

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE LORENA – EEL/USP

JOÃO PEDRO BRANDÃO LEONI

Avaliação do comportamento mecânico de argamassas com diferentes proporções de fibra de bambu em sua composição

Orientador: Prof. Dr. Sebastião Ribeiro

LORENA – SP

2022

AGRADECIMENTOS

Ao professor Sebastião Ribeiro, pelo aprendizado durante a graduação, pela parceria nos trabalhos realizados com a Comissão de Graduação e pela paciência e disposição para orientar meu trabalho de maneira muito atenciosa e enriquecedora.

Aos meus pais e irmã por todo o amor, incentivo, inspiração e apoio durante toda minha vida, em especial ao meu falecido pai Francisco Eduardo “Chicão”, que me deixou no ano de 2018, porém se não fosse por ele, eu não estaria tornando-me um Engenheiro.

Ao Diretório Acadêmico 29 de Maio e ao Conselho de Repúblicas da Escola de Engenharia de Lorena que, além de terem me proporcionado incontáveis aprendizados, concederam-me grandes amizades que tiveram papel fundamental na minha Graduação.

Aos meus amigos de república, que tornaram meus dias difíceis mais fáceis, e me proporcionaram momentos e amizades inesquecíveis que levarei para toda a vida.

E aos professores e funcionários da Universidade de São Paulo, que constroem o futuro diariamente, vocês são os verdadeiros heróis.

“Se eu vi mais longe, foi por estar sobre ombros de gigantes”.

Isaac Newton

RESUMO

LEONI, J. P. B. AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE ARGAMASSAS COM DIFERENTES PROPORÇÕES DE FIBRA DE BAMBU EM SUA COMPOSIÇÃO. Trabalho de Graduação (TG) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2022.

O cimento é atualmente um dos materiais mais consumidos do mundo, e tem um papel fundamental na crescente urbanização que o planeta vive hoje, onde a sua aplicação é principalmente voltada para a indústria civil. Quando o cimento é misturado com água, cal e um agregado, obtemos o concreto (agregado graúdo + agregado miúdo) ou a argamassa (agregado miúdo). O foco desse trabalho é estudar o comportamento mecânico das argamassas de cimento quando é adicionado um reforço na sua mistura, a fibra de bambu. Durante a moldagem foram feitos 4 corpos de prova com frações de massa 1:1:6 (cimento:cal:areia) com a adição em sua composição de 0%, 2,5%, 5% e 10% de fibra de bambu já selecionadas granulometricamente. O tempo de cura foi de 28 dias em atmosfera saturada de água para cada grupo de amostra. Posteriormente, as amostras foram submetidas ao teste de flexão em 3 pontos para avaliar seu módulo de ruptura e ensaio de compressão para medir sua resistência a esse esforço.

Palavras-chave: Cimento, argamassa, fibra de bambu, flexão, compressão

ABSTRACT

LEONI, J, P, B EVALUATION OF THE MECHANICAL BEHAVIOR OF MORTARS WITH DIFFERENT PROPORTIONS OF BAMBOO FIBER IN THEIR COMPOSITION.

Graduation Work (GW) – School of Engineering of Lorena, University of São Paulo, Lorena, 2022.

Cement is currently one of the most consumed materials in the world, and it plays a key role in the growing urbanization that the planet is experiencing today, where its application is mainly aimed at the civil industry. When we mix cement with water, lime and an aggregate, we obtain concrete (coarse aggregate + fine aggregate) or mortar (fine aggregate). The focus of this work is to study the mechanical behavior of cement mortars when one more component is added to their mixture, bamboo fiber. During the molding, 5 samples were made with mass fractions 1:1:6 (cement:lime:sand) with the addition of 0%, 2.5%, 5% and 10% of bamboo fiber already granulometrically selected. The curing time will be 28 days in a saturated atmosphere of water for each sample group. Subsequently, the samples will be submitted to the bending test to evaluate their modulus of rupture and compression tests to measure their resistance to this effort.

