

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

**MICHEL FERNANDO ALBERTIM**

**DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE COMPÓSITOS  
CIMENTÍCIOS HÍBRIDOS**

MARINGÁ  
2016

**MICHEL FERNANDO ALBERTIM**

**DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE COMPÓSITOS  
CIMENTÍCIOS HÍBRIDOS**

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

Orientador: Prof. Dr. Vladimir José Ferrari

MARINGÁ  
2016

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

A334d Albertim, Michel Fernando  
Desenvolvimento e análise de compósitos  
cimentícios híbridos / Michel Fernando Albertim. --  
Maringá, 2016.  
95 f. : il. color., figs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Vladimir José Ferrari.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de  
Maringá, Centro de Tecnologia, Departamento de  
Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil, 2016.

1. Compósito cimentício híbrido. 2. Fibras de  
aço. 3. Fibras de vidro. I. Ferrari, Vladimir José,  
orient. II. Universidade Estadual de Maringá. Centro  
de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil.  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III.  
Título.

CDD 21.ed. 624.1834

GV5-003692

MICHEL FERNANDO ALBERTIM

DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE COMPÓSITOS  
CIMENTÍCIOS HÍBRIDOS

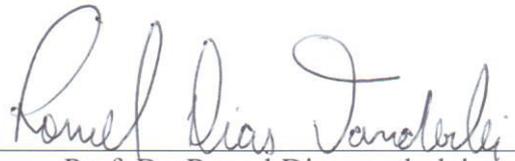
Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Maringá, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, na área de concentração Estruturas, para obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 26 de agosto de 2016.



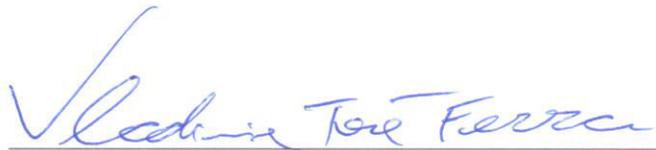
Prof. Dr. Rodrigo Ribeiro Paccola

**Membro EESC-USP**



Prof. Dr. Romel Dias vanderlei

**Membro UEM**



Prof. Dr. Vladimir José Ferrari

**Orientador UEM**

Aos familiares e amigos pelo constante apoio e incentivo.

## AGRADECIMENTOS

Ao nosso criador e ao seu filho Jesus Cristo;

À Universidade Estadual de Maringá e ao Professor Dr. Rafael Alves de Souza pela oportunidade de cursar um Mestrado em uma Universidade renomada;

À gloriosa Polícia Militar do Paraná, local onde tiro o meu sustento diário e de onde levo o pão de cada dia à mesa de minha família;

Ao IFPR Campus de Foz do Iguaçu pela disponibilização do espaço físico para desenvolvimento desta pesquisa;

À Itaipu Binacional pela disponibilidade do Laboratório de Tecnologia do Concreto para desenvolvimento da pesquisa;

As empresas Marcenaria CBE, Maccaferri América Latina e Belgo Bekaert Arames pela disposição de materiais para o desenvolvimento desta pesquisa;

Ao Capitão Edson Dal Pozzo e ao Tenente Murilo Mendonça Mendes pelo apoio e oportunidade com a flexibilização das escalas, permitindo assim meus deslocamentos semanais à cidade de Maringá.

Ao Professor Dr. Vladimir José Ferrari pela orientação, incentivo, parceria e paciência durante a elaboração deste trabalho;

Aos demais professores e colegas de classe do PCV, pelo apoio, amizade e dedicação prestada durante o curso;

Aos funcionários do Laboratório de Tecnologia do Concreto da Itaipu Binacional, Engenheiro Civil Fábio Luiz Willrich, e ao Técnico em Construção Civil João Bernardino, pela amizade, tempo e dedicação durante os ensaios realizados;

A minha esposa Andrea Ampessan Albertim pelo incentivo, dedicação e paciência nas minhas ausências, e aos meus filhos Julia Ampessan Albertim e Murilo Ampessan Albertim, pelo combustível motivacional para o início e conclusão deste curso;

Aos meus pais, Messias Benedito Albertim e Angelina Matilde Piai Albertim pelo apoio e motivação, assim como de minha irmã, Fabiana Albertim Kaiser;

Aos colegas de viagem e estudo, Adriano Risson, Juliana Neves e Miguel Oliveira pelo companheirismo durante essa longa jornada;

Ao amigo Miguel Batista de Oliveira pelo apoio, companheirismo e tempo disponibilizado durante o curso e principalmente durante os ensaios;

Aos amigos e sócios Edson Aristides e Valdir Renaldo de Oliveira, pelo apoio e tempo disponibilizado, onde muitas vezes se fizeram necessários o aumento de suas jornadas para suprir minhas ausências;

A secretária do PCV e grande parceira Marli, pelo incentivo e apoio.

Aos demais companheiros de trabalho, pela amizade e incentivo.

Se lembra tempo de quebra

A vida volta pra trás

Sou bagual que não se entrega,

Assim no más.

Música Veterano de Ewerton Ferreira

## RESUMO

A utilização de fibras em concreto está cada vez mais empregada na construção civil, com muitos estudos e com diversas técnicas de emprego. As melhorias como a elevada resistência à tração, resistência a corrosão, baixo peso e principalmente o retardo e controle da fissuração, fazem da utilização de fibras em concreto uma alternativa cada vez mais aplicada e disseminada. O trabalho objetivou o desenvolvimento e a análise de um compósito cimentício híbrido para aplicação em reparos de estruturas, sendo que o estudo ocorreu pela introdução conjunta de fibras de aço e microfibras de vidro à matriz cimentícia. Com isso, e seguindo as literaturas sobre fibras, sabemos que as microfibras atuam diretamente na microfissuração que ocorre na fase pré-pico de carregamento, e que as fibras de aço, com um comprimento maior e com ganchos para ancoragem, atuam diretamente na fase pós-pico, isto é, após a fissuração da estrutura. A partir disso, considerou-se o desenvolvimento de um compósito híbrido, com microfibras de vidro e fibras de aço, a fim de que uma fibra complemente a outra e que o compósito desenvolvido possa atuar de forma sinérgica, retardando a microfissuração e aumentando sua capacidade de carga, e que após a atuação das microfibras, com as fissuras já abertas, a estrutura possa ainda suportar carga em função das fibras de aço. Foram realizados ensaios à flexão de três pontos em viga pré-entalhada com a finalidade de estudar o processo de transferência de tensões entre fibras, assim como analisar a incorporação de fibras de vidro ao compósito, material este, que possui poucas referências na literatura atual no que tange o seu uso a questão estrutural. Ao final comprovou-se em parte a solução proposta, onde o uso controlado e em baixa quantidades de fibra de vidro aliadas com a fibra de aço, ocasionou um aumento da capacidade de carga do concreto, além de direcionar proposições promissoras para novos estudos com o emprego da fibra de vidro.

**Palavras-chave:** Compósito híbrido. Fibras de aço. Fibras de vidro.

## **ABSTRACT**

The use of fibers in concrete is increasingly used in construction, with many studies and several employment techniques. Improvements as high tensile strength, corrosion resistance, low weight and especially the retardation and crack control, make the use of fiber in concrete an alternative more and more applied and spread. The study aimed to the development and analysis of a cementitious hybrid composite for use in structure repairs, and such composite studied the joint introduction of steel fibers and glass microfibers to the cementitious matrix. With that, and following the literature on fibers, we know that the microfibers act directly on the hairline cracks that occur in the pre-peak loading phase, and steel fibers with a greater length and with hooks for anchoring, act directly in the post stage -post-peak, i.e., after the cracking of the structure. From this was considered the development of a hybrid composite, with glass microfibres and steel fibers, so that a fiber complements the other and the composite developed can act synergistically, delaying microcracking and increases their ability to load, and then, after the performance of the microfibers, with the already open cracks, the structure can also withstand load, depending on the steel fibers. Bending tests were performed at three points in pre-notched beam in order to study the stress transfer process between fibers, so as to analyze the incorporation of glass fibers to the composite, taking into account that this material has few references in the literature, regarding to its structural use. Finally the proposed solution has been partially confirmed, where the controlled use and low glass fiber amounts combined with steel fiber caused an increase in carrying capacity of concrete, in addition to targeting promising propositions for further studies with fiberglass employment.

**Key-words:** Hybrid composite. Steel fibers. Fiberglass.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Transferência de tensões pelas fibras entre as faces de uma fissura.....	17
Figura 1.2 - Ponte do Limão (SP) com armadura exposta .....	19
Figura 1.3 - Viaduto Santo Amaro (SP) com armadura exposta.....	19
Figura 2.1 - Processo de transferência de tensões e costura de fibras .....	22
Figura 2.2 - Diagrama de tensão por deformação.....	23
Figura 2.3 - Compatibilidade entre fibras e agregados graúdos.....	25
Figura 2.4 - Comportamento de matrizes cimentícias .....	26
Figura 2.5 - Processo de fabricação da fibra de vidro.....	28
Figura 2.6 - Exemplos de tipos de formas de fibras de aço .....	32
Figura 2.7 - Fibra com ancoragem.....	32
Figura 2.8 – Parâmetros de tenacidade flexional conforme RILEM (2002).....	36
Figura 3.1 - Corpo de prova dotado de entalhe central reto passante.....	39
Figura 3.2 - Entalhe na viga .....	40
Figura 3.3 - Configuração do Ensaio .....	40
Figura 3.4 – Suportes e clip gauge.....	41
Figura 3.5 - Corpo de prova posicionado para a realização do ensaio de flexão .....	41
Figura 3.6 - Equipamento servo-controlado e sistema de aquisição de dados .....	42
Figura 3.7 - Clip gauge.....	42
Figura 3.8 - Areia média do rio Paraná.....	46
Figura 3.9 - Brita 0.....	48
Figura 3.10 - Adiment Premium.....	49
Figura 3.11 - Fibras Wirand FS8 .....	49
Figura 3.12 - Fibras de vidro AR.....	50
Figura 3.13 – Formas empregadas.....	52
Figura 3.14 - Corpos de prova .....	52
Figura 4.1 – Curvas P-CMOD do compósito CP0 .....	54
Figura 4.2 - Curvas P-CMOD dos compósitos com fibras de vidro .....	54
Figura 4.3 - Curvas P-CMOD para a comparação entre as taxas de vidro .....	56
Figura 4.4 - Curvas P-CMOD dos compósitos com fibras de aço.....	57
Figura 4.5 - Curvas P-CMOD dos compósitos híbridos .....	58
Figura 4.6 - Força máxima de offset (FL) e força máxima do compósito (FM) .....	61

Figura 4.7 - Relação entre as forças nos compósitos híbridos .....	62
Figura 4.8 - Valores de resistência.....	63
Figura 4.9 - Flexão residual $f_{R,1}$ .....	64
Figura 4.10 - Flexão residual $f_{R,4}$ .....	64
Figura 4.11 - Curvas P-CMOD dos compósitos.....	65
Figura 4.12 – Comportamento P-CMOD inicial por compósito .....	66
Figura 4.13 - Comportamento P-CMOD inicial.....	69
Figura 4.14 - Corpo de prova fraturado .....	70

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Compósitos estudados .....	44
Tabela 3.2 - Tipos de Fibras .....	45
Tabela 3.3 - Composição de materiais para produção dos compósitos .....	51
Tabela 4.1 - Resultados médios do ensaio a compressão.....	53
Tabela 4.2 - Forças e Resistências .....	60
Tabela 4.3 - Flexão residual $f_{R,1}$ .....	63

## LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 - Valores de resistência e módulo de elasticidade para diversos tipos de fibras e matrizes .....	24
Quadro 2.2 - Tipos de fibras de vidro .....	28
Quadro 2.3 - Composição química das fibras de vidro.....	29
Quadro 2.4 - Comprimento das fibras para atingir 95% da eficiência.....	30
Quadro 3.1 - Características técnicas dos equipamentos .....	43
Quadro 3.2 - Nomenclatura dos compósitos .....	44
Quadro 3.3 - Características do cimento .....	46
Quadro 3.4 - Determinação da massa específica da areia .....	47
Quadro 3.5 - Ensaio granulométrico para caracterização da areia .....	47

## LISTA DE EQUAÇÕES

(2.1).....	36
(2.2).....	37
(2.3).....	37
(2.4).....	38

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

CMOD      Deslocamento de abertura da entrada do entalhe

## SUMÁRIO

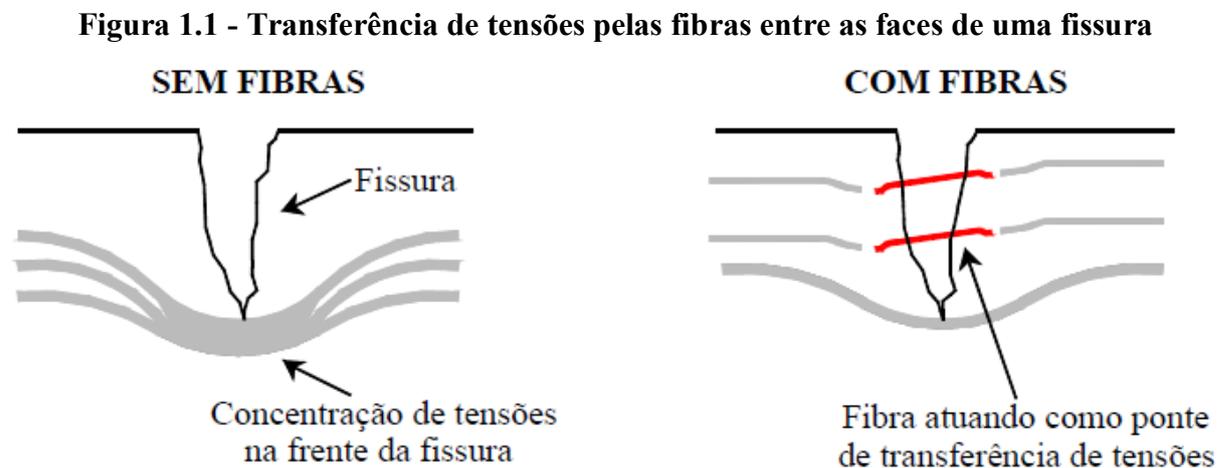
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
1.1	Considerações Iniciais .....	17
1.2	Justificativas .....	18
1.3	Objetivos .....	21
1.3.1	Objetivo geral.....	21
1.3.2	Objetivos específicos .....	21
1.4	Apresentação da dissertação .....	21
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>22</b>
2.1	Concreto com fibras.....	22
2.1.1	Tenacidade .....	25
2.1.2	Trabalhabilidade.....	26
2.2	Fibras de vidro.....	27
2.3	Fibras de aço .....	31
2.3.1	Durabilidade.....	34
2.4	Hibridização de fibras.....	34
2.5	RILEM.....	36
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>39</b>
3.1	Configuração do ensaio e instrumentação .....	39
3.2	Programa de ensaios .....	43
3.3	Preparação dos compósitos.....	45
3.3.1	Cimento CP-V ARI .....	45
3.3.2	Areia .....	46
3.3.3	Brita .....	48
3.3.4	Aditivo .....	48
3.3.5	Fibras de aço .....	49
3.3.6	Fibra de vidro .....	50
3.3.7	Constituição e dosagens dos compósitos.....	50
<b>4</b>	<b>ANÁLISE DE RESULTADOS .....</b>	<b>53</b>
4.1	Ensaio à compressão em corpos de prova cilíndricos.....	53
4.2	Resultados .....	53
4.3	Curvas P-CMOD para análise dos compósitos híbridos.....	65
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>71</b>

<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>74</b>
<b>APÊNDICE A – Curvas Força (P) versus deslocamento vertical (<math>\delta</math>).....</b>	<b>78</b>
<b>APÊNDICE B – Curvas Força (P) versus abertura da fissura (CMOD).....</b>	<b>87</b>

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 Considerações Iniciais

Segundo Figueiredo (2011), a incorporação de fibras ao concreto é uma alternativa usada para minimizar limitações que o concreto possui, principalmente o seu comportamento frágil e sua baixa capacidade de deformação antes da ruptura sob esforços de tração. As vantagens mecânicas oriundas da adição de fibras ao concreto são devidas ao fato de que elas atuam como ponte de transferência de tensões através das fissuras (vide Figura 1.1).



Fonte: Nunes & Agopyan, 1998

Diferentes tipos de fibras já foram estudadas quando incorporadas ao concreto com vistas a um melhor desempenho mecânico quando sob esforços de tração. Entre os estudos nacionais, cito:

- a) Fibras de aço: Figueiredo (2000), Ferrari (2007), Arquez (2010) e Ferreira (2002);
- b) Fibras de vidro: Ortenzi (2007), Bonifácio & Godinho (2014), Ventura (2009) e Aquino e Carvalho (1992);
- c) Fibras poliméricas: Cáceres et al. (2013).

Dos trabalhos citados anteriormente, fica evidenciado como comentado por Ferreira (2002) que as modificações decorrentes da adição de fibras de aço à matriz cimentícia em taxas de até 2% tendem a restringir-se apenas à fase de pós-pico do histórico de carregamento. Nessas

condições, as fibras não são suficientes para inibir o processo de fissuração da matriz que antecede a carga máxima.

Neste sentido, o processo de hibridização (incorporação de mais de um tipo de fibra) tem ganhado espaço e produzido bons resultados: Ferrari (2007), Arquez (2010) e Cáceres et al. (2013) demonstraram isso em seus estudos.

Assim, um dos principais preceitos para a hibridização é o de controlar a abertura de fissuras em diferentes estágios de comportamento da matriz cimentícia.

Di Prisco et al (2009) comenta que as combinações de fibras, com diferentes tamanhos, formas e propriedades contribuem para o desenvolvimento de um compósito cimentício híbrido visam um maior desempenho das estruturas por meio de melhorias na resistência, ductilidade e tenacidade ao fraturamento. Ainda segundo os autores, dois ou mais diferentes tipos de fibras podem ser adequadamente combinados para produzir um compósito e incrementar as suas propriedades físicas e mecânicas a partir da ação de cada uma das fibras.

Conforme comentam Banthia & Sappakittipakorn (2007), o objetivo de usar simultaneamente as fibras de aço e as fibras sintéticas (fibras obtidas através de polímeros sintéticos) é obter melhor desempenho do concreto, aumento da energia de fratura e incremento da tenacidade na região pós-pico.

Diante do exposto, é que se apresenta o objetivo da presente pesquisa, utilizar a combinação de fibras metálicas com fibras de vidro para o desenvolvimento de compósitos cimentícios de elevado desempenho a tração na flexão. A análise de desempenho é feita mediante os resultados obtidos pelos ensaios prescritos pela RILEM (2002).

## 1.2 Justificativas

No Brasil não é raro deparar-se com estruturas de concreto armado que se encontram em estágio avançado de deterioração. Nas figuras 1.2 e 1.3 são mostrados casos de degradação do concreto onde é possível verificar a deterioração das armaduras.

**Figura 1.2 - Ponte do Limão (SP) com armadura exposta**



Fonte: Arquez, 2010

**Figura 1.3 - Viaduto Santo Amaro (SP) com armadura exposta**



Fonte: Arquez, 2010

Nesse sentido, a principal justificativa para a condução da presente pesquisa reside no fato da necessidade do desenvolvimento de compósitos cimentícios de melhores propriedades mecânicas em relação aos concretos convencionais.

Ademais, os estudos para a incorporação de fibras ao concreto geralmente contemplam a utilização de fibras de aço em se tratando de Brasil, como comentam Figueiredo (2000), Arquez (2010) e Ferreira (2002).

Como as fibras de aço encontradas comercialmente são disponibilizadas com comprimento entre 25mm e 45mm, os estudos mostram que este comprimento não impede a formação de microfissuras na fase pré-pico, pois somente trabalham de forma eficiente após o surgimento destas, onde a fibra na matriz já fissurada, atua como ponte de transferência de tensões como demonstrado na Figura 1.1.

Com o propósito de melhorar o desempenho das fibras de aço vendidas comercialmente, alguns estudos incorporaram microfibras, que possuem comprimento aproximado entre 13mm e 15mm aos compósitos, como fez Ferrari (2007), onde seus estudos mostraram a atuação eficiente das microfibras na fase pré-pico, combatendo diretamente a microfissuração e assim aumentando a resistência do compósito de forma eficiente.

Ocorre que as microfibras utilizadas para o estudo de Ferrari (2007) não são encontradas comercialmente, pois foram fabricadas exclusivamente para o desenvolvimento daquele estudo, e mesmo com os bons resultados, não foram continuadas pela empresa fabricante, o que levou esta pesquisa a buscar uma alternativa para substituição e aproveitamento dos resultados apresentados pelo referido autor.

Sendo assim, uma microfibras sintética foi encontrada comercialmente, com 13mm de comprimento e com propriedades interessantes à tração (superiores à do aço), neste caso a microfibras de vidro álcali resistente (AR). Essa fibra foi considerada uma boa alternativa, pois além da disponibilidade, possui um baixo custo de mercado.

Outro ponto positivo, nos estudos de Ortenzi (2007), ele descreve que uma vantagem indiscutível das fibras sintéticas em relação às de aço, é que as últimas podem ser afetadas por corrosão, principalmente nas fibras próximas às faces dos elementos. Outra desvantagem das fibras metálicas é o fato de haverem partes dessas fibras junto às faces de elementos estruturais, corroborando para que fenômenos de degradação por agentes ambientais possam ocorrer, podendo assim perder sua resistência devido ao efeito da corrosão.

Ainda que a utilização das fibras de vidro para uso estrutural seja incipiente, principalmente no Brasil, com nenhum trabalho de destaque na área científica, suas propriedades a tornam interessante para o desenvolvimento deste estudo.

Já uma composição a base de dois tipos de fibras, sendo uma metálica e uma sintética, neste caso, a de vidro, parte-se do pressuposto que um tipo de fibra pode potencializar o outro, e assim melhorar o desempenho à tração na flexão.

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 Objetivo geral

Desenvolvimento e análise de compósitos cimentícios híbridos de elevado desempenho em termos de resistência à tração na flexão (tenacidade flexional).

### 1.3.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos, este trabalho pretende analisar:

- Analisar o efeito do processo de hibridização;
- Avaliar o desempenho dos compósitos com a variação das taxas de microfibras de vidro;
- Avaliar o efeito da hibridização entre as fibras de aço com as microfibras de vidro.

## 1.4 Apresentação da dissertação

A presente dissertação, apresenta a ordem e descrição dos capítulos que a compõem, como segue:

No Capítulo 1 será apresentada uma introdução sobre a pesquisa e a sua justificativa, assim como os objetivos pretendidos.

No Capítulo 2 será apresentada a revisão bibliográfica sobre o tema, onde constarão as publicações científicas nacionais e internacionais já realizadas, destacando os principais resultados e a importância de cada estudo.

No Capítulo 3 serão descritos os materiais utilizados na pesquisa e suas características, assim como detalhado os métodos científicos adotados para atingir os objetivos propostos.

No Capítulo 4 serão apresentados os resultados obtidos, que serão interpretados, analisados e confrontados com o referencial teórico estudado.

No Capítulo 5 serão apresentadas as principais conclusões encontradas nesta pesquisa e trará algumas sugestões para futuros trabalhos acerca do mesmo tema.

Por fim, o Capítulo 6 trará o referencial bibliográfico utilizado para o desenvolvimento da pesquisa.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

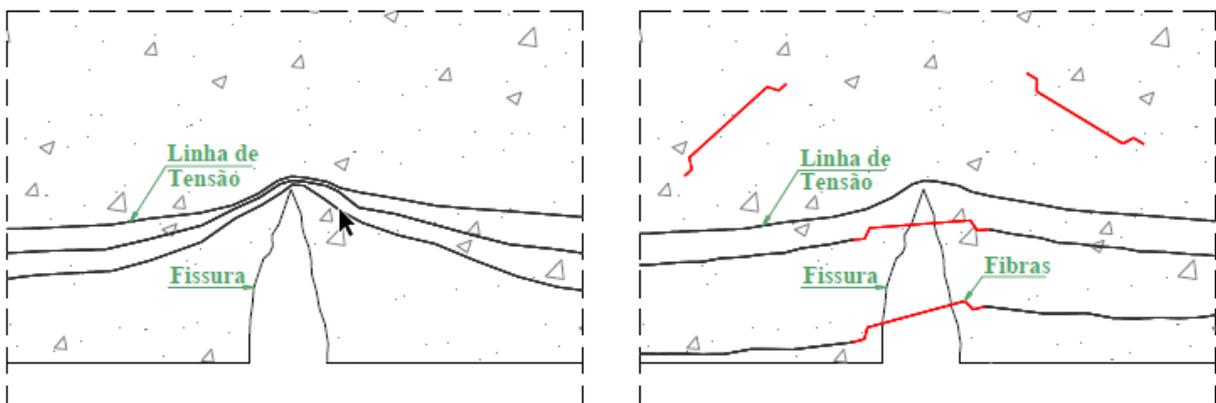
### 2.1 Concreto com fibras

O concreto é o material mais utilizado na construção civil, e que seu desenvolvimento contribuiu de forma incisiva para a construção da sociedade moderna. Sua capacidade para absorver esforços a compressão o torna extremamente eficiente com concretos normais atingindo valores 10 MPa a 50 MPa, além de outros estudos de concretos especiais cujos valores podem atingir até 150 MPa.

Porém é notório também suas limitações, sendo que o comportamento da matriz fica comprometido quando é submetida à esforços de tração ou flexão, aliado a baixa capacidade de deformação do concreto, o que ocasiona a propagação de fissuras e consequentemente a ruína da peça, daí a chamada ruptura frágil do concreto.

Para o concreto com fibras, as fibras atuam como uma costura no fissuramento, retardando a processo de abertura das mesmas, agindo como uma ponte de ligação, transferindo as solicitações entre as fibras e minimizando o esforço na fissura, como pode ser visto na Figura 2.1:

**Figura 2.1 - Processo de transferência de tensões e costura de fibras**



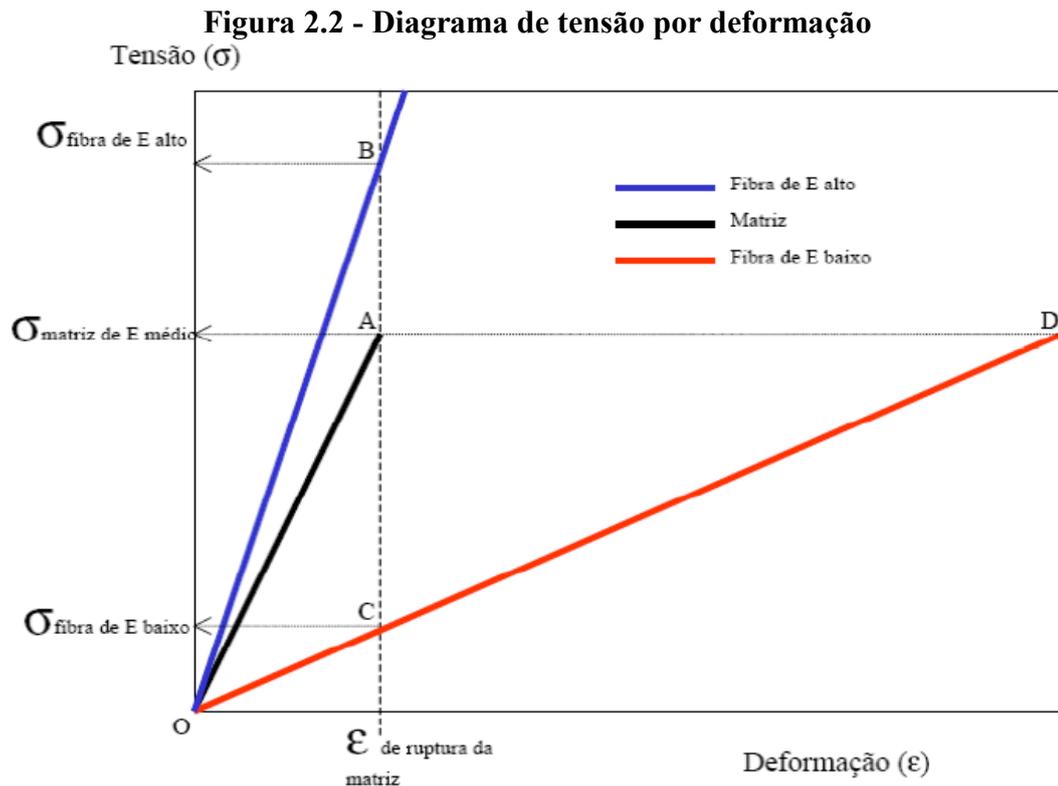
Fonte: Arquez, 2010

Para Uygunoglu (2008), a adição de fibras na mistura do concreto, melhora significativamente propriedades como tração, flexão, impacto, fadiga, resistência à abrasão e capacidade de deformação.

