flexão e a tenacidade foram aumentadas em 59% e 276% respectivamente.

Os nanotubos de carbono multi paredes, do inglês Multi-walled carbono nanotubes (MWCNTs), foram adicionados em argamassa de cimento Portland em trabalho realizado por Hu et al (2014) a fim de estudar o efeito das nano

partículas na resistência a compressão e tenacidade. Além das propriedades mecânicas do material, os pesquisadores investigaram também as técnicas de dispersão e fabricação dos corpos de prova. Assim como outros autores, tais como Alshaghel et al (2018), Parveen et al (2015) e Wang, Han e Liu (2013), o processo de dispersão das nano partículas partiu-se da utilização de dispersantes e ultrassonificação. Os autores apresentaram também, além de benefícios nas propriedades mecânicas, que os CNTs agem como pontes de tensões na matriz cimentícia, fornecendo melhorias na transmissão de tensão.

Wan, Han e Liu (2013) investigaram a adição de MWCNTs em matriz cimentícia para analisar a tenacidade a flexão. Além disso, os autores avaliaram a microestrutura do compósito cimentício pela avaliação da porosidade e distribuição de poros além da microscopia eletrônica de varredura que garantiu a verificação dos CNTs agindo como pontes de tensões em vazios, poros e microfissuras presentes na matriz.

### 2.2.3 Macro Fibras

As fibras metálicas que mais são utilizadas são as de aço carbono (CARNIO, 2017). A norma ABNT NBR 15530:2007 – Fibras de aço para Concreto traz a conceituação das fibras de aço, caracterização, classificação, tolerância de dimensionamento e as propriedades da fibra. Segue na Figura 3 a fibra de aço da marca DRAMIX.



Figura 3 - Fibras de aço  
Fonte: Catálogo DRAMIX (2014)

De acordo com Ghadban, Wehbe e Underberg (2018) concreto armado é amplamente usado na construção civil devido a seu baixo custo, variabilidade para aplicação e a disponibilidade da matéria prima na natureza que o constitui. Entretanto, o concreto possui algumas desvantagens como baixa resistência a tração e sua ductilidade.

Devido a essas características, o aparecimento de fissuras é facilmente provocado sob carregamentos impostos na estrutura. Com isso, a armadura fica exposta a umidade e cloretos, possibilitando sua corrosão. Conseqüentemente, isso leva a deterioração e perda da capacidade de resistência da estrutura. As fibras são adicionadas ao concreto para melhorar a resistência a tração do material e sua ductilidade, o que é chamado de concreto reforçado com fibras (CRF) (GHADBAN, WEHBE e UNDERBERG, 2018).

Sendo assim, a incorporação de fibras no concreto, sendo elas de elevada resistência e ductilidade, pode melhorar algumas características da matriz. De acordo com Ferrari (2007), a presença das fibras não melhora significativamente a resistência a tração da CRF, mas sim um melhor comportamento quando fissurado e uma maior capacidade portante, conforme ilustrado na Figura 4.

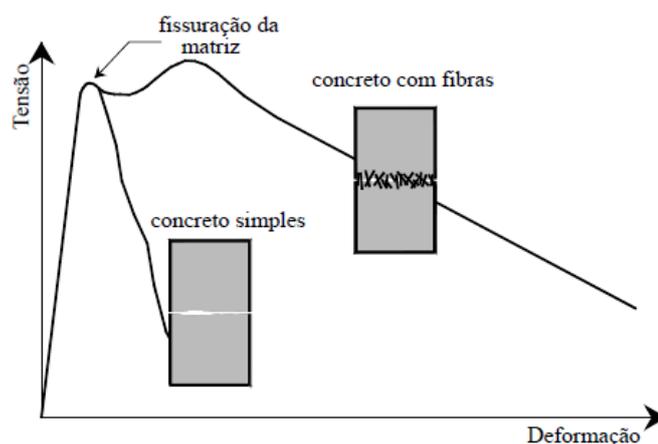


Figura 4 - Concreto com fibras x concreto sem fibras  
Fonte: Adaptado de Ferrari (2007)

Não somente a resistência a tração e ductilidade são melhoradas no comportamento do CRF (Lee, et al. 2017). De acordo com Kakooei et al. (2011)

diversos resultados em pesquisas realizadas por pesquisadores mostram que a resistência a compressão, tração e a flexão também apresentam melhorias. Os autores relatam que uma das razões mais importantes do CRF é a sua elevada resistência e elasticidade.

O comportamento mecânico do CRF é um fator relevante para estudo. Para sua caracterização, a partir de ensaios normativos, vários fatores são levados em consideração. Este capítulo traz esses fatores com suas definições e a consequência que causam no CRF. A trabalhabilidade, volume crítico das fibras, resistência a compressão, resistência a tração, resistência a flexão, comportamento pós fissuração e tenacidade são estudados.

#### 2.2.3.1 Trabalhabilidade

A adição de fibras de aço altera as condições de consistência do concreto. Apesar do ganho de desempenho, quando o concreto do estado endurecido, conferido pela adição das fibras, isso pode alterar a trabalhabilidade da mistura. Isso ocorre principalmente porque, ao se adicionar um novo material, a quantidade de área superficial que demanda água também é aumentada (FIGUEIREDO, 2000)

As fibras que são adicionadas ao concreto, possuem geometrias singulares. Cada tipo de fibra possui suas próprias características físicas e químicas. Uma das características que auxiliam na especificação das fibras é o fator de forma. (DAKUZAKU, REVERA e ALTHEMAN, 2017). Sua definição de acordo com a norma é a relação entre o comprimento e o diâmetro equivalente. Assim, quanto maior o fator de forma da fibra, maior o impacto na trabalhabilidade. Salvador Filho (2017) afirma que quanto maior o volume de fibras, maior é sua resistência a tração e tenacidade, porém sua trabalhabilidade também é afetada.

Sendo a quantidade de adição de fibras um critério importante para sua dosagem, Mehdipour et al., 2013, estudaram a influência nos aspectos das

propriedades mecânicas do CRF. A distribuição das fibras depende diretamente da trabalhabilidade da mistura e volume de adição.

Há valores mínimos e máximos de adição de fibras para o concreto. A Figura 5 é referente a um trabalho realizado por Mehdipour et al. (2013). Em (a) é mostrado a dispersão uniforme das fibras no corpo de prova e o oposto onde o agrupamento das fibras é mostrado em (b) devido ao alto teor de fibras empregado.



Figura 5 - Dispersão das fibras na matriz do concreto  
Fonte: Mehdipour et al. (2013)

A influência da trabalhabilidade do CRF está diretamente ligada ao valor obtido no ensaio de abatimento do tronco de cone. Com o aumento da dosagem das fibras, aumenta-se o valor da resistência a flexão e tenacidade, diminuindo assim, o valor do abatimento (GHADBAN, WEHBE e UNDERBERG, 2018). Isso é atribuído para dosagens excessivas de fibras, que reduzem significativamente o slump, tornando o CRF com má trabalhabilidade (BAKHSHI, BARSBY e MOBASHER, 2014).

### 2.2.3.2 Caracterização das Fibras

Para caracterização das fibras de aço, o comitê 303 do IBRACON/ABECE desenvolveu um documento como prática recomendada para controle da qualidade do concreto reforçado com fibras (2016). O documento traz que para a qualificação prévia das fibras, essas devem ser qualificadas previamente de acordo com a ABNT NBR 15530. Essa norma traz informações sobre fibras a serem adicionadas ao concreto além de definições e especificações somente de fibras de aço.

A norma ABNT NBR 15530:2007 – Fibras de aço para Concreto traz a conceituação das fibras de aço, caracterização, classificação, tolerância de dimensionamento e as propriedades da fibra. A norma indica três tipos de fibras em função de sua geometria:

- Tipo A: fibra de aço com ancoragens nas extremidades
- Tipo C: fibra de aço corrugada
- Tipo R: fibra de aço reta

Ainda existem três classes previstas pela norma que se associa ao tipo de aço que originou a fibra:

- Classe I: fibra oriunda de arame trefilado a frio
- Classe II: fibra oriunda de chapa laminada cortada a frio
- Classe III: fibra oriunda de arame trefilado e escarificado

Segue na Tabela 1 as informações que classificam as fibras de aço quanto sua geometria e ao tipo de aço que se deu origem.

Tabela 1 - Classificação das fibras de aço

<b>Tipo (geometria)</b>	<b>Classe de fibra</b>	<b>Geometria</b>
<b>A</b>	I	
	II	
<b>C</b>	I	
	II	
	III	
<b>R</b>	I	
	II	

Fonte: Adaptado de Figueiredo (2008).

Uma das principais características ligadas a geometria da fibra que interfere diretamente em seu desempenho é o fator de forma. Sua definição de acordo com a norma é a relação entre o comprimento e o diâmetro equivalente. O diâmetro equivalente é definido como sendo uma circunferência que corresponde a mesma área que a seção transversal da fibra. Para tanto, há as tolerâncias dimensionais para o comprimento da fibra e seu diâmetro. Correlacionando a geometria do material com o tipo de aço de origem, a norma prescreve os valores de fator de forma mínimo para as fibras presentes na Tabela 2.

Tabela 2 - Limites de fator de forma

<b>Fibra</b>	<b>Fator de Forma mínimo</b>	<b>Limite de resistência a tração do aço (MPa)</b>
AI	40	1000
AII	30	500
CI	40	800
CII	30	500
CIII	30	800
RI	40	1000
RII	30	500

Fonte: Adaptado de Figueiredo (2008)

Sendo assim, é listado 3 procedimentos que podem caracterizar as fibras:

- Caracterização dimensional

Com base nas especificações da ABNT NBR 15530:2007, as fibras possuem os tipos e as classes (A, B, C ou R e I, II e III). Uma amostragem de uma quantia do todo é separada para verificação das medidas como comprimento, diâmetro da fibra e o cálculo do fator de forma. De acordo com a Tabela 2, para cada tipo e classe de fibra há um valor de forma mínimo e um limite de resistência a tração do aço. Deve-se executar este procedimento em 60 fibras escolhidas aleatoriamente.

- Ensaio de dobramento

Tal ensaio é realizado para verificação de possíveis rompimentos das fibras. É utilizado um pino circular metálico, de diâmetro aproximado de 3,2 mm, para dobramento manual de 90° das fibras. Esse processo é feito de modo manual de uma amostra que representa o todo para verificar possíveis fibras danificadas. Deve-se executar este procedimento em 10 fibras escolhidas aleatoriamente.

- Análise visual

Visto que as fibras de aço provêm de um processo industrial, é realizado uma análise visual para verificação de possíveis fibras danificadas. Deve-se executar este procedimento em uma quantia referente à 200 gramas de fibras.

## 2.3 COMPORTAMENTO MECÂNICO

Diversas pesquisas realizadas por autores apresentados neste capítulo mostram que a adição de fibras no concreto melhora as características do CRF. Ensaio de códigos normativos estrangeiros que trazem ensaios do CRF à flexão analisam o ganho dessas resistências. O ganho dessas resistências comprova a viabilidade do CRF pois para concretos convencionais serem utilizados em

estruturas é necessário a imposição de armaduras para resistirem a esforços de tração, flexão e cisalhamento.

O fator predominante que é observado nesse compósito é a tenacidade e o comportamento pós fissuração. A tenacidade, definida como sendo a capacidade de absorção de energia, fornece ao CRF uma deformabilidade maior a estrutura. Sendo que o valor da tenacidade do compósito é obtido pelos ensaios de flexão com relações de carga e deformação, sendo este parâmetro o mais observado após a fissuração do concreto.

### **2.3.1 Resistência a compressão**

A fibra é adicionada ao concreto para melhorar as características mecânicas do concreto como resistência a tração, fragilidade, controle de fissuras, tenacidade e comportamento pós fissuração. O comportamento a compressão para o CRF pode até apresentar valores menores para resistência a compressão devido a uma menos eficiente compactação do material (FIGUEIREDO, 2000).

O fib model code 2010 traz que para porcentagens baixas de adição de fibras (objeto deste trabalho), o concreto reforçado com fibras não apresenta ganho de resistência à compressão significativo. Quando se trata de altas porcentagens de adição de fibras na matriz, pode-se obter então, ganhos significativos de resistência a compressão. Segue a Figura 6 que mostra as curvas tensão-deformação de concretos de resistências normais (NSC) e concretos de alta resistência (HSC).

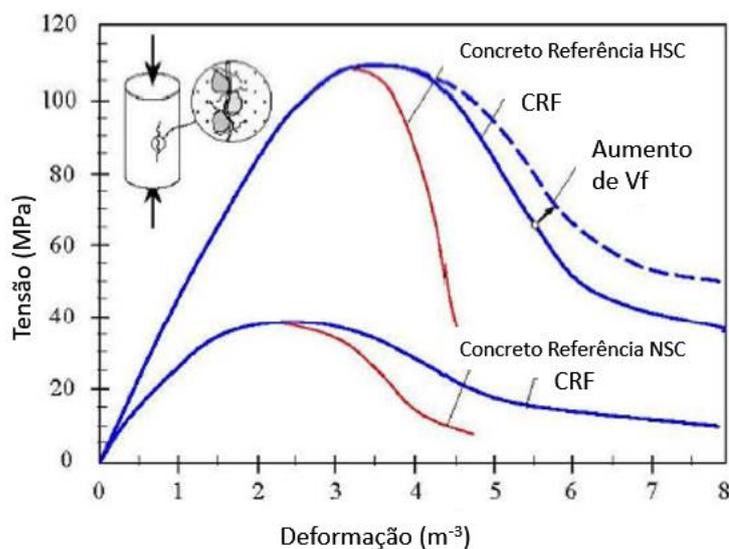


Figura 6 - Resistência a compressão do concreto reforçado com fibras  
 Fonte: adaptado de FIB (2010)

Embora que para concretos de resistências normais não apresentam ganhos significativos para a resistência a compressão, o CRF de altas resistências pode apresentar ganhos mais notáveis a compressão (TAHENNI, CHEMROUK E LECOMPTE, 2016)

De acordo com Lee, Kim e Yoo (2018) há um aumento significativo na resistência a compressão de concretos de ultra alta resistência com CNTs e Fibras de aço. Porém, segundo o autor, a adição somente dos CNTs não fornece um grande impacto nessa característica.

### 2.3.2 Resistência a flexão

Fibras são adicionadas a matriz do concreto, para que combinadas, resistam a carregamentos externos antes que ocorra a fissuração do CRF. O comportamento de vigas feitas de CRF pode ser considerado um comportamento elástico, pois os materiais que o compõe ainda estão na região elástica, antes do CRF fissurar. (LEE et al., 2016)

Segundo Ferrari (2007), a adição de fibras no concreto mantém a capacidade portante pós fissuração. Assim sendo, o CRF apresenta mudança na capacidade resistente após o concreto fissurado.

Com o início das fissuras, as fibras possuem um papel mais significativo no CRF. Com as tensões impostas sob a estrutura, as fibras impedem o aumento das tensões nas fissuras do concreto. Um fator importante que pode ser usado para avaliar o efeito da fibra na viga na flexão é a resistência residual. Essa resistência é o nível de tensão depois da fissuração do concreto. (LEE et al., 2016)

De acordo com Thomaz (2009) as fibras têm um grande efeito na resistência à tração na flexão. Há relatos de aumento de mais que 100% na resistência, para elevados fatores de fibras. Para melhor entender o comportamento do CRF à flexão, a Figura 7 traz a dispersão das fibras na matriz com a propagação das tensões, quando submetido a tração (DAMASCENO, FERREIRA E OLIVEIRA, 2014).

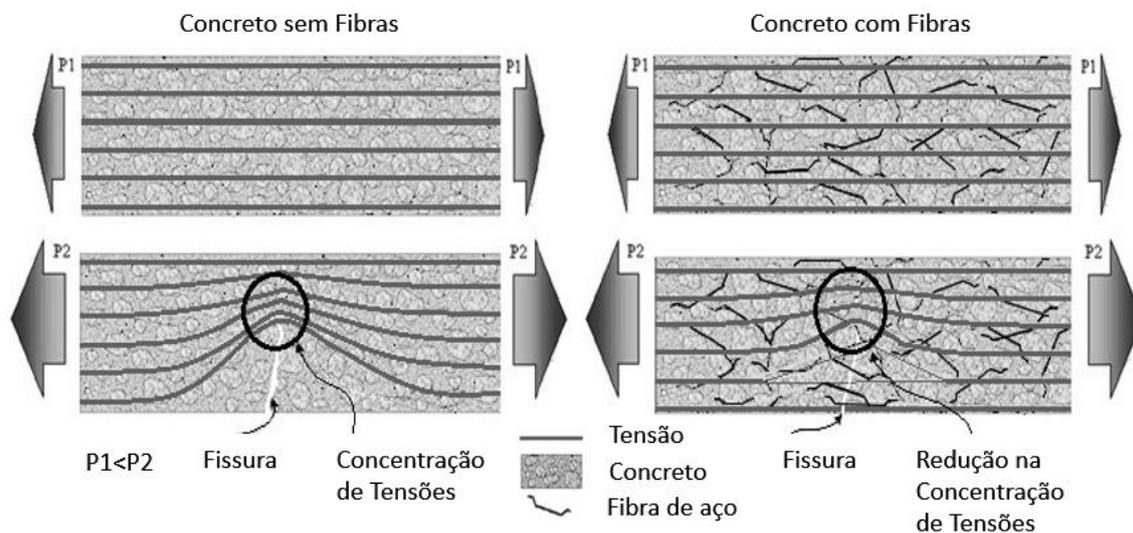


Figura 7 - Distribuição de tensões no concreto fissurado  
 Fonte: Adaptado de Damasceno, Ferreira e Oliveira (2014)

No primeiro esquema, encontra-se o concreto convencional fissurado e a concentração de tensões junto a fissura. Em contrapartida, no segundo esquema é mostrado que mesmo com a fissura, com a presença de fibras de aço na

mistura, a propagação das tensões acontece de forma mais suave, reduzindo a concentração das tensões. Outro detalhe importante que pode ser observado é que as linhas de tensões passam pelas fissuras. Isso é observado, devido ao fato de a fibra funcionar como uma transmissora de tensões.

Para melhor exemplificar tal fenômeno, Ferrari (2007) traz que as fissuras presentes na estrutura do CRF são interceptadas pelas fibras, como mostra a Figura 8. Com isso, o autor afirma que há um aumento na tenacidade do material, sendo necessário maior energia para que ocorra a ruptura do CRF.

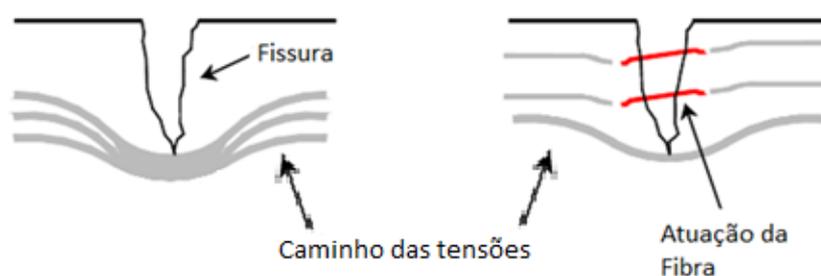


Figura 8 - Caminho das Tensões  
Autor: Adaptado de Ferrari (2007)

Pesquisa desenvolvida por Meng e Khayat (2016) avalia a microestrutura do concreto com a adição de nano fibras de carbono e nano grafite. Como discussão do trabalho os autores trazem que, imediatamente ao se aparecer fissuras na matriz do concreto, as fibras agem como pontes nas interfaces das fissuras. Ao se aumentar o carregamento, eventualmente essas microfissuras se tornaram maiores e ocorrerá o arrancamento das nano fibras. Sendo assim, para carregamentos em que há fissuração da matriz, as nano fibras garantem um aumento na resistência do compósito ao atuarem em microfissuras e também na melhoria da resistência.

### 2.3.3 Comportamento pós fissuração

Embora seja mais comum analisar o concreto quanto sua resistência a compressão, dimensionar o concreto armado à flexão e cisalhamento, para o

CRF o comportamento pós fissuração é muito importante. De acordo com Deluce e Vecchio (2013), a adição das fibras no concreto está sendo mais aplicada nas construções industriais. As fibras estão sendo reconhecidas pelo reforço que podem oferecer a mistura melhorando o comportamento a flexão, além do comportamento pós fissuração deste material frágil.

Diversos códigos normativos trazem procedimentos de ensaio de flexão para o estudo do CRF. Entre eles, a EN 14651 (2007) traz 4 gráficos de cunho qualitativo para demonstrar a resposta do CRF no ensaio. Esses gráficos seguem na Figura 9, onde mostram que após uma elevada carga absorvida pelo CRF, há a fissuração do compósito e em seguida 4 comportamentos diferentes.

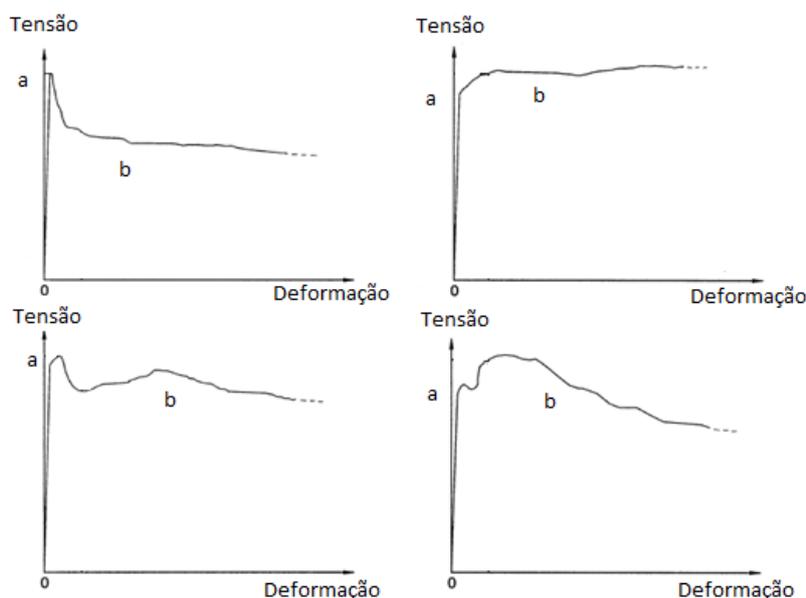


Figura 9 - Gráficos de Tensão x Deformação  
Fonte: Adaptado de EN 14651

Onde: (a) é o ponto de fissuração do CRF

(b) é o comportamento do concreto fissurado

Devido ao melhoramento do controle de fissuração do concreto devido a adição das fibras, é possível melhorar o comportamento do concreto pós fissurado. Por exemplo, estudos realizados mostraram que com o aumento das

fibras no concreto, decresce o espaçamento de fissuras e a abertura de fissuras (DELUCE e VECCHIO, 2013).

Por várias décadas, muitos pesquisadores demonstraram que a o concreto com fibras pode apresentar um comportamento dúctil mesmo após sua fissuração. Recentemente, muitos estudos estão voltados a ensaios de tensão de tração a flexão (LEE, CHO e VECCHIO, 2013).

Jordan, Seong-Cheol e Vecchio (2014) propõem um novo modelo de cálculo para espaçamento e abertura de fissuras para concretos reforçado com fibras e armadura. O CRF apresenta no comportamento pós fissuração, com o aumento das fissuras, o ganho de resistência devido as fibras presentes na fissura.

Para tais estudos, um fator muito importante a ser levado em consideração é o teor de fibras. Lee (2017) estudou a influência da resistência do CRF com a variação dos teores de fibras. A importância da quantidade de fibra na mistura se dá pelo fato de que para sua aplicação, necessitasse de um conhecimento maior sobre o comportamento pós fissuração.

Ressalta-se que a tensão residual do CRF após a sua fissuração é analisada pelo autor. Além dos teores de fibras, outras características do compósito são analisadas, o efeito do ganho de tensão pós fissuração também é afetado pelo volume crítico de fibras e capacidade de absorção de energia. A capacidade de absorção de energia, é denominada tenacidade. (LEE, 2017)

Uma medida que avalie o comportamento pós fissuração é a capacidade de absorção de energia do material após a fissuração. Essa medida avalia o efeito das fibras do CRF após a fissuração da matriz. Lee, Cho e Choi (2017) apresentam resultados em seu trabalho que há um aumento da resistência e absorção de energia, com o aumento do volume de fibras. Ambos comportamentos obtidos a partir da fissuração da matriz.

### 2.3.4 Tenacidade

As normas utilizam-se do ensaio de flexão e determinam que a tenacidade pode ser encontrada a partir da curva carga-deslocamento. A partir do teste de flexão, a curva carga-deslocamento é obtida e para a tenacidade é obtida em termos da área do gráfico (BANTHIA E ISLAM, 2013)

Segue na Figura 10 um gráfico esquemático presente na JSCE SF4:1984 que representa a medida de tenacidade, determinada por intermédio da realização de ensaios de flexão.

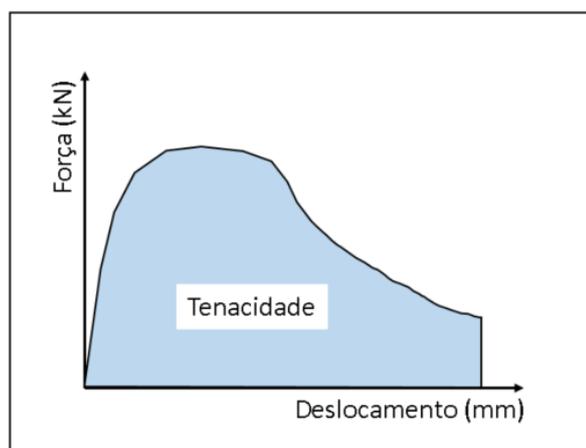


Figura 10 - Tenacidade de curvas carga x deslocamento

Com a presença de fibras no concreto, há um aumento na tenacidade do material. A tenacidade pode ser caracterizada como a capacidade de absorção de energia até a ruptura do CRF (BARBOZA ET AL., 2017, BANTHIA e ISLAM, 2013). O controle desta capacidade de absorção de energia é de extrema importância para caracterização do material, uma vez que está correlacionada ao comportamento pós fissuração. (FIGUEIREDO, MONTE e TOALDO, 2013)

De acordo com Yoo, Yoon e Banthia (2015) a capacidade de resistência do CRF aumenta com o aumento do teor de fibras. Isso pode ser visualizado na Figura 11, onde há uma comparação com o volume de fibras variando entre 0,5%, 1% e 2% e a tenacidade correspondente.

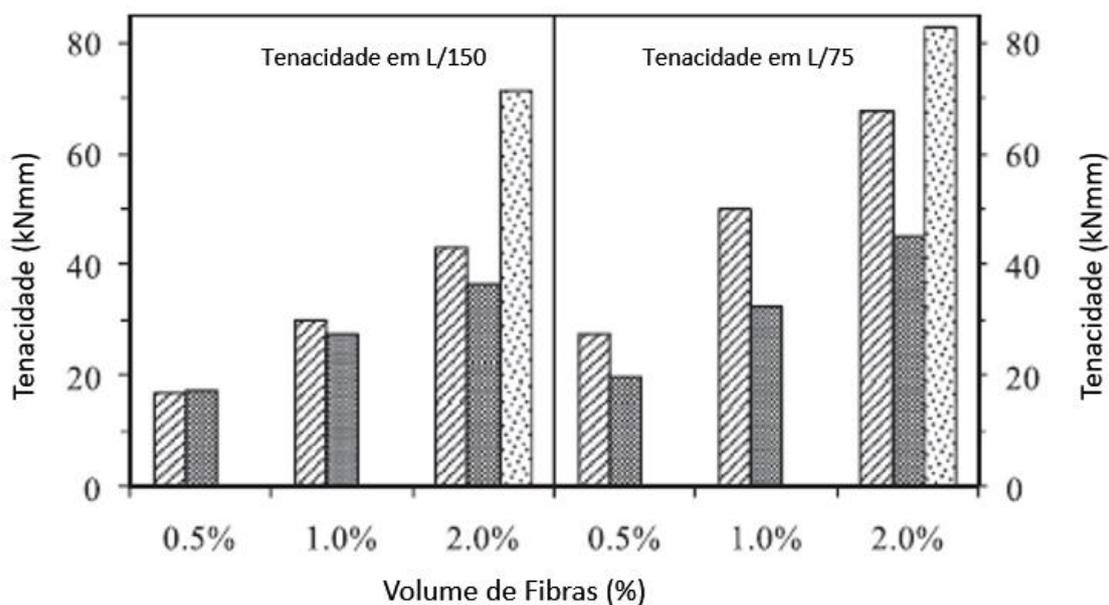


Figura 11 - Volume de fibras e tenacidade  
 Fonte: Adaptado de YOO, YOON e BANTHIA (2015)

A tenacidade pode ser medida por diversas técnicas. Muitas delas propostas em ensaios em corpos de prova prismáticos, partindo do ensaio de flexão de três ou quatro pontos. Os ensaios mais utilizados para determinação da tenacidade são os presentes nas normas japonesa, americana e europeia.

Trabalho realizado por Parveen et al. (2015) apresentam resultados que os compósitos cimentícios reforçados com CNTs possuem um comportamento mais dúctil quando comparados aos compósitos cimentícios referência. Isto foi observado a partir do ensaio de flexão para medir a energia de fratura, ou tenacidade.

