

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE LORENA**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**JOÃO PEDRO MARCONDES CAMPOS**

**MEDIDA DE ENERGIA DE FRATURA DE COMPÓSITOS  
ARGAMASSA/FIBRA DE BAMBU PELO MÉTODO DA CUNHA**

Lorena  
2022

JOÃO PEDRO MARCONDES CAMPOS

MEDIDA DE ENERGIA DE FRATURA DE COMPÓSITOS  
ARGAMASSA/FIBRA DE BAMBU PELO MÉTODO DA CUNHA

Projeto de Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à Escola de Engenharia de Lorena  
da Universidade de São Paulo, como requisito  
parcial para a obtenção do título de Engenheiro  
de Materiais.

Orientador: Prof. Sebastião Ribeiro

Lorena  
2022

## **AGRADECIMENTOS**

Meus mais sinceros agradecimentos a todos os que fizeram parte dessa minha trajetória, especialmente ao meu pai Luiz Corrêa de Campos, minha falecida mãe Maria Adelaide Marcondes Campos que nos deixou no ano de 2022 e sempre acreditou em mim e na conclusão do meu curso. Agradeço também aos meus irmãos, tios, tias e avós.

Dedico este trabalho a todos meus amigos de curso e de vida que direta ou indiretamente contribuíram para essa conquista.

Meus agradecimentos também ao professor Sebastião Ribeiro e ao corpo docente da Universidade de São Paulo que tanto me auxiliou nesses anos.

## Epígrafe

*“O essencial é invisível aos olhos”.*

*Antoine de Saint-Exupéry*

**CAMPOS, João Pedro Marcondes. MEDIDA DE ENERGIA DE FRATURA DE COMPÓSITOS ARGAMASSA/FIBRA DE BAMBU PELO MÉTODO DA CUNHA. 2022. 33 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Materiais, Demar, Universidade de São Paulo, Lorena, 2022.**

## **RESUMO**

O consumo de cimento ao longo dos anos tem aumentado muito devido ao processo de industrialização, desenvolvimento, crescente aumento populacional no planeta vem sendo cada vez mais requisitado matérias-primas que agridam menos o meio ambiente e otimização de processos tradicionais e já conhecidos.

Com isso, o presente estudo teve como objetivo a confecção de uma argamassa incorporada com fibras de bambu de granulometria previamente determinada, alterando sua composição em 0%, 2,5% e 5% de fibra de bambu nos corpos de prova, as porcentagens foram calculadas em relação ao somatório de massa de cal e cimento. Foram produzidas ao todo 12 corpos de provas, sendo 4 para cada grupo e usando um tempo de cura de 28 dias imerso em solução saturada de água e cal.

Após o período de cura, as amostras foram submetidas ao Método da Cunha como forma de obter a energia de fratura para uma posterior comparação entre as diferentes composições.

Dessa forma foi possível concluir um ganho em mais de 50% na energia de fratura e aproximadamente 37% aumento na força máxima para o aparecimento da trinca em relação ao controle.

Palavra-chave: argamassa, cimento, energia de fratura, fibra de bambu, Método da Cunha.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Consumo de cimento ao longo dos anos .....	10
Figura 2 - Tipos de cimentos Portland mais utilizados .....	11
Figura 3 - Tempo de liberação e concentração de $Ca^{2+}$ em função do tempo de hidratação .....	14
Figura 4 - Esquema de hidratação do cimento no processo de cura .....	16
Figura 5 - Componentes da argamassa .....	17
Figura 6- Tipo de argamassa utilizada na construção civil.....	17
Figura 7- Fluxograma de fibras .....	19
Figura 8- Mecanismo de funcionamento da fibras .....	22
Figura 9- Representação do corpo de prova submetido ao Método da Cunha ..	23
Figura 10- Conjunto de peneiras na mesa vibratória.....	25
Figura 11- Conjunto de peneiras utilizadas para separar as fibras de bambu.....	26
Figura 12- Misturador Planetário .....	26
Figura 13- Molde com argamassa na mesa vibratória.....	27
Figura 14- Estufa usada para a secagem dos corpos de prova.....	28
Figura 15- Retificadora Ferdimat TA60A usada na retificação dos corpos de prova.....	28
Figura 16 - Máquina universal de ensaios mecânicos Emic/ instron modelo DL 3000 .....	29
Figura 17 - Curvas força-deslocamento das amostras escolhidas para representar o lote do grupo 0%: (a) Amostra A1; (b) Amostra A2; (c) Amostra A3; (d) Amostra A4 .....	30
Figura 18 - Curvas força-deslocamento das amostras escolhidas para representar o lote do grupo 2,5%: (a) Amostra B1; (b) Amostra B2; (c) Amostra B3; (d) Amostra B4 .....	31
Figura 19 - Curvas força-deslocamento das amostras escolhidas para representar o lote do grupo 5%: (a) Amostra C1; (b) Amostra C2; (c) Amostra C3; (d) Amostra C4 .....	32
Figura 20- Comparaçao da distribuição de fibras entre os grupos .....	33

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Composição química média do cimento .....	11
Tabela 2 - Simplificação de fórmulas na reação de hidratação.....	14
Tabela 3 - Composição básica das amostras em gramas .....	25
Tabela 4 - Média e desvio padrão da média para energia de fratura e força máxima.....	33

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>9</b>
1.1. Justificativa	9
1.2. Objetivo	9
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>9</b>
2.1.1. Cimento	9
2.1.2. Consumo Nacional	9
2.1.3. Composição	10
2.1.4. Tipos	11
2.1.4.1. CP I ou CP I - S	12
2.1.4.2. CP II (E, F ou Z)	12
2.1.4.3. CP III	12
2.1.4.4. CP IV	12
2.1.4.5. CP V - ARI	13
2.1.5. Cura	13
2.1.5.1. Estágio inicial ou pré indução	14
2.1.5.2. Estágio de indução	15
2.1.5.3. Estágio de aceleração	15
2.1.5.4. Estágio de desaceleração	15
2.1.5.5. Estágio final	16
2.2. Argamassa	17
2.2.1. Tipos de argamassas	17
2.2.1.1. Argamassa de assentamento de alvenaria	18
2.2.1.2. Argamassa de revestimento	18
2.2.1.3. Argamassa Colante	18
2.2.1.4. Argamassa de Rejunte	18
2.3. Fibras	19
2.3.1. Fibras Sintéticas	19
2.3.2. Fibras Naturais	19
2.3.2.1. Fibra de bambu	20
2.3.3. Influência da fibra na matriz	20
2.4. Energia de Fratura	22
2.4.1. Método da Cunha	23
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>24</b>
3.1. Confecção das Amostras	24
3.1.1. Cura	27
3.1.2. Secagem	28
3.1.3. Retificação	28
3.1.4. Ensaio pelo Método da Cunha	29

<b>4. RESULTADOS</b>	<b>30</b>
<b>5. DISCUSSÃO</b>	<b>35</b>
<b>6. CONCLUSÃO</b>	<b>35</b>
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>36</b>

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. Justificativa

Com o avanço da tecnologia nas últimas décadas buscou-se aprimorar os materiais conhecidos pelo homem, aumentando sua resistência e durabilidade reduzindo custos e ao mesmo tempo trazendo o menor impacto ambiental possível com materiais ecologicamente corretos. O mesmo aconteceu na construção civil com o uso de fibras sintéticas de composição polimérica introduzido em argamassas com o objetivo de aumentar a resistência mecânica, porém essa solução gera uma problemática ambiental. Dessa forma faz-se necessário que o estudo analise a viabilidade do uso de fibras naturais para aplicação em argamassas visando o ganho da energia de fratura. [1]

### 1.2. Objetivo

O presente trabalho tem como objetivo analisar o comportamento mecânico da argamassa sob influência da fibra de bambu em diferentes composições, tendo como parâmetro a energia de fratura das amostras usando o método da cunha como forma de obtenção dos dados.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1.1. Cimento

O cimento é um dos materiais mais utilizados na construção civil em várias etapas da construção. Pode ser classificado como um aglomerante hidráulico que em contato com água por meio de processo físico-químico tem a capacidade de atingir grande resistência à compressão [2].

Uma importante *commodity* na qual é possível avaliar o grau de evolução econômica de um país.