Para Arquez (2010), em situações específicas, com esforços definidos em um plano, como flexão, por exemplo, o dimensionamento estrutural utilizando barras de aço convencional, é a maneira mais econômica de solucionar o problema. Porém, quando o assunto

é reforço estrutural, às vezes, o custo x benefício permite utilizar fibras em determinadas aplicações.

As fibras para utilização como reforço devem possuir módulo de elasticidade alto, já as fibras que apresentam módulo baixo tem um ganho de desempenho na diminuição da fissuração e boa resistência a impactos, porém não trabalham de forma eficiente no reforço.



Supondo uma situação de deformação até a fissuração para uma matriz, na figura acima a linha OA, a partir desse ponto as fibras começam a ser solicitadas. Na situação das fibras de baixo módulo de elasticidade, na Figura 2.2 acima a linha OD, no ponto de deformação da matriz, a tensão estaria ainda baixa, o que necessita uma grande deformação para atingir a mesma tensão da matriz, o que muitas vezes nem ocorre tendo em vista que as fibras de baixo módulo apresentam uma menor resistência. Já no segundo caso, quando a matriz atinge seu limite, a fibra está mais tensionada, suportando um aumento de carga com pouca deformação. Obviamente, desde que tenha resistência mecânica para tal aumento. Isso faz com que as fibras de alto módulo funcionem como reforço.

Para Arquez (2010), as fibras de alto módulo, pode-se citar as de aço. Devido às suas propriedades, elas atuam como reforço do concreto endurecido, podendo, inclusive, substituir a armadura convencional em determinadas aplicações.

No Quadro 2.1 abaixo, Figueiredo (2000) descreve as propriedades dos diferentes tipos de fibras.

**Quadro 2.1 - Valores de resistência e módulo de elasticidade para diversos tipos de fibras e matrizes**

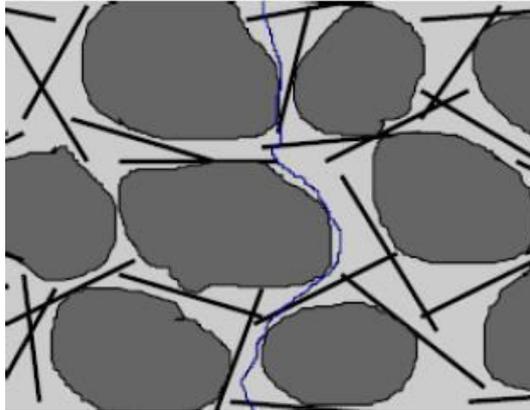
Material	Diâmetro (µm)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à tração (MPa)	Deformação na ruptura (%)
Aço	5-500	7,84	190-210	0,5-2,0	0,5-3,5
Vidro	9-15	2,60	70-80	2-4	2-3,5
Amianto	0,02-0,4	2,6	160-200	3-3,5	2-3
Polipropileno	20-200	0,9	5-7,7	0,5-0,75	8,0
Kevlar	10	1,45	65-133	3,6	2,1-4,0
Carbono	9	1,9	230	2,6	1,0
Nylon	-	1,1	4,0	0,9	13-15
Celulose	-	1,2	10	0,3-0,5	-
Acrílico	18	1,18	14-19,5	0,4-1,0	3,0
Polietileno	-	0,95	0,3	$0,7 \times 10^{-3}$	10
Fibra de Madeira	-	1,5	71	0,9	-
Sisal	10-50	1-50	-	0,8	3,0
Matriz de cimento (para comparação)	-	2,50	10-45	$3,7 \times 10^{-3}$	0,02

Fonte: Figueiredo, 2000

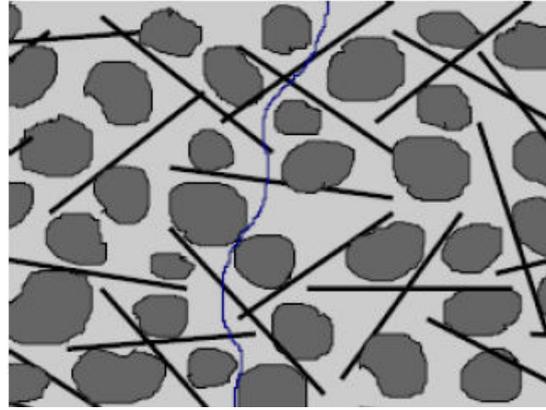
Figueiredo (2005) explica que em geral, quanto maior o fator de forma, maior é a capacidade resistente do concreto pós-fissurado. Porém, caso o comprimento da fibra seja muito grande, ou a resistência da matriz seja muito elevada, haverá um aumento na aderência entre concreto e fibra, que impedirá o seu deslizamento, possibilitando a abertura da fissura. O mecanismo é interrompido quando houver o rompimento da fibra, agregando pouco ou nenhuma resistência ao sistema. Por outro lado, se o fator de forma for muito pequeno, as fibras escorregarão sob baixos carregamentos, não contribuindo muito para diminuir a fissuração.

Para Figueiredo (2005), deve haver uma compatibilidade dimensional entre o agregado graúdo e as fibras, sendo que estas devem ser igual ou superior ao dobro da dimensão máxima do agregado utilizado. Esta compatibilidade permite que as fibras sejam ancoradas corretamente e o reforço seja mesmo do concreto e não meramente da argamassa, já que as fissuras se propagam preferencialmente na interface entre argamassa e agregado, situação que pode ser visualizada na Figura 2.3.

**Figura 2.3 - Compatibilidade entre fibras e agregados graúdos**



**Figura 2.2a:** Concreto reforçado com fibras onde não há compatibilidade dimensional entre as fibras e o agregado graúdo.



**Figura 2.2b:** Concreto reforçado com fibras onde há compatibilidade dimensional entre as fibras e o agregado graúdo.

Fonte: (Adaptado de FIGUEIREDO, 2000)

Cuidados devem ser tomados na produção do concreto reforçado com fibras para que não apareçam os chamados ouriços ou nichos, que nada mais são que o “empelotamento” das fibras. Quanto maior o fator de forma, mais susceptível de acontecer o fenômeno (ARQUEZ, 2010).

Para que as fibras possam funcionar corretamente, é imprescindível que a matriz apresente propriedades satisfatórias. É ela quem transmite os esforços entre as fibras, protege as fibras das agressividades ambientais, de danos mecânicos e auxilia na resistência ao cisalhamento dos polímeros, seja no plano ou interlaminar. Além disso, dá suporte contra a instabilidade das fibras sob ações de compressão. (SOARES; MARTINS, 2006).

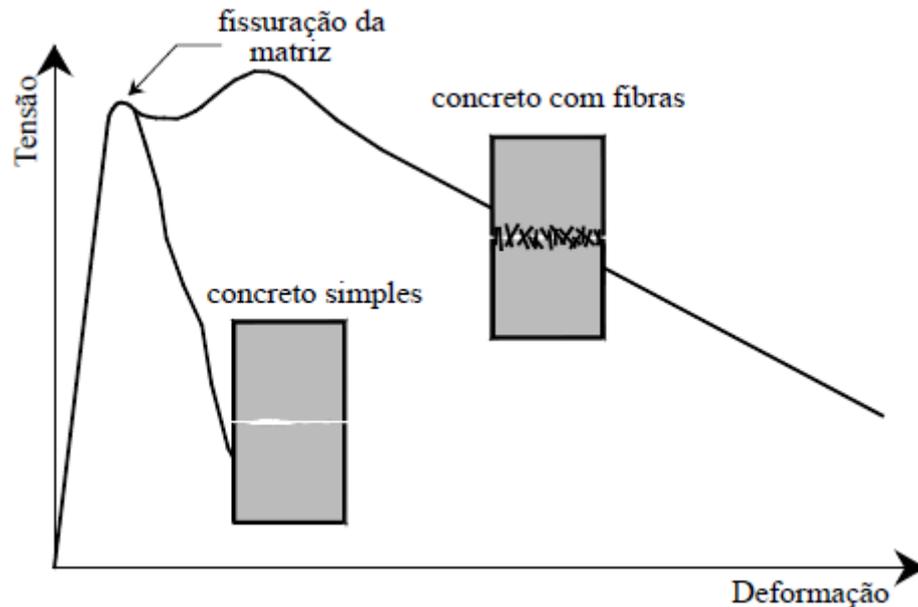
### 2.1.1 Tenacidade

Tenacidade é uma medida da quantidade de energia que o compósito pode absorver antes de fraturar, e que pode ser mostrada de forma numérica, pela área sob a curva *tensão x deslocamento vertical* que pode ser obtida em um ensaio de tração na flexão.

Uma matriz cimentícia tem por característica a baixa resistência à tração comparando-se à sua resistência à compressão, além de uma baixa capacidade de deformação, onde após o surgimento da primeira fissura, tende a perder sua capacidade quase que imediatamente.

Com isso, a utilização de fibras com boa resistência à tração e boa ductilidade, atua diretamente na capacidade da estrutura de absorver carga e de deformação, como pode ser visto na Figura 2.4:

**Figura 2.4 - Comportamento de matrizes cimentícias**



Fonte: Ferrari, 2007

Bentur & Mindess (1990) comentam que as fibras de aço não são tão eficientes quanto as armaduras contínuas para suportar esforços de tração, entretanto, apresentam papel fundamental no controle da propagação de fissuras no concreto. Elas alteram o comportamento mecânico do concreto após a ruptura da matriz e melhoram a sua tenacidade, ou seja, a sua capacidade de absorção de energia.

### 2.1.2 Trabalhabilidade

Trabalhabilidade pode ser definida como a facilidade com a qual um concreto pode ser manipulado sem segregação nociva e isso é outro fator importante para a utilização de um concreto com fibras. O concreto é considerado trabalhável quando no estado fresco apresenta consistência e dimensões máximas dos agregados apropriadas ao tipo de obra a que se destina, levando em conta as dimensões das peças, afastamento e distribuição das barras de aço, métodos de transporte, lançamento e adensamento que serão adotados.

Mehta e Monteiro (2008) explicam que a incorporação de fibras à matriz cimentícia diminui a trabalhabilidade e que isso varia conforme o volume de fibras e o fator de forma. Figueiredo (2005) acrescenta que isso ocorre em função do aumento da área superficial que demanda água e por isso o aumento do fator água/cimento e o uso de super ou hiper plastificantes, pode contribuir na trabalhabilidade do compósito.

## 2.2 Fibras de vidro

A utilização de fibras de vidro remonta do Egito antigo, onde peças encontradas em escavações arqueológicas mostram a utilização de fibras de vidro em artefatos cerâmicos, fato este que comprova sua função de reforçar as propriedades mecânicas do elemento, uma vez que tais peças se mantem em bom estado até a presente data.

Mesmo assim, a utilização da fibra de vidro não evoluiu até o início do século XX, onde a partir daí, iniciaram os estudos no processo de fabricação e aplicação do material, principalmente pela indústria militar americana, que enxergou na fibra um potencial para uma ampla variedade de aplicações, seja ela aeroespacial, naval, química, saneamento e de transportes, sendo que um dos principais fatores que motivaram sua utilização foi sua agilidade e leveza em relação as fibras tradicionais em aço.

De acordo com Carvalho (1992), a fibra de vidro é considerada um dos principais agentes de reforço empregados para obtenção de materiais compósitos e ocupam posição de grande importância na indústria aeronáutica, automobilística e esportiva. Comercializados para esta finalidade desde a década de 40, as fibras de vidro têm contribuído para o uso crescente dos plásticos reforçados em aplicações que no passado eram reservadas exclusivamente aos metais e suas ligas (CARVALHO, 1992).

Segundo Ventura (2009), atualmente existe uma gama bastante ampla de materiais compósitos de fibra de vidro, sendo este tipo de reforço bastante utilizado principalmente pelo seu baixo custo se comparado com outras fibras como carbono e aramida. Os materiais reforçados com fibras de vidro apresentam elevado quociente resistência/peso, boa estabilidade dimensional, resistência ao calor, bem como para com a umidade e corrosão e boas propriedades de isolamento elétrico (VENTURA, 2009).

As fibras de vidro proporcionam vantagens significativas, pois possuem excelente aderência fibra-matriz, baixo custo, facilidade no processamento, alta resistência à tração se comparada com outras fibras têxteis, resistência ao calor e ao fogo devido a sua origem inorgânica (mineral), alto ponto de fusão e ainda apresentam boa resistência química, à umidade, térmica e elétrica. (AQUINO, 1992).

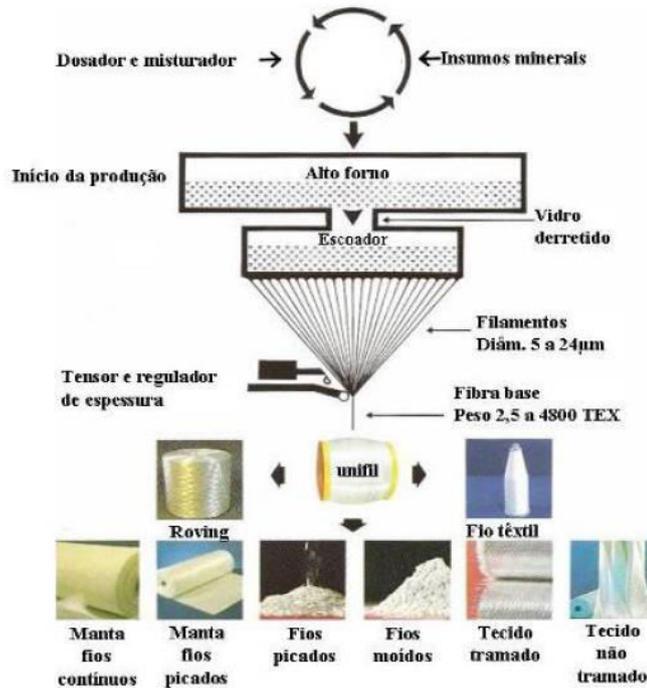
Sua fabricação é oriunda de compostos químicos encontrados na natureza, sendo a areia, o calcário, o óxido de magnésio e o de alumínio. A fusão desses materiais origina alguns tipos de vidros e também as fibras.

A fibra de vidro pode ser utilizada de diversas formas, que variam conforme o processo de filamentação, que origina produtos para isolamentos termo acústicos, tecidos especiais

diversos e mantas e tecidos com finalidade estrutural. Hoje, grande parte da fabricação de fibras de vidro está voltada para a indústria automobilística, sendo matéria prima principal para o reparo de latarias de automóveis.

Abaixo a Figura 2.5 demonstra o processo de fabricação dos filamentos de vidro que originam as fibras, onde podemos visualizar o processo de fusão dos materiais em alto forno e sua passagem pelas peneiras para a formação dos filamentos.

**Figura 2.5 - Processo de fabricação da fibra de vidro**



Fonte: Saint-Gobain-VETROTEX®, 2000

No processo de fabricação da fibra de vidro podemos originar diferentes tipos de fibras para diferentes finalidades, sendo que esses diferentes tipos podem ser obtidos pela variação das proporções dos compostos utilizados na fabricação, como o boro, a sílica e o quartzo.

Dos principais tipos de fibras de vidro fabricados, as principais são descritas no Quadro 2.2 abaixo:

**Quadro 2.2 - Tipos de fibras de vidro**

<b>Tipo de vidro</b>	<b>Características principais</b>	<b>Resistencia Mecânica</b>	<b>Resistencia Química</b>
E	Isolamento Eletro-magnético	Muito boa	Boa

AR	Álcali-resistente	Boa	Ótima
S	Alta resistência mecânica e térmica	Ótima	Muito boa
C	Alta resistência química	Boa	Ótima

Fonte: Adaptado de SAINT-GOBAIN VETROTEX®, 2000

O tipo S que possui bons resultados em resistência mecânica e química e estão mais restritos a indústria aeroespacial, e os mais comuns utilizados na construção civil, são o tipo E e o tipo AR, sendo o AR o ideal para emprego estrutural, uma vez que sua composição o torna mais resistente a alcalinização, isto é, um menor teor de óxido de cálcio, óxido de magnésio e óxido de alumínio, melhora suas propriedades para a utilização em ambientes alcalinos.

Segundo Ortenzi (2007), a alcalinidade é tão importante que concretos com fibras de vidro tipo AR, tinha uma deformação 1/10 menor após um ano que a deformação na flexão aos 28 dias, enquanto o concreto com fibras de vidro tipo E reduziu para 1/2 da deformação na flexão aos 28 dias.

O Quadro 2.3 abaixo demonstra essas variações no processo de fabricação que originam os diferentes tipos de fibras de vidro.

**Quadro 2.3 - Composição química das fibras de vidro**

<b>COMPOSIÇÃO QUÍMICA MÉDIA POR TIPO DE VIDRO</b>					
<b>Composição média em % por peso</b>	<b>AR Álcali-resistente</b>	<b>E-D Baixa condutividade</b>	<b>C Resistência química</b>	<b>R Resistência mecânica</b>	<b>S Resistência térmica</b>
Areia, calcário, Óxido de silício	72,1	54,3	64,4	64,2	65
Óxido de alumínio	0,6	15,2	4,1	24,8	25
Óxido de boro	-	8	4,7	0,01	-
Óxido de magnésio	2,5	4,7	3,3	10,27	10
Óxido de cálcio	10	17,2	13,2	0,01	-
Óxido ferroso	-	-	-	0,21	-
Óxido de sódio	14,3	0,6	7,7	0,3	-
Óxido de potássio	-	-	1,7	-	-
Óxido de bário	-	-	0,9	0,2	-
Outros	0,5	-	-	-	-

Fonte: SAINT-GOBAIN VETROTEX®, 2000

A grande vantagem do uso das fibras ocorre pelo aumento da capacidade de o concreto resistir à tração e ao impacto, aumentando a capacidade em absorver e dissipar a energia, bem

como a possibilidade de uso da estrutura no estado pós-fissurado, conforme Savastano Jr. (1992), é descrito que se mantendo o percentual fixo de fibras e melhorando a seleção dos agregados e o fator água / cimento, atinge-se um aumento de até 20% na resistência da matriz.

As fibras utilizadas como reforço de estruturas são basicamente de feixe de filamentos que numa primeira situação são ensaiados os filamentos de vidro em relação ao diâmetro médio, uniformidade, resistência aos agentes químicos e também ao fogo, além de sua compatibilidade com outros materiais, numa segunda situação, as fibras são testadas em associação com a matriz onde a fibra está inserida.

Os ensaios mecânicos da fibra de vidro associada a uma matriz devem considerar sempre a direção da disposição das fibras, o tipo de fibra, o percentual de fibra em relação à matriz e a técnica de elaboração dos corpos de prova. Todos esses aspectos influenciam conjuntamente para que a fibra associada à matriz tenha maior ou menor resistência e rigidez, além de outras propriedades como aderência fibra versus matriz, que poderá influenciar no início das falhas do material compósito (ORTENZI, 2007).

Com base no Quadro 2.4 abaixo, Piggott (2002) compara o comprimento necessário de diversos tipos de fibras para que seja atingida a eficiência do reforço correspondente a 95% do módulo de elasticidade ( $E$ ). Isso considerando um volume de fibra de 5% e empacotamento hexagonal em relação a matriz, comparando com elementos constantes na tabela abaixo.

**Quadro 2.4 - Comprimento das fibras para atingir 95% da eficiência**

Tipo de Fibra ou escamas			Comprimento da fibra na matriz, para o módulo indicado junto ao material da matriz		
Reforço	$E_f$ (GPa)	$d(\mu m)$	Epóxi (2.5 GPa)	Alumínio (71 GPa)	LAS <sup>2</sup> (100 GPa)
Vidro – E	72	10	1.2	0.23	0.19
Aço	212	100	21.0	4.0	3.2
Aramida (K-49)	130	12	1.7	-	-
Polietileno <sup>1</sup>	170	27	5.1	-	-
Carbono (AS4)	233	8	1.8	0.33	0.27
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Saffil)	300	3	0.76	0.14	0.11
SiC (SCS6)	410	140	41.0	7.8	6.2
Carbono (El. Rigidez)	827	10	4.2	0.79	0.63
SiC (lascas)	840 <sup>3</sup>	1	0.42	0.079	0.063
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (lascas)	2250 <sup>3</sup>	1	0.69	0.13	0.1

Notas: 1. Marca comercial SPECTRA 100; 2. Lítio-Alumino-Silicato (cerâmica); 3. Lascas com maior módulo  $E$ .

Fonte: Piggott, 2002

Tendo em vista que o módulo de elasticidade é a relação entre força aplicada e a deformação, Ortenzi (2007) descreve que para o caso das fibras de vidro a rigidez é o fator crítico ao se dimensionar qualquer elemento estrutural. Isso é tratado como obstáculo para uso

como estrutura, contudo, conforme o Quadro 2.4, a fibra de vidro possui características similares tanto para o módulo longitudinal, quanto para o transversal, favorecendo a homogeneidade dos compósitos produzidos com esse tipo de fibra, ao contrário de fibras com alto módulo longitudinal, mas baixo módulo transversal, que requerem maior cuidado na orientação dos laminados.

A preocupação em dimensionar estruturas com reforço de fibras está em relacionar a resistência com a rigidez para a partir disso dimensionar os elementos conforme sua finalidade.

A literatura relata (PERUZZI, 2002; FIB, 1998), que é fundamental o controle do fator água / cimento em concretos que utilizem fibras sintéticas como adição. Além disso, o uso de superplastificantes também é recomendado para permitir a fluidez necessária ao concreto e possibilitar melhor dispersão dessas fibras na massa.

Ortenzi (2007) e grande parte dos fabricantes recomendam que uma quantidade usual de fibras picadas adicionadas ao concreto se situa em torno de  $0,6 \text{ kg} / \text{m}^3$ .

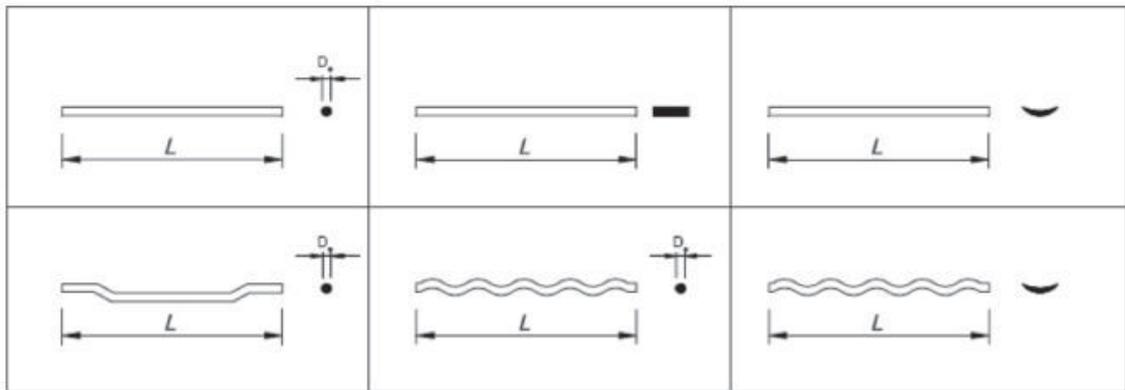
### 2.3 Fibras de aço

As primeiras experiências com a utilização de fibras de aço são datadas do início dos anos setenta com incorporação de fibras metálicas lisas na matriz de concreto.

Inicialmente, as fibras de aço utilizadas apresentavam resistências entre 500 e 900 MPa e geometrias cilíndricas. Sabia-se que seções com maior área de contato entre a fibra e matriz aumentariam o desempenho do compósito, mas, num primeiro momento, por limitações técnicas, não era possível produzir fibras com outras seções transversais. Só mais tarde, com o desenvolvimento de novas tecnologias é que houve a possibilidade de criação de novas geometrias para as fibras de aço (NAAMAN, 1998).

Como o tempo e com o desenvolvimento dos estudos, essas fibras passaram a ser produzidas com diferenças de formas, dimensões e tipos de aços.

**Figura 2.6 - Exemplos de tipos de formas de fibras de aço**



Fonte: Figueiredo, 2000

A fibra de aço pode ser caracterizada pelo seu comprimento ( $L$ ), pela sua forma e pelo seu diâmetro ou diâmetro equivalente ( $D_e$ ). Da relação entre o comprimento ( $L$ ) e o diâmetro equivalente ( $D_e$ ), obtemos o fator de forma que quanto maior é esse fator, maior é quantidade de fibras presentes no elemento, aumentando assim seu desempenho.

Comercialmente as fibras podem ser encontradas em diversos comprimentos que podem variar de 25mm (fibras curtas) a 60mm (fibras longas) e com diâmetros entre 0,55mm a 1,00mm.

A utilização de fibras longas garante ancoragem suficiente para a transferência de tensões da matriz à fibra, analogamente ao que acontece com as armaduras no concreto armado. As limitações de execução existentes no momento da mistura do concreto, porém, exigem fibras relativamente curtas (PASA, 2007).

Alguns tipos de fibras de aço apresentam em suas extremidades ganchos para facilitar a ancoragem. Podem ser fornecidas soltas ou coladas em pentes, sendo que as coladas facilitam o processo de mistura e homogeneização do material, uma vez que elas são unidas por cola solúvel em água e sua dispersão ocorre durante a mistura da massa, facilitando sua inserção e evitando o agrupamento de fibras na massa.

**Figura 2.7 - Fibra com ancoragem**



Fonte: Figueiredo, 2000

Segundo Figueiredo (2000), as fibras de aço podem ser consideradas como fibras destinadas ao reforço primário do concreto, isto é, não atua somente na redução da fissuração e

no aumento da resistência ao impacto do material, mas também proporciona um ganho de desempenho quanto ao reforço mecânico.

Quanto mais fibras presentes na seção transversal do elemento estrutural, melhor será a distribuição de tensões entre as fibras e maior será a tenacidade proporcionada ao concreto, porém, pode deixar de ser interessante economicamente.

Para Aitcin (2000), o aumento da tenacidade em concreto de alto desempenho pode ser adquirido de duas maneiras: mantendo o mesmo fator de forma e geometria das fibras, aumentando a tensão de ruptura do aço, ou desenvolvendo fibras mais curtas, com menor diâmetro para reduzir a tensão de aderência a nível inferior à tensão de ruptura do aço. O referido autor ainda complementa que a segunda opção é mais promissora, propiciando mais fibras por unidade de volume. O que temos é a dificuldade de encontrar fibras pequenas no mercado.

Figueiredo (2000), recomenda que o teor de argamassa do concreto deve ser de no mínimo 50%, a relação água/cimento ( $a/c$ ) deva ser no máximo de 0,55 e a relação água materiais secos ( $H$ ), de no máximo 11,5%.

As propriedades incorporadas ao concreto com a adição de fibras de aço, como a tenacidade e a resistência residual, podem ser medidas a partir de ensaios de tração na flexão de corpos de prova prismáticos, preferencialmente realizados em três pontos (ARQUEZ, 2010).

As fibras de aço são feitas de aço carbono ou aço inoxidável, com sua resistência à ruptura variando entre 500 e 2600 MPa, e o seu módulo de elasticidade em torno de 210 GPa. Em geral, têm um comprimento máximo de 60mm, embora existam fibras com comprimento maior, porém com emprego não muito comum, assim como sua oferta. A seção transversal das fibras pode ser circular, poligonal, chata ou disforme. Para aquelas fibras que não tenham uma seção transversal circular é comum para determinar o diâmetro das fibras equivalente que corresponde ao diâmetro de um círculo com a mesma área em corte transversal.