### 2.3.5 Pull out

A eficiência da presença das fibras no compósito cimentício é controlado pela resistência das fibras ao seu arrancamento. Este fenômeno está diretamente relacionado com a capacidade resistência da ancoragem do compósito com a fibra. (ACI Committee 544)

Outro aspecto relacionado ao arrancamento das fibras na matriz cimentícia são as características da própria fibra. Segundo o ACI Committee 544, o fator de forma e o formato da fibra alteram crucialmente sua resistência de ancoragem.

Os pesquisadores Wille e Loh (2010) mostram em sua pesquisa que as fibras de aço torcidas (tipo C segundo a NBR 15530) apresentam maior aderência quando adicionadas ao concreto. Outro aspecto relevante apresentado pelo autor, é o aumento da resistência ao arrancamento da fibra ao se adicionar baixos teores de MWCNT na matriz cimentícia.

Outros aspectos que fornecem um acréscimo a resistência de ancoragem das fibras no compósito cimentício é o fator de forma. Segundo a ACI Committee 544, as fibras com menor diâmetro oferecem maior resistência ao arrancamento por uma certa área que as com maior diâmetro. Ou seja, com fibras de menores diâmetros, há um aumento de quantidade de fibras por volume de concreto, aumentando a área superficial de aderência da fibra com a pasta de cimento. Vale ressaltar que o fator de forma é obtido pela razão entre o comprimento e o diâmetro, sendo que para uma redução do diâmetro das fibras, acarreta-se em um aumento do fator de forma.

Em pesquisa desenvolvida por Meng e Khayat (2016), os autores mostram que as microfibras resistem as microfissuras presentes no compósito cimentício advindos de carregamentos externos. A incorporação de nanopartículas no concreto, apresentam melhoria na interface da matriz cimentícia e da fibra de aço.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo apresenta-se a metodologia executada no programa experimental deste trabalho. A parte laboratorial deste estudo foi realizada no Laboratório de Materiais de Construção (LMC) e Laboratório de Estruturas (LEST) do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade do Minho (UMINHO), na cidade de Guimarães, em Portugal.

Para investigar e analisar as propriedades do CRF no estado fresco e endurecido, foram realizados ensaios de caracterização dos materiais, de avaliação da consistência da mistura no estado fresco e de investigação das propriedades mecânicas no estado endurecido. No Anexo B foi elaborado um fluxograma para exemplificação dos ensaios realizados.

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

##### 3.1.1 Cimento

O cimento utilizado foi um CEM I 42,5 R (Produzido com no mínimo 95% de clínquer Portland), assim designado de acordo com a NP EN 197-1 (2011) da marca SECIL com as características fornecidas pelo fabricante indicadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Características do cimento conforme fabricante

Composição do produto	95 a 100% de Clinquer Portland e 0 a 5% de outros constituintes
Resistência aos 2 dias	>20 MPa
Resistência aos 28 dias	>42,5 MPa e <62,5 MPa

Fonte: Adaptado de SECIL

### 3.1.2 Agregados

Foram utilizados dois tipos de agregado miúdo processados proveniente de pedreiras da região de Guimarães em Portugal. Um desses agregados tem granulometria mais fina e o outra mais grossa, como é observado na Figura 12.



Figura 12 - Aspecto visual dos dois tipos de agregados miúdos utilizados

Nas Tabela 4 e Tabela 5 apresentam-se a composição granulométrica da areia fina e grossa, respectivamente e nas Figura 13 e Figura 14 são indicadas suas curvas granulométricas. O relatório de ensaio de granulometria consta no ANEXO C.

Tabela 4 - granulometria da areia

Dimensões (mm)	Massa (g)	% Retido	% Passante
<b>63</b>	0,000	0	100
<b>31,5</b>	0,000	0	100
<b>16</b>	0,000	0	100
<b>8</b>	0,000	0	100
<b>4</b>	1,200	0	100
<b>2</b>	75,000	10	90
<b>1</b>	253,600	34	55
<b>0,5</b>	214,800	29	26
<b>0,25</b>	118,600	16	10
<b>0,125</b>	44,500	6	4
<b>0,063</b>	15,900	2	2
<b>P</b>	12,400	-	-
<b>% Finos</b>	-	1,7	-
<b>Total</b>	736,000	100	-

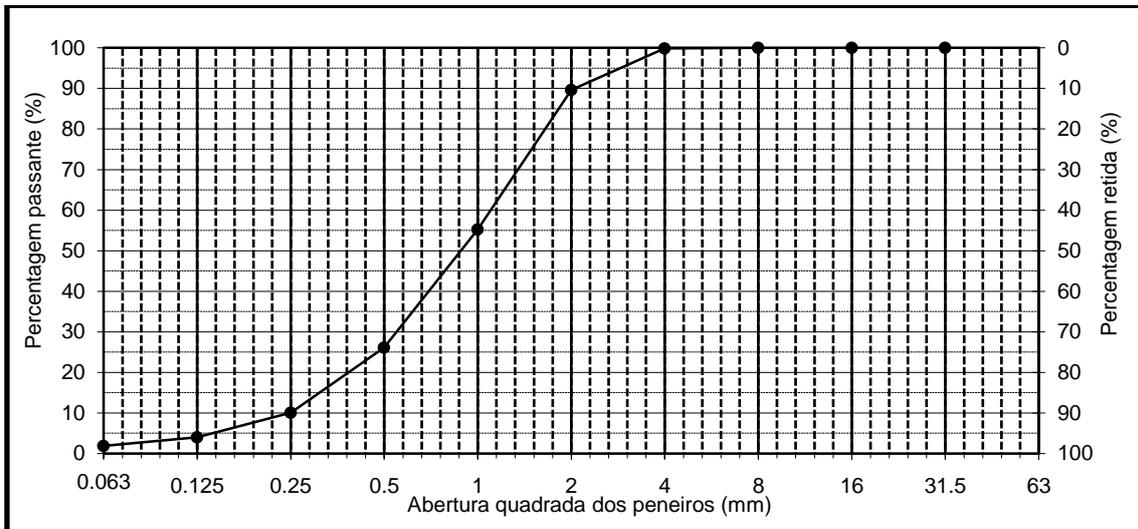


Figura 13 - Gráfico da curva granulométrica da areia fina

Tabela 5 - granulometria da areia

Dimensões (mm)	Massa (g)	% Retido	% Passante
<b>63</b>	0,000	0	100
<b>31,5</b>	0,000	0	100
<b>16</b>	0,000	0	100
<b>8</b>	0,000	0	100
<b>4</b>	45,100	6	94
<b>2</b>	153,500	21	73
<b>1</b>	255,600	34	39
<b>0,5</b>	187,100	25	14
<b>0,25</b>	84,600	11	3
<b>0,125</b>	18,800	3	0
<b>0,063</b>	0,600	0	0
<b>P</b>	0,900	-	-
<b>% Finos</b>	-	0,1	-
<b>Total</b>	746,200	100	-

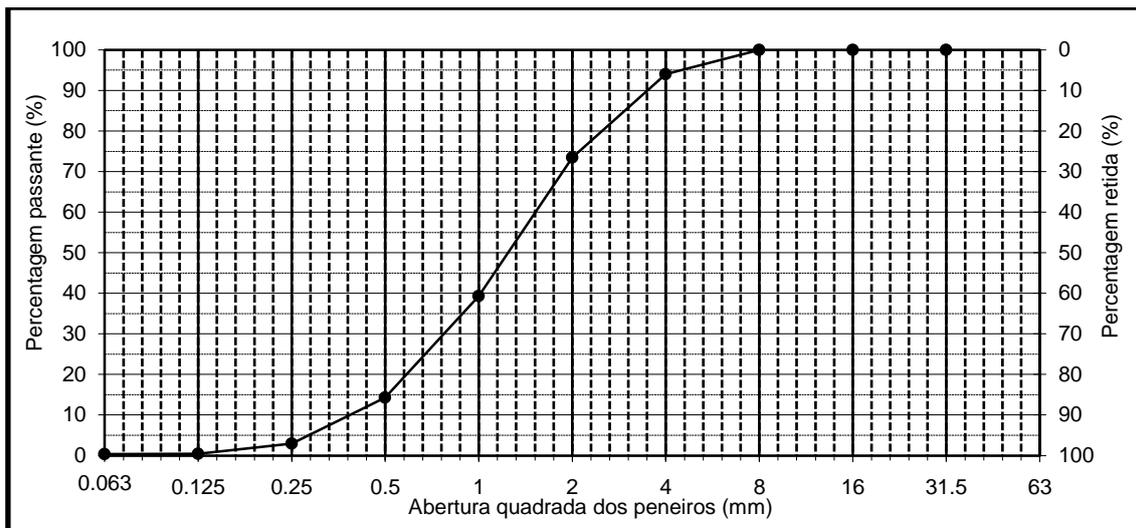


Figura 14 - Gráfico da curva granulométrica da areia grossa

O agregado graúdo (ver Figura 15) utilizado é proveniente de uma pedraira da região de Guimarães, tendo diâmetro nominal de 4 a 8 mm, nomeada como brita 0, de acordo com a ABNT NBR 7211 (2007).



Figura 15 - Aspecto visual do agregado graúdo brita

Para a caracterização foi realizado o ensaio de granulometria e de absorção de água segundo as normas europeias EN 933-1:2000 e 933-2:1999 e EN 1097-6:2000, respectivamente. Na Figura 16 tem-se a ilustração do ensaio de absorção de água e na Figura 17 ilustra-se a realização do ensaio de

granulometria. Ambos realizados no Laboratório de Materiais de Construção (LMC), cidade de Guimarães, Portugal.



Figura 16 - Ensaio de absorção de água dos agregados



Figura 17 - Ensaio de granulometria dos agregados

Segue a Tabela 6 com os resultados e a Figura 18 com o gráfico da curva granulométrica plotado. O relatório completo do ensaio de granulometria se encontra no ANEXO C.

Tabela 6 - granulometria da brita

Dimensões (mm)	Massa (g)	% Retido	% Passante
<b>63</b>	0,000	0	100
<b>31,5</b>	0,000	0	100
<b>16</b>	0,000	0	100
<b>8</b>	150,600	10	90
<b>4</b>	1312,200	88	2
<b>2</b>	20,000	1	1
<b>1</b>	10,200	1	0
<b>0,5</b>	0,200	0	0
<b>0,25</b>	1,600	0	0
<b>0,125</b>	0,600	0	0
<b>0,063</b>	0,600	0	0
<b>P</b>	0,300	-	-
<b>% Finos</b>	-	0,0	-
<b>Total</b>	1496,300	100	-

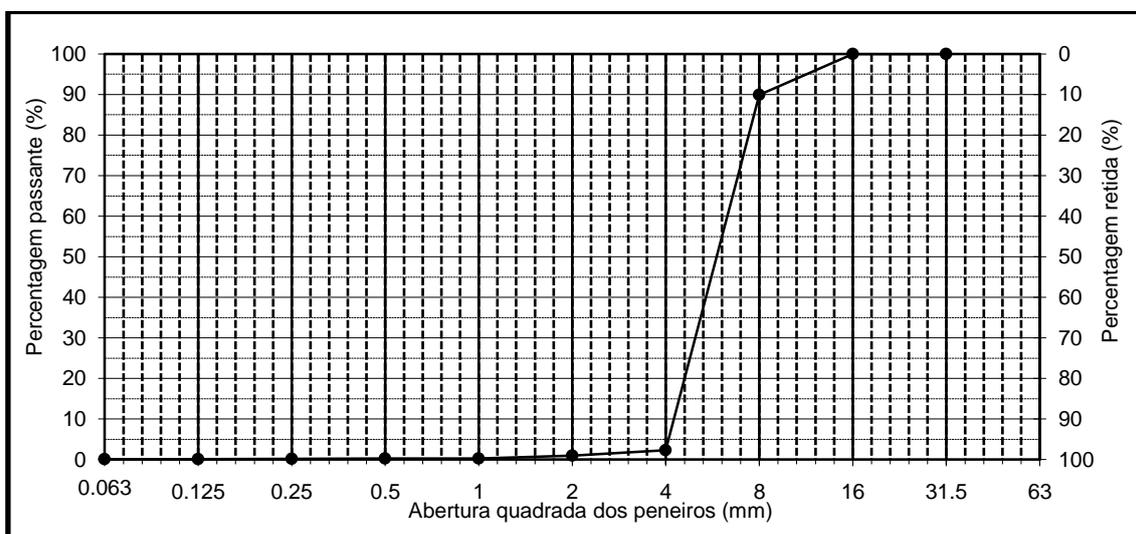


Figura 18 - Gráfico da curva granulométrica da brita

Os ensaios de absorção de água dos agregados miúdos seguiram as recomendações da norma europeia EN 1097-6:2000. A Tabela 7 traz os dados obtidos em tal ensaio.

Tabela 7 - Absorção de água dos agregados miúdos

	<b>Areia Grossa</b>	<b>Areia fina</b>
Massa específica do material impermeável	2,67 g/cm <sup>3</sup>	3,24 g/cm <sup>3</sup>
Massa específica das partículas saturadas	2,58 g/cm <sup>3</sup>	3,14 g/cm <sup>3</sup>
Massa específica das partículas secas	2,52 g/cm <sup>3</sup>	3,09 g/cm <sup>3</sup>
Absorção de água da areia	2,19%	1,52%

O ensaio de absorção de água do agregado graúdo seguiu as recomendações da norma europeia EN 1097-6:2000. A Tabela 8 traz os resultados obtidos.

Tabela 8 - Absorção de água do agregado graúdo

	<b>Brita 4/8</b>
Massa específica do material impermeável	2,71 g/cm <sup>3</sup>
Massa específica das partículas saturadas	2,67 g/cm <sup>3</sup>
Massa específica das partículas secas	2,64 g/cm <sup>3</sup>
Absorção de água da brita	105%

### 3.2 FIBRAS DE AÇO

Nesta pesquisa foram utilizadas as fibras Ibermix HER 0.55/35 BL da empresa Ibermix de Portugal. O aspecto dessas fibras é mostrado na Figura 19. É uma fibra reta de 35 mm de comprimento, 0,55 mm de diâmetro, dotada de ganchos nas extremidades, fator de forma igual a 64 e resistência à tração de 1.395 MPa.

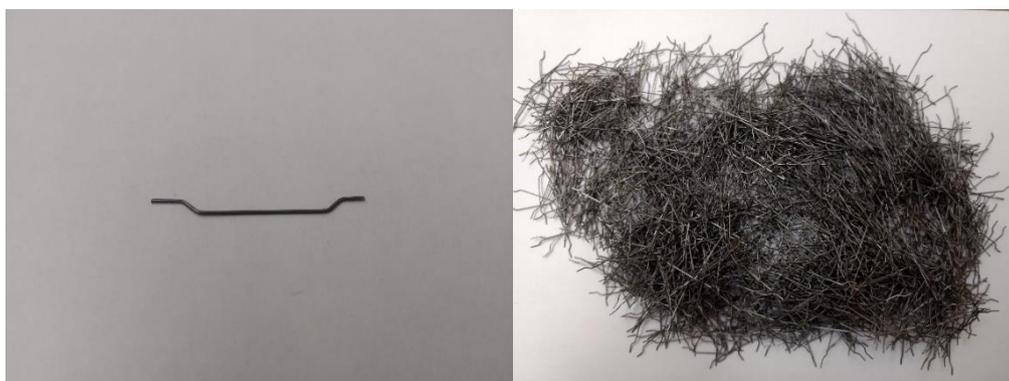


Figura 19 - Aspecto das fibras de aço

Os dados técnicos das fibras apresentados pela empresa seguem na Tabela 9, bem como os valores de tolerância de fabricação.

Tabela 9 – Propriedades das fibras de aço conforme fabricante

	<b>Nominal</b>	<b>Tolerância</b>
Grupo	Grupo I – Fio estirado a frio	
Forma	Reta com ganchos	
Comprimento fibra (l)	35 mm	33 – 37 mm
Diametro fio (d)	0,55 mm	0,52 – 0,58 mm
Fator de forma $\lambda=l/d$	64	59 – 69
Resistência à tração (RM)	1.395 MPa	1290 – 1500 MPa
Módulo de Elasticidade (E)	200.000 MPa	

Fonte: Adaptado de Ibermix

De acordo com a ABNT NBR 15530 (2007) as fibras devem ser submetidas a um controle de recebimento para ser aplicado em estruturas de concreto armado. Neste trabalho, foi realizado de acordo com a norma esses procedimentos para averiguar a qualidade das fibras a serem utilizadas. Na Tabela 10 está presente o plano de amostragem para se realizar tais procedimentos.

Tabela 10 - caracterização das fibras de aço pela ABNT NBR 15530:2007

<b>Ensaio</b>	<b>Amostra mínima</b>	<b>Porcentagem mínima de fibras em conformidade com os requisitos</b>
Dobramento	10 fibras	90%
Verificação dimensional	60 fibras	90%
Verificação de defeitos	200 g	95%

O ensaio referente ao dobramento da fibra consta com uma amostra de 10 fibras. O dobramento de 90° deve ser feito sobre um pino de 3,2 mm de diâmetro a uma temperatura acima de 16 °C. Mais que 90% das fibras ensaiadas não podem apresentar falhas. Segue na Figura 20 o aspecto da fibra ensaiada sobre um pino de 3,2 mm, em que nenhuma fibra apresentou falhas (Tabela 11).

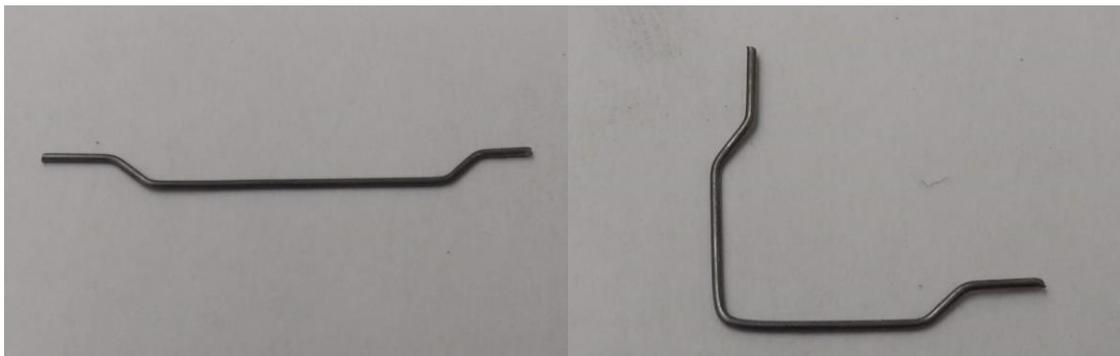


Figura 20 - Ensaio de dobramento da fibra de aço

Para o ensaio de caracterização dimensional, a norma prevê que deve ser realizado a medição das dimensões de 60 fibras. Neste trabalho, separou-se 60 fibras e mediu-se as dimensões com um paquímetro digital com precisão de 0,01 mm. A ausência de variação dimensional para as fibras de aço depende do processo de fabricação das mesmas. É muito importante que essa variação dimensional não seja elevada, pois o fator de forma da fibra age diretamente no comportamento do CRF quanto ao comportamento flexional.

A medida média obtida dos diâmetros foi de 0,54 mm, valor que atende a tolerância prescrita pelo fabricante de 0,52 a 0,58 mm, apresentados na Tabela 11. O valor da média dos comprimentos medidos foi igual a 33,62 mm, valor que também atende a tolerância prescrita pelo fabricante de 33 a 37 mm (Tabela 11).

A NBR 15530 traz uma tolerância de que para cada amostra de 200 gramas, apenas 5% de fibras (10 gramas) possam apresentar deformações. A Figura 21 traz os tipos de deformações encontradas na amostra.

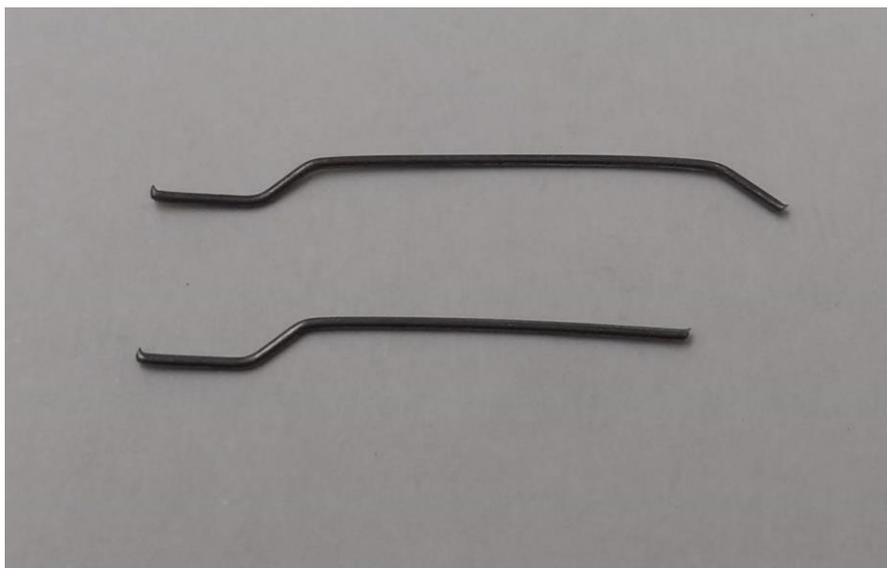


Figura 21 - Imperfeições contidas nas fibras de aço

Na amostra de 201,5 gramas separadas para a realização deste ensaio, um total de 9,12 gramas foi caracterizado como defeituoso. A quantidade de fibras defeituosas encontrada foi de 4,53%, conforme Tabela 11, abaixo do valor máximo prescrito pela norma (5%).

Tabela 11 – Resultados da caracterização das fibras de aço

<b>Ensaio</b>	<b>Valores obtidos</b>	<b>Tolerância normativa</b>
Dobramento	Nenhuma fibra apresentou falhas	Uma fibra com falha
Verificação dimensional	Diâmetro médio 0,54 mm Comprimento médio 33,62 mm	0,52 a 0,58 mm 33 a 37 mm
Verificação de defeitos	9,12 g de fibras defeituosas	10 g

### 3.3 NANOTUBOS DE CARBONO

Os nanotubos de carbono utilizado na pesquisa têm nome comercial “Multi-Walled Carbon Nanotubes” (GCM327) e foram fornecidos pela empresa Carbon Nanotubes Plus. Na Tabela 12 seguem as características do material conforme informações fornecidas pelo fabricante.

Na Figura 22 apresenta-se o aspecto visual de cor preta dos Nanotubos de carbono (CNTs) advindos em frascos de 100 g.

Tabela 12 - Característica dos nanotubos de carbono conforme informações do fabricante

<b>Nome</b>	Multi-Walled Carbon Nanotubes (GCM327)
Pureza	>98%
Diametro interno	2-5nm
Diametro externo	<8nm
Comprimento	10-30um
Cor	Preta



Figura 22 - Aspecto visual dos NanoTubos de Carbono (CNTs)

A dispersão em água dos nanotubos foi realizada com auxílio de dispersante “Pluronic F-127” do tipo não iônico, fornecido pela empresa Sigma Aldrich. As características do produto conforme informações do fabricante constam na Tabela 13.

Na Figura 23 mostra-se o dispersante de coloração branca advindo em frasco de 100g.

Tabela 13 - Característica do dispersante Pluronic F-127 conforme informações do fabricante

<b>Nome</b>	Pluronic F-127
<b>Cor</b>	Branca
<b>Aparência</b>	Pó
<b>pH em 50mg/mL em H2O</b>	6 – 7



Figura 23 - Aspecto visual do dispersante Pluronic F-127

### 3.3.1 Definição da taxa de dispersante

Embora, os CNTs tenham excelentes propriedades físicas e mecânicas, o sucesso da transferência dessas características para o concreto, segundo Parveen et al. (2015), é fortemente dependente da dispersão das nanopartículas na matriz. Existe uma forte tendência há aglomeração dessas nanopartículas, o que precisa ser contornado por meio de um processo de dispersão que garanta a homogeneidade.

Uma boa dispersão pode ser obtida usando-se energia proveniente de agitação mecânica, uma adequada energia de ultrassonificação na presença de uma correta taxa de um Dispersante. Então, foram realizados procedimentos e ensaio para a definição da taxa de Dispersante, sendo eles a agitação mecânica, ultrassonificação e o ensaio UV-Vis, ambos realizados nos Laboratório da Fibrenamics e no Laboratório de Engenharia Química da Universidade do Minho.

Foram preparadas 3 soluções de CNT e Pluronic em água destilada como mostrado na Figura 24. As soluções continham 20 mg de CNT em 20 g de água (CNT em 0,1%), foram pesadas em balança eletrônica com precisão (0,1 mg) e, a taxa de Dispersante foi variada em 1%, 3% e 5%.

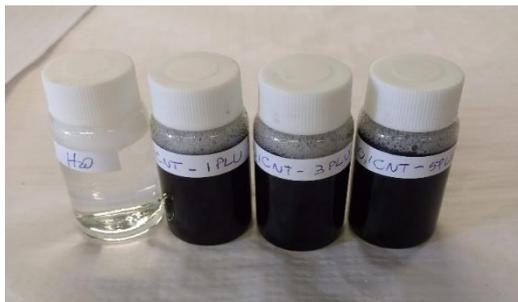


Figura 24 - Soluções de CNT e Pluronic

A agitação mecânica das soluções foi realizada por 1 hora em um equipamento como mostrado na Figura 25. O equipamento de agitação mecânica trabalha com um agitador magnético que fornece à solução uma agitação uniforme conforme calibração prévia.



Figura 25 – Equipamento para agitação mecânica das soluções

Após agitação, as soluções foram conduzidas ao equipamento de ultrassonificação (Figura 26) para promover melhor dispersão do CNT na solução. A Figura 27 mostra o equipamento de ultrassonificação acoplado a um refrigerador para manutenção da temperatura em  $40\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ .



Figura 26 - Equipamento para a ultrassonificação



Figura 27 - Temperatura para realização do procedimento de ultrassonificação

Para a execução do ensaio de espectroscopia de UV-VIS as soluções foram dispersas em 100 microlitros de solução para 10 mL de água por conta da sensibilidade do equipamento. O equipamento utilizado emite raios ultravioletas em direção à solução de diferentes comprimentos de onda (200 a 800 nm) e faz a leitura daquelas ondas não absorvidas pela solução. Assim, para uma solução que apresenta baixa dispersão, o equipamento irá absorver menor quantidade

de raios ultravioletas, enquanto que para uma solução que apresenta uma boa dispersão, o equipamento irá absorver maior quantidade de raios ultravioletas.

O procedimento aqui adotado foi semelhante ao realizado pelos pesquisadores Alshaghel et al. (2018).

Na Figura 28 mostram-se as soluções preparadas em balões de vidro de 10 ml para a leitura do equipamento de espectroscopia de UV-VIS. O equipamento utilizado foi o UV-Vis Recording Spectrophotometer UV-2401PC Shimadzu.



Figura 28 - Ensaio de UV - VIS

### 3.3.2 Definição do tempo de Ultrassonificação

Foram preparadas amostras de CNT (0,05%, 0,10% e 0,15%) e Dispersante em água destilada com 3% de Pluronic (valor considerado ideal). Cada amostra foi submetida a 1 hora, 2 horas e 3 horas de ultrassonificação, formando-se os grupos mostrados na Tabela 14.

Tabela 14 - Listagem das amostras para ultrassonificação

		<b>CNT</b>	<b>Pluronic</b>	<b>Água</b>
Grupo 1 – 1 hora de ultrassonificação	Solução 1	0,05%	3%	20 mL
	Solução 2	0,10%	3%	20 mL
	Solução 3	0,15%	3%	20 mL
Grupo 2 – 2 horas de ultrassonificação	Solução 4	0,05%	3%	20 mL
	Solução 5	0,10%	3%	20 mL
	Solução 6	0,15%	3%	20 mL
Grupo 3 – 3 horas de ultrassonificação	Solução 7	0,05%	3%	20 mL
	Solução 8	0,10%	3%	20 mL
	Solução 9	0,15%	3%	20 mL

### 3.3.3 Resultados da caracterização das dispersões dos nanotubos de carbono

A Figura 29 mostra o resultado do ensaio de UV-Vis para a taxa de Dispersante em 1%, 3% e 5%. Com 0,1% de CNT em solução aquosa, a presença de 3% de Dispersante resultou em maior absorvância. O acréscimo na Absorvância segundo Ashaghel et al. (2018), reflete maior dispersão das partículas.