Keywords: Cement, mortar, bamboo fiber, flexural strength, compression

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Embalagem cimento Portland	13
Figura 2 – Fábricas de cimento no Brasil	20
Figura 3 – Variação de liberação de calor (A) e a concentração de Ca²⁺ (B) durante a hidratação.....	21
Figura 4 – Simplificação das formulações químicas dos silicatos e aluminatos de presentes na reação de hidratação do cimento	23
Figura 5 – Processo de hidratação do cimento	24
Figura 6 - Representação da microestrutura da argamassa colante no estado fresco	25
Figura 7 – a) Serrote e morsa utilizados para a fragmentação dos bastões de bambu, b) Fibras de bambu	32
Figura 8 – Peneiras organizadas no agitador Bertel	33
Figura 9 – Misturador Planetário	34
Figura 10 – Corpos de prova do Traço 1 ao Traço 4 (esquerda para direita)	
.....	35
Figura 11 – Retificadora Ferdimat TA60A.....	36
Figura 12 – Realização do ensaio de compressão axial para o traço 1.....	38
Figura 13 – Variação da resistência a tração conforme o aumento da porcentagem de fibra de bambu na composição.....	39
Figura 14 – Variação da resistência à tração conforme o aumento da porcentagem de fibra de bambu na composição.....	41
Figura 15 –Gráfico para a determinação da relação água/cimento (a/c) em função das resistências do concreto e do cimento aos 28 dias de idade	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação cimento Portland	15
Tabela 2 – Tipos de cimento x características	18
Tabela 3 – Composição dos corpos de prova.....	34
Tabela 4– Força máxima e resistência a flexão para as amostras variando a concentração de fibra de bambu	38
Tabela 5– Força máxima e resistência à compressão para as amostras variando a concentração de fibra de bambu	41

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	10
1.1 Contextualização	10
1.2 Justificativa.....	10
1.3 Objetivo geral	11
1.4 Objetivos específicos.....	11
2 Revisão da Literatura.....	12
2.1 Indústria da Construção Civil no Brasil.....	12
2.2 Cimento	12
2.3 Processo produtivo.....	19
2.4 Cura.....	20
2.5 Argamassa	25
2.6 Fibras sintéticas e naturais.....	27
2.7 Bambu	28
3 PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	28
3.1 Tensão de ruptura	28
3.2 Resistência a compressão	30
4 MATERIAIS E MÉTODOS:.....	31
4.1 Composição das amostras	31
4.2 Fibra de bambu	31
4.3 Obtenção corpos de prova	33

4.4	Cura.....	36
4.5	Retificação.....	36
4.6	Resistência flexão	37
4.7	Resistência a compressão axial	37
5	RESULTADO E DISCUSSÃO	38
5.1	Resistência a flexão avaliando a variação da concentração de fibra de bambu na argamassa	38
5.2	Resistência à compressão avaliando a variação da concentração de fibra de bambu na argamassa	40
5.3	Análise comparativa dos resultados obtidos	43
6	CONCLUSÃO.....	44
	REFERÊNCIAS.....	46

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Quando o homem percebeu que além da caça, também conseguiria obter alimentos através do cultivo da terra e criação de animais, sua necessidade de ter uma moradia para se abrigar e proteger das intempéries da natureza se tornou de extrema importância. Com isso, o instinto pela sobrevivência fez com que ele aprendesse a colocar sua criatividade em prática, manuseando a natureza conforme a sua própria vontade e, desde os primórdios, praticar o que hoje conhecemos como Engenharia. Foi dessa necessidade, que o ser humano encontrou elementos necessários para construir seu abrigo: pedra, madeira e barro. No Brasil, a mistura desses elementos, com a adição de fibras orgânicas, foi denominada de pau-a-pique ou taipa a mão. [1].

Nos dias de hoje pouco vemos as construções de pau-a-pique. Essa estrutura foi substituída em nossa sociedade urbanizada por concreto, viga, tijolo e argamassa. As fibras orgânicas, foram substituídas por fibras sintéticas como as de aço, vidro e polímero, visando o desenvolvimento da utilização de materiais de reforços incorporados a compostos a princípio frágeis, proporcionando uma maior resistência, tornando as construções mais duráveis, com menos necessidade de reparos, menos consumo de material e consequentemente uma maior rentabilidade e sustentabilidade na construção. [1]

De qualquer forma, técnica do pau-a-pique ou taipa a mão continua com um valor importantíssimo na história do Brasil colônia, e ainda é muito encontrada em igrejas e construções de cidades históricas do Sudeste brasileiro, principalmente Minas Gerais, como Ouro Preto, Tiradentes e São João Del Rei. [2]