Segundo Zollo (1997), fibras com pequeno diâmetro equivalente apresentam baixa rigidez à flexão, mas uma certa habilidade para ocupar os espaços na pasta de cimento, enquanto fibras com grande diâmetro equivalente apresentam grande rigidez à flexão, contudo influenciam na consolidação dos agregados durante os processos de mistura e adensamento.

As fibras também podem ser produzidas a partir de fios trefilados progressivamente até se chegar ao diâmetro desejado. Com isto, acabam por apresentar uma maior resistência mecânica (dado o seu encruamento), a qual pode ser ainda maior quando da utilização de aços com maior teor de carbono (FIGUEIREDO, 2000).

Os estudos também definem uma quantidade ideal de fibras para utilização no concreto, segundo o ACI 544.3R-93 (1993), o teor usual de emprego de fibras de aço em concreto varia entre 0,25% em relação ao volume, equivalente a 20 kg/m<sup>3</sup> em massa, e 2% em volume, equivalente a 157 kg/m<sup>3</sup>.

Ao dosar um concreto com fibras de aço, deve estar clara a finalidade de sua utilização, designando-as como reforço ou não. Para isso, existe uma definição conceitual de volume crítico de fibras, que para Figueiredo (2010), no caso das fibras de aço, o volume crítico gira em torno de 1% do volume de concreto, isso agregando fatores técnicos e econômicos.

### 2.3.1 Durabilidade

Embora recorrentes, as dúvidas sobre durabilidade dos compósitos reforçados com fibras de aço muitas vezes não são necessárias. Primeiro porque as fibras mais internas na peça estrutural estão protegidas pela pasta de cimento da mesma maneira como as barras convencionais de aço. Segundo que as mais externas, por apresentarem dimensões pequenas, não proporcionam diferença potencial (originadas por umidade e tensões no aço ou concreto, por exemplo) suficiente para produzir corrosão. Entretanto, mesmo que ocorra, não será suficiente para destacar o concreto adjacente. Contra essa vertente, tem-se ainda, o benefício das fibras impedirem a abertura das fissuras, protegendo o concreto e as barras convencionais de agentes externos, consequentemente aumentando a durabilidade da estrutura (ARQUEZ, 2010).

## 2.4 Hibridização de fibras

De acordo com Callister (2007), compósitos híbridos são formados pela utilização de mais de um tipo de fibra de reforço e/ou mais de um tipo de matriz, ou seja, os materiais compósitos híbridos apresentam na sua estrutura, combinações de vários tipos de reforços, mesclando fibras e partículas no mesmo material ou ainda combinando mais de um tipo de fibra ou de partícula no mesmo material. Quando existem dois tipos de reforço na mesma matriz, partícula e fibra, este tipo de compósito passa ser classificado como composto híbrido (MATTHEWS e RAWLINGS, 1994; ZHENG, NING e ZHENG, 2005; CAO e CAMERON, 2006a; TSAI e CHENG, 2009).

A adição de partículas de elevada rigidez no polímero, permite que o mesmo tenha um ganho de propriedades como, melhoria da resistência mecânica (durabilidade, resistência à fadiga), aumento do módulo de elasticidade/rigidez do compósito, da resistência mecânica (tração, flexão ou compressão) e algumas vezes aumento da tenacidade/resistência ao impacto do compósito (ZATTERA, 2004; FU et al., 2008; PETHRICK, MILLER e RHONEY, 2009).

O propósito básico de usar fibra híbrida é tentar obter controle da abertura de fissuras em diferentes zonas do concreto (pasta de cimento ou zona de transição entre a pasta e o agregado), em diferentes idades e a diferentes níveis de carga (QIAN; STROEVEN, 2000 apud HAMEED et al, 2010). Várias combinações de diferentes tipos de fibras, em vários tamanhos, formas e propriedades mecânicas, fornecem comportamentos mecânicos diferentes (ROSSI et al, 1987). Dois ou mais diferentes tipos de fibras podem ser adequadamente combinados para produzir o compósito e incrementar as propriedades físicas e mecânicas do compósito a partir da ação de cada uma das fibras, como uma possível resposta sinérgica (DI PRISCO; PLIZZARI; VANDEWALLE, 2009).

As fibras podem ser classificadas pelo valor de seu módulo de elasticidade comparativamente ao módulo de elasticidade do concreto. As fibras poliméricas possuem módulo de elasticidade inferior ao do concreto endurecido e são classificadas como fibras de baixo módulo. Já as fibras de aço, que possuem módulo de elasticidade superior ao concreto, são chamadas de fibras de alto módulo (FIGUEIREDO, 2011). O propósito de usar simultaneamente as fibras de aço e as fibras sintéticas é obter melhor desempenho do concreto, aumento da energia de fratura e incremento da tenacidade na região pós-pico (BANTHIA; SAPPAKITTIPAKORN, 2007).

A combinação de fibras metálicas e não metálicas pode oferecer vantagens potenciais para melhorar as propriedades do concreto, bem como há bom tempo é conhecido o potencial de redução de custo total da produção do concreto (BENTUR; MINDESS, 1990). Nesse sentido, alguns estudos já foram realizados com o objetivo de avaliar a utilização simultânea de diferentes tipos de fibras, como é o caso do estudo das propriedades mecânicas do concreto auto adensável de alto desempenho com reforço híbrido de microfibras poliméricas e macrofibras de aço, após exposição a altas temperaturas proposto por DING et al (2011). No entanto, o concreto reforçado com fibras continua a ser uma nova tecnologia e ideias ainda estão a evoluir para avaliar as características de um sistema de fibra ideal. Uma possibilidade que ultimamente esta concentrando muito a atenção é a hibridização das fibras. Em um sistema híbrido, dois ou mais tipos de fibras são racionalmente combinados para produzir um compósito buscando benefícios oriundos de cada uma das fibras individuais, resultando em uma resposta sinérgica (BANTHIA; NANDAKUMAR, 2001).

## 2.5 RILEM

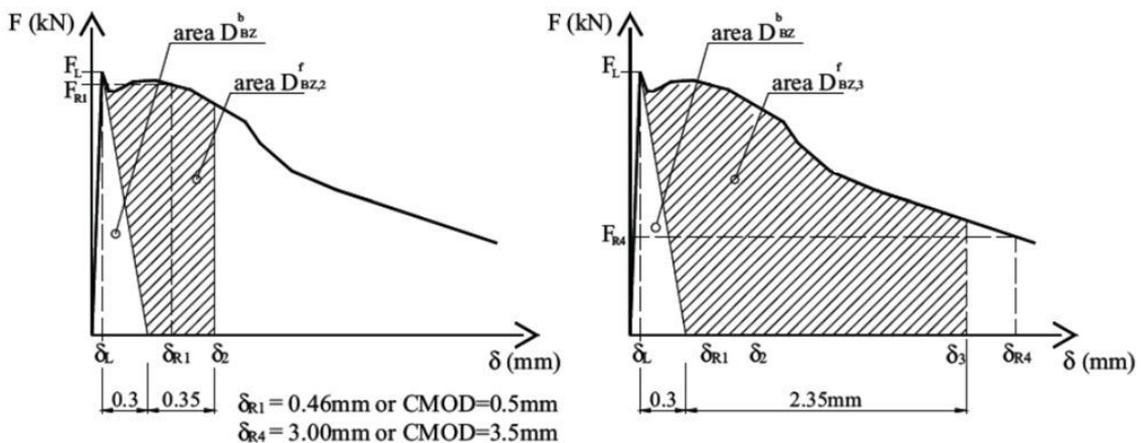
Os ensaios de flexão para os compósitos propostos foram feitos segundo as recomendações do grupo de trabalho TC 162-TDF da RILEM., grupo este de destaque na normalização de ensaios de materiais com fibras, e também no estudo e estabelecimento de parâmetros para análise e dimensionamento de estruturas de concreto reforçado com fibras de aço.

O método da RILEM TC 162-TDF (2002b) analisa o comportamento do compósito através do ensaio à flexão em três pontos em viga não armada entalhada transversalmente.

Essa avaliação de tenacidade que normaliza a RILEM, é estruturada na capacidade de absorção de energia, entendida como a área sob a curva P- $\delta$ , onde o P é a força aplicada no corpo de prova e o  $\delta$  é o seu deslocamento vertical. Podemos então avaliar a contribuição das fibras para o compósito subtraindo da parcelada de tenacidade oriunda da matriz cimentícia.

Os gráficos obtidos nos ensaios com os compósitos são semelhantes aos apresentados na Figura 2.8.

**Figura 2.8 – Parâmetros de tenacidade flexional conforme RILEM (2002)**



Fonte: Ferrari (2007)

Do gráfico temos o  $F_L$  que é o maior valor de carga entre o intervalo 0 e 0,05mm do eixo x (deslocamento vertical ou CMOD) onde temos o limite de proporcionalidade, de onde é possível calcular  $f_{fct,L}$  que é a resistência à tração na flexão ou tensão no limite de proporcionalidade, conforme a Equação 2.1.

$$f_{fct,L} = \frac{3 \cdot F_L \cdot L}{2 \cdot b \cdot h_{sp}^2} \quad (2.1)$$

onde:

$f_{ct,L}$  = resistência à tração na flexão ou tensão no limite de proporcionalidade (N/mm<sup>2</sup>);

$F_L$  = carga máxima dentro do intervalo 0 e 0,05 mm do deslocamento vertical ou abertura da fissura (N);

$L$  = comprimento do corpo de prova (mm);

$b$  = largura do corpo de prova (mm);

$h_{sp}$  = distância entre a ponta do entalhe e a face superior do corpo de prova (mm).

A capacidade de absorção de energia do compósito ( $D_{BZ,2}$  e  $D_{BZ,3}$ ) é dividida em uma parte referente a matriz cimentícia ( $D^b_{BZ}$ ) e em outra referente as fibras ( $D^f_{BZ,2}$  e  $D^f_{BZ,3}$ ), sendo esta calculada pela área abaixo da curva *força x deslocamento* entre os pontos  $\delta_2$  e  $\delta_3$  menos a área da referente a matriz cimentícia.

A diferenciação da influência da matriz cimentícia da influência das fibras, pode ser vista na Figura 2.8, onde uma reta de  $F_L$  perpendicular ao eixo x ( $\delta_L$ ) que somado a 0,3 mm, define a área de influência da matriz. Com isso podemos definir também  $\delta_2$  e  $\delta_3$ , onde  $\delta_2 = \delta_L + 0,65 \text{ mm}$  e  $\delta_3 = \delta_L + 2,65 \text{ mm}$ .

A norma considera ainda uma distribuição linear de tensões na seção de fratura e ainda despreza uma parcela de energia absorvida pela matriz, com as tensões equivalentes de tração na flexão conforme as Equações 2.2 e 2.3.

$$f_{eq,2} = \frac{3 \cdot D^f_{BZ,2} \cdot L}{2,0,50 \cdot b \cdot h_{sp}^2} \quad (2.2)$$

$$f_{eq,3} = \frac{3 \cdot D^f_{BZ,3} \cdot L}{2,0,50 \cdot b \cdot h_{sp}^2} \quad (2.3)$$

onde:

$f_{eq,i}$  = tensão equivalente à tração na flexão ou tensão no limite de proporcionalidade nos pontos 2 e 3 (N/mm<sup>2</sup>);

$D^f_{BZ,2}$  = área abaixo da curva *força x deslocamento* até o ponto  $\delta_2 = \delta_L + 0,65$  (mm), desprezando a parcela referente à  $D^b_{BZ}$ ,

$D_{BZ,3}^f$  = área abaixo da curva *força x deslocamento* até o ponto  $\delta_3 = \delta_L + 2,65$  (mm), desprezando a parcela referente à  $D_{BZ}^b$ ;

$L$  = comprimento do corpo de prova (mm);

$b$  = largura do corpo de prova (mm);

$h_{sp}$  = distância entre a ponta do entalhe e a face superior do corpo de prova (mm).

E as tensões residuais calculadas conforme a Equação 2.4:

$$f_{R,i} = \frac{3 \cdot F_{R,i} \cdot L}{2 \cdot b \cdot h_{sp}^2} \quad (2.4)$$

Sendo:

CMOD1 = 0,5 mm -  $\delta_{R,1} = 0,46$  mm

CMOD2 = 1,5 mm -  $\delta_{R,2} = 1,31$  mm

CMOD3 = 2,5 mm -  $\delta_{R,3} = 2,15$  mm

CMOD4 = 3,5 mm -  $\delta_{R,4} = 3,00$  mm

onde:

$f_{ri}$  = tensão de flexão residual no ponto  $i$  (N/mm<sup>2</sup>);

$F_{Ri}$  = carga registrada no ponto de  $CMOD_i$  ou  $\delta_{R,i}$  (N);

$L$  = comprimento do corpo de prova (mm);

$b$  = largura do corpo de prova (mm);

$h_{sp}$  = distância entre a ponta da fissura e a face superior do corpo de prova (mm).

A capacidade de carga do material em relação a um valor pré-definido de deslocamento vertical é avaliada através das resistências flexionais residuais  $f_{R,1}$  e  $f_{R,4}$ . Assim a Tabela 4.2 apresenta os valores de forças e resistências, conforme recomendações da RILEM. O FM apresentado é a força máxima obtida pelo compósito no ensaio e o  $F_L$  é a força máxima de *offset*, isto é, a força de primeira fissura.

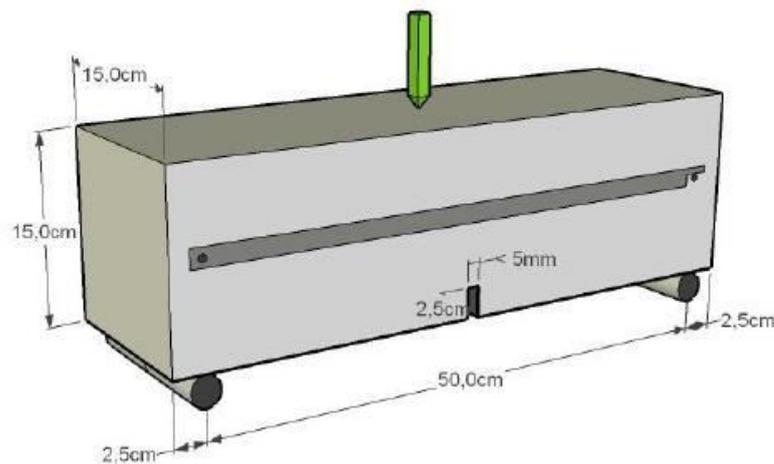
### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Configuração do ensaio e instrumentação

Para avaliar o comportamento dos compósitos foram realizados ensaios à flexão em três pontos em corpos-de-prova prismáticos conforme as recomendações da RILEM TC 162-TDF (2002a).

Estes ensaios em corpos-de-prova são dotados de entalhe central reto passante, com profundidade de 25 mm e largura de 5 mm, executado com disco de corte diamantado na face lateral, conforme pode ser visualizado na Figura 3.1.

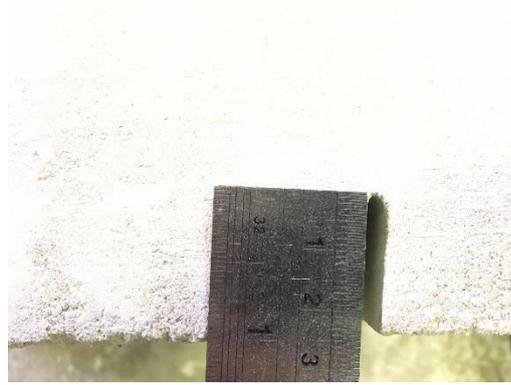
**Figura 3.1 - Corpo de prova dotado de entalhe central reto passante**



Fonte: Arquez (2010)

O entalhe pretende induzir a fratura em plano preferencial e elevar os níveis de sollicitação em todo o material junto a ponta do entalhe. Com isso, durante a sollicitação, a deformação é sempre localizada no plano que contém o entalhe e a dissipação de energia volumétrica é reduzida. O corpo de prova já entalhado pode ser observado na Figura 3.2 abaixo:

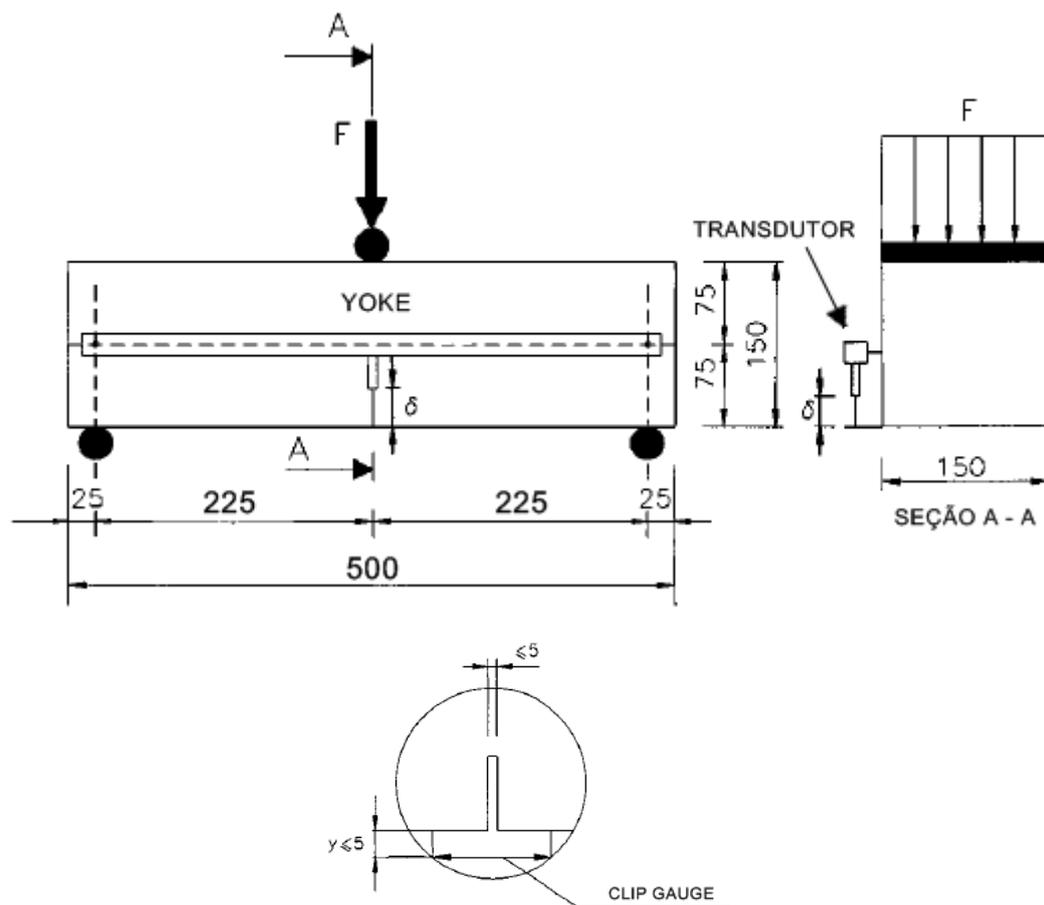
**Figura 3.2 - Entalhe na viga**



Fonte: Autor

Na figura 3.3 observamos o aspecto geral do corpo de prova com os dispositivos utilizados para a medição, apoios, suportes e ponto de carga. Na obtenção do deslocamento vertical foi utilizado um transdutor de deslocamentos fixado num suporte denominado por “Yoke”. Nas figuras 3.4 e 3.5 são mostrados o aspecto geral do ensaio.

**Figura 3.3 - Configuração do Ensaio**



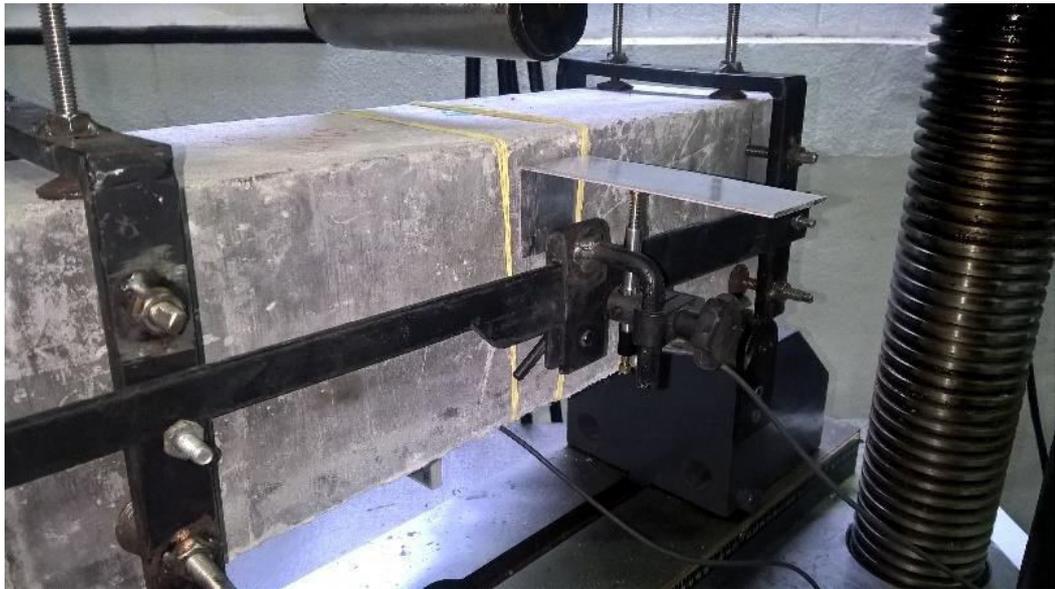
Fonte: Adaptado de RILEM TC-162 TDF, 2002

**Figura 3.4 – Suportes e clip gauge**



Fonte: Autor

**Figura 3.5 - Corpo de prova posicionado para a realização do ensaio de flexão**



Fonte: Autor

Os estudos foram desenvolvidos no Laboratório de Concreto da Itaipu Binacional em Foz do Iguaçu/PR. Foi utilizado o equipamento servo-controlado TIMEGROUP com o emprego de uma célula de carga com capacidade de 1000 kN, conforme Figura 3.6 abaixo:

**Figura 3.6 - Equipamento servo-controlado e sistema de aquisição de dados**



a) Equipamento servo controlado

b) Sistema de aquisição de dados

Fonte: Autor

Os ensaios foram conduzidos sob o controle de deslocamento do pistão de carga a uma taxa de 0,3 mm/min, com a medição da abertura do entalhe através do *clip gauge*, vide Figura 3.7.

**Figura 3.7 - Clip gauge**



Fonte: Autor

No Quadro 3.1 apresenta-se uma descrição geral dos equipamentos e dos instrumentos de medição utilizados nos ensaios.

**Quadro 3.1 - Características técnicas dos equipamentos**

<b>Equipamentos e Instrumentos</b>	<b>Marca / Modelo</b>	<b>Características</b>	<b>Finalidade</b>
Maquina universal de ensaios servo-controlada	TIMEGROUP / c/ célula de carga	Capacidade nominal de 1000 kN	Aplicação do carregamento nos corpos de prova
Sistema de aquisição de dados de extensômetro	HBM / MX 840A	Taxa de leitura 20 Hz	Aquisição automática de dados
<i>Clip Gauge</i>	HBM / DD1	Curso $\pm 2,5$ mm – resolução 0,01 mm	Medir o CMOD dos compósitos produzidos
Transdutor de deslocamento Axial	HBM / WI10	Curso 10 mm – resolução 0,01 mm	Medição dos deslocamentos
Suporte “YOKE”	Aço 1020, espessura 5 mm	Formato de régua de seção retangular	Suporte para fixação do transdutor de deslocamento

Fonte: Autor

### 3.2 Programa de ensaios

Foram moldados 27 corpos-de-prova prismáticos com dimensões de 150 mm x 150 mm x 500 mm, sendo divididos em grupos formados por 3 prismas moldados com as mesmas características, totalizando-se 9 compósitos diferentes. Para facilitar o entendimento, o Quadro 3.2, é utilizado para a nomenclatura dos compósitos estudados e de suas variações de fibras. Na Tabela 3.1 são indicados todos os compósitos estudados.

**Quadro 3.2 - Nomenclatura dos compósitos**

CPXAYV
CP → Corpo de prova
X → Volume de fibras de aço
A → Fibras de aço
Y → Volume de fibras de vidro
V → Fibras de vidro

Fonte: Autor

**Tabela 3.1 - Compósitos estudados**

Grupos	Compósito	Taxa de Fibras	Tipo de Fibras
1	CP0	0,00%	-
2	CP0.5V	0,50%	Vidro AR
3	CP0.75V	0,75%	Vidro AR
4	CP1V	1,00%	Vidro AR
5	CP1A	1,00%	Aço
6	CP1A0.25V	1,00% + 0,25%	Aço + Vidro AR
7	CP1A0.5V	1,00% + 0,50%	Aço + Vidro AR
8	CP1A0.75V	1,00% + 0,75%	Aço + Vidro AR
9	CP1A1V	1,00% + 1,00%	Aço + Vidro AR

Fonte: Autor

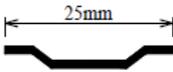
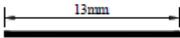
Neste estudo, o percentual de fibras de aço foi fixado a 1%, mesmo valor trabalhado por Ferrari (2007) em sua pesquisa e recomendado por Figueiredo (2000). Tal opção é justificada em função que a utilização da fibra de aço como reforço já é reconhecida por inúmeros estudos e trabalhos, diferentemente das fibras de vidro, que possuem uma utilização mais restrita nesta área, sendo necessário mais estudos para conhecer a capacidade e o comportamento estrutural da fibra, daí a opção pelos ensaios com compósitos contendo somente fibras de vidro.

As variações para as taxas de fibras de vidro foram baseadas nas recomendações dos fabricantes, assim como no trabalho de Bonifácio & Godinho (2014).

Valores superiores aos informados nas taxas de fibras, foram descartados em função da diminuição da trabalhabilidade do concreto, como apresentado nos compósitos CP1A0.75V e CP1A1V.

Na Tabela 3.2 encontram-se descritas as características das fibras utilizadas. A fibra de aço utilizada foi a *FS8-Wirand*, fornecida pela empresa *Maccaferri – América Latina*, com comprimento de 25 mm, gancho nas extremidades e um diâmetro de 0,75 mm, o que resulta num fator de forma igual a 33. A outra fibra utilizada foi a de vidro do tipo AR (álcali resistente), adquirida pelo autor junto a empresa *Prifix Industria e Comercio de Produtos Químicos* e com especificações informadas na Tabela 3.2.

**Tabela 3.2 - Tipos de Fibras**

Parâmetros	Fibra de Aço	Fibra de Vidro
Formato		
Diâmetro Nominal	0,75mm	0,013mm
Tensão máxima de tração	1100MPa	1698Mpa
Peso Específico	7850 Kg/m <sup>3</sup>	2700 Kg/m <sup>3</sup>
Módulo de Young	210 kN/mm <sup>2</sup>	84 kN/mm <sup>2</sup>
Alongamento Ruptura	3 a 4%	2 a 3%

Fonte: Autor

### 3.3 Preparação dos compósitos

Para produção dos compósitos, os materiais constituintes foram empregados uniformemente para todas as amostras, de forma que as alterações entre eles ocorreram somente no que tange o percentual e os tipos de fibras utilizados.

#### 3.3.1 Cimento CP-V ARI

Cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI), que apresenta resistência inicial acima de 27 MPa, superando valores mínimos normatizados pela NBR 5733 para cimentos Portland de alta resistência inicial, tem a peculiaridade de atingir altas resistências já nos primeiros dias, O CP V-ARI é produzido com um clínquer de dosagem diferenciada de calcário e argila se comparado aos demais tipos de cimento e com moagem mais fina. Esta diferença de produção confere a este tipo de cimento uma alta resistência inicial do concreto em suas primeiras idades, podendo atingir 26MPa de resistência à compressão em apenas 1 dia

de idade. É largamente utilizado em produção industrial de artefatos, onde se exige desforma rápida, concreto protendido pré e pós-tensionado, pisos industriais e argamassa armada.