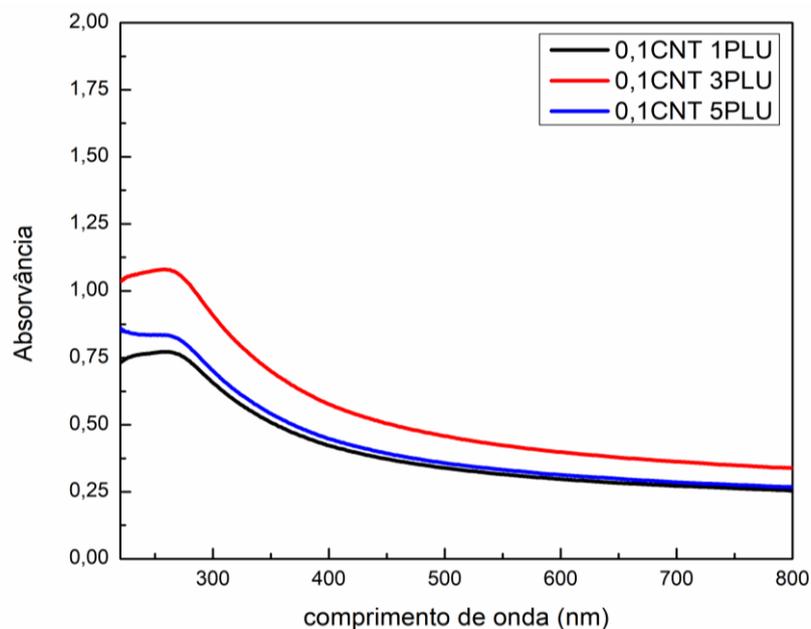
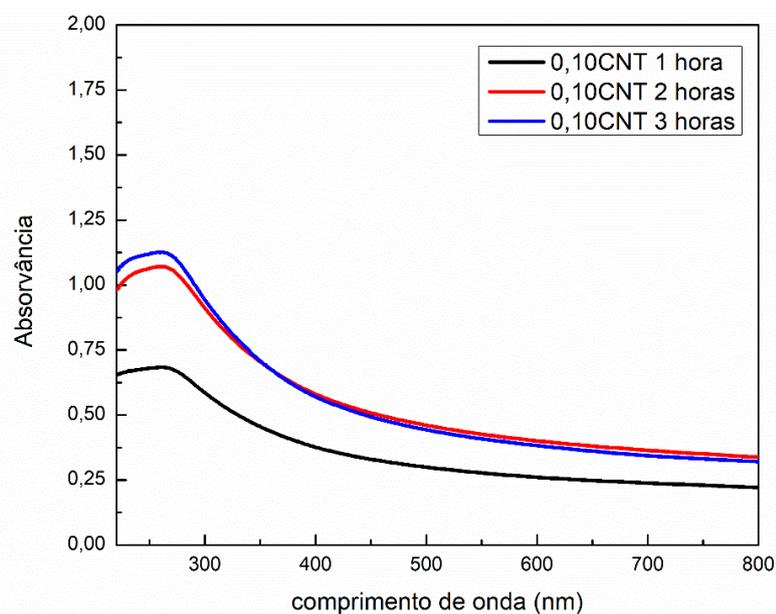
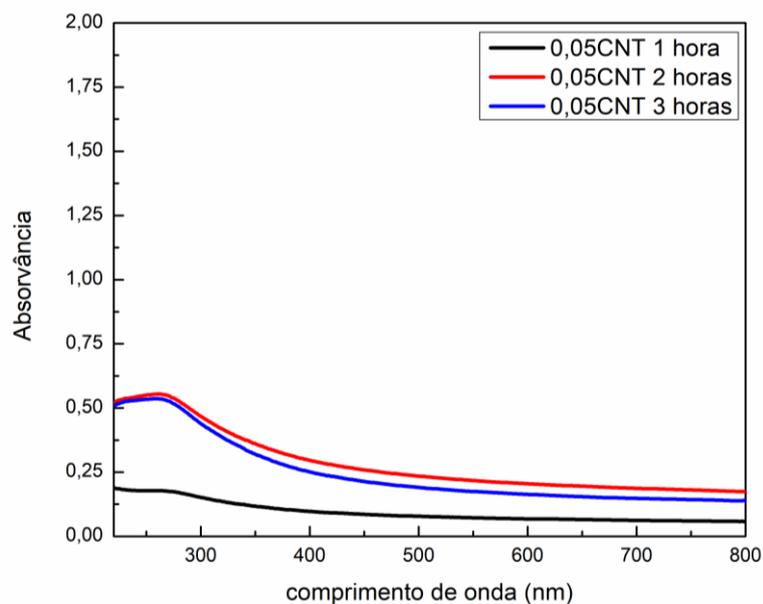


Figura 29 - Absorvância com variação da taxa de Dispersante

Na Figura 30, são mostrados a variação da Absorvância para amostras de CNT em taxas de 0,05%, 0,10% e 0,15% a partir dos resultados obtidos com o ensaio de UV-Vis. Os resultados são apresentados considerando-se 1h, 2h e 3h de ultrassonificação.



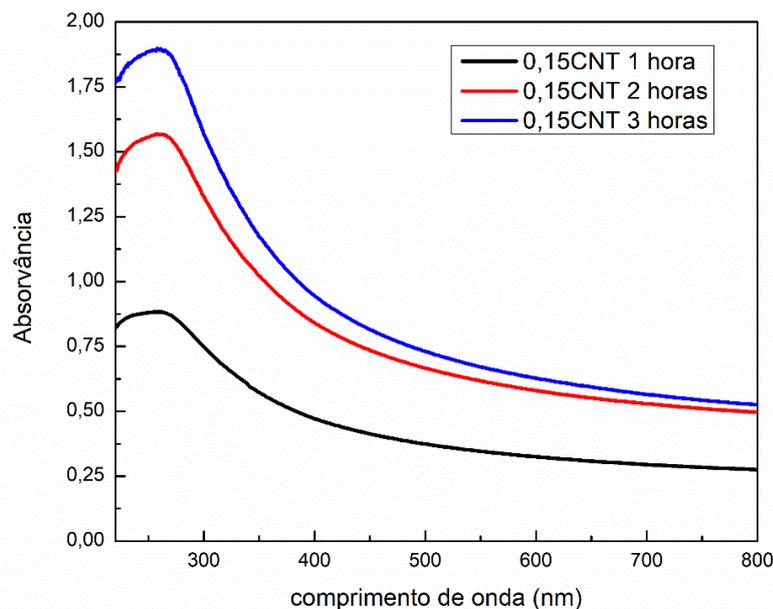


Figura 30 - Absorvância com variação de tempo de ultrassonificação

Da Figura 30, vê-se que para amostras com 0,05% e 0,10% de CNT a melhor dispersão foi aquela com 2 horas de ultrassonificação e para as amostras com 0,15% de CNT, a melhor dispersão foi dada com 3 horas de ultrassonificação.

### 3.4 FABRICAÇÃO DOS CONCRETOS CN E CRNF

Na Tabela 15 são indicados os oito grupos de concretos idealizados para estudar o efeito da taxa de nanopartículas (nanotubos de Carbono – CNTs) sobre o comportamento mecânico em termos de resposta à flexão e a compressão. O efeito da taxa de nanopartículas sobre a resposta mecânica do concreto reforçado com fibras de aço também foi estudada.

Um levantamento teórico foi realizado para a definição das taxas de CNTs. De acordo com Wang, Han e Liu (2013) as taxas de adição variaram de 0% a 0,15%, destacando-se para melhores resultados os valores de 0,08%. Alshaghel et al (2018) trabalharam com taxas de 0,2% a 0,6% obtendo melhores resultados com valores de taxa de adição em 0,2%. Parveen et al (2015) realizaram sua pesquisa com taxas de adição em 0,1%. Meng e Khayat (2016) trabalharam com

taxas de adição de 0% a 0,3% e os autores Hu et al (2014) com taxas de adição em 0 a 0,1%.

O concreto do grupo C1 é de referência, sem a adição de nanopartículas e de fibras de aço. Os grupos C2, C3 e C4 representam concretos em que foram adicionados CNTs em taxas de 0,05%, 0,10% e 0,15%, respectivamente, sendo denominados por CN005, CN010 e CN015.

O grupo C5 é formado por concreto reforçado com fibras (CRF), no caso fibras de aço em taxa de 1% representativa do volume crítico para a matriz em questão. Os grupos C6, C7 e C8 foram idealizados para estudar o efeito da taxa de nanopartículas sobre o comportamento mecânico do concreto reforçado com fibras de aço. Segue na tabela Tabela 15 a listagem de materiais utilizadas para fabricação dos concretos.

Tabela 15 – Grupos de concreto

grupos de concreto		Concreto (L)	Cimento (kg)	Água (L)	Areia (kg)	Brita (kg)
C1	REF	2,5	0,875	0,4375	1,97	1,97
C2	CN005	2,5	0,875	0,4375	1,97	1,97
C3	CN010	2,5	0,875	0,4375	1,97	1,97
C4	CN015	2,5	0,875	0,4375	1,97	1,97
C5	CRF	2,5	0,875	0,4375	1,97	1,97
C6	CRNF005	2,5	0,875	0,4375	1,97	1,97
C7	CRNF010	2,5	0,875	0,4375	1,97	1,97
C8	CRNF015	2,5	0,875	0,4375	1,97	1,97

grupos de concreto		Fibra Aço (1% massa de concreto) (g)	CNT (% em massa de cimento) (g)		Pluronic (3% em massa de água) (g)	TBP (0,5 em relação ao pluronic) mL
C1	REF	0	0	0	0	0
C2	CN005	0	0,05%	0,4375	13,125	6,385
C3	CN010	0	0,10%	0,875	13,125	6,385
C4	CN015	0	0,15%	1,3125	13,125	6,385
C5	CRF	196,25	0	0	0	0
C6	CRNF005	196,25	0,05%	0,4375	13,125	6,385
C7	CRNF010	196,25	0,10%	0,875	13,125	6,385
C8	CRNF015	196,25	0,15%	1,3125	13,125	6,385

Os concretos foram produzidos utilizando-se de uma argamassadeira (Figura 31), devido ao reduzido volume de materiais. Vale ressaltar que a utilização da argamassadeira foi única e exclusivamente devido à baixa quantidade de material para mistura em betoneira. A argamassadeira possui uma capacidade de aproximadamente 3 litros, com velocidade e tempo de mistura automatizados, com recipiente e pá misturadora em aço inoxidável e dimensões padronizadas (CEN – Comité Europeu de Normalização, 2006).



Figura 31 - Argamassadeira utilizada na produção dos concretos

O processo de dispersão de CNT em meio aquoso foi realizado tendo-se como referência os resultados obtidos anteriormente nesta pesquisa, em termos de taxa mais adequada de Dispersante Pluronic F-127 (3%) e tempo suficiente de ultrassonificação de 2 horas para 0,05% e 0,10% de CNT e 3 horas para 0,15% de CNT.

Devido ao reduzido volume de materiais, não foi possível realizar o ensaio de Slump Test para o concreto. Sendo assim, a trabalhabilidade do concreto foi analisada por meio do ensaio do espalhamento (Figura 32) realizado conforme as recomendações da EN 1015-3:2004.



Figura 32 - Ensaio de espalhamento do concreto fresco

Na Figura 33 tem-se a ilustração das fôrmas metálicas utilizadas para a moldagem e os corpos de prova após a desforma. A moldagem contou com auxílio de pequena vibração dada por meio de uma mesa vibratória.



Figura 33 – Fôrmas metálicas e aspecto dos corpos de prova após a moldagem

A desmoldagem foi realizada 24 horas após a moldagem e em seguida, os corpos de prova foram submersos em água durante 28 dias.

Nos corpos de prova prismáticos (50 x 50 x 200 mm) foi executado um entalhe central reto passante no meio do vão, conforme EN 14651 (2007). A Figura 34 mostra o detalhe do entalhe.

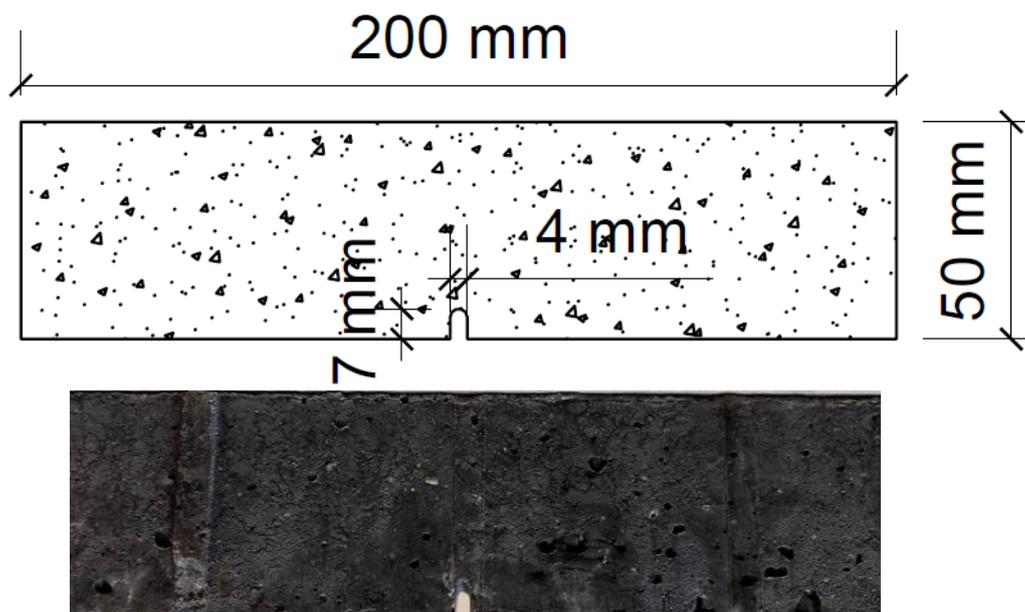


Figura 34 – Corpos de prova com entalhe

### 3.5 ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO

Para analisar a absorção de água dos diferentes grupos de concreto, foi realizado o ensaio de Absorção de água por imersão seguindo-se as recomendações da EN 394:1993. Para tanto, três corpos de prova 50 x 50 x 100 mm foram inseridos em estufa por 7 dias e mantidos a uma temperatura de 105°C para obtenção da massa seca. A obtenção do valor da massa seca foi garantido pela verificação de não variação dos valores das massas por 2 dias consecutivos.

Após este processo, os corpos de prova foram pesados e novamente submersos pelo mesmo período de 7 dias para obtenção da massa saturada. A obtenção do valor da massa saturada foi garantido pela verificação de não variação dos valores das massas por 2 dias consecutivos. Na Figura 35 ilustra-se o processo de obtenção da massa hidrostática dos corpos de prova.



Figura 35 – Processo de obtenção da massa hidrostática dos corpos de prova

### 3.6 ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL

Os corpos de prova cúbicos (50 x 50 x 50 mm) foram submetidos ao ensaio de compressão axial seguindo-se as recomendações da EN 12390 (2003). O ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção da Universidade do Minho quando da idade de 28 dias dos corpos de prova. A Figura 36 mostra o equipamento que opera a uma velocidade de carregamento de 2,5 kN/s.



Figura 36 - Ensaio de compressão axial

### 3.7 ENSAIO DE FLEXÃO EM TRÊS PONTOS

O ensaio de flexão em três pontos foi realizado conforme as recomendações da EN 14651 (2007). Os corpos de prova foram ensaiados com 28 dias de fabricação e suas medidas eram 50 x 50 x 200 mm. O ensaio foi realizado utilizando-se um equipamento SENTUR com sistema servo-controlado, com carga máxima de 100 kN, sendo que para tal ensaio foi utilizado uma célula de carga de 25 kN.

Foram utilizados LVDTs da marca KDP (*Linear Voltage Differential Transducer*) com campo de medida com resolução de 1  $\mu\text{m}$  acoplados ao corpo de prova por meio de suportes horizontal e vertical como mostrado na Figura 37.

O transdutor vertical foi posicionado na face lateral e central do corpo de prova para o registro das deformações verticais ( $\delta$ ).

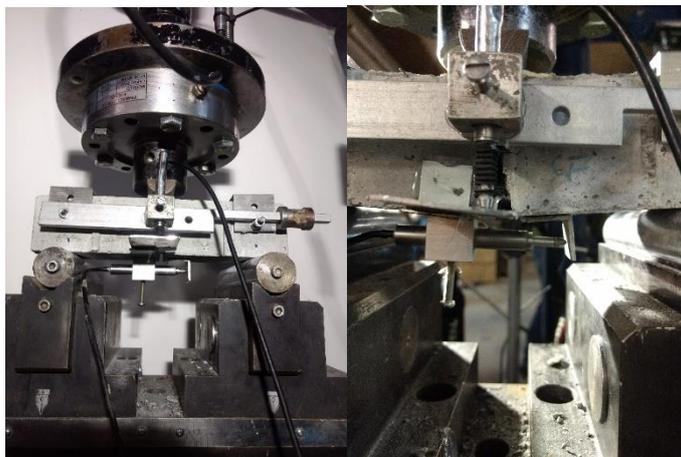


Figura 37 - Ensaio de Flexão

O transdutor horizontal foi posicionado na face inferior do corpo de prova para o registro do deslocamento da abertura da entrada do entalhe, denominada por CMOD (*crack mouth opening displacement*).

### 3.8 ENSAIO MEV

Após a realização dos ensaios mecânicos foram extraídas pequenas amostras do concreto dos corpos de prova representativos do concreto de referências e dos grupos CN005, CN010 e CN015. As amostras foram preparadas utilizando-se tratamento metálico em ouro para a realização do procedimento. O microscópio eletrônico de varredura (MEV) utilizado foi o FEI NOVA 200 (FEG/SEM) EDAX – Pegasus X4M da SEMAT na Universidade do Minho, Guimarães, conforme mostrado na Figura 38.

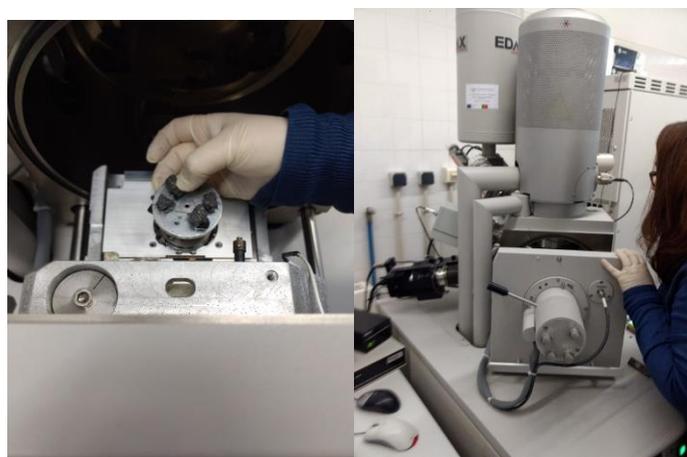


Figura 38 - Microscópio eletrônico de varredura (MEV)

### 3.9 PRODUÇÃO DOS CONCRETOS REF, CRF E CRNF005

Os concretos C1 (de referência), C5 (reforçado com fibra de aço – CRF) e C6 (nanopartículas em taxa de 0,05% e fibras de aço) foram novamente reproduzidos para a moldagem de corpos de prova prismáticos (150 x 150 x 600 mm) que foram submetidos a ensaios de flexão em três pontos conforme o esquema indicado na Figura 39 obedecendo as prescrições da EN 14651 (2007).

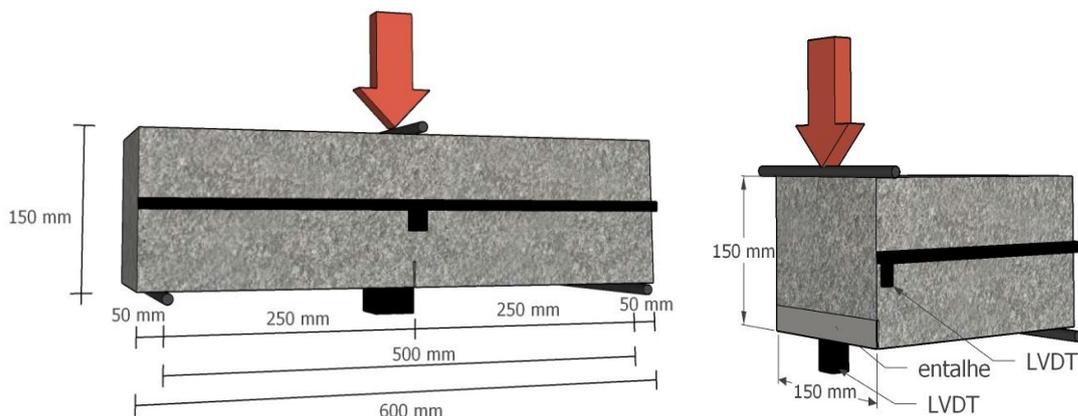


Figura 39 – Representação gráfica para carregamento do corpo de prova

O concreto C6 é o CRNF005 desenvolvido na etapa anterior e que apresentou melhores resultados em termos de resistência à compressão e à flexão em relação aos concretos C7 (CRNF010) e C8 (CRNF015).

Segue na Tabela 16 a listagem de materiais utilizadas para fabricação dos concretos.

Tabela 16 – Quantidade de Materiais para a fabricação de concreto

grupos de concreto		Concreto (L)	Cimento (kg)	Água (L)	Areia (kg)	Brita (kg)
C1	REF	70	24,5	12,25	55	55
C5	CRF	70	24,5	12,25	55	55
C6	CRNF005	70	24,5	12,25	55	55

grupos de concreto		Fibra Aço (1% massa de concreto) (kg)	CNT (% em massa de cimento) (g)		Pluronic (3% em massa de água) (g)	TBP (0,5 em relação ao pluronic) mL
C1	REF	0	0	0	0	0
C5	CRF	5,495	0	0	0	0
C6	CRNF005	5,495	0,05%	24,5	367,5	178,789

Para a produção do concreto, todo o processo de solução de CNT em meio aquoso foi realizado, sendo ultrassonificação dividida em vários *Beckers* conforme mostrado na Figura 40.



Figura 40 - Ensaio de Ultrassonificação

O concreto foi fabricado em betoneira elétrica com capacidade de 200 litros e todos os materiais foram dosados em massa. Após a moldagens, os corpos de prova foram submersos em água durante os 28 dias de cura.

Os entalhes foram executados com uma serra circular em mesa fixa na seção central dos corpos de prova com uma profundidade de 25 mm (Figura 41).



Figura 41 - Execução dos entalhes nos corpos de prova prismáticos segundo a EN 14651 (2007)

### 3.10 ENSAIO DE FLEXÃO EM TRÊS PONTOS

Na Figura 42 tem-se a configuração geral do ensaio de flexão em três pontos realizado seguindo-se as recomendações da EN 14651 (2007). O

equipamento servo-controlado utilizado trata-se de um equipamento SENTUR, com carga máxima de 100 kN, sendo que para tal ensaio foi utilizado uma célula de carga de 25 kN



Figura 42 - Execução do ensaio de flexão

### 3.11 ENSAIO DE ARRANCAMENTO DA FIBRA: ENSAIO DE *PULL OUT*

Com o objetivo de analisar se as nanopartículas de CNTs exercem influência sobre as características de aderência entre a fibra e a matriz cimentícia, foram realizados ensaios de arrancamento.

Foram moldados corpos de prova com dimensões de 100 x 100 x 60 mm conforme mostrado na

Figura 43 com o concreto C1 (de referência) e o concreto CRNF005. Para cada grupo de concreto, foram moldados dois corpos de prova de concreto, sendo que cada corpo de prova continha quatro fibras de aço com embutimento equivalente a metade de seu comprimento.

O ensaio foi realizado conforme configuração geral ilustrada na Figura 43 utilizando-se um equipamento servo-controlado com velocidade de carregamento de 8,33  $\mu\text{m/s}$ .

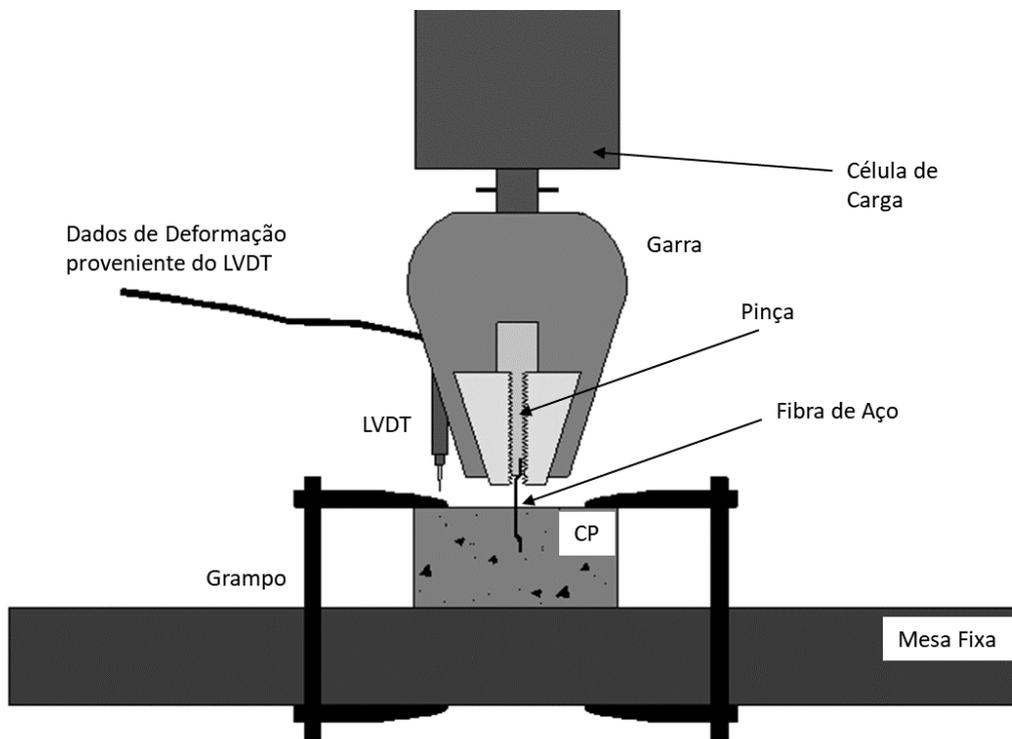
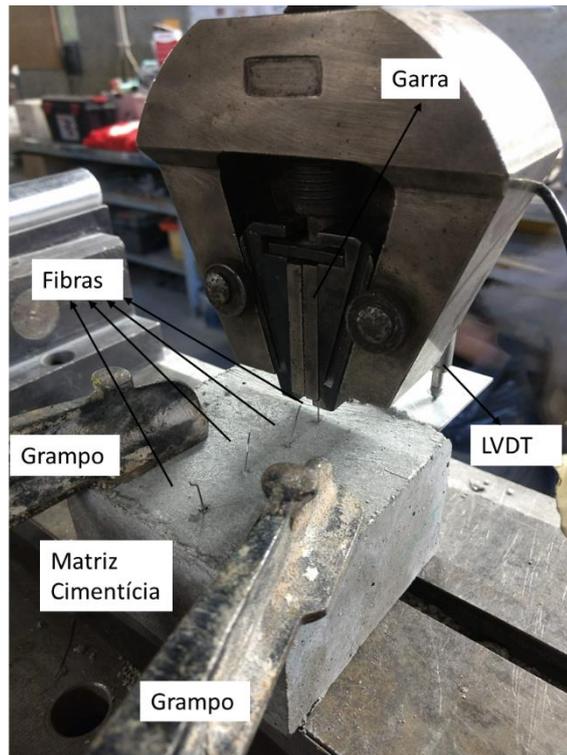


Figura 43 – Corpo de prova e execução do ensaio de arrancamento da fibra (*Pull out*)

## 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 4.1 TRABALHABILIDADE DOS CONCRETOS

Na Tabela 17 são apresentados os valores obtidos através da realização do ensaio de espalhamento nos concretos e na Figura 44 os resultados são comparados graficamente. Os resultados apresentados são médios e obtidos a partir da leitura de 3 ensaios realizados no mesmo concreto.

Tabela 17 - Espalhamento médio dos concretos

Concreto	Espalhamento médio (mm)	Desvio Padrão (%)	Coefficiente de Variação (%)
REF	131,7	2,4	1,8%
CN005	138,3	6,2	4,5%
CN010	138,3	6,2	4,5%
CN015	135,0	4,1	3,0%
CRF	121,7	6,2	5,1%
CRNF005	128,3	2,4	1,8%
CRNF010	126,7	6,2	4,9%
CRNF015	125,0	4,1	3,3%

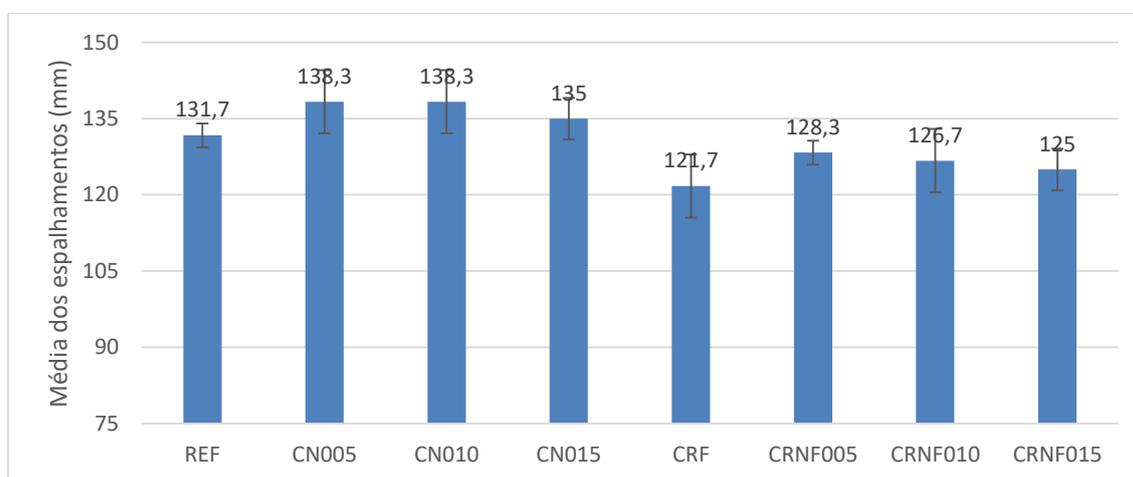


Figura 44 – Comparativo dos resultados do espalhamento dos concretos

Pelos resultados observa-se que os concretos contendo CNTs (CN005, CN010 e CN015) foram aqueles que apresentaram os maiores valores de espalhamento. A adição de fibras de aço reduziu em 7,5% (concreto CRF) o

espalhamento da mistura em relação ao concreto de referência. No entanto, a adição de CNTs elevou os valores de espalhamento dos concretos CRNF ao do concreto de referência. Logo, fica demonstrada a eficiência das nanopartículas na melhoria da mobilidade da mistura para o concreto com macrofibras de aço e CNTs.