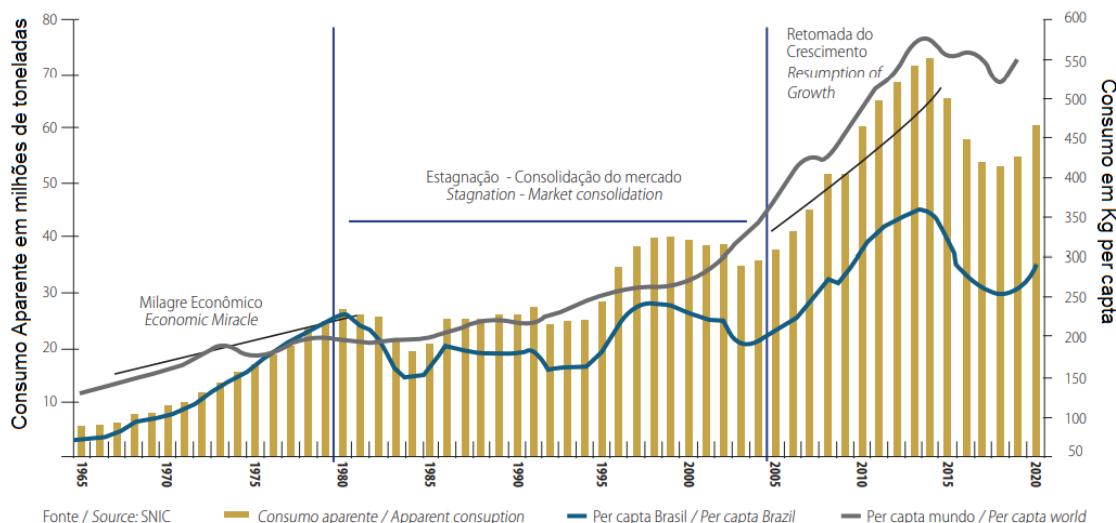
### 2.1.2. Consumo Nacional de cimento

O consumo de cimento nacional está diretamente relacionado com a construção civil, que por sua vez está relacionada com o crescimento econômico

do país. Dessa forma podemos mensurar o desenvolvimento econômico usando esse parâmetro. [3]

Como ilustrado na Figura 1 pode-se comparar o desempenho do Brasil e do mundo em diferentes épocas, durante a época do milagre econômico no Brasil investiu-se muito em construção civil proporcionando um desenvolvimento na sociedade, porém o mesmo não ocorreu no início dos anos 80, que ficou conhecido como a década perdida, ao início dos anos 2000 o qual o Brasil ainda passava por muitas reestruturações monetárias para controle da inflação. Após o início dos anos 2000 nota-se um crescimento no consumo tanto no Brasil quanto no mundo, momento em que a economia estava em desenvolvimento. [3]

Figura 1 - Consumo de cimento no Brasil em milhões de toneladas ao longo dos anos



Fonte: Sindicato Nacional da Indústria de Cimento (2020) [3]

### 2.1.3. Composição do cimento

O cimento pode ser considerado um aglomerante ativo e hidráulico composto basicamente de aluminossilicatos complexos que quando se misturam com água formam uma massa gelatinosa que no seu processo de cristalização endurece e promove o ganho de resistência mecânica [4].

Os principais elementos presentes no cimento podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1 - composição química média do cimento

	Óxidos	% porcentagem
Principais	Óxido de cálcio- $CaO$	60 a 68%
	Dióxido de silício- $SiO_2$	17 a 25%
	Óxido de alumínio- $Al_2O_3$	2 a 9%
	Óxido de Ferro III - $Fe_3O_3$	0,5 a 6%
Secundários	Óxido de Magnésio - $MgO$	0,1 a 4%
	Trióxido de enxofre - $SO_3$	0,1 a 4%
Álcalis	$Na_2O$	1 a 3%
	$K_2O$	0,5 a 1,5%

Fonte: Campos (2017) [5]

#### 2.1.4. Tipos de cimento

No Brasil, o cimento mais consumido é o Portland e são produzidos vários tipos de Portland e diferenciando-se principalmente devido à sua composição química segundo a ASTM C 150 que define que cimento Portland é um aglomerante hidráulico produzido na moagem de clínquer (composto na sua maior parte de silicato de cálcio), o clínquer pode ter de 5 a 25 mm de diâmetro [2].

No Quadro 1 pode-se analisar as diferenças entre os principais tipos de cimento Portland e quantidades de matéria-prima.

Quadro 1 - Tipos de cimentos Portland mais utilizados

Cimento Portland (ABNT)	Tipo	Clínquer + Gesso (%)	Escória siderúrgica (%)	Material pozolânico (%)	Calcário (%)
CP I	Comum	100	-	-	-
CP I - S	Comum	95-99	1-5	1-5	1-5
CP II - E	Composto	56-94	6-34	-	0-10
CP II - Z	Composto	76-94	-	6-14	0-10
CP II - F	Composto	90-94	-	-	6-10
CP III	Alto-forno	25-65	35-70	-	0-5
CP IV	Pozolânico	45-85	-	15-50	0-5
CP V - ARI	Alta resistência inicial	95-100	-	-	0-5

Fonte: E-civil [2]

#### 2.1.4.1. CP I ou CP I - S

Foi o primeiro cimento Portland lançado no Brasil, atualmente pouco usado no país. Na sua composição não apresenta adição além de gesso e clínquer (CP I) já CP I-S além de clínquer e gesso pode ter uma pequena quantidade de aditivo [6].

#### 2.1.4.2. CP II (E, F ou Z)

O CP II-E faz referência ao cimento Portland composto com escória e possui mais aditivos do que outros cimentos, segundo NBR 11578. O nível de escória pode variar de 6 a 34%. Esse tipo de cimento é comumente utilizado em materiais que não liberam tanto calor [7].

O CP II-F refere-se ao cimento Portland composto com *fíler* que pode apresentar 6 a 10% de calcário, conhecido por ter boa resistência e ser usado em obras com concreto armado [7].

O CP II-Z é conhecido como cimento Portland com pozolana por apresentar de 6 a 14% de material pozolânico, além de possuir até 10% de *fíler*. Esse tipo de cimento é indicado para obras subterrâneas ou situações em que há contato constante com água [7].

#### 2.1.4.3. CP III

É conhecido também como cimento de alto forno e tem como sua principal característica sua grande durabilidade, baixo calor de hidratação, impermeável e muito versátil em sua aplicação podendo ser usado em obras convencionais até viaduto, pista de aeroportos, entre outros. Em sua composição pode apresentar de 35 a 70% de escória siderúrgica [7].

#### 2.1.4.4. CP IV

O cimento Portland pozolânico possui alta resistência à compressão, podendo conter de 15 a 50% de material pozolânico que faz com que diminua a permeabilidade e a porosidade capilar dessa forma aumentando a estabilidade do concreto. Pode ser utilizado em obras que existam grandes variações de temperatura [7][8].

#### 2.1.4.5. CP V - ARI

O cimento Portland de alta resistência inicial leva esse nome justamente por atingir altas resistências logo nos primeiros dias de aplicação, porém continua ganhando resistência até 28 dias de cura. Em sua composição pode ter até 5% de *filler* calcário. Esse tipo de cimento é muito recomendado para pisos industriais, argamassa armada, entre outros. Porém, não é recomendado para concreto além disso o consumo dele é baixo devido ao alto valor [9].

#### 2.1.5. Cura

Ao adicionar água no cimento instantaneamente ocorre a troca de íons entre a fase sólida e a líquida. O alto grau de solubilidade de alguns componentes presentes no clínquer permite que haja uma elevação na concentração dos aluminatos, sulfatos, álcalis (sódio, potássio e cálcio) na porção líquida [9].

Destaque para algumas composições presentes na fase líquida que tem contato direto com o cimento [10]:

- Silicatos de Cálcio:  $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot (\text{C}_3\text{S})$  e  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot (\text{C}_2\text{S})$ :  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{OH}^-$
- Aluminatos de Cálcio  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot (\text{C}_3\text{A})$  e ferritas  $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$

- $(C_4AF)$ :  $Ca^{2+}$  e  $Al(OH)^{4-}$ ;
- Sulfato de Cálcio  $(CaSO_4)$ :  $Ca^{2+}$  e  $SO_4^{2-}$ ;
- Sulfatos Alcalinos  $(Na_2SO_4$  e  $K_2SO_4)$ :  $Na^+$ ,  $K^+$  e  $SO_4^{2-}$

À medida que o tempo passa com a dissolução do clínquer acaba formando compostos com uma solubilidade menor, o que leva a precipitação de hidratos na composição da pasta já endurecida [10].

O mecanismo de hidratação é dividido em 5 etapas conforme ilustrado na Figura 3: O estágio inicial (I), indução (II), aceleração (III), desaceleração (IV), estágio final (V) [10].