Para esta pesquisa foi o utilizado o cimento da marca Cauê adquirido pelo autor em loja especializada, sendo suas principais características destacadas no Quadro 3.3:

**Quadro 3.3 - Características do cimento**

Idades	Resistência a compressão (MPa)				Início de pega (min)	Fim de pega (min)
	24h	3d	7d	28d		
NBR 5737/5733	≥11	≥24	≥34	-	≥60	≤600
CPV ARI CAUÊ	≥20	≥33	≥40	≥48	175	265

Fonte: Cimentos Cauê

### 3.3.2 Areia

A areia natural foi retirada do Rio Paraná pelo processo de dragagem pela empresa, pode-se classificar a areia utilizada, segundo a NBR 7211 (2005), como média, de acordo com o ensaio granulométrico realizado. A Figura 3.8 mostra uma parcela da areia a ser utilizada na pesquisa, sendo esta passada pelo processo secagem e peneiramento para se obter-se o módulo de finura e sua curva granulométrica que são mostrados no Quadro 3.5.

**Figura 3.8 - Areia média do rio Paraná**



Fonte: Autor

O quadro 3.4, mostra a massa específica do agregado, conforme ensaio descrito na NBR NM 52 (2009) e realizado em laboratório para caracterização da mesma.

**Quadro 3.4 - Determinação da massa específica da areia**

ENSAIO N.º	FRASCO N.º	MASSA DE AREIA SECA (M <sub>1</sub> ) (g)	MASSA DO CONJUNTO		MASSA ESPECÍFICA APARENTE DO AGREGADO SECO (kg/dm <sup>3</sup> )
			FRASCO + ÁGUA (M <sub>2</sub> ) (g)	FRASCO + AREIA + ÁGUA (M <sub>3</sub> ) (g)	
1	7	504,13	915,14	1229,69	2,659
2	7	500,00	915,14	1224,47	2,622
3	7	500,71	915,14	1228,50	2,673
VALORES MÉDIOS					2,651

OBSERVAÇÕES:

1) MASSA ESPECÍFICA DO AGREGADO SECO: 2,651 kg/dm<sup>3</sup>  $\gamma_s = \frac{M_1}{M_2 - (M_3 - M_1)} * \gamma_{\text{água}}$

Fonte: Autor

No Quadro 3.5, são apresentados os resultados do ensaio granulométrico realizado para caracterização da areia bem como a sua curva granulométrica a partir da NBR NM 248 (2003).

**Quadro 3.5 - Ensaio granulométrico para caracterização da areia**

PENEIRAS (mm)	ENSAIO 1			ENSAIO 2			PORCENTAGEM MÉDIA DO MATERIAL RETIDO E ACUMULADO (%)
	MASSA DE MATERIAL RETIDO (g)	PORCENTAGEM DE MATERIAL		MASSA DE MATERIAL RETIDO (g)	PORCENTAGEM DE MATERIAL		
		RETIDO (%)	RETIDO E ACUMULADO (%)		RETIDO (%)	RETIDO E ACUMULADO (%)	
6,3							
4,8	0,00	0,0	0,0	0,00	0,0	0,0	0
2,4	2,96	0,6	0,6	2,93	0,6	0,6	1
1,2	5,25	1,1	1,6	5,22	1,0	1,6	2
0,6	35,73	7,2	8,8	35,78	7,2	8,8	9
0,3	325,92	65,3	74,1	325,95	65,2	74,0	74
0,15	120,17	24,1	98,2	120,12	24,0	98,0	98
FUNDOS	9,07	1,8	100,0	10,00	2,0	100,0	100
TOTAL (g)	499,10			500,00	Modulo de Finura = 1,840		
MASSA INICIAL DA AMOSTRA = 499,34 / 500,00				Diâmetro Máximo Característico = 1,2			

Fonte: Autor

### 3.3.3 Brita

Foi utilizada a brita nº 0 com diâmetro máximo de 12,5 mm e módulo de finura de 5,74, sendo a brita ideal para produção de vigas, lajes pré-moldadas, tubos, blocos de concreto para construção e fundação, paralelepípedos de concretos moldados, conforme Figura 3.9.

**Figura 3.9 - Brita 0**



Fonte: Autor

### 3.3.4 Aditivo

A NBR 11768 (2011) define os aditivos redutores de água ou superplastificantes como sendo, aditivo que, sem modificar a consistência do concreto no estado fresco, permite uma elevadíssima redução no conteúdo de água de um concreto; ou que, sem alterar a quantidade de água, aumenta consideravelmente o abatimento e a fluidez do concreto; ou, ainda, aditivo que produz esses dois efeitos simultaneamente. Nesta classificação o aditivo não apresenta função secundária sobre a pega.

Nesta pesquisa foi utilizado o aditivo hiperplastificante Adiment Premium da marca Vedacit (Figura 3.10) de maneira a contribuir para a trabalhabilidade da mistura, aumentando sua fluidez, e facilitando sua aplicação em regiões congestionadas por armaduras e de dimensões reduzidas.

Sua utilização ocorre após uma pré-mistura do cimento e demais agregados com cerca de 70% do volume de água a ser utilizado.

**Figura 3.10 - Adiment Premium**



Fonte: Autor

### 3.3.5 Fibras de aço

As fibras de aço utilizadas na pesquisa foram as fibras Wirand FS8 de doação da empresa Maccaferri América Latina, onde buscou-se respeitar os critérios como o comprimento igual ou superior ao dobro do diâmetro do agregado e inferior a 1/3 da menor dimensão do elemento estrutural, neste caso foi utilizado as fibras de 25 mm. O formato da fibra pode ser observado na Figura 3.11.

**Figura 3.11 - Fibras Wirand FS8**



Fonte: Autor

### 3.3.6 Fibra de vidro

As fibras de vidro utilizadas foram do tipo AR (álcali resistente), adquirida pelo autor junto a empresa *Prifix Industria e Comercio de Produtos Químicos* com tamanho de 13 mm e com seu formato apresentado na Figura 3.12.

**Figura 3.12 - Fibras de vidro AR**



Fonte: Autor

### 3.3.7 Constituição e dosagens dos compósitos

Observação dos tamanhos dos agregados graúdos empregados, conforme a recomendação de Teutsch (1997), quanto à compatibilidade dimensional do tamanho máximo da partícula de agregado graúdo que não deve ser muito maior do que  $1/3$  do comprimento das fibras.

Na realização da mistura empregou-se uma betoneira elétrica com capacidade de 200 litros. Os procedimentos usados na mistura foram:

- a) Mistura da areia, brita e cimento por cerca de 1 minuto;
- b) Adição de 70% da água;
- c) Adição aleatória das fibras;
- d) Adição do restante da água;
- e) Adição do aditivo à mistura.

O tempo de mistura foi de aproximadamente 5 minutos, sendo em seguida lançada em um carrinho de mão e transportada para o local de moldagem. As misturas, apresentaram uma boa trabalhabilidade no geral, principalmente nos compósitos com taxa reduzidas de fibras, sendo que nas misturas com taxas maiores, em função da aparência seca do concreto, a boa trabalhabilidade apareceu somente com o emprego do aditivo. Ainda foi testado a realização da mistura dos agregados com as fibras à seco, porem o procedimento ocasionou empelotamento das fibras, sendo assim descartado.

Nos compósitos com maiores taxas de fibras, se fez necessário a utilização de vibrador para a melhor acomodação da mistura às formas, assim como a expulsão do ar e diminuição dos vazios.

O traço utilizado no estudo, pode ser visualizado na Tabela 3.3, e foi baseado no traço de Ferrari (2007) e Arquez (2010).

**Tabela 3.3 - Composição de materiais para produção dos compósitos**

Material	Compósito	
	Traço em massa	Massa específica
Cimento CP-V ARI PLUS	1	3,15 kg/dm <sup>3</sup>
Areia	2,3	2,65 kg/dm <sup>3</sup>
Brita 0	1,7	2,87 kg/dm <sup>3</sup>
a/c	0,5	-
Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	446	
Teor de fibra	Variável	
Aditivo hiperplastificante Adment Premium	0,9%*	1,09 kg/dm <sup>3</sup>
* o aditivo foi dosado em relação ao peso do cimento		

Fonte: Autor

Abaixo nas Figuras 3.13, podemos visualizar as formas de madeira confeccionadas para a moldagem dos corpos de prova.

**Figura 3.13 – Formas empregadas**

a) adensamento nas formas



b) formas de madeira

Fonte: Autor

Os corpos-de-prova foram submetidos a cura submersa em tanque de água após 24 hs da moldagem e foram retirados 24 hs antes da data de ensaio. A Figura 3.14 mostra os compósitos já prontos para o ensaio.

**Figura 3.14 - Corpos de prova**

Fonte: Autor

## 4 ANÁLISE DE RESULTADOS

### 4.1 Ensaio à compressão em corpos de prova cilíndricos

Para avaliar a resistência à compressão do concreto estudado e utilizado para a formação dos compósitos, foram moldados cinco corpos de prova cilíndricos com 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, de acordo com a ABNT NBR 5738:2015 e ensaios em acordo com a ABNT NBR 8522:2008 com o objetivo de obter sua resistência à compressão e seu módulo de elasticidade.

Como Figueiredo (2000) e Ferrari (2007) demonstraram que a incorporação de fibras a matriz de concreto reduz sua resistência, não foram ensaiados compósitos com fibras, uma vez que o objetivo da pesquisa é o desenvolvimento de um compósito que proporcione ganhos à flexão. A Tabela 4.1 abaixo apresenta o resultado para o ensaio realizado com o compósito CP0.

**Tabela 4.1 - Resultados médios do ensaio a compressão**

<b>Compósito</b>	<b>Fcm (MPa)</b>	<b>Ecs (MPa)</b>
CP0	56,34	34113

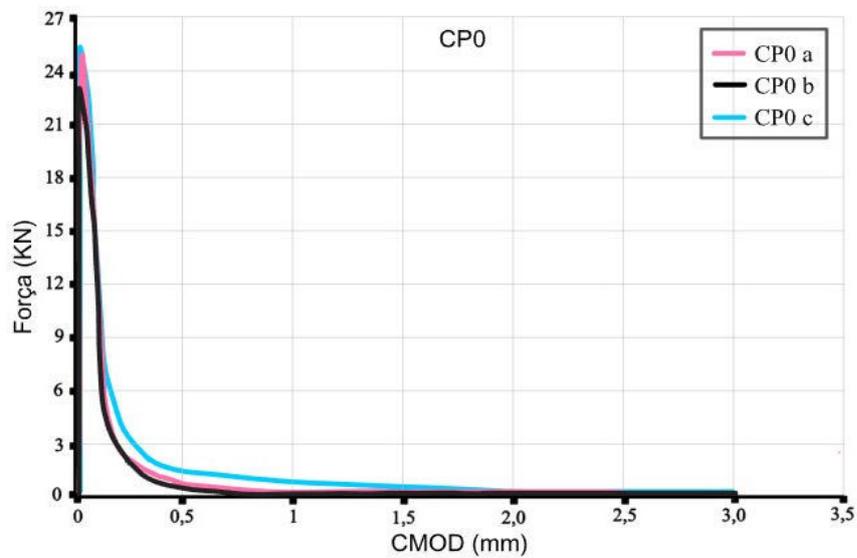
Fonte: Autor

Foram ensaiados dois corpos de prova à compressão axial e três para o módulo de elasticidade.

### 4.2 Resultados

Para efeito de comparação com os compósitos híbridos, o gráfico P-CMOD do compósito sem adição de fibras, pode ser visualizado abaixo na Figura 4.1:

**Figura 4.1 – Curvas P-CMOD do compósito CP0**

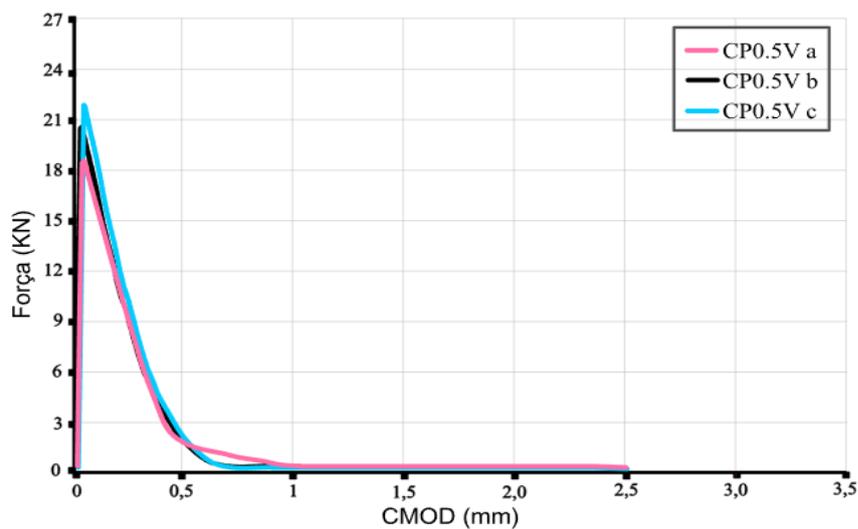


Fonte: Autor

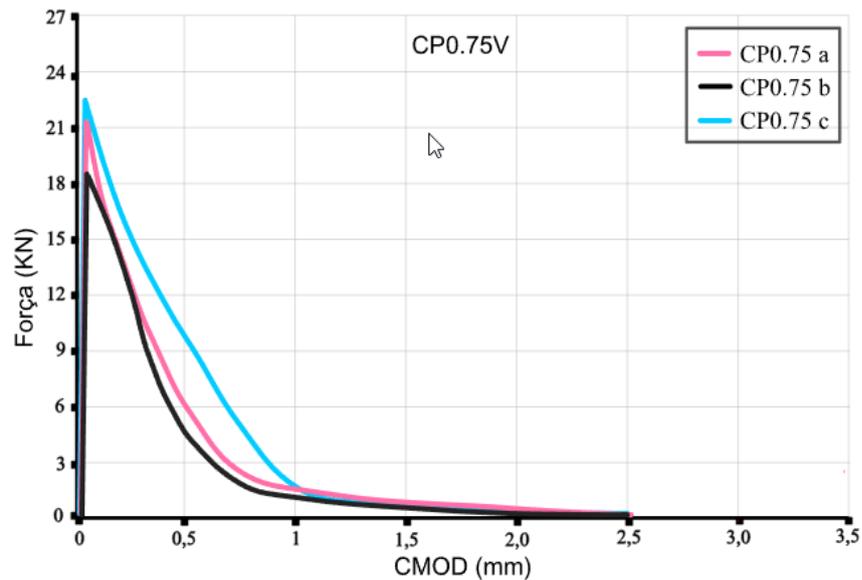
Nela, é possível visualizar sua ruptura frágil, com grande queda de sua capacidade resistente após o fraturamento.

Das Figuras 4.2, temos os compósitos com variações das taxas de microfibras de vidro, com 0,50%, 0,75% e 1,00% respectivamente.

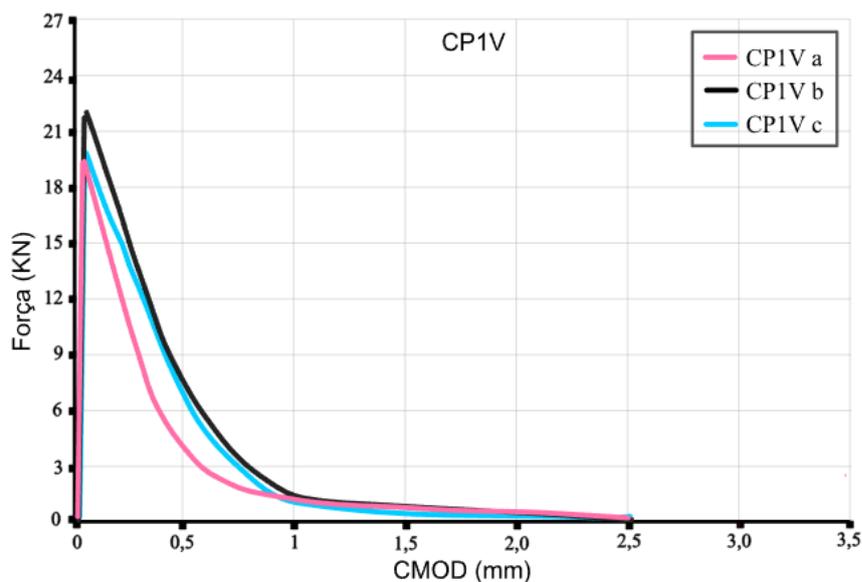
**Figura 4.2 - Curvas P-CMOD dos compósitos com fibras de vidro**  
CP0.5V



a) Compósito CP0.50V



b) Compósito CP0.75V



c) Compósito CP1V

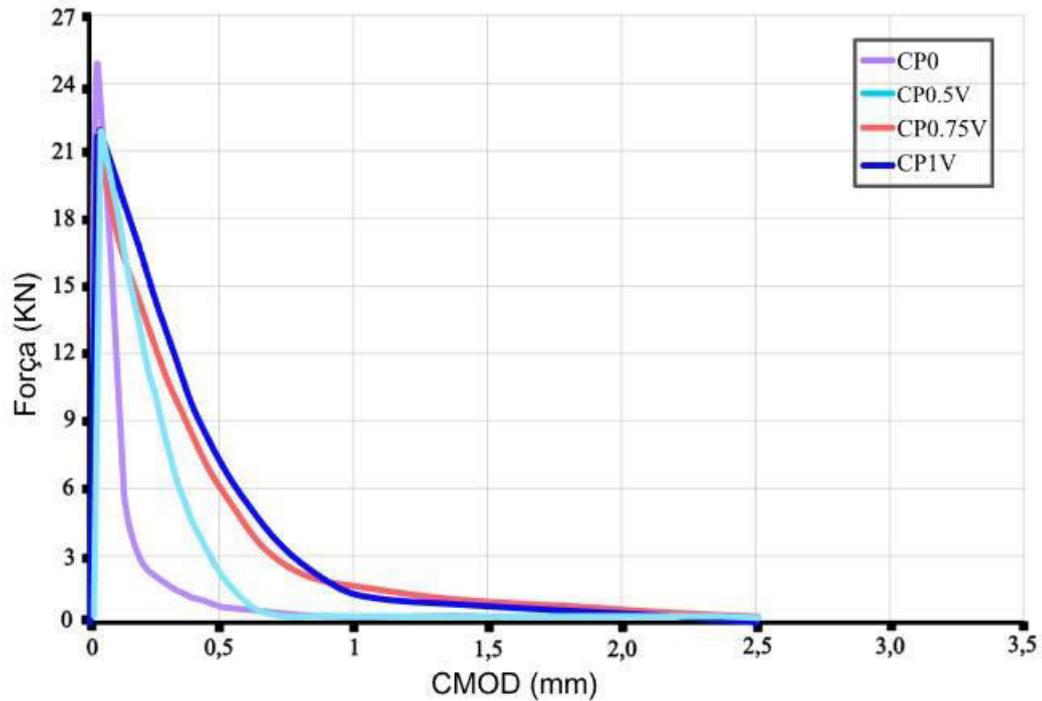
Fonte: Autor

Nos compósitos onde é exclusivo a utilização das microfibras de vidro, pôde-se confirmar o que preconiza a literatura, a influência dessas fibras apenas na fase pré-pico de carregamento atuando na microfissuração da matriz cimentícia. Após o fraturamento da matriz, na fase pós-pico, a fibra de vidro pelo efeito do seu escorregamento, não permitiu ganhos acentuados de tenacidade a esses compósitos.

Das Figuras 4.2, pode-se observar a variação das áreas sob as curvas, com CP0.5V apresentando uma área menor que o CP0.75V e CP1V, o que mostra que com o aumento da

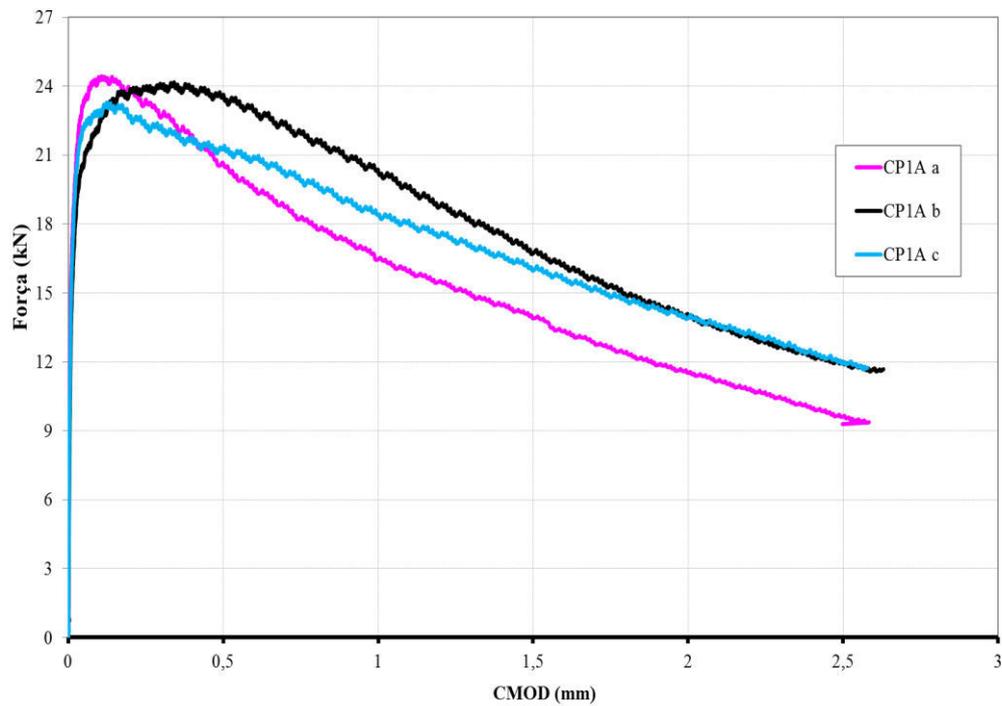
taxa das microfibras de vidro, mesmo que levemente, melhorou a capacidade de deformação de tais compósitos, situação que pode ser evidenciada na Figura 4.3, onde são apresentados os compósitos acima, através da curva mais representativa em um único gráfico.

**Figura 4.3 - Curvas P-CMOD para a comparação entre as taxas de vidro**



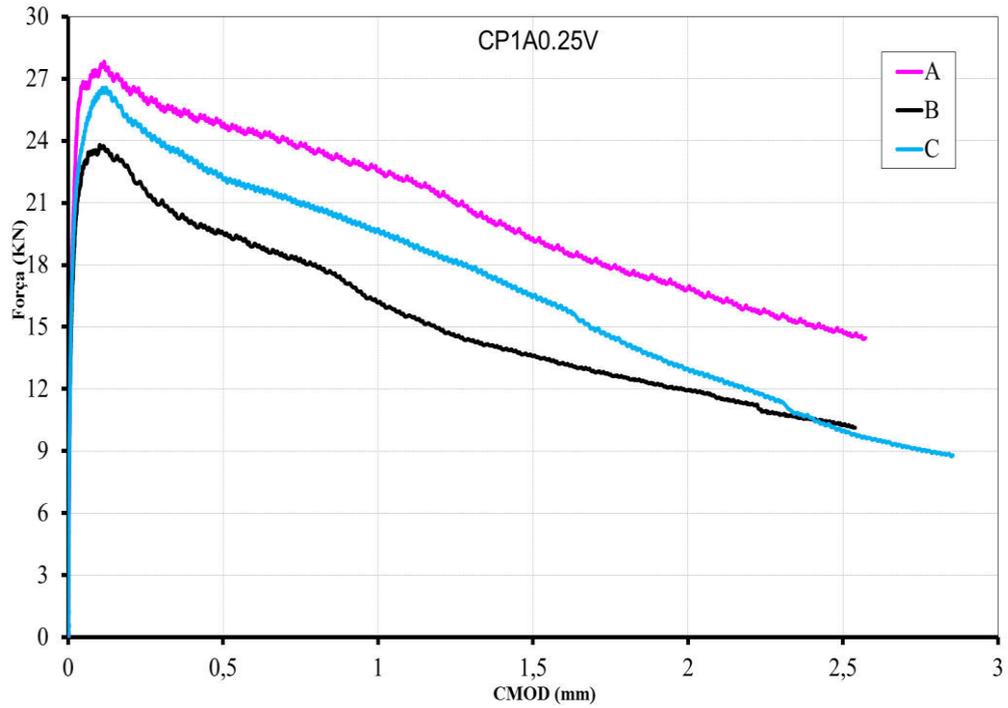
Fonte: Autor

Na Figura 4.4 tem-se as curvas do compósito base CP1A tendo apenas fibras de aço, isto é, sem a presença das microfibras atuando na fase pré-pico para atuar na microfissuração e, com as fibras de aço na fase pós-pico de carregamento.

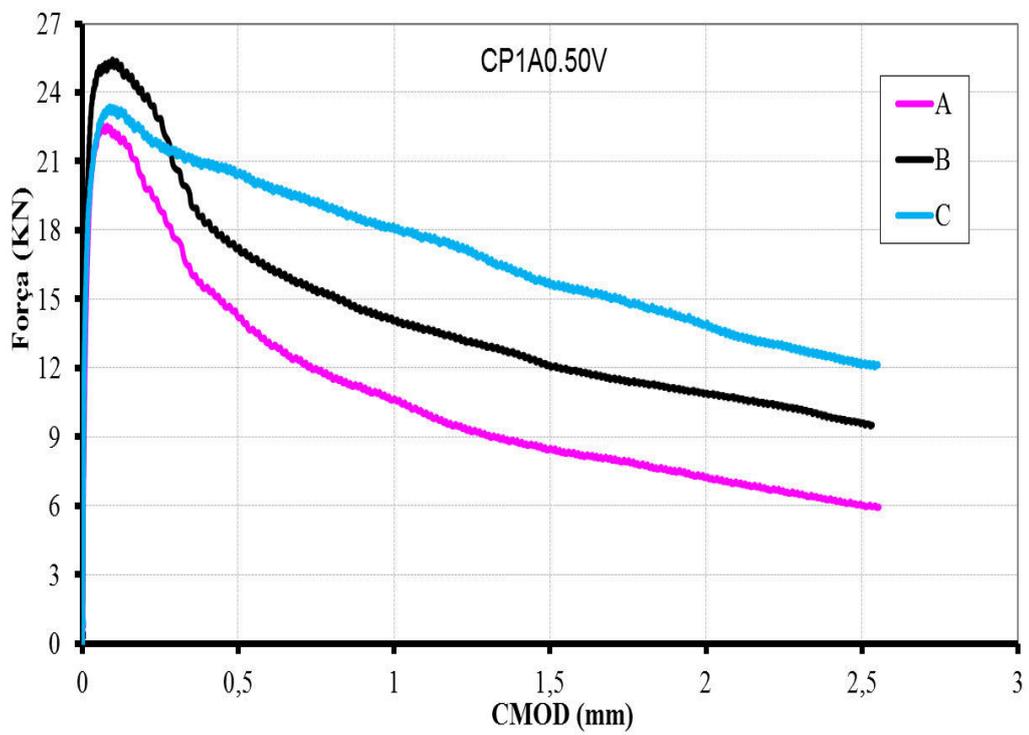
**Figura 4.4 - Curvas P-CMOD dos compósitos com fibras de aço**

Fonte: Autor

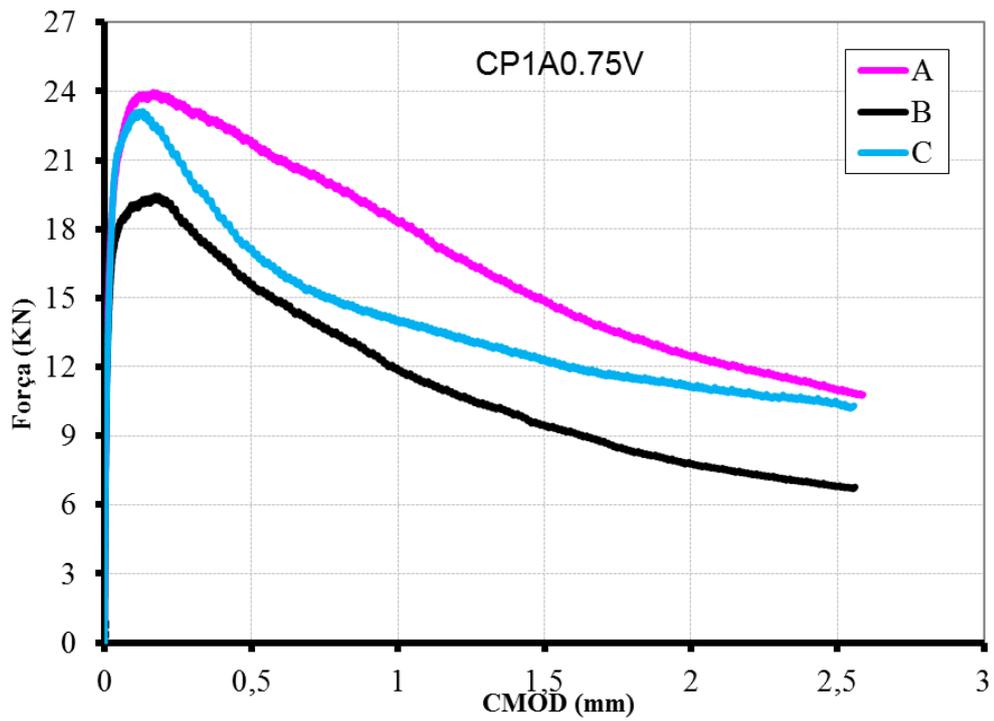
Tendo por base as recomendações dos trabalhos de Ferrari (2007) e Figueiredo (2000), as taxas de fibra de aço foram fixadas em 1%, e a hibridização com microfibras de vidro, ocorrerá com esta taxa fixada, sendo variado somente a taxa de microfibras de vidro, como pode ser visto nos compósitos CP1A0.25V, CP1A0.5V, CP1A0.75V e CP1A1V, demonstradas nas Figuras 4.5.

