

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA
DE MINAS GERAIS – CEFET/MG
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Felipe Sérgio Bastos Jorge

**INFLUÊNCIA DA CINZA DE CASCA DE ARROZ COMO ADIÇÃO
MINERAL NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE CONCRETO
COM FIBRAS DE AÇO**

Orientador: Prof. Dr. Conrado de Souza Rodrigues

Belo Horizonte, fevereiro de 2018

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA
DE MINAS GERAIS – CEFET/MG
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Felipe Sérgio Bastos Jorge

**INFLUÊNCIA DA CINZA DE CASCA DE ARROZ COMO ADIÇÃO
MINERAL NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE CONCRETO
COM FIBRAS DE AÇO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil

Orientador: Prof. Dr. Conrado de Souza Rodrigues

Belo Horizonte, fevereiro de 2018

J82i Jorge, Felipe Sérgio Bastos
Influência da cinza de casca de arroz como adição mineral no comportamento mecânico de concreto com fibras de aço. / Felipe Sérgio Bastos Jorge. -- Belo Horizonte, 2018.
85 f. : il.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. 2018.

Orientador: Prof. Dr. Conrado de Souza Rodrigues.

Bibliografia

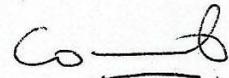
1. Resíduos Como Materiais de Construção. 2. Resistência dos Materiais - Concreto. 3. Materiais de Construção – Vida Útil – Concreto. I. Rodrigues, Conrado de Souza. II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. III. Título

CDD 691.3

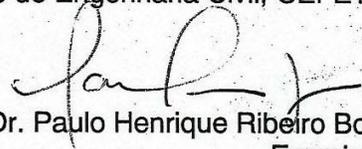
FELIPE SÉRGIO BASTOS JORGE

**INFLUÊNCIA DA CINZA DE CASCA DE ARROZ COMO
ADIÇÃO MINERAL NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE
CONCRETO COM FIBRAS DE AÇO**

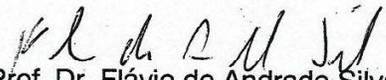
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do CEFET-MG como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.



Prof. Dr. Conrado de Souza Rodrigues
Orientador
Departamento de Engenharia Civil, CEFET-MG



Prof. Dr. Paulo Henrique Ribeiro Borges
Examinador
Departamento de Engenharia Civil, CEFET-MG



Prof. Dr. Flávio de Andrade Silva
Examinador
CIV, PUC-Rio

Belo Horizonte, 16 de fevereiro de 2018

Dedico este trabalho à minha esposa e meus
filhos, que são a razão de tudo que faço em
minha vida.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, que está sempre ao meu lado me dando forças e me protegendo em todos os momentos. Agradeço pela oportunidade de concluir esse desafio.

Aos meus pais Antonio Jorge e Maria Inez por terem me dado educação, por terem me ensinado o respeito e por terem me dado sempre o seu apoio incondicional.

À minha família: Ana Cecília, esposa maravilhosa, companheira de trabalho e de vida a quem eu amo e sempre me dá apoio e me incentiva; nossos filhos Antonio e Mariana, pessoinhas especiais que completam nossa felicidade.

Ao CEFET-MG, pela oportunidade de ingressar e fazer parte desse grupo de pesquisadores, pela infraestrutura disponível e pelos ensinamentos que vão além dos limites do Campus.

Ao meu Orientador Prof. Conrado de Souza Rodrigues, que me aceitou em seu grupo de pesquisa e me ajudou a alcançar os resultados. Obrigado pela paciência e disponibilidade.

Ao pessoal da PUC-Rio que viabilizou a realização dos ensaios de flexão.

Aos demais professores que com dedicação me transmitiram seu conhecimento e de alguma forma me orientaram no desenvolvimento do trabalho.

Aos meus irmãos e amigos, sempre lá quando preciso, em especial Ricardo, Ju, Matheus e Silvino.

Muito Obrigado.

A criatividade é a inteligência se divertindo

Albert Einstein

Resumo

O concreto possui alta resistência à compressão e durabilidade, mas sua ductilidade é baixa, o que o torna um material frágil e com pouca capacidade de absorção de energia, ou tenacidade. Nesse sentido, pesquisas com a utilização de fibras incorporadas ao concreto têm sido direcionadas com o objetivo de agregar tenacidade. Nos compósitos cimentícios, a zona de transição interfacial (ITZ) é aquela na qual surgem as primeiras fissuras que ao se propagarem levam à fratura do material. O desempenho de compósitos cimentícios reforçados com fibras depende da eficiência do processo de transferência das tensões para o reforço fibroso, de forma a garantir o funcionamento do conjunto. Entre os fatores determinantes dessa eficiência está a qualidade da matriz cimentícia que é dada pela sua densidade, ou seja, à medida que a interface entre os materiais se torna densa, aumenta a aderência entre esses componentes. Adições minerais têm sido incorporadas às matrizes cimentícias com dois objetivos fundamentais: dar uma destinação sustentável aos resíduos agroindustriais e melhorar as propriedades dos compósitos à base de cimento. A cinza de casca de arroz (CCA), que é produzida através da queima da casca de arroz com fins de geração de energia possui alto teor de sílica amorfa, o que lhe confere alto potencial de utilização pela sua atividade pozolânica. O objetivo dessa pesquisa foi avaliar os efeitos da incorporação de fibras de aço e CCA em concretos cuja formulação é a aquela empregada na produção de dormentes ferroviários. Para isso, foram realizados ensaios de caracterização do concreto fresco e endurecido utilizado atualmente na produção, ensaios de flexão em quatro pontos nos concretos reforçados com fibras nos percentuais de 0.5, 0.75 e 1.0% com e sem CCA e ensaios de arrancamento de fibra única em proposições com e sem CCA. Os resultados apontaram ganhos nos picos de carga, resistência residual pós fissuração e tenacidade. A utilização da CCA se mostrou eficaz e é uma boa alternativa para o incremento das propriedades do concreto reforçado com fibras de aço.

Palavras Chave

Aderência, CCA, Fibra de aço, ITZ.

Abstract

Concrete has high compressive strength and durability, but its ductility is low, which makes it a brittle material with little capacity for energy absorption, or toughness. In this sense, research with fibers incorporated in concrete has been directed with the objective of adding toughness. In cement-based composites, the interfacial transition zone (ITZ) is one in which the first cracks arise which, when propagated, lead to a material failure. The performance of fiber reinforced cement-based composites depends on stress transfer process efficiency to fibrous reinforcement, in order to guarantee the assembly operation. Among the determinants of this efficiency is the quality of cementitious matrix that is given by its density, that is, as interface between materials becomes dense, the adhesion between these components increases. Mineral additions have been incorporated into cement matrixes with two fundamental objectives: to give a sustainable destination to agroindustrial waste and to improve cement-based composites properties. Rice husk ash (RHA), which is produced by burning rice hulls for energy generation purposes, has a high content of amorphous silica, which gives it high potential for its pozzolanic activity. Research's aim was to evaluate the effects of incorporation of steel fibers and RHA in concretes whose formulation is used in railway lines production. For this, characterization tests of fresh and hardened concrete currently used in production were carried out, four-point flexural tests on the fiber-reinforced concretes in the percentages of 0.5, 0.75 and 1.0% with and without RHA and single fiber pullout tests in propositions with and without RHA. The results showed gains in load peaks, residual resistance post-cracking and toughness. Use of RHA proved to be effective and is a good alternative for increasing the properties of reinforced concrete with steel fibers.

Keywords

Adhesion, RHA, Steel fiber, ITZ.

Lista de figuras

Figura 1 - Esquema de via ferroviária permanente	16
Figura 2 - Linhas de tensão e pontes por reforço fibroso.....	21
Figura 3 - Percentuais ideais de finos e fibras	24
Figura 4 - Comportamento ao ensaio de arrancamento.....	25
Figura 5 - Variação da curva tensão X deformação conforme percentual de adição de fibras de aço	27
Figura 6 - Comportamento típico para o ensaio de arrancamento	31
Figura 7 - Comportamento da fibra pré-fissuração.....	31
Figura 8 - Tensões de cisalhamento adesional e friccional.....	32
Figura 9 - Comportamento de fibras com e sem gancho no ensaio de arrancamento.....	33
Figura 10 - Esquema de fissuração	34
Figura 11 - Diagrama carga x deflexão	35
Figura 12 - Diagrama de fases na flexão	36
Figura 13 - Esquema de ITZ	37
Figura 14 - Tensão de aderência	39
Figura 15 - a) curva granulométrica da areia – b) curva granulométrica da brita.....	46
Figura 16 - Granulometria da CCA a laser	47
Figura 17 - Fibra de aço Belgo Bekaert.....	48
Figura 18 - Detalhe máquina ensaio para compressão axial	50
Figura 19 – Mecanismo do ensaio de arrancamento	52
Figura 20 - Detalhe do molde em acrílico para ensaio de arrancamento	53
Figura 21 - Moldagem para ensaio de arrancamento	54
Figura 22 - Detalhe de montagem para o ensaio de flexão em quatro pontos	56
Figura 23 - Detalhe CP e marcação dos pontos de interesse para os ensaios.....	57
Figura 24 - a) pórtico para realização do ensaio de flexão. b) detalhe CP preparado para ensaio com LVDT e dispositivo <i>Yoke</i>	59
Figura 25 - Ensaio de abatimento de tronco de cone.....	60

Figura 26 - Ensaio de arrancamento de fibra.....	61
Figura 27 - Gráficos de arrancamento de fibra. a) 00% CCA, (b) 15% CCA	63
Figura 28 - Gráfico carga x deflexões médias.....	66
Figura 29 - Comparativo de tenacidade entre formulações.....	67
Figura 30 - Padrão de fissuração no ensaio de flexão.....	68

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Propriedades típicas das fibras	22
Tabela 2 - Composição química da CCA.....	42
Tabela 3 - Nomenclatura dos CP's para ensaio de flexão.....	44
Tabela 4 - Nomenclatura dos CP's para ensaio de arrancamento	45
Tabela 5 - Caracterização química da CCA por FRX	47
Tabela 6 - Caracterização da fibra de aço.....	48
Tabela 7 - Traço fornecido pela Conprem	50
Tabela 8 - Parâmetros do ensaio de compressão axial.....	51
Tabela 9 - Traço utilizado no ensaio de arrancamento.....	54
Tabela 10 - Parâmetros do ensaio de arrancamento	55
Tabela 11 - Quantitativo de materiais para cada formulação	58
Tabela 12 - Parâmetros do ensaio de flexão.....	59
Tabela 13 - Resultados ensaio de compressão axial	61
Tabela 14 - Resultados ensaio de arrancamento	63
Tabela 15 - Rigidez da ITZ	64
Tabela 16 - Resultados ensaio de flexão.....	65
Tabela 17 - Resistência equivalente.....	67

Lista de Abreviaturas e Siglas

ACI – American Concrete Institute

ASTM – American Society for testing and materials

CaO – Óxido de cálcio

CCA – Cinza de casca de arroz

CEFET-MG – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

CH (Ca(OH)₂)– Hidróxido de cálcio

CO₂ – Dióxido de carbono

CP – Corpo de prova

CPFL – Corpo de prova para ensaio de flexão

CPPO – Corpo de prova para ensaio de pullout

CPV-ARI – Cimento Portland tipo V com alta resistência inicial

C-S-H (CaO-SiO₂-H₂O) – Silicato de cálcio hidratado

Faperj – Fundação de Amparo à Pesquisa do Rio de Janeiro

FRX – Fluorescência por raios-X

ITZ – Interfacial transition zone (zona de transição interfacial)

KN - Quilonewton

LVDT - Linear Variable Differential Transformer (Transformador Diferencial Variável Linear)

MPa – Megapascal

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora

NM – Norma mercosul

PUC-Rio – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

RILEM – International Union of Laboratories and experts in construction materials, systems and structures

SiO₂ – Dióxido de silício (sílica)

Sumário

1. INTRODUÇÃO	14
1.1. Objetivos	16
1.2. Justificativa e Relevância.....	17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1. Panorama histórico do concreto	19
2.2. Concreto reforçado com fibras.....	20
2.3. Concreto com fibras de aço	22
2.4. Propriedades do concreto reforçado com fibras.....	25
2.5. Mecanismos pré e pós-fissuração	28
2.6. Mecanismo de transferência de tensões.....	30
2.7. Mecanismos de fissuração	33
2.8. Comportamento do concreto reforçado à flexão	35
2.9. Zona de transição interfacial.....	37
2.10. Tensão de aderência	38
2.11. Adições minerais no concreto.....	40
2.11.1. Cinza de casca de arroz.....	41
3. MATERIAIS E MÉTODOS	44
3.1. Materiais.....	45
3.1.1. Cimento.....	45
3.1.2. Agregados.....	45
3.1.3. Cinza de casca de arroz.....	46
3.1.4. Fibra de aço	47
3.1.5. Água.....	48
3.1.6. Superplastificante	48
3.2. Caracterização do concreto fornecido.....	48
3.2.1. Produção dos CP's.....	49
3.2.2. Formulação	49
3.2.3. Ensaio de compressão axial	50
3.3. Ensaio de arrancamento de fibra única (<i>pullout</i>).....	51
3.3.1. Produção dos CP's.....	52
3.3.2. Formulações.....	54
3.4. Ensaio de flexão em quatro pontos para prismas de concreto.....	55
3.4.1. Produção dos CP's.....	56
3.4.2. Formulações.....	57

3.4.3. Preparação do ensaio.....	58
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	60
4.1. Caracterização do concreto fornecido e verificação do traço	60
4.2. Ensaio de arrancamento de fibra	61
4.3. Ensaio de flexão em quatro pontos.....	65
5. CONCLUSÕES	69
5.1. Sugestões para trabalhos futuros	70
5.2. Apoio à pesquisa	71
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73

1. INTRODUÇÃO

O cimento Portland é o material de construção civil mais utilizado no mundo, de forma que o estudo das propriedades dos compósitos baseados em cimento assume grande importância para toda a sociedade. Qualquer modificação na cadeia de utilização do cimento/concreto promove impacto significativo dado ao enorme volume desse material que é consumido. A taxa de urbanização das cidades está intimamente relacionada ao consumo desse material, principalmente nos países em desenvolvimento, como é o caso do Brasil (EDWARDS, 2014).

A demanda de utilização do concreto se justifica pela sua capacidade de suportar esforços de compressão e por sua durabilidade, aliado ao fato de ser um material de produção simples e de fácil adaptabilidade a quase todas as situações construtivas. Outra característica do concreto é ser um material frágil, no qual a propagação das fissuras acontece rapidamente, o que impossibilita seu uso em determinadas situações. Apesar de possuir alguma resistência aos esforços de tração e flexão, seu uso para tal finalidade é incomum, dado a presença de materiais mais adequados, como o aço, por exemplo. Tal fenômeno se explica pela baixa tenacidade do concreto, que é a capacidade de absorver esforços, evitando a propagação de pequenas trincas e fissuras (BRAZ e NASCIMENTO, 2015).

O processo de produção do cimento Portland, material base do concreto, causa grande impacto ambiental, seja pela extração de matéria-prima, seja pelo enorme gasto de energia na produção do clínquer (resultado da fusão do calcário, argila e minério de ferro em fornos mantidos a temperaturas acima de 1400°C constantemente) ou ainda pelas emissões de CO₂ na atmosfera (COSTA et al., 2013).

Visando melhorar o desempenho do concreto em relação à tenacidade, pesquisas têm sido desenvolvidas através da incorporação de fibras à matriz, que atuam como ponte de tensões, promovendo ao compósito uma melhoria no comportamento pré e pós-fissuração (RANA, 2013). Segundo Braz e Nascimento (2015), na pós-fissuração, a fibra atua transmitindo as tensões de um lado ao outro da fissura, evitando a concentração das mesmas, o que evita a

ruptura precoce do material. Atualmente, as fibras incorporadas ao concreto têm sido utilizadas como reforço secundário para as armaduras auxiliando na absorção dos esforços ou ainda, em menor escala, como substituição da armadura principal em elementos estruturais finos (por exemplo, lajes de pisos).

Segundo Bentur e Mindess (2007), uma das fibras mais comuns utilizadas para reforço secundário em concretos são as fibras de aço, que combatem as fissurações de médio e longo prazo ocasionadas principalmente por carregamentos de impacto ou cíclicos (como paredes de túneis, pisos industriais ou dormentes ferroviários). Esse reforço claramente contribui para a longevidade das estruturas, evitando manutenções e reparos.

Apesar de ser conhecido o incremento nas propriedades do concreto reforçado com fibras, são necessários estudos mais aprofundados que possibilitem mensurar quantitativamente o ganho, uma vez que as fibras estão distribuídas de forma aleatória na matriz. Outros fatores influentes nessa relação são o tipo e tamanho das fibras, seu material constituinte, a relação de aspecto, o volume de fibras incorporado e a qualidade da matriz cimentícia (caracterizada pela zona de transição interfacial entre as fases do compósito). Todas essas variáveis influenciam na tensão de aderência fibra/matriz, que é a propriedade que irá promover tenacidade ao concreto reforçado com fibra (BENTUR e MINDESS, 2007).

O concreto reforçado com fibras é um material capaz de atender a diversas demandas da construção civil, além de atender de forma indireta a outros ramos de atividades. Uma delas é a produção de dormentes de concreto, setor de infraestrutura que atualmente tem investido na substituição de antigos dormentes de madeira por novos de concreto ou aço.

Foram identificadas duas situações de desgaste comuns em dormentes de concreto: o caseamento (desgaste no contato do “patim” do trilho metálico com a base em concreto, promovendo um esforço adicional na ombreira, que é engastada durante a concretagem) e o desgaste na parte inferior do dormente provocado pelo atrito com as pedras que compõem o lastro da via férrea (SILVA e OLIVEIRA, 2015). Em ambos os casos há o surgimento de micro trincas que levam à formação de fissuras e posterior ruptura do componente (Figura 1).

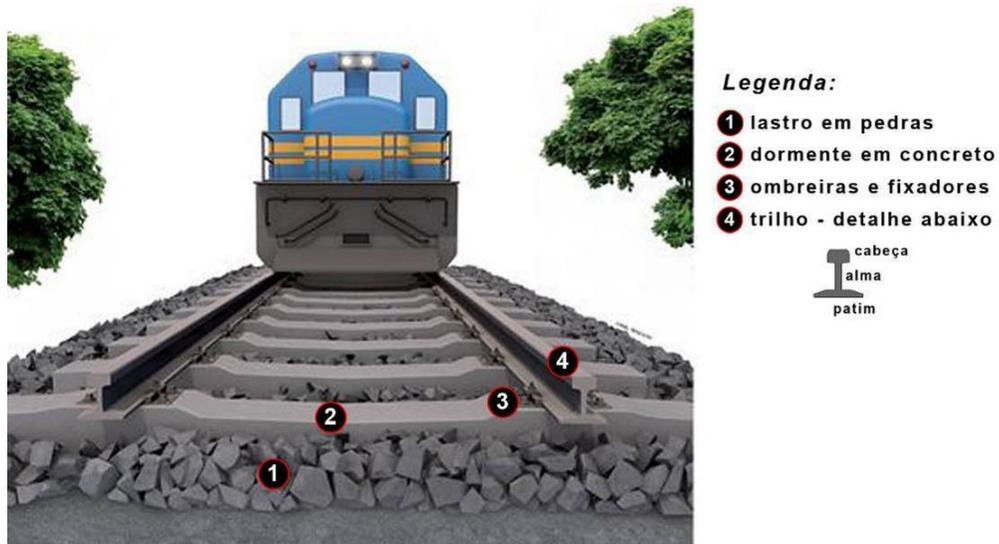


Figura 1 - Esquema de via ferroviária permanente
Fonte: próprio autor

Portanto, o foco dessa pesquisa é analisar o comportamento de concretos reforçados com fibras de aço de forma a atender às demandas de utilização de um dormente ferroviário. Espera-se que a adição de fibras controle o surgimento e propagação das fissuras garantindo maior longevidade para esses elementos estruturais.

1.1. Objetivos

O objetivo geral da pesquisa é avaliar o comportamento do concreto reforçado com fibra de aço em relação ao ganho de tenacidade, a partir da incorporação de cinza de casca de arroz como medida de densificação da zona de transição interfacial entre os materiais do compósito.

São objetivos específicos:

- Verificar a viabilidade de incorporação das fibras de aço e cinza de casca de arroz (CCA) através da análise de trabalhabilidade da dosagem de concreto fornecida;
- Avaliar a resistência mecânica à compressão do traço fornecido;
- Avaliar o mecanismo de propagação de fissuras em concretos reforçados com fibra de aço sob esforços de flexão;

- Avaliar o efeito da incorporação de fibras de aço nos percentuais de 0.5, 0.75 e 1.0% em relação ao ganho de tenacidade do compósito;
- Avaliar o ganho de aderência entre a matriz e a fibra promovido pela CCA através da variação da rigidez de ligação no ensaio de arrancamento;

1.2. Justificativa e Relevância

A relevância da pesquisa se dá pela necessidade de promover ao concreto tenacidade, ou seja, que ele seja capaz de absorver uma quantidade significativa de energia antes de sua ruptura, ou ainda, que ele seja capaz de controlar a propagação de pequenas fissuras, durante longos períodos de tempo, provocadas pelo tipo de carregamento cíclico incidente nos dormentes ferroviários. Tal característica é alcançada através da transferência de tensões da matriz cimentícia para a fibra (ponte de tensões). Dessa forma, é possível a produção de componentes de melhor desempenho e maior durabilidade, o que agrega sustentabilidade à pesquisa. O que se pretende com esse estudo é a alteração nas propriedades do dormente de concreto sem impacto no custo de produção.