1.2 Justificativa

Com a expansão global cada vez mais acelerada, o conceito de desenvolvimento sustentável tornou-se popular, principalmente no ramo da construção civil, que é o

principal consumidor de recursos, materiais e energia. O desafio do século XXI é a necessidade de obter materiais de construção de baixo consumo energético, duráveis e ecológicos que possam atender às necessidades de infraestrutura da população, principalmente nos países em desenvolvimento. Portanto, a indústria tem experimentado uma enorme transição como as pesquisas de novas tecnologias e materiais alternativos, sustentáveis e renováveis com propriedades compatíveis que possam substituir os métodos tradicionais. As fibras orgânicas utilizadas de reforço que foram substituídos pelas sintéticas nos dias de hoje, podem voltar a ter um papel fundamental no desenvolvimento da indústria da construção civil. O objetivo não é apenas minimizar o impacto ambiental, mas também mitigar a superexploração de insumos e cooperar para alcançar um desenvolvimento socioeconômico equitativo e equilibrado.[3]

1.3 Objetivo geral

O objetivo desta monografia é desenvolver um estudo sobre a influência que a adição de fibras de bambu tem no comportamento de argamassas feitas a partir de cimento Portland CP III.

1.4 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- Avaliar a resistência mecânica da argamassa com e sem a fibra de bambu;
- Avaliar a resistência à flexão;
- Avaliar a resistência à compressão.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Indústria da Construção Civil no Brasil

É importante destacar que a ICC (Indústria da Construção Civil) tem um enorme impacto na economia de um país. Por ser uma grande geradora de empregos, ela também se relaciona diretamente com o desenvolvimento de diversos outros ramos da economia, fornecendo as infraestruturas necessárias para construção de rodovias, ferrovias, portos, fábricas, hidrelétricas e servindo de alicerce para o desenvolvimento de diversos outros setores de um país. Além de também influenciar o crescimento de outros setores, a ICC demanda vários outros produtos de outros setores da economia, tornando a sua cadeia bastante complexa, desde o consumo de matérias-primas como brita e areia até o uso de aços de alta resistência e vidros temperados. [4]

Em um panorama mais atual, o mercado imobiliário e a construção civil formam um dos poucos seguimentos da economia que conseguiram crescer mesmo durante as piores fases da pandemia da Covid-19. De acordo com a Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC), as vendas de unidades residenciais cresceram 9,8% no ano de 2020. Para o ano de 2022, a previsão é que o crescimento desse mercado seja entre 5 - 10% diante de uma alta de 3% do Produto Interno Bruto (PIB) [5].

2.2 Cimento

A mistura de cimento com água forma uma massa gelatinosa, chamada de “gel”, que após a reação de hidratação estar completa, começa a cristalizar, endurecendo a mistura e proporcionando um material com ótimas propriedades mecânicas para aplicações na construção civil. [6]

A composição principal do cimento é o clínquer. O clínquer que é constituído majoritariamente por calcário, argila e conta com a adição de alguns óxidos como o Óxido de ferro III – Fe_2O_3 e o Óxido de alumínio – Al_2O_3 . Quando esses materiais são misturados e submetidos a altas temperaturas (até 1500 °C), inicia-se o processo de clinquerização com a liberação do CO_2 do Carbonato de Cálcio, formando o Óxido de

Cálcio, que inicia a formação do clínquer. O que acaba diferenciando o cimento em suas propriedades é a variação de 4 elementos: gesso, escória, argila pozolânica e calcário (Fíler). [7]

A Figura 1 representa como é possível identificar que tipo de cimento está sendo comprado a partir de sua embalagem. No Brasil, o mais utilizado é o Portland, e dentro dele, existem diversas outras classificações. Cada classificação traz uma diferente propriedade e composição para o cimento, por isso é de extrema importância de que quem está adquirindo o material consiga entender o que a embalagem quer dizer e qual a finalidade em que o cimento será utilizado.