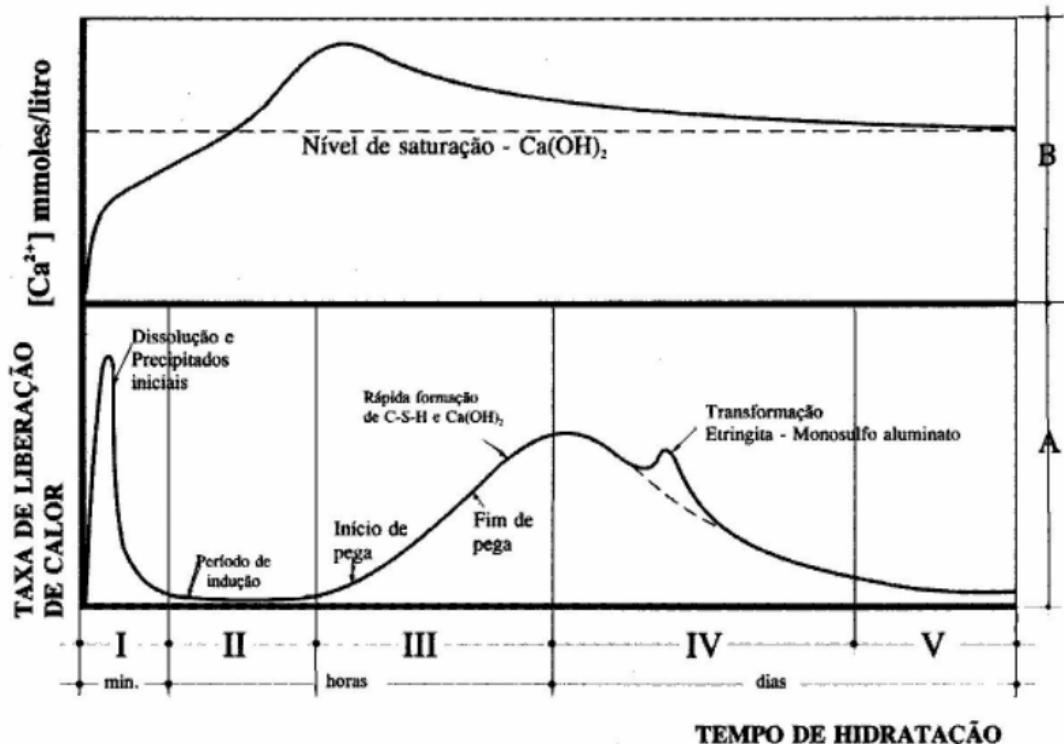
Para uma melhor compreensão, alguns compostos foram simplificados conforme a Tabela 2.

Tabela 2- Simplificação de fórmulas na reação de hidratação

Inicial	Composto	Exemplo
C	$CaO$	$C_3S - 3 CaO.SiO_2$ - Silicato trí-cálcico
S	$SiO_2$	$C_2S - 2 CaO.SiO_2$ - Silicato di-cálcico
A	$Al_2O_3$	$C_3A - 2 CaO.Al_2O_3$ - Silicato di-cálcico
F	$Fe_2O_3$	$C_4AF - 4 CaO.Al_2O_3Fe_2O_3$ - Ferro aluminato tetra-cálcio
H	$H_2O$	$C_4\bar{S}H_2 - CaSO_4 \cdot 2H_2O$ - Sulfato de cálcio di-hidratato
$\bar{S}$	$SO_3$	$C_4\bar{S}H_2 - CaSO_4 \cdot 2H_2O$ - Sulfato de cálcio di-hidratato

Fonte: adaptado de TAYLOR, 1998 [11]

Figura 3 - Tempo de hidratação e concentração de  $Ca^{2+}$  em função do tempo de hidratação



Fonte: QUARCIANI, V. A. [10]

#### 2.1.5.1. Estágio inicial ou pré indução

Nessa etapa temos um pico acentuado de liberação de calor devido liberação de alguns íons como  $Na^+, K^+$  e  $SO_4^{2-}$  proveniente dos sulfatos alcalinos, além disso também ocorre a dissolução até a saturação do sulfato de cálcio, liberando  $Ca^{2+}$  e  $SO_4^{2-}$ , o sulfato de cálcio hemihidratado ( $CaSO_4 \cdot \frac{1}{2}H_2O$ ) também passa por uma mudança na hidratação e se transforma em dihidratado ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ) contribuindo para a curva exotérmica acentuada [10].

É nessa etapa também que ocorre a dissolução das fases anidras ( $C_3S$ ,  $C_3A$ ,  $C_4AF$ ) e ocorre a liberação dos íons. Os íons provenientes do  $C_3A$ ,  $C_4AF$  reagem com o  $Ca^{2+}$  e o  $SO_4^{2-}$  inicia-se a formação uma camada de gel de silicato hidratado (amorfo e rico em aluminato) (C-S-H) na superfície dos grãos anidro de clínquer [10].

#### 2.1.5.2. Estágio de indução

Nesse estágio há uma diminuição drástica na liberação de calor porém a concentração de  $Ca^{2+}$  e  $OH^-$  continuam crescendo, elevando o grau de saturação de  $Ca(OH)_2$  atingindo o ponto de supersaturado. O tempo para atingir a supersaturação varia de acordo com a relação água/cimento e do tamanho dos cristais de  $C_3S$  porém a duração média é entre 30 minutos a 3 horas para que os íons de cálcio atinjam o ponto de saturação e inicie seu declínio (período também conhecido como dormência) [10].

A camada de gel iniciada na etapa anterior é formada e gera uma espécie de barreira entre as fases anidras e a solução aquosa [10].

#### 2.1.5.3. Estágio de aceleração

Nessa etapa o mecanismo predominante é o de dissolução-precipitação, em consequência da supersaturação iônica e há formação de C-S-H e  $CH[Ca(OH)_2]$ . Nessa formação há um consumo do  $Ca^{2+}$  em solução que faz com que reduza gradualmente sua concentração [10].

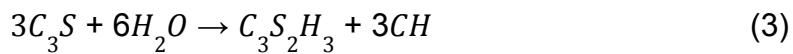
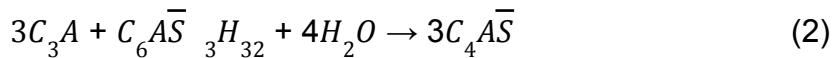
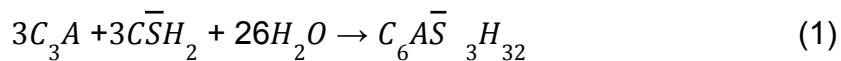
Nessa etapa também ocorre o último pico de liberação de calor devido à hidratação rápida dos silicatos, sobretudo a alita ( $C_3S$ ) até atingirem a taxa máxima. Nessa etapa, a formação de C-S-H controla a taxa de hidratação [10].

#### 2.1.5.4. Estágio de desaceleração

Essa etapa se destaca pela diminuição da liberação de calor, resultado devido à precipitação de hidratos responsável pelo revestimento das partículas de cimento, essa partícula dificulta a solubilização das fases anidras. A redução na liberação da energia se dá também pela redução da concentração de íons no meio, mas mesmo com a baixa concentração e redução na velocidade ainda há formação de silicatos de cálcio hidratados e difusão iônica entre as moléculas [10].

### 2.1.5.5. Estágio final

A hidratação prossegue nessa etapa em que o produto preenche gradativamente ocupando os espaços anteriormente ocupados pelo excedente de água. Com a densificação da pasta segue as reações de hidratação pelo mecanismo topoquímico [10].



Na Figura 4 é pode-se visualizar esquematicamente cada uma das etapas citadas anteriormente até o estágio final.

Figura 4 - Esquema de hidratação do cimento no processo de cura



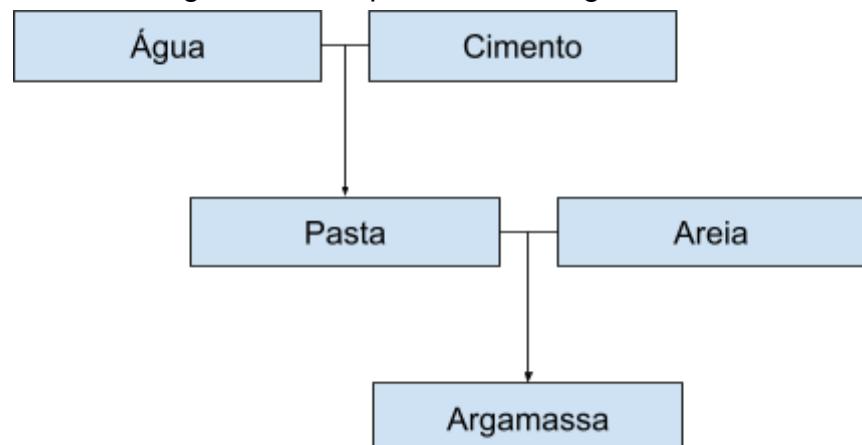
Fonte: Laguna e Ikematsu [12]

## 2.2. Argamassa

A argamassa consiste em uma mistura de cimento, areia, água e outros aditivos com compostos, como ilustrado na figura 5. Ela é comumente utilizada

como ligação entre interfaces como assentamento de pisos, ligação de tijolos e revestimentos, resistindo a esforços laterais além de absorver as deformações que ocorrem naturalmente ou por efeitos térmicos [13].