Como justificativa, destaca-se que esse trabalho é parte de um projeto de pesquisa que envolve o CEFET-MG, PUC-Rio, Faperj e as empresas Conprem, Belgo Bekaert Arames e VLI; e pretende desenvolver dormentes para linhas férreas com maior durabilidade e maior resistência aos esforços oriundos do transporte ferroviário, impedindo a propagação das fissuras originadas pelos esforços atuantes nos dormentes, assim como reduzir perdas por fissuração durante o processo de fabricação.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O cimento Portland é o material de construção civil mais utilizado no mundo, sendo o estudo das características e propriedades de compósitos que o utilizam, de grande importância para toda a sociedade, haja visto que a taxa de urbanização das cidades está intimamente relacionada ao consumo desse material. Edwards (2014), em sua pesquisa, apresenta dados da produção desse cimento de 1950 até 2015, comprovando uma crescente utilização, principalmente nos países em desenvolvimento.

Qualquer alteração nas propriedades dos compósitos à base de cimento Portland promove impacto significativo dado o enorme volume desse material que é utilizado. Também é conhecido que o processo de produção do cimento Portland, principal material constituinte do concreto, causa grande impacto ambiental, uma vez que o gasto de energia na produção do clínquer (resultado da fusão do calcário, argila e minério de ferro em fornos mantidos a temperaturas acima de 1400°C constantemente) é bastante significativo (COSTA et al., 2013).

Segundo Aitcin (2000), compósitos cimentícios são materiais baseados em cimento, compostos de múltiplas fases, tendo em sua composição dois ou mais materiais, que ocupam regiões separadas no espaço. O principal compósito produzido com o cimento é o concreto. O concreto moderno é muito mais que a mistura de cimento, agregados e água; ele possui cada vez mais adições minerais que promovem a melhoria de suas características. Além disso, o concreto é um material que aceita modificações em sua matriz sem perdas consideráveis em suas características mecânicas (COSTA et al., 2013).

Apesar de ser um material amplamente conhecido e utilizado desde o início do século XIX, o concreto ainda é constantemente objeto de pesquisas relacionadas às suas propriedades, seja no estado fresco ou endurecido.

Há alguns anos, duas frentes têm motivado o aprofundamento das pesquisas relacionadas ao concreto: as propriedades relativas à alta resistência e durabilidade desse material e as questões relativas à sustentabilidade tanto em sua produção quanto em sua aplicação (BRANDT, 2009).

2.1. Panorama histórico do concreto

Do início do século XX até seu final, a produção de cimento mundial cresceu de 10 milhões de toneladas para 1.6 bilhões de toneladas. Essa quantidade equivaleria a cerca de 1m³ de concreto por ano para cada ser humano, em peso, cerca de 3,5 toneladas de concreto/pessoa/ano. Somente a água tem um consumo maior que o concreto (AITCIN, 2000). Tal aumento significativo de consumo acontece principalmente a partir da metade do século XX, devido às reconstruções da Europa e Japão, após as guerras mundiais. Também há um aumento do padrão de vida de vários países, acompanhado de uma forte urbanização, o que impulsionaram o consumo do cimento. Segundo Edwards (2014) mostra que a produção do cimento em 2014 foi cerca de 4.2 bilhões de toneladas.

A popularização do concreto, principal compósito produzido com cimento, como material de construção se deve entre outros fatores a seu baixo custo de produção associado a sua capacidade de atender a distintas condições de produção (BRAZ e NASCIMENTO, 2015).

A partir da década de 1960, a indústria do cimento alcançou progressos significativos, principalmente no que se refere ao processo de produção e economia de energia. O cimento se torna, portanto, um material cada vez mais complexo produzido através de grandes avanços tecnológicos. Os processos se tornam mais sofisticados, requerendo mão de obra e equipamentos especializados. O estudo do concreto passa a atrair os cientistas no sentido de amplificar o conhecimento desse material, que apesar de complexo, possui tecnologia simples. Cada vez mais, o estudo do concreto tem requerido técnicas de medição e observação mais apuradas, capazes de aumentar a compreensão sobre esse material, possibilitando o seu uso em situações não convencionais (AITCIN, 2000).

Durante muito tempo, tanto a indústria do concreto quanto projetistas dimensionaram as estruturas para o uso de um concreto bom o suficiente para a maioria dos usos convencionais, com resistência entre 15 e 25 MPa. Através do conhecimento da microestrutura do concreto e dos processos químicos inerentes à sua produção, a partir dos anos 70, há um incremento na resistência, para 40 ou 50 MPa, o que possibilitava diferentes usos e novas possibilidades arquitetônicas; esse compósito passa a ser chamado de concreto de alto-desempenho. Foi a partir dos anos 90 que o estudo do concreto de alto-

desempenho atinge um novo patamar de resistência e durabilidade, passando também a agregar aspectos de sustentabilidade e resistência a meios agressivos (PEREIRA, 2017).

Paralelamente a esses estudos, direcionados para a produção de concretos de altíssimo desempenho, é possível notar o surgimento de outras pesquisas de alta tecnologia do concreto, como é o caso dos concretos reforçados com fibras, que atuam em um mercado bem menor, mas com significativa importância para o estudo das propriedades desse compósito (AITCIN, 2000).

Esses concretos especiais podem ser considerados como sendo resultado do aprimoramento da tecnologia de produção, que possibilitou uma melhoria nas suas propriedades, de forma a suprir às suas deficiências inerentes. Nesse contexto, para atender às diversas demandas de utilização, surgem os concretos de alto-desempenho, auto adensáveis, concretos leves, reforçados com fibras, poliméricos e outros (BRAZ e NASCIMENTO, 2015).

2.2. Concreto reforçado com fibras

O uso de fibras como reforço de materiais de construção frágeis é conhecido desde muito tempo. Cabanas de barro reforçadas com palha e argamassas para alvenaria com adição de pelos de animais são dois exemplos. Os primeiros materiais de construção a utilizar as fibras como reforço de forma calculada e controlada foram os compósitos de cimento/amianto, produzidos em seções finas lisas ou corrugadas. O uso das fibras possibilitava a produção de elementos muito finos com boas propriedades mecânicas, devido ao grande volume de fibras incorporado (BENTUR e MINDESS, 2007).

Fibras são usadas no concreto, geralmente, no controle de fissuras devido às suas propriedades plásticas. Elas podem reduzir a permeabilidade do concreto, deixando-o menos susceptível à ação da água. Alguns tipos de fibras promovem significativo impacto nas propriedades do compósito (RANA, 2013).

A simples adição de fibras a matrizes de cimento, apesar dos efeitos positivos na tenacidade e resistência à tração, traz também desvantagens, como dificuldades de moldagem, aumento da área de interface (porosidade, permeabilidade). Assim, para melhor aproveitamento do reforço, a adição de fibras vem acompanhada de adaptações no traço, nos procedimentos de mistura, etc.

Segundo Braz e Nascimento (2015), o objetivo da incorporação de fibras ao concreto é que estas funcionem como uma ponte de tensões, capaz de evitar a concentração das mesmas, situação que leva à falência do compósito. A presença de uma fissura (que pode surgir a partir de um esforço na estrutura ou mesmo da retração hidráulica do cimento) irá representar uma barreira às linhas de tensões, que se concentrarão na extremidade da fissura, desencadeando um processo rápido de ruptura do elemento. No concreto reforçado com fibras, há uma retenção a essa fissuração, uma vez que as tensões são transferidas para as fibras, evitando sua concentração, conforme a Figura 2.

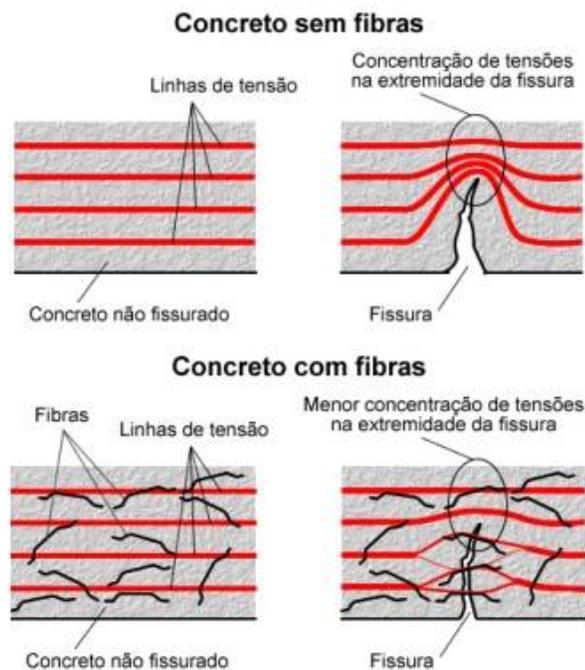


Figura 2 - Linhas de tensão e pontes por reforço fibroso
Fonte: Barros (2009)

Concretos reforçados com fibras são compósitos cimentícios que tem sido utilizados, nos últimos anos com sucesso na construção civil para promover ganhos de flexão e tração, resistência a impacto, diminuir a permeabilidade, controle pós-fissuração, entre outras características (RANA, 2013).

São compósitos que utilizam fibras descontínuas que podem ser incorporadas à matriz de concreto durante o processo convencional de mistura. São utilizadas em percentuais tipicamente entre 0,1 a 3,0% do volume (RANA, 2013). Aparentemente a ideia da patente desse material vem da França, em torno de 1918 baseando-se no uso de fibras longitudinais de ferro, madeira ou outros materiais, distribuídas uniformemente na matriz do concreto. A patente

determinava que as fibras deveriam ser rugosas e dobradas nas extremidades, o que confere maior resistência mecânica ao elemento (JOHNSTON, 2001).

O uso do amianto como reforço fibroso teve início a partir do início do século XX e seguiu até 1970 aproximadamente, quando entrou em declínio devido aos danos provocados à saúde humana, apesar de ainda ser utilizado em alguns lugares. Desde então, uma grande variedade de fibras tem sido incorporadas aos materiais cimentícios com o objetivo de melhoria no desempenho. Entre os mais comuns destacam-se as fibras de aço e vidro, mais recentemente fibras de carbono e kevlar, fibras de baixo módulo de elasticidade como as fibras de polipropileno, nylon (artificiais) ou fibras de celulose, sisal e juta (naturais). Os tipos de fibra podem variar consideravelmente em suas propriedades, custo e eficiência (BENTUR e MINDESS, 2007).

A Tabela 1 traz um comparativo entre as características dos tipos de fibras mais comuns utilizados.

Tabela 1 - Propriedades típicas das fibras

Fibra	Diâmetro (µm)	Peso específica	Mód. de elasticidade (Gpa)	Resistência a tração (Gpa)	Deformação na ruptura (%)
Aço	5-500	7,84	200	0,5-2,0	0,5-3,5
Vidro	9-15	2,6	70-80	2-4	2-3,5
Amianto					
Crocidolite	0,02-0,4	3,4	196	3,5	2,0-3,0
Chrysolite	0,02-0,4	2,6	164	3,1	2,0-3,0
Polipropileno	20-400	0,9-0,95	3,5-10	0,45-0,76	15-25
Kevlar	10-12	1,44	63-120	2,3-3,5	2-4,5
Carbono (alta resistência)	8-9	1,6-1,7	230-380	2,5-4,0	0,5-1,5
Nylon	23-400	1,14	4,1-5,2	0,75-1,0	16,0-20,0
Celulose	-	1,2	10	0,3-0,5	-
Acrílico	18	1,18	14-19,5	0,4-1,0	3
Polietileno	25-1000	0,92-0,96	5	0,08-0,60	3-100
Fibra de madeira	-	1,5	71	0,9	-
Sisal	10-50	1,5	-	0,8	3,0
Matriz de cimento (p/ comparação)	-	1,5-2,5	10-45	0,003-0,007	0,02

Fonte: Bentur e Mindess (2007)

2.3. Concreto com fibras de aço

O concreto reforçado com fibras de aço pode ser usado de diversas formas. Pode ser usado em elementos finos, nos quais o reforço com vergalhões não é viável; para esse caso específico as fibras atuam como reforço primário da estrutura, contribuindo na resistência e na tenacidade do compósito, além de

serem usadas numa concentração maior que o convencional, cerca de 5% do volume; nesse caso são classificadas como de alto desempenho. Podem ser usadas em componentes que suportam cargas localizadas muito altas ou de grande deformação, como túneis, fornos ou estacas pré-fabricadas. Outro uso significativo é em elementos que necessitam de um controle pós-fissuração provocada por variações de umidade ou temperatura. Para esses tipos de elementos estruturais, elas agem como reforço secundário, uma vez que há a presença da armadura convencional. É importante ressaltar que, de forma geral, o reforço com fibras não trabalha como substituto ao reforço convencional (barras de aço, vergalhões). Cada material desempenha uma função específica no compósito, podendo atuar juntos ou separados de acordo com a demanda (BENTUR e MINDESS, 2007).

Os concretos reforçados com fibras de aço podem ser produzidos utilizando as práticas de produção de um concreto convencional com adaptações para promover homogeneidade. Deve-se conferir especial atenção à dispersão uniforme das fibras durante a mistura do concreto para que seja possível alcançar as melhorias de desempenho nas propriedades mecânicas do mesmo, considerando também a trabalhabilidade necessária para uma mistura, lançamento e acabamento adequados desse compósito. Mesmo com o uso de superplastificantes, esse percentual de incorporação permanece em torno de 2% ao se utilizar as práticas convencionais de mistura do concreto (BENTUR e MINDESS, 2007). Para Johnston (2001) esse percentual está entre 0,25 e 1,0% por volume. Holschemacher et al. (2010) utilizou em sua pesquisa percentuais de 0,8 a 2,4% de fibras. Abbas (2013) estudou as propriedades de concretos auto adensáveis com fibras de aço curtas (30mm) nos percentuais entre 0,5 e 1,5%.

A quantidade de fibras incorporadas ao concreto interfere diretamente no percentual de agregados finos que devem estar presentes na mistura. Quanto maior a quantidade de fibras maior deve ser a quantidade de finos para promover um empacotamento adequado das partículas. A Figura 3 mostra o percentual ideal de partículas finas em relação ao percentual de fibras (BENTUR e MINDESS, 2007).

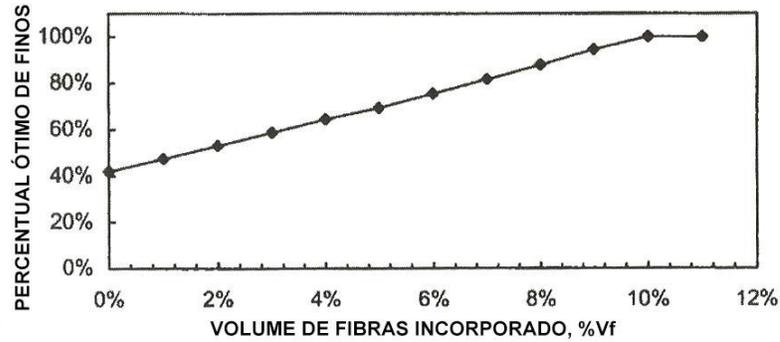


Figura 3 - Percentuais ideais de finos e fibras
 Fonte: adaptado de Bentur e Mindess (2007)

A dificuldade de dispersão das fibras é grande devido à tendência de aglomeração das mesmas. Quanto maior o comprimento das fibras, maior a chance de ocorrer o efeito “ninho”, gerando problemas de trabalhabilidade (RANA, 2013). Esse agrupamento pode ser causado pelo fato das fibras já estarem agrupadas quando lançadas na mistura, terem sido lançadas muito rápido no misturador, alto volume de fibras a ser adicionado, o método de mistura ser ineficiente para dispersar uniformemente o material ou ainda caso a introdução das fibras aconteça antes dos outros materiais.

Segundo Bentur e Mindess (2007), a eficiência da fibra de aço, que é a resistência ao arrancamento, aumenta à medida que a relação de aspecto (que é a relação entre o comprimento e o diâmetro da fibra) aumenta. Outro fator importante é a aderência da fibra, determinada pela densidade da matriz cimentícia.

A geometria das fibras, sua superfície, a orientação, o volume adicionado e dispersão na mistura também são os principais condicionantes para as propriedades mecânicas do concreto reforçado com fibras de aço (JOHNSTON, 2001).

Nesse tipo de compósito, com o módulo de elasticidade das fibras maior que o módulo da matriz cimentícia (concreto ou argamassa), haverá aumento no suporte ao carregamento através do aumento de resistência à tração do compósito (RANA, 2013). Esse aumento de resistência/tenacidade acontecerá se houver aderência adequada atrelada à quantidade de fibras incorporada.

De um modo geral, a falha no compósito acontece principalmente pelo arrancamento da fibra e não pela sua ruptura. O comportamento pós-fissuração depende da geometria da fibra, mas também da resistência da matriz e seu método de moldagem. A área superficial da interface entre a fibra e a matriz

determina a resistência ao arrancamento da fibra de aço. Nesse sentido, fibras irregulares de menor diâmetro respondem melhor a esse esforço que aquelas lisas e de diâmetros maiores. As fibras com superfícies deformadas ou que possuam dispositivos de ancoragem também possuem maior resistência ao arrancamento (Figura 4). O modo de falha desses compósitos (por arrancamento) tem a vantagem de ser gradual e dúctil em comparação à falha por ruptura de fibras por tração, que é rápida; quanto mais dúctil for o reforço fibroso, mais gradual e dúctil será o processo de fissuração do compósito (ACI 544.4R, 1988).

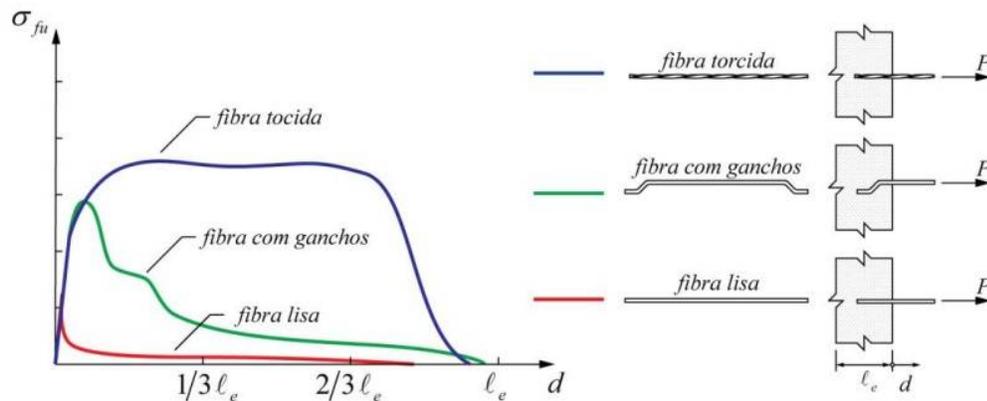


Figura 4 - Comportamento ao ensaio de arrancamento
Fonte: Pereira (2017)

É possível estabelecer algumas vantagens do concreto reforçado com fibras de aço: otimização do custo devido ao baixo teor de fibras incorporado; as fibras de aço reforçam o concreto às cargas de impacto; reduzem a permeabilidade do concreto à água e outras substâncias; fácil mistura à matriz e aumento da resistência à fissuração (RANA, 2013).

Com o objetivo de regulamentar o uso de fibras no concreto, foi produzida a NBR 15530 (2007) que estabelece os tipos de fibras permitidos para utilização no Brasil conforme a geometria das mesmas. Também são definidas as classes baseadas no processo de produção e o aço utilizado.

2.4. Propriedades do concreto reforçado com fibras

Durante seu estado fresco, a principal propriedade dos concretos a ser levada em consideração é sua trabalhabilidade, que é sua capacidade de ser misturado, manipulado, transportado, lançado e adensado. Para que seja

considerada eficiente, a trabalhabilidade do concreto deve permitir que essas etapas aconteçam sem que haja perda de homogeneidade, incorporação de ar e mínima exsudação (tendência da água “subir” para a superfície do concreto recém lançado devido à diferença de densidade entre a água e a pasta de concreto). Essa propriedade depende da composição do concreto, os equipamentos de mistura e transporte, fatores ambientais, condições da forma, métodos de lançamento e adensamento e o tempo entre a mistura e o lançamento. Segundo Bentur e Mindess (2007), as fibras tendem a “endurecer” a mistura, apesar de responderem bem à vibração. Através dela, esse efeito praticamente desaparece, o que permite que o método de mistura seja o mesmo de um concreto convencional.

Apesar da melhoria nas propriedades do concreto endurecido, durante a mistura, o concreto reforçado com fibras perde fluidez, causando impacto negativo em sua trabalhabilidade. Essa dificuldade se reflete, além da mistura, no seu lançamento e acabamento, demandando mais esforço laboral nessas etapas. Somado a isso, é perceptível a dificuldade de se obter um acabamento mais apurado nas superfícies dos concretos reforçados com fibras (FIGUEIREDO e CECCATO, 2015).

Para Mehta e Monteiro (2006), a adição de fibras ao concreto é determinante para a redução da trabalhabilidade, não importando o tipo de fibra utilizado. Essa perda é diretamente proporcional ao volume de fibras incorporado e pode ser administrada com uso de incorporadores de ar, aditivos plastificantes, aumento da quantidade de cimento ou o uso de fibras coladas em conjunto.

Com relação ao estado endurecido do concreto reforçado com fibras, o mecanismo de atuação da fibra é a transferência de tensões de um lado a outro da fissura, impedindo ou dificultando sua propagação. O mecanismo de falha desse sistema está diretamente ligado ao cisalhamento interfacial e o intertravamento fibra/matriz (GOIS, 2010; BRAZ e NASCIMENTO, 2015).