**Figura 4.5 - Curvas P-CMOD dos compósitos híbridos**

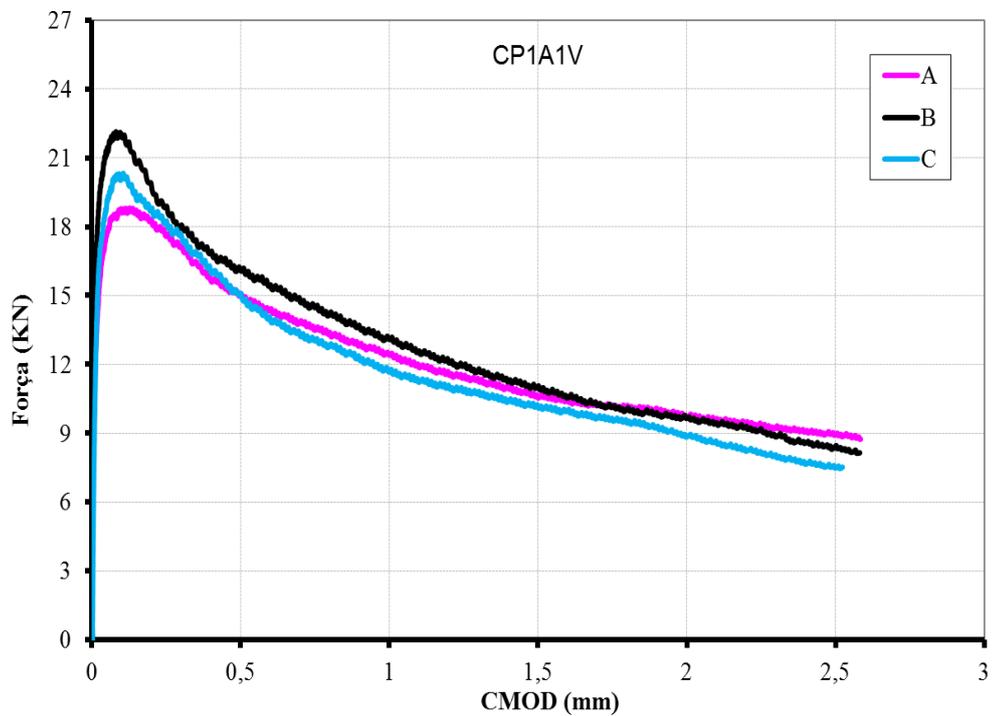
a) Compósito CP1A0.25V



b) Compósito CP1A0.50V



c) Compósito CP1A0.75V



d) Compósito CP1A1V

Fonte: Autor

Com base nos gráficos e com o apoio do software TENAC, na Tabela 4.2 temos os resultados das forças e resistências para os compósitos estudados.

Tabela 4.2 - Forças e Resistências

Compósito	Corpo de Prova	F <sub>L</sub>	F <sub>M</sub>	f <sub>fet,L</sub>	f <sub>eq,2</sub>	f <sub>eq,3</sub>
		N	N	MPa	MPa	MPa
CP0	A	25,06	25,06	7,22	0	0
	B	23,28	23,28	6,7	0	0
	C	25,56	25,56	7,36	0	0
	<b>Média</b>	<b>24,63</b>	<b>24,63</b>	<b>7,09</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
CP0.50V	A	20,02	20,02	5,77	0	0
	B	21,77	21,77	6,27	0	0
	C	18,7	18,7	5,39	0	0
	<b>Média</b>	<b>20,16</b>	<b>20,16</b>	<b>5,81</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
CP0.75V	A	21,49	21,49	6,19	0,91	0,31
	B	18,95	18,95	5,46	0,93	0,26
	C	22,4	22,61	6,45	2,73	0,66
	<b>Média</b>	<b>20,95</b>	<b>21,02</b>	<b>6,03</b>	<b>1,52</b>	<b>0,41</b>
CPIV	A	19,34	19,34	5,57	3,13	0,72
	B	21,91	21,91	6,31	2,77	0,63
	C	19,74	19,74	5,69	1,54	0,37
	<b>Média</b>	<b>20,33</b>	<b>20,33</b>	<b>5,86</b>	<b>2,48</b>	<b>0,57</b>
CP1A	A	24,16	24,44	6,96	5,03	3,04
	B	21,88	24,16	6,3	5,14	2,94
	C	22,62	23,28	6,51	5,91	4,12
	<b>Média</b>	<b>22,89</b>	<b>23,96</b>	<b>6,59</b>	<b>5,36</b>	<b>3,37</b>
CP1A0.25V	A	27,41	27,84	7,89	6,87	4,68
	B	23,56	23,81	6,79	5,01	2,97
	C	25,93	26,59	7,47	6,19	3,87
	<b>Média</b>	<b>25,63</b>	<b>26,08</b>	<b>7,38</b>	<b>6,02</b>	<b>3,84</b>
CP1A0.5V	A	22,55	22,55	6,49	3,74	2,3
	B	25,28	25,44	7,28	4,59	3,14
	C	22,61	23,37	6,51	5,68	4,09
	<b>Média</b>	<b>23,48</b>	<b>23,79</b>	<b>6,76</b>	<b>4,67</b>	<b>3,18</b>
CP1A0.75V	A	23,07	23,96	6,64	6,02	4
	B	18,38	19,46	5,29	4,63	2,71
	C	22,54	23,15	6,49	4,49	3,17
	<b>Média</b>	<b>21,33</b>	<b>22,19</b>	<b>6,14</b>	<b>5,05</b>	<b>3,29</b>
CP1AIV	A	18,52	18,8	5,33	4	2,8
	B	21,94	22,15	6,32	4,14	2,72
	C	20,28	20,34	5,84	3,78	2,5
	<b>Média</b>	<b>20,25</b>	<b>20,43</b>	<b>5,83</b>	<b>3,97</b>	<b>2,67</b>

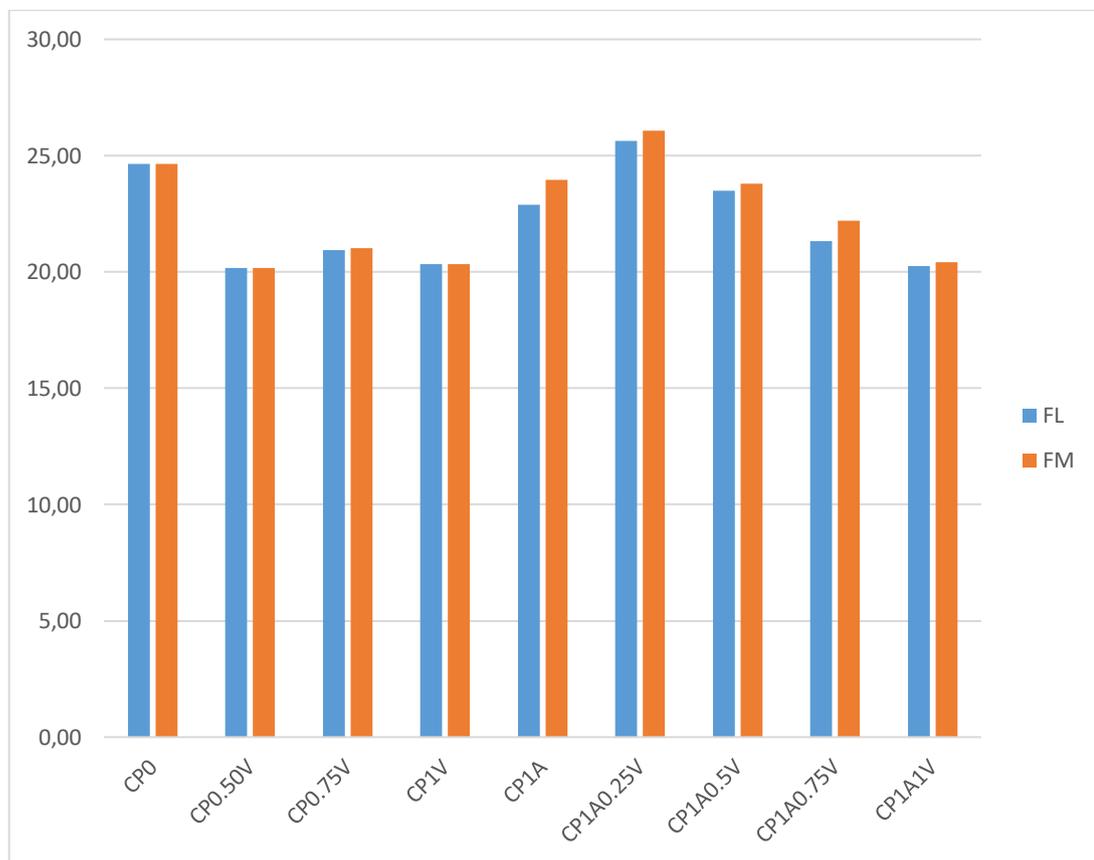
Fonte: Autor

Nos compósitos híbridos temos o destaque para o desempenho do CP1A0.25V que apresentou aumento da capacidade de carga em relação ao CP1A, porém é perceptível a queda gradual desta capacidade com o aumento da taxa de microfibras.

Na análise dos gráficos demonstrados acima, é visto uma variação de resultados entre os compósitos com diferentes taxas, com variação considerável na força máxima suportada. Observamos também quanto menos brusca é a perda de carga, maior é a área do gráfico, sendo assim maior a tenacidade do compósito.

Como pode ser visto na Figura 4.6, os compósitos que mais suportaram carga após o início da fissuração foram os híbridos.

**Figura 4.6 - Força máxima de offset (FL) e força máxima do compósito (FM)**

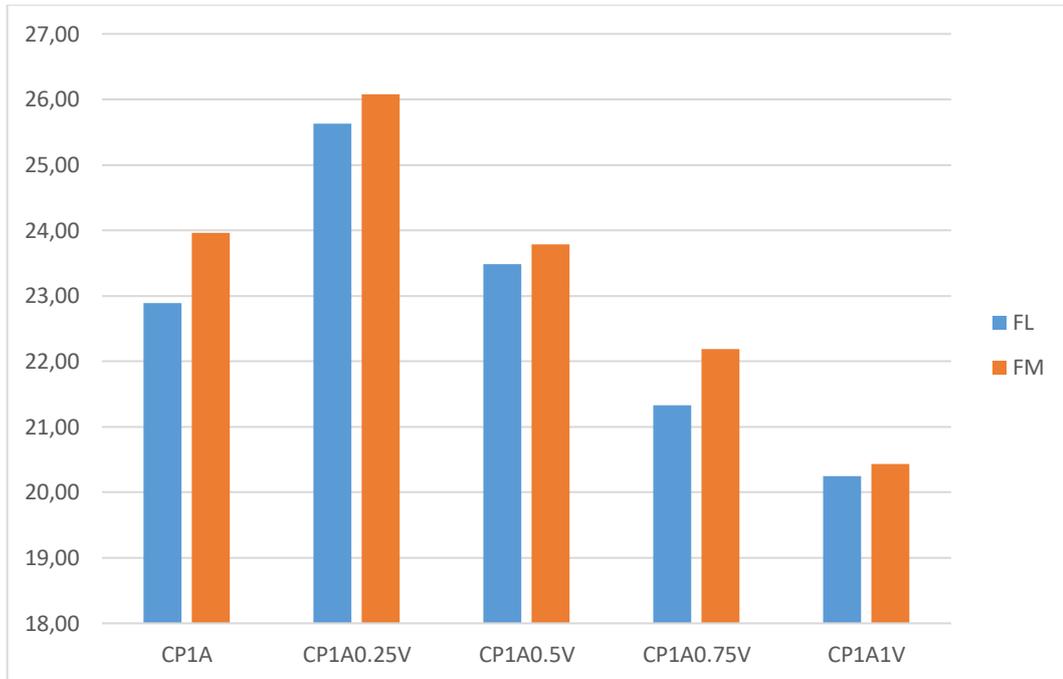


Fonte: Autor

O limite de proporcionalidade é a força máxima ou *offset* no intervalo de 0 a 0,05mm (é identificada como  $F_L$ ), e a força máxima resistida pelo compósito (é identificada como  $F_M$ ). Nos compósitos híbridos, a força máxima foi superior ao  $F_L$ , o que demonstra a parcela de contribuição das fibras, que proporcionaram o aumento da capacidade de carga do compósito. Ocorre, no entanto, que a hibridização, gerou resultados satisfatórios em relação ao compósito

CP1A, isso apenas na taxa 0,25% de fibras de vidro (CP1A0.25V), sendo que nos demais compósitos, o acréscimo na taxa de fibras de vidro resultou na diminuição da capacidade de carga (Figura 4.7):

**Figura 4.7 - Relação entre as forças nos compósitos híbridos**



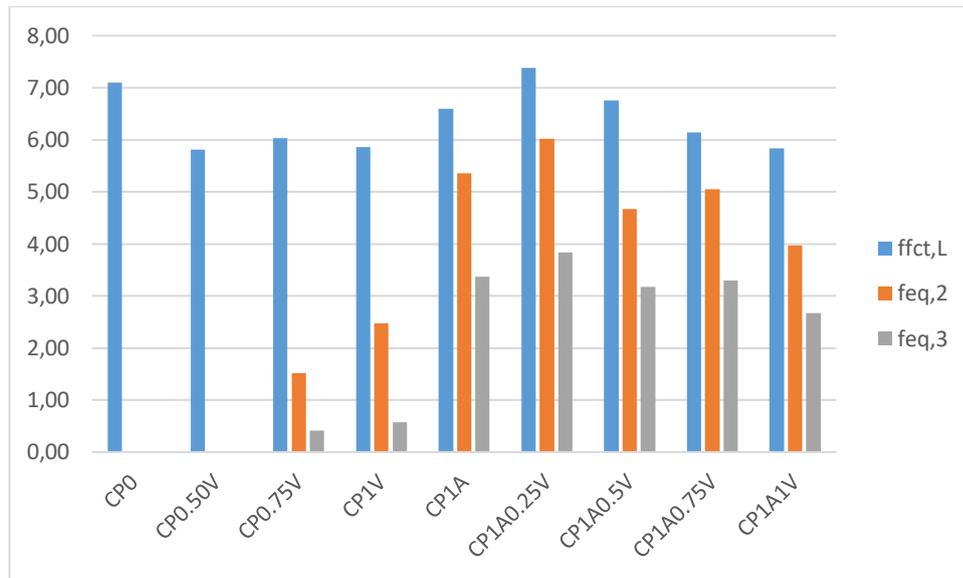
Fonte: Autor

Por outro lado, é possível visualizar uma contribuição maior das fibras no compósito CP1A0.75V onde o aumento de carga é próximo de 5%.

Para a RILEM, o  $f_{ct,L}$  corresponde à tensão referente à força  $F_L$  e representa a resistência oriunda da matriz cimentícia. Já os valores das resistências flexionais equivalentes  $f_{eq,2}$  e  $f_{eq,3}$  correspondem o comportamento do compósito oriundo da contribuição das fibras. Com isso, podemos observar que apenas o compósito CP1A0.25V foi o único a contribuir para a melhora da matriz de concreto, sendo todos os demais, apresentaram valores inferiores a matriz base sem fibras (CP0).

Em relação as resistências flexionais equivalentes  $f_{eq,2}$  e  $f_{eq,3}$ , que caracterizam o comportamento do compósito em relação as fibras, a adição de fibras não foi suficiente ao ponto de superar a resistência dada pela contribuição apenas da matriz cimentícia ( $f_{ct,L}$ ).

Com isso, em exceção ao compósito CP1A0.25V, a utilização das microfibras de vidro não contribuíram para o aumento da capacidade de carga nos compósitos além da contribuição da matriz cimentícia, como demonstra a Figura 4.8:

**Figura 4.8 - Valores de resistência**

Fonte: Autor

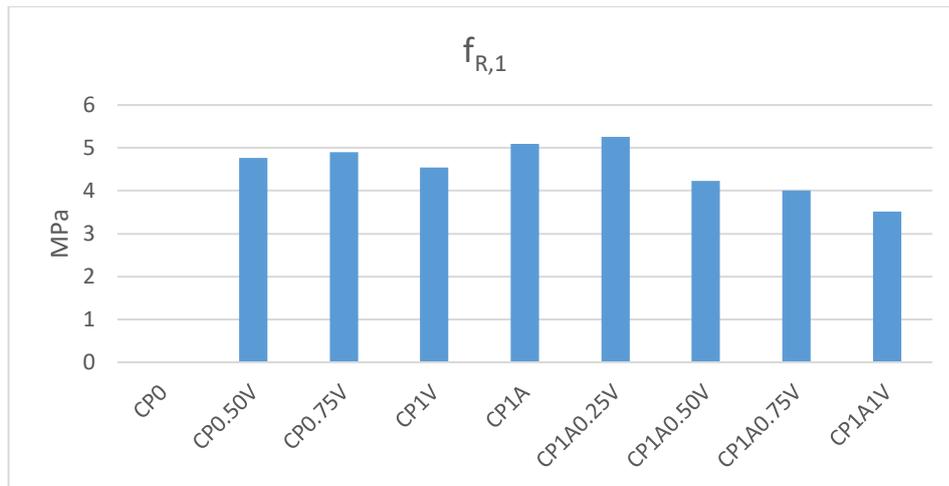
Nos demais parâmetros, a flexão residual  $f_{R,1}$  é um dos parâmetros da RILEM com a finalidade de avaliar a resistência do compósito em função das fibras para um determinado ponto de deslocamento, neste caso, por norma  $\delta=0,46$  mm. Com isso é possível analisar o comportamento das fibras no mesmo ponto de deformação.

A Tabela 4.3 e a Figura 4.9 demonstram esse comportamento nos compósitos, através da curva mais representativa de cada compósito estudado.

**Tabela 4.3 - Flexão residual  $f_{R,1}$** 

Compósito	$F_L$	$F_M$	$F_{R,1}$	$F_{R,4}$	$f_{R,1}$	$f_{R,4}$
	N	N	N	N	MPa	MPa
<b>CP0</b>	23,28	23,28	23,28	0	5,54	0
<b>CP0.50V</b>	20,02	20,02	20,02	0	4,76	0
<b>CP0.75V</b>	21,49	21,49	20,62	0	4,90	0
<b>CP1V</b>	19,34	19,34	19,11	0	4,54	0
<b>CP1A</b>	22,62	23,28	21,4	9,8	5,09	2,33
<b>CP1A0.25V</b>	25,93	26,59	22,1	8,6	5,26	2,05
<b>CP1A0.50V</b>	25,28	25,44	17,8	8,4	4,23	2,00
<b>CP1A0.75V</b>	22,54	23,15	16,8	9,02	4,00	2,15
<b>CP1A1V</b>	20,28	20,34	14,8	6,3	3,52	1,50

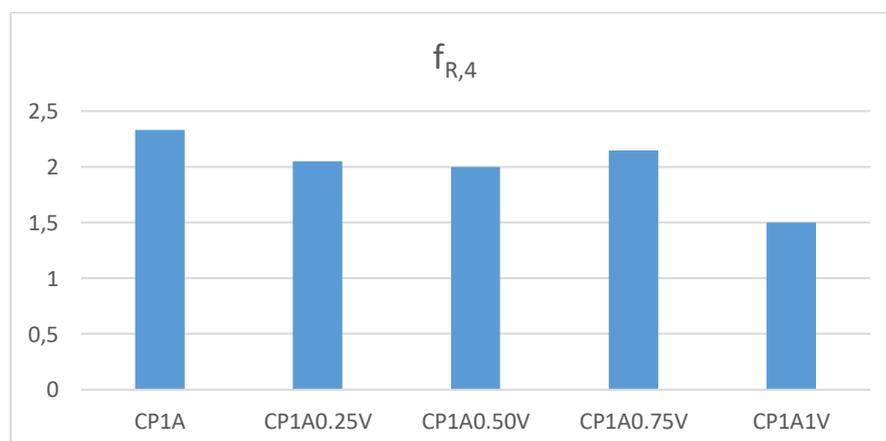
Fonte: Autor

**Figura 4.9 - Flexão residual  $f_{R,1}$** 

Fonte: Autor

Na Figura 4.9, temos a atuação das fibras no  $\delta=0,46\text{mm}$ , e assim podemos visualizar a comparação de um compósito base de fibras de aço (CP1A) com compósitos de fibra de aço com adição de fibras de vidro. Apenas no compósito CP1A0.25V é visualizado um incremento em função da adição das fibras de vidro. Então o combate a microfissuração, conforme preconiza a literatura e de função específica das microfibras, foi mais eficiente com a adição apenas de 0,25% de fibras de vidro, para as demais adições de fibras de vidro notamos um perca da capacidade, com os corpos de prova fraturados apresentando escorregamento das fibras.

Na Figura 4.10 apresentamos mais um dos parâmetros da RILEM, o  $f_{R,4}$  que também avalia a resistência do compósito em função das fibras, porem neste caso, para o deslocamento  $\delta=3,00\text{mm}$ .

**Figura 4.10 - Flexão residual  $f_{R,4}$** 

Fonte: Autor

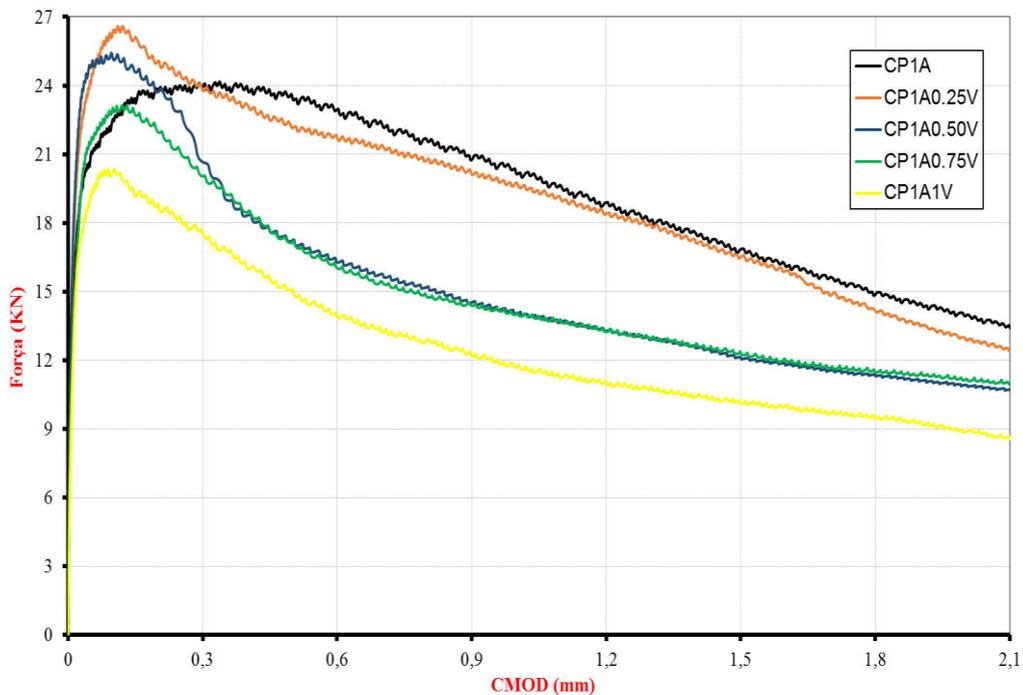
Os compósitos que possuem apenas fibras de vidro CP0.50V, CP0.75V e CP1V, não possuem a capacidade de deformação para atingir o deslocamento  $\delta=3,00\text{mm}$ , sendo que tal deslocamento somente foi observado nos compósitos com fibras de aço e nos híbridos com fibras de aço e fibras de vidro. Conforme preconiza a literatura, as microfibras não trabalham eficientemente na pós-fissuração, sendo que a maior resistência neste ponto foi obtida pelo compósito apenas com fibras de aço CP1A.

### 4.3 Curvas P-CMOD para análise dos compósitos híbridos

Todas as curvas P-CMOD obtidas nos ensaios à flexão, assim como as curvas *força (P) x deslocamento ( $\delta$ )*, podem ser encontrados no Apêndice A e no Apêndice B.

Na Figura 4.11 é apresentado as curvas médias P-CMOD para os compósitos híbridos CP1A0.25V, CP1A0.5V, CP1A0.75V e CP1A1V assim como a curva da matriz base de fibras de aço CP1A, objetivando a comparação e atuação das microfibras de vidro. Para cada compósito apresentado no gráfico, foi escolhido a curva mais representativa, isto é, a curva media entre os resultados obtidos com o ensaio.

**Figura 4.11 - Curvas P-CMOD dos compósitos**



Fonte: Autor

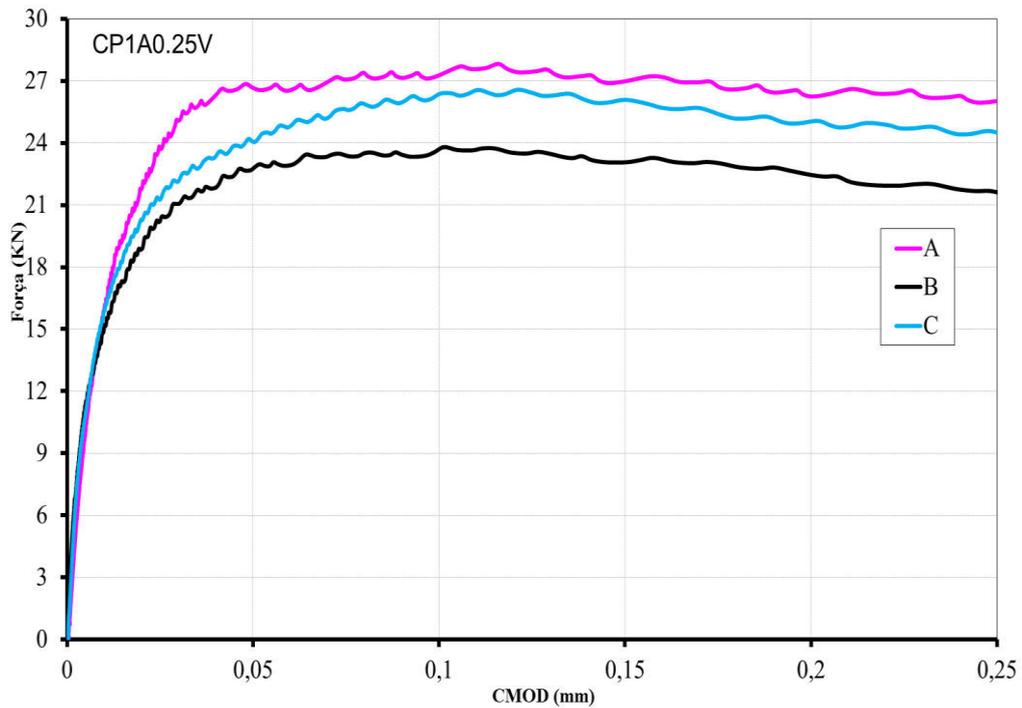
Observamos que a presença de fibras melhorou o comportamento frágil do concreto, sendo que no caso do CP1A0.25V é observado uma elevação da resistência antes e após a fissuração da matriz.