Importante observar que o concreto CN015 apresentou valor de espalhamento inferior aos concretos CN005 e CN010, denotando-se uma tendência de redução da mobilidade da mistura com o aumento da taxa de nanopartículas, como visto na Figura 45. Essa mesma tendência foi observada na sequência de concretos CRNF, em que o CRNF0015 apresentou menor espalhamento do que os concretos CRNF005 e CRNF010.

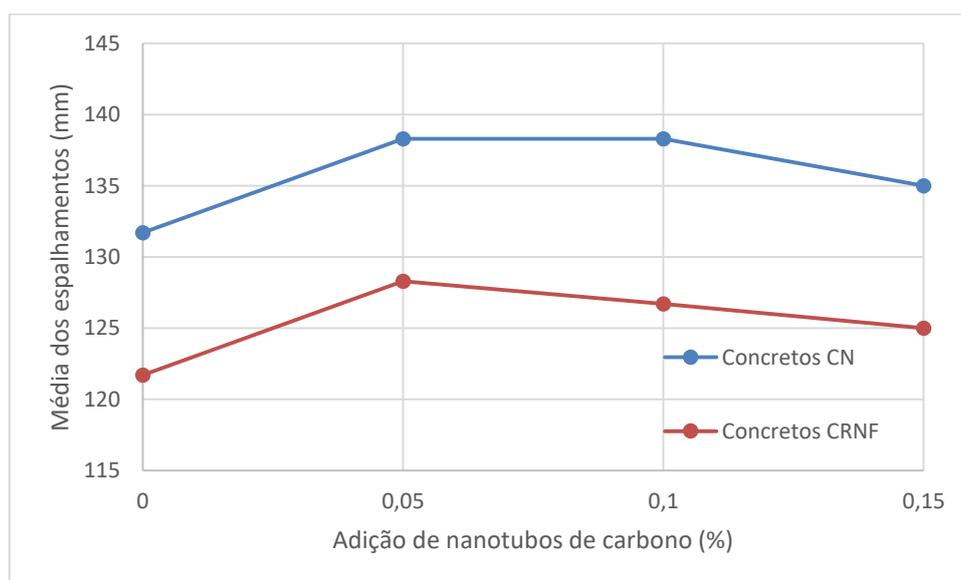


Figura 45 - Influência das nanopartículas na trabalhabilidade

## 4.2 ABSORÇÃO DE ÁGUA DOS CONCRETOS

Os resultados do ensaio de absorção de água dos concretos são apresentados na Tabela 18 e comparadas graficamente na Figura 46. Os valores são médios representativos de 3 amostras.

Tabela 18 – Resultados da Absorção água dos concretos

Concreto	Absorção (%)	Desvio Padrão (%)	Coefficiente de Variação (%)
REF	11,11%	0,10%	0,90%
CN005	8,89%	0,18%	2,00%
CN010	8,87%	0,18%	2,07%
CN015	10,08%	0,12%	1,20%
CRF	12,17%	0,24%	1,94%
CRNF005	8,65%	0,19%	2,19%
CRNF010	8,24%	0,26%	3,18%
CRNF015	9,75%	0,27%	2,79%

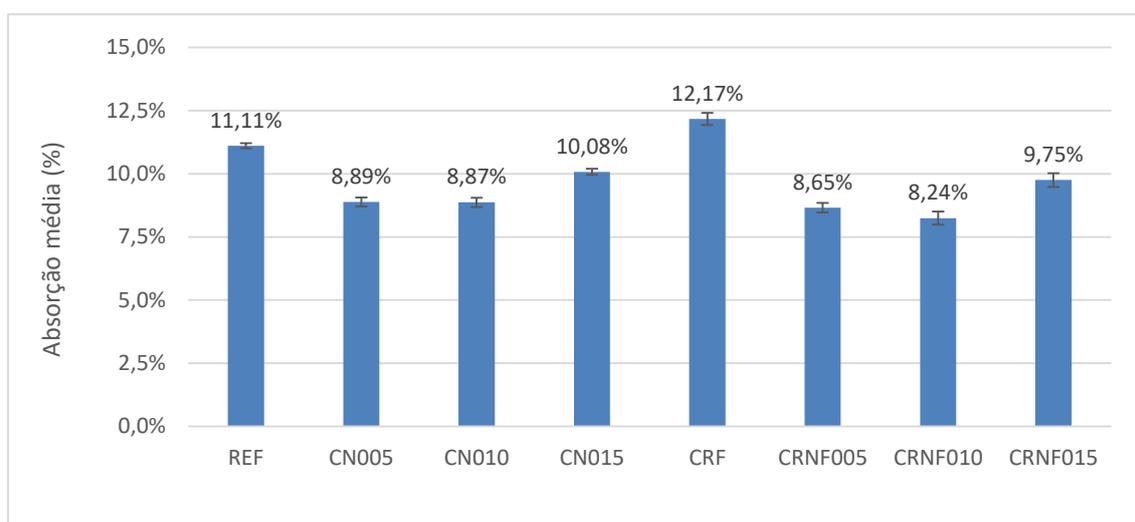


Figura 46 - Comparativos dos valores médios do grau de absorção dos concretos

Os concretos contendo CNTs apresentaram menor grau de absorção do que aqueles concretos sem a presença das nanopartículas. Essa constatação é observada nos concretos contendo somente nanopartículas como também naqueles com nanopartículas e fibras de aço (Figura 47). O fato revela indicativo de diminuição dos vazios/poros existentes na matriz cimentícia por meio de um efeito de preenchimento.

O grau de absorção dos concretos contendo 0,15% de CNTs (CN015 e CRNF015) foi sempre mais elevado do que aquele registrado nos concretos contendo 0,05% e 0,10% de CNTs. Mesmo na taxa de 0,15%, os valores de absorção dos concretos contendo CNTs foram sempre menores do que o concreto de referência e o concreto com fibras de aço.

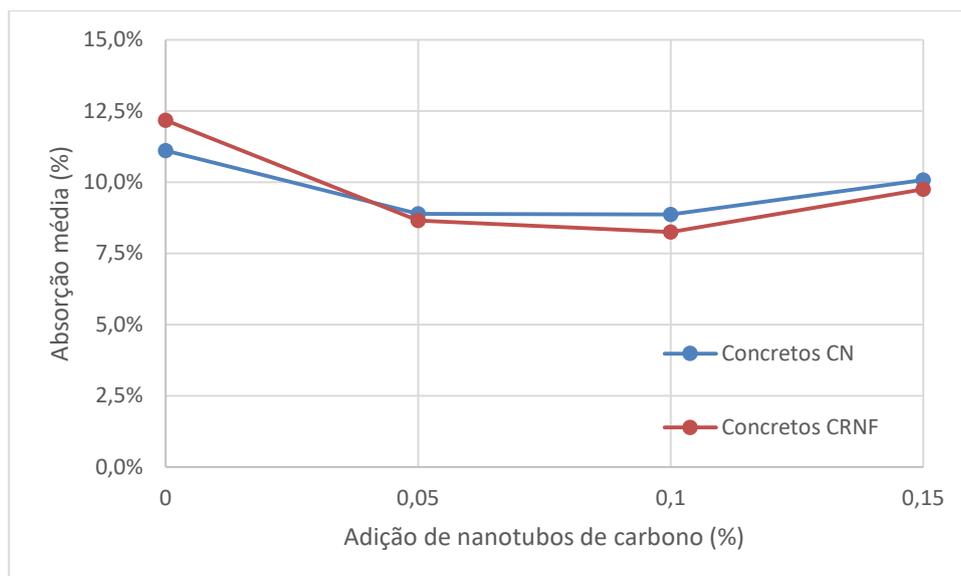


Figura 47 - Influência das nanopartículas na absorção de água

É possível afirmar que a diminuição da absorção de água nos concretos com nanotubos de carbono é representativa de melhora em sua microestrutura.

Ao se comparar o concreto referência com o concreto contendo 1% de fibras de aço, nota-se um aumento de 9,5% no grau de absorção de água, consequência do aumento de vazios por conta da dispersão das fibras na matriz cimentícia.

### 4.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

Os resultados do ensaio de compressão axial dos concretos são apresentados na Tabela 19 e comparados graficamente através da

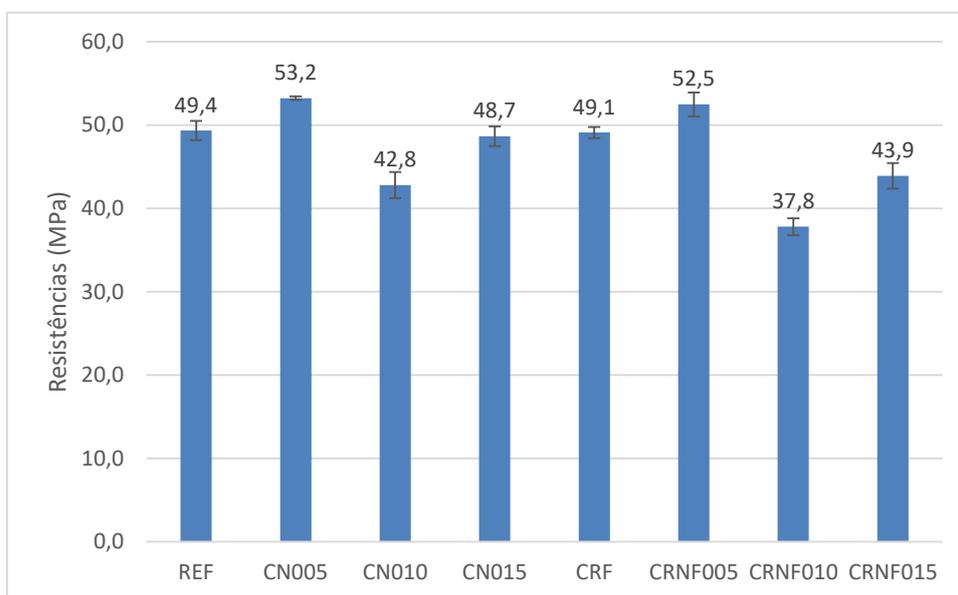


Figura 48. Os valores são médios e representativos de 3 corpos de prova.

Tabela 19 - Resultados do ensaio de compressão axial

Concreto	Médias (MPa)	Desvio Padrão (%)	Coefficiente de Variação (%)
REF	49,4	1,2%	2,3%
CN005	53,2	0,2%	0,4%
CN010	42,8	1,6%	3,7%
CN015	48,7	1,2%	2,4%
CRF	49,1	0,7%	1,3%
CRNF005	52,5	1,4%	2,7%
CRNF010	37,8	1,0%	2,7%
CRNF015	43,9	1,5%	3,5%

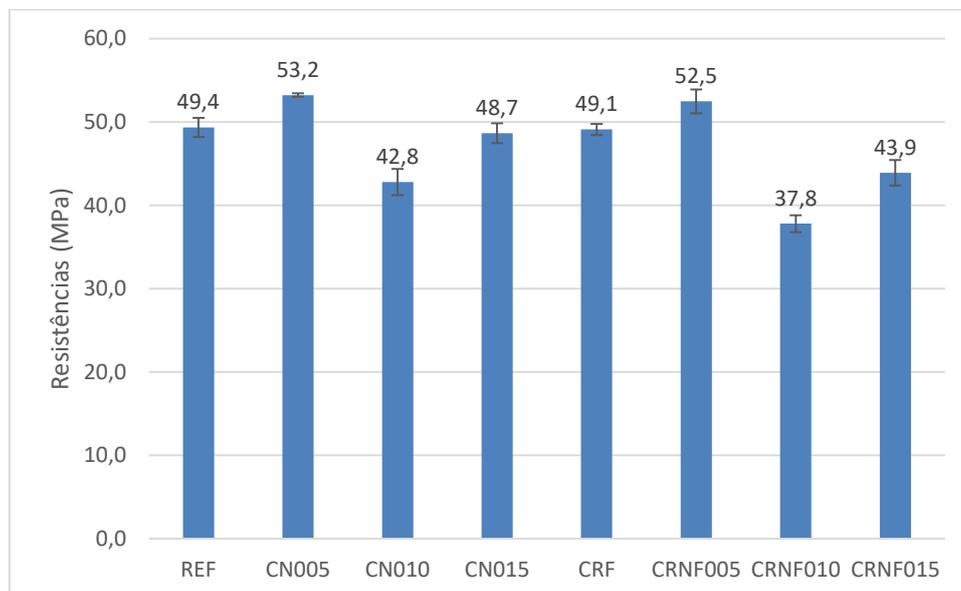


Figura 48 - Comparativo da resistência à compressão axial

A presença de CNT na matriz cimentícia em taxa de 0,05%, aumentou a resistência a compressão em 7,7% em relação ao concreto de referência. No entanto, para as taxas de 0,10% e 0,15% houve queda nos valores da resistência.

A adição de nanopartículas em taxa de 0,05% no concreto com fibras de aço resultou em aumento na resistência do concreto quando comparado ao concreto de referência (6,3%) como também ao concreto contendo fibras de aço (6,9%). Em taxas de 0,10% e 0,15% o mesmo efeito não foi observado e a resistência à compressão foi inferior a do concreto de referência e a do concreto contendo fibras de aço.

A Figura 49 evidencia o efeito das nanopartículas sobre a resistência à compressão dos concretos com e sem fibras de aço. Fica evidenciado que em relação a matriz sem fibras, as resistências dos concretos foram aumentadas quando da taxa de 0,05% de nanopartículas. A resistência da matriz contendo fibras de aço ficou inferior àquela sem fibras de aço.

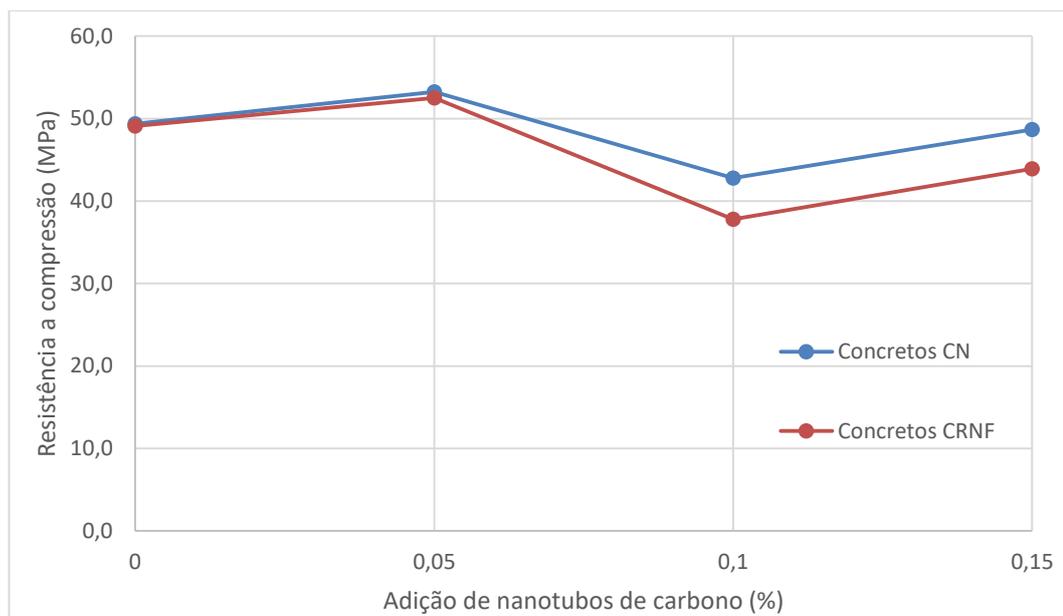


Figura 49 - Influência das nanopartículas na resistência à compressão

#### 4.4 RESISTÊNCIA À FLEXÃO

Na Figura 50 são apresentadas as curvas médias Tensão-CMOD dos concretos com matriz sem fibras de aço (CN) e na Figura 51 tem-se as curvas dos concretos contendo fibras de aço (CRNF). As curvas individuais (três amostras) de cada grupo são apresentadas no ANEXO em termos de Força-CMOD.

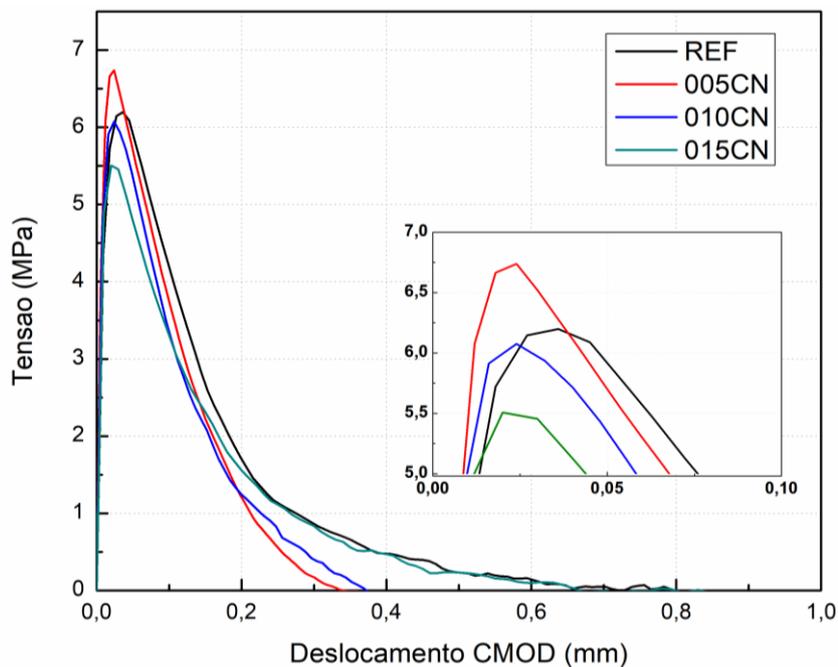


Figura 50 - Curvas médias Tensão-CMOD dos concretos CN

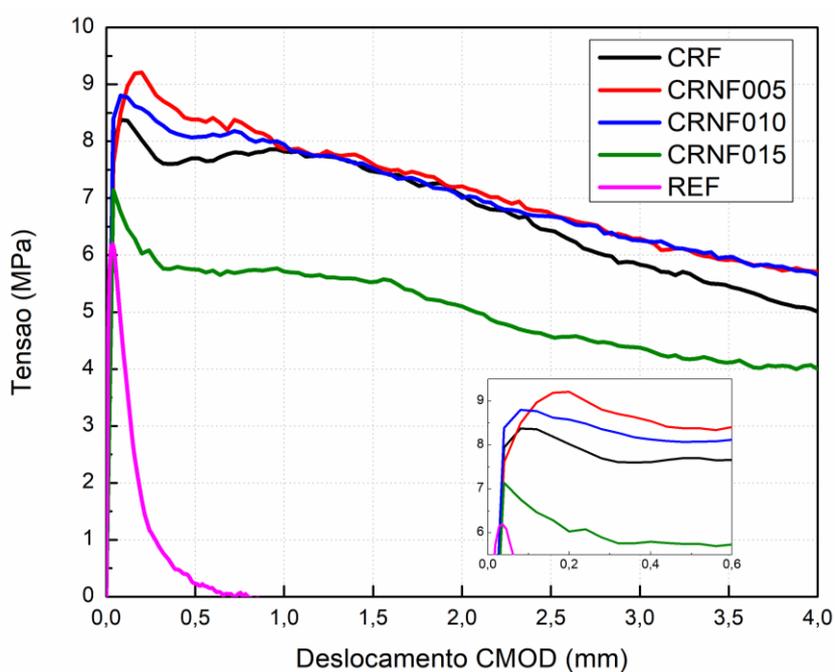


Figura 51 - Curvas médias Tensão-CMOD dos concretos CRNF

Como observado pela Figura 50, os concretos CN, contendo apenas nanopartículas, apresentaram um comportamento caracterizado por diminuição

da resistência após a ruptura da matriz cimentícia e sem capacidade de deformação após a força máxima. Do detalhe apresentado na Figura 50 observou-se que a presença de 0,05% de CNT na matriz cimentícia elevou a tensão máxima do concreto CN005 em significativos 9% em relação a matriz de referência. Em taxas de 0,10% e 0,15%, as nanopartículas não resultaram em aumento nos valores de tensão máxima para os concretos CN010 e CN015, respectivamente, diminuindo-se inclusive a capacidade de carga em relação ao concreto de referência.

Ao se analisar separadamente as curvas referente ao concreto referência e ao concreto 005CN, a partir do detalhe apresentado na Figura 50, é possível observar que para uma mesma tensão o concreto com CNT apresentou menores deslocamentos. Isto é, com a inclusão dos CNTs na matriz do concreto, estes agem já na fase pré pico, fornecendo maior rigidez ao compósito. Com isso, fica notável a ação dos CNTs em vazios, poros e microfissuras como pontes de tensões.

Pela Figura 51, o concreto contendo apenas fibra de aço apresentou aumento significativo na resistência (35 %) em relação ao concreto de referência. A presença de 1% de fibras de aço além de aumentar a capacidade de carga do concreto, resultou em manutenção da capacidade resistente após a fissuração da matriz, a resistência residual pós-fissuração é muito maior do que a do concreto sem fibras o que resulta em significativa melhora da tenacidade do material.

Com 0,05% de nanopartículas a resistência máxima à flexão do concreto CRNF005 foi ainda aumentada em 10% em relação ao concreto CRF e a capacidade de carga após a fissuração também foi incrementada como pode ser observado pelo ramo mais inclinado da curva representativa do comportamento do concreto CRNF005.

Com 0,10% de nanopartículas nota-se menor resistência à flexão do concreto CRNF010 em relação ao CRNF005, porém ainda maior que o concreto CRF. Já para 0,15% de nanopartículas a resistência do concreto CRNF015 foi menor do que a do CRF.

Logo, constata-se que a taxa de 0,05% de CNTs foi aquela que resultou em maior resistência máxima para os concretos contendo nanopartículas e fibras de aço, a resistência máxima foi elevada em 49% em relação ao concreto de referência e em 10% em relação ao concreto CRF.

Os ramos descendentes pós-fissuração dos concretos CRNF005 e CRNF010 são praticamente idênticos e situados acima do ramo descendente do CRF. O fato representa maior tenacidade para os concretos CRNF005 e CRNF010 em relação ao concreto CRF e denota maior eficiência do mecanismo de resistência pelo efeito de ponte das fibras ancoradas à matriz cimentícia contendo nanopartículas.

Pelas curvas dos concretos CRNF005 e CRNF010 fica evidenciado o efeito das nanopartículas na fase pré-pico de fissuração da matriz.

A Figura 52 mostra a relação típica entre a força ( $F$ ) aplicada e o CMOD obtido a partir do ensaio de flexão em três pontos. Com base nessa relação foram obtidos a força correspondente ao limite de proporcionalidade ( $F_L$ ) e as forças residuais ( $F_j$ ). O valor de  $F_L$  corresponde ao maior valor de força registrado até o CMOD de 0,05 mm. Os valores de forças ( $F_j$ ) foram tomados tendo-se como referência os valores correspondentes ao  $CMOD_j$  ( $j = 1$  a 4).

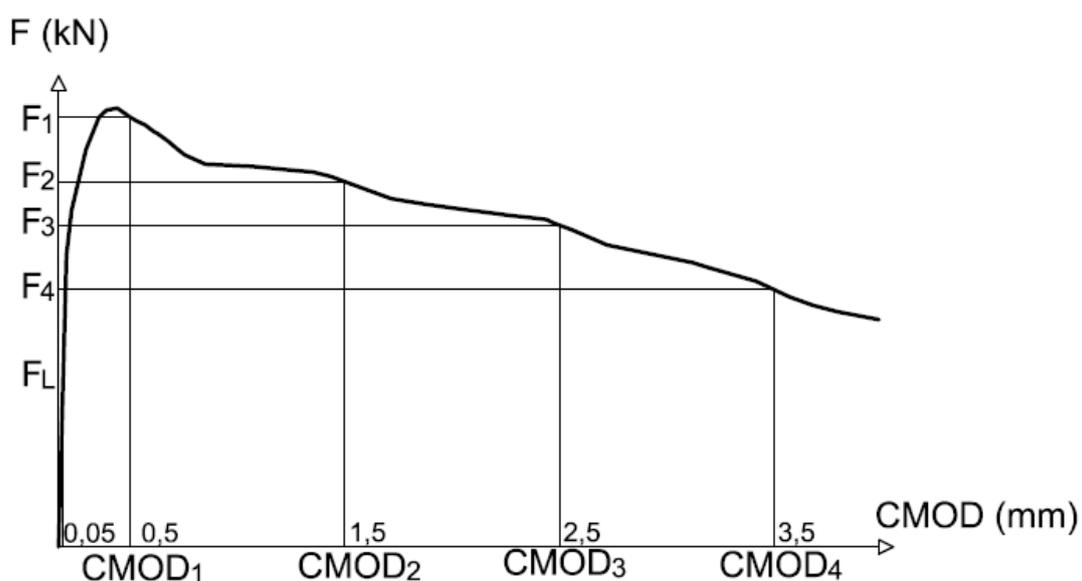


Figura 52 – Curva típica Força x CMOD

A resistência correspondente ao limite de proporcionalidade ( $f_{ct,L}$ ) é calculada por meio da Equação 1 e as resistências residuais ( $f_{R,j}$ ) são calculadas através da eq. (2).

$$f_{ct,L}^f = \frac{3 \cdot F_L \cdot l}{2 \cdot b \cdot h_{sp}^2} \quad \text{Equação 1}$$

$$f_{R,j} = \frac{3 \cdot F_j \cdot l}{2 \cdot b \cdot h_{sp}^2} \quad \text{Equação 2}$$

Em que:

b: largura da seção do corpo de prova;

$h_{sp}$ : distância entre o topo do entalhe e a borda superior da seção transversal;

L: vão do corpo de prova.

Na Tabela 20 são apresentados os valores médios das resistências juntamente com o coeficiente de variação.

Tabela 20 – Resistências médias dos concretos

Concreto	$f_{(ct,L)}$ (MPa) cv (%)	$f_{R,1}$ (MPa) cv (%)	$f_{R,2}$ (MPa) cv (%)	$f_{R,3}$ (MPa) cv (%)	$f_{R,4}$ (MPa) cv (%)
REF	6,09 (5,2%)	-	-	-	-
CN005	5,79 (20,8%)	-	-	-	-
CN010	5,43 (7%)	-	-	-	-
CN015	4,79 (14,6%)	-	-	-	-
CRF	7,94 (5,9%)	7,70 (17,2%)	7,48 (14,4%)	6,44 (13,3%)	5,48 (14%)
CRNF005	7,61 (12,1%)	8,38 (1,6%)	7,64 (4%)	6,76 (2,7%)	5,91 (8,4%)
CRNF010	8,39 (12,4%)	8,07 (14,7%)	7,55 (18,8%)	6,69 (21,1%)	5,96 (18%)
CRNF015	7,14 (15,2%)	5,75 (20,5%)	5,53 (26%)	4,59 (24,5%)	4,11 (22%)

A representação gráfica das resistências,  $f_{ct,L}$  e  $f_{R,j}$ , para os concretos CRNF são comparados na Figura 53.

O maior valor de resistência de proporcionalidade ( $f_{fc,L}$ ) foi o registrado para o concreto CRNF010, sendo 6% acima da resistência do CRF. Os concretos CRNF005 e CRNF015 apresentaram resistência  $f_{ct,L}$  inferior, 4% e 10%, inferior ao valor da resistência do CRF, respectivamente.

O maior valor de resistência residual ( $f_{R1}$ ) foi o registrado para o concreto CRNF005, sendo 9% acima do valor de resistência do CRF. Ainda o concreto CRNF010 apresentou o valor de  $f_{R1}$  5% acima do valor do CRF.

As demais resistências ( $f_{R2}$ ,  $f_{R3}$  e  $f_{R4}$ ) apresentaram a mesma tendência: valores praticamente idênticos para os concretos CRNF005 e CRNF010, porém sempre acima dos valores apresentados pelos concretos CRF e CRNF015.

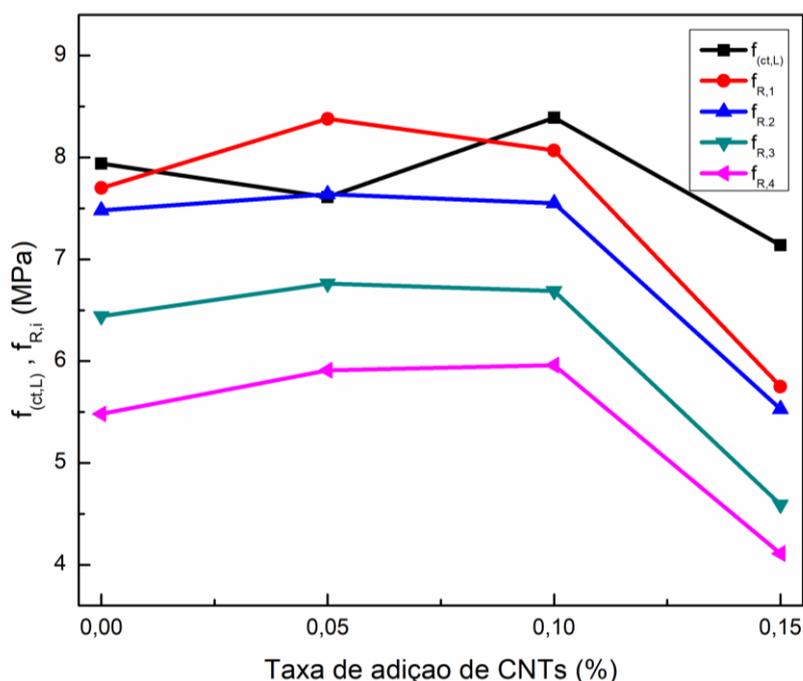


Figura 53 – Comparação gráfica entre  $f_{ct,L}$  e  $f_{R,j}$  para os concretos CRNF

A presença de 0,05% de CNT elevou os valores dos parâmetros das resistências residuais a flexão. Com taxa de 0,05% de CNT o CRF apresentou um aumento de 8,9% no valor de  $f_{R,1}$  e 5% no valor de  $f_{R,3}$ , quando comparados ao CRF sem adição de nanopartículas.