Com relação à resistência à compressão, a incorporação de fibras pode promover pequeno ou nenhum incremento, ou ainda, decréscimo na resistência, dependendo da condição da mistura (com mais água, por exemplo), segundo Bentur e Mindess (2007). Contudo, com o uso de aditivos plastificantes, é possível alcançar incrementos reais de resistência à compressão, como o estudo de Song e Hwang (2004) que apresentou aumento de cerca de 12,9% para a incorporação de 2,0% de fibras na matriz. As fibras de aço contribuem

pouco para essa propriedade do SFRC, embora elas tenham parcela significativa no aumento da ductilidade pós-trinca ou a energia de absorção do material. A Figura 5 mostra o comportamento do material em ensaios de compressão. É perceptível o pouco ganho na ruptura, porém mostra ganhos significativos no comportamento pós-trinca do material.

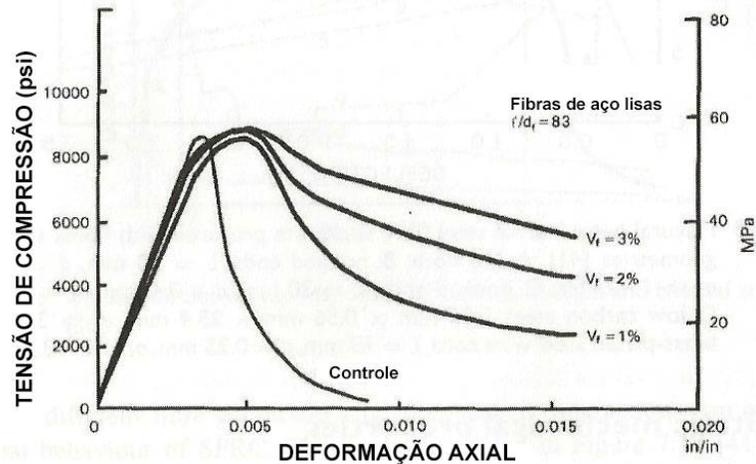


Figura 5 - Variação da curva tensão X deformação conforme percentual de adição de fibras de aço

Fonte: adaptado de Bentur e Mindess (2007)

No concreto reforçado com fibras, o principal efeito do reforço é aumentar a capacidade de suporte de tensão à tração que está associada à tenacidade do compósito, além de incrementar sua resistência residual após a fissuração. Para tanto, o principal método de avaliação dessas características são os ensaios de flexão (JOHNSTON, 2001). É através do ensaio de flexão que determinamos sua resistência à tração, ou tração na flexão. De forma geral, os aumentos são significativos, especialmente no estado pós-fissuração. Os resultados de Song e Hwang (2004) nos mostram incrementos de 50,0% para adição de 1,0% de fibras e 98,3% para adições de 2,0%. Rana (2013) obteve resultados menos significativos, sendo de 24,6% para adições de 2,0% e 11,1% para adições de 1,0% por volume. Variações na constituição da matriz, processo de mistura e diferenças geométricas entre os tipos de fibras utilizados são os fatores determinantes para a eficácia do reforço fibroso (JOHNSTON, 2001; BENTUR e MINDESS, 2007).

A adição de fibras ao concreto tem como objetivo principal promover tenacidade, ou energia de absorção. Os ganhos em outras propriedades têm importância secundária. E a medida dessa propriedade é feita pelo cálculo da área sob a

curva carga X deflexão na flexão. Conforme a relação de aspecto (W/d) aumenta, a tenacidade do compósito aumenta (BENTUR e MINDESS, 2007).

No que se refere à abrasão, o concreto reforçado com fibras é seguramente mais resistente que o convencional. Para fluxos lentos de água com detritos, essa diferença é menor, porém, para fluxos com velocidade alta, a resistência do concreto reforçado é significativamente maior. Um exemplo é a utilização desse material como solução para problemas de cavitação em barragens (GRUNEWALD, 2004, apud BENTUR e MINDESS, 2007).

Apesar de os resultados para cargas estáticas de compressão não apontarem grandes incrementos nos concretos reforçados, Bentur e Mindess (2007) relatam estudos que encontraram importantes melhorias para cargas dinâmicas de fadiga tanto à compressão quanto tração direta. São relatados melhorias nos limites de resistência, fissuras mais estreitas e mais energia absorvida na fratura dos compósitos reforçados (BENTUR e MINDESS, 2007).

2.5. Mecanismos pré e pós-fissuração

Conforme descrito nos tópicos anteriores, a eficiência do reforço de fibras é devido à resistência à tração da fibra, seu módulo de elasticidade, a relação de aspecto, geometria, o volume incorporado, sua distribuição e orientação e a qualidade da matriz, retratada pela força de adesão. Algumas dessas características podem ser mensuradas por ensaios de caracterização, outras através de análises físico-químicas, como é o caso da avaliação da força de adesão, que pode ser mensurada através de ensaios de arrancamento. A análise microscópica da zona de transição também pode ser feita, seja por raio X, tomografia computadorizada ou microscópios eletrônicos.

Nesse cenário, a definição da eficiência de um reforço fibroso passa por eliminar as incertezas das variáveis. A confiabilidade do uso do concreto reforçado está diretamente ligada à elucidação das incertezas quanto à distribuição e orientação das fibras. Com o objetivo de avaliar esses efeitos, será usada a abordagem teórica de Kaw (2006), que simplifica algumas hipóteses da resistência dos materiais de forma a transformar um material real heterogêneo em um material elástico homogêneo: adesão perfeita entre matriz e fibra; módulo elástico, diâmetros e vazios entre fibras uniformes; fibras contínuas e paralelas; matriz e fibras seguem lei de Hooke; fibras possuem resistência

uniforme; compósito sem vazios. A partir dessas simplificações, temos que o módulo de elasticidade do compósito resultante pode ser obtido pela equação 1.1 abaixo.

$$E_c = E_m \cdot V_m + E_f \cdot V_f \quad \text{Eq. 1.1}$$

Onde,

E_c , E_m , E_f = módulo elástico do compósito, matriz e fibras, respectivamente;

V_m , V_f = volume da matriz e fibras, respectivamente.

Contudo, esse método não aborda as questões de força de adesão fibra/matriz e o fator de distribuição espacial das fibras, que segundo Bentur e Mindess (2007) e Laranjeira et al. (2010), podem ser substituídos pelos fatores de eficiência n_l e n^θ , sendo que o fator n_l diz respeito à eficiência da fibra em função da direção do carregamento variando de 0 (carregamento perpendicular ao alinhamento da fibra) e 1 (carregamento no mesmo sentido da fibra). O fator n^θ está ligado à distribuição tridimensional da fibra na matriz. Segundo Bentur e Mindess (2007), em compósitos formados por matrizes frágeis, considera-se que a capacidade de resistência da matriz termina após o limite de proporcionalidade e a tensão resistente passa a ser suportada apenas pelas fibras quando seu volume excede o volume crítico (V_{fcrit}). O processo de simplificação das equações envolvidas no sistema seguiu o procedimento realizado por Pereira (2017), no qual obtivemos as equações 1.2 e 1.3 seguintes.

$$E_c = E_m \cdot (1-V_f) + n_l \cdot n^\theta + E_f \cdot V_f \quad \text{Eq. 1.2}$$

$$V_{fcrit} = \sigma'_{mu} / \sigma_{fu} \quad \text{Eq. 1.3}$$

Onde,

E_c , E_m , E_f = módulo elástico do compósito, matriz e fibras, respectivamente;

V_f = volume das fibras;

n_l = fator de eficiência relacionado com o comprimento crítico da fibra;

n^θ = fator de eficiência relacionado com o ângulo relativo da fibra com a direção do carregamento;

V_{fcrit} = volume teórico de fibras acima do qual se obterá uma capacidade de carga superior à carga do compósito após a primeira fissura

σ'_{mu} = tensão de ruptura da matriz;

σ_{fu} = tensão de escoamento das fibras de aço.

Em tese, a adição de fibras poderia ser tão grande quanto fosse a demanda, porém, devido aos atuais processos de mistura para os concretos reforçados com fibras serem semelhantes aos de um concreto convencional, os percentuais de adição, costumeiramente não passam de 3% por volume. Assim, conforme relatado por Bentur e Mindess (2007), o reforço fibroso contribui para a ductilidade do concreto após sua fissuração, mas pouco é sua contribuição no que se refere à capacidade de carregamento, tendo um comportamento de “*strain-softening*”, ou seja, a resistência residual pós-fissura não ultrapassa o pico de carga suportado pela matriz. A efetividade do reforço fibroso está ligada à sua capacidade de promover ao compósito condições dele suportar, após a fissuração, a esforços maiores que o pico de carga anterior à primeira fissura, comportamento chamado de “*strain-hardening*”. Portanto, a melhoria no comportamento pós-fissuração passa pelo estudo da aderência entre a fibra e a matriz determinada pela zona de interface entre componentes do compósito (ROSSIGNOLO, 2007).

2.6. Mecanismo de transferência de tensões

Segundo Bentur e Mindess (2007), o entendimento dos mecanismos responsáveis pela transferência de tensões serve de base para predição da curva de tensão X deformação do compósito, e também seu modo de falha, conforme sua relação ductilidade/fragilidade. A compreensão desse mecanismo torna possível o desenvolvimento de compósitos mais eficientes, através da modificação nas interações entre a matriz cimentícia e a fibra.

O efeito de ponte de tensões em uma fissura no concreto é regido pela eficiência das fibras que a interceptam. A capacidade de suportar os esforços depende das características de cada fibra individualmente em relação à matriz, ou seja, da interação fibra-matriz. Dessa forma, se torna essencial o conhecimento dos mecanismos de adesão entre os materiais do compósito, para tanto, testes laboratoriais de arrancamento de fibras são ferramentas importantes no estudo das relações fibra-matriz (BREITENBUCHER et al., 2013).

A Figura 6 apresenta o comportamento típico de um ensaio de arrancamento de fibra simples (*pullout*), exemplificando o comportamento do compósito após a fissuração e as opções de resposta do reforço fibroso.

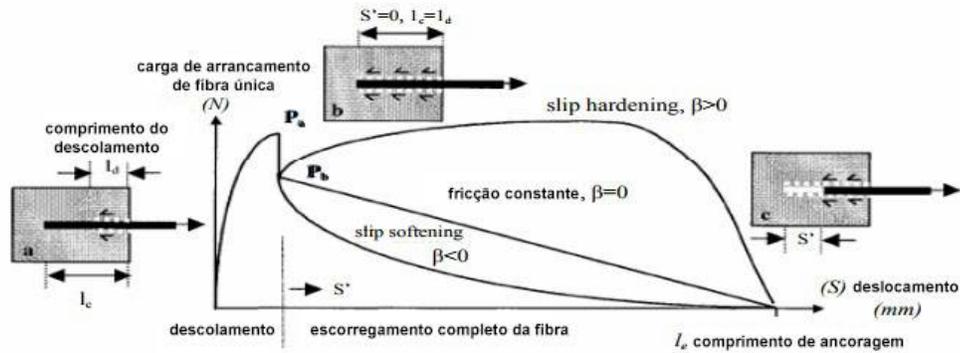


Figura 6 - Comportamento típico para o ensaio de arrancamento
Fonte: adaptado de Rathod (2014)

Bentur e Mindess (2007) afirmam que, na prática, o principal efeito do reforço fibroso ocorre após a fase de fissuração, na qual as tensões são transmitidas para as fibras ao longo da fissura, evitando a falha do compósito. Até o momento da fissuração, o reforço de fibras atua de forma elástica no compósito, tendo um comportamento conforme a Figura 7.

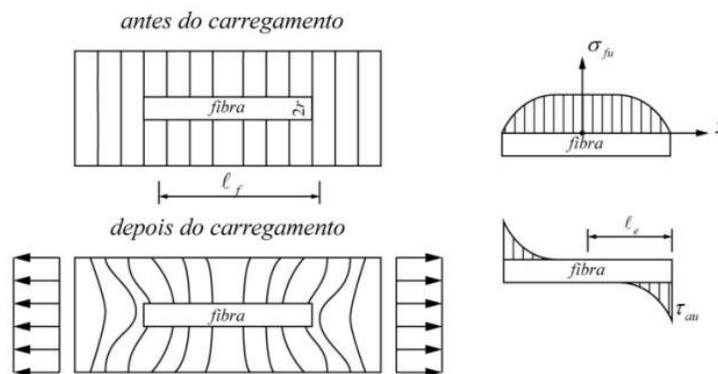


Figura 7 - Comportamento da fibra pré-fissuração
Fonte: Bentur e Mindess (2007)

Nessa etapa, denomina-se o mecanismo como sendo “fase elástica de transferência de tensões”. A partir da fissuração, inicia-se a etapa friccional de tensão, nela ocorre o descolamento gradual da fibra em relação à matriz. Assim, ocorrem de forma combinada, tensões tanto elástica quanto friccional (BENTUR e MINDESS, 2007).

Nos gráficos típicos de testes de arrancamento de fibra única dois pontos são destacados para a análise da capacidade de carga do compósito reforçado com fibras. O primeiro se refere ao pico que indica o fim da fase elástica e o segundo se refere à região de fricção, que ocorre após o descolamento. Esses pontos são associados posteriormente às tensões de cisalhamento adesional τ_{au} e tensão máxima de cisalhamento friccional τ_{fu} . As curvas pós-descolamento representam os comportamentos *slip-softening* ou *slip-hardening* do compósito (BENTUR e MINDESS, 2007).

A Figura 8 esquematiza o comportamento das tensões de cisalhamento adesional e friccional para os testes de arrancamento.

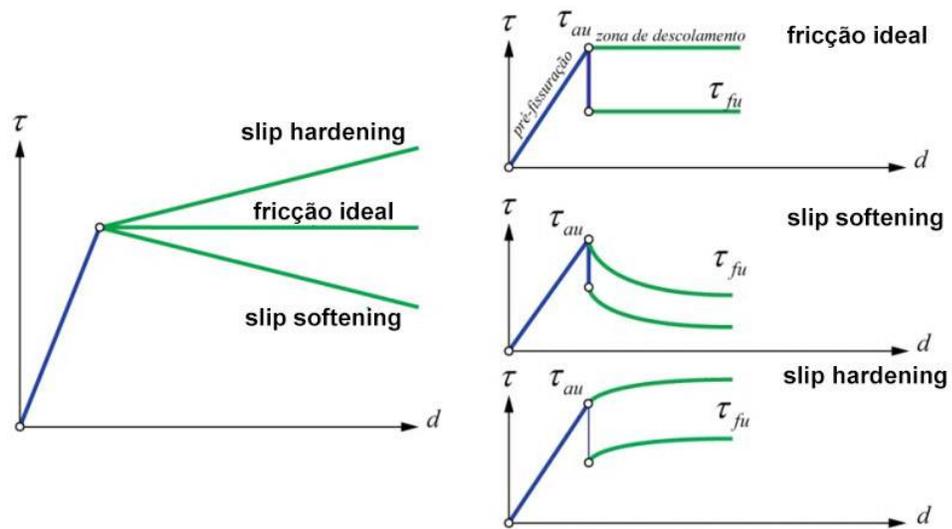


Figura 8 - Tensões de cisalhamento adesional e friccional
 Fonte: adaptado de Bentur e Mindess (2007)

No caso da existência de rugosidades na superfície das fibras ou a utilização de ganchos mecânicos, percebe-se que o comportamento do compósito é distinto. As primeiras etapas são semelhantes às de uma fibra lisa (AO e AB, Figura 9), mas a partir do descolamento da fibra e início da fase friccional (BC), pode haver um incremento na capacidade de carga devido à ancoragem mecânica. Há um leve deslizamento (CD) e posteriormente uma deformação gradual à medida que ocorre o arrancamento da matriz (DE). A partir do momento que os ganchos passam a se alongar e exercer menos força de atrito, ocorre o decaimento friccional até o completo arrancamento da fibra (EF). A deformação dos ganchos, associada ao não alinhamento da fibra em relação aos carregamentos, provoca danos significativos à matriz, acelerando o processo de arrancamento (ISLA et al., 2015; BENTUR e MINDESS, 2007).

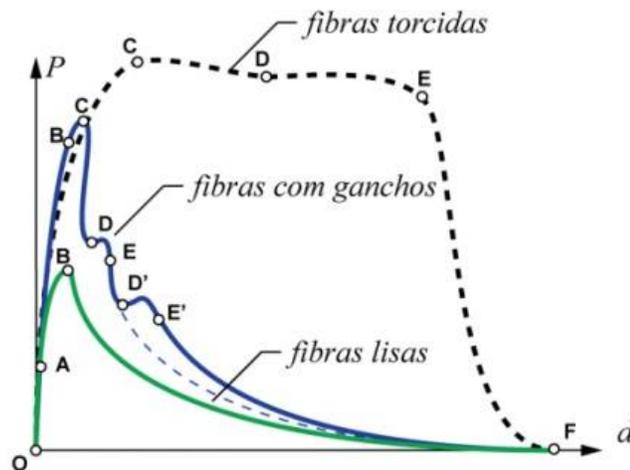


Figura 9 - Comportamento de fibras com e sem gancho no ensaio de arrancamento
 Fonte: adaptado de Bentur e Mindess (2007)

2.7. Mecanismos de fissuração

O concreto é um compósito cimentício que possui estrutura porosa e micro fissuras que são inerentes à sua composição. Essa conformação do concreto é formada de um conjunto de vazios, representados por falhas, capilares, poros ou micro fissuras existentes na zona de transição interfacial (ITZ). Muitos desses vazios se formam pela segregação dos materiais constituintes, ou por expansão térmica da matriz cimentícia (retração) (MEHTA e MONTEIRO, 2006). Para Horii et al. (1992), a falha em compósitos frágeis como o concreto é governada por uma zona específica (zona de fratura), localizada adiante da fissura e que abrange uma área de micro fissuras e uma área de ponte de tensões. É na região micro fissurada que se inicia o processo de fissuração. A região de ponte de tensões faz parte da macro fissuração, e nela as tensões são transmitidas aos agregados da matriz ou ao reforço fibroso, conforme Figura 10.

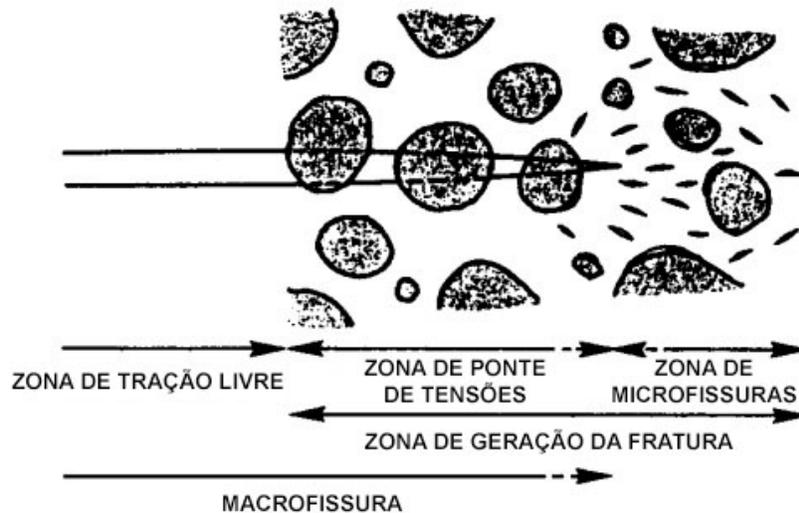


Figura 10 - Esquema de fissuração
 Fonte: adaptado de Horii *et al.* (1992)

Sob esforços, acontece a interligação dessas fissuras e microfissuras pré-existentes devido às fracas ligações entre a matriz e agregados/fibras. Essa fissuração se propaga rapidamente através dos vazios do compósito, o que governa o comportamento desse material sob tração. Em relação à compressão, se faz necessária maior aplicação de energia para que haja a progressão das fissuras em tamanho e quantidade, explicando o bom desempenho do concreto sob tal esforço (VAN MIER, 2013).

Nesse sentido, referindo-se aos concretos reforçados com fibras de aço, caso a matriz não promova boa aderência em relação à fibra, ocorre o descolamento da mesma sob baixa aplicação de carga, o que não contribui para o sistema de transferência de tensões a que o material se propõe. Por outro lado, caso a aderência seja muito forte, é possível que as fibras se rompam antes que aconteça a dissipação da energia. É necessário que haja um equilíbrio de adesão na relação fibra/matriz (METHA e MONTEIRO, 2006).

Essa característica desses compósitos de dissipar a energia em fase anterior à fissuração/ruptura é chamada de tenacidade e é representada pela área sob a curva carga X deflexão. Na ausência de fibras, as microfissuras progredem rapidamente, se tornando macrofissuras até que a resistência do compósito reduza a zero. Conforme descrito anteriormente, com a presença das fibras, ocorre a ponte de tensões responsável por dissipar a energia do carregamento. Segundo a ASTM-C1609 (2012), a determinação da tenacidade de um material através do cálculo da área sob a curva carga X deflexão (Figura 11) é uma

indicação da capacidade de absorção de energia desse material e depende diretamente da geometria do material e das condições de carregamento. O cálculo deve considerar a deflexão do material sob carregamento até a o limite de $L/150$, onde L é o comprimento do vão entre apoios. Em alguns casos, o incremento de fibras pode aumentar a capacidade de carregamento residual, ou seja, após o pico de carga que marca a presença da primeira fissura.