Figura 5 - Componentes da argamassa

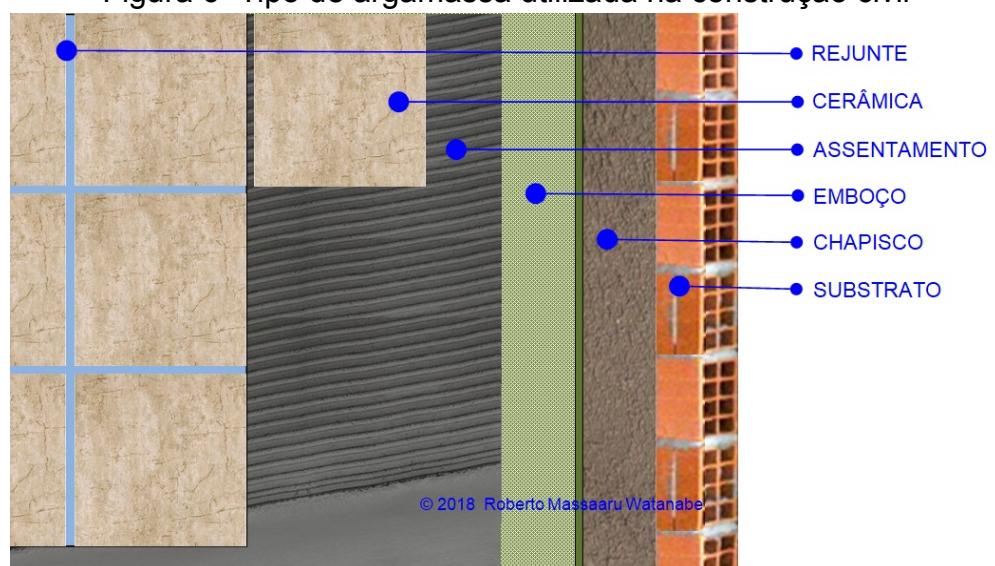


Fonte: Adaptado de (ZAGO, 2019) [14]

### 2.2.1. Tipos de argamassas

As argamassas podem ser classificadas em 4 tipos como ilustrado na figura 6:

Figura 6- Tipo de argamassa utilizada na construção civil



Fonte: AS PATOLOGIAS... (2020) [15]

#### **2.2.1.1. Argamassa de assentamento de alvenaria**

Esse tipo de argamassa é comumente utilizado para assentamento de blocos cerâmicos. Tem como objetivo promover a ancoragem mecânica [16].

A argamassa de assentamento pode ser produzida em uma central ou na própria obra, com auxílio de betoneiras ou até mesmo comprar pronta [16].

A argamassa estabilizada é o tipo mais comum de argamassa pronta, isso porque ela recebe uma adição polimérica que retarda a hidratação do cimento, que evita que o material endureça antes da aplicação [16].

Esse tipo de material permite que haja uma menor mão de obra e desperdício, consequentemente reduzindo custos [16].

#### **2.2.1.2. Argamassa de revestimento**

O revestimento é uma etapa que tem como objetivo corrigir imperfeições e dar rugosidade. Ela é subdividida em três categorias [16]:

- **Chapisco:** O chapisco é a primeira camada aplicada logo na superfície do tijolo e tem como característica um acabamento mais grosso e áspero para maior aderência das próximas camadas.
- **Emboço:** O emboço é uma camada intermediária, aplicada logo após o chapisco, ela tem como objetivo nivelar a superfície e realizar a impermeabilização para a próxima camada.
- **Reboco:** O reboco é a última camada do revestimento, o objetivo é deixar a camada o mais liso e plana possível para que posteriormente receba a aplicação da tinta.

#### **2.2.1.3. Argamassa Colante**

Esse tipo de argamassa é usada para fixação e aplicação de pisos, azulejos, entre outros. Em sua mistura é adicionado cimento Portland e polímero que permite uma melhor junção da cerâmica [16].

#### **2.2.1.4. Argamassa de Rejunte**

Essa camada é usada logo após a aplicação do revestimento cerâmico e

tem como finalidade cobrir as juntas entre os revestimentos e podem absorver pequenas dilatações dos revestimentos sofridas pela variação de temperatura [16].

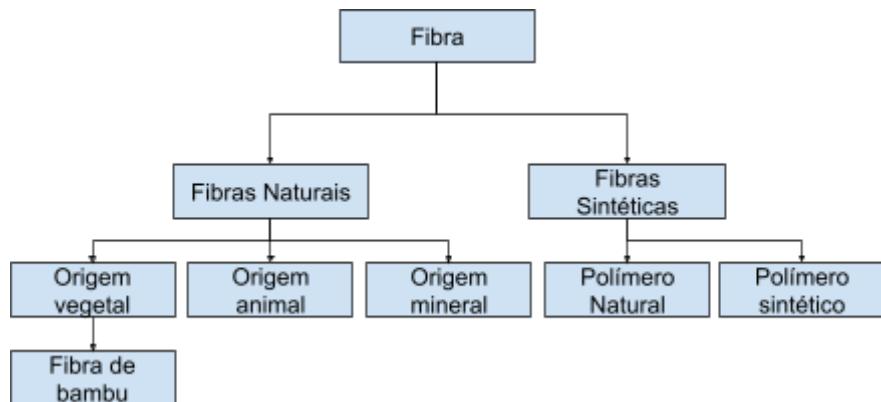
### 2.3. Fibras

As fibras têm como característica geométrica uniforme, com um comprimento maior que o diâmetro, variando suas propriedades mecânicas de acordo com sua composição [1].

Na busca da evolução na construção civil introduziu-se fibras em argamassas com a finalidade de servir como material de reforço, melhorando as propriedades mecânicas, diminuindo a retração e aumentando a tenacidade, ductilidade e a resistência do compósito [1].

As fibras são classificadas em naturais e sintéticas como ilustrado na Figura 7.

Figura 7- Fluxograma de fibras



Fonte: Adaptado de Persson et al. (1984) [18].

#### 2.3.1. Fibras Sintéticas

As fibras sintéticas são compostas por uma matriz polimérica, são monofilamentos que possuem o objetivo de substituir as armaduras e fibras de aço até certo nível de solicitação mecânica. Comumente usadas em aplicações de pisos, pavimentos, entre outros [17].

### 2.3.2. Fibras Naturais

Infelizmente o estudo sobre fibras naturais em construção civil ainda é muito recente e um pouco desprovido de informações, porém vem o mundo olhando cada vez mais para esses materiais renováveis [17].

As fibras naturais possuem uma composição de hemicelulose, celulose, lignina, entre outros componentes. Alguns exemplos dessas fibras são: coco, juta, sisal, banana, bambu [17].

Elas possuem algumas vantagens em relação às fibras sintéticas como o baixo custo, a abundância, são renováveis, propriedades específicas e não toxicidade. Porém possuem desvantagens como a dificuldade no controle de um padrão de qualidade e nas propriedades [17].

#### 2.3.2.1. Fibra de bambu

O Brasil tem a maior quantidade de espécies diferentes no mundo todo, isso devido ao clima e a região, concentrando a maior quantidade na Amazônia. Porém essa matéria-prima é pouco explorada, levando um destaque principalmente na indústria de papel e celulose [17].

O bambu tem algumas características e vantagens em relação às outras fibras desde o plantio como: o bambu é usado como protetor do solo, evitando a erosão do mesmo, permite uma plantação em paralelo com outras plantas, possui um crescimento rápido e tem uma grande absorção de gás carbônico durante o processo [17].

Além disso, o bambu tem propriedades importantes como a capacidade de alongamento, boa resistência mecânica, baixa densidade, grande disponibilidade para uso e um material biodegradável [17].

### 2.3.3. Influência da fibra na matriz

Com o objetivo de melhorar um material naturalmente frágil e propenso a fissuras é a adição de certos tipos de fibras tem como finalidade trazer melhorar a

resistência a tração ou flexão, ductilidade, tenacidade resistência à fadiga, resistência à fissuração, permeabilidade e ductilidade [19].