Nota-se também a eficiência das fibras de aço no pós-fissuração, onde sua presença contribui diretamente para a manutenção da carga mesmo após o início das fissuras.

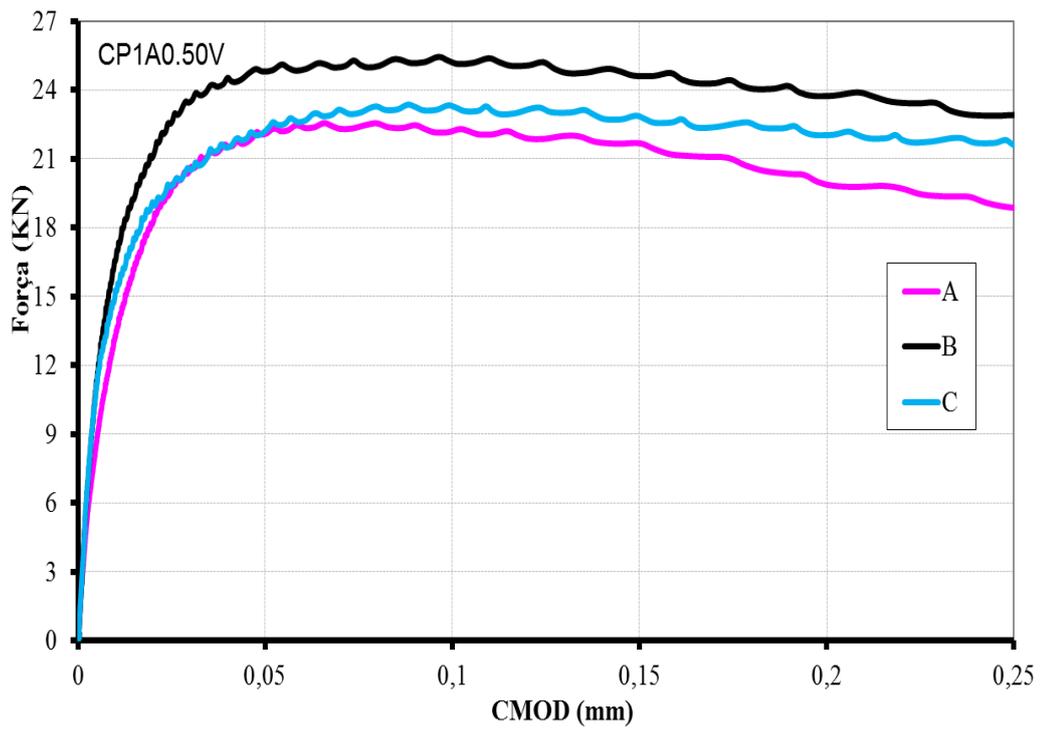
Entretanto, o aumento das taxas de fibras de vidro afetou diretamente na capacidade de absorção de energia e nos níveis de resistência, com queda gradual na ductilidade destes compósitos.

Na figura 4.12 serão apresentadas as curvas P-CMOD para CMOD até 0,25mm, para os compósitos híbridos, visando demonstrar o trabalho das microfibras de vidro na fase inicial pré-pico.

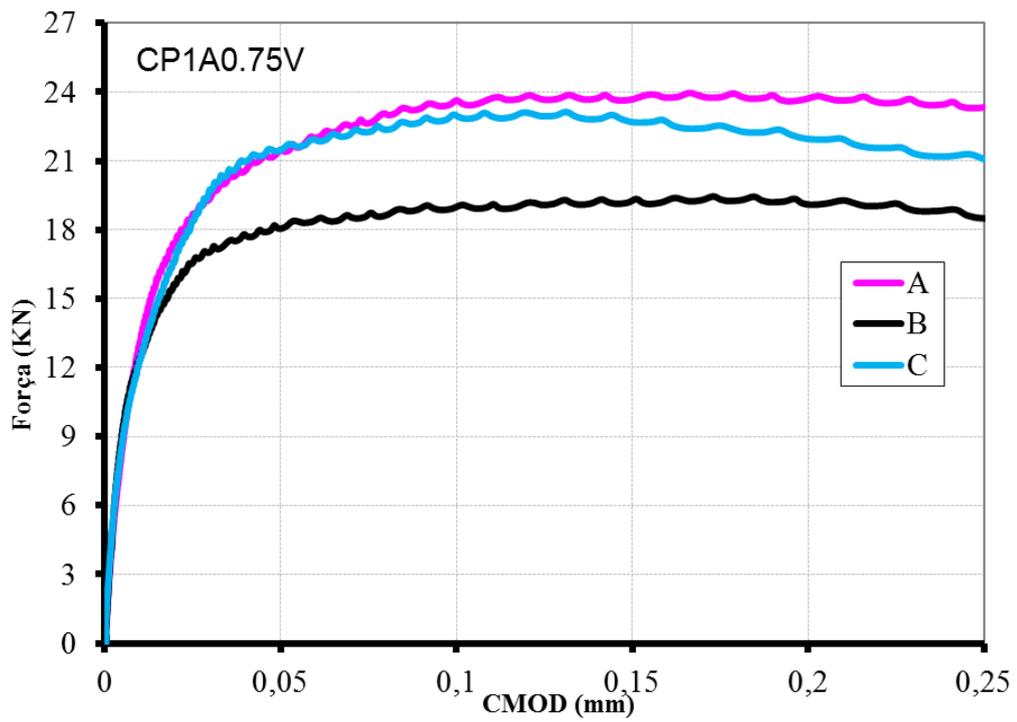
**Figura 4.12 – Comportamento P-CMOD inicial por compósito**



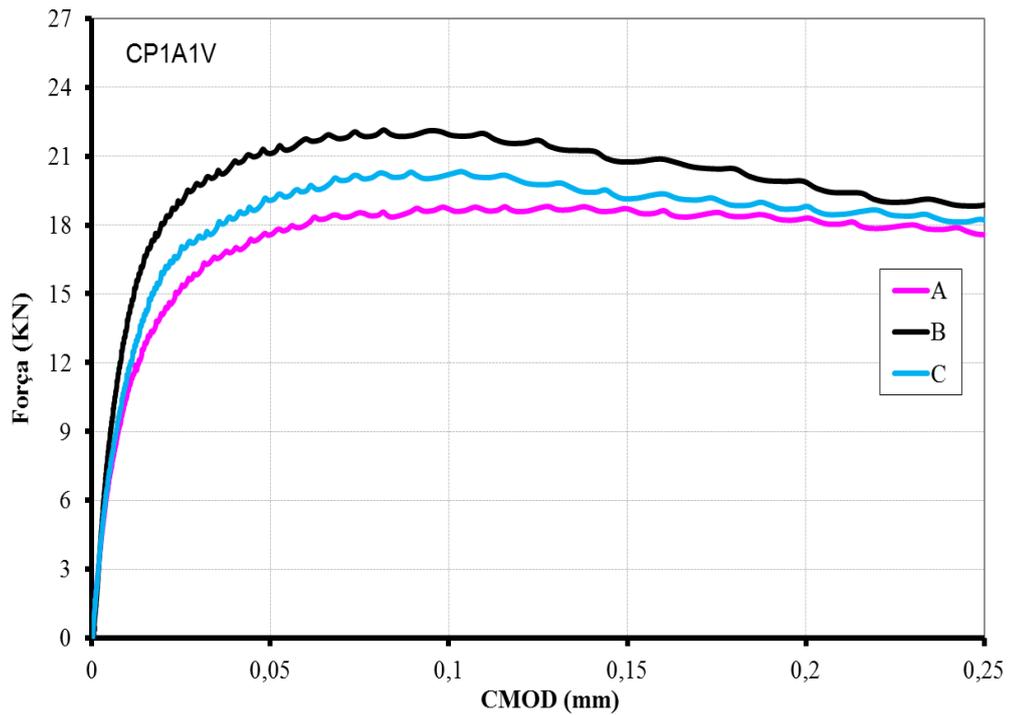
a) Compósito CP1A0.25V



b) Compósito CP1A0.50V



c) Compósito CP1A0.75V



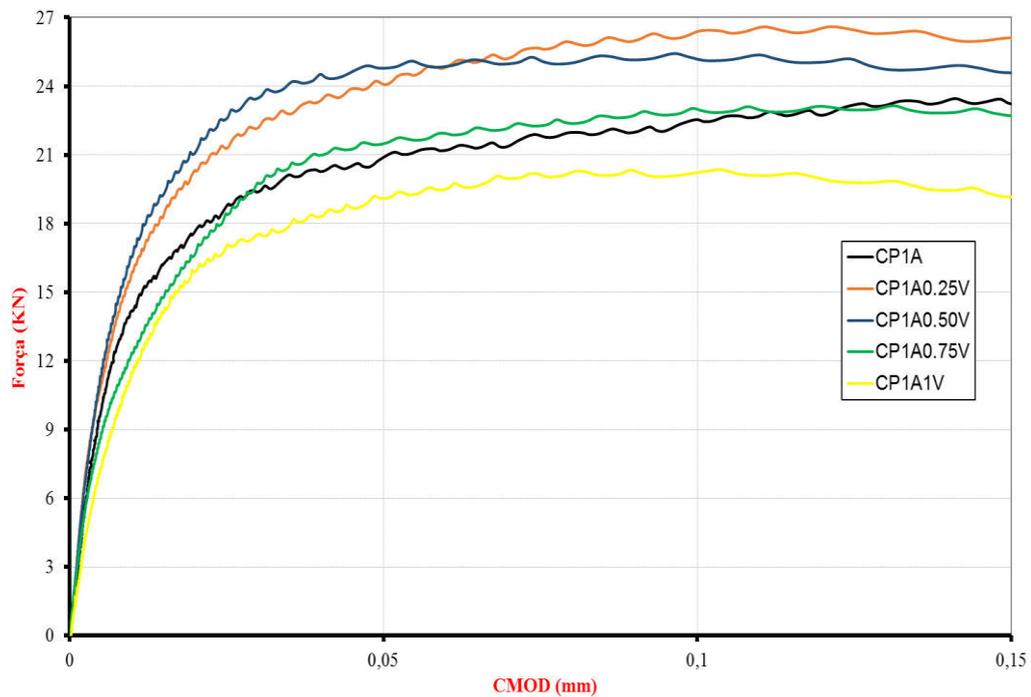
d) Compósito CP1A1V

Fonte: Autor

Os compósitos híbridos apresentaram um pequeno aumento de carga pós-fissuração com manutenção da carga após o pico para o intervalo de abertura proposto.

Para um incremento de 0,25% de fibras de vidro no compósito de aço, é possível observar o aumento da capacidade de absorção de energia, como pode ser visto na Figura 4.13, onde apresentamos os resultados das Figuras 4.12, porém com ênfase ao intervalo inicial de sollicitação do compósito, isto é, para um CMOD de até 0,15mm, o que traduz o trabalho da microfibras no compósito, trabalhando na costura da microfissuração.

**Figura 4.13 - Comportamento P-CMOD inicial**



Fonte: Autor

O trabalho das microfibras de vidro fica evidente neste gráfico, onde é possível visualizar o aumento da capacidade para o deslocamento informado, e mostra ainda mais a eficiência da mistura de 1% de fibras de aço com 0,25% de fibras de vidro. É possível também notar o aumento em todos os compósitos híbridos.

O gráfico mostra também que a presença de microfibras em uma matriz, torna a transferência de tensões mais gradual e ainda com aumento da capacidade de carga para algumas misturas, pois sua disposição dispersa trabalha diretamente no processo de “costura” das microfissuras, retardando o crescimento das mesmas.

Nota-se, entretanto, conforme análise dos corpos de prova pós-ensaiados, é visível que tais fibras não foram rompidas e que o aumento de carga ocasionou o escorregamento das mesmas, e que em função disto, a “costura” não atingiu o resultado desejado, conforme Figura 4.14.

**Figura 4.14 - Corpo de prova fraturado**



Fonte: Autor

Segundo Bentur & Mindess (1990), com a fissuração da matriz, o mecanismo de transferência de tensões para as fibras é controlado pelo atrito. Assim, o efeito da presença de ganchos nas extremidades das fibras tem grande influência no desempenho dos compósitos. Portanto, a característica da fibra de vidro, que é lisa, não contribuiu para evitar seu deslizamento em relação a matriz, o que levou o compósito a dissipar energia ou invés de absorver.

Sendo assim as fibras de aço empregadas nos compósitos, e que possuem tal característica de ancoragem, trabalharam efetivamente na pós-fissuração.

## 5 CONCLUSÃO

Tendo em vista os resultados apresentados sobre os compósitos ensaiados, escolhemos o CP1A0.25V como a mistura mais apropriada.

Os outros compósitos híbridos CP1A0.50V, CP1A0.75V e CP1A1V, também obtiveram um resultado interessante, porém com diminuição gradativa de resistência atrelada ao aumento da taxa de fibras de vidro, o que torna inviável aplicações acima de 0,25% de fibras de vidro com essas características, mostrando que misturas com taxas de fibras de vidro acima de 0,50% prejudicou a ancoragem ocasionada pelas fibras de aço.

Talvez um outro experimento, com fibras de vidro ancoradas, sejam elas por rugosidade ou dobraduras, de forma a contribuir para evitar o escorregamento das mesmas em relação a matriz, possam obter um resultado mais satisfatório.

Analisando a tenacidade flexional, a resistência máxima de offset ( $f_{ict,L}$ ) do compósito CP1A0.25V, apresentou um valor 10,69% superior ao compósito com apenas fibras de aço CP1A e de 5% em relação ao compósito sem fibras CP0.

Em relação as resistências flexionais equivalentes para o deslocamento de  $\delta=0,46\text{mm}$  ( $f_{eq,2}$ ), o compósito CP1A0.25V teve 10,96% de ganho em relação a matriz com apenas fibras de aço CP1A, 22,43% em relação ao compósito CP1A0.50V, 16,11% em relação ao compósito CP1A0.75V e 34,05% em relação ao compósito CP1A1V. Isso mostra que o incremento de fibras de vidro com estas características foi interessante apenas com a taxa de 0,25% de fibras.

Em relação as resistências flexionais equivalentes para o deslocamento de  $\delta=3,00\text{mm}$  ( $f_{eq,3}$ ), o compósito CP1A0.25V teve 12,24% de ganho em relação a matriz com apenas fibras de aço CP1A, 17,19% em relação a CP1A0.50V, 14,32% em relação a CP1A0.75V e 30,47% em relação a CP1A1V.

Nota-se, portanto, que a perda de capacidade é gradativa conforme o acréscimo de fibra de vidro.

Para as resistências residuais ( $f_{R,1}$ ), o valor obtido com o compósito CP1A0.25V foi 3,23% superior a matriz com fibras de aço CP1A, 19,58% em relação ao compósito CP1A0.50V, 23,95% em relação a CP1A0.75V e 33,08% em relação a CP1A1V.

Para as resistências residuais ( $f_{R,4}$ ), o valor obtido com o compósito CP1A0.25V foi inferior em 12,02% em relação ao compósito com apenas fibras de aço CP1A, e também foi inferior ao compósito CP1A0.75V em 4,65%.

A proposta do presente trabalho foi a de buscar alternativas aos compósitos desenvolvidos por Ferrari (2007), onde o mesmo criou diferentes compósitos cimentícios com o objetivo de criar um substrato de transição eficiente para o reparo da área danificada e para a colagem de mantas de polímero reforçadas com fibra de carbono. No desenvolvimento dos compósitos, o referido autor utilizou-se de um processo de hibridização, onde foi mesclado tipos diferentes de fibras de aço, sendo umas das escolhas foram as microfibras com 13mm de comprimento associadas com fibras de 25mm de comprimento.

As microfibras de 13mm utilizadas por Ferrari, não são encontradas comercialmente, e mesmo com os resultados satisfatórios em sua pesquisa, a empresa fabricante não continuou sua fabricação, impossibilitando assim o aproveitamento em larga escala de seus estudos.

Uma vez que seus resultados apresentaram um aumento da capacidade de carga da viga, a diminuição da fissuração, aumento da rigidez, e também o aumento da capacidade de deformação da viga, evitando assim o rompimento frágil na qual é característico do concreto comum, foi buscado uma alternativa comercial e facilmente encontrada no mercado para a substituição das microfibras de aço de 13mm.

Tendo por base as propriedades das fibras de vidro, onde sua resistência à tração e sua capacidade de deformação na ruptura são superiores as tradicionais fibras de aço, somados a isso, a falta de estudos com o emprego na área estrutural, optou-se por sua utilização e estudo.

Ocorre que os resultados não foram satisfatórios como os obtidos por Ferrari (2007), e isso foi constatado observando os corpos de prova já ensaiados e fraturados, onde uma característica da fibra de vidro foi preponderante para isso, que é a sua forma lisa. Nos corpos de prova fraturados foi observado o “deslizamento” das fibras de vidro e não o seu rompimento como era esperado. Então mesmo com características superiores, o resultado obtido com a substituição pelas fibras de vidro foi inferior e isso se deve em função de ancoragem.

Parte das microfibras utilizadas por Ferrari (2007) possuíam ganchos nas pontas e outra parte eram lisas, e o bons resultados obtidos por seus compósitos foram apenas nas microfibras com gancho, onde as mesmas travaram com a matriz cimentícia e impedem o deslizamento que é comum nas fibras com forma lisa.

Ainda assim, o compósito CP1A0.25V apresentou um desempenho superior a matriz com a apenas fibras de aço, e isso leva a crer que a dosagem 0,25% de microfibras de vidro, contribuiu de alguma forma para o controle das microfissuras fazendo com que a viga obtivesse aumento na sua capacidade de carga.

Por outro lado, o crescimento além dos 0,25%, que foi testado nos compósitos CP1A0.50V com 0,50% de fibras de vidro, no compósito CP1A0.75V com 0,75% de fibras de

vidro e no compósito CP1A1V com 1% de taxa, ocasionou uma diminuição gradativa em sua capacidade.

É provável que desenvolvimento de outros tipos de fibras de vidro, com características que possibilitem a ancoragem, seja ela por ganchos, ondulações ou até mesmo por rugosidade, se obtenha um ganho considerável de desempenho uma vez suas propriedades são superiores a fibra de aço.

Fica a sugestão para futuros trabalhos acadêmicos.

## BIBLIOGRAFIA

- AÍTICIN, P. C. (2000). Concreto de alto desempenho. São Paulo: **Pini**. Cap. 5, p. 104-105.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Manual of concrete practice: part 5. ACI. Guide for specifying, proportioning, mixing, placing, and finishing steel fiber reinforced concrete. (ACI 544.3R-93). **ACI Committee 544**. Detroit, USA, 1993. 10p.
- AQUINO, E. M. F. **Identificação do modo de fratura de compósitos poliésteres – Vidro-E**. 13° CBCIMAT. Vol. 1, Paraná, 1992.
- ARQUEZ, A.P. (2010). **Aplicação de laminado de polímero reforçado com fibras de carbono (PRFC) inserido em substrato de microconcreto com fibras de aço para reforço à flexão de vigas de concreto armado**. São Carlos, 2010. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2007). **ABNT NBR 5739**: Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto. ABNT, Rio de Janeiro.
- \_\_\_\_\_. **NBR 5738**: Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. Rio de Janeiro, 1994.
- \_\_\_\_\_. **NBR 8522**: Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação. Rio de Janeiro, 2008.
- BANTHIA, N.; SAPPAKITTIPAKORN, M.. Toughness enhancement in steel fiber reinforced concrete through fiber hybridization. **Cement and Concrete Research**, v. 37, p. 1366-1372, 2007.
- BANTHIA, N.; NANDAKUMAR, N.. **Crack growth resistance of hybrid fiber reinforced cement composites**. The University of British Columbia, Vancouver, Canada, 2001.
- BEBER, A. J.; CAMPOS FILHO, A.; CAMPAGNOLO, J. L. (2000). Reforço de estruturas e concreto armado com tecidos pré-impregnados de fibras de carbono. **Revista Técnica**, São Paulo, n.45, p. 52-55, mar – abr.
- BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre reinforced cementitious composites**. United Kingdom. Barking, Elsevier. 1990.
- BERTOLO, R. S.; SELMO, S. M. S. (2005). Argamassas de reparo de estruturas de concreto com corrosão de armaduras: sugestões de requisitos e critérios básicos para qualificação. **Revista Ibracon**, v.38, p.64-72, março a maio.
- BONIFACIO, J. S. R.; GODINHO, D. S. S.; **Estudo do efeito das fibras de vidro e polipropileno nas propriedades mecânicas do concreto**. Engenharia Civil UNESC, Criciúma, 2014.
- CACERES, A. R. E; FIGUEIREDO, A. D.; MONTE, R. Avaliação do comportamento mecânico do concreto com reforço híbrido de fibras. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 55, 2013, Gramado. **Anais...** Gramado, 2013.
- CALLISTER, W. D. **Materials Science and Engineering: An Introduction**, ed. 4, John Wiley & Sons, USA, 2007.

CAO Y., CAMERON J. **Impact Properties of Silica Particle Modified Glass Fiber Reinforced Epoxy Composite**. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 2006 25: 761, 2006a.

CARVALHO, A. **Fiberglass x Corrosão – Especificação, Instalação e manutenção de equipamentos de Fiberglass para Ambientes Agressivos**, ASPLAR, 425 p., São Paulo, 1992.

CUSSON, D.; MAILVAGANAM, N. P. (1996). **Durability of concrete repair materials**. *Concrete International*, v.18, n.3.

DI PRISCO, M.; PLIZZARI, G.; VANDEWALLE, L.. **Fibre reinforced concrete: new design perspectives**. *Materials and Structures*, RILEM, 2009.

DING, Y.; AZEVEDO, C.; AGUIAR, J.; JALALI, S.. **Study on residual behaviour and flexural toughness of fibre cocktail reinforced self compacting high performance concrete after exposure to high temperature**. Dalian University of Technology, China, 2011.

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

FERREIRA, L. E. T. (2002). **Sobre a resistência ao fraturamento do concreto e do concreto reforçados com fibras de aço**. 266p. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo. 2002.

FERREIRA, L. E. T.; GETTU, R.; BITTENCOURT, T. N. (2000). **TENAC – An automatic tool for the analysis of the toughness of steel fiber reinforced concrete**. Universidade de São Paulo, Brazil, Universitat Politècnica de Catalunya, Spain.

FIB - FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. **Design of Thin-walled Units – Recommendations**. London: FIB, 1998.

FIGUEIREDO, A. D.. **Concreto com fibras**. Concreto ciência e Tecnologia – IBRACON, 2011.

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

FIGUEIREDO, A. D. (2005). Concreto com fibras. IBRACON. **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto. Cap. 39, p. 1195-1225.

FU, S.-Y. *et al.* **Effects of particle size, particle/matrix interface adhesion and particle loading on mechanical properties of particulate–polymer composites**. *Composites Part B: Engineering*, v. 39, n. 6, p. 933-961, set. 2008.

HAMEED, R.; TURATSINZE, A.; DUPRAT, F.. SELLIER, A. **Study on the flexural properties of metallic-hybrid-fibre-reinforced concrete**. Université de Toulouse, France, 2010.

HELENE, P. R. L. (1992). **Manual para reparo, reforço e proteção de estruturas de concreto**. 2aed. São Paulo: Pini, 1992.

MAILVAGANAM, N. P. (1992). **Repair and protection of concrete structures**. CRC Press.

MATTHEWS, F. L.; RAWLINGS, R. D. **Composite materials: engenering and science**, Great Britain, Chapman & Hall, 470 p, 1994.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. (2008). **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 3.ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto. Cap. 12, p. 517-538.

MOHAN, R., KISHORE, A. J., **Reinforced Plastic Composites**, v.4, pp. 186-194, 1985

NAAMAN, A. E., HAMMOND, H. Fatigue characteristics of high performance fiber-reinforced concrete. **Cement & Concrete Composites**, v.20, 1998., p353-63.

NUNES, N. L., AGOPYAN, V. (1998). **Influência do fator de forma da fibra na tenacidade à flexão do concreto reforçado com fibra de aço**. *Boletim Técnico*, Escola Politécnica da USP – Departamento de Construção Civil.

ORTENZI, Altibano (2007). “**A Fibra de Vidro em Matrizes Poliméricas e Cimentícias e Seu Uso Estrutural em Construção Civil – O Estado-da-arte**”. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2007.

PASA, V. F. **Análise do Comportamento de Estruturas de Concreto Reforçado com Fibras de Aço via Método dos Elementos Finitos**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

PERUZZI, Antônio de Paulo. **Comportamento das Fibras de Vidro Convencionais em Matriz de Cimento Portland Modificada com Látex e Adição de Sílica Ativa** – Dissertação de Mestrado – Departamento de Estruturas. São Carlos: EESC – USP, 2002.

PETHRICK, R. A.; MILLER, C.; RHONEY, I. **Influence of nanosilica particles on the cure and physical properties of an epoxy thermoset resin**. Wiley Interscience: 2009.

PIGGOTT, Michael. **Load Bearing Fibre Composites**. 2nd Edition. Toronto: KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS, 2002.

PROENÇA, S. P. B.; PITUBA, J. J. C. (2000). Características do comportamento mecânico do concreto. **Introdução à mecânica do dano e fraturamento**. São Carlos, 2000, Capítulo 2.

QIAN, C; STROEVEN, P.. **Development of hybrid polypropylene-steel fiber-reinforced concrete**. Cement and Concrete research, 2000.

REUNION INTERNACIONALE DE LABORATOIRES D'ESSAIS ET MATERIAUX. Test and design methods for steel fibre reinforced concrete. Bending test. (RILEM TC 162-TDF). **Materials and Structures/Matériaux et Constructions**, v.35, p.579-582, 2002.

ROSSI, P., ACKER, P.,MALIER, Y. Effect of steel fibres at two diferente stages: the material and the structures. **Materials and Structures** 20: 436-439.

SAINT-GOBAIN – VETROTEX. **Vetrotex Glass Fibre**. Chambéry: VETROTEX, 2000.

SAVASTANO JR., Holmer. **Zona de Transição Entre Fibras e a Pasta de Cimento Portland: Caracterização e Interrelação com as Propriedades Mecânicas do Concreto**. Tese de Doutorado. São Paulo: USP, 1992.

SOARES, C. M.; MARTINS, J. G. (2006). **Reforço de estruturas de betão armado com CFR**. 1.ed. Porto: Universidade do Porto.

TSAI, J.-L.; CHENG, Y.-L. **Investigating Silica Nanoparticle Effect on Dynamic and Quasi-static Compressive Strengths of Glass Fiber/Epoxy Nanocomposites**. *Journal of Composite Materials*, v. 43, n. 25, p. 3143-3155, 2009.

UYGUNOGLU, T. (2008). Investigation of microstructure and flexural behavior of steel-fiber reinforced concrete. **Materials and Structures**, v.41, n.8, p. 1441-1449, abril.

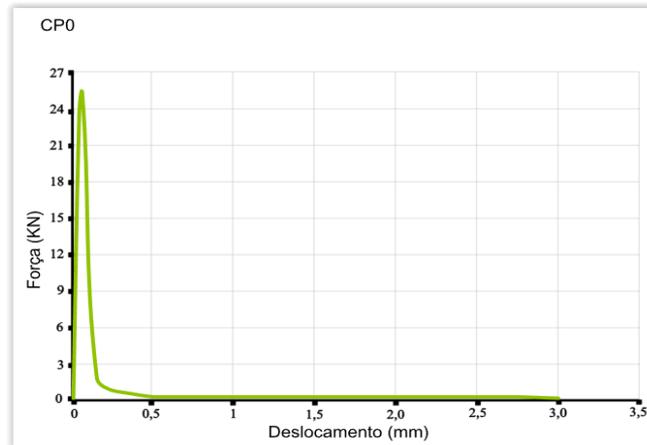
VAYSBURD, A. M.; EMMONS, P. H. (2000). How to make today's repairs durable for tomorrow – corrosion protection in concrete repair. **Construction and Building Materials**, v.14. p.189-197.