Para taxa de adição em 0,10% de CNT o aumento nos valores de  $f_{R,1}$  e  $f_{R,3}$  foram de 4,8% e 3,8% respectivamente. Ao se aumentar a taxa de CNTs em 0,15% houve um decréscimo de 25,3% e 28,7% para os mesmos parâmetros.

Na Figura 54 são apresentadas de forma gráfica a evolução dos valores de resistência com o CMOD. Fica destacado o comportamento do CRNF005 como sendo o único concreto, dentro todos os estudados, que apresentou elevação nos níveis de resistência ( $f_{R1}$  e  $f_{R2}$ ) após a fissuração. Nos demais concretos as resistências pós-fissuração são menores do que a resistência correspondente ao limite de proporcionalidade.

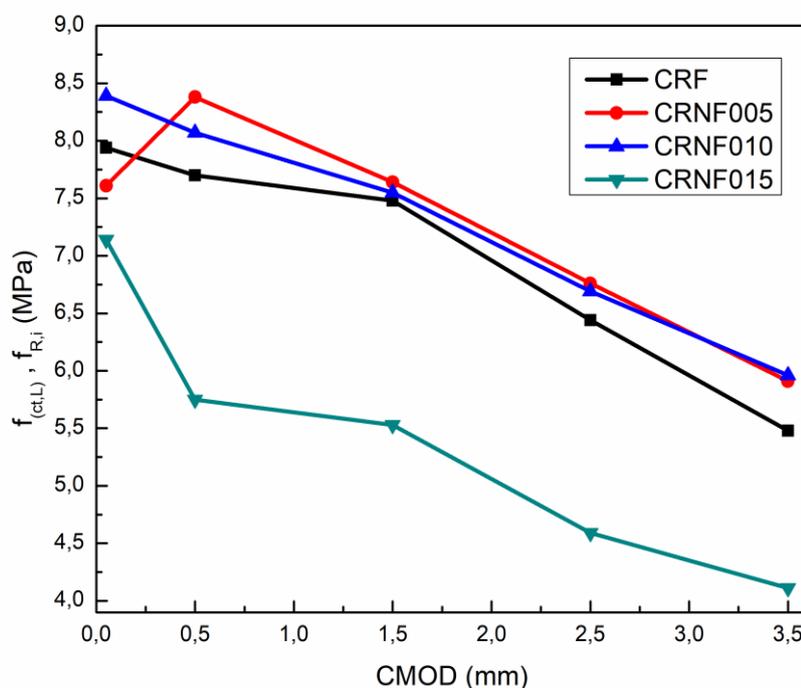


Figura 54 – Valores das resistências  $f_{ct,L}$  e  $f_{R,i}$  dos concretos

#### 4.4.1 Energia de Fratura

Para obtenção da energia de fratura dos concretos, os ensaios foram baseados na recomendação TC50-FMC1 (RILEM,1985) e norma EN 14651 (2007), bem como procedimentos realizados pelos autores Parveen et al. 2015 e Alshaghel et al. 2018. Foram calculadas as áreas sob o gráfico das curvas

médias a partir da integração das curvas com o tratamento de dados com auxílio do software Origin.

Para o grupo de concreto que possuem fibras de aço em sua matriz (CRF e CRNF), o cálculo da área foi realizado com o deslocamento variando de 0 a 4 mm (Tabela 21). Já para o grupo de concreto que não possuem fibras de aço (REF e CN), o cálculo não foi realizado pois não foi possível conduzir o ensaio até o CMOD igual a 4mm.

Tabela 21 - energia de fratura dos compósitos sem fibras de aço

Concreto	Energia de Fratura (J)				cv (%)
	CP1	CP2	CP3	Média	
CRF	10,51	14,13	12,08	12,24	14,8%
CRNF005	12,86	12,51	12,16	12,51	2,8%
CRNF010	10,44	15,64	13,97	13,35	19,9%
CRNF015	6,01	9,10	10,63	8,58	27,4%

A partir da Tabela 21, é possível verificar os concretos com taxas de adição de CNTs em 0,05% e 0,10% pouco alterou os resultados da energia de fratura. Já para o compósito que apresenta 0,15% de taxa de adição de CNT na matriz, ocorre uma queda brusca na energia de fratura. Isto pode ser justificado pela má dispersão e aglomeração dos CNTs na matriz. Vale ressaltar que, não só a tenacidade do compósito foi afetada pela má dispersão e aglomeração das nanopartículas, mas também as resistências à compressão e flexão conforme resultados obtidos nos ensaios de compressão e flexão.

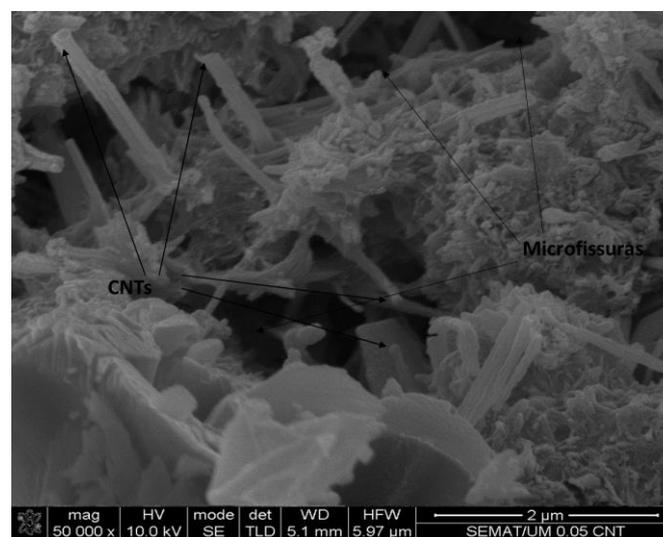
Para o grupo de concreto que apresenta fibras de aço em sua composição (Tabela 21), o valor obtido da energia de fratura do concreto CRNF005 foi 2% maior quando comparado ao concreto CRF. No concreto CRNF010 houve uma elevação de 9% na energia de fratura. O aumento da energia de fratura evidencia a ação dos CNTs em conjunto com as fibras de aço que atuam nas fissuras como pontes de tensão.

Já o concreto CRNF015 apresentou uma queda de 30% na energia de fratura. A diminuição observada está relacionada com o alto índice de

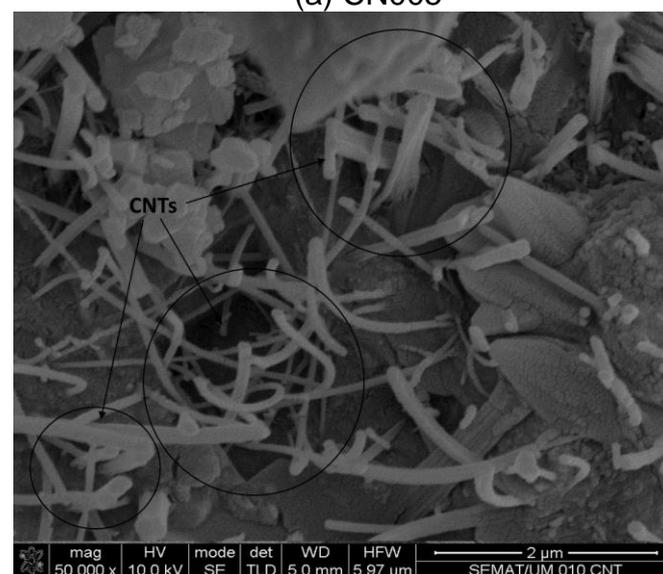
aglomerações indesejadas das nanopartículas, onde causou a diminuição nas resistências a compressão e flexão, bem como na energia de fratura.

#### 4.5 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

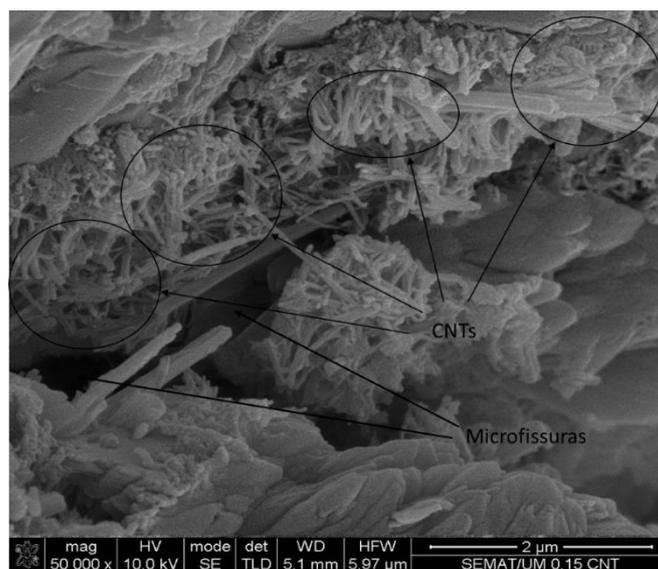
Com a finalidade de se observar a presença dos nanotubos de carbono na matriz de concreto, segue as Figura 55 (a), (b) e (c) que trazem as imagens obtidas através do ensaio MEV dos concretos CN005, CN010 e CN015.



(a) CN005



(b) CN010



(c) CN015

Figura 55 – Presença dos CNTs nas microfissuras (CN005)

Pela Figura 55 (a), observa-se boa dispersão das nanopartículas ao longo das microfissuras existentes na matriz do concreto CN005. Ao possuírem uma boa dispersão, mesmo para valores de adição reduzidos de CNTs (0,05%), estes estão presentes em toda a amostra, indicando uma amostra com distribuição homogênea das nanopartículas na matriz do concreto. De acordo com Parveen et al. 2015 com uma boa dispersão das nanopartículas, há uma melhora na microestrutura do concreto, resultando em maior densidade e aumento nas resistências mecânicas.

Sendo assim, é possível afirmar que a boa dispersão dos CNTs no concreto (Figura 55 (a)) garantiu melhoria no comportamento mecânico do concreto com adição de 0,05%, como apresentado nos resultados apresentados nos itens anteriores, ensaio de compressão e flexão.

Nos concretos CN010 e CN015 (Figura 55 (b) e (c)) observa-se maior aglomeração de nanopartículas ao longo da superfície fraturada. É possível relacionar essa maior aglomeração de CNTs com os resultados dos ensaios de compressão axial e flexão. Vale ressaltar que o alto índice de aglomeração

indesejado indicado na Figura 55 (c) justifica o comprometimento das resistências a compressão e a flexão do concreto.

#### 4.6 ENSAIOS DE FLEXÃO EM TRÊS PONTOS: CONCRETOS CRF E CRNF005

Para fins de comparação das resistências a compressão dos corpos de prova 50 x 50 x 200 mm e 150 x 150 x 600 mm, foi realizado o ensaio de compressão para os concretos CRF e CRNF005. Na Tabela 22 apresentam-se os resultados em termos de valores médios da resistência à compressão dos concretos: de referência (REF), reforçado com taxa de 1% de fibras de aço (CRF) e do concreto contendo CNT em taxa de 0,05% e fibras de aço em 1% (CRNF005).

Tabela 22 - valores de resistências à compressão axial

<b>Concretos</b>	<b>Resistência à compressão</b>		
	Médias (MPa)	Desvio Padrão (%)	Coefficiente de Variação(%)
<b>REF</b>	46,9	1,59%	3,4%
<b>CRF</b>	49,4	0,91%	1,8%
<b>CRNF005</b>	50,6	1,15%	2,3%

Os valores de resistência a compressão apresentadas pela Tabela 22 trazem uma pequena diferença dos resultados apresentados pela Tabela 19. Essa diferença pode estar relacionada com o efeito escala dos corpos de prova, por se tratar de corpos de prova com diferentes tamanhos.

Na Figura 56 segue comparação gráfica dos valores médios da resistência à compressão dos concretos. Os resultados foram obtidos na idade de 28 dias e referem-se à média de três corpos de prova.

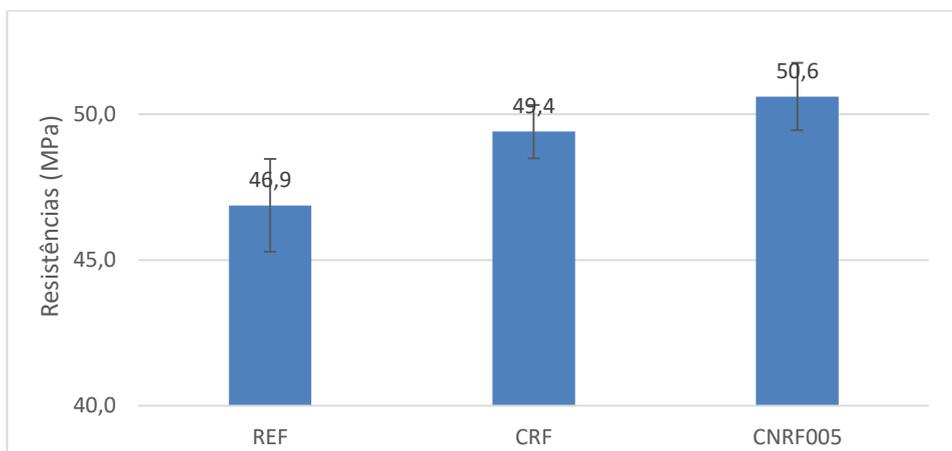


Figura 56 - Gráfico da resistência a compressão axial

Em relação ao concreto de referência, a resistência à compressão do CRF e do CRNF005 foram maiores em 5% e 8%, respectivamente.

Os resultados do ensaio de flexão em três pontos segundo a norma europeia EN 14651 (2007) estão apresentados no gráfico da Figura 57. Essas curvas são médias dos ensaios em três corpos de prova do concreto REF, CRF e CRNF005. As curvas médias foram obtidas pelo software ORIGIN. Os valores para obtenção das curvas médias estão presentes no ANEXO E.

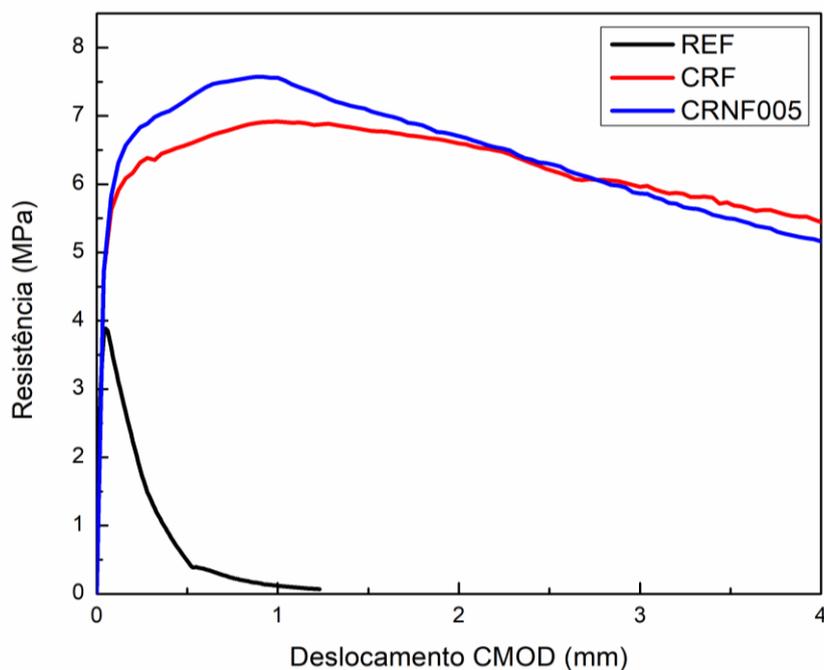


Figura 57 - Gráfico das curvas médias do ensaio de flexão da EN 14651

Os ensaios foram realizados até um CMOD ligeiramente superior a 4mm como recomendação da EN 14651 (2007). Analisando o gráfico da Figura 57, é possível notar que o concreto CRNF005 possui resistência máxima à flexão superior ao concreto CRF. O aumento observado é de aproximadamente 10% na resistência máxima denotando-se a influência das nanopartículas no comportamento à flexão.

Os resultados do ensaio de flexão são apresentados em termos dos valores médios do limite de proporcionalidade (LOP) e resistências residuais conforme apresentado na Tabela 23.

Tabela 23 – Resistência à flexão dos concretos conforme EN 14651 (2007)

<b>Concreto</b>	<b><math>f_{(ct,L)}</math> (MPa) cv (%)</b>	<b><math>f_{R,1}</math> (MPa) cv (%)</b>	<b><math>f_{R,2}</math> (MPa) cv (%)</b>	<b><math>f_{R,3}</math> (MPa) cv (%)</b>	<b><math>f_{R,4}</math> (MPa) cv (%)</b>
REF	1,24 (1,1%)	0,49 (9,5%)	-	-	-
CRF	4,73 (1,8%)	6,53 (8,4%)	6,81 (9,5%)	6,24 (10,6%)	5,74 (11,7%)
CRNF005	4,70 (4,1%)	7,21 (2,9%)	7,10 (5,4%)	6,28 (6%)	5,49 (8,1%)

Os valores das resistências à flexão apresentadas pela Tabela 23 trazem uma diferença dos resultados apresentados pela Tabela 20. Essa diferença pode estar relacionada com o efeito escala dos corpos de prova, por se tratar de corpos de prova com diferentes tamanhos.

Pelos parâmetros de resistências flexionais e residuais apresentadas na Tabela 23, pode-se afirmar que não ocorreu alteração no valor médio da resistência  $f_{(ct,L)}$ . Uma ligeira melhora foi observada nos valores das resistências residuais do concreto contendo CNTs. O valor obtido da resistência ( $f_{R,1}$ ) para o CRNF005 foi 10% maior que o apresentado pelo CRF e de 4% e 1% de aumento das resistências  $f_{R,2}$  e  $f_{R,3}$ , respectivamente. O valor da resistência  $f_{R,4}$  do CRF foi superior ao valor obtido para o CRNF005.

#### 4.6.1 Energia de Fratura

Com o cálculo das áreas sob as curvas Força-Deslocamento foi possível obter a Energia de Fratura dos concretos CRF e CRNF005 conforme é mostrado na Tabela 24.

Tabela 24 - Energia de fratura dos concretos CRF e CRNF005

Concreto	Energia de Fratura (J)				cv (%)
	CP1	CP2	CP3	Média	
CRF	80,65	67,79	87,04	78,50	12,5%
CRNF005	76,26	85,71	80,38	80,78	5,9%

Quando comparados os valores apresentados pela Tabela 24 com os valores da Tabela 21 há uma grande diferença no valor da energia de fratura. Sendo a energia de fratura calculada a partir da área sob o gráfico Força-Deslocamento, a diferença dos tamanhos dos corpos de prova (50 x 50 x 200 mm e 150 x 150 x 600 mm) requer uma força muito maior durante o ensaio para romper o corpo de prova. Sendo assim, a energia requerida pelo corpo de prova 150 x 150 x 600 mm é muito maior que a energia requerida pelo corpo de prova 50 x 50 x 200 mm.

O aumento de 2,7% do concreto CRNF005 em relação ao CRF demonstra aumento desprezível no valor de energia de fratura.

#### 4.7 PULL OUT

Nas Figura 58 e Figura 59 indicam-se as curvas obtidas por meio do ensaio de arrancamento do tipo *Pull out* para os concretos de referência e o CN005, respectivamente. São apresentadas as curvas individuais, bem como a curva média em destaque. Na Figura 60, as curvas médias representativas do comportamento força-deslizamento das fibras de aço no concreto de referência e no concreto CRNF005 são comparadas.

A Figura 58 e Figura 59 a seguir trazem os gráficos com os resultados obtidos do ensaio de *Pull out*, para o concreto referência e o CN005.

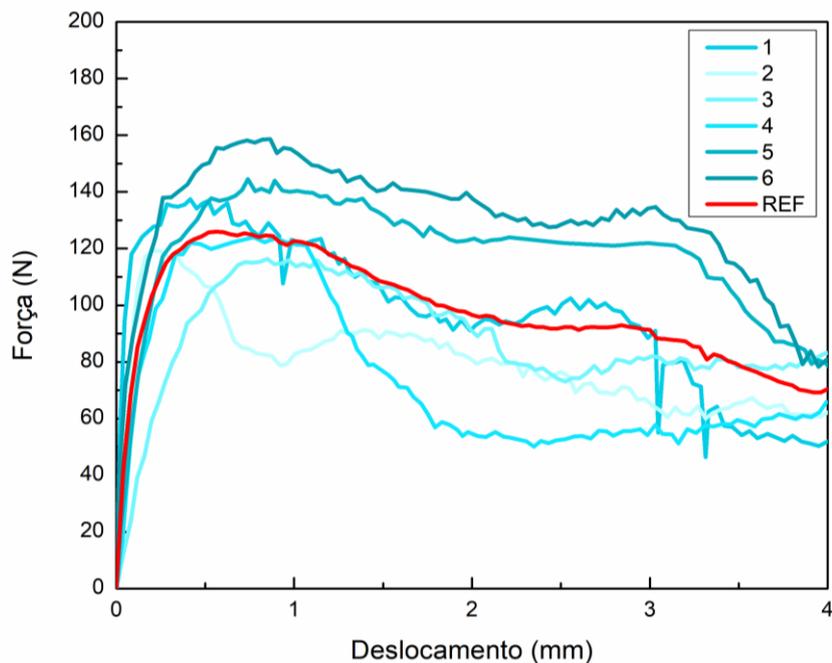


Figura 58 - Curva força-deslizamento da fibra de aço – concreto de referência

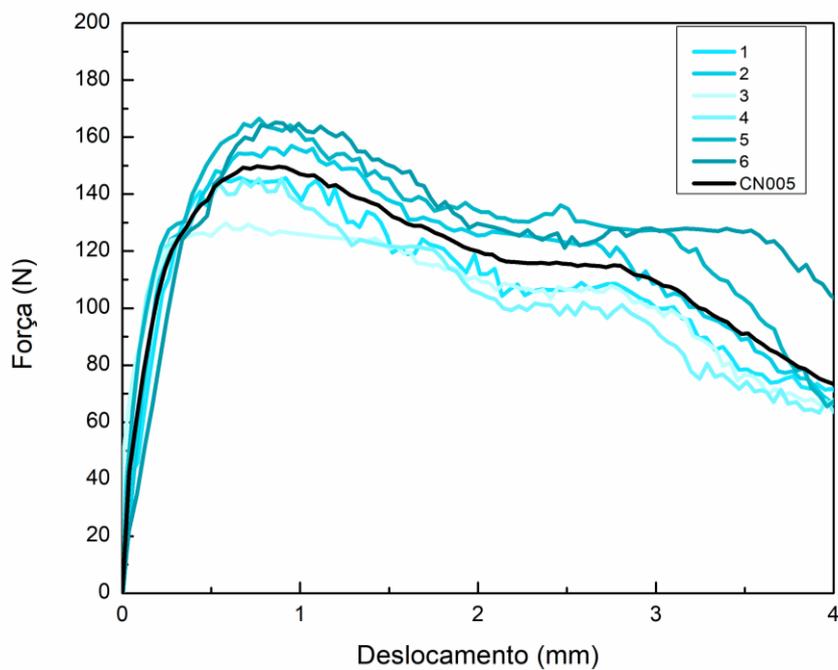


Figura 59 - Curva força-deslizamento da fibra de aço – concreto CRNF005

Segue a Figura 60 com o gráfico somente com as curvas médias.

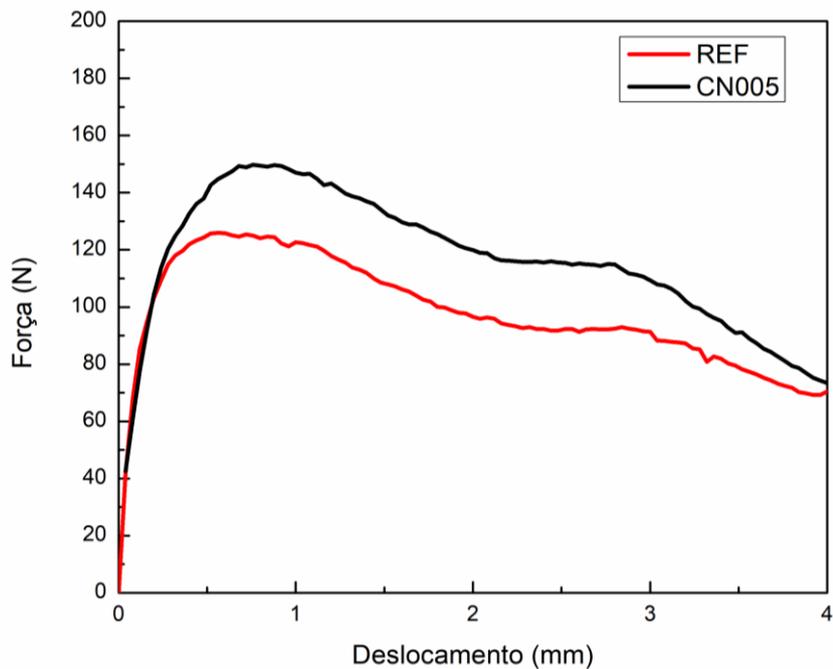


Figura 60 - Gráfico das curvas médias do ensaio de *Pull out*

O modo de ruína observado, em ambos os concretos, foi o de arrancamento das fibras (Figura 61). Segue na Figura 62 uma ilustração do mecanismo associado com o arrancamento da fibra de aço e na Figura 63 tem-se a associação do mecanismo com o histórico de carregamento.