Figura 1 – Embalagem cimento Portland



Fonte: Portal do Concreto [7]

O cimento é de extrema importância para a construção civil, e é um dos materiais mais consumidos no mundo todo. Esse material tem aspecto pulverulento, ou seja, é um pó, e majoritariamente constituído de aluminossilicatos. Ele pode ser definido como um aglomerante ativo e hidráulico, pois, serve de ligante para união de grãos de

agregados(areia), mas, precisa de um agente externo para que a reação comece, que no caso é a água. [8]

- **Gesso**

O gesso, um material aglomerante composto majoritariamente por sulfato de cálcio di-hidratado, é misturado ao clínquer para regular o início do endurecimento do cimento. Um cimento com menos gesso do que o necessário, endurece rápido demais, o que torna difícil seu manuseio na construção, e um cimento com pouco gesso pode nunca atingir a durabilidade desejada, por isso é muito importante entender a dosagem exata desse aglomerante. [8]

- **Escória**

A cada tonelada de aço produzido nas usinas siderúrgicas, tem-se a formação de 330 kg de um resíduo nos alto-forno, que é conhecido como escória. A sua composição varia dependendo da natureza do minério, consumo de coque e o tipo de ferro que está sendo produzido, e isso faz com que as proporções de cal, sílica, alumina e magnésio variem na escória. A função da adição desse material no cimento é tornar a liberação de calor do processo de hidratação mais lenta.[8]. Outro fator importante é que a escória, como seu próprio nome já leva a entender, é o resíduo de um processo, e toda vez que esse material, que seria descartado a princípio, consegue ser incorporado a outro processo, os ganhos ambientais e econômicos são importantíssimos.

- **Pozolanas**

Seu papel fundamental é tornar o cimento mais impermeável. Elas formam compostos aglomerados na presença de água e hidróxido de cálcio, ou seja, formam uma pasta que ajuda a ligar as partículas do agregado. As pozolanas podem ser naturais ou artificiais, as artificiais são produzidas pela combustão de carvão mineral

ativado ou argila, ou xisto argiloso em temperaturas próximas à 700°C As cinzas são calcinadas (queimadas) a 900°C. [8]

- **Filler**

O filler calcário é uma matéria-prima com granulometria muito baixa, aumentando assim a trabalhabilidade e reduzindo a permeabilidade do cimento. Provém de materiais finamente moídos, geralmente basalto, calcário e materiais carbonáticos. [8]

Tabela 1 – Classificação cimento Portland

Nome técnico		Clínquer + Gesso	Adições	Sigla	Classe (MPa)
Cimento Portland Comum (NBR 5732)	Cimento Portland comum	100%	-	CP I	25 32 40
	Cimento Portland comum com adição	95-99%	Escória, pozolana ou filler(até 5%)	CP I-S	25 32 40
Cimento Portland Compostos (NBR11578)	Cimento Portland composto com escória	56-94%	Escória (6 - 34%) Filler (0-10%)	CP II-E	25 32 40
	Cimento Portland composto com pozolana	76-94%	Pozolana (6-14%) Filler (0-10%)	CP II-Z	25 32 40
	Cimento Portland composto com filler	90-94%	Filler (6-10%)	CP II-F	25 32 40
Cimento Portland de alto-forno (NBR 5735)		25-65%	Escória (35-70%) Filler (0-5%)	CP III	25 32 40
Cimento Portland Pozalânico (NBR 5736)		45-85%	Pozolana (15-50%)	CP IV	25 32
Cimento Portland de Alta Resistência inicial (NBR 5733)		95-100%	Materiais carbonáticos (até 5%)	CP V ARI	-

Fonte: Adaptado Portal do Concreto [8]

- **CP I – Cimento Portland Comum**

É usado na construção quando nenhuma função especial é necessária. Normalmente, em concreto que não foi exposto a águas subterrâneas ou sulfato do solo, e que não requer liberação rápida ou evitar geração de calor na hora da hidratação. Comparado a outros tipos, seu alto custo e baixa resistência fazem com que quase não seja mais utilizado no mercado. A razão pelo seu alto custo é porque esse cimento é composto 100% por clínquer e gesso, o que torna o custo bem elevado. [8]

- **CP I-S – Cimento Portland comum com adição**

O Cimento Portland comum com adições (CP I-S) é utilizado quase na mesma situação do anterior, mas são um pouco mais baratos, pois permite a incorporação de aditivos e requer uma quantidade menor de clínquer. Conforme mostra a Tabela 1, tem-se a adição de até 5% de escória, argila pozolânica ou calcário. [8]