VENTURA, Ana Mafalda F.M. **Os Compósitos e a sua aplicação na Reabilitação de Estruturas metálicas**. C.Tecn. Mat., Lisboa, v. 21, n. 3-4, 2009.

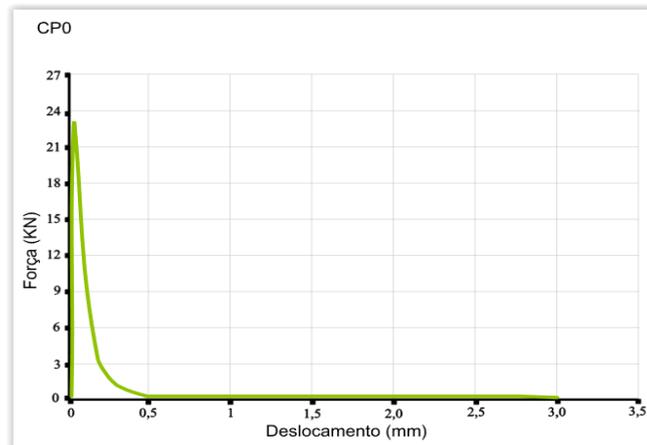
ZATTERA, A. J. **Caracterização de Misturas de Resíduos de EVA do Setor Coureiro-Calçadista e de Polietileno Pós-consumo Preparadas com Misturados Tipo Drais**, Tese de Doutorado, Escola de Engenharia, PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.

ZHENG, Y.; NING, R.; YING ZHENG. Study of SiO<sub>2</sub> **Nanoparticles on the Improved Performance of Epoxy and Fiber Composites**. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 24(3): 223233, 2005.

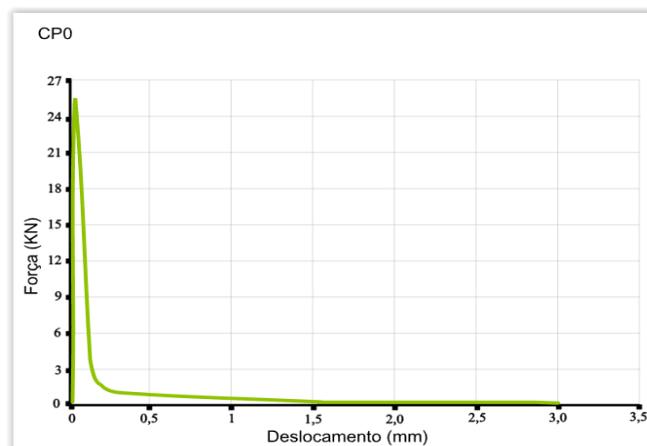
ZOLLO, R. F. Fiber-reinforced concrete: an overview after 30 years of development. **Cement & Concrete Composites**, v. 19, n. 2, p. 107-122, 1997.

**APÊNDICE A – Curvas Força (P) versus deslocamento vertical ( $\delta$ )****Figuras A.1 – Curvas P- $\delta$  para o compósito CP0**

a) Corpo de prova A

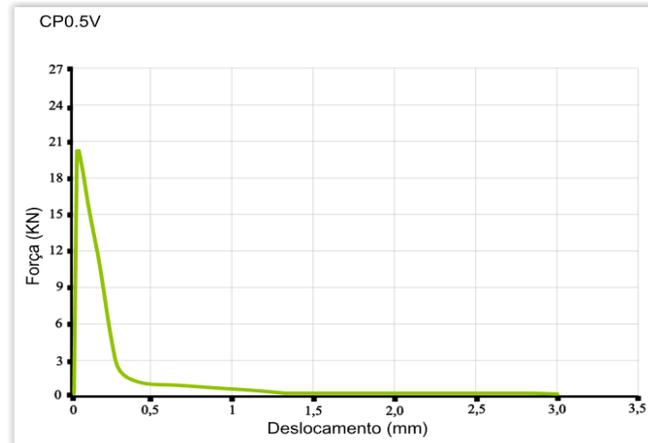


b) Corpo de prova B

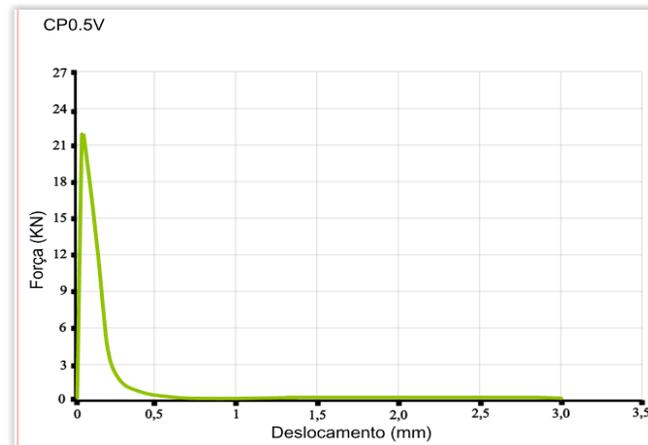


c) Corpo de prova C

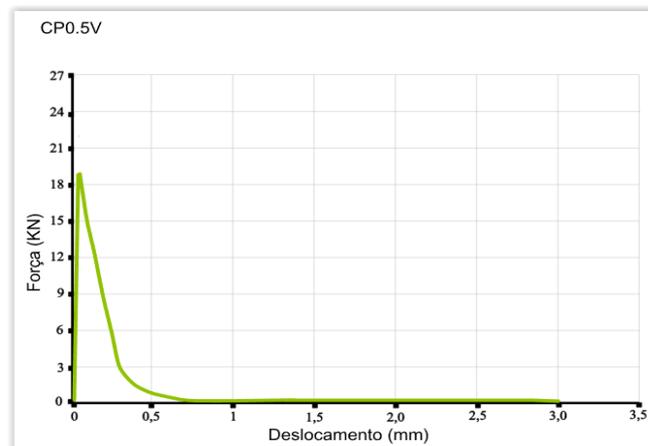
Fonte: Autor

**Figuras A.2 – Curvas P- $\delta$  para o compósito CP0.50V**

a) Corpo de prova A

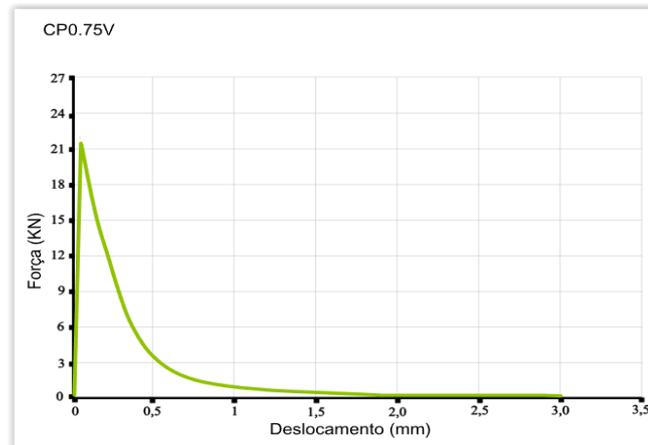


b) Corpo de prova B

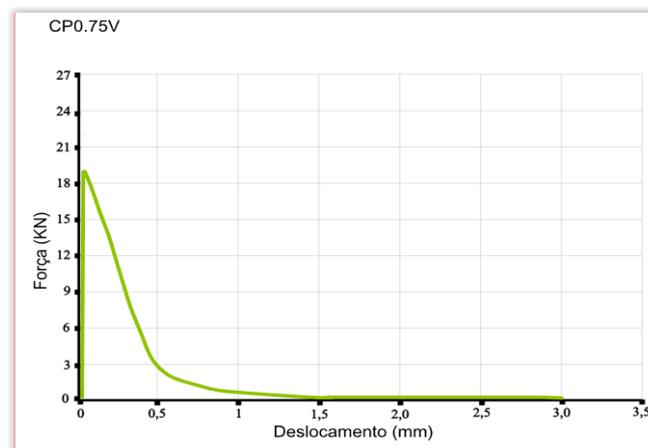


c) Corpo de prova C

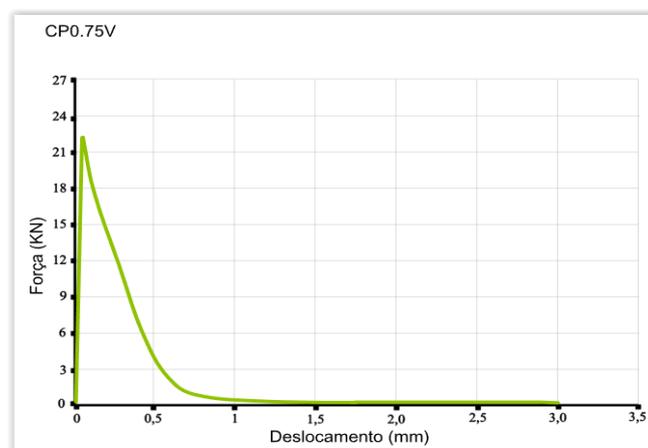
Fonte: Autor

**Figuras A.3 – Curvas P- $\delta$  para o compósito CP0.75V**

a) Corpo de prova A

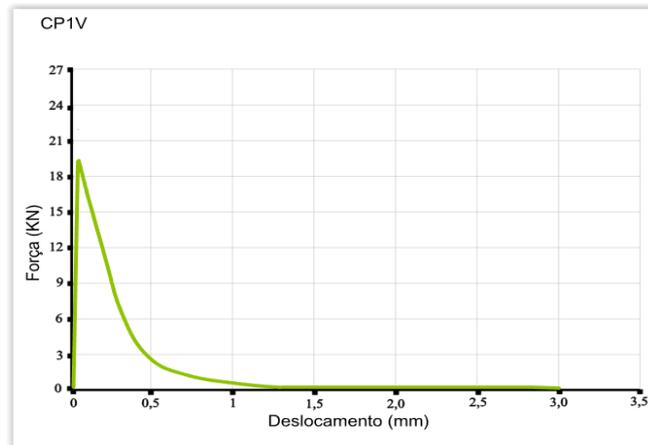


b) Corpo de prova B

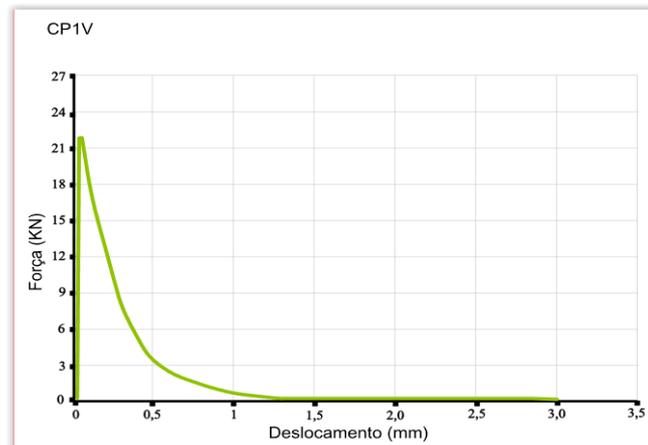


c) Corpo de prova C

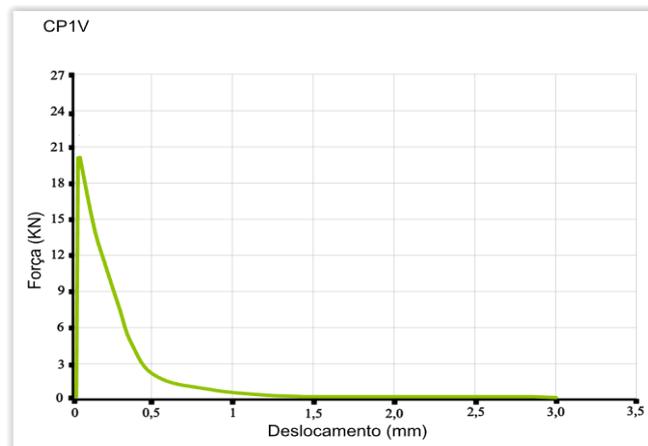
Fonte: Autor

**Figuras A.4 – Curvas P- $\delta$  para o compósito CP1V**

a) Corpo de prova A

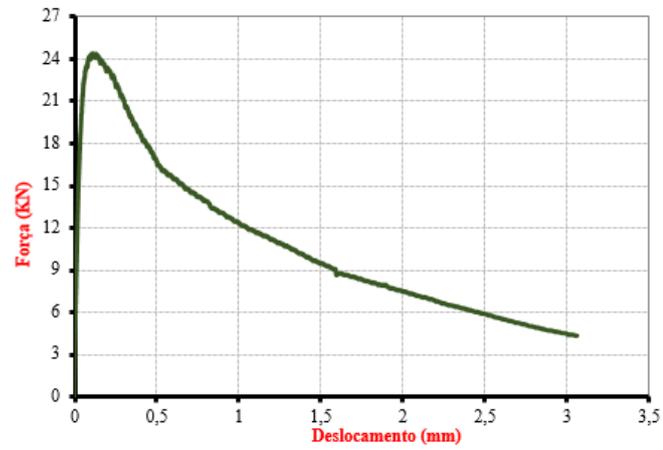


b) Corpo de prova B

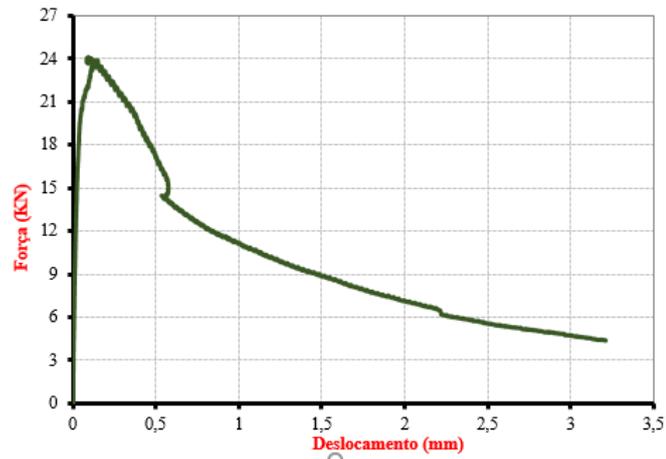


c) Corpo de prova C

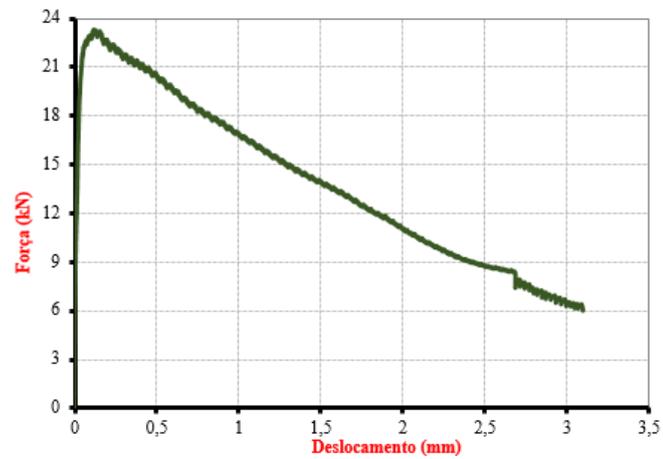
Fonte: Autor

**Figuras A.5 – Curvas P- $\delta$  para o compósito CP1A**

a) Corpo de prova A

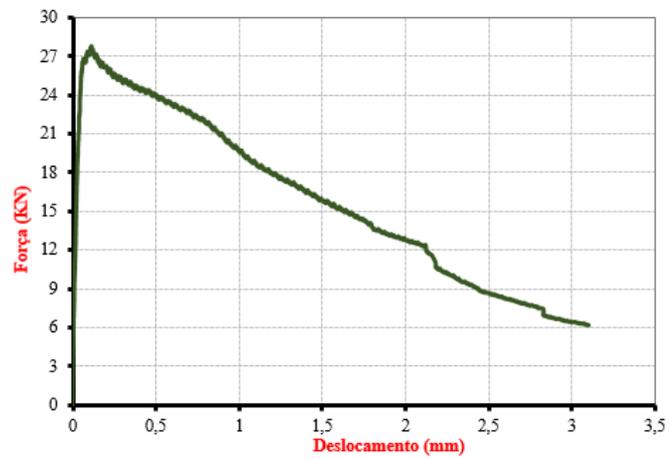


b) Corpo de prova B

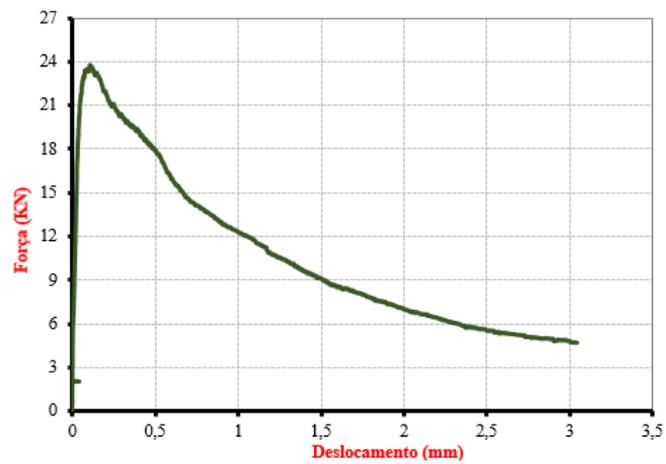


c) Corpo de prova C

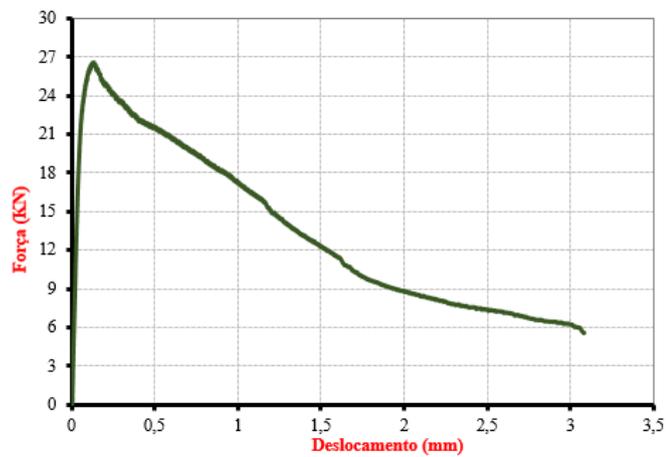
Fonte: Autor

**Figuras A.6 – Curvas P- $\delta$  para o compósito CP1A0.25V**

a) Corpo de prova A

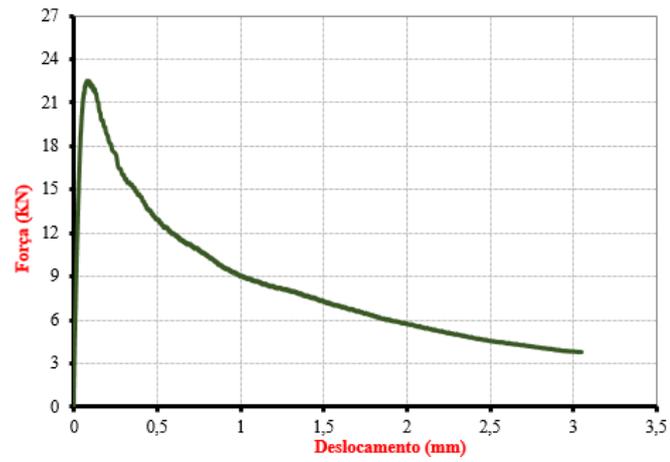


b) Corpo de prova B

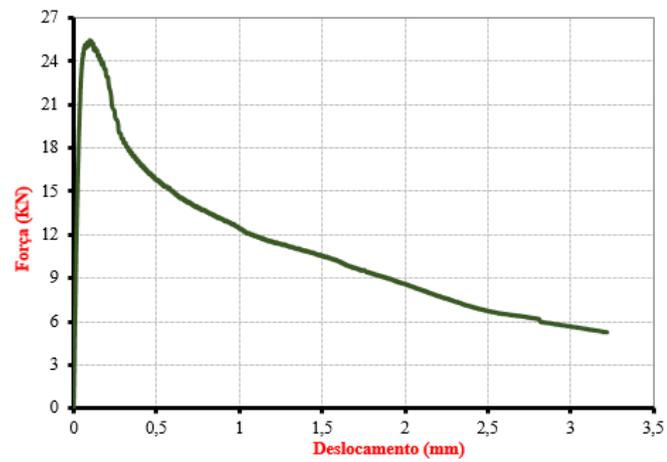


c) Corpo de prova C

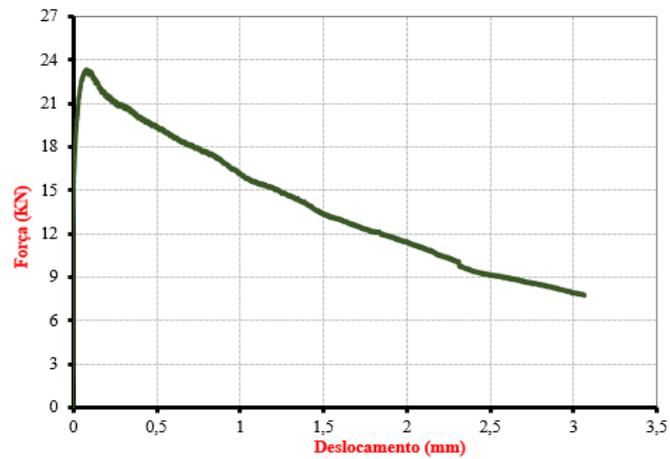
Fonte: Autor

**Figuras A.7 – Curvas P- $\delta$  para o compósito CP1A0.50V**

a) Corpo de prova A



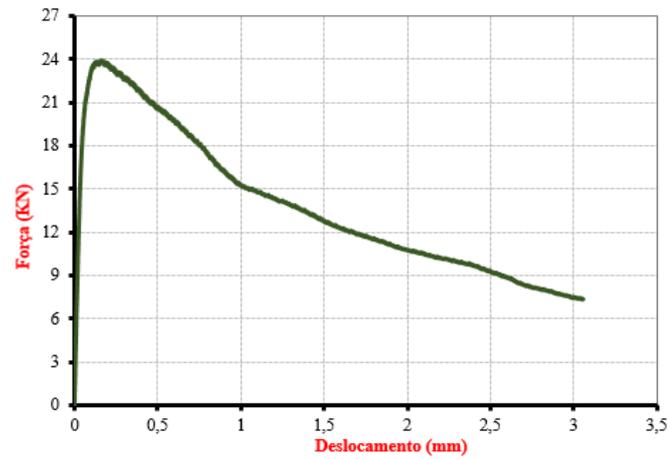
b) Corpo de prova B



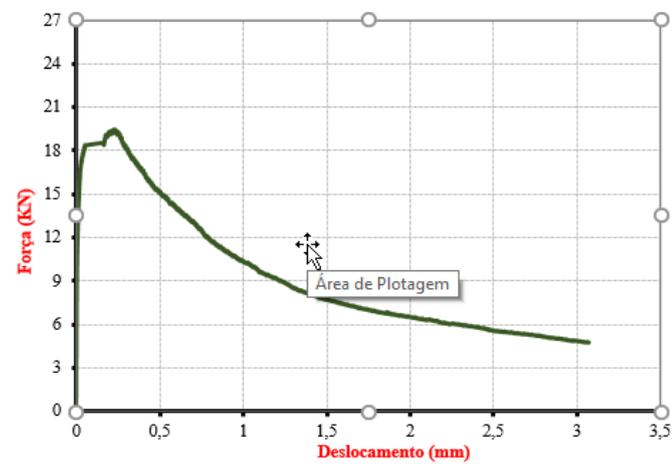
c) Corpo de prova C

Fonte: Autor

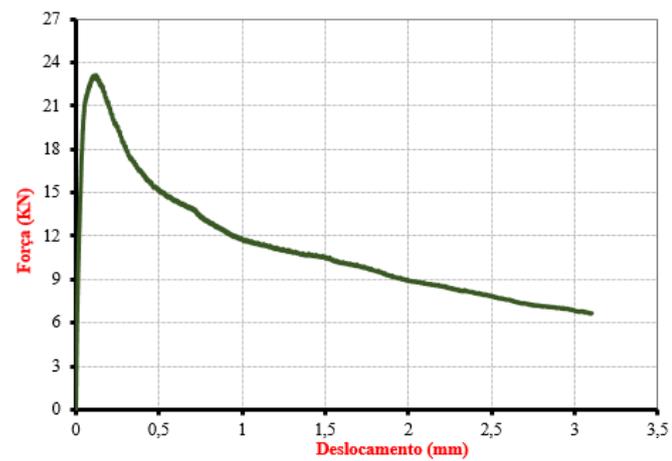
**Figuras A.8 – Curvas P- $\delta$  para o compósito CP1A0.75V**