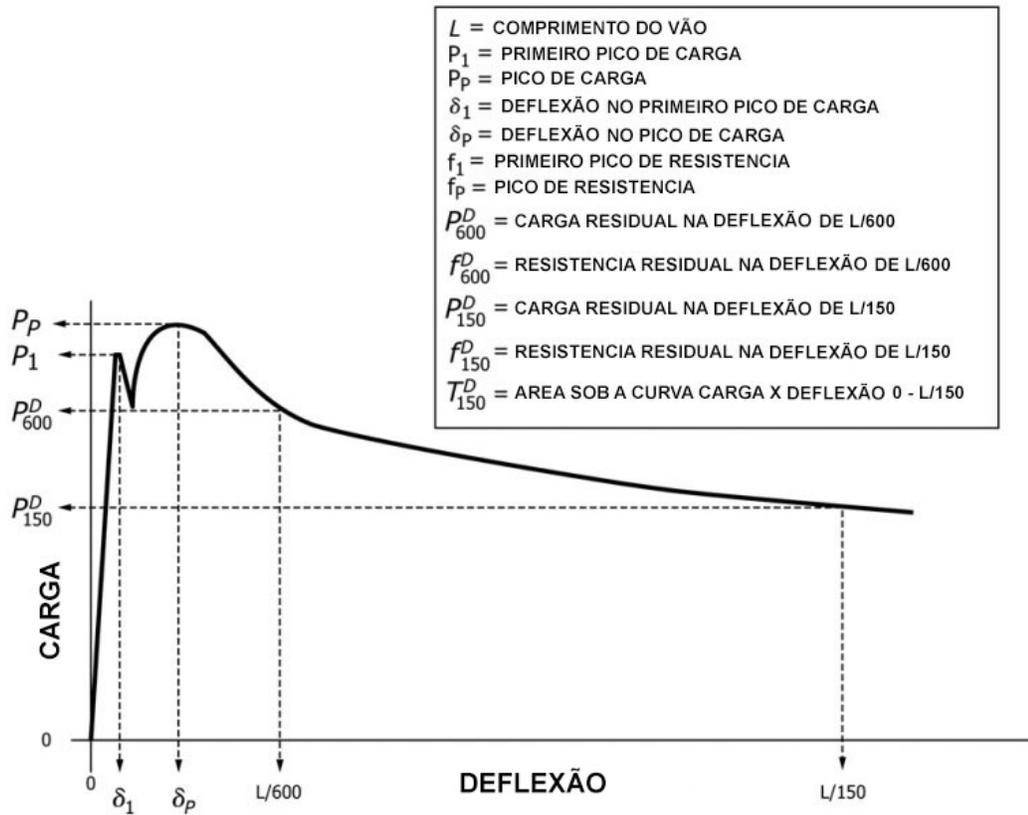


Figura 11 - Diagrama carga x deflexão
Fonte: adaptado de ASTM-C1609 (2012)

Em síntese, Van Mier (2013) estabelece os quatro estágios do processo de fratura do concreto reforçado com fibras de aço sob esforços de tração: estágio elástico; micro fissuração (estável); macro fissuração (instável) e etapas de ponte e intertravamento.

2.8. Comportamento do concreto reforçado à flexão

A resistência à flexão de concretos reforçados com fibra de aço pode alcançar valores da ordem de 100% maiores que o concreto convencional. Esse aumento

está diretamente relacionado com o volume de fibras incorporado e a relação de aspecto. Essa relação pode ser dada pela fórmula W/d na qual l/d é a relação de aspecto e W o peso em porcentagem de fibras (BENTUR e MINDESS, 2007). Prudencio et al. (2006) apresenta um modelo conceitual do comportamento do concreto reforçado sob carga de flexão. O diagrama da Figura 12 apresenta três regiões distintas, sendo a primeira uma zona de compressão, a segunda é a tensionada, mas sem a presença de fissuras e a terceira seria a zona tensionada fissurada. Essa região fissurada subdivide-se em um primeiro momento no qual a fibra se encontra agregada à matriz, é nela que surgem as micro fissuras que dão início ao processo de descolamento, numa segunda fase onde as fibras estão parcialmente descoladas, mas ainda atuam como ponte de tensões e numa terceira fase onde as fibras foram completamente arrancadas da matriz.

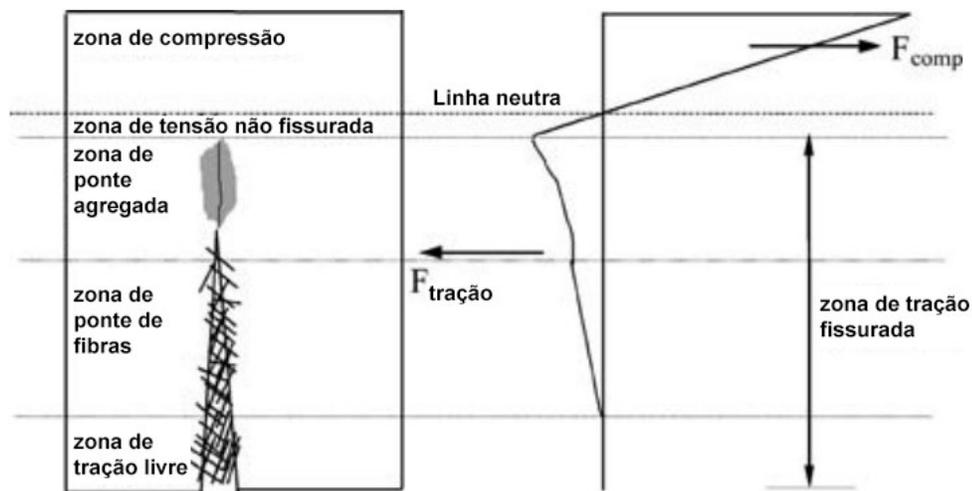


Figura 12 - Diagrama de fases na flexão
 Fonte: adaptado de Prudencio et al. (2006)

Segundo Ahmadi et al. (2012), a capacidade de flexão da seção sob esforço é definida pela combinação dos fatores: a relação tensão/deformação na compressão do concreto; a relação tensão/deformação na tração do concreto; a relação de fissura/abertura do concreto; o perfil de deformação e posição de linha neutra nas zonas fissurada e não fissurada; perfil de abertura de fissura associada à deflexão no meio do vão.

Os incrementos de desempenho nos concretos reforçados com fibras de aço sob flexão estão ligados ao deslocamento progressivo da linha neutra em direção à zona comprimida, fato que se deve principalmente à carga residual de

tração pós-fissuração proporcionada pela presença das fibras (PRUDENCIO et al., 2006). Esse aumento na resistência está relacionado ao volume de fibras incorporado, sendo desprezível para volumes menores que 0,5% e à relação de aspecto, que, quanto maior for, maior será o aumento na resistência (ACI 544.4R, 1988).

2.9. Zona de transição interfacial

A ITZ é uma fase dos compósitos cimentícios localizada entre a pasta de cimento e o agregado, seja ele gráudo ou miúdo. Segundo Liao et al. (2004), ela é composta por duas camadas, a primeira é uma película mais grossa na superfície do agregado composta de cristais de CH e géis de C-S-H. A segunda camada é porosa, constituída de mais cristais de CH, alguns géis de C-S-H e pouca etringita. Ambas são fracas e através de estudos realizados foi constatado que o processo de propagação das fissuras se dá na “fenda” existente entre os materiais do compósito, provocada possivelmente pela retração da matriz de cimento. As falhas têm início nessa fenda, se propagam pela interface com o agregado até avançarem pela matriz, causando a fratura do compósito. A Figura 13 esquematiza essa região.

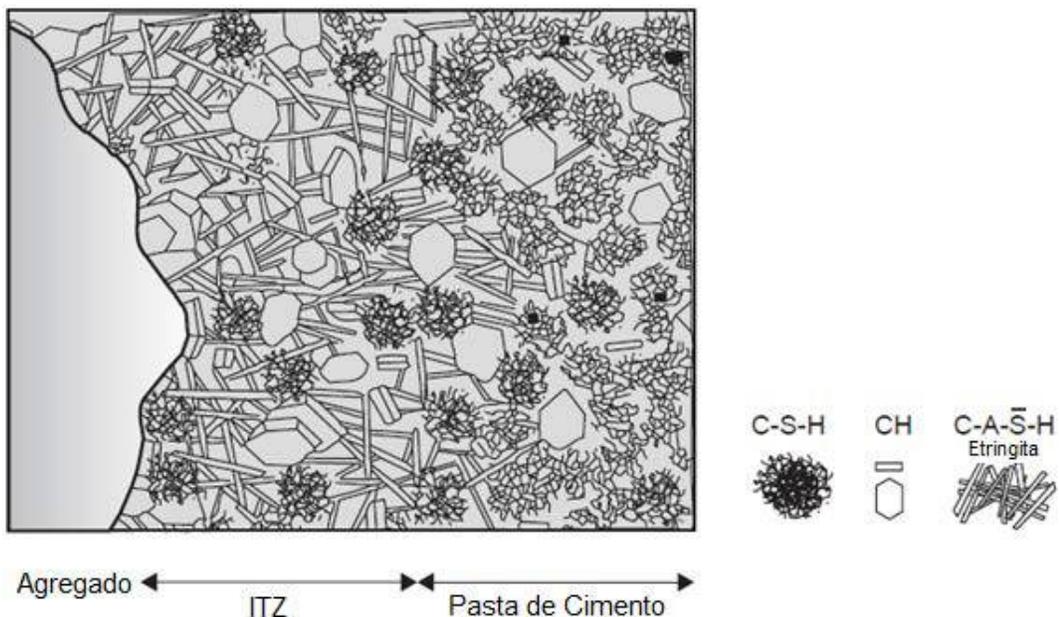


Figura 13 - Esquema de ITZ
Fonte: Mehta e Monteiro (2006)

De uma forma geral, essa região é fraca pela pouca presença das partículas de cimento, promovendo um aumento do fator água/cimento, tornando essa região mais porosa. Dessa forma, quanto maior os agregados, maior será a presença de água e conseqüentemente mais fraco e permeável será o compósito nessa região (MEHTA e MONTEIRO, 2006).

Nos compósitos reforçados com fibras, a interface entre a fibra e a matriz também é chamada de ITZ, pois apresenta a mesma configuração da relação matriz/agregado. Essa região se estende por aproximadamente 50 µm da superfície das fibras (MASO, 1996). Essa região se difere do restante da matriz por causa do efeito parede provocado pela fibra, que é a diferença na forma de empacotamento das partículas quando em contato com a superfície impenetrável da mesma, afirma Brandt (2009).

Segundo Bentur e Mindess (2007) e Brandt (2009), a qualidade dessa região de transição depende da matriz e dos processos de mistura. Uma melhoria da aderência entre a fibra e a matriz cimentícia está ligada à produção de ITZ's mais densas, que podem ser geradas a partir de processos de mistura que despendam mais energia.

Segundo Ollivier et al. (1995), é possível a densificação dessa região através da utilização de adições minerais finas e dispersas, promovendo o enchimento dos espaços vazios e a criação de novos produtos de hidratação pela atividade pozolânica dessas adições. O estudo dessa região ainda é um campo a ser investigado, uma vez que essa região tem sua composição bastante diversificada, mesmo dentro de uma mesma amostra (SCRIVENER et al., 2004; BATISTA, 2016).

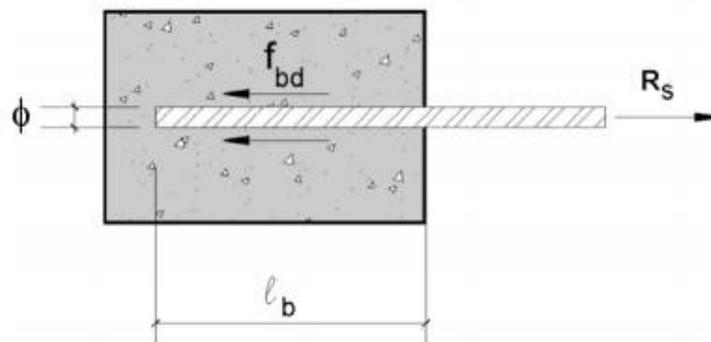
A rigidez da ITZ, ou rigidez da ligação entre os materiais do compósito, pode ser obtida através da análise da fase inicial da curva de arrancamento, antes da fissuração (fase elástica). Através da extração da equação $y=ax+b$ da reta tendência dos pontos experimentais da curva tensão X deformação, é possível determinar o módulo de elasticidade (a), que representa a rigidez da ITZ.

2.10. Tensão de aderência

Durante o processo de arrancamento das fibras, são originadas forças que evitam o seu descolamento. No caso das fibras lisas, essas forças surgem pela aderência e fricção entre a fibra e a matriz de cimento. Para aquelas que

possuem qualquer tipo de aparato de natureza geométrica em suas extremidades, como o caso dos ganchos, soma-se a esse conjunto de forças um reforço mecânico que é resultado de uma ancoragem mais eficiente da fibra na matriz (ISLA et al., 2015).

Portanto, a definição da tensão de aderência na interface da fibra com a matriz é de suma importância para avaliar a eficiência do reforço fibroso. A Figura 14 esquematiza o sistema de forças para fibras lisas sem gancho.



$$\tau_b = \frac{R_s}{\pi \cdot \phi \cdot l_b}$$

R_s é a força atuante na barra;

ϕ é o diâmetro da barra;

l_b é o comprimento de ancoragem.

Figura 14 - Tensão de aderência
Fonte: Pinheiro e Muzardo (2003)

Segundo os resultados experimentais de ISLA et al. (2015), há uma grande variabilidade nos resultados de testes de arrancamento para o mesmo tipo de fibra e matriz de concreto. Essa dispersão nos resultados se deve à variação típica de distribuição dos agregados graúdos no concreto, criando zonas de diferentes resistências na matriz. Também foi relatado que a presença dos ganchos aumenta significativamente os ganhos de resistência. No caso de fibras simples, o ganho está relacionado ao comprimento de ancoragem. Para as fibras com gancho, o incremento está relacionado com o formato do gancho e de forma secundária com o comprimento de ancoragem. Ainda como conclusão dos testes, foi estabelecido que a força de aderência aumenta conforme a resistência da matriz. A presença do agregado graúdo aumenta a eficiência da ancoragem mecânica das fibras com ganchos em relação à matriz de

argamassa. A resistência ao arrancamento de fibras com gancho em matrizes de concreto é sempre maior que matrizes de argamassa; mesmo que o pico de carga não tenha variação importante, a resistência residual pós-fissura apresenta ganhos significativos conforme o tipo de matriz utilizada.

2.11. Adições minerais no concreto

O concreto convencional é um compósito produzido a partir de cimento, agregados, água, aditivos e adições. Durante a produção do cimento Portland muita matéria prima é gasta, seja como recurso ou como combustível para os alto-fornos. Com o objetivo de diminuir o consumo do cimento, e consequentemente, seus materiais constituintes, muitos estudos têm sido direcionados para o uso de adições minerais na produção do concreto. Geralmente, essas adições são materiais inorgânicos, substituindo ou adicionando em massa, nos percentuais de 20 a 70%, o material cimentício utilizado (MEHTA e MONTEIRO, 2006).

Esses materiais quando incorporados em grandes quantidades ao concreto na forma de partículas pequenas e finas, tendem a melhorar algumas de suas propriedades, tais como resistência mecânica, durabilidade, consistência, além da redução de consumo de insumos primários e redução de custo de produção (ASTM-C125, 2015).

Essas adições podem agir na forma de filler ou reagentes químicos. Pela sua finura, as partículas podem contribuir no preenchimento dos espaços vazios existentes entre as partículas do cimento e os agregados (finos ou graúdos) provocando o refinamento dos poros e a densificação da matriz cimentícia. Como reagente químico, as adições minerais podem reagir com o hidróxido de cálcio formando mais silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), que é o componente químico responsável pela resistência mecânica do compósito (MOLIN, 2005).

A produção de silicato de cálcio hidratado ($\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ ou C-S-H), através da adição de água às adições minerais com atividade cimentante é lenta e não acontece de forma satisfatória quando utilizada isoladamente, o que torna necessária a substituição apenas parcial do cimento (MOLIN, 2005).

Segundo Massazza (1998), esse tipo de material é conhecido como material pozolânico, ou seja, são aqueles que “endurecem” quando em contato com a água e misturados ao óxido de cálcio (CaO), ou que liberam hidróxido de cálcio

(Ca(OH)₂ ou CH). As pozolanas são materiais silicosos ou sílico-aluminosos que por si só não possuem propriedades ligantes, mas em partículas finas e em contato com a água reagem com o Ca(OH)₂ formando compostos com propriedades cimentícias (MEHTA e MONTEIRO, 2006). As reações químicas originadas da sílica amorfa, cujas estruturas são formadas por ligações curtas com o Ca(OH)₂ formando silicatos de cálcio hidratados, são chamadas de reações pozolânicas.

Esse material pozolânico, ao ser misturado com o cimento, é ativado pelo hidróxido de cálcio liberado após a hidratação do clínquer e forma novos compostos ligantes além de formar, em menor escala, novos produtos hidratados (BATTAGIN, 2011; PÁDUA, 2012).

Segundo Sokolovicz et al. (2009) e Cordeiro et al. (2008), as adições minerais usualmente utilizadas são as escórias de alto-forno, cinzas volantes, sílica ativa e cinzas oriundas de resíduos agroindustriais (cinzas de casca de arroz, cinzas de cana de açúcar, cinzas de eucalipto entre outras).

A ASTM distingue duas categorias de adições minerais, a primeira constituída pelas pozolanas naturais e cinzas volantes, divididas em três classes (Classes N, C e F, que variam conforme a finura, consumo de água, atividade pozolânica, integridade e constituição química) e a segunda sendo a escória de alto-forno com suas variações conforme três níveis de resistência à compressão. A NBR-12653 (2014) estabelece as condições para uso de adições minerais (MEHTA e MONTEIRO, 2006).

2.11.1. Cinza de casca de arroz

A CCA é uma adição mineral obtida através da queima da casca do arroz, que é um resíduo agroindustrial. É um recurso de grande potencial de utilização pelo fato do grande volume desse alimento que é produzido e consumido no mundo. O arroz alimenta mais de 50% da população diariamente, gera renda para famílias de baixa renda e sua produção ocupa cerca de 11% da área arável do planeta (CANTRELL, 2002; BATISTA, 2016). A casca de arroz é um resíduo problemático para o meio ambiente, uma vez que cada tonelada de arroz produz cerca de 200Kg de casca, que ao ser queimada gera aproximadamente 40Kg de cinzas. Atualmente a queima da casca de arroz é usada como combustível, pelo seu alto valor calorífico.

A casca de arroz, quando queimada, adquire as características físicas e químicas que as adições minerais devem ter para serem incorporadas ao concreto. Sua atividade pozolânica depende do teor de sílica, teor de cristalinidade e a área de superfície das partículas. Além disso, deve ter um percentual baixo de carbono em sua composição. Uma vez que a queima da casca de arroz é feita de forma controlada, as partículas de cinza adquirem uma estrutura amorfa e com grande área superficial. O método de moagem e queima da casca de arroz influencia diretamente na qualidade da cinza produzida (KULKARNI et al., 2014).

A CCA apresenta altos percentuais de sílica amorfa (SiO₂), o que a qualifica a ser utilizada com adição mineral em compósitos cimentícios em substituição parcial do cimento (BATISTA, 2016). A Tabela 2 apresenta a composição química da CCA segundo diversos autores.

Tabela 2 - Composição química da CCA

Propriedades químicas da CCA									
Autores \ Constituintes	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	outros
Mehta (1992)	87,20	0,15	0,16	0,55	0,35	0,24	1,12	3,68	6,55
Zhang et al. (1996)	87,30	0,15	0,16	0,55	0,35	0,24	1,12	3,68	6,45
Bui et al. (2005)	86,98	0,84	0,73	1,40	0,57	0,11	2,46	-	6,91
Gomes e Marton (2015)	93,99	0,20	0,05	0,51	0,14	-	0,02	1,16	3,93
Chao-Lung et al. (2009)	91,00	0,35	0,41	-	0,81	1,21	0,08	3,21	2,93
Cordeiro et al. (2011)	82,60	0,40	0,50	0,80	0,70	-	0,10	1,80	13,10
Della et al. (2002)	94,95	0,39	0,26	0,54	0,90	-	0,25	0,94	1,77
Saraswathy et al. (2007)	92,95	0,31	0,26	0,53	0,55	-	0,08	2,06	3,26
Al-Khalaf e Yousif (1984)	86,89	0,40	0,19	1,40	0,37	1,54	1,15	3,84	4,22
Ganesan et al. (2008)	87,32	0,22	0,28	0,48	0,28	-	1,02	3,14	7,26
Habeen e Mahmud (2010)	88,32	0,46	0,67	0,67	0,44	-	0,12	2,91	6,41
Chindaprasit et al. (2007)	90,00	0,50	0,90	0,80	0,60	0,10	0,10	2,10	4,90
Ramezaniapour et al. (2009)	89,61	0,04	0,22	0,91	0,42	-	0,07	1,58	7,15
Batista (2016)	95,90	0,26	0,03	0,43	0,36	-	0,00	1,43	1,59

Fonte: Givi *et al.* (2010), Batista (2016)

A CCA tem sido usada em compósitos cimentícios como material pozolânico, devido ao incremento nas propriedades desses compósitos, tais como resistência, durabilidade além de sua contribuição para a sustentabilidade em materiais de construção. No estado fresco, a adição de CCA aumenta a plasticidade do concreto, o que permite fácil lançamento e acabamento. Também diminui a massa específica do compósito. Em determinados percentuais de adição há um incremento na resistência mecânica aos 28 dias (KULKARNI et al., 2014).

Em compósitos cimentícios onde há a incorporação da CCA, ocorre a redução da porosidade, redução do hidróxido de cálcio e também a redução do tamanho da ITZ, o que promove aumento de resistência da matriz e diminuição da permeabilidade (GIVI et al., 2010).

Os estudos de Batista (2016) apresentam resultados positivos para a incorporação de CCA em concretos e argamassas. Nos ensaios de compressão axial em concreto, aos 180 dias, foram obtidos incrementos acima de 10% em relação ao concreto de referência. Para argamassas, já aos 28 dias (também aos 90 e 180 dias) foram encontrados valores de resistência maiores que a referência acima de 10%. Também nos ensaios de resistência à tração em concretos (por compressão diametral), os valores encontrados aos 180 dias são significativamente maiores para a CCA em relação à referência (50%).