- **CP II-E – Cimento Portland composto com escória**

O cimento composto varia conforme a sua adição. No caso do cimento composto com adição de escória, ele é utilizado na elaboração de construções que necessitam que a liberação de calor seja mais lenta no processo de hidratação do cimento, assim evita-se a expansão do material e a surgimento de fissuras e trincas quando o cimento já está seco e exposto a baixas temperaturas. Além da presença da escória, esse tipo de cimento também pode ter uma variação de 0-10% de calcário em sua composição. [8]

- **CP II-Z – Cimento Portland composto com pozolana**

Esse tipo de cimento é indicado para a utilização em ambientes agressivos ou em estruturas que ficam em contato com a água como barragens, pontes etc. Quando a pozolana é adicionada na formulação do cimento, temos um desenvolvimento de resistência menor no início da cura, porém, a resistência obtida no final do processo é

superior ao dos cimentos sem adições. Um ponto que torna esse cimento similar ao CP II-E é que o aditivo também gera um calor de hidratação menor, porém, o diferencial fica nas propriedades de resistência química que esse tipo de cimento ganha. Nesse caso, também é possível ter uma adição de 0-10% de filler em sua composição. [8]

- **CP II-F – Cimento Portland composto com filler**

O cimento com adição apenas de filler possui maior trabalhabilidade, por isso é um cimento amplamente utilizado para argamassas, estruturas de concreto armado, assentamento, revestimentos ou outras estruturas em locais não corrosivos. O filler (filler calcário) é obtido por moagem fina de calcário, basalto, carbonato e outros materiais, e devido à granulometria de sua partícula ser muito fina, é um bom material para melhorar a trabalhabilidade e reduzir a permeabilidade do material. [8]

- **CP III – Cimento Portland de alto forno**

Muito utilizado em grandes obras da indústria da construção civil como estradas, tubulações, túneis, pistas de aeroportos, entre outros que necessitam de um material estrutural com grande resistência e durabilidade. Similar ao CP II-E porém, com a adição de escória muito maior (35-70%) portanto, sua liberação de calor durante a hidratação é ainda mais lenta, trazendo ao material alta impermeabilidade e resistência bem elevada. [8]

- **CP IV – Cimento Portland Pozolânico**

Esse cimento tem características similares ao CP II-Z, porém com uma adição superior de pozolana em sua composição (15-50%). O incremento desse material com o cimento e a água faz com que o calor de hidratação seja baixo e permite a formação de materiais aglomerantes, que ao ser utilizado em conjunto com agregados, proporciona uma maior estabilidade em ambientes agressivos e ácidos. [8]

- **CP V ARI – Cimento Portland de alta resistência inicial**

Esse cimento, assim como o CP I, não contém adições em sua composição, a não ser até 5% em massa de material carbonático. O que difere do cimento comum é o teor de calcário e argila na composição do clínquer e no grau de moagem, neste caso, o clínquer permanece na moagem por mais tempo e tem tamanho menor que o cimento convencional. O tamanho de partícula menor permite que o cimento tenha uma reação de hidratação mais rápida, proporcionando maior resistência com tempos de cura mais curtos. [8]

Na Tabela 2 é possível observar de forma resumida quais são as principais características que devem ser levadas em conta na escolha do cimento conforme sua aplicação.

Tabela 2 – Tipos de cimento x características

Propriedade	Comum e Composto	Alto-Forno	Pozolânico	Alta Resistência Inicial
Resistência à compressão	Padrão	Menor nos primeiros dias e maior no final da cura	Menor nos primeiros dias e maior no final da cura	Muito maior nos primeiros dias
Calor gerado na reação do cimento com a água	Padrão	Menor	Menor	Maior
Impermeabilidade	Padrão	Maior	Maior	Padrão
Resistência aos agentes agressivos (água do mar e de esgotos)	Padrão	Maior	Maior	Menor
Durabilidade	Padrão	Maior	Maior	Padrão

Fonte: PUGLIESE, Nataley [9]

2.3 Processo produtivo

A primeira etapa do processo produtivo do cimento é a extração do calcário das jazidas, e dependendo da origem, pode conter impurezas como magnésio, alumínio, ferro e outros. Geralmente as fábricas que produzem o cimento se localizam próximas às jazidas de calcário, pois, o material é muito pesado,e são necessárias diversas viagens para levar todo o material extraído para a planta, logo essa estratégia acaba gerando grandes economias. [10]