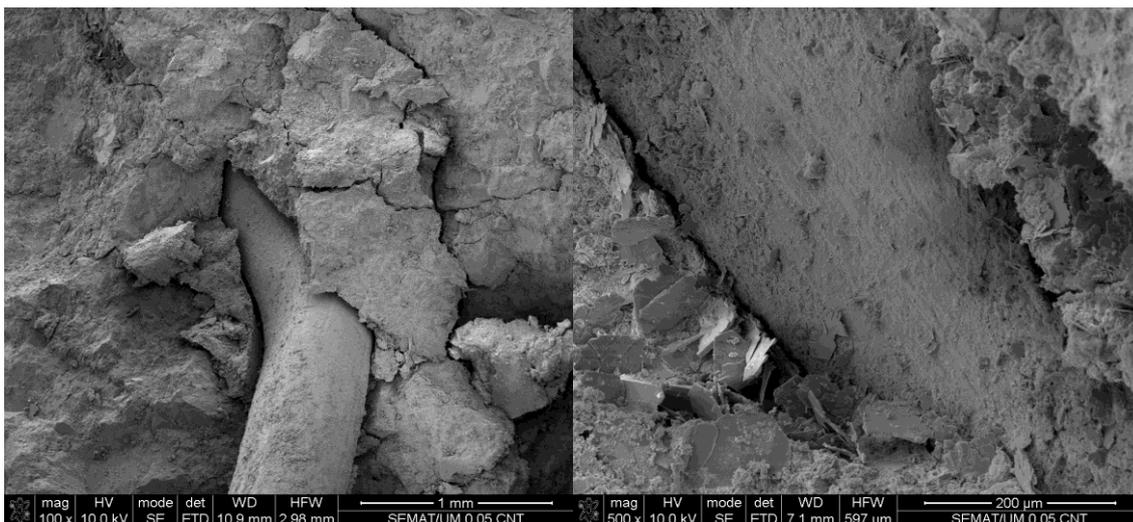


Figura 61 - Interface fibra de aço e matriz cimentícia

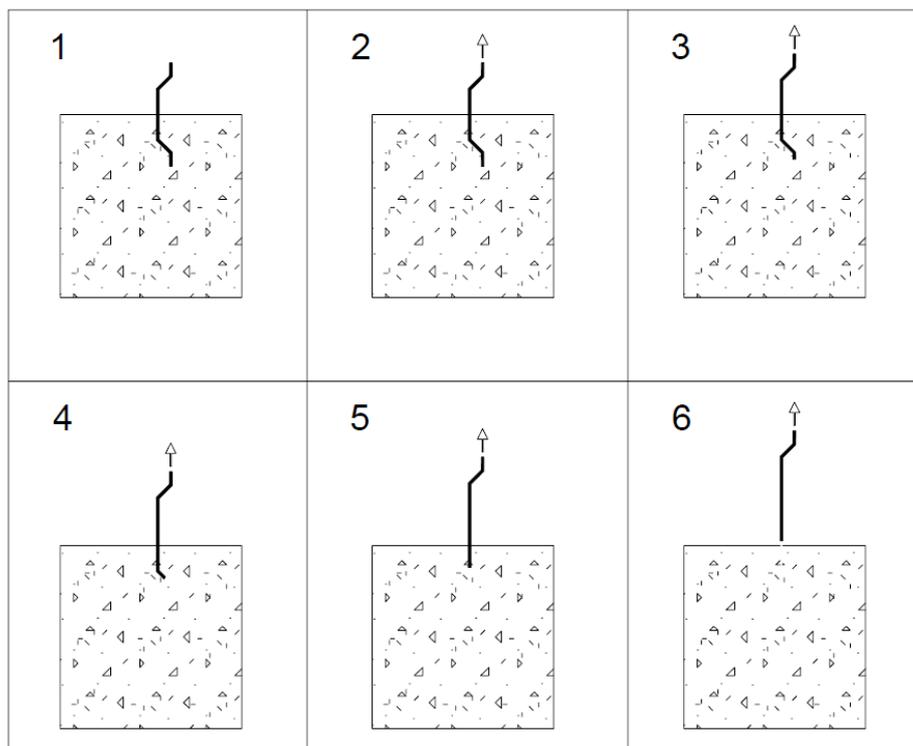


Figura 62 - Ilustração do mecanismo de arrancamento da fibra de aço

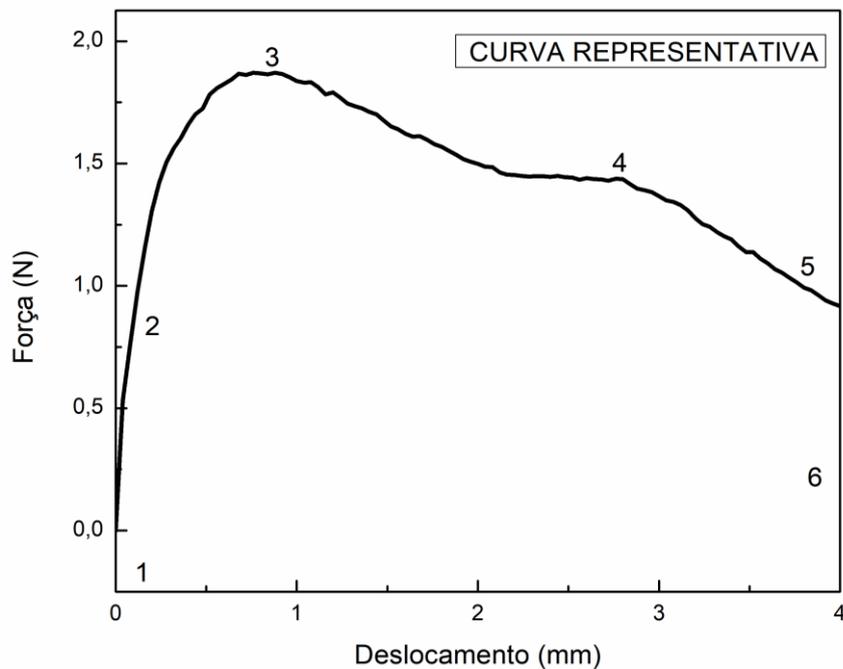


Figura 63 - Ilustração do mecanismo de arrancamento da fibra ao longo do do histórico de carregamento

Pela análise das curvas verifica-se que o ramo do pré-pico é constituído por um trecho linear e outro não-linear. O trecho linear corresponde ao regime

em que a aderência da fibra com a matriz é dada de forma elástica e sem degradação da ligação. No concreto CRNF005 o trecho linear foi estendido até a força de 120 N que, representa um valor de 15% acima daquele observado no concreto de referência, demonstrando que as nanopartículas atuam no sentido de retardar o início da microfissuração que degrada a interface entre fibra e a matriz.

O trecho não-linear do ramo pré-pico pode ser atribuído a mecanismos de degradação da aderência interfacial e o início da mobilização do gancho da fibra como relatado por Abrishambaf et al. (2016). No trecho não-linear pré-pico, percebeu-se uma modificação significativa entre o comportamento do deslizamento da fibra entre os concretos analisados. A mudança na declividade do ramo ascendente da curva pré-pico é mais acentuada no concreto REF do que no CRNF005. O fato representa um processo de microfissuração menos intenso da interface fibra-matriz do concreto com CNTs e com aumento gradativo da força de arrancamento.

A força média de pico para o concreto contendo CNTs foi de 152,0 N, sendo 21% acima do valor da força média (126 N) registrada para o concreto de referência. A força máxima para o concreto contendo CNT foi registrada para o deslizamento de 0,77 mm, enquanto que, para o concreto de referência o deslizamento foi de 0,65 mm. O fato revela que as nanopartículas aumentam a extensão do trecho não-linear pré-pico. Enquanto que no concreto CRNF005 a diferença entre a força de pico e a corresponde ao final do trecho linear foi de 27%, no concreto de referência essa diferença foi de apenas 18%.

Após a força de pico, a região de extremidade correspondente ao gancho da fibra deforma-se progressivamente e a força de arrancamento decresce com o deslizamento da fibra no interior da matriz. A fase correspondente ao pós-pico apresentou características semelhantes entre os concretos analisados, no entanto, sempre com maiores valores de força associada ao processo de deslizamento da fibra no concreto contendo nanopartículas.

## 5 CONCLUSÃO

- Para taxas de adição Nanotubos de Carbono (CNT) em 0,05% e 0,10%, as soluções que apresentaram melhor dispersão em água foram com a utilização de 3% de Pluronic F-127 e 2 horas de ultrassonificação. Enquanto que para a taxa de 0,15%, 3 horas de ultrassonificação, de acordo com os ensaios de UV-VIS.

- Os concretos contendo CNTs apresentaram menor grau de absorção do que aqueles concretos sem a presença das nanopartículas.

- A presença de CNT na matriz cimentícia em taxa de 0,05%, aumentou a resistência à compressão em 7,7% em relação ao concreto de referência. No entanto, para as taxas de 0,10% e 0,15% houve queda nos valores da resistência.

- O concreto com a presença de 0,05% de CNT apresentou um aumento na resistência máxima a flexão em 9% em relação ao concreto referência. Já os concretos com 0,10% e 0,15% apresentaram uma queda na resistência máxima.

- O concreto contendo apenas fibras de aço apresentou aumento significativo na resistência à flexão (35%) em relação ao concreto de referência. Ademais, com a adição das fibras de aço e de 0,05% de nanopartículas, este concreto elevou a resistência máxima à flexão em 49% quando comparado ao concreto referência e 10% ao ser comparado com o que contém apenas fibras de aço.

- A energia de fratura do concreto obteve um aumento de 9% com a presença de 0,10% de CNT e fibra de aço quando comparado ao concreto apenas com fibras de aço.

- O ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) mostrou um alto índice de aglomerações indesejadas de nanopartículas na interface da superfície fraturada do concreto, quando em taxas de adição de CNTs em 0,15%.

- Segundo o ensaio da EN 14651 (2007), o concreto com fibra de aço e 0,05% de CNTs obteve um aumento de 10% na resistência máxima à flexão quando comparado ao concreto somente com fibra de aço e 10% na resistência residual ( $f_{R,1}$ ). As resistências residuais  $f_{R,2}$  e  $f_{R,3}$  obtiveram aumento de 4% e 1% respectivamente, enquanto que o  $f_{R,4}$  uma apresentou uma queda.
- A energia de fratura do concreto com a presença de 0,05% de CNT e fibra de aço apresentou um acréscimo de 2,7% quando comparado ao concreto apenas com fibras de aço.
- O ensaio de *Pull out* apresentou um acréscimo de resistência ao arrancamento da fibra de aço do compósito com 0,05% de CNT em 19% quando comparado ao compósito sem as nanopartículas. Esses resultados reiteram a boa relação entre as fibras e o compósito.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRISHAMBAF, A.; CUNHA, V.M.C.F.; BARROS, J.A.O. A two-phase approach to model steel fibre reinforced self compacting concrete in panels. *Engineering Fracture Mechanics*; v. 162, p 1-20, 2016.

Abdallah, S.; Fan, M.; Rees, D. W.A. Predicting pull-out behaviour of 4D/5D hooked end fibres embedded in normal-high strength concrete. *Engineering Structures*. v. 172 p. 967–980, 2018.

Abdallah, S.; Rees, D. W. A. Comparisons Between Pull-Out Behaviour of Various Hooked-End Fibres in Normal–High Strength Concretes. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. <https://doi.org/10.1186/s40069-019-0337-0>. 2019.

ALSHAGHEL, A, PARVEEN, S, RANA, S, FANGUEIRO, R. Effect of multiscale reinforcement on the mechanical properties and microstructure of microcrystalline cellulose carbon nanotube reinforced cementitious composites. *Composites Part B*, v. 149, 122-134, 2018.

AL-RUB, R. K.; TYSON, B.; YANDANBAKHS, A.; GRASLEY, Z. Mechanical Properties of Nanocomposite Cement Incorporating Surface-Treated and Untreated Carbon Nanotubes and Carbon Nanofibers. *JOURNAL OF NANOMECHANICS AND MICROMECHANICS*. V 2, P 1 – 6, 2012.

AMIN A., FOSTER S.J. Shear strength of steel fibre reinforced concrete beams with stirrups. *Engineering Structures*. p. 323–332, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR NM 23: Cimento Portland – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2000. 11 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR NM 53: Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 67:1998: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Brasil, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-5738: Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: Concreto – ensaio de compressão de corpos de prova de concreto cilíndricos – método de ensaio. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6118: projeto de estruturas de concreto - procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7223: Concreto – determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15530: Fibras de aço para concreto – especificações. Brasil, 2007.

BAKHSI, M.; BARSBY, C.; MOBASHER, B. Comparative evaluation of early age toughness parameters in fiber reinforced concrete. *Materials and Structures*, v. 47, n. 5, p. 853–872, 2014. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1617/s11527-013-0098-1>>.

BANTHIA, N.; ISLAM, S. T. Loading Rate Concerns in ASTM C1609. *Journal of Testing and Evaluation*, v. 41, n. 6, p. 20120192, 2013. Disponível em: <<http://www.astm.org/doiLink.cgi?JTE20120192>>.

Bani-Hani, K. A.; Irshidat, M. R.; Al-Rub, R. K A.; Al-Nuaimi, N.A.; Talleh, A. T. Strength optimization of mortar with CNTs and nanoclays. *ICE Proceedings Structures and Buildings*. <http://dx.doi.org/10.1680/jstbu.14.00106>. 2016.

Barros, A. (1996). Caracterização do comportamento do betão reforçado com fibras de aço.

BS EN 197-1, 2000. Cement - Part 1 Composition, specification and conformity criteria for common cements. s.l.:s.n.

BS EN 1015-3, 2004. Methods of test for mortar for masonry — Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table). s.l.

BUTTIGNOL, T. E. et al. Verificação de vigas de concreto armado reforçado com fibras de aço no estado limite último. ISSN 1983-4195, *Revista Ibracon de estruturas e materiais*, v.11, n.5, p. 997-1024, outubro de 2018.

CARNIO, M. A “Aspectos gerais sobre o uso do concreto reforçado com fibras no Brasil: produção, projeto, tecnologia, normalização”, In: *Concreto e Construções*, 87, 2017, São Paulo, IBRACON, 2017

CARNIO, M. A. Panorama das atividades, discussões e cronograma para o lançamento de práticas recomendadas sobre concreto reforçado com fibras pelo CT 303. In: *Concreto e Construções*, 87, 2017, São Paulo, IBRACON, 2017

DAKUZAKU, R.; REIVERA, A. F.; ALTHEMAN, D. "Práticas para qualificação de macrofibra no concreto". In: *Concreto e Construções*, 87, 2017, São Paulo, IBRACON, 2017

DAMASCENO, I. I. R.; FERREIRA, M. P.; OLIVEIRA, D. R. C. RC beams with steel fibers under impact loads. *Acta Scientiarum*. V. 36, n. 1, p. 23 – 31, 2014.

DELUCE, J. R.; VECCHIO, F. J. <Cracking Behavior of Steel Fiber-Reinforced Concrete Members Containing Conventional Reinforcement.pdf>. , , n. 110, 2014.

di PRISCO, M.; PLIZZARI, G.; VANDEWALLE, L. Fibre reinforced concrete: new design perspectives. *Material and Structures*, v. 42, p. 1261-1281, 2009.

EN 1097-6, 2000. Tests for mechanical and physical properties of aggregates – Part 6. Determination of particle density and water absorption.

EN 14651. Test method for metallic fibre concrete - Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality residual). European Standard. 2005.

Faghih, F.; Ayoub, A. S. Structural performance of steel-concrete sandwich beams with carbon nanofiber reinforcement. *Engineering Structures*. v. 187 p 177–198, 2019.

FERNOSIAN, I. (2016). Material Development and Self-healing Capacity of Eco-Efficient Ultra-High Performance Concrete (EEUHPC).290f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, 2016.

FERRARI, V. J. (2007). Reforço à flexão de vigas de concreto armado com manta de polímero reforçado com fibras de carbono (PRFC) aderido a substrato de transição constituído por compósito cimentício de alto desempenho. 328f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

Ferrari, V. J.; Hanai, J. B. de; Souza, R. A. Flexural strengthening of reinforcement concrete beams using high performance fiber reinforcement cement-based composite (HPFRCC) and carbon fiber reinforced polymers (CFRP). *Construction and Building Materials*, 48, 485-498, 2013.

FERREIRA, L.E.T.; BITTENCOURT, T. N.; SOUZA, J.L.A.O.; GETTU, R. R-curve behavior in notched beam tests of rocks. *Engineering fracture mechanics*, v. 32 p 27 – 40, 2012.

Ferro G, Tulliani J and Musso M (2011) Carbon nanotubes cement composites. In *Proceedings of XXI IGF National Conference*, Cassino, Italy (Ferro G, Iacoviello F and Susmel L (eds)), Gruppo Italiano Frattura, Cassino Frosinone, Italy, pp. 49–59.

FIGUEIREDO, A. D. (2000). *Concreto com fibras de aço*. ISSN 0103-9830, BT/PCC/260, 2000.

Figueiredo, Anotnio Domingues de. Concreto reforçado com fibras / A.D. de Figueiredo. – São Paulo, 2011. 248p.

FIGUEIREDO, A. D.; CHAMA NETO, P. J.; FARIA, H. M A. Nova normalização brasileira sobre fibras de aço. Concreto e Construções, São Paulo, v. 36, n. 50, p. 67-76, br./maio/jun. 2008.

GHADBAN, A. A.; WEHBE, N. I.; UNDERBERG, M. Effect of Fiber Type and Dosage on Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete for Highway Bridges. ACI Materials Journal, v. 115, n. 3, 2018. Disponível em: <<http://www.concrete.org/Publications/InternationalConcreteAbstractsPortal.aspx?m=details&i=51702036>>.

Goodfellow, B. Design and Application of a Fiber Pullout Test for Examining Controlled Interfaces in Fiber Reinforced Polymers. Materials Science and Engineering. p. 63, 2004

HU, Y.; LUO, D.; LI, P.; LI, Q. SUN, G. Fracture toughness enhancement of cement paste with multi-walled carbon nanotubes. Construction and Building Materials, v; 70, p. 332 – 338. 2014.

IBRACON. Instituto Brasileiro de Concreto. Produzido por IBRACON. Disponível em: < <http://site.ibracon.org.br/ct-302-comite-tecnico-de-durabilidade-e-vida-util-de-estruturas-de-concreto-2>>. Acesso em 10/08/2018

Isla, F.; Ruano, G.; Luccioni B. Analysis of steel fibers pull-out. Experimental study. Construction and Building Materials. v. 100, p 183–193, 2015.

JORDON, R. D.; SEONG-CHEOL, L.; VECCHIO, F. J. Crack model for steel fiber-reinforced concrete members containing conventional reinforcement. ACI Structural Journal, v. 111, n. 1, p. 93–102, 2014.

KAKOOEI, S.; AKIL, H. M.; JAMSHIDI, M.; ROUHI, J. The effects of polypropylene fibers on the properties of reinforced concrete structures. Construction and Building Materials, v. 27, n. 1, p. 73–77, 2012. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.015>>.

KAZEMI, M.T.; FAZILEH, F.; EBRAHIMINEZHAD, M. A. (2007) Cohesive crack model and fracture energy of steel-fiber-reinforced-concrete notched cylindrical specimens. Journal of Materials in Civil Engineering, v.19, n.10, p.884-890, outubro.

KIM, D. J.; KIM, M. S.; CHOI, J.; et al. Concrete beams with fiber-reinforced polymer shear reinforcement. ACI Structural Journal, v. 111, n. 4, p. 903–911, 2014.

LEE, J. H.; CHO, B.; CHOI, E.; KIM, Y. H. Experimental study of the reinforcement effect of macro-type high strength polypropylene on the flexural capacity of concrete. Construction and Building Materials, v. 126, p. 967–975, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.017>>. .

LEE, J. Influence of concrete strength combined with fiber content in the residual flexural strengths of fiber reinforced concrete. *Composites Structures* 168, 2017, 216-225.

LEE, J.; Cho, B.; Choi, E. Flexural capacity of fiber reinforced concrete with a consideration of concrete strength and fiber content. *Construction and Buildings Materials*, 138, 2017, 222 – 231, 2017

LEE, S. H.; KIM, S.; YOO, D. Y. Hybrid effects of steel fiber and carbon nanotube on self-sensing capability of ultra-high-performance concrete. *Construction and buildings materials*. V. 185 p 530 – 544, 2018.

Magureanu, C.; Sosa, I.; Negrutiu, C.; Heghes, B. Mechanical Properties and Durability of Ultra-High-Performance Concrete. *ACI MATERIALS JOURNAL*. P 177 – 183, 2012.

Maida, P. Di; Sciancalepore, C.; Radi, E.; Bondioli, F. Effects os nano-silica treatment on the flexural post cracking behaviour of polypropylene macro-synthetic fibre reinforced concrete. *Mechanics Research Communications*, 88, 2018, 12-18.

MEHDIPOUR, I.; LIBRE, N. A.; SHEKARCHI, M.; KHANJANI, M. Effect of workability characteristics on the hardened performance of FRSCCMs. *Construction and Building Materials*, v. 40, p. 611–621, 2013. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.051>>.

MENG, W.; KHAYAT, K. H. Mechanical properties of ultra-high-performance concrete enhanced with graphite nanoplatelets and carbon nanofibers. *Composites Part B*. v. 107 p 113 – 122, 2016.

Mohammadi, Y.; Sing, S. P.; Kaushik, S. K. Properties of steel fibrous concrete containing mixed fibres in fresh and hardened state. *Construction and Building Materials*, 22, 956-965, 2008.

MONTE, R., TOALDO, G. S., FIGUEIREDO, A. D. “Avaliação da tenacidade de concretos reforçados com fibras através de ensaios com sistema aberto”, *Matéria* , v.19, pp.132 - 149, 2014.

NP EN 933-1, 2000. Ensaio das propriedades geométricas dos agregados – Parte 1. Método de peneiração.

NP EN 933-2. 1999. Ensaio para determinação das características geométricas dos agregados – Parte 2. Peneiros de ensaio, dimensão nominal das aberturas.

PARVEEN, S.; RANA, S.; FANGUEIRO, R.; PAIVA, M. C. Microstructure and mechanical properties of carbon nanotube reinforced cementitious composites developed using a novel dispersion technique. *Cement and Concrete Research*. V. 73 p 215 – 227, 2015.

Pimentel, M. G.; Borges, J. P. C.; Picanço, M. S.; Ghavami, K. Resposta à flexão e análise de tenacidade de argamassas reforçadas com fibra de Curauá. *Revista Matéria*. v. 21 p. 18 – 26, 2016.

RILEM TC 162-TDF, 2002. TEST AND DESIGN METHODS FOR STEEL FIBRE, Bending test, Final Recommendation. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, Volume 35, pp. 579-582. 2003

SALVADOR FILHO, J. A. A. Compósitos cimentícios de ultra-alto desempenho reforçados com fibras. In *Concreto e Construções*, 87, 2017, São Paulo, IBRACON, 2017

SALVADOR R. P.; FERNANDES J. F.; FIGUEIREDO A. D. Avaliação do concreto reforçado com baixos teores de fibras para fins estruturais segundo a norma EN 14651-2007. ISSN 1517-7076, *Revista Matéria*, v.20, n.04, p. 961-974, 2015.

Sener, S.; Begimgil, M.; Belgin, C. Size Effect on Failure of Concrete Beams With and Without Steel Fibers. *JOURNAL OF MATERIALS IN CIVIL ENGINEERING*. 436 – 440, 2002.

Shah, S. P.; Naaman, A. E. Mechanical properties of glass and steel fibre reinforced mortar. *American Concrete Institute Journal*. 73 (1), 50-53, 1976.

Shah, S. P.; Rangan, B. V. Fibre reinforced concrete properties. *American Concrete Institute Journal*. 68 (2), 126-135, 1971.

SILVA, L. F. (2016). ESTUDO DO EFEITO DA MICROCELULOSE SOBRE O DESEMPENHO DE MATERIAIS COMPÓSITOS DE MATRIZ CIMENTÍCIA. 77f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá, Maringá, PR, 2016.

Soetens T, Matthys S. Implementation of fibre pull-out behaviour in a finite element model for SFRC. In: *Bond in concrete 2012 – bond, Anchorage, Detailing*, Brescia, Italy; 2012.

Sorensen, B. F.; Lilholt, H. Fiber pull-out test and single fiber fragmentation test - analysis and modelling. *Materials Science and Engineering*. doi:10.1088/1757-899X/139/1/012009. 139, 2016.

Souza Filho, A. G.; Parveen, S.; Rana, S.; Vanderlei, R. D.; Fangueiro, R. Novel Multi-scale Cimentitious Composites Developed Using Microcrystalline Cellulose (MCC) and Sisal Fibers. *AUX-Defense Conference*, Portugal, 2019.

TAHENNI, T.; CHEMROUK, M.; LECOMPTE, T. Effect of steel fibers on the shear behavior of high strength concrete beams. *Construction and Building Materials*, v. 105, p. 14–28, 2016. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.010>>. .

THOMAZ, E. C. S. CRF – Concreto Reforçado com Fibras – Mito e Realidade. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2009.

VRIJDAGHS, R.; DI PRISCO, M.; VANDEWALLE, L. Uniaxial tensile creep of a cracked polypropylene fiber reinforced concrete. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, v. 51, n. 1, p. 1–12, 2018. Springer Netherlands. Disponível em: <<https://doi.org/10.1617/s11527-017-1132-5>>. .

Wang, B.; Han, Y.; Liu, S. Effect of highly dispersed carbon nanotubes on the flexural toughness of cement-based composites. *Construction and Building Materials*. v. 46 p. 8–12, 2013.

Wille K, Loh K. Nanoengineering ultra-high-performance concrete with multiwalled carbon nanotubes. *Transportation Research Record*, 2142 :119 – 126, 2010.

Zamanzadeh, Z.; Lourenço, L.; Barros, J. Recycled Steel Fibre Reinforced Concrete failing in bending and in shear. *Construction and Building Materials*. v. 85 p 195–207, 2015.

Zhang, F.; Ding, Y.; Xu, J.; Zhang, Y.; Zhu, W.; Shi, Y. Shear strength prediction for steel fiber reinforced concrete beams without stirrups. *Engineering Structures*. v. 127 p. 101–116, 2016.

## ANEXO A

### NORMA EUROPEIA EN 14651 (2007)

O comportamento a tração é o aspecto mais importante do CRF (comitê 303 do Ibracon). A partir do ensaio de 3 pontos em corpos de prova com entalhe, é possível determinar suas propriedades mecânicas.

Os corpos de prova possuem dimensões 150 mm x 150 mm x 600 mm com um vão de 500 mm. Ademais, há um entalhe que deve ser feito de 5 mm por 25 mm de altura centralizado na face inferior do prisma. A Figura A1 representa um esquema do carregamento e entalhe no prisma.

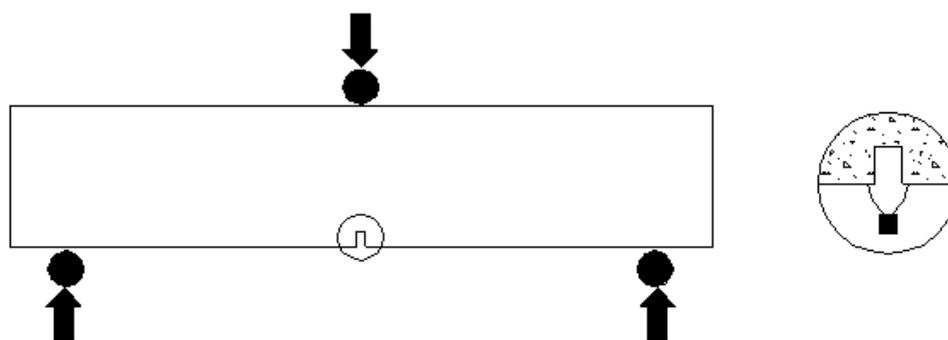


Figura A1 - Aplicação da carga do ensaio e detalhe do entalhe  
Fonte: Adaptado de EN 14651

De acordo com Soetens e Matthys (2014), o método prescrito pela EN é o mais utilizado para descrever o modelo constitutivo do CRF. Autores ressaltam que o ensaio de 3 pontos com o entalhe é o modelo mais recomendado para a análise do comportamento pós fissuração do prisma.

A grande vantagem do método com o entalhe é a simplicidade de controle para a resposta do corpo de prova pós fissurados. Com o controle CMOD (Crack mouth opening displacement) é possível assegurar que a fissura se propaga de forma estável (BAKHSHI, BARSBY E MOBASHER, 2014).

Para a execução do ensaio, a norma traz que os apoios e o ponto de aplicação de carga devem ser cilíndricos, confeccionados de aço com diâmetro de 30 mm e comprimento de, no mínimo, 600 mm. Segue na Figura A2 o esquema que mostra a ordem de preenchimento de concreto no molde. O número 1 e 2 representam a ordem de primeiro e segundo como ordem de preenchimento. Sendo que  $1/2$  do volume de concreto deve preencher o espaço 1 e  $1/4$  do volume nos espaços 2.

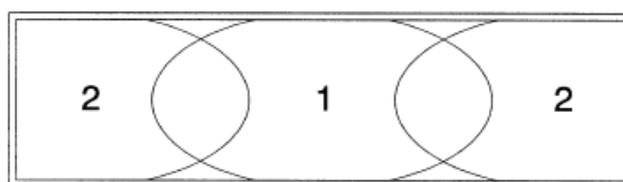


Figura A2 - Molde e concretagem do corpo de prova  
Fonte: EN 14651

Para a execução do entalhe no corpo de prova, este deve ser rotacionado com tal sorte que a superfície que receberá o entalhe fique perpendicular à superfície. Deve-se entalhar o corpo de prova com uma serra circular com jatos de água. O entalhe deve possuir dimensões de 5 mm ou menos, com profundidade de 25 mm  $\pm$  1 mm. Essa execução pode ser realizada no mínimo 3 dias antes de se realizar o ensaio. Segue na Figura A3 uma ilustração das dimensões do corpo de prova assim como seu entalhe.

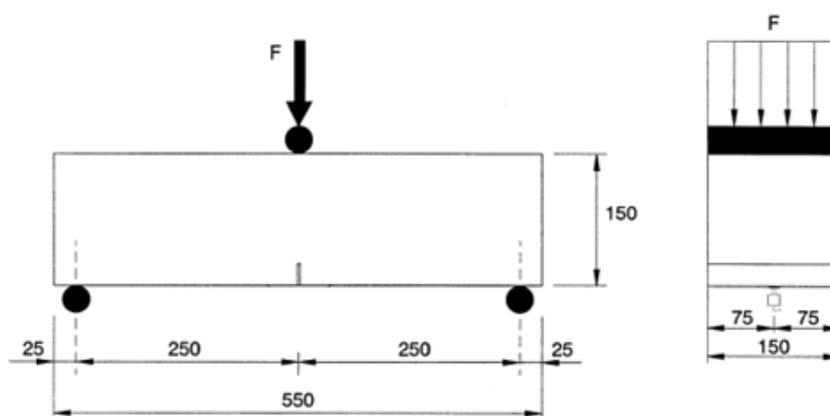


Figura A3 - dimensões do corpo de prova prismático (EN 14651)  
Fonte: Adaptado de EN 14651

Para determinação da deformação é necessário acoplar um transdutor de deslocamento a uma moldura fixa, que por sua vez será instalado na lateral do corpo de prova. Para a determinação do CMOD, outro transdutor deve ser acoplado na parte inferior do prisma. Segundo a Figura A4, uma das extremidades da moldura deve ser fixa no corpo de prova com uma fixação deslizante e com outra fixação que admita rotação.