Ainda com relação à pesquisa de Batista (2016), foram reportados refinamento dos poros nas amostras com CCA através do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio. Sobre a permeabilidade, os ensaios de Permeabilidade de O₂ apresentaram queda de 80% aos 90 dias comparando com a referência. Esse estudo confirma a densificação da ITZ através da incorporação de CCA na matriz cimentícia. Com relação à melhoria de durabilidade do concreto com CCA, a pesquisa de Deotale et al. (2012) concluiu que a CCA aumenta a durabilidade do concreto, evitando a perda de massa em mais de 50% sob ação de produtos químicos.

A pesquisa de Tuan et al. (2011) com substituição parcial do cimento por CCA obteve os melhores resultados de resistência à compressão com o percentual de 10% de substituição. A pesquisa de Givi et al. (2010) aponta como faixa ótima de substituição entre 10 e 30% do cimento. Essa pesquisa também reporta os resultados de Mahmud et al. (1996) como 15% e de Zhang et al. (1996) como sendo de 10% o percentual ótimo de substituição.

A atividade pozolânica dos materiais constituídos por grande quantidade de sílica, como é o caso da CCA, é de grande importância para promover uma hidratação mais completa do cimento, tornando a matriz mais densa e menos sujeita a degradação por agentes externos e, no caso dos concretos reforçados com fibra, aumentam a força de aderência dos materiais desse compósito (KULKARNI et al., 2014). Além disso, por possuírem partículas menores que o cimento possibilitam uma melhor compactação da pasta de cimento (KAIKEA et al., 2014).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho experimental iniciou com a avaliação do traço fornecido através de ensaios do concreto no estado fresco pelo ensaio de abatimento do tronco de cone e no estado endurecido através do ensaio de compressão axial.

A etapa seguinte se refere à avaliação da influência da incorporação da CCA em concretos reforçados com fibras de aço. Foi utilizado somente um tipo de fibra de aço, nas frações volumétricas de 0.5; 0.75 e 1.0% por volume de concreto, conforme os estudos apresentados na seção 2.3 do capítulo anterior. Como adição mineral foi utilizada a CCA com o objetivo de promover a densificação da ITZ; para tal, foram avaliados os percentuais de substituição parcial do cimento de 0 e 15%, conforme referências das pesquisas citadas na seção 2.11.1. O concreto utilizado como controle seguiu o traço fornecido pela fabricante de dormentes de concreto Conpreem, seguindo os mesmos parâmetros utilizados na fábrica. Os insumos para a produção do concreto foram fornecidos também pela Conpreem de forma a padronizar a qualidade dos materiais, possibilitando a comparação dos resultados entre os grupos que estão envolvidos na pesquisa.

Os CP's foram identificados quanto ao tipo de ensaio realizado, o percentual de substituição de cimento por CCA e a fração volumétrica de incorporação de fibras de aço, além do seqüencial de moldagem. Dessa forma, os conjuntos de formulações foram denominados seguindo a Tabela 3 abaixo.

Tabela 3 - Nomenclatura dos CP's para ensaio de flexão

Nomenclatura dos CP's para ensaio de flexão		
Código	% CCA	% fibra
CPFL_00_0	0	0
CPFL_00_0.5	0	0,5
CPFL_00_0.75	0	0,75
CPFL_00_1.0	0	1,0
CPFL_15_0.5	15	0,5
CPFL_15_0.75	15	0,75
CPFL_15_1.0	15	1,0

Para os ensaios de arrancamento, os corpos de prova foram identificados quanto ao tipo de ensaio realizado, o percentual de substituição de cimento por CCA e o número seqüencial de moldagem. A nomenclatura desses espécimes está descrita na Tabela 4.

Tabela 4 - Nomenclatura dos CP's para ensaio de arrancamento

Nomenclatura dos CP's para ensaio de arrancamento	
Código	% CCA
CPPO_00	0
CPPO_15	15

3.1. Materiais

3.1.1. Cimento

O cimento a ser utilizado nesta pesquisa será o Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CPV ARI) da empresa Holcim. Por se tratar de um cimento mais puro, é o ideal para avaliar a eficácia da incorporação de CCA e sua atividade pozolânica no compósito. Cabe ressaltar que o cimento utilizado na pesquisa é o mesmo utilizado pelo fabricante dos dormentes de concreto, com o objetivo de estabelecer um padrão de incremento nas propriedades do compósito. O material foi fornecido pela fabricante dos dormentes e trazido para os laboratórios do CEFET-MG.

3.1.2. Agregados

Todos os agregados utilizados na pesquisa foram fornecidos pela fabricante dos dormentes com o objetivo de manter um padrão de comparação com a sua produção atual. Foi utilizada areia média lavada e brita #0 de gnaiss, os quais foram caracterizados fisicamente. A areia possui dimensão máxima 1,2mm com módulo de finura de 1,65. O agregado graúdo utilizado, brita #0, possui dimensão máxima 12,5mm e o módulo de finura de 1,11. As curvas granulométricas da areia e da brita estão representadas nas Figuras 15a e 15b.

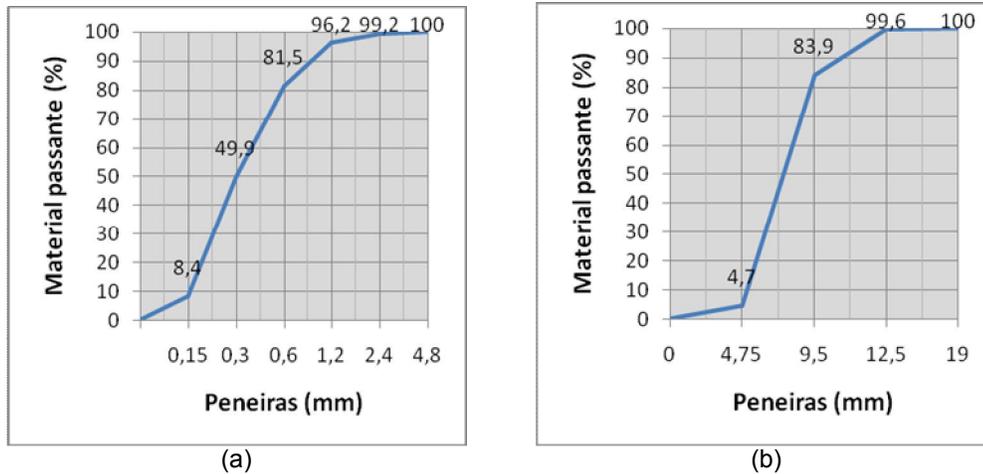


Figura 15 - a) curva granulométrica da areia – b) curva granulométrica da brita
 Fonte: próprio autor

O agregado miúdo apresentou massa unitária de 1.131 Kg/m³ com índice de vazios de 57,2% e massa específica seca de 2,65 g/cm³, enquanto o graúdo possui massa unitária de 1.510 Kg/m³, índice de vazios de 47,4% e massa específica seca de 2,88 g/cm³. A caracterização dos agregados seguiu as prescrições das normas NBR-NM-248 (2003), NBR-NM-53 (2009), NBR-NM-45 (2006) e NBR-NM-30 (2001).

3.1.3. Cinza de casca de arroz

Foi utilizada a CCA industrializada da empresa Pilecco Nobre, denominada Silcca Nobre. A CCA é produzida através de queima uniforme e controlada, possuindo teor de sílica de 95%. Foram utilizados como caracterização química da CCA os resultados obtidos por Batista (2016). A Tabela 5 apresenta a composição química da CCA obtida através do ensaio de fluorescência de raio X (FRX) em comparação ao cimento (OPC) e a Figura 16 apresenta a curva granulométrica da CCA, que teve como tamanho médio dos grãos 7.70 µm.

Tabela 5 - Caracterização química da CCA por FRX

Composição Química (%)	OPC	CCA
SiO ₂	18,73	95,9
TiO ₂	0,21	0,02
Al ₂ O ₃	4,94	0,26
Fe ₂ O ₃	2,93	0,03
MnO	0,06	0,31
CaO	62,38	0,43
MgO	0,51	0,36
Na ₂ O	0,08	0
K ₂ O	0,82	1,43
P ₂ O ₅	0,16	0,27
C (LOI)	5,81	2,67

Fonte: Batista (2016)

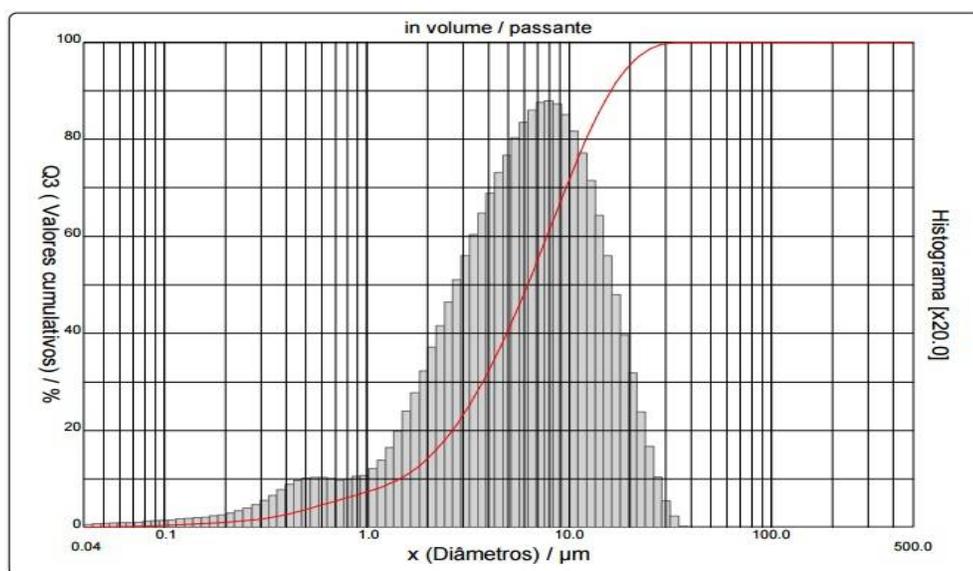


Figura 16 - Granulometria da CCA a laser

Fonte: próprio autor

3.1.4. Fibra de aço

As fibras de aço adotadas na pesquisa foram as fibras lisas do tipo 80/60BG DRAMIX com gancho (Figura 17), de fabricação da empresa Belgo Bekaert Arames, conforme a ASTM-A820 (2016), localizada na cidade de Belo Horizonte no estado de Minas Gerais. A Tabela 6 apresenta as especificações da fibra utilizada.



Figura 17 - Fibra de aço Belgo Bekaert
Fonte: próprio autor

Tabela 6 - Caracterização da fibra de aço

Caracterização da fibra de aço Dramix 80/60BG - Belgo Bekaert	
Tipo de fibra	SF01
Diâmetro (mm)	0,75
Comprimento (mm)	60
Resistência à tração (N/mm ²)	1.100
Carga máxima (N)	485
Relação de aspecto (l/d)	80

Fonte: Belgo Bekaert Arames

3.1.5. Água

A água utilizada nos ensaios foi fornecida via poço artesiano e armazenada no reservatório do CEFET-MG, Campus Curvelo, MG. O Ph da água medido da amostra foi de 7,92 (medição realizada por Medidor de Ph disponível na Instituição).

3.1.6. Superplastificante

O superplastificante usado na pesquisa foi o FLUXER RMX 7000 da empresa Erca. Sua massa específica é de 1,1 Kg/m³.

3.2. Caracterização do concreto fornecido

A caracterização do concreto no estado fresco foi feita através do ensaio de abatimento de tronco de cone, ou *slump test*, que segue as prescrições da NM

67 (1998). Para o estudo do traço fornecido no estado endurecido foi realizado o ensaio de compressão axial conforme as prescrições da NM 101 (1996). Os ensaios foram realizados na máquina universal de ensaios INSTRON EMIC 23-300 pertencente ao CEFET-MG Campus Curvelo.

3.2.1. Produção dos CP's

Para os referidos ensaios, foi utilizado o traço fornecido pela empresa fabricante dos dormentes. Foi adotado como procedimento de mistura dos materiais o lançamento em betoneira convencional de 200lts, primeiramente, da metade da água, seguido dos agregados. Procedeu-se a mistura por um minuto para umidificação desses componentes. Após, foi adicionado o restante da água, os aglomerantes e o superplastificante. Durante 5 minutos esses materiais foram homogeneizados. Foram produzidos cinco CP's cilíndricos conforme a NBR 5738 (2003) nas dimensões de $\varnothing 100 \times 200$ mm para o ensaio de compressão axial, utilizando formas metálicas padronizadas. Anteriormente à moldagem foi realizado o ensaio de abatimento de tronco de cone. Os moldes foram preenchidos em duas camadas sendo que em cada uma delas procedeu-se a compactação com haste metálica com 12 golpes. Periodicamente aplicavam-se golpes com martelo de borracha, a fim de evitar bolhas de ar aprisionadas nas superfícies internas das fôrmas. Os CP's foram desmoldados com 48hs e o método de cura foi por imersão em água durante o período de 28 dias. Anteriormente aos ensaios de compressão, os CP's passaram pela retífica a fim de nivelar a superfície de aplicação de carga.

3.2.2. Formulação

A dosagem do concreto fornecida pela empresa fabricante dos dormentes está representada na Tabela 7.

Tabela 7 - Traço fornecido pela Conprem

Componentes da matriz para 1m ³ de concreto	Formulação Controle
Cimento (Kg)	409,84
Areia (Kg)	568,85
Brita #0 (Kg)	1292,62
Água (Kg)	179,51
Água / Cimento	0,44
Superplastificante (Kg)	2,61

3.2.3. Ensaio de compressão axial

Foi utilizada máquina universal de ensaios mecânicos EMIC/Instron 23-300 (Figura 18) com atuador eletromecânico e célula de carga igual a 2000KN. Como parâmetro de ensaio foi utilizada taxa de carregamento de 10 MPa/min (NM 101 – 1996).



Figura 18 - Detalhe máquina ensaio para compressão axial
Fonte: próprio autor

A Tabela 8 resume os parâmetros de ensaio utilizados.

Tabela 8 - Parâmetros do ensaio de compressão axial

Parâmetros do ensaio de compressão axial em CP's cilíndricos		
	Unidade	Valores
Características geométricas dos CP's		
Diâmetro do CP	mm	100
Altura do CP	mm	200
Características do atuador		
Velocidade de carregamento	Mpa/min	10
Carga máxima	KN	2000

3.3. Ensaio de arrancamento de fibra única (*pullout*)

Como ainda não há uma norma específica para o ensaio de arrancamento de fibra, ou *pullout*, os ensaios foram feitos seguindo o método utilizado por Abbas et al. (2016). Para os ensaios de arrancamento foi utilizada uma máquina universal de ensaios EMIC/Instron 23-300, na qual foram instaladas as garras adequadas aos ensaios de tração. A garra inferior foi utilizada para fixar a barra de $\varnothing 6,3$ mm, enquanto que a superior fixou a fibra de aço, conforme Figura 19.

Como parâmetro de ensaio foi definida a taxa de deslocamento do atuador em 0,2 mm/min e a célula de carga utilizada foi a de 20KN. O software usado para aquisição de dados e controle do ensaio foi o Instron Bluehill 3. O alinhamento vertical da fibra em relação à barra inferior foi feito visualmente.

Nesse ensaio, o cálculo de tenacidade da fibra ao arrancamento foi definido pela área da curva carga X deslocamento até o limite de 5mm de deslocamento da fibra (ABBAS et al., 2016).

Foi possível determinar, através do ensaio de arrancamento, a rigidez da ligação, ou rigidez de arrancamento, definida pela equação da reta tendência do trecho elástico pré-fissuração. A rigidez é obtida pelo cálculo do módulo de elasticidade. Do gráfico carga X deslocamento se obtém a relação tensão X deformação. Após a definição da reta tendência do trecho elástico, foi extraída a equação que a governa " $y=ax+b$ ", onde " a " retrata o módulo de elasticidade.

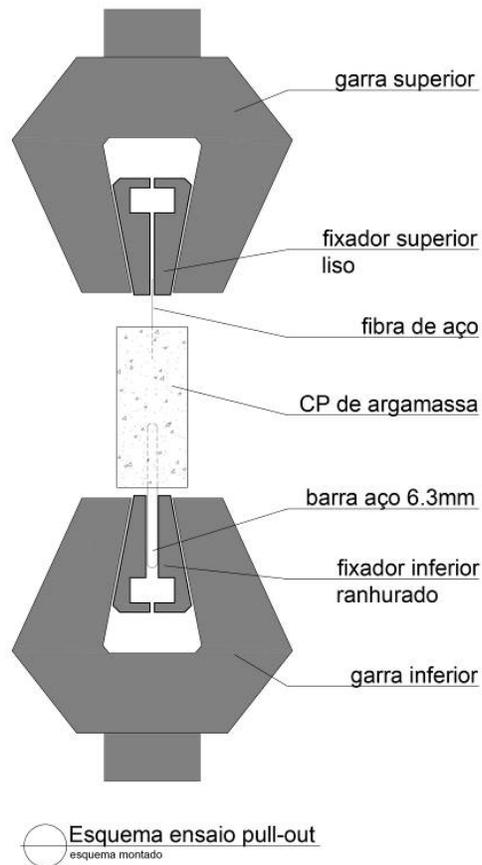


Figura 19 – Mecanismo do ensaio de arrancamento
 Fonte: próprio autor

3.3.1. Produção dos CP's

Foram produzidos cinco CP's cilíndricos de $\varnothing 50 \times 100$ mm de altura para cada formulação proposta. Foi adotado como procedimento de mistura dos materiais o lançamento em betoneira convencional de 200lts, primeiramente, da metade da água, seguido dos agregados. Procedeu-se a mistura por um minuto para umidificação desses componentes. Após, foi adicionado o restante da água, os aglomerantes e o superplastificante. Durante 5 minutos esses materiais foram homogeneizados. O tempo total de mistura foi de 10 minutos. Após a homogeneização o material foi peneirado em malha #4,8mm para que fosse retirado o agregado graúdo (brita #0), ficando só a argamassa; dessa forma, o material utilizado tanto nos ensaios de arrancamento quanto de flexão foi o mesmo. Os moldes foram preenchidos em quatro camadas sendo que em cada uma delas procedeu-se a compactação com soquete metálico com 30 golpes. Em cada CP foi introduzido uma barra de aço $\varnothing 6,3$ mm com 90mm de

comprimento na face inferior, sendo a metade dessa barra mantida externa ao corpo de prova. Na face superior do molde, através de um furo central com $\varnothing 1,0\text{mm}$ na tampa, foi introduzida uma única fibra de aço, a qual teve os ganchos subtraídos, sendo fixada por uma presilha metálica, mantendo o comprimento de ancoragem fixado em 20mm. Os ganchos foram subtraídos visando mensurar apenas a tensão de aderência entre a matriz e a fibra, sem a ação mecânica gerada pelos mesmos. Foi utilizado um dispositivo adaptado para proceder a vibração da mistura. A Figura 20 apresenta detalhe do molde produzido em acrílico. Os CP's foram desmoldados com 24hs e o método de cura foi por imersão em água saturada com hidróxido de cálcio de forma a proteger a fibra de aço contra corrosão durante o período de 90 dias (Figura 21). Após o período de cura os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de arrancamento.

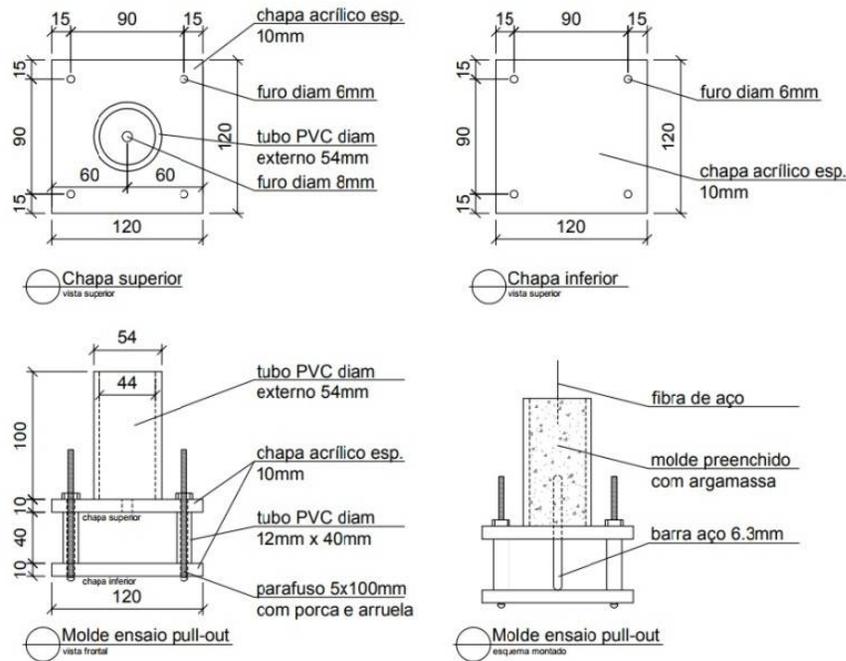


Figura 20 - Detalhe do molde em acrílico para ensaio de arrancamento
Fonte: próprio autor



Figura 21 - Moldagem para ensaio de arrancamento
Fonte: próprio autor

3.3.2. Formulações

As formulações propostas estão apresentadas na Tabela 9 abaixo. Para as formulações foram mantidos o fator água/aglomerante, a areia, a brita e o superplastificante. Como variáveis foram adotadas as formulações sem adição de CCA e com substituição de 15% do cimento pela CCA. A Tabela 10 sumariza os parâmetros de ensaio utilizados.