Para se obter o calcário, primeiramente são extraídas grandes rochas calcárias com o auxílio de explosivos. Essas rochas são levadas até um britador para que sua granulometria fique com grãos menores ou iguais a 25 mm. Nesse processo, para aumentar a qualidade do clínquer que será produzido, são adicionados argila, quartzito e minério de ferro na mistura. Após a britagem, o material é direcionado para moinhos de bola ou rolo buscando diminuir ainda mais a granulometria e homogeneizar a mistura até obter-se a farinha de cimento. [10]. A Figura 2 mostra onde se localizam as usinas de cimento no Brasil, onde a região do país com maior número de fábricas é a região Sudeste.

A farinha de cimento é levada até fornos de calcinação para que ocorra a decomposição térmica e liberação de gás carbônico, dando origem ao processo de clinquerização. Esses fornos que podem chegar até 1450 °C de temperatura, onde a farinha sofre uma fusão incipiente e a origem ao clínquer. A última etapa é realizar a moagem do clínquer obtido na granulometria desejada e inserir algumas adições como gesso, e caso seja do interesse da aplicação, escória e calcário [10].

Na Figura 2 é possível observar as fábricas de cimento distribuídas no Brasil, onde a maior concentração está no Sul, Sudeste e Nordeste do país, sendo a fábrica do grupo Votorantim, localizada na cidade de 62.Rio Branco do Sul (PR) a maior da América Latina, com uma capacidade de produção de 7 milhões de toneladas de cimento por ano.

Figura 2 – Fábricas de cimento no Brasil



Fonte: RODRIGUES, Antônio Fernando da Silva [11]

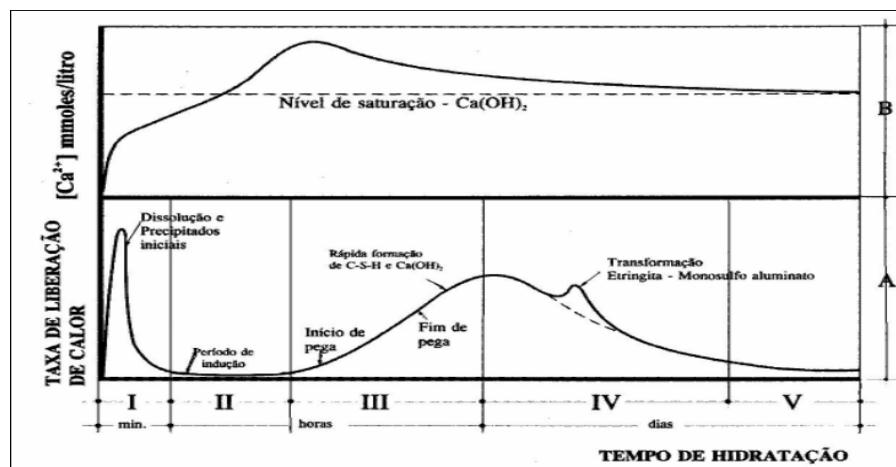
2.4 Cura

A partir do momento em que é adicionada a água no cimento o processo de hidratação já começa com a troca iônica entre os sólidos e a fase líquida presente. No clínquer estão presentes alguns componentes com elevada solubilidade, isso dá origem e causa um rápido aumento na concentração de aluminatos, sulfatos e álcalis (sódio, potássio e cálcio) na fase líquida, onde a maior contribuição a essa fase são descritas a seguir [12]:

- Silicatos de cálcio $\rightarrow 3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_3S) e $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_2S): Ca^{2+} e OH^- ;
- Aluminatos de cálcio $\rightarrow 3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (C_3A) 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 $\rightarrow (\text{CaSO}_4)$: Ca^{2+} e SO_4^{2-} ;
- Sulfatos alcalinos $\rightarrow (\text{Na}_2\text{SO}_4 \text{ e } \text{K}_2\text{SO}_4)$: Na^+ , K^+ e SO_4^{2-}

À medida que a fase anidra se dissolve, formam-se compostos menos solúveis, levando à precipitação de hidratos que compõem a pasta endurecida. A Figura 3 mostra como varia a liberação de calor (A) e a concentração de Ca^{2+} (B) durante as 5 etapas do mecanismo de hidratação do cimento: (I) estágio inicial, (II) indução, (III) aceleração, (IV) desaceleração e (V) estágio final.