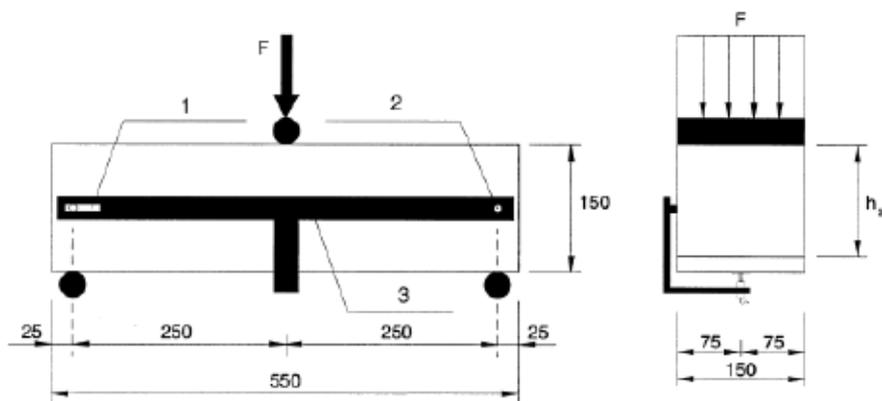


Figura A4 - Corpo de prova prismático e transdutor de deslocamento  
Fonte: Adaptado de EN 14651

O ensaio é realizado em sistema fechado de modo que a taxa de carregamento deve ser constante e igual a 0,05 mm/min em função do CMOD (crack mouth opening displacement) até um valor de fissuração igual a 0,1 mm. Após esse limite a taxa de carregamento do CMOD deve ser constante e igual a 0,20 mm/min. (EN 14651)

Durante os dois primeiros minutos de teste, os valores de carregamento devem estar regulados para uma frequência de 5 Hz, no mínimo. Após esse tempo, este valor pode ser reduzido para 1 Hz. (EN 14651)

O teste deve ser finalizado com um valor de CMOD maior que 4 mm. Se o valor de carga mínima estiver no intervalo de CMODFL para CMOD = 0,5 mm, e for inferior a 30% do valor da carga que corresponde ao CMOD = 0,5 mm, o teste deve ser verificado quanto à instabilidade.

A norma prescreve que as fissuras devem surgir no entalhe do corpo de prova, caso contrário o teste deve ser refeito e o corpo de prova descartado.

Para obtenção da carga  $F_L$ , deve ser feita uma linha paralela ao eixo do carregamento a uma distância de 0,05 mm nos diagramas de carga x CMOD ou carga x deslocamento. O valor de  $F_L$  é a carga máxima neste intervalo de 0 a 0,05mm. Os diagramas de carga x CMOD seguem nas Figura A5 e Figura A6, onde mostram as forças  $F_L, F_1, F_2, F_3$  e  $F_4$ .

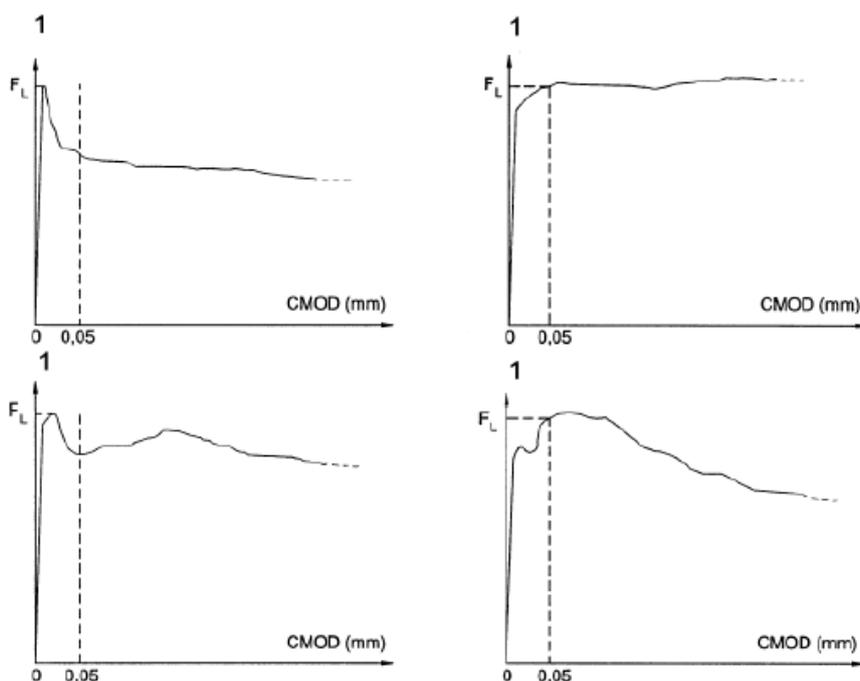


Figura A5 - Gráficos de Carga por CMOD e  $F_L$   
Fonte: EN 14651

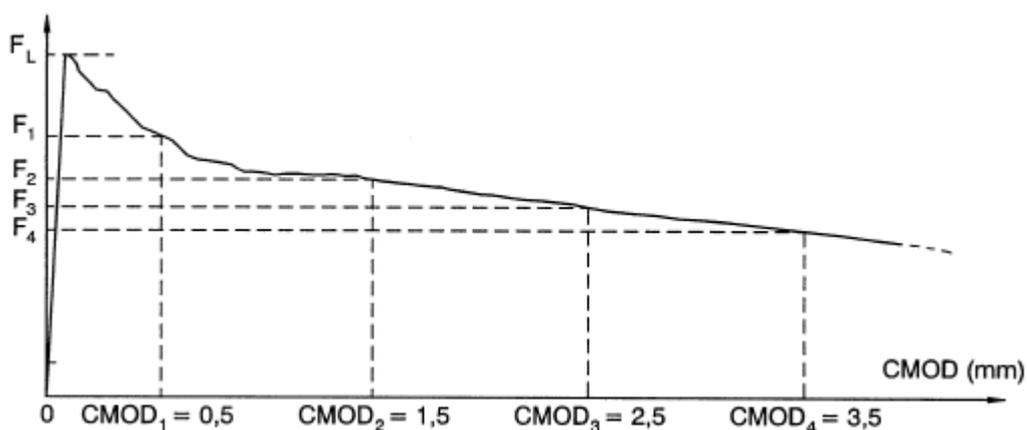


Figura A6 - Gráfico de  $F_j$  x CMOD  
Fonte: EN 14651

O Limite de Proporcionalidade (LOP) é calculado pela Equação A1:

$$f_{ct,L}^f = \frac{3 \cdot F_L \cdot l}{2 \cdot b \cdot h_{sp}^2} \quad \text{Equação A1}$$

Onde:  $f_{ct,L}^f$  é o Limite de Proporcionalidade (LOP);

$F_L$  é a carga que corresponde ao Limite de Proporcionalidade;

$l$  é o valor do comprimento do vão, ou seja, 500 mm;

$b$  é o valor da largura do corpo de prova prismático, ou seja, 150 mm;

$h_{sp}$  é o valor da altura do corpo de prova prismático menos o valor do entalhe, ou seja, 125 mm.

$F_L$  é a máxima carga entre 0 e 0,05 mm de deformação.

Para obtenção dos valores de tensão de flexão residual é utilizado a Equação A2 que segue:

$$f_{R,j} = \frac{3 \cdot F_j \cdot l}{2 \cdot b \cdot h_{sp}^2} \quad \text{Equação A2}$$

Onde:  $F_{R,j}$  é a tensão de flexão residual referente ao CMOD<sub>j</sub>, com j variando entre 1, 2, 3 e 4;

$F_j$  é a carga correspondente ao CMOD<sub>j</sub>;

$l$  é o valor do comprimento do vão, ou seja, 500 mm;

$b$  é o valor da largura do corpo de prova prismático, ou seja, 150 mm;

$h_{sp}$  é o valor da altura do corpo de prova prismático menos o valor do entalhe, ou seja, 125 mm.

Os níveis j (1, 2, 3 e 4) representam os valores da carga  $F_j$  aplicada que representa aos CMOD iguais a 0,5 mm, 1,5 mm, 2,5 mm e 3,5 mm, como mostra a Figura 19.

O momento fletor no meio do vão do corpo de prova do ensaio é dado pela Equação A3:

$$M = \frac{F \cdot l}{2 \cdot 2} \quad \text{Equação A3}$$

Onde:  $F$  é a carga e  $l$  é o vão.

Sendo assim, o LOP é dado pela Equação A4:

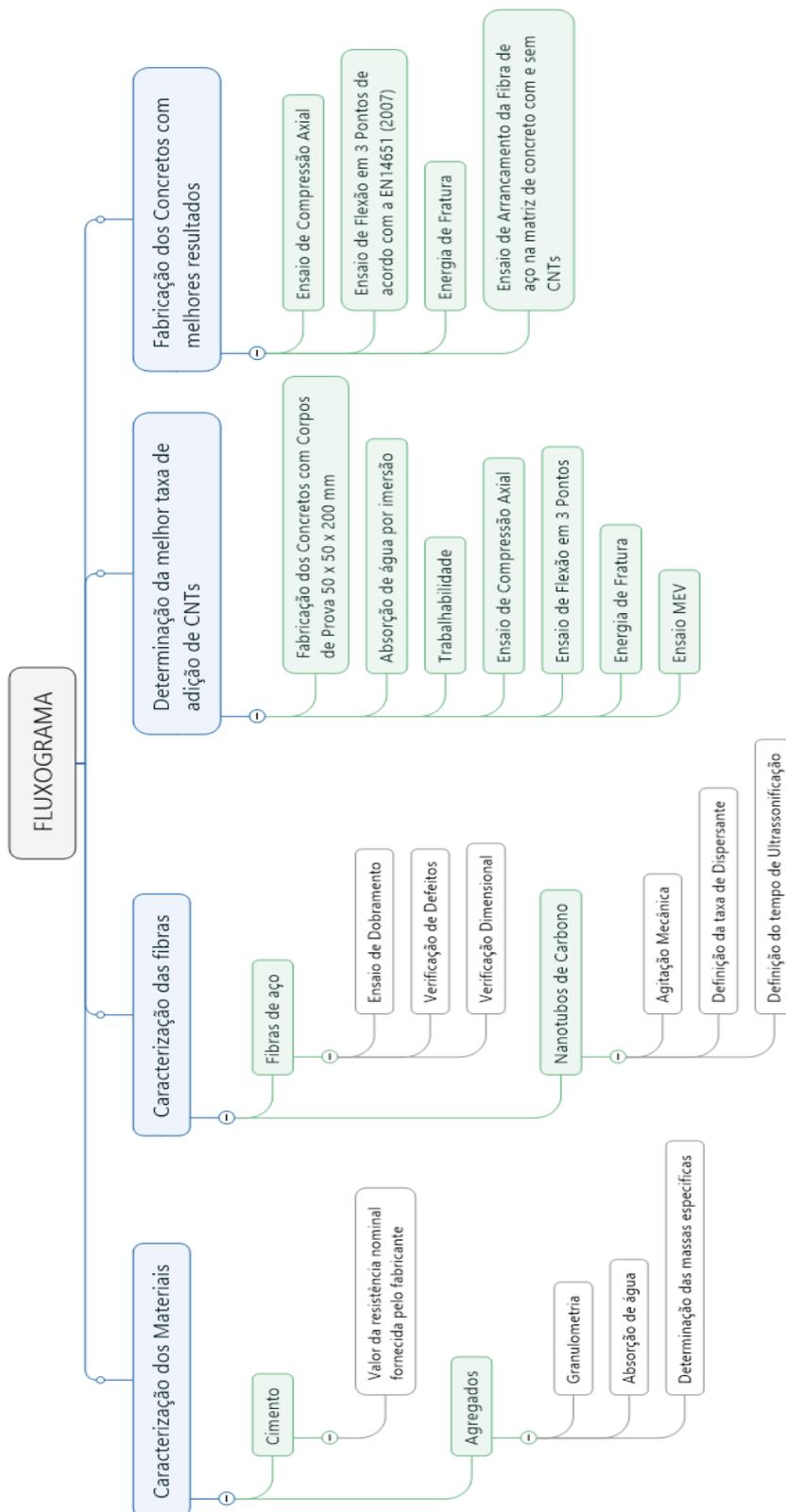
$$f_{ct,L}^f = \frac{3 \cdot F_L \cdot l}{2 \cdot b \cdot h_{sp}^2} = \frac{3 \cdot M_L \cdot 4}{2 \cdot b \cdot h_{sp}^2} = \frac{6 \cdot M_L}{b \cdot h_{sp}^2} \quad \text{Equação A4}$$

E a tensão de flexão residual é dada pela Equação A5:

$$f_{R,j} = \frac{3 \cdot F_j \cdot l}{2 \cdot b \cdot h_{sp}^2} = \frac{3 \cdot M_j \cdot 4}{2 \cdot b \cdot h_{sp}^2} = \frac{6 \cdot M_j}{b \cdot h_{sp}^2} \quad \text{Equação A5}$$

A utilização dos dados de resistência residual extraídas deste gráfico são utilizados para o dimensionamento de estruturas. Apenas os valores de CMOD iguais a 0,5 e 2,5 são utilizados, sendo que o de 0,5 corresponde ao estado limite de serviço e o de 2,5 para o estado limite último (di PRISCO; PLIZZARI; VANDEWALLE, 2009). Esses valores de CMOD correspondem aos valores de  $f_{R1k}$  e  $f_{R3k}$ , respectivamente.

## ANEXO B

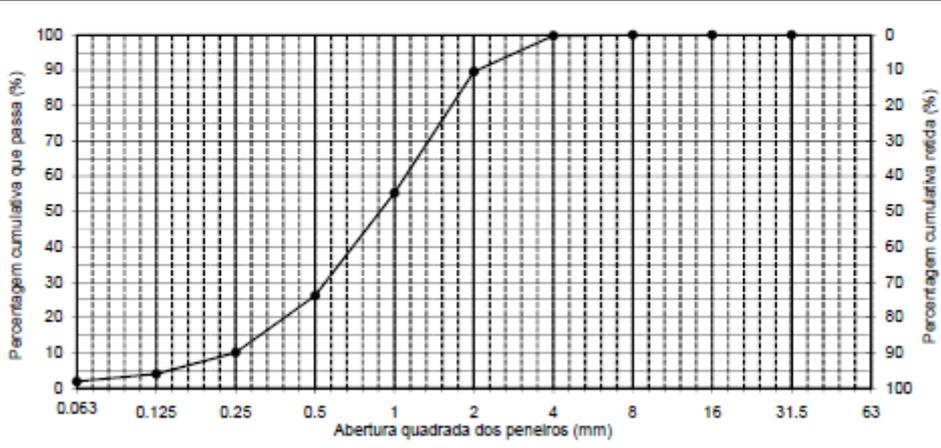


## ANEXO C

Este anexo contém os relatórios de ensaio de granulometria dos agregados.

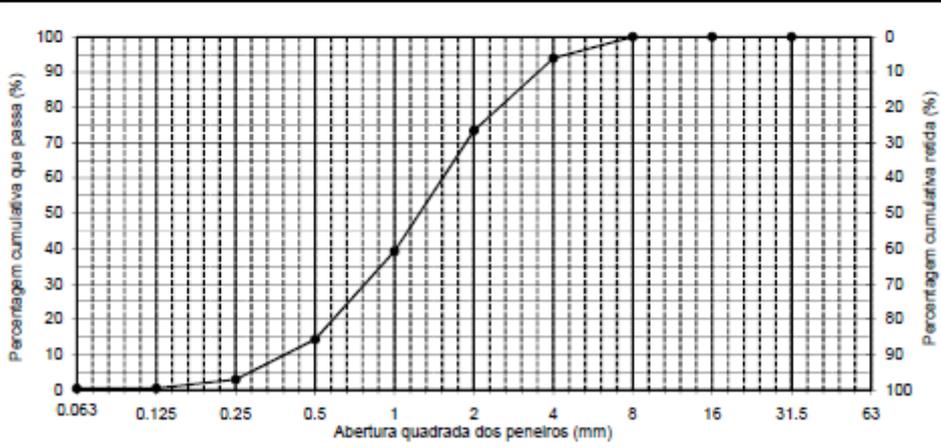
UNIVERSIDADE DO MINHO		ANÁLISE GRANULOMÉTRICA NP EN 933-1					
 UNIVERSIDADE DO MINHO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL UNIVERSIDADE DO MINHO LABORATORIO DE GEOTECNIA GUIMARÃES 4800-058		REQUERENTE: JOÃO PEDRO LOPES					
		OBRA: MESTRADO					
		LOCALIZAÇÃO: UMINHO					
		PROC. N.º: IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA - AREIA (1) 0/4 mm					
Procedimento usado: lavagem e peneiração							
Massa seca total $M_1$ (kg)		737,500	Massa seca total $M_1$ (kg)				
Massa seca após lavagem $M_2$ (kg)		737,500	Massa seca após lavagem $M_2$ (kg)				
Massa seca dos finos removidos por lavagem $M_2$ (kg)		0,000	Massa seca dos finos removidos por lavagem $M_2$ (kg)		0,000		
1ª Análise granulométrica				2ª Análise granulométrica			
Dimensões (mm)	Massa (kg)	% Retido	% Cumulativa passado	Dimensões (mm)	Massa (kg)	% Retido	% Cumulativa passado
63	0,000	0	100	63		M1 inválido	M1 inválido
31,5	0,000	0	100	31,5		M1 inválido	M1 inválido
16	0,000	0	100	16		M1 inválido	M1 inválido
8	0,000	0	100	8		M1 inválido	M1 inválido
4	1,200	0	100	4		M1 inválido	M1 inválido
2	75,000	10	90	2		M1 inválido	M1 inválido
1	253,600	34	55	1		M1 inválido	M1 inválido
0,5	214,800	29	26	0,5		M1 inválido	M1 inválido
0,25	118,600	16	10	0,25		M1 inválido	M1 inválido
0,125	44,500	6	4	0,125		M1 inválido	M1 inválido
0,063	15,900	2	2	0,063		M1 inválido	M1 inválido
P	12,400	-	-	P		-	-
% Finos	-	1,7	-	% Finos	-	M1 inválido	-
Total	736,000	100	-	Total	0,000	M1 inválido	-
$\frac{M_2 - (\sum R_i + P)}{M_2} =$		0,2%	Observações: ensaio válido (<1%)	$\frac{M_2 - (\sum R_i + P)}{M_2} =$		M1 inválido	Observações:

	
TÉCNICO RESPONSÁVEL (ASSINATURA)	
COORDENADOR DO LG (ASSINATURA)	
DATA:	

UNIVERSIDADE DO MINHO		ANÁLISE GRANULOMÉTRICA NP EN 933-1					
 UNIVERSIDADE DO MINHO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL UNIVERSIDADE DO MINHO LABORATORIO DE GEOTECNIA GUIMARÃES 4800-055		REQUERENTE: JOÃO PEDRO LOPES					
		OBRA: MESTRADO					
		LOCALIZAÇÃO: UMINHO					
		PROC. Nº: IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA - AREIA (2) 0/4 mm					
Procedimento usado: lavagem e peneiração							
Massa seca total $M_1$ (kg)		748,000	Massa seca total $M_1$ (kg)				
Massa seca após lavagem $M_2$ (kg)		748,000	Massa seca após lavagem $M_2$ (kg)				
Massa seca dos finos removidos por lavagem $M_2$ (kg)		0,000	Massa seca dos finos removidos por lavagem $M_2$ (kg)		0,000		
1ª Análise granulométrica				2ª Análise granulométrica			
Dimensões (mm)	Massa (kg)	% Retido	% Cumulativa passado	Dimensões (mm)	Massa (kg)	% Retido	% Cumulativa passado
63	0,000	0	100	63		M1 inválido	M1 inválido
31,5	0,000	0	100	31,5		M1 inválido	M1 inválido
16	0,000	0	100	16		M1 inválido	M1 inválido
8	0,000	0	100	8		M1 inválido	M1 inválido
4	45,100	6	94	4		M1 inválido	M1 inválido
2	153,500	21	73	2		M1 inválido	M1 inválido
1	255,600	34	39	1		M1 inválido	M1 inválido
0,5	187,100	25	14	0,5		M1 inválido	M1 inválido
0,25	64,600	11	3	0,25		M1 inválido	M1 inválido
0,125	18,800	3	0	0,125		M1 inválido	M1 inválido
0,063	0,600	0	0	0,063		M1 inválido	M1 inválido
P	0,900	-	-	P		-	-
% Finos	-	0,1	-	% Finos	-	M1 inválido	-
Total	746,200	100	-	Total	0,000	M1 inválido	-
$\frac{M_2 - (\sum R_i + P)}{M_2} =$		0,2%	Observações: ensaio válido (<1%)	$\frac{M_2 - (\sum R_i + P)}{M_2} =$		M1 inválido	Observações:

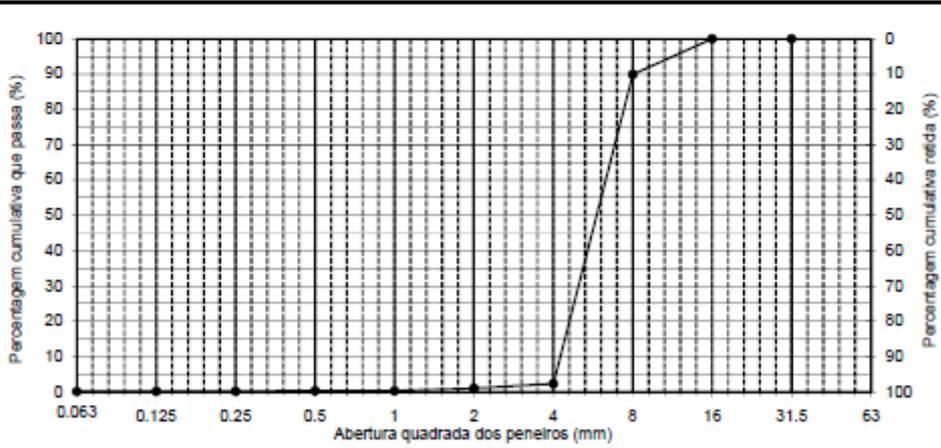
  



TECNICO RESPONSÁVEL (ASSINATURA)	COORDENADOR DO LG (ASSINATURA)
DATA:	DATA:

UNIVERSIDADE DO MINHO		ANÁLISE GRANULOMÉTRICA NP EN 933-1					
 UNIVERSIDADE DO MINHO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL UNIVERSIDADE DO MINHO LABORATORIO DE GEOTECNIA GUIMARÃES 4800-055		REQUERENTE: JOÃO PEDRO LOPES					
		OBRA: MESTRADO					
		LOCALIZAÇÃO: UMINHO					
		PROC. Nº: IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA - BRITA 4/8 mm					
Procedimento usado: lavagem e peneiração							
Massa seca total $M_1$ (kg)		1497,600		Massa seca total $M_1$ (kg)			
Massa seca após lavagem $M_2$ (kg)		1497,600		Massa seca após lavagem $M_2$ (kg)			
Massa seca dos finos removidos por lavagem $M_2$ (kg)		0,000		Massa seca dos finos removidos por lavagem $M_2$ (kg)		0,000	
1ª Análise granulométrica				2ª Análise granulométrica			
Dimensões (mm)	Massa (kg)	% Retido	% Cumulativa passado	Dimensões (mm)	Massa (kg)	% Retido	% Cumulativa passado
63	0,000	0	100	63		M1 Inválido	M1 Inválido
31,5	0,000	0	100	31,5		M1 Inválido	M1 Inválido
16	0,000	0	100	16		M1 Inválido	M1 Inválido
8	150,600	10	90	8		M1 Inválido	M1 Inválido
4	1312,200	88	2	4		M1 Inválido	M1 Inválido
2	20,000	1	1	2		M1 Inválido	M1 Inválido
1	10,200	1	0	1		M1 Inválido	M1 Inválido
0,5	0,200	0	0	0,5		M1 Inválido	M1 Inválido
0,25	1,600	0	0	0,25		M1 Inválido	M1 Inválido
0,125	0,600	0	0	0,125		M1 Inválido	M1 Inválido
0,063	0,600	0	0	0,063		M1 Inválido	M1 Inválido
P	0,300	-	-	P		-	-
% Finos	-	0,0	-	% Finos	-	M1 Inválido	-
Total	1496,300	100	-	Total	0,000	M1 Inválido	-
$\frac{M_2 - (\sum R_i + P)}{M_2} =$		0,1%	Observações: ensaio válido (<1%)	$\frac{M_2 - (\sum R_i + P)}{M_2} =$		M1 Inválido	Observações:



Percentagem cumulativa que passa (%)

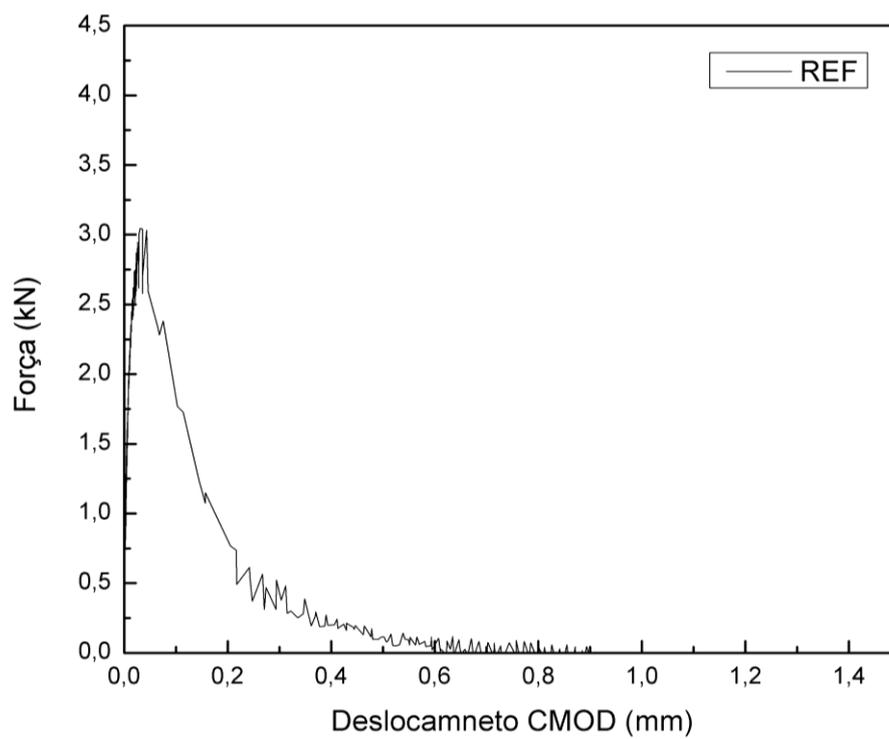
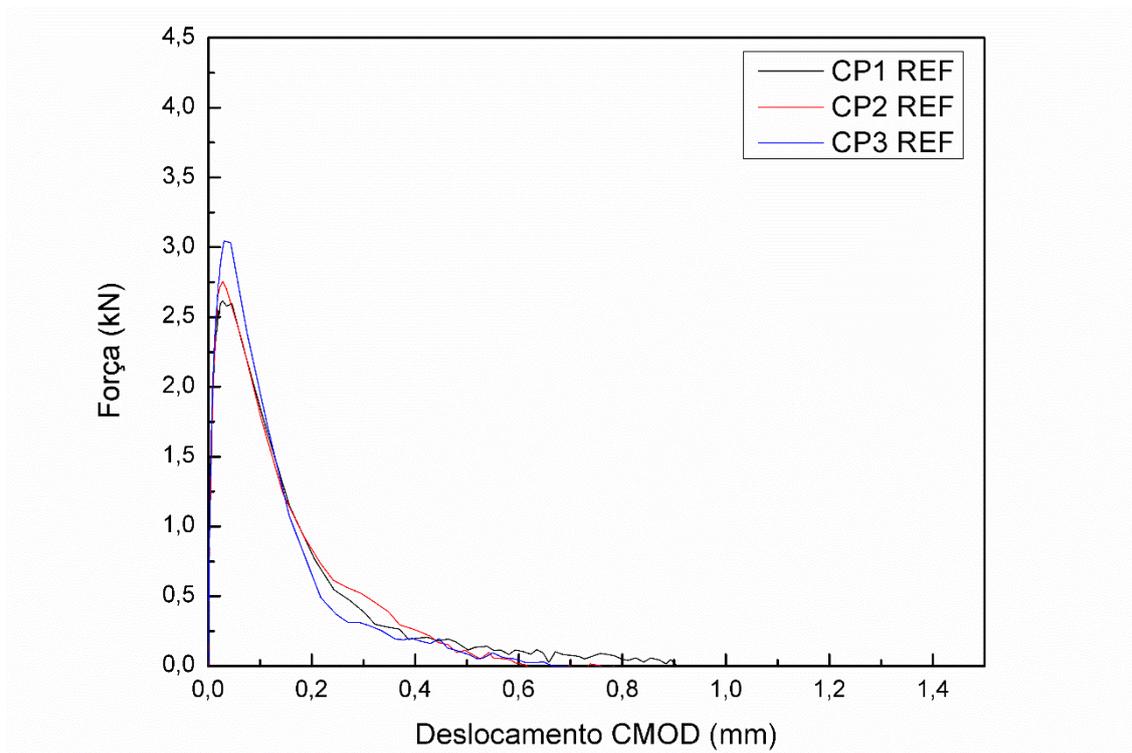
Abertura quadrada dos peneiros (mm)