a) Corpo de prova A

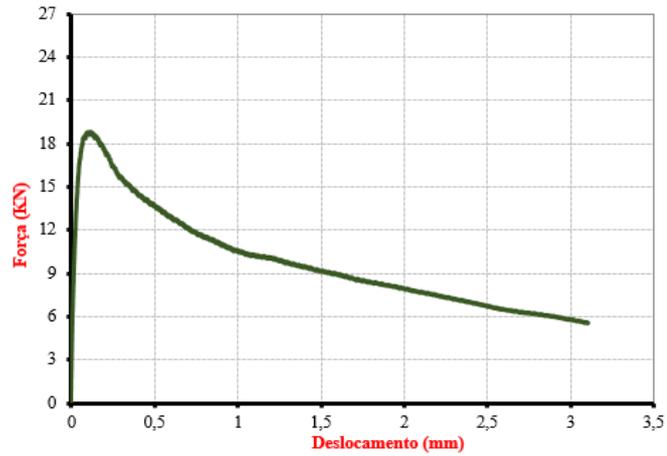


b) Corpo de prova B

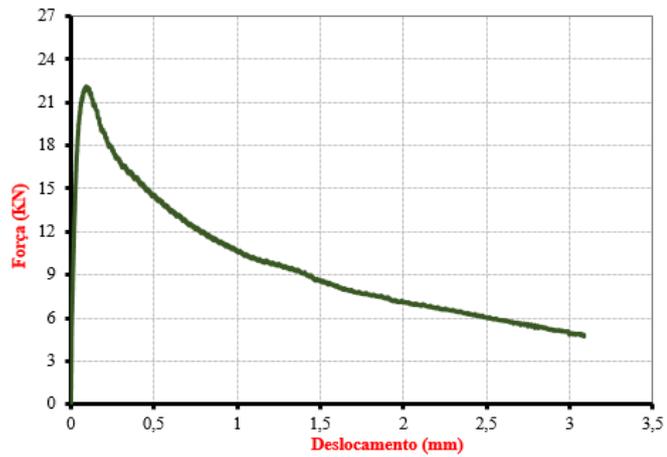


c) Corpo de prova C

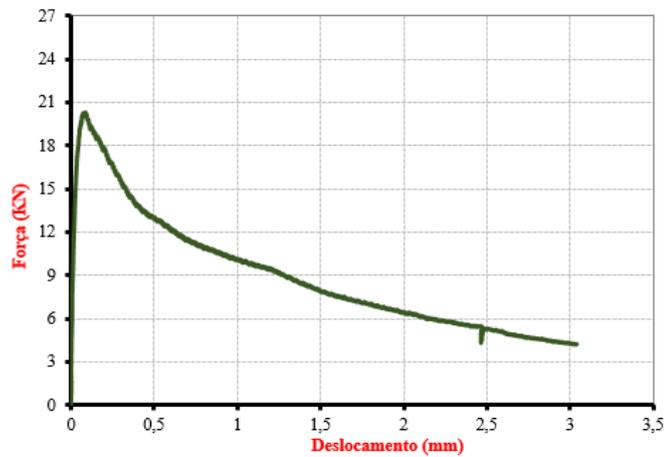
Fonte: Autor

**Figuras A.9 – Curvas P- $\delta$  para o compósito CP1A1V**

a) Corpo de prova A

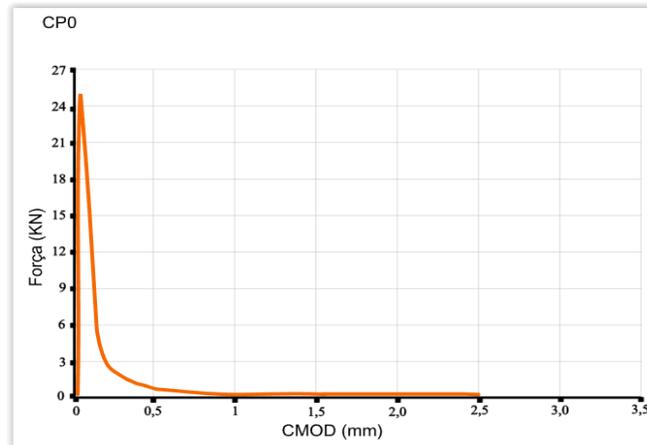


b) Corpo de prova B

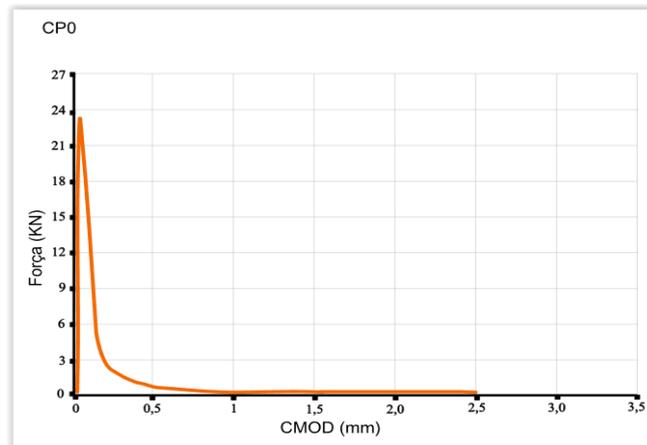


c) Corpo de prova C

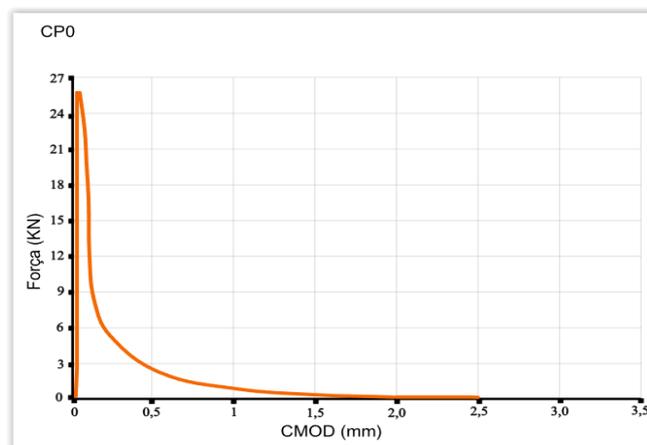
Fonte: Autor

**APÊNDICE B – Curvas Força (P) versus abertura da fissura (CMOD)****Figuras B.1 – Curvas P-CMOD para o compósito CP0**

a) Corpo de prova A

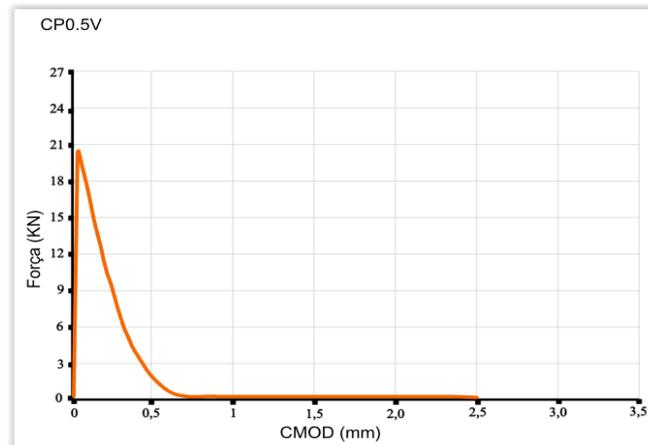


b) Corpo de prova B

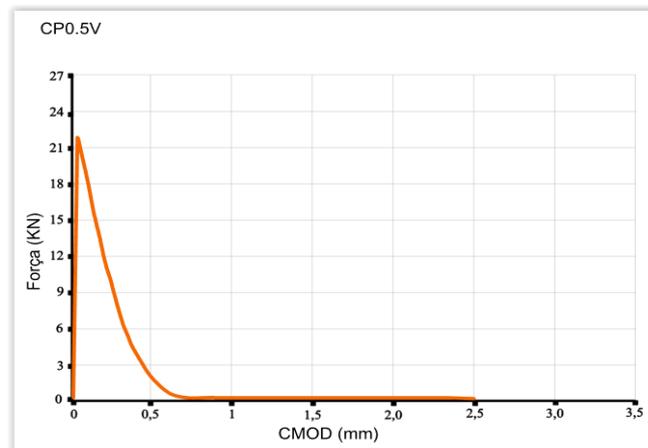


c) Corpo de prova C

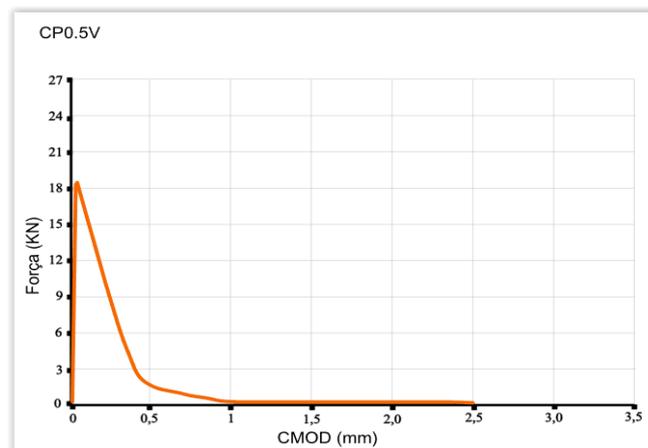
Fonte: Autor

**Figuras B.2 – Curvas P-CMOD para o compósito CP0.50V**

a) Corpo de prova A

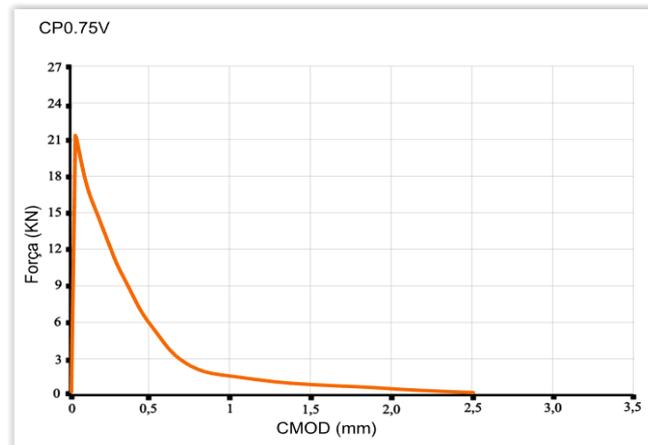


b) Corpo de prova B

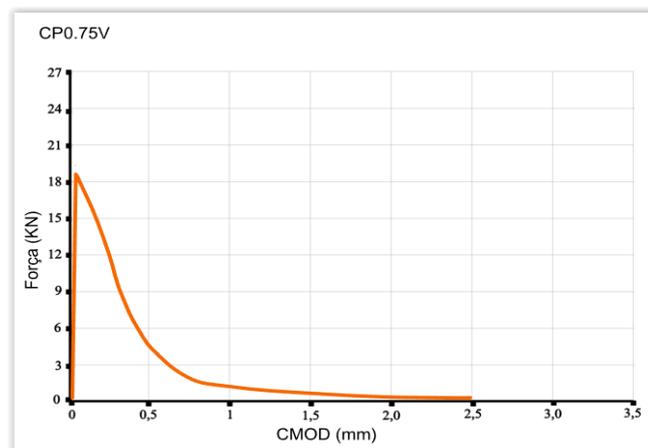


c) Corpo de prova C

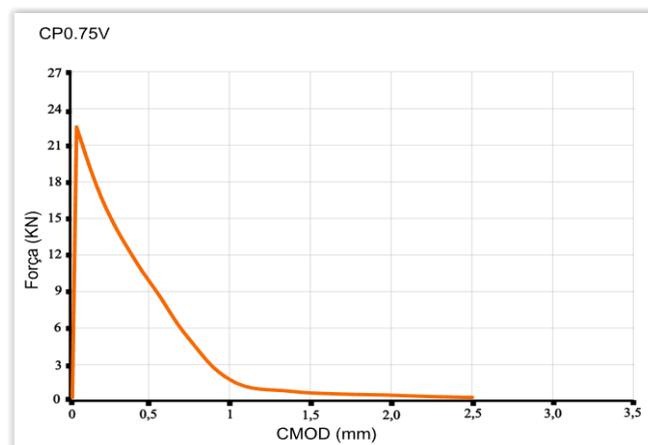
Fonte: Autor

**Figuras B.3 – Curvas P-CMOD para o compósito CP0.75V**

a) Corpo de prova A

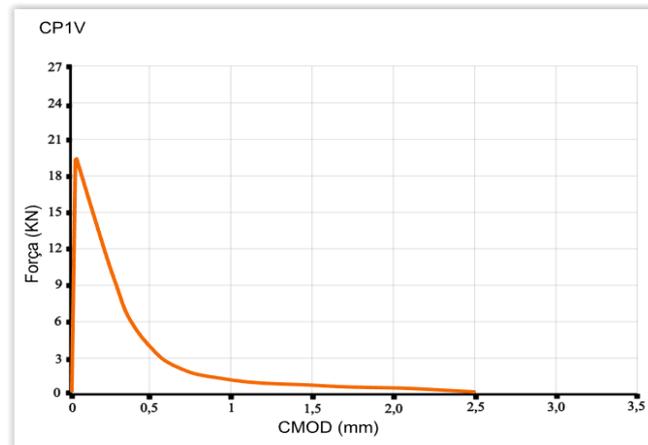


b) Corpo de prova B

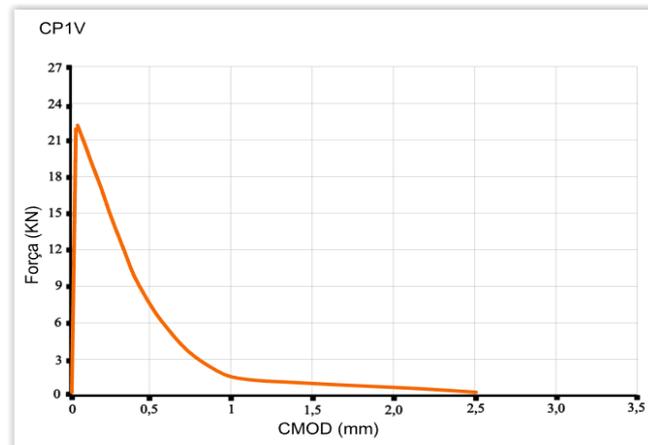


c) Corpo de prova C

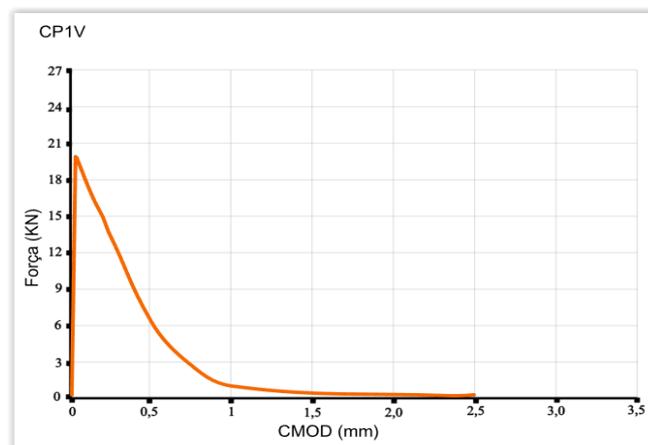
Fonte: Autor

**Figuras B.4 – Curvas P-CMOD para o compósito CP1V**

a) Corpo de prova A

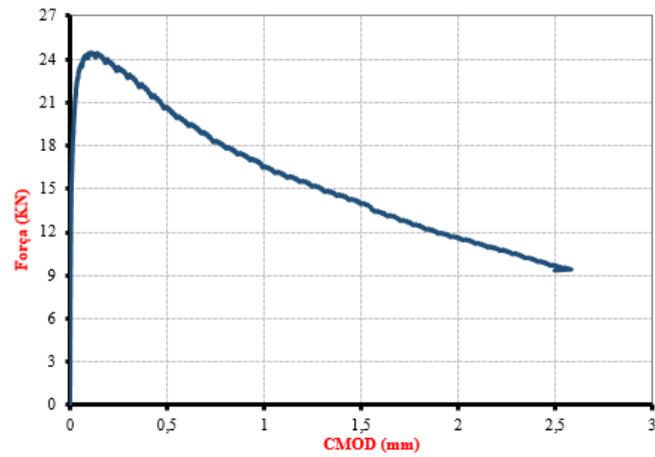


b) Corpo de prova B

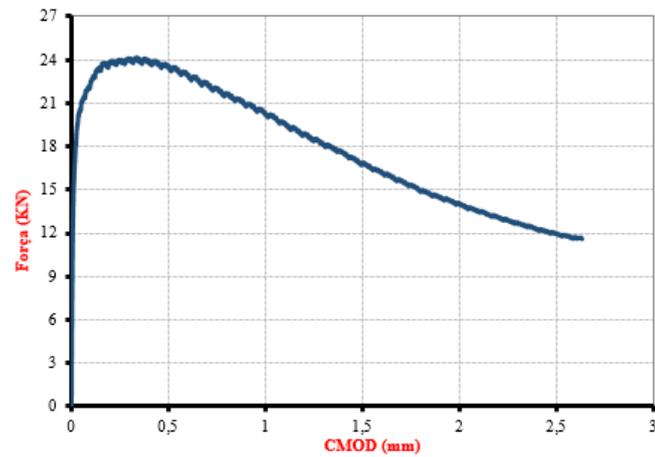


c) Corpo de prova C

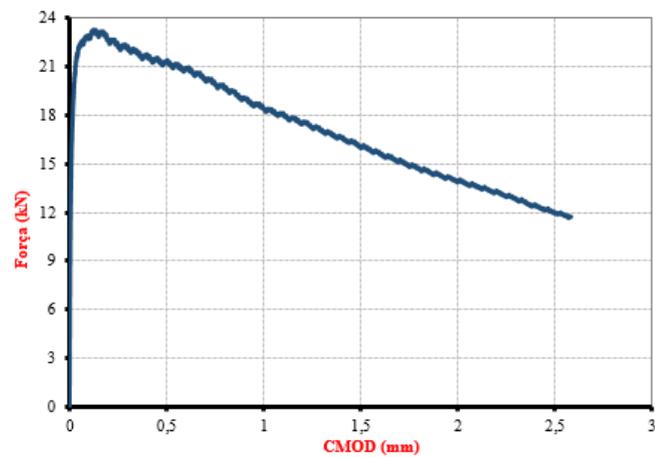
Fonte: Autor

**Figuras B.5 – Curvas P-CMOD para o compósito CP1A**

a) Corpo de prova A

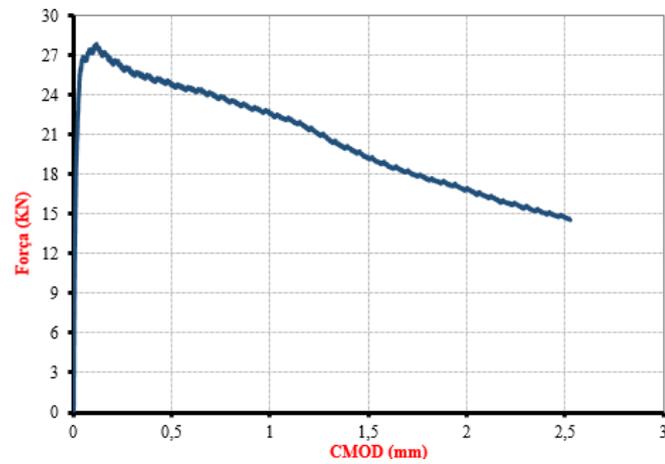


b) Corpo de prova B

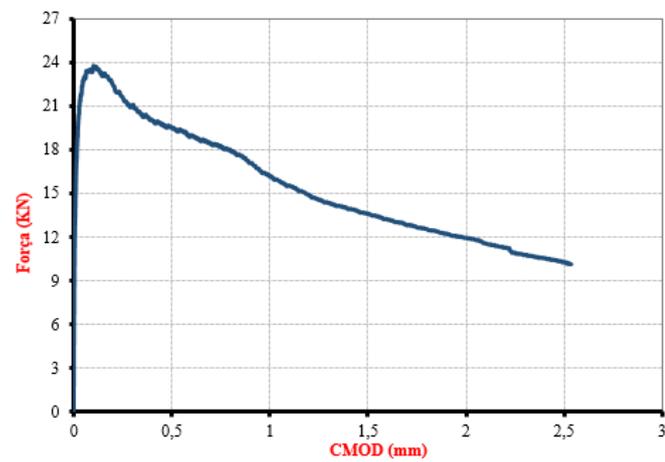


c) Corpo de prova C

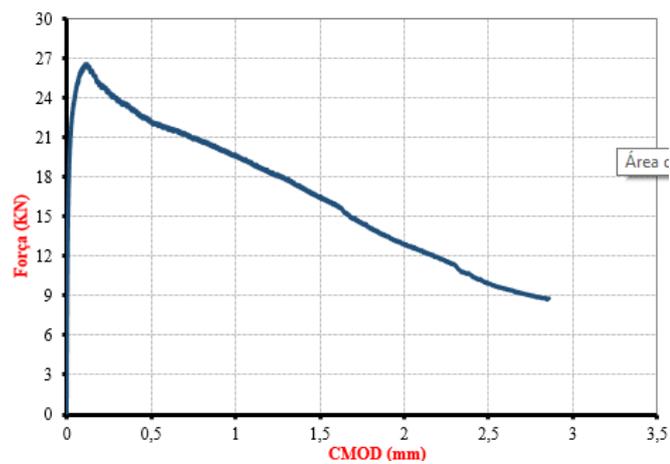
Fonte: Autor

**Figuras B.6 – Curvas P-CMOD para o compósito CP1A0.25V**

a) Corpo de prova A

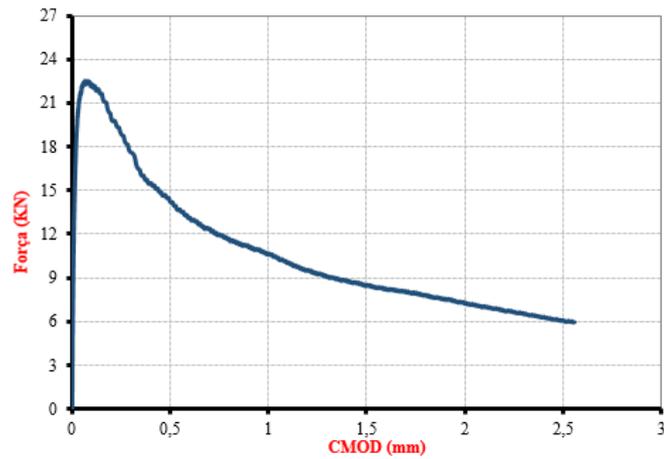


b) Corpo de prova B

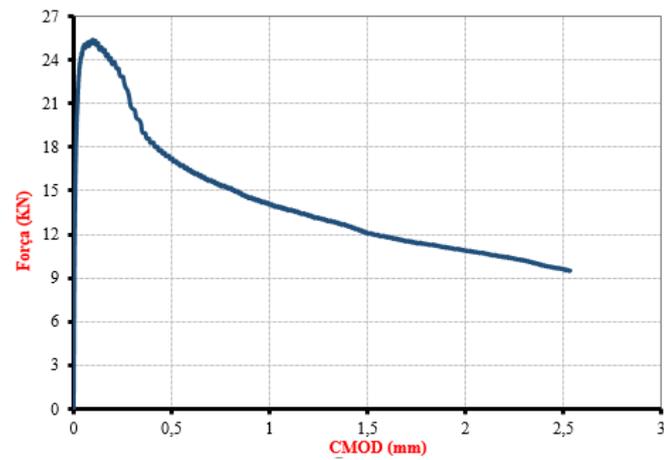


c) Corpo de prova C

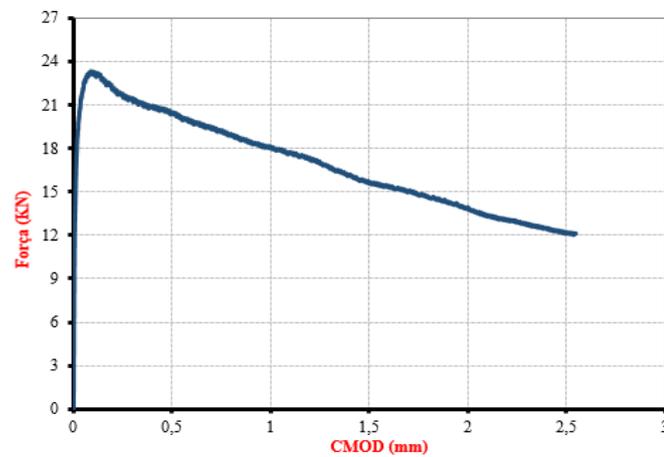
Fonte: Autor

**Figuras B.7 – Curvas P-CMOD para o compósito CP1A0.50V**

a) Corpo de prova A

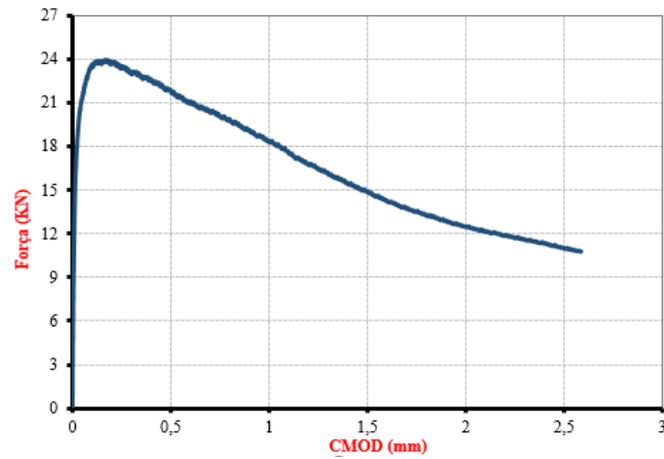


b) Corpo de prova B

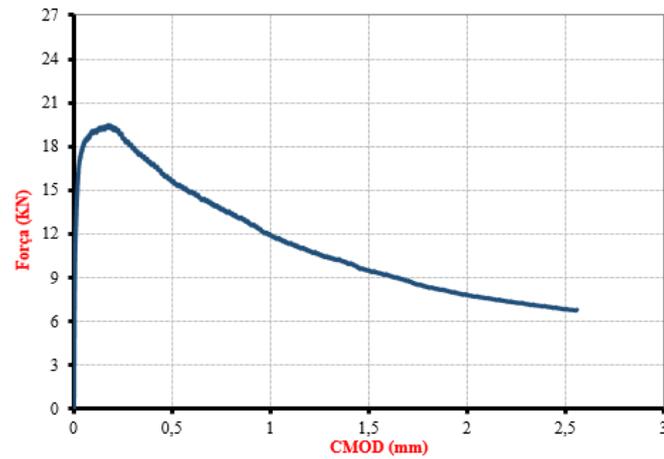


c) Corpo de prova C

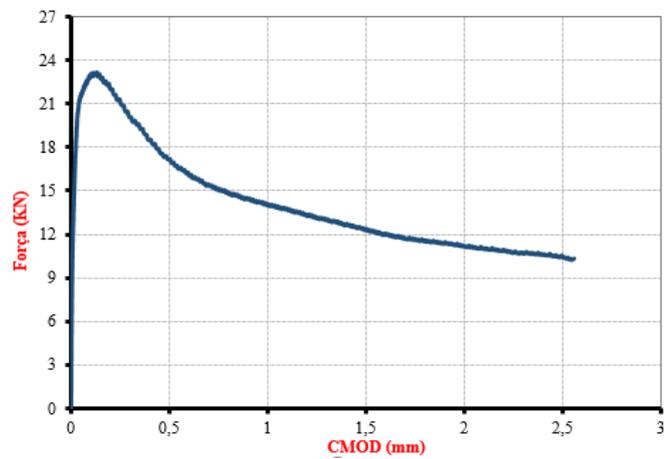
Fonte: Autor

**Figuras B.8 – Curvas P-CMOD para o compósito CP1A0.75V**

a) Corpo de prova A

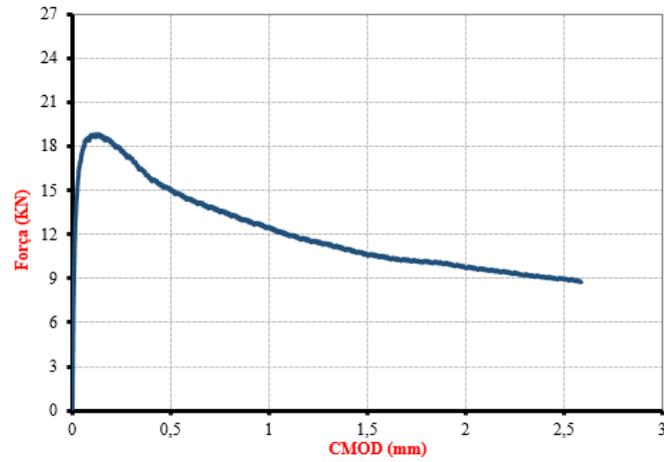


b) Corpo de prova B

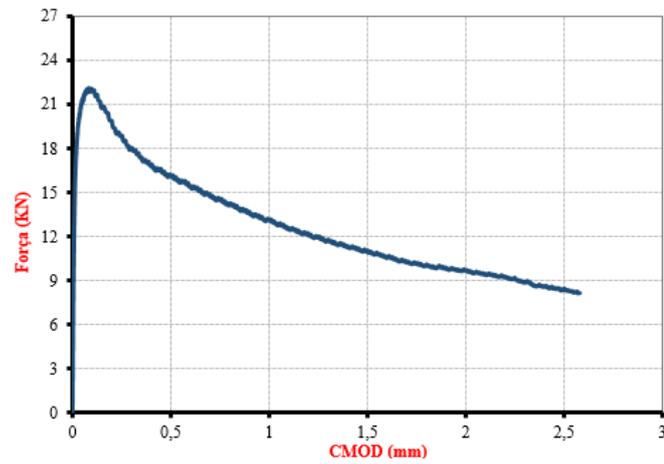


c) Corpo de prova C

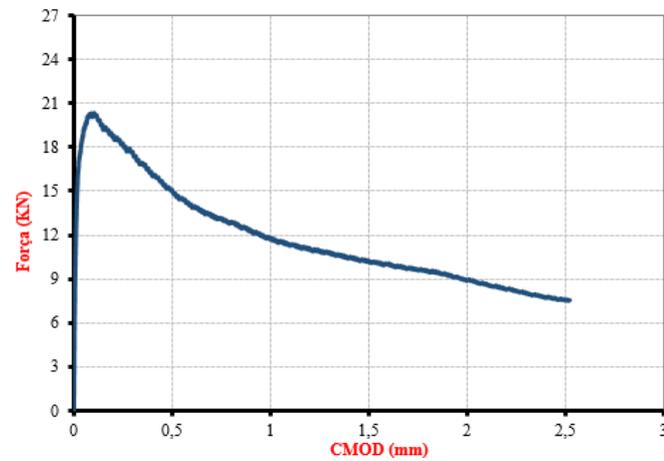
Fonte: Autor

**Figuras B.9 – Curvas P-CMOD para o compósito CP1A1V**

a) Corpo de prova A



b) Corpo de prova B



c) Corpo de prova C

Fonte: Autor