Tabela 9 - Traço utilizado no ensaio de arrancamento

Componentes da matriz para 1m³ de concreto	Formulação Controle	Formulação 15% CCA
Cimento (Kg)	409,84	348,36
CCA (Kg)	0,00	61,48
Areia (Kg)	568,85	568,85
Brita #0 (Kg)*	1292,62	1292,62
Água (Kg)	179,51	179,51
Água / Cimento	0,44	0,44
Superplastificante (Kg)	2,61	2,61

* retirada após a mistura em betoneira

Tabela 10 - Parâmetros do ensaio de arrancamento

Parâmetros do ensaio de arrancamento de fibra única		
	Unidade	Valores
Características geométricas dos CP's		
Diâmetro do CP	mm	50
Altura do CP	mm	100
Comprimento de ancoragem	mm	20
Características do atuador		
Velocidade de carregamento	mm/min	0,2
Carga máxima	KN	20

3.4. Ensaio de flexão em quatro pontos para prismas de concreto

Os ensaios de flexão em quatro pontos seguiram as prescrições da ASTM-C1609 (2012). Segundo a citada norma, o valor da tenacidade obtido no ensaio de flexão em quatro pontos é dado pela área sob a curva carga X deflexão até o limite de $L/150$, onde L é o comprimento do vão, no caso 300mm. Ela retrata a capacidade de absorção de energia do corpo de prova e depende diretamente da geometria e da configuração do carregamento. Também deve ser calculado através desse ensaio, a taxa de resistência à flexão equivalente que é definida como a proporção da carga equivalente ponderada até a deflexão $L/150$ sobre o primeiro pico de carga multiplicado por 100, conforme a Equação 3.

$$R_{T, 150}^D = \frac{150 \cdot T_{150}^D}{f_1 \cdot b \cdot d^2} \cdot 100 \%$$

Eq. 3

Onde:

$R_{T, 150}^D$ = resistência equivalente;

T_{150}^D = tenacidade;

f_1 = tensão na primeira fissura;

b = largura média na fratura do CP;

d = profundidade média na fratura do CP.

Foi utilizada máquina de ensaios com atuador servo-hidráulico MTS com capacidade de carregamento igual a 100KN, montado sob um pórtico rígido com controlador de deslocamento vertical monitorado por um LVDT com capacidade de medição de 4mm. O dispositivo LVDT HBM 20mm foi acoplado a cada amostra através de um aparato suporte tipo *Yoke*, ilustrado pela Figura 22. Como parâmetro de ensaio foi utilizada como taxa de deslocamento do atuador de 0,1mm/min, com frequência de aquisição de dados de 5Hz. Foi estabelecido como controle do ensaio a deflexão medida pelo LVDT, sendo limitada a 2mm (que equivale ao L/150, conforme prescrição da norma de referência).

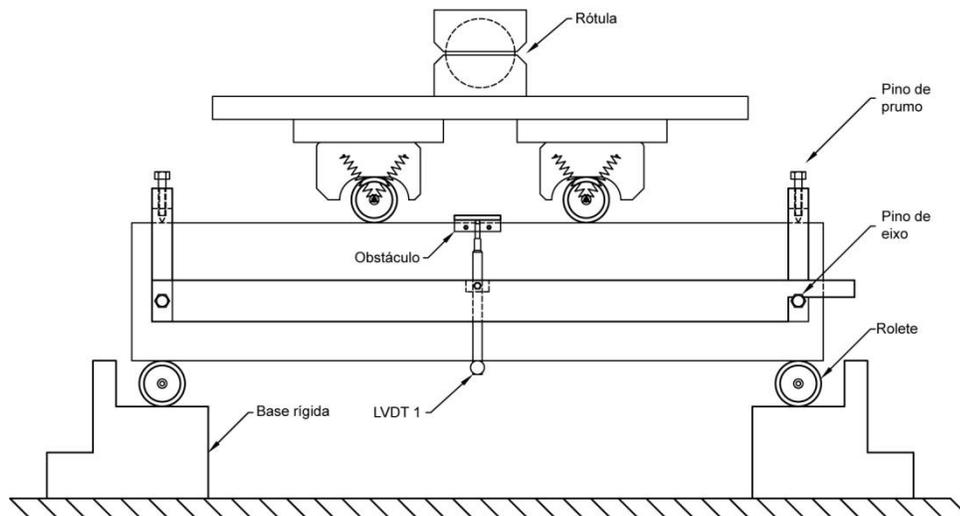


Figura 22 - Detalhe de montagem para o ensaio de flexão em quatro pontos
Fonte: Pereira (2017)

3.4.1. Produção dos CP's

Foram produzidos três CP's prismáticos para cada formulação proposta, sendo 21 CP's ao todo. As amostras foram produzidas nas dimensões de 100x100x350mm conforme a ASTM-C1609 (2012) para ensaios de flexão, utilizando formas de madeira com base nivelada e paredes internas impermeabilizadas. Foi adotado como procedimento de mistura dos materiais o lançamento em betoneira convencional de 200lts, primeiramente, da metade da água, seguido dos agregados. Procedeu-se a mistura por um minuto para umidificação desses componentes. Após, foi adicionado o restante da água, os aglomerantes e o superplastificante. Durante 5 minutos esses materiais foram homogeneizados para que ao final desse tempo fosse lançada lentamente a fração de fibra correspondente a cada formulação. O tempo total de mistura foi de 10 minutos. Os moldes foram preenchidos em duas camadas sendo que em

cada uma delas procedeu-se a compactação com haste metálica com 75 golpes. Periodicamente aplicavam-se golpes com martelo de borracha, a fim de evitar bolhas de ar aprisionadas nas superfícies internas das fôrmas. Após o preenchimento o molde foi razado para se obter uma superfície nivelada. Os CP's foram desmoldados com 48hs e o método de cura foi por imersão em água saturada com hidróxido de cálcio de forma a proteger a fibra de aço contra corrosão durante o período mínimo de 28 dias. Os ensaios de flexão precediam de marcação de pontos de interesse com auxílio de lápis, régua e esquadro (Figura 23).

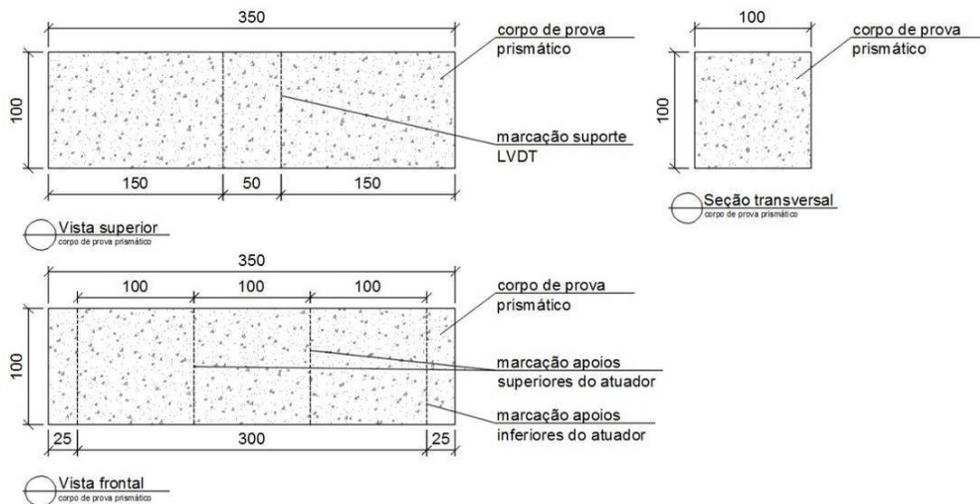


Figura 23 - Detalhe CP e marcação dos pontos de interesse para os ensaios
Fonte: próprio autor

3.4.2. Formulações

A tabela com as formulações propostas está apresentada na Tabela 11 abaixo. Para cada formulação foram mantidos o fator água/aglomerante, a areia, a brita e o superplastificante. Como variáveis do volume de fibras incorporado foram adotados os percentuais de 0.5, 0.75 e 1.0% por volume de concreto. Também foram adotadas as formulações sem adição de CCA e com substituição de 15% do cimento pela CCA.

Tabela 11 - Quantitativo de materiais para cada formulação

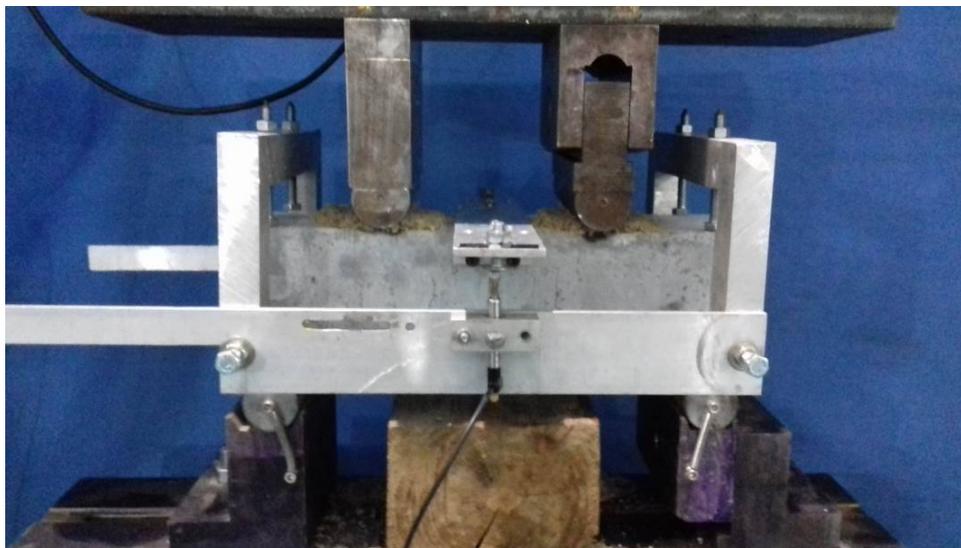
Componentes da matriz para 1m³ de concreto	Formulações						
	CPFL_00_0	CPFL_00_0,5	CPFL_00_0,75	CPFL_00_1,0	CPFL_15_0,5	CPFL_15_0,75	CPFL_15_1,0
Cimento (Kg)	409,84	409,84	409,84	409,84	348,36	348,36	348,36
CCA (Kg)	0	0	0	0	61,48	61,48	61,48
Areia (Kg)	568,85	568,85	568,85	568,85	568,85	568,85	568,85
Brita #0 (Kg)	1292,62	1292,62	1292,62	1292,62	1292,62	1292,62	1292,62
Água (Kg)	179,51	179,51	179,51	179,51	179,51	179,51	179,51
Água / Cimento	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44
Volume de fibras (Kg)	0	39,25	58,88	78,50	39,25	58,88	78,50
Superplastificante (Kg)	2,61	2,61	2,61	2,61	2,61	2,61	2,61

3.4.3. Preparação do ensaio

Para os ensaios de flexão em quatro pontos, foi feito o alinhamento da base do pórtico, seguido do posicionamento dos roletes de apoio e do ajuste da distância entre eixos. Os roletes de apoio distavam 300 mm entre si e 25 mm das extremidades dos CP's. Os roletes de aplicação de carga, por sua vez, distavam 100 mm posicionando-se no terço médio dos CP's. Auxiliado por um laser, foi feito o alinhamento do centro de cada CP em relação ao centro de aplicação de carga. Com o objetivo do dimensionamento da deflexão durante o ensaio, instalou-se em cada CP o aparato suporte tipo Yoke e a chapa obstáculo para aquisição de dados via LVDT. Por fim, se conectava o LVDT ao dispositivo de aquisição de dados HBM QuantumX MX440B, antes de se iniciar o procedimento de ensaio (Figuras 24a e 24b).



(a)



(b)

Figura 24 - a) pórtico para realização do ensaio de flexão. b) detalhe CP preparado para ensaio com LVDT e dispositivo Yoke

Fonte: próprio autor

A Tabela 12 sumariza os parâmetros de ensaio utilizados.

Tabela 12 - Parâmetros do ensaio de flexão

Parâmetros do ensaio de flexão em quatro pontos para CP's prismáticos		
	Unidade	Valores
Características geométricas dos CP's		
Base do CP	mm	100
Altura do CP	mm	100
Comprimento do CP	mm	350
Características do atuador		
Distância entre atuadores inferiores	mm	300
Distância entre atuadores superiores	mm	100
Velocidade de carregamento	mm/min	0,1
Carga máxima	KN	100
Frequência de aquisição de dados	Hz	5

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Caracterização do concreto fornecido e verificação do traço

A determinação da trabalhabilidade do concreto no estado fresco através do ensaio de abatimento do tronco de cone da dosagem fornecida, teve como resultado o valor de 70 mm, conforme mostrado na Figura 25. Esse resultado indica trabalhabilidade média, segundo Neville (1997).



Figura 25 - Ensaio de abatimento de tronco de cone
Fonte: próprio autor

Na caracterização do concreto no estado endurecido, foram encontrados resultados de resistência à compressão conforme Tabela 13. A referência de resistência para o traço fornecido (f_{ck}) pela empresa fabricante dos dormentes foi de 45 MPa. Nesse caso, a resistência de dosagem (f_{cj}) seria de $45 + 1,65 \cdot 4 = 51,6$ MPa. Os resultados encontrados estão acima do f_{ck} proposto, porém, com pouca margem de perda, no caso de modificações na formulação.

Tabela 13 - Resultados ensaio de compressão axial

Resultados do ensaio de compressão axial em CP's cilíndricos		
Corpos de prova	Carga máxima (KN)	Tensão máxima (MPa)
Valor médio	380,6	48,5
Desvio padrão	20,2	2,6

Os resultados encontrados estão inferiores aos encontrados na pesquisa que acontece simultaneamente na PUC-Rio que visa a produção de dormentes com maior durabilidade. Na referida pesquisa os valores obtidos foram de 60,48 Mpa com desvio padrão de 2,15. Acredita-se que a variação nos resultados foi provocada pela utilização de diferentes parâmetros de ensaio, como por exemplo, a taxa de carregamento mais lenta.

4.2. Ensaio de arrancamento de fibra

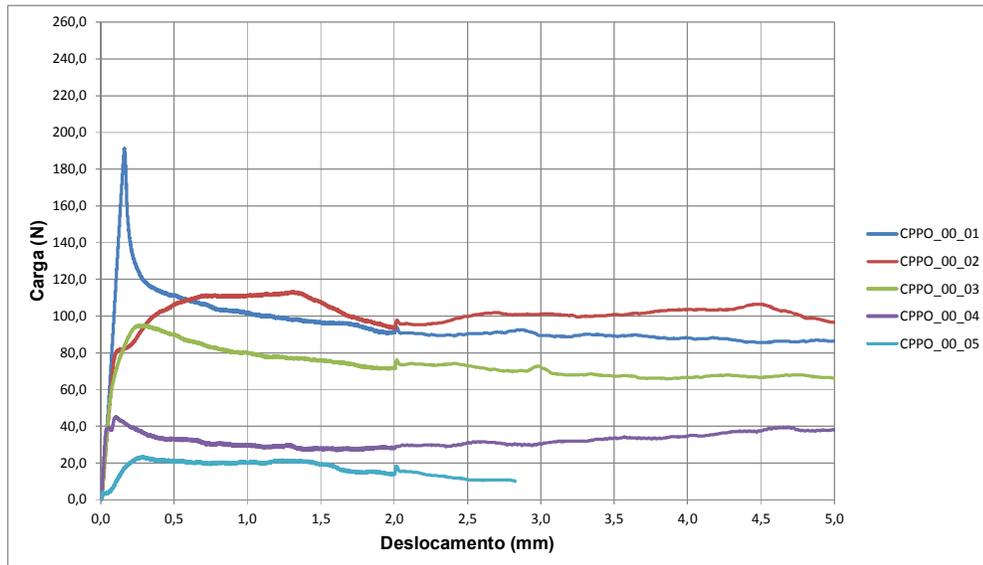
Nessa seção são apresentados os resultados dos ensaios de arrancamento de fibra simples (*pullout*) realizados nos 10 CP's cilíndricos, sendo cinco para cada formulação (Figura 26).



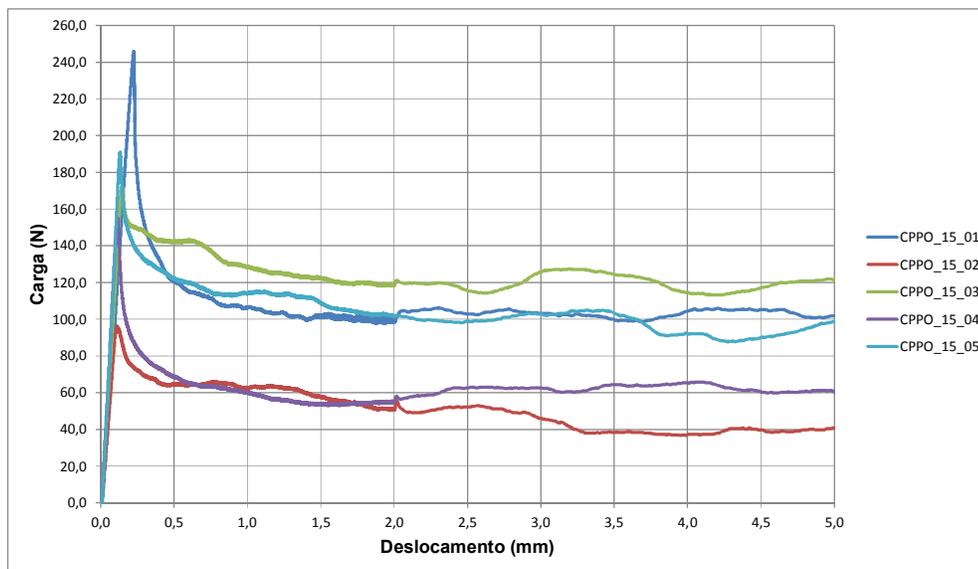
Figura 26 - Ensaio de arrancamento de fibra
Fonte: próprio autor

Nas análises foram considerados como pontos chave o primeiro pico de carga (1) que configura a zona de tensão adesional e o ponto limite de deslocamento analisado (2), que para a pesquisa em questão foi de 5mm, ponto qual localizado na área de tensão friccional, que se estende do pico de carga até o arrancamento completo da fibra (no caso de fibras sem gancho).

Para as formulações com adição de CCA percebe-se a fase linear até o pico de carga (tensão adesional) e depois a fase de tensão friccional. Para os CP's sem CCA os resultados são dispersos, não sendo possível identificar em alguns com clareza as mudanças de fase ao longo do ensaio, conforme os gráficos apresentados nas Figuras 27a e 27b. Também é possível perceber um comportamento menos diverso entre os CP's durante os ensaios, com variabilidade menor de resultados e padrão de resultados mais uniforme naqueles com utilização da CCA.



(a)



(b)

Figura 27 - Gráficos de arrancamento de fibra. a) 00% CCA, (b) 15% CCA

A Tabela 14 sumariza os resultados dos ensaios.

Tabela 14 - Resultados ensaio de arrancamento

Resultados dos ensaios de arrancamento de fibra simples em CP's cilíndricos									
Formulações	tempo cura (dias)	$\delta p1$ (mm)	Cp1 (N)	$f p1$ (MPa)	$\delta p2$ (mm)	Cp2 (N)	$f p2$ (MPa)	T (N.mm)	desv. T (N.mm)
CPPO_00_01	90	0,161	191,37	4,06	5,00	86,67	1,84	472,3	
CPPO_00_02	90	1,300	113,26	2,40	5,00	96,38	2,05	505,1	
CPPO_00_03	90	0,288	94,93	2,01	5,00	66,06	1,40	364,5	
CPPO_00_04	90	0,103	45,10	0,96	5,00	37,77	0,80	162,1	
CPPO_00_05	90	0,283	23,41	0,50	5,00	-	-	47,0	
MÉDIA_00			93,6	1,987		71,7	1,522	310,2	199,0
CPPO_15_01	90	0,224	245,99	5,22	5,00	102,13	2,17	534,3	
CPPO_15_02	90	0,113	96,20	2,04	5,00	40,87	0,87	252,6	
CPPO_15_03	90	0,145	172,56	3,66	5,00	121,73	2,58	615,2	
CPPO_15_04	90	0,116	155,11	3,29	5,00	60,36	1,28	314,6	
CPPO_15_05	90	0,132	191,31	4,06	5,00	98,81	2,10	521,4	
MÉDIA_15			172,2	3,655		84,8	1,799	447,6	155,5

Onde,

$\delta p1$ = deslocamento no pico de carga, ou ponto de tensão adesional;

Cp1 = pico de carga no ponto de tensão adesional;

$f p1$ = tensão adesional;

$\delta p2$ = deslocamento em 5mm, ou tensão friccional;

Cp2 = carga em 5mm;

fp2 = tensão em 5mm, ou tensão friccional;

T = tenacidade (determinada pela área sob a curva carga x deflexão);

desv. T = desvio padrão da tenacidade.

Em relação à resistência friccional pós-fissuração foi verificada que a média de tensão no ponto de deslocamento 5mm é da ordem de 18% maior nas formulações com CCA. Também é possível notar que o pico de carga médio nas formulações com CCA é 84% maior. No que se refere à tenacidade dos compósitos, foi verificado um ganho de 44% nas formulações com CCA.

O desvio padrão da tenacidade do compósito sem adição de CCA é significativamente maior que nas formulações com CCA, sugerindo que a matriz esteja mais heterogênea, com regiões de diferentes resistências em sua composição.

A rigidez da ligação (rigidez de arrancamento) obtida para cada curva de arrancamento está reportada na Tabela 15.

Tabela 15 - Rigidez da ITZ

Cálculo da rigidez de arrancamento		
Formulações	E (MPa)	desv. E (MPa)
CPPO_00_01	542,4	
CPPO_00_02	397,7	
CPPO_00_03	168,8	
CPPO_00_04	523,5	
CPPO_00_05	-	
MÉDIA_00	408,1	172,0
CPPO_15_01	503,7	
CPPO_15_02	414,3	
CPPO_15_03	541,3	
CPPO_15_04	638,6	
CPPO_15_05	673,6	
MÉDIA_15	554,3	104,5

Onde,

E = rigidez da ligação determinada pelo módulo de elasticidade (MPa);

desv. E = desvio padrão da rigidez.