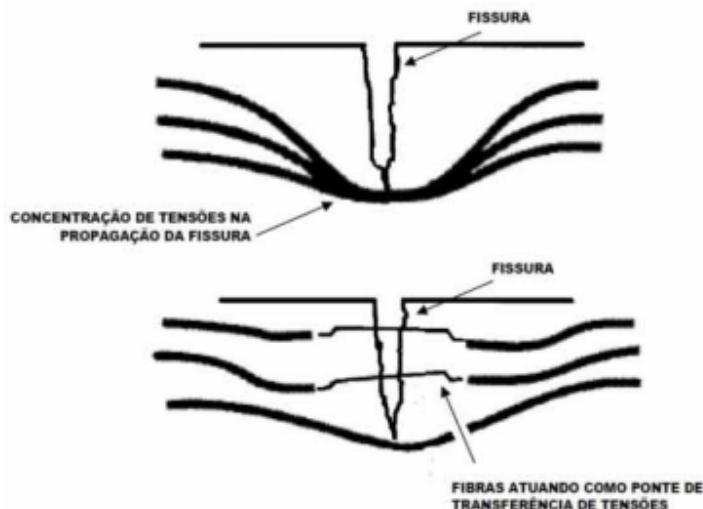
Os principais parâmetros para um bom desempenho de fibras em uma matriz cimentícia são [19]:

- **Teor da fibra:** um número elevado no teor de fibras pode ajudar na resistência pós-fissuração, controlando a fissuração contanto que as fibras resistam a força aplicada, atuando como pontes distribuindo a tensão [19].
- **Módulo de elasticidade:** Um alto valor de módulo de elasticidade para a fibra gera um possível arrancamento da mesma, evitando que sejam rompidas com a solicitação do carregamento [19].
- **Aderência entre fibra e matriz:** Quanto maior a aderência melhor é a homogeneidade entre as fibras e a matriz, consequentemente reduzindo possíveis fissuras [19].
- **Resistência de fibra:** A resistência da fibra é diretamente proporcional a ductilidade do compósito. Ela depende da aderência, do teor e do comportamento pós-fissuração [19].
- **Deformabilidade da fibra:** Quanto maior a deformação das fibras maior será a ductilidade, visto que, as fibras alongaram absorvendo muita energia, resistindo uma maior carga [19].
- **Compatibilidade:** A relação de compatibilidade entre fibra/matriz é extremamente importante porque, certos tipos de fibras podem reter e absorver água, consequentemente alterar seu volume comprometendo suas propriedades. Além disso, no longo prazo pode haver degradação de certas fibras pela ação de componentes presentes na hidratação do cimento [19].
- **Comprimento da fibra:** Um maior comprimento de fibra permite que haja uma menor chance de ser arrancada para um certo valor de carga [19].

As fibras atuam como uma ponte de transferência de tensão, evitando que a tensão se concentre em um único ponto, esse mecanismo dificulta a frente de propagação da trinca, conforme ilustrado na figura 8, além disso a deformação necessária para o aparecimento da primeira fissura aumenta como uso da fibra

bem como a deformação até a ruptura completa [19].

Figura 8- Mecanismo de funcionamento da fibras



Fonte: (SIQUEIRA, 2006) [19]

#### 2.4. Energia de Fratura

A resistência mecânica é um parâmetro muito importante para um projeto com concreto estrutural, mas a energia de fratura ( $\gamma_{wof}$ ) pode trazer um dado muito relevante a respeito da propagação de trincas no material [20]. A energia de fratura é determinada pela seguinte equação:

$$\gamma_{wof} = \frac{1}{2A} \int F_m d\delta \quad (5)$$

Elá pode ser calculada com o resultado do ensaio de propagação estável de trincas, através da curva (carga-deslocamento) gerada. Na equação 5, "A" representa a área projetada da superfície de fratura,  $F_m$  refere-se a carga aplicada verticalmente pela máquina do ensaio, e  $\delta$  é o deslocamento do atuador. O resultado da integral  $\int F_m d\delta$  é dado pela área gerada na curva carga-deslocamento [20].

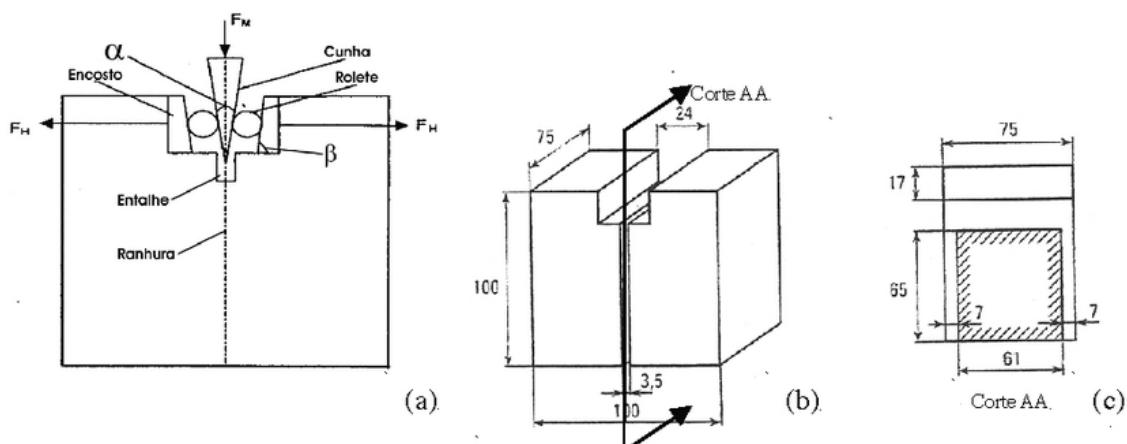
Há uma grande preocupação a respeito do tamanho do corpo de prova a ser ensaiado quando tratamos de concreto e argamassa devido à diferença de tamanhos de agregados contidos na amostra.

O método comumente mais usado para se obter a energia de fratura é o de barra entalhada flexionada de três ou quatro pontos e possui a característica de usar amostras pequenas o que traz uma desvantagem na relação agregado/área de fratura e para o resultado final pode trazer resultados indesejados e impreciso. Já no Método da Cunha os corpos de provas possuem uma maior dimensão para minimizar esse problema, porém isso também leva a uma desvantagem que é o acúmulo de energia elástica quando a propagação da trinca é gerada instavelmente [20].

#### 2.4.1. Método da Cunha

O Método da Cunha tem como característica um corpo de prova em formato de um paralelepípedo com um rebaixo na face de cima, um entalhe central e duas ranhuras nas laterais (uma em cada face), ilustrado na figura 9 (a). O entalhe e a ranhura tem como finalidade servirem como concentradores de tensão para orientar a propagação da trinca na face central, fazendo com que o corpo de prova trinque uniformemente dividindo-o em partes iguais, representado pelos cortes na figura 9 (b) e (c) [20].

Figura 9- Representação do corpo de prova submetido ao Método da Cunha



Fonte: (RIBEIRO; RODRIGUES, 2009)

Além disso, o dispositivo conta com dois roletes, uma cunha de ângulo  $\alpha$  e dois encostos de ângulo  $\beta$  [20].

Ao iniciar o ensaio é aplicado uma carga  $F_M$  em uma baixa velocidade, a fim de que ocorra a propagação da trinca lentamente. A força  $F_M$  é dividida propagada para ambos os lados horizontalmente ( $F_H$ ). A relação entre as duas forças é dada pela seguinte equação 6:

$$F_H = \frac{F_M}{2 \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \quad (6)$$

Após o ensaio é possível obter uma tabela que relaciona a carga aplicada pela máquina e o deslocamento sofrido verticalmente na ponta da cunha que o mesmo sofrido pelo atuador. Com auxílio de um *software* pode-se *plotar* uma curva relacionando-as, e com um auxílio de um instrumento preciso de medição é possível calcular a área de fratura dos corpos de prova, com isso calcular a energia de fratura e tirar as conclusões a respeito do material estudado.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a execução do trabalho foi usado cimento CP III, cal hidratada e areia fina comprados em uma loja de material de construção local. Além disso, toda água e bambu usados durante o estudo foram retirados nas dependências do DEMAR (departamento de engenharia de materiais).

Durante a confecção dos corpos de prova foi necessário o uso de um molde de aço inoxidável, e para a lubrificação das cavidades de suas cavidades fez-se o uso de óleo de motor. Já para misturar todas as matérias primas dos corpos de prova foi usado um Misturador Planetário com volume de 4,5 L. Na retificação das amostras foi necessário o uso de uma Retificadora Ferdimat TA60A com o Rebolo diamantado 126  $\mu\text{m}$ .

Para a cura das amostras usou-se recipientes plásticos e uma estufa sem circulação forçada. A execução dos testes foi possível graças ao uso da máquina universal de ensaios mecânicos eletromecânica Emic/ introns modelo DL 3000

### 3.1. Confecção das Amostras

Ao todo foram produzidas 12 amostras em três grupos utilizando o traço de 1:1:6 (cimento: cal: areia), o fator de água usado foi de 0,65 em relação cimento e cal. Variou-se apenas a quantidade de fibra de bambu nos grupos de 4 amostras cada. O primeiro grupo sem a presença de fibra de bambu, o segundo com 2,5% e o terceiro com 5%. As porcentagens de fibra correspondem à quantidade em massa em relação a cal e o cimento. As quantidades e composições de cada grupo podem ser visualizadas na tabela 3.

Tabela 3- Composição básica das amostras em gramas

	<b>Grupo A - 0%</b>	<b>Grupo B - 2,5%</b>	<b>Grupo C - 5,0%</b>
Areia	1200	1200	1200
Cal	200	200	200
Cimento	200	200	200
Água	260	260	260
Bambu	0	10	20

Fonte: O autor

Primeiramente foi necessário fazer a secagem da areia a ser utilizada no trabalho, o processo ocorreu ao ar livre até que estivesse livre de umidade. Para uma maior homogeneidade no tamanho de partículas foi usado somente a areia que passou na peneira de 2 mm.