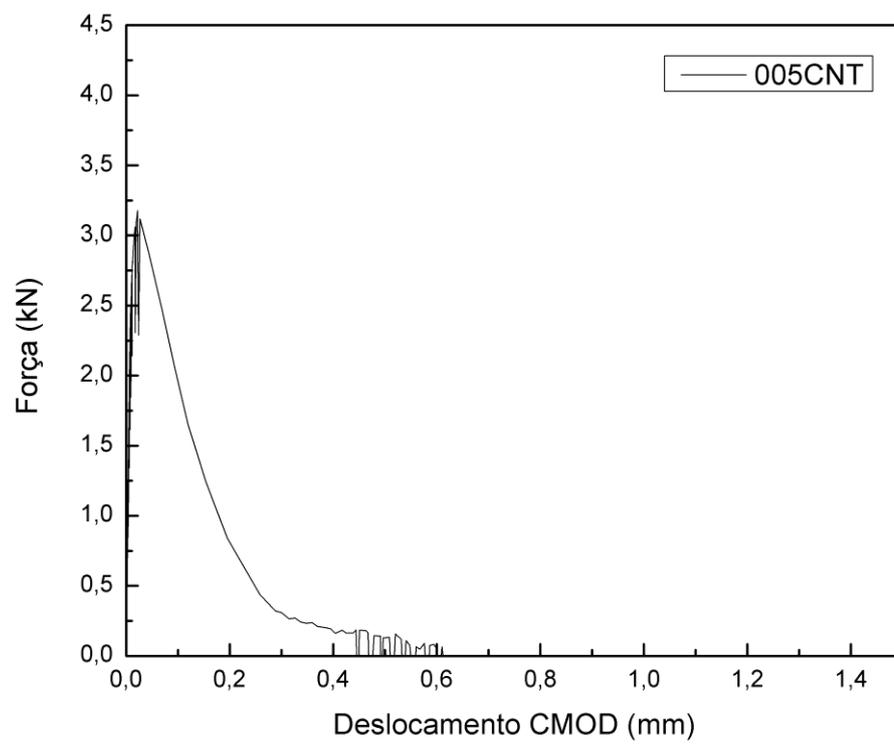
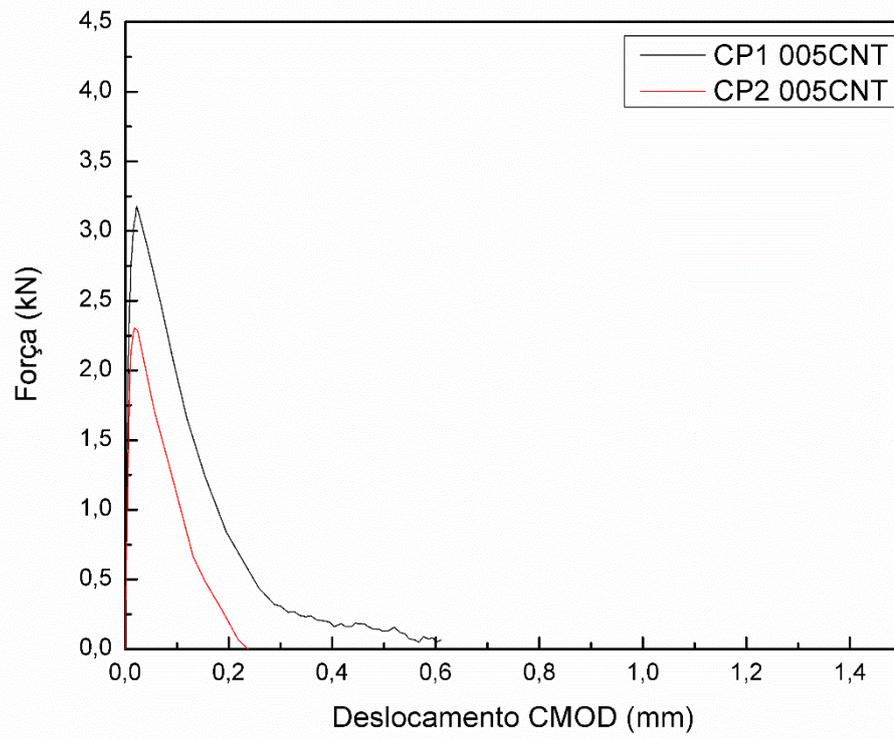
Percentagem cumulativa retida (%)

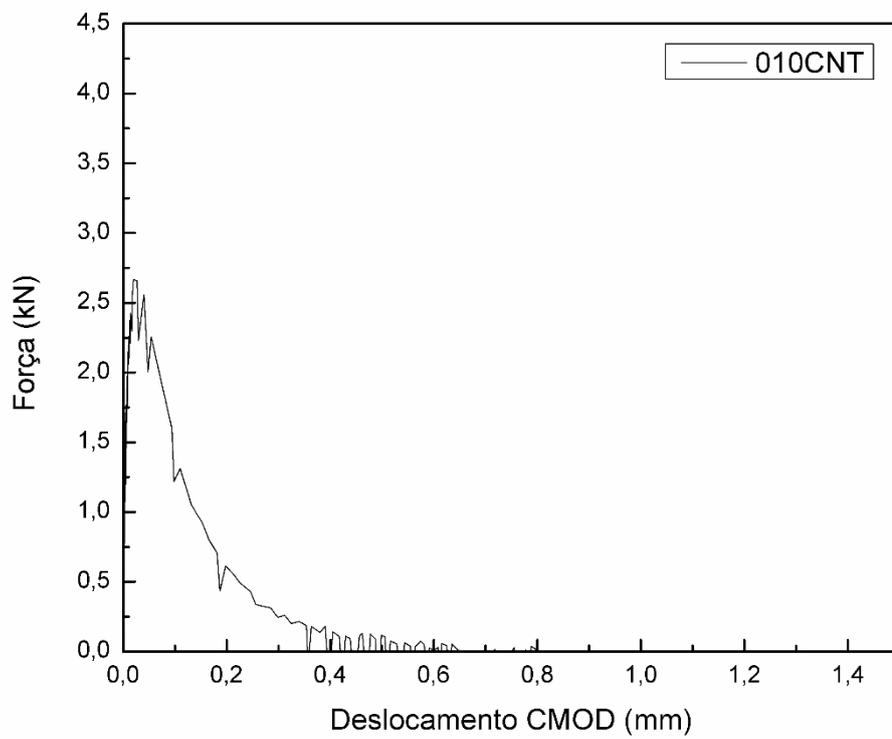
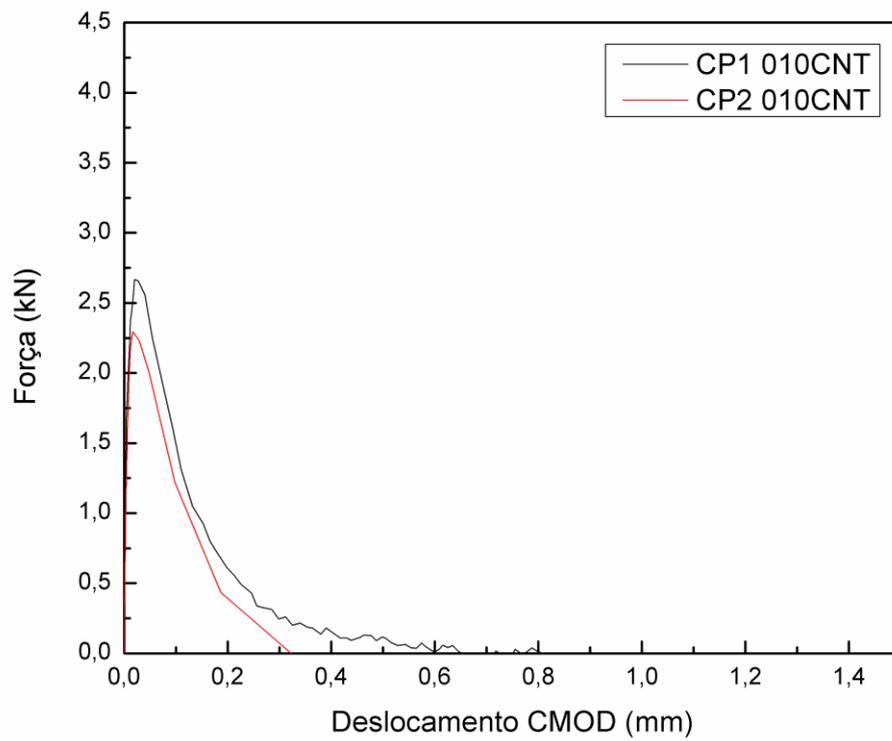
TÉCNICO RESPONSÁVEL (ASSINATURA)	COORDENADOR DO LG (ASSINATURA)
DATA:	DATA:

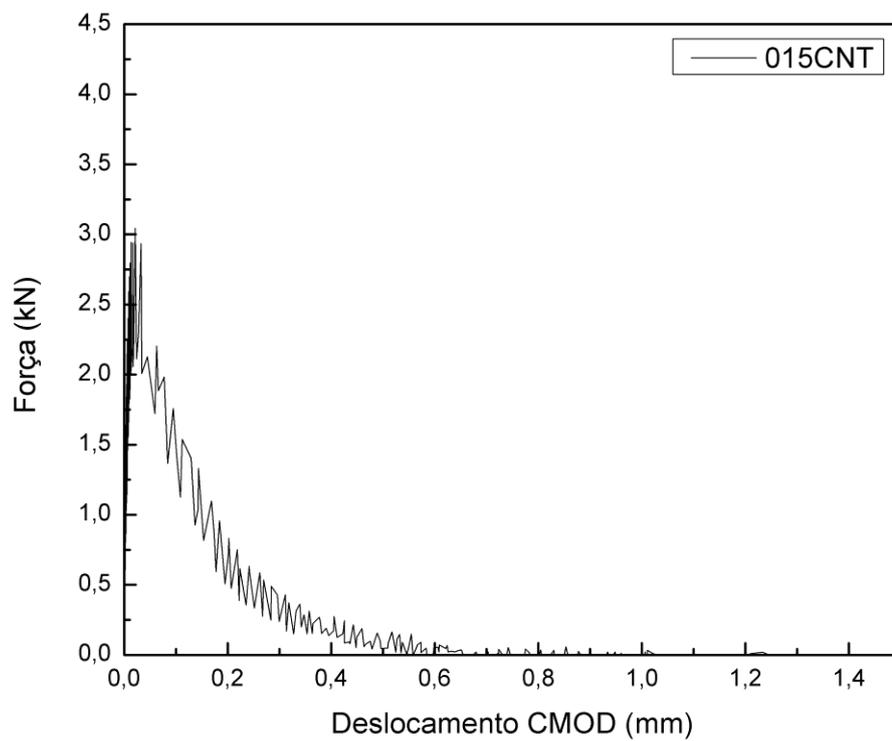
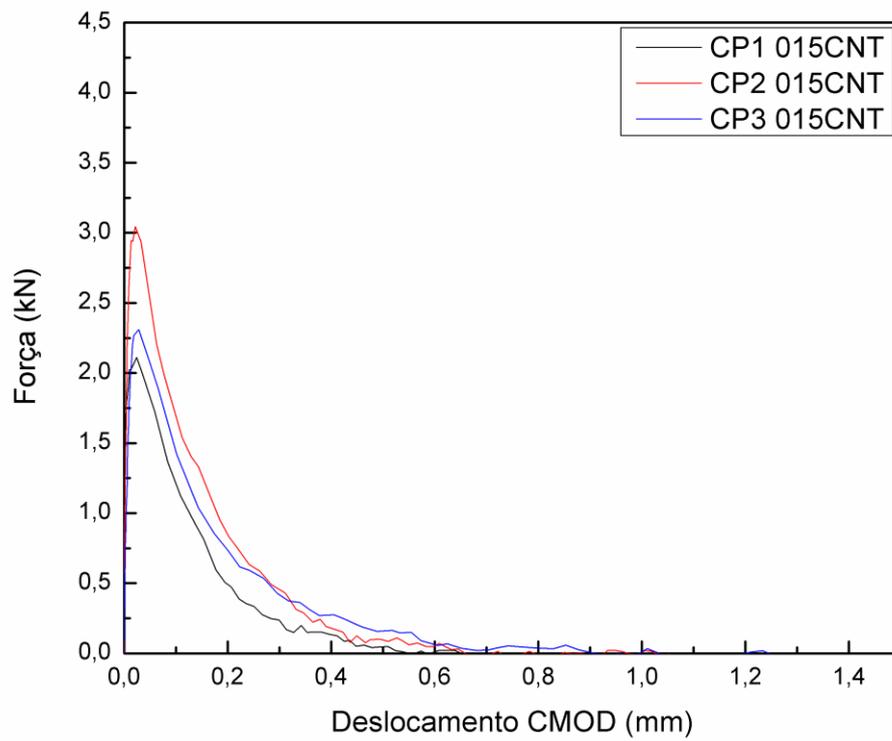
## ANEXO D

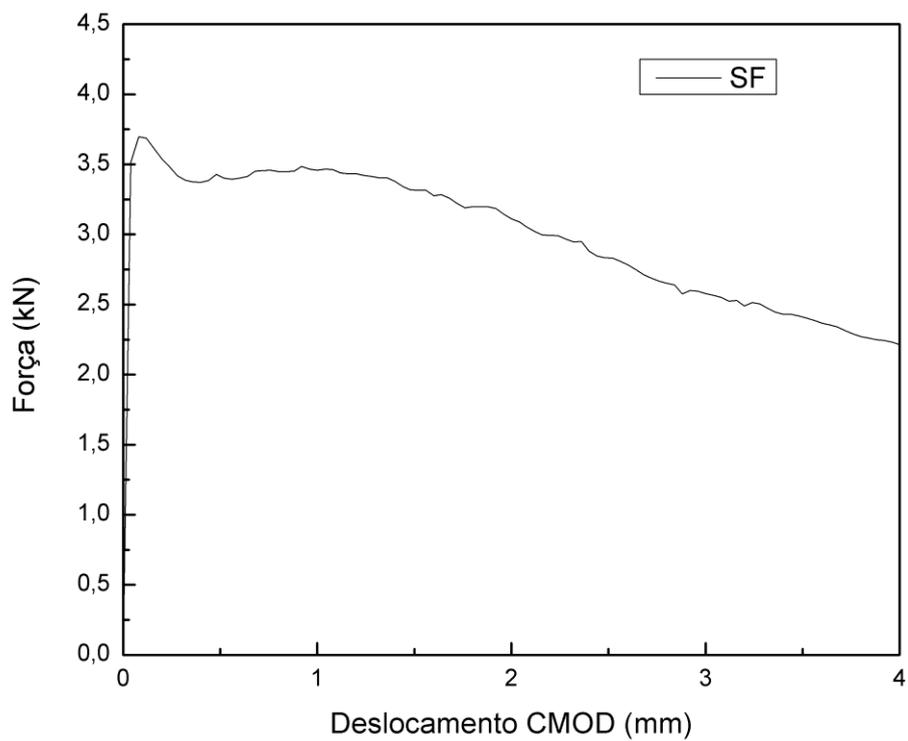
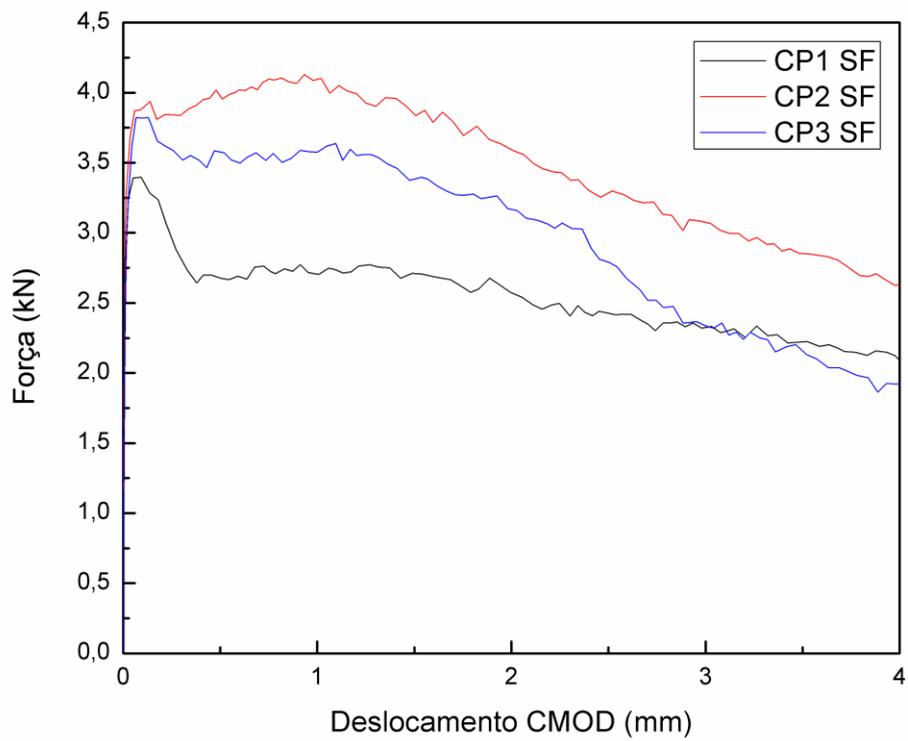
Este anexo contém os resultados obtidos do ensaio de flexão em 3 pontos dos corpos de prova 50 x 50 x 200 mm.

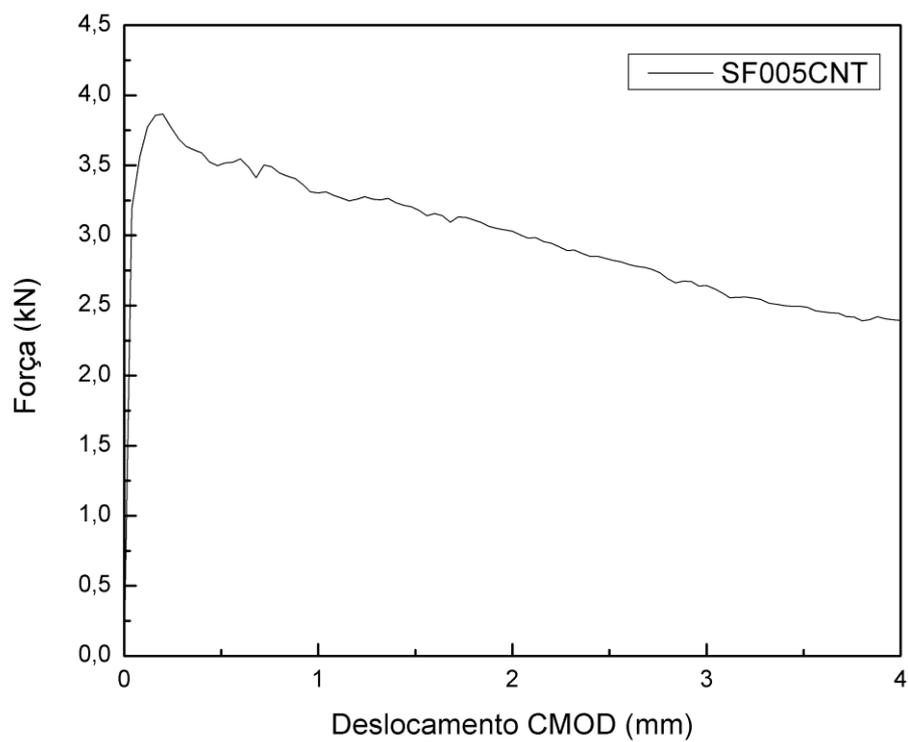
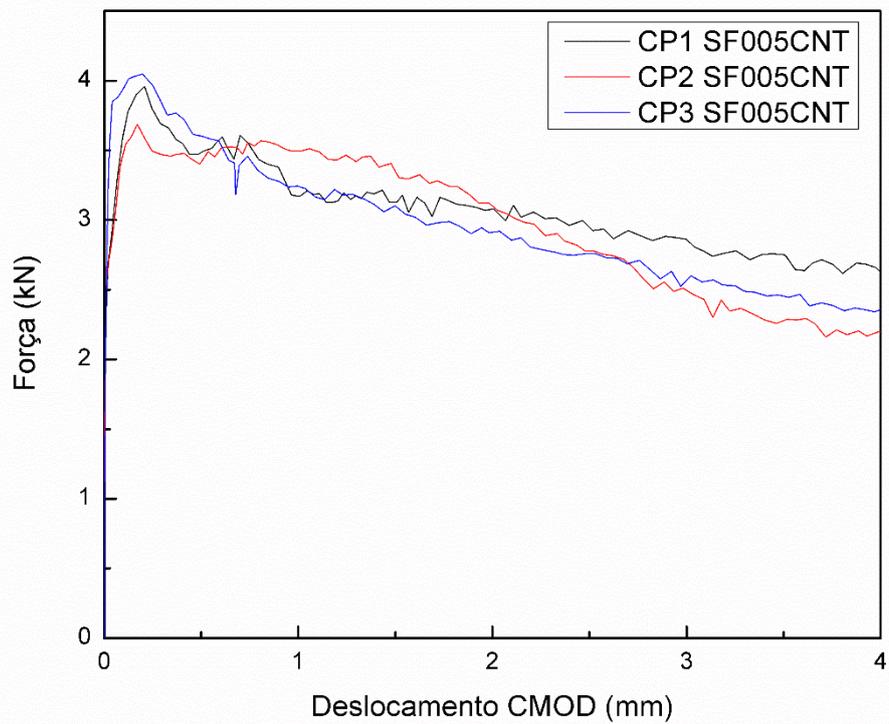


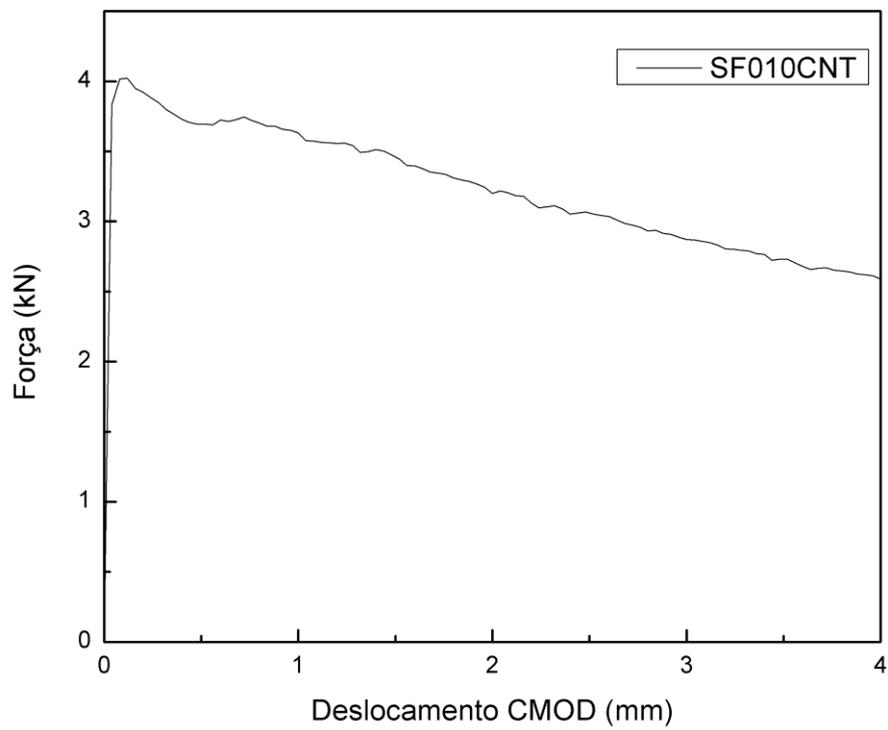
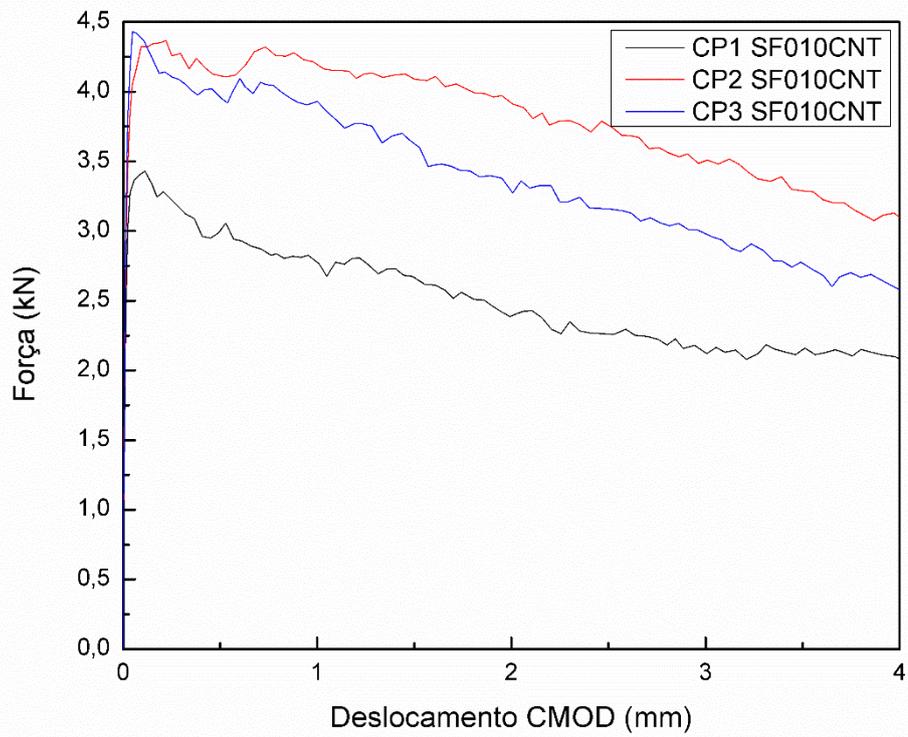


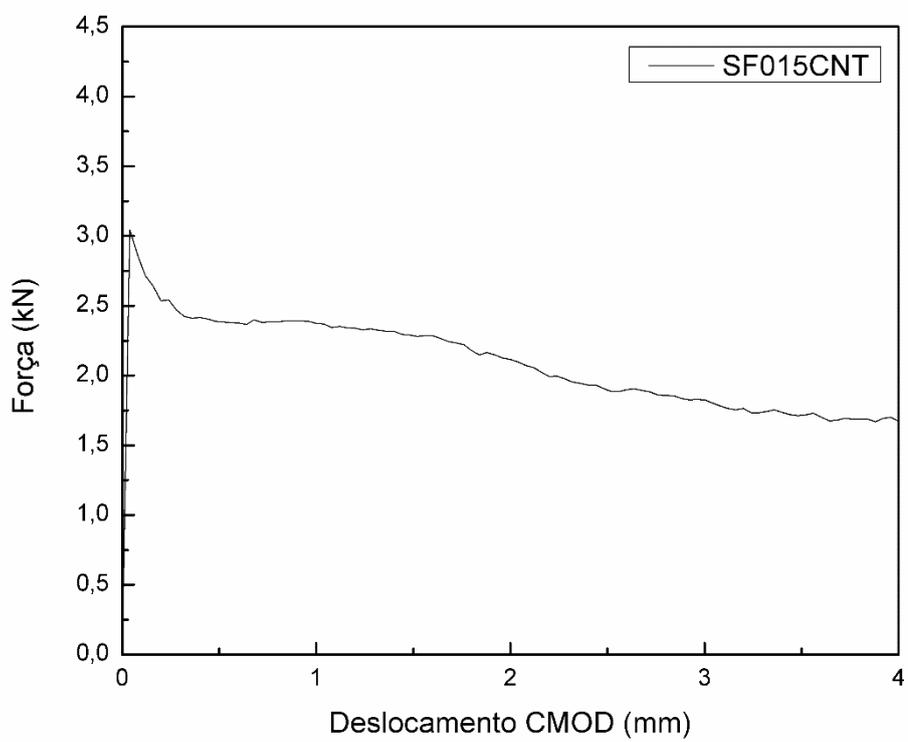
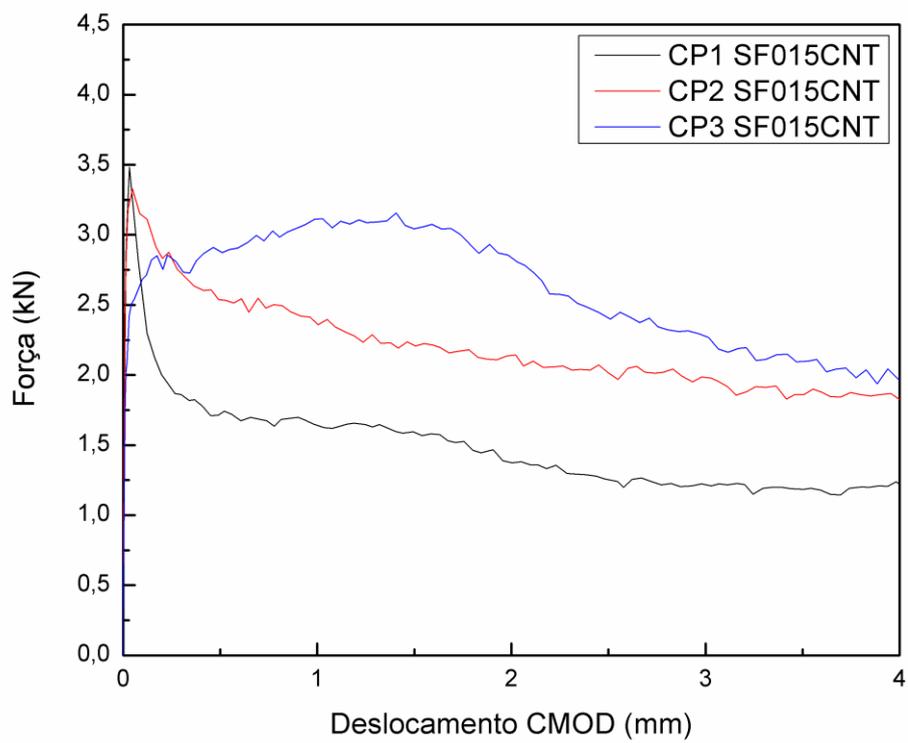












## ANEXO E

Este anexo contém os resultados obtidos do ensaio de flexão em 3 pontos dos corpos de prova 150 x 150 x 600 mm segundo a EN 14651 (2007).