Os resultados obtidos para as formulações com CCA são da ordem de 36% maiores que aqueles sem a adição mineral. Além disso, a variação dos resultados é menor (60%) para as formulações com CCA.

4.3. Ensaio de flexão em quatro pontos

Essa seção se destina à apresentação dos resultados dos ensaios de flexão em quatro pontos realizados nos 21 CP's prismáticos, sendo três para cada formulação. Nas análises foram considerados alguns pontos chave. O primeiro, determinado pelo "limite de proporcionalidade" marca o ponto de primeira fissura (P1, Figura 11). Depois desse ponto, o comportamento pós fissuração segue a descrição feita por Naaman e Reinhardt (2006) de *deflection-softening* ou *deflection-hardening*.

Os ensaios de flexão foram realizados conforme as diretrizes da ASTM C1609 (2012), utilizando controle de deslocamento por atuador hidráulico. Os resultados médios obtidos em cada uma das sete séries ensaiadas estão na Tabela 16, seguidas dos gráficos de carga X deflexão de cada série (Figura 28) onde é possível verificar o comportamento *deflection-hardening* para as formulações com 1,00% de adição de fibra e *deflection-softening* para as demais. Os gráficos referentes a cada conjunto ensaiado à flexão, separados por família de CP's, se encontram no Apêndice I.

Tabela 16 - Resultados ensaio de flexão

Resultados dos ensaios de flexão em quatro pontos para CP's prismáticos												
Formulações	cura	$\delta p1$	Cp1	fp1	$\delta L/600$	CL/600	fL/600	$\delta L/150$	CL/150	fL/150	T	desv. T
	(dias)	(mm)	(KN)	(Mpa)	(mm)	(KN)	(Mpa)	(mm)	(KN)	(Mpa)	(KN.mm)	(KN.mm)
CPFL_00_0	65	0,040	21,03	6,31	0,50	0,69	0,21	2,00	-	-	2,32	0,36
CPFL_00_0.5	36	0,043	26,92	8,08	0,50	16,86	5,06	2,00	14,73	4,42	33,05	3,88
CPFL_00_0.75	42	0,042	24,47	7,34	0,50	21,90	6,57	2,00	21,08	6,32	32,52	12,18
CPFL_00_1.0	44	0,067	28,02	8,41	0,50	33,56	10,07	2,00	27,02	8,11	60,53	3,28
CPFL_15_0.5	63	0,047	25,81	7,74	0,50	19,21	5,76	2,00	15,62	4,69	36,70	13,30
CPFL_15_0.75	50	0,042	28,26	8,48	0,50	22,91	6,87	2,00	22,08	6,62	45,82	7,32
CPFL_15_1.0	61	0,044	29,58	8,87	0,50	35,14	10,54	2,00	34,71	10,41	75,13	10,94

Onde,

$\delta p1$ = deflexão no pico de carga, ou primeira fissuração;

Cp1 = pico de carga no ponto de primeira fissuração;

fp1 = tensão na primeira fissura;

$\delta L/600$ = deflexão no ponto L/600, ou seja, 0,5mm;

CL/600 = carga no ponto L/600, ou seja, 0,5mm;

fL/600 = tensão no ponto L/600, ou seja, 0,5mm;

$\delta L/150$ = deflexão no ponto L/150, ou seja, 2,0mm;

CL/150 = carga no ponto L/150, ou seja, 2,0mm;

fL/150 = tensão no ponto L/150, ou seja, 2,0mm;

T = tenacidade (determinada pela área sob a curva carga x deflexão);

desv. T = desvio padrão para o cálculo de tenacidade

No que se refere à resistência residual pós-fissuração, foram verificados, para a deflexão de 0,5mm, valores de 62, 89 e 120% do pico de carga correspondente à primeira fissura para as frações volumétricas de fibra de 0.5, 0.75 e 1.0%, respectivamente, sem adição de CCA. Também foram obtidos, para as formulações com 15% de CCA, os valores médios de 74, 81 e 119% do pico de carga para as mesmas frações volumétricas. Na deflexão de 2mm, os valores foram de 54, 86 e 96% para aquelas sem CCA, enquanto que as formulações que utilizaram a CCA obtiveram 61, 78 e 117% respectivamente.

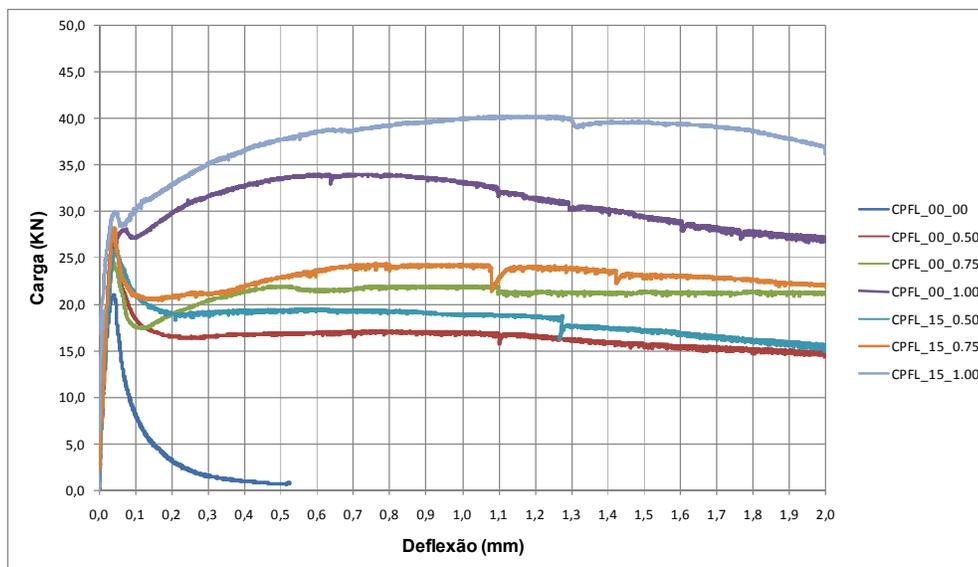


Figura 28 - Gráfico carga x deflexões médias

Conforme a Figura 29, as formulações com 0,50% de adição de fibras de aço apresentaram ganho de tenacidade da ordem de 11% comparando as proposições sem e com CCA. Nas formulações com 0,75% de adição, ganho de 41% e para as adições de 1,00% constatou-se um incremento de 24,1%.

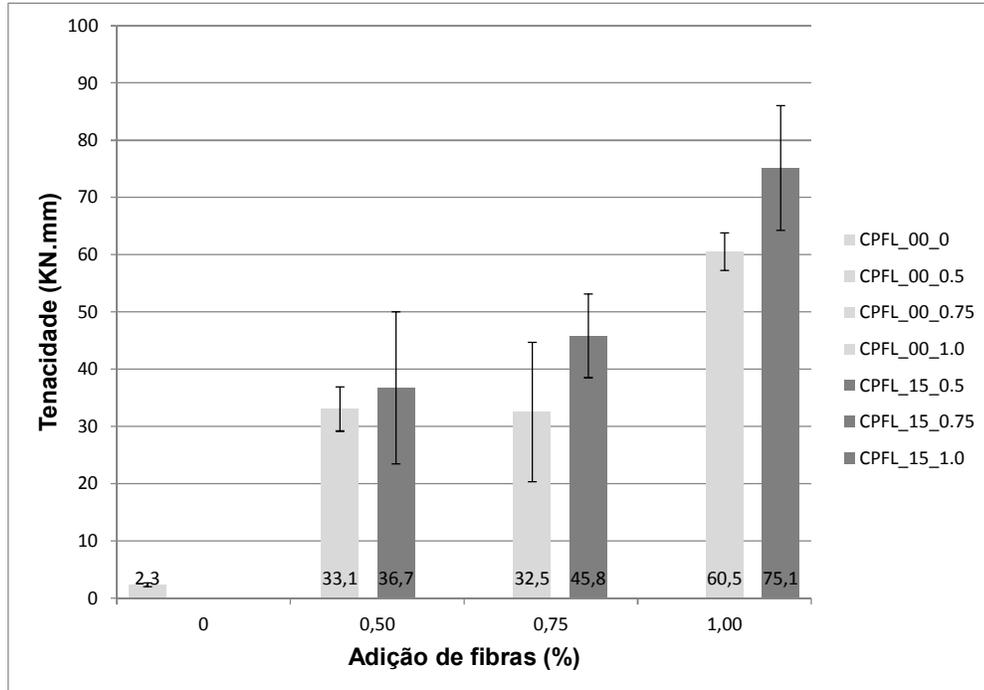


Figura 29 - Comparativo de tenacidade entre formulações

Ainda com base nos resultados dos ensaios de flexão foi possível determinar a taxa de resistência à flexão equivalente, reportada na Tabela 17.

Tabela 17 - Resistência equivalente

Resistência à flexão equivalente	
Formulações	$R_{D,150}^T$ (%)
CPFL_00_0	5,5
CPFL_00_0.5	61
CPFL_00_0.75	66
CPFL_00_1.0	108
CPFL_15_0.5	71
CPFL_15_0.75	81
CPFL_15_1.0	127

Os resultados indicam a capacidade de carga maior nas proposições com 1,0% de fibra de aço. As formulações com CCA obtiveram um ganho de 16% para as proposições com 0,5% de fibra; 23% para as formulações com 0,75% e 18% nas séries com 1,0% em relação àquelas sem a adição mineral.

O padrão de fissuração observado nos ensaios para a maioria dos CP's foi de apenas uma fissura sinuosa predominante, dentro do terço médio; com exceção dos espécimes CP2_0_0.75, CP2_15_1.00 e CP3_15_1.00, que apresentaram a formação de duas fissuras aproximadamente equidistantes em relação ao meio do CP, entretanto, ambas dentro do terço médio (Figura 30).

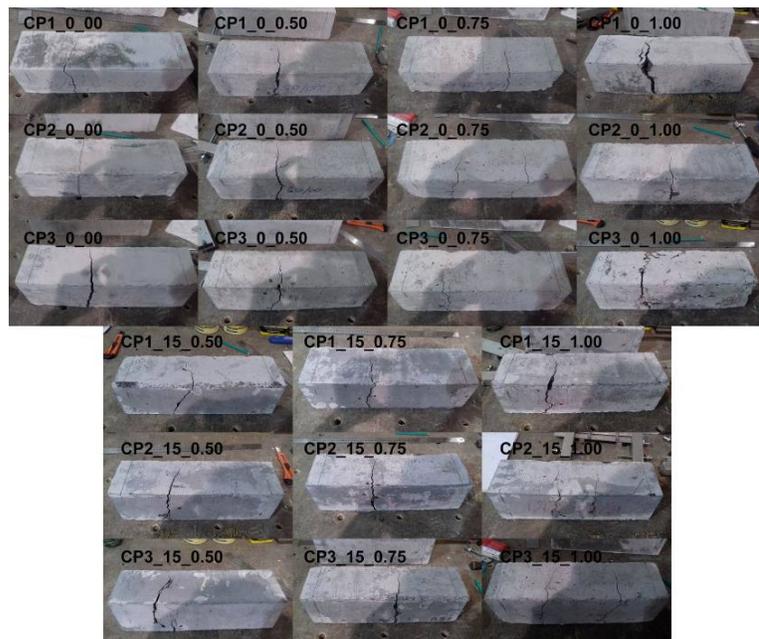


Figura 30 - Padrão de fissuração no ensaio de flexão

O Apêndice II apresenta o registro fotográfico dos ensaios à flexão realizados.

5. CONCLUSÕES

O concreto produzido a partir da dosagem fornecida pela fabricante dos dormentes apresentou trabalhabilidade média, segundo Neville (1997), que em sua pesquisa estabelece o intervalo de 15 a 75mm de abatimento. Isso permitiu a incorporação tanto da CCA quanto da fibra de aço sendo possível estudar as diferentes formulações propostas mantendo viável o manuseio do concreto.

Em relação à resistência à compressão do traço proposto, conclui-se que os valores encontrados estão acima do f_{ck} mínimo exigido pela fabricante dos dormentes, o que torna possível a substituição ou subtração de parte do cimento de forma a viabilizar financeiramente a incorporação das fibras de aço e/ou a CCA.

Nos ensaios de arrancamento foram obtidos resultados bem dispersos, que não seguiram um padrão de comportamento. Tal variabilidade se deve ao fato da matriz cimentícia e, principalmente, a ITZ possuírem regiões de diferentes resistências no seu interior, além da posição, geometria e superfície dos agregados constituintes, conforme relatado por ISLA et al. (2015).

No que se refere à rigidez da ligação, a CCA teve boa contribuição no aumento do módulo de elasticidade, incrementando os valores obtidos, bem como, diminuindo a variabilidade dos resultados. Isso sugere uma densificação e homogeneização da ITZ, o que contribui para a melhoria do desempenho dos compósitos reforçados com fibras.

O surgimento e propagação das fissuras em concretos reforçados com fibras seguiram o padrão encontrado na literatura. Para as formulações com 0,5 e 0,75% de fibras o comportamento pós-fissuração foi de *strain-softening*, ou seja, houve pouca contribuição da resistência residual na capacidade de carga. Nas proposições com 1,0% de fibras, percebeu-se o perfil de *strain-hardening*, cujos picos de carga na fase residual foram superiores aos primeiros picos. Foi possível verificar também, nos ensaios de flexão, que o surgimento das trincas se deu sempre na região intermediária dos CP's, que é a região de flexão pura.

No que diz respeito à tenacidade dos compósitos, percebe-se o incremento dessa propriedade à medida que aumenta o percentual de fibra de aço. Com as

proposições estudadas não foi possível estabelecer o limite de adição de fibras que corresponde ao ganho máximo de tenacidade, havendo a necessidade de estudos complementares. O estudo foi limitado a 1% devido à dificuldade de dispersão das fibras na mistura já nesse patamar de incorporação. Em percentuais maiores seria necessária modificação no traço, com adição de superplastificantes, ou alterando a relação água/cimento, o que não é o objetivo dessa pesquisa.

A utilização da CCA em substituição parcial do cimento como medida de densificação da ITZ e conseqüentemente melhoria da aderência entre os materiais obteve resultados promissores. Nos ensaios de flexão em quatro pontos foram obtidos incrementos significativos na resistência residual e na tenacidade (da ordem de 16,5% para as formulações com 1,0% de fibra). Para os ensaios de arrancamento de fibra única os ganhos de resistência no pico de carga inicial (84%), resistência residual (18%) e tenacidade (44%) também foram relevantes. Portanto, é correto afirmar, mesmo com a grande variabilidade nos resultados, que de forma geral, a CCA contribui para o incremento das propriedades do concreto reforçado com fibras de aço. Também foram encontrados ganhos de desempenho em relação à resistência à flexão equivalente, sempre das proposições com CCA em relação às formulações sem CCA.

Embora não seja possível a comparação numérica de resultados, a pesquisa em questão corrobora algumas conclusões de outros pesquisadores, como Deotale et al. (2012) que afirmam entre coisas que a resistência à flexão e tração do concreto aumenta com a adição de CCA, a trabalhabilidade diminui com a adição de CCA e que a CCA promove maior durabilidade ao concreto em relação a agentes químicos externos.

Cabe ressaltar que é necessária uma maior amostragem para aumentar a representatividade dos resultados e dispersões. Os ensaios de flexão e arrancamento de fibra possuem, tipicamente, uma quantidade de espécimes descartados.

5.1. Sugestões para trabalhos futuros

A presente pesquisa baseou-se na incorporação de percentuais de fibra de aço em traço pré-estabelecido, tendo como variável a substituição de cimento por

CCA no percentual de 15%. Sugere-se que os estudos sejam aprofundados levando em consideração algumas opções para futuros trabalhos:

- a) Utilização de variados tipos de fibras, com tamanhos, formatos e acabamentos diferentes; é possível também que fibras de outros materiais possam ser utilizados como reforço para dormentes de linhas férreas;
- b) O estudo também deve ser realizado utilizando outros tipos de adições minerais em substituição ao cimento, como a sílica ativa, cinzas volantes ou outros resíduos agrícolas;
- c) Para uma real simulação de utilização do concreto reforçado com fibras em dormentes ferroviários, devem ser realizados ensaios de abrasão e fadiga, além dos demais ensaios mecânicos, em corpos de prova em tamanho real utilizando as formulações ótimas da pesquisa;
- d) Uma vez que os melhores resultados obtidos nessa pesquisa foram os compósitos com 1,0% de adição de fibra, sugere-se que o mesmo estudo seja realizado com percentuais maiores de forma a obter a melhor combinação resistência/trabalhabilidade;
- e) Aperfeiçoar e padronizar os ensaios de arrancamento de fibra única com o objetivo de comparar resultados entre diversos pesquisadores;
- f) É necessária uma análise financeira a respeito da retirada de parte do cimento no traço proposto de forma a viabilizar a incorporação das fibras de aço e da CCA sem elevação dos custos de produção.

5.2. Apoio à pesquisa

A pesquisa realizada foi possível graças ao apoio dos seguintes órgãos, empresas e colaboradores:

- Belgo Bekaert – fornecedora das fibras de aço;
- Comprem – fabricante dos dormentes que cedeu o material e informações para a pesquisa;
- VL! – empresa que utilizará os dormentes e cedeu informações sobre a utilização dos dormentes;
- PUC Rio – que cedeu os laboratórios de engenharia civil para os ensaios de flexão em quatro pontos;

- Vitor e Felipe – estudantes dos cursos de Engenharia Civil e Pós-graduação da PUC Rio que auxiliaram e colaboraram na realização dos ensaios.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBAS, A. A. The effect of steel fiber on some mechanical properties of self compacting concrete. *American Journal of Civil Engineering*, v. 1, n. 3, p. 102-110. 2013. DOI: 10.11648/j.ajce.20130103.14.
- ABBAS, M. Y.; KHAN, M. I. Fiber-Matrix Interfacial Behavior of Hooked-End Steel Fiber-Reinforced Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 28, n. 11, 2016.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 544.4R-88: Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete. United States: American Concrete Institute, 1988.
- AHMADI, R.; GHODDOUSI, P.; SHARIFI, M. A simple solution for prediction of steel fiber reinforced concrete behavior under flexure. *International Journal of Civil Engineering*. v. 10, n. 4, p. 274-279. 2012.
- AITCIN, P. C. Cements of yesterday and today Concrete of tomorrow. *Cement and Concrete Research*. v. 30, p. 1349-1359. 2000.
- ASTM-A820. Standard Specification for Steel Fibers for Fiber-Reinforced Concrete. United States of America: American Society for testing and materials: 4 p. 2016.
- ASTM-C125. Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates. United States of America: American Society for testing and materials: 8 p. 2015.
- ASTM-C1609. Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading). United States of America: American Society for testing and materials: 9 p. 2012.
- BARROS, A. R. Avaliação do comportamento de vigas de concreto auto-adensável reforçado com fibras de aço. Dissertação de mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Brasil, 2009.
- BATISTA, A. D. B. Efeitos de resíduos agroindustriais na resistência mecânica, porosidade e permeabilidade de argamassas e concretos. 2016. (Mestrado). Departamento de Engenharia Civil, CEFET-MG, Belo Horizonte/Brasil.
- BATTAGIN, A. F. Cimento Portland - Concreto: ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2011.
- BENTUR, A.; MINDESS, S. Fibre reinforced cementitious composites. 2. New York: Taylor & Francis Group, 2007. ISBN 978-0-415-25048-1.
- BRANDT, A. M. Cement-based composites - Materials, mechanical properties and performance. 2. New York: Taylor & Francis Group, 2009. ISBN 978-0-415-40909-4.
- BRAZ, M. C. A.; NASCIMENTO, F. B. C. Concreto reforçado com fibras de aço. *Ciências exatas e tecnológicas*, v. 3, n. 1, p. 43-56, 2014. ISSN 2357-9919
- BREITENBUCHER, R.; MESCHKE, G.; SONG, F.; ZHAN, Y. Experimental, analytical and numerical analysis of the pullout behaviour of steel fibres

considering different fibre types, inclinations and concrete strengths. *Structural Concrete*, v. 15, n. 2, p. 126-135, 2014. DOI 10.1002/suco. 201300058.

BUI, D. D., HU, J., STROEVEN, P. Particle size effect on the strength of rice husk ash blended gap-graded Portland cement concrete. *Cement and Concrete Composites*. V. 27, n. 3, p. 357–366. 2005.

CANTRELL, R. Rice: why it's so essential for global security and stability. In: (Ed.). *Economic Perspectives*. An Electronic Journal of the US Department of State: International Rice Research Institute, v.7, cap. 2, p. 6. 2002.

CORDEIRO, G. C. et al. Pozzolan activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars. *Cement and Concrete Composites*, v. 30, p. 8, 2008.

COSTA, E. B. et al. Portland cement clinker with reduced environmental impact. *Ambiente Construído*, Porto Alegre/Brasil, v. 13, n. 2, p. 75-86, 2013.

DEOTALE, R. S.; SATHAWANE, S. H., NARDE, A. R. Effect of Partial Replacement of Cement by Fly Ash, Rice Husk Ash with Using Steel Fiber in Concrete. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, v. 3, n. 6, p. 1-9. 2012. ISSN 2229-5518.

EDWARDS, P. The Rise and Potential Peak of Cement Demand in the Urbanized World. *Cornerstone*, v. 3, n. 2, p. 36-41, 2014.

FIGUEIREDO, A. D.; CECCATO, M. R. Workability Analysis of Steel Fiber Reinforced Concrete Using Slump and Ve-Be Test. *Materials Research*, v. 18, n. 6, p. 1284-1290. 2015. DOI: 1516-1436.022915

GIVI, A. N.; RASHID, S. A.; AZIZ, F. N. A.; SALLEH, M. A. M. Contribution of rice husk ash to the properties of mortar and concrete: a review. *Journal of American Science*, v. 6, n. 3, p. 157-165, 2010.