O bambu foi previamente triturado e então peneirado da seguinte forma: o material foi colocado na mesa vibratória (Figura 10) usado um conjunto de peneira de 2mm, 1,4mm e 1mm, conforme ilustrado na figura 10.

Figura 10- Conjunto de peneiras na mesa vibratória



Fonte: O autor

A fibra usada no trabalho foi retida na peneira de 1 mm após 2 min de vibração na máquina representado na figura 11 pela peneira (b). Sendo que na figura 11 as letras a, b, c, d representam respectivamente o fundo, e as peneiras de 2mm, 1,4mm e 1mm.

Figura 11- Conjunto de peneiras utilizadas para separar as fibras de bambu



Fonte: O autor

Inicialmente o molde foi previamente lubrificado com óleo em todas as cavidades. Os materiais foram colocados no misturador planetário da seguinte forma: adicionou-se areia, cimento, cal, fibra de bambu (para o grupo B e C), então foi feito um ciclo de 2 min em velocidade 60 rpm (rotações por minuto). Posteriormente adicionou-se água e misturou-se por mais 2 min em uma velocidade de 60 rpm. Por último foi feito um ciclo de 1 min na velocidade 120 rpm para que aumentasse a taxa de cisalhamento.

Figura 12- Misturador Planetário



Fonte: O autor

Após colocar o material no molde foi feita a vibração na mesa vibratória para a melhor incorporação do material nas cavidades do molde e remoção de possíveis bolhas de ar geradas no processo.

Figura 13 - Molde com argamassa na mesa vibratória



Fonte: O autor

### 3.1.1. Cura

O conjunto amostra e molde foi colocado em um recipiente fechado e com uma umidade constante por 24 horas para o início da cura. Posteriormente a amostra foi desmoldada e introduzida em um outro recipiente na qual ficou imersa em uma solução saturada de água e cal por 28 dias segundo a NBR 7215.

### 3.1.2. Secagem

Após os 28 dias de cura as amostras foram colocadas na estufa a uma temperatura fixa de 105°C durante 24 horas

Figura 14- Estufa usada para a secagem dos corpos de prova



Fonte: O autor

### 3.1.3. Retificação

As amostras foram colocadas na retificadora Ferdimat TA60A onde foi feito a retificação com o auxílio do rebolo diamantado grana 126, as amostras foram presas magneticamente e o processo foi feito em pares, as amostras foram retificadas até que a superfície de moldagem das amostras ficassem perfeitamente planas.

Figura 15- Retificadora Ferdimat TA60A usada na retificação dos corpos de prova

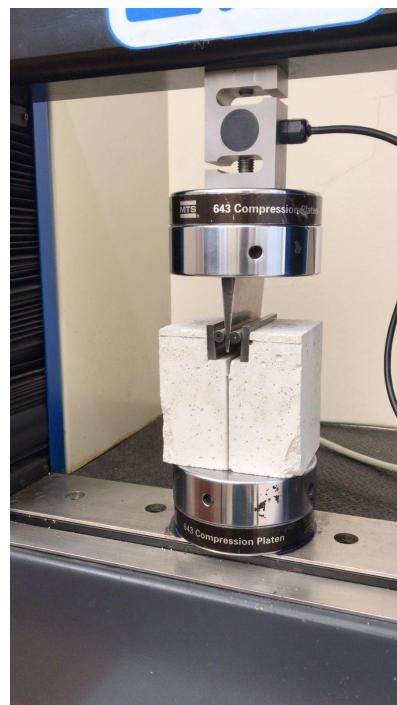


Fonte: O autor

### 3.1.4. Ensaio pelo Método da Cunha

O ensaio ocorreu a uma taxa de  $30 \mu\text{m}/\text{minuto}$ , a célula de carga usada foi de  $5\text{kN}$  em uma máquina universal de ensaios mecânicos eletromecânica da fabricante Emic/ instron modelo DL 3000, como ilustrado na figura 16. O ensaio se encerra quando a carga atinge o valor de 10% da sua carga máxima.

Figura 16 - Máquina universal de ensaios mecânicos Emic/ instron modelo DL 3000.



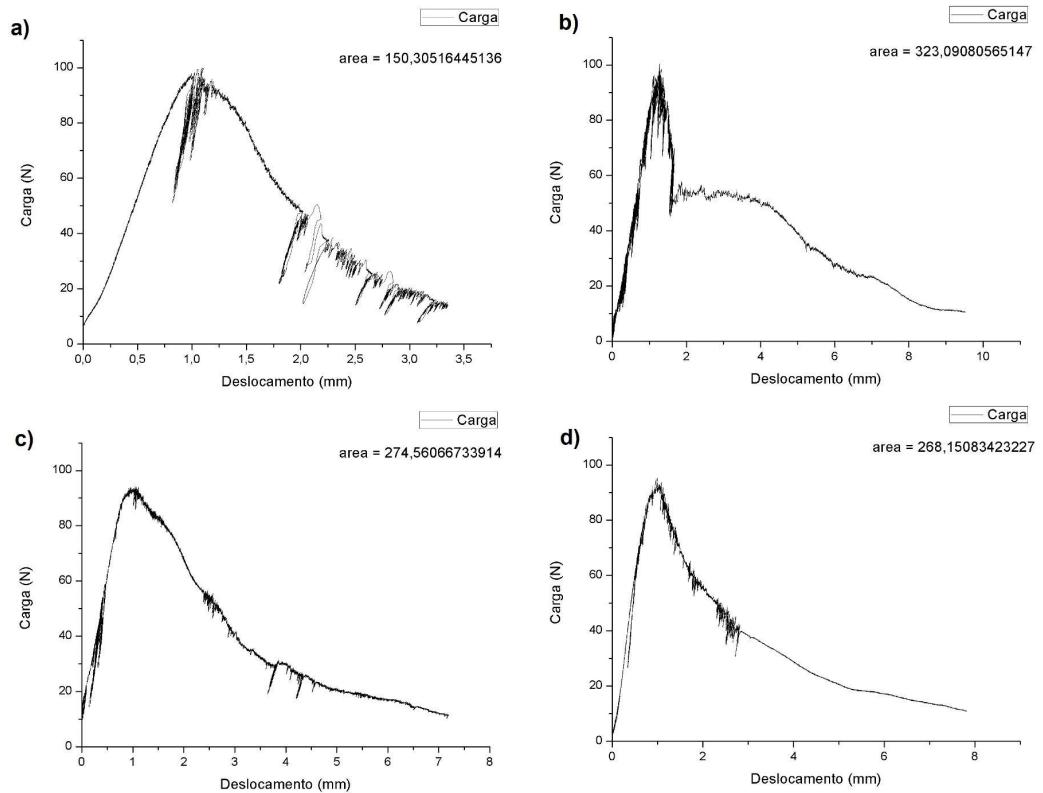
Fonte: O autor

#### 4. RESULTADOS

Após os testes foram obtidas tabela relacionando a tensão, deslocamento e o tempo, os dados foram posteriormente usados para *plotar* os respectivos gráficos com o auxílio do *software* Origin.

Para o grupo de controle (0% de fibra de bambu) corresponde a Figura 17.

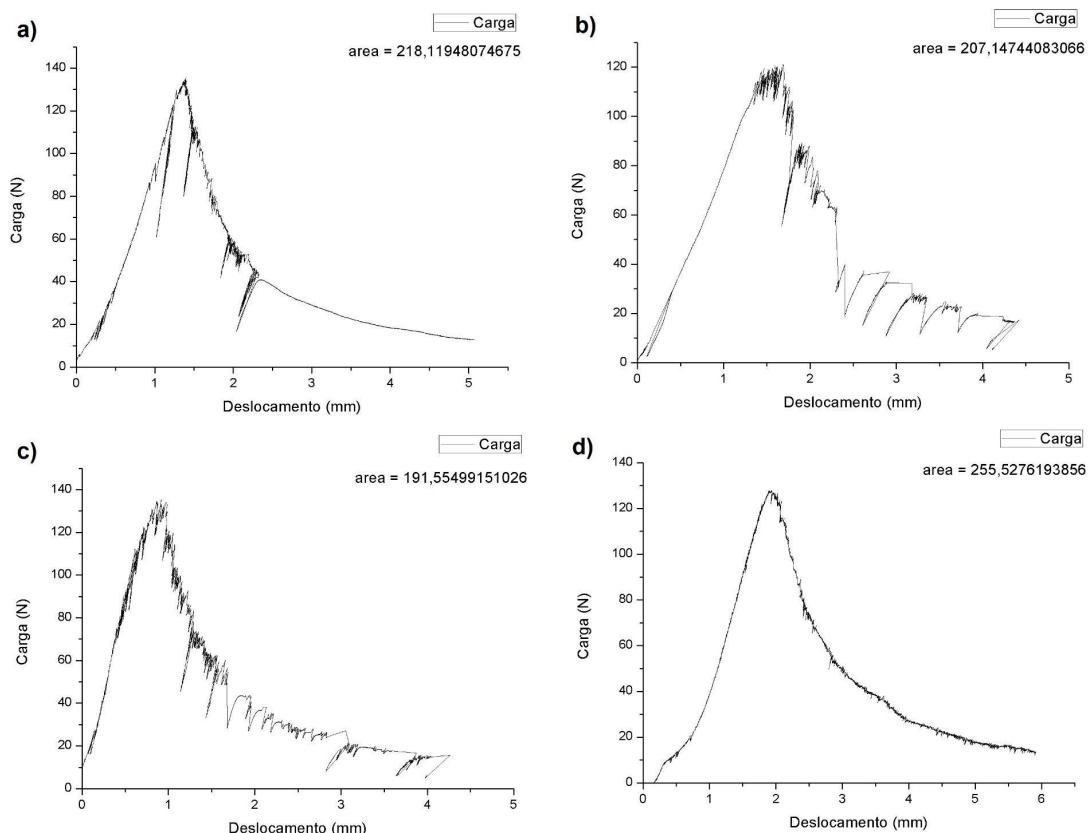
Figura 17 - Curvas força-deslocamento das amostras escolhidas para representar o lote do grupo 0%: a) Amostra A1; b) Amostra A2; c) Amostra A3; d) Amostra A4