GÓIS, F. A. P. Avaliação experimental do comportamento de concreto fluido reforçado com fibras de aço: Influência do fator de forma e da fração volumétrica das fibras nas propriedades mecânicas do concreto. 156p. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2010.

GRUNEWALD, S. Performance-Based Design of Self-Compacting Fibre Reinforced Concrete. Tese de pós doutorado, Technische Universiteit Delft, Holanda, 2004.

HOLSCHMACHER, K.; MUELLER, T.; RIBAKOV, Y. Effect of steel fibres on mechanical properties of high-strength concrete. *Materials and Design*, v. 31, p. 2604-2615. 2010.

HORII, H.; SHIN, H. C.; PALLEWATTA, T. M. Mechanism of Fatigue Crack Growth in Concrete. *Cement & Concrete Composites*, v. 14, p. 83-89. 1992. ISSN 0958-9465

ISLA, F.; RUANO, G; LUCCIONI, B. Analysis of steel fibers pull-out. Experimental study. *Construction and Building Materials*, v. 100, p. 183-193. 2015. ISSN 0950-0618

JOHNSTON, C. D. *Fiber-reinforced cements and concretes*. New York: Taylor & Francis Group, 2001. ISBN 90-5699-694-0.

KAIKEA, A.; ACHOURA, D.; DUPLAN, F.; RIZZUTI, L. Effect of mineral admixtures and steel fiber volume contents on the behavior of high performance fiber reinforced concrete. *Materials and Design*, v. 63, p. 493-499, 2014. ISSN 0261-3069.

KAW, A. K. *Mechanics of Composite Materials*. 1ª. ed. New York: Taylor & Francis, 457 p. 2006.

KULKARNI, M. S.; MIRGAL, P. G.; BODHALE, P. P.; TANDE, S. N. Effect of rice husk ash on properties of concrete. *Journal of Civil Engineering and Environmental Technology*, v. 1, n. 1, p. 26-29, 2014. ISSN 2349-8404.

LARANJEIRA, F.; GRUNEWALD, S.; WALRAVEN, J.; BLOM, C.; MOLINS, C.; AGUADO, A. Characterization of the orientation profile of steel fiber reinforced concrete. *Materials and Structures*, v. 44, n. 6, p. 1093-1111, 2011.

LIAO, K. Y. et al. A study on characteristics of interfacial transition zone in concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 34, p. 977-989, 2004. ISSN 0008-8846/\$.

MASO, J. C. *Interfacial Transition Zone in Concrete - State-of-Art 154 Report prepared by RILEM Technical Committee 108-ICC, Interfaces in Cementitious Composites*. 1ª. ed. London: E & FN Spon, 197 p. 1996.

MASSAZZA, F. Pozzolana and pozzolanic cements. In: (Ed.). *Lea's chemistry of cement and concrete*. 4. United States of America: Elsevier, 1998. cap. 10, p.471-636.

METHA, P. K. Rice Husk Ash - A unique supplementary cementing material *Proceeding International Symposium on Advances in Concrete Technology*. Editor. Malhotra, V. M. Athens, Greece, 407-430. 1992.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concrete - Microstructure, Properties and Materials*. 3. United States of America: The McGraw-Hill Company, 2006. ISBN 978-0-07-146289-1.

MOLIN, D. D. *Adições minerais para concreto estrutural - Concreto: ensino, pesquisa e realizações*. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2005. p. 345-380.

NAAMAN A. E.; REINHARDT, H. W. Proposed classification of HPFRC composites based on their tensile response. *Materials and Structures*, v. 39, p. 547-555, 2006. DOI 10.1617/s11527-006-9103-2.

NBR-5738. *Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova*. Brasil: Associação Brasileira de Normas Técnicas: 9 p. 2015.

NBR-12653. *Materiais pozolânicos — Requisitos*. Brasil: Associação Brasileira de Normas Técnicas: 6 p. 2014.

NBR-15530. *Fibras de aço para concreto - Especificações*. Brasil: Associação Brasileira de Normas Técnicas: 7 p. 2007.

NBR-NM-30. *Agregado miúdo - Determinação da absorção de água*. Mercosul: Associação Brasileira de Normas Técnicas: 3 p. 2001.

NBR-NM-45. *Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios*. Mercosul: Associação Brasileira de Normas Técnicas: 8 p. 2006.

NBR-NM-53. *Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água*. Mercosul: Associação Brasileira de Normas Técnicas: 8 p. 2009.

NBR-NM-67. *Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone*. Mercosul: Associação Brasileira de Normas Técnicas: 8 p. 1998.

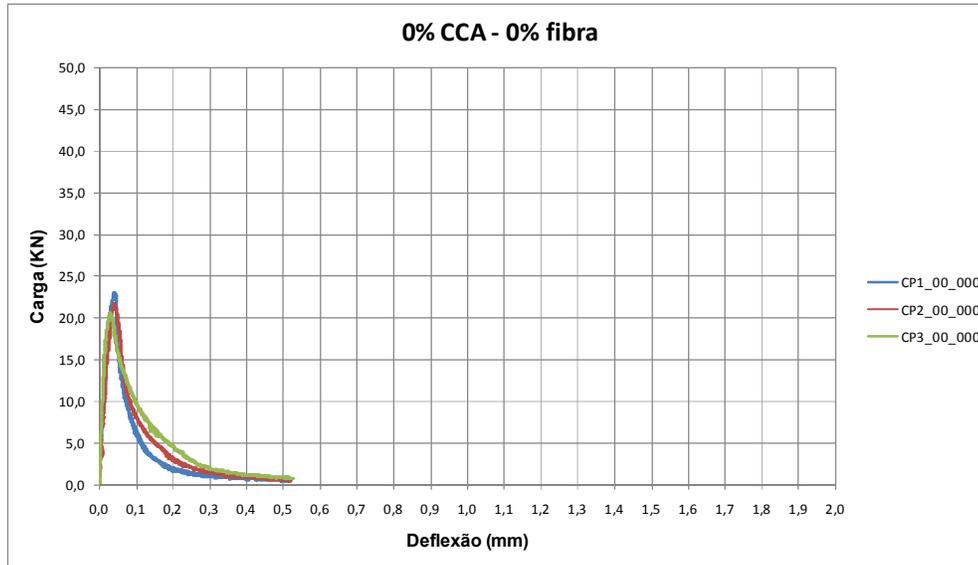
NBR-NM-101. *Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos*. Mercosul: Associação Brasileira de Normas Técnicas: 5 p. 1996.

- NBR-NM-248. Agregados - Determinação da composição granulométrica. Mercosul: Associação Brasileira de Normas Técnicas: 6 p. 2003.
- NEVILLE, A. M. Propriedades do concreto. Tradução de Salvador E. Giammusso. 2ª. Edição. São Paulo. Editora PINI, p. 828, 1997.
- OLLIVIER, J. P.; MASO, J. C.; BOURDETTE, B. Interfacial transition zone in concrete. *Advanced Cement Based Materials*, v. 2, n. 1, p. 30-38, 1995.
- PÁDUA, P. G. L. D. Desempenho de compósitos cimentícios fabricados com cimentos aditivados com cinzas de bagaço de cana-de-açúcar in natura e beneficiadas. 2012. Departamento de Engenharia de Estruturas, UFMG, Belo Horizonte/Brasil.
- PEREIRA, E. V. Influência de Fibras de Aço no Comportamento Mecânico e nos Mecanismos de Fissuração de Concretos Autoadensáveis. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio, Brasil. 2017.
- PINHEIRO, L. M.; MUZARDO, C. D. Aderência e ancoragem. In: (Ed.). Universidade de São Paulo. São Paulo: USP, 2003. cap. 10,
- PRUDENCIO, L. J.; AUSTIN, S.; JONES, P.; ARMELIN, H.; ROBINS, P. Prediction of steel fibre reinforced concrete under flexure from an inferred fibre pull-out response. *Materials and Structures*, v. 39, p. 601-610. 2006. DOI 10.1617/s11527-006-9091-2
- RANA, A. Some Studies on Steel Fiber Reinforced Concrete. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, v. 3, n. 1, p. 120-127, 2013. ISSN 2250-2459.
- RATHOD, J. D. Effect of Single Fiber Pull Out Test Result on Flexural Performance of ECC. *Civil & Environmental Engineering*, v. 4, n. 2. 2014. ISSN 2165-784X
- ROSSIGNOLO, J. A. Avaliação da zona de transição interfacial pasta-agregado leve em concretos com sílica ativa e látex SBR. *Revista Matéria*, v. 12, n. 3, p. 532-540, 2007. ISSN 1517-7076.
- SCRIVENER, K. L.; CRUMBIE, A. K.; LAUGESSEN, P. The interfacial transition zone (ITZ) between cement paste and aggregate in concrete. *Interface science*, v. 12, n. 4, p. 411-421, 2004.
- SILVA, R. S.; OLIVEIRA, A. M. Falha de um dormente de concreto por deterioração da região de apoios dos trilhos - causas e consequências. XXIX CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISA EM TRANSPORTE DA ANPET, p. 11, 2015.
- SOKOLOVICZ, B.; ISAIA, G.; GASTALDINI, A. Concreto com cinza de casca de arroz natural: estudo da penetração de cloretos em protótipos de concreto. X Congreso Latinoamericano de Patología y XII Congreso de Calidad em la Construcción. CONPAT 2009, 2009, Valparaiso-Chile.
- SONG, P. S.; HWANG, S. Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, v. 18, p. 669-673. 2004. ISSN 0950-0618
- TUAN, N. V.; YE, G.; BREUGEL, K. V.; FRAAIJ, A. L. A.; DAI, B. D. The study of using rice husk ash to produce ultra high performance concrete. *Construction and Building Materials*, v. 25, p. 2030-2035. 2011.
- VAN MIER, J. G. M. *Concrete Fracture: A Multiscale Approach*. 1ª. ed. London: Taylor & Fancis Group, 315 p. 2013.

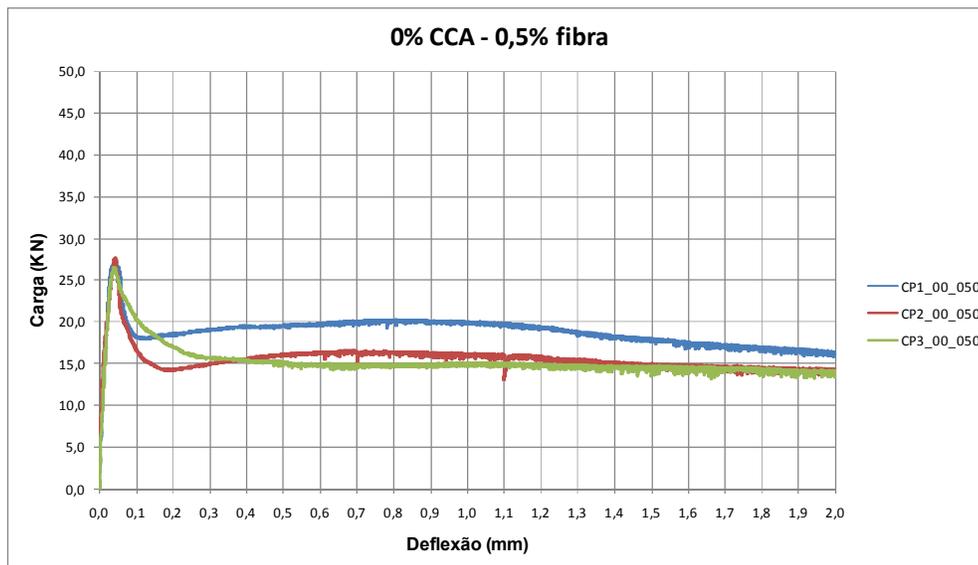
ZHANG, M. H., LASTRA, R., MALHOTRA, V. M. Rice husk ash paste and concrete: Some aspects of hydration and the microstructure of the interfacial zone between the aggregate and paste. *Cement and Concrete Research*. v. 26, n. 6, p. 963-977. 1996.

APÊNDICE I – Ensaio de flexão em quatro pontos

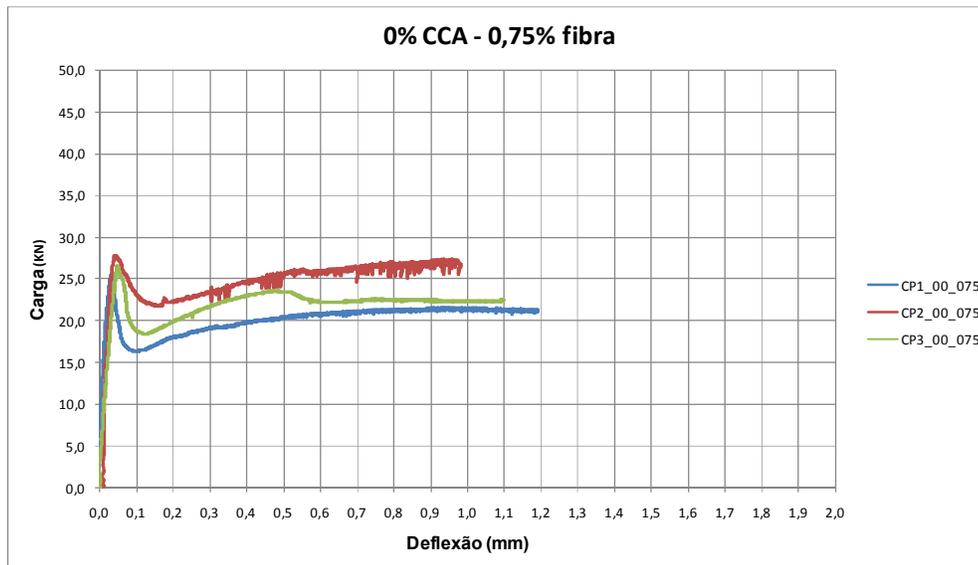
Resultados do ensaio de flexão para formulações com 0% de CCA e 0% de fibra de aço:



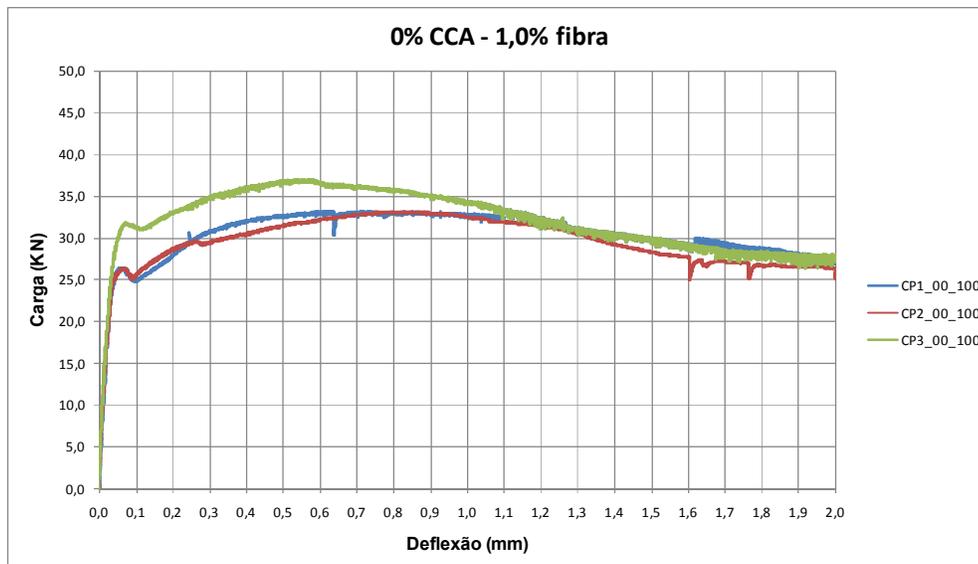
Resultados do ensaio de flexão para formulações com 0% de CCA e 0,5% de fibra de aço:



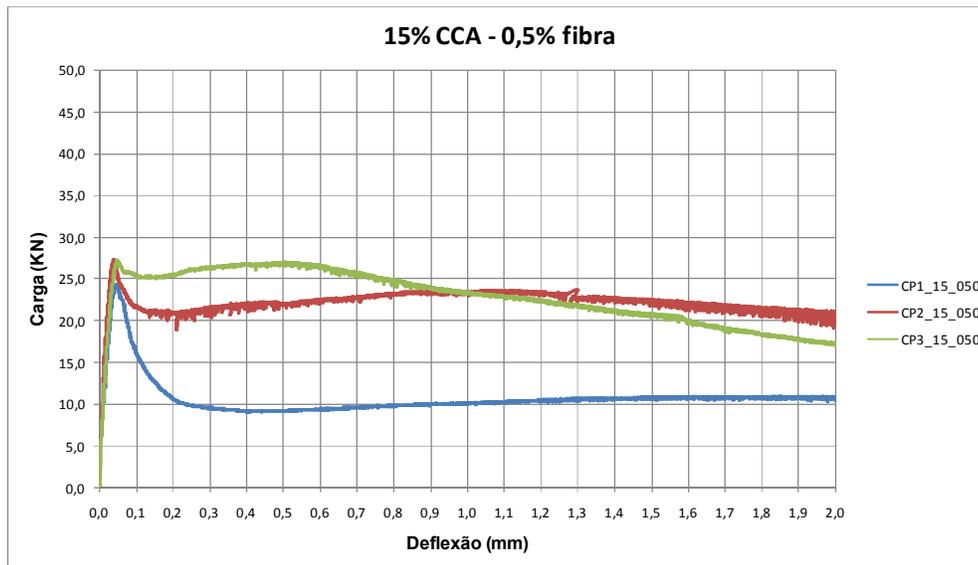
Resultados do ensaio de flexão para formulações com 0% de CCA e 0,75% de fibra de aço:



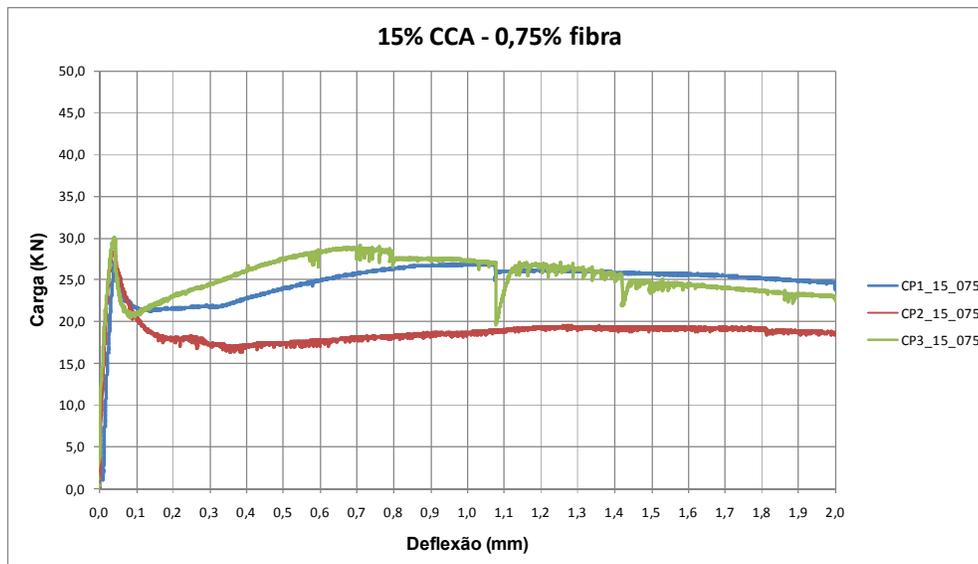
Resultados do ensaio de flexão para formulações com 0% de CCA e 1,0% de fibra de aço:



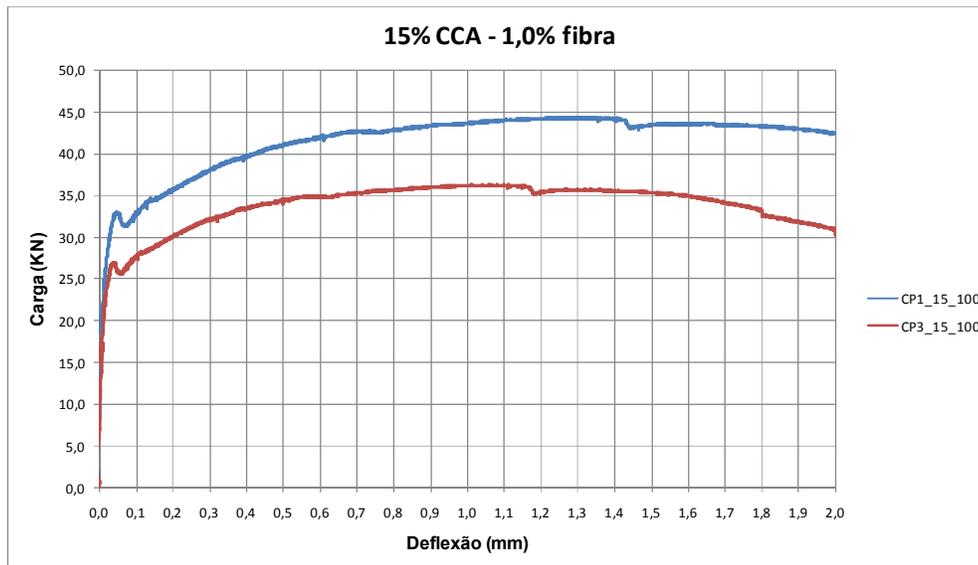
Resultados do ensaio de flexão para formulações com 15% de CCA e 0,5% de fibra de aço:



Resultados do ensaio de flexão para formulações com 15% de CCA e 0,75% de fibra de aço:



Resultados do ensaio de flexão para formulações com 15% de CCA e 1,0% de fibra de aço:



* Não foram obtidos dados para o ensaio do espécime CP2_15_100

APÊNDICE II – Registro fotográfico dos ensaios de flexão em quatro pontos