Fonte: O autor

Já para o grupo com 2,5% de fibra de bambu foram obtidos os seguintes resultados presentes na Figura 18.

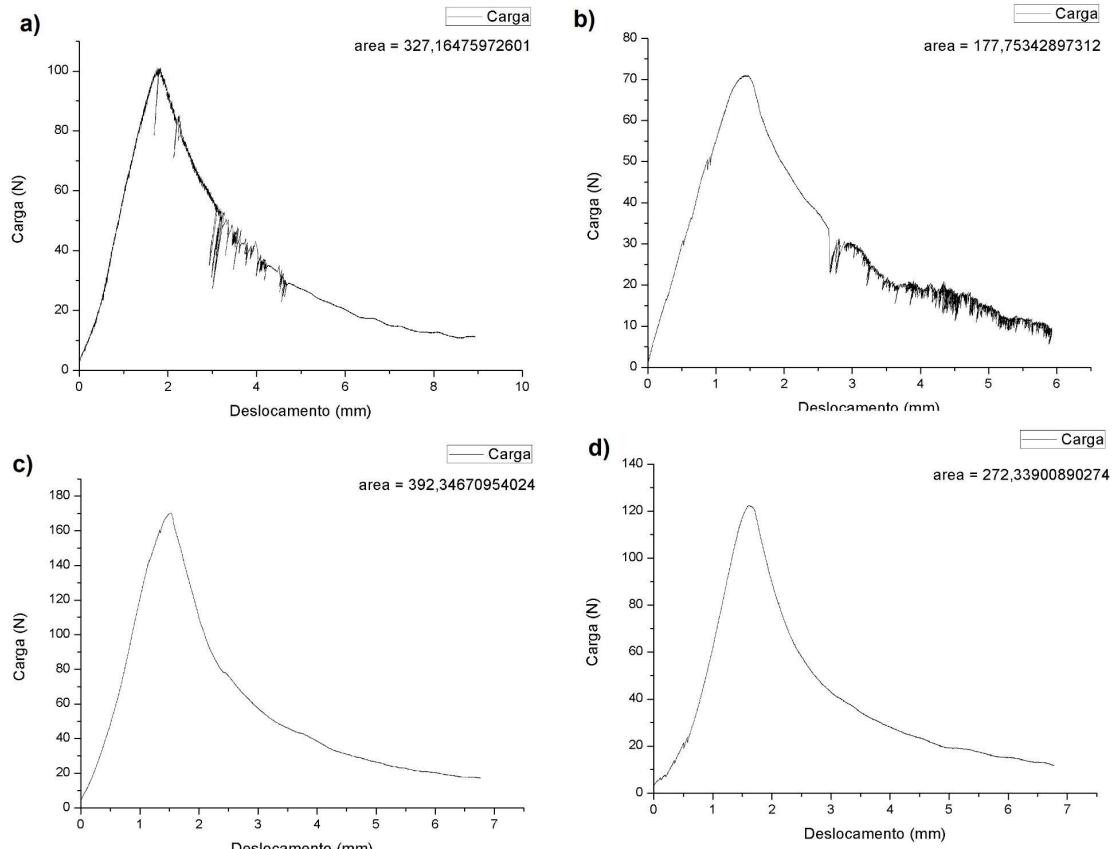
Figura 18 - Curvas força-deslocamento das amostras escolhidas para representar o lote do grupo 2,5%: a) Amostra B1; b) Amostra B2; c) Amostra B3; d) Amostra B4



Fonte: O autor

Para o último grupo que continha 5% de fibra apresentaram as curvas correspondentes a Figura 19.

Figura 19 - Curvas força-deslocamento das amostras escolhidas para representar o lote do grupo 5,0%: a) Amostra C1; b) Amostra C2; c) Amostra C3; d) Amostra C4



Fonte: O autor

Após o teste a energia de fratura foi devidamente calculada usando a equação 5, nos corpos de provas foi calculada uma média entre 5 pontos na largura e na altura para o cálculo da área de fratura de cada corpo de prova.

E com o auxílio de ferramenta de cálculo de área do Origin foi possível obter as respectivas áreas das curvas (Força x Deslocamento), correspondente ao trabalho de fratura, que ao dividir pela área geométrica da área de fratura obtém-se a energia de fratura.

Já a força máxima de cada amostra foi obtida no topo de cada curva em seguida feito uma média e calculado o desvio padrão.

Sendo as amostras foram divididas em grupo de número 1 ao 4 pertencentes ao grupo A (0% de bambu), 5 ao 8 pertencentes ao grupo B (2,5% de bambu), 9 ao 12 pertencem ao grupo C (5% de bambu).

Após os cálculos foi possível obter o seguinte resultado para cada grupo:

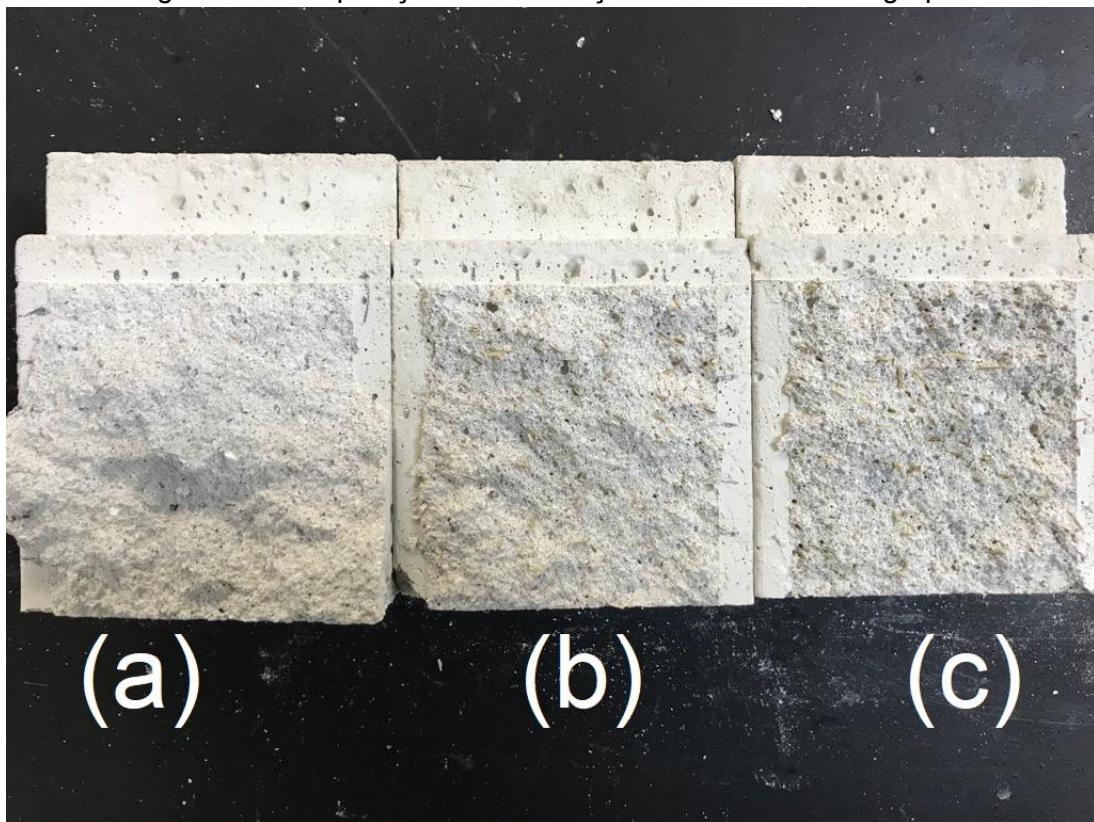
Tabela 4- Média e desvio padrão da média para energia de fratura e força máxima

<b>Grupo</b>	<b>Força Máxima (N)</b>	<b>Energia de Fratura J/m<sup>2</sup></b>
0%	95,35±0,88	26,99±4,47
2,5%	129,93±3,57	25,99±1,01
5,0%	131,13±20,45	41,17±4,33

Fonte: O autor

Pode-se comparar a distribuição da quantidade de fibras em cada amostra de acordo com a figura 20, em que a amostra (a) representa a amostra do grupo A (sem fibra), a amostra (b) do grupo B (2,5% de fibra) e a amostra (c) ao grupo C (5% de fibra). É possível observar que com o aumento da quantidade de fibra melhor sua distribuição ao longo da matriz e com isso maiores serão as pontes para distribuição de tensão, como pode ser observado no item (c) da figura 20 uma maior quantidade de pontos marrons representados pelas fibras.

Figura 20- Comparaçao da distribuição de fibras entre os grupos



Fonte: O autor

## 5. DISCUSSÃO

Analizando a Tabela 4 pode-se inferir que houve um ganho na energia de fratura e na força máxima para surgimento da trinca na composição de 5% de fibra de bambu, já os compósitos com 2,5% de fibra não apresentaram um ganho significativo de energia de fratura em relação ao controle (0% de fibra), em compensação houve ainda um ganho de força máxima.

O resultado obtido deve-se ao fato que com o maior teor de fibra maior era o número de pontes que distribuem a tensão mecânica aplicada dessa forma evitando a frente de propagação das trincas com concentradores de tensão, dessa maneira aumentando a resistência a carga para o aparecimento da trinca e também aumentando o deslocamento, visualizado pelo alargamento das curvas nos gráficos, indicando uma maior energia de fratura.

Também foi possível visualizar graficamente que muitas propagação das trincas ocorreram de forma instável, apenas os gráficos referentes às amostras B4, C3, C4 tiveram uma propagação estável. O grande número de amostras com trincas instáveis deve-se a grande sensibilidade do teste, durante a preparação do ensaio podem ocorrer erros no posicionamento da cunha, encosto ou dos roletes que afetam diretamente o resultado. Para isso é necessário um bom treinamento e um olhar meticoloso para melhor confiabilidade dos dados.

O fato do aumento da energia de fratura e da força máxima também deve-se a boa compatibilidade da fibra com a argamassa e a boa resistência mecânica da fibra que atuou aumentando a taxa de deslocamento quando aplicada na argamassa.

Infelizmente não foi possível fazer um comparativo dos dados obtidos com dados da literatura pois não foi encontrado nenhum trabalho semelhante com o mesmo viés.

## 6. CONCLUSÃO

O objetivo da inserção de fibras naturais em argamassas tem como propósito promover um ganho de resistência mecânica no compósito. Dessa forma foi possível inferir com o trabalho e os resultados apresentados que com o aumento no teor de fibra na composição obteve-se ganho tanto na força máxima para o surgimento da trinca quanto para o aumento de energia de fratura.

Dessa forma abre-se a possibilidade de um aprofundamento nos estudos de viabilidade para as aplicações em construção civil, seja como argamassa de assentamento, revestimento, colante e rejunte, contribuindo para a ampliação do uso de materiais de origem natural.

## REFERÊNCIAS

- [1] AUERSVALDT, B. L.; LAY, L. A.; MIRANDA, T. L. Incorporação de Fibras Vegetais de Bambu ao Concreto em Substituição à Fibras Sintéticas. In: IX Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção, **Anais do...** Ponta Grossa: Aprepro, p. 1-12 2019.
- [2] E-CIVIL. **Composição do Cimento Portland.** E-Civil - Engenharia Civil, Arquitetura e Construção, 2017. Disponível em: <[http://www.ecivilnet.com/artigos/cimento\\_portland\\_composicao.htm](http://www.ecivilnet.com/artigos/cimento_portland_composicao.htm)>. Acesso em: 09 ago 2022.
- [3] SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE CIMENTO. **Relatório anual 2020.** São Paulo, 2020. Disponível em: <[http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio\\_anual/rel\\_anual\\_2020.pdf](http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/rel_anual_2020.pdf)> Acesso em: 01 dez 2022.
- [4] PORTAL DO CONCRETO. O que é cimento? **Portal do Concreto**, 2022. Disponível em <<http://www.portaldoconcreto.com.br/cimento/concreto/cimento.html>>. Acesso em: 15 out 2022.
- [5] CAMPOS, S. R. R. **Influência do tempo e das condições de cura nas propriedades mecânicas do concreto.** 2017. 48 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, 2017.
- [6] CIMENTO.ORG. **CP-I - Cimento Portland Comum**, 2016. Disponível em: <<http://cimento.org/cp-i-32-cimento-portland/>>. Acesso em: 10 ago 2022.
- [7] INSTITUTO DA CONSTRUÇÃO. **Conheça os principais tipos de cimento e suas aplicações**, 2017. Disponível em: [https://www.institutodaconstrucao.com.br/blog/conheca-os-principais-tipos-de-cimento-e-suas-aplicacoes/#:~:text=CP%20II%2DF%20\(Cimento%20Portland,de%20alta%20resist%C3%A3ncia%20inicial\)%3B](https://www.institutodaconstrucao.com.br/blog/conheca-os-principais-tipos-de-cimento-e-suas-aplicacoes/#:~:text=CP%20II%2DF%20(Cimento%20Portland,de%20alta%20resist%C3%A3ncia%20inicial)%3B). Acesso em: 10 ago. 2022.
- [8] CIMENTO.ORG. **CP IV – Cimento Portland pozolânico**, 2016. Disponível em: <<http://cimento.org/cp-iv-32-cimento-portland-pozolanico/>>. Acesso em: 10 ago 2022.
- [9] CIMENTO.ORG. **CP V-ARI – Cimento Portland de alta resistência inicial**, 2010. Disponível em: <<https://cimento.org/cp-v-ari-cimento-portland-de-alta-resistencia-inicial/>>. Acesso em: 10 ago. 2022.
- [10] QUARCIONI, V. A. **Influência da cal hidratada nas idades iniciais da**

- hidratação do cimento Portland - estudo em pasta.** Tese de doutorado, São Paulo: Universidade de São Paulo, 2008. 188 f. Acesso em: 30 out. 2022.
- [11] TAYLOR, H. F. W. Cement Chemistry. 2. ed. London: Thomas Telford, 1998. 459p.
- [12] LAGUNA, Luis Antonio; IKEMATSU, Paula. A influência da temperatura na desforma do concreto. **PINI web**, v. 150, 2009.
- [13] RESIMAT. **O que é Argamassa?** Disponível em: <<https://resimat.com.br/oque-e-argamassa/>>. Acesso em: 16 out. 2022.
- [14] ZAGO, C. Concreto, Argamassa ou Pasta de Cimento? **Zeng projetos**, 2019. Disponível em: <<https://www.zengprojetos.com/post/concreto-argamassa-ou-pasta-de-cimento>>. Acesso em: 16 out. 2022.
- [15] WATANABE, R. M. **As patologias do revestimento.** 2020. Disponível em: <<http://www.ebanataw.com.br/roberto/patologias/patrevcer.php>>. Acesso em: 22 out. 2022.
- [16] PINHEIRO, I. Os Tipos e as Patologias Vistas nas Argamassas. **Inovacivil**. 2019. Disponível em: <<https://www.inovacivil.com.br/os-tipos-de-argamassas-e-suas-principais-patologias/>>. Acesso em: 22 out. 2022.
- [17] MOURA, C. R. Aplicações e tratamentos da fibra de bambu e similares: uma revisão. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, v. 5, n. 5, p. 0460-0468, 2019.
- [18] PERSSON, H.; SKARENDAHL, A. Natural Fibre Concrete for Roofing Sheets and Other Purposes In: GRAM, H. E.; PERSSON, H.; SKARENDAHL, A. **Natural Fibre Concrete**: Report from a SAREC - financed Research and Development Project. Estocolmo: SAREC, 1984.
- [19] SIQUEIRA, J. E. L. **Utilização de fibras naturais e sintéticas em argamassas de revestimento de alvenaria: estudo comparativo de desempenho.** Dissertação de mestrado. Santa Catarina: Universidade Federal de Santa Catarina, 2006. 217 p.
- [20] RIBEIRO, S.; RODRIGUES, J. A.. Influência da forma e do processo de obtenção do entalhe na carga máxima e na energia de fratura de argamassas utilizando o método da cunha para propagação estável de trinca. **Cerâmica**, [S.L.], v. 55, n. 334, p. 181-189, jun. 2009.