Figura 3 – Variação de liberação de calor (A) e a concentração de Ca^{2+} (B) durante a hidratação



Fonte: QUARCIONI, V. A. [12]

- **Estágio Inicial ou de pré indução (I)**

Como se observa na Figura 3, essa fase é caracterizada pelo pico na taxa de liberação de calor do processo. Essa alta é conduzida pelo molhamento inicial das partículas presentes (ação exotérmica), reações de dissolução dos sulfatos alcalinos e liberação de íons K^+ , Na^+ e SO_4^{2-} , dissolução do sulfato de cálcio até a saturação da reação. Ocorre também a formação de uma camada de gel de silicato devido a dissolução das fases anidras, que envolve os grãos anidros do cimento.[12]

- **Estágio de indução (II)**

Durante o período de indução (segunda etapa), a camada de gel depositada sobre as partículas de cimento gera uma barreira entre a fase anidra e a solução aquosa.

Dura cerca de 30 minutos a 3 horas, momento em que a camada de gel começa a se decompor e novamente permite a difusão iônica entre a fase anidra e a solução. Caracteriza-se pelo baixo valor calórico. Durante esta etapa, o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ também é supersaturado até o início da precipitação.[12]

- **Estágio de aceleração (III)**

Na etapa seguinte, o estágio da aceleração (etapa III), predomina o mecanismo de dissolução-precipitação, que leva à supersaturação iônica da fase aquosa e à formação de silicato de cálcio hidratado, resultando em diminuição gradual da concentração de Ca^{2+} . Esta é a fase em que aparece o segundo pico exotérmico e o onde ocorre o famoso fenômeno da pega acontece devido a rápida hidratação dos silicatos até sua saturação e liberação máxima de calor. A extensão curva que representa a hidratação e liberação de calor é dependente da granulometria do cimento que está sendo utilizado. [12]

- **Estágio de desaceleração (IV)**

É caracterizada pela diminuição na taxa de liberação de calor devido. Esse fenômeno é resultado da precipitação de hidratos que revestem as partículas de cimento dificultando a solubilização das fases anidras, e pela redução da concentração de íons na solução. Com isso, passamos a ter somente a difusão iônica entre as moléculas, o que causa uma grande diminuição na velocidade da reação.

É importante destacar que ainda ocorre, mesmo que em baixa intensidade, a formação de silicatos de cálcio hidratados. [12]

- **Estágio final (V)**

Na etapa final (etapa V), à medida que o produto de hidratação cresce, o espaço anteriormente ocupado pela água misturada é gradualmente ocupado, e o processo de hidratação prossegue através de um mecanismo químico topológico, ou seja, um processo de hidratação no estado sólido, diretamente na superfície dos compostos sem que eles entrem em solução. [12]

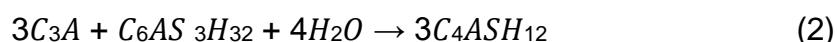
Para um melhor entendimento das reações de hidratação que serão descritas, as formulações químicas da Figura 4 são utilizadas para méritos de simplificação.

Figura 4 – Simplificação das formulações químicas dos silicatos e aluminatos presentes na reação de hidratação do cimento

C - CaO S - SiO ₂ A - Al ₂ O ₃ F - Fe ₂ O ₃	C₃S - 3CaO.SiO ₂ - Silicato tri-cálcico C₂S - 2CaO.SiO ₂ - Silicato di-cálcico C₃A - 3CaO.Al ₂ O ₃ - Aluminato tri-cálcico C₄AF - 4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃ - Ferro Aluminato tetra-cálcico
---	--

Fonte: LEONI, Matheus [13]

As principais reações no processo de hidratação do cimento podem ser descritas conforme abaixo:



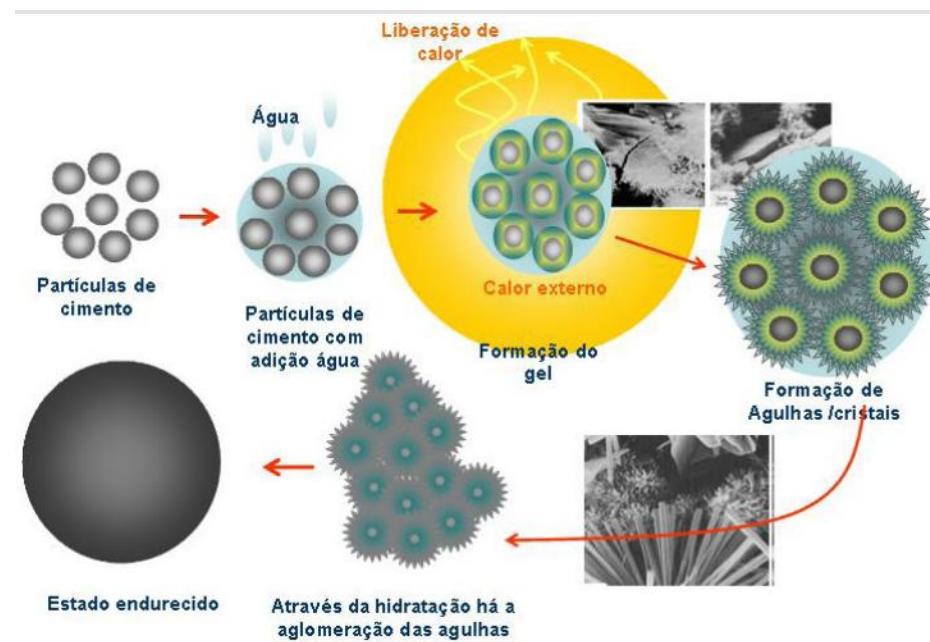
Para que todo o processo de hidratação ocorra corretamente é necessário garantir que a umidade relativa do ar ultrapasse 95% para evitar a perda de umidade. Também é importante controlar a temperatura durante a cura e hidratação, pois além do calor

gerado durante o processo, a temperatura externa também afeta diretamente o desempenho do concreto.

O aumento da temperatura favorece a reação de hidratação e promove aumento na liberação de calor inicial. Ao mesmo tempo, porém, acelera o processo de desidratação por hidratação microestrutural, esvaziando o espaço anteriormente ocupado pela água, o que, por sua vez, reduz muito o desempenho do material e suas propriedades mecânicas [14]. Para eliminar o possível malefício do efeito da temperatura, o ideal é que a hidratação ocorra em uma atmosfera próxima a 100% de concentração de água, assim a perda para o ambiente é quase nula.

A Figura 5 ilustra, em visão microscópica, como as partículas de cimento reagem ao processo de hidratação, a formação do gel através da liberação de calor do processo, como são formadas as agulhas/cristais de etringita e principalmente a importância de um ambiente com alta concentração de água durante a hidratação até o cimento atingir sua fase final de estado endurecido..

Figura 5 – Processo de hidratação do cimento

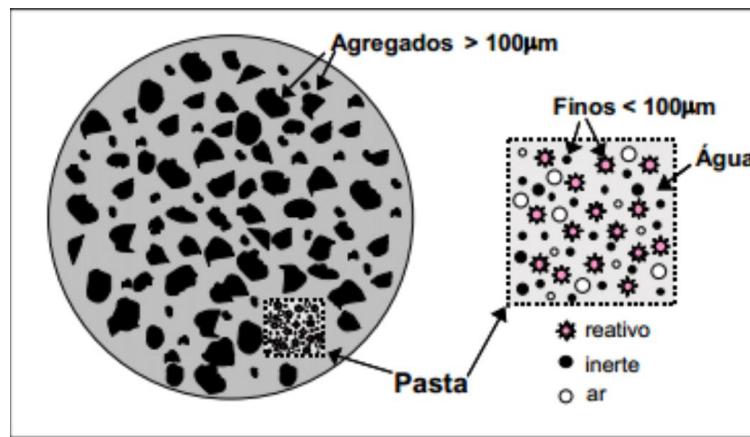


Fonte: Laguna e Ikematsu [14]

2.5 Argamassa

A argamassa é composta por aglomerante (cimento), agregado miúdo (areia), cal (plastificante), água e se for necessário, aditivos [15]. As principais funções dela são: proteger e vedar as estruturas contra agentes agressivos, evitar a degradação aumentando a durabilidade e diminuindo os custos de manutenção, isolamento termoacústico e estanqueidade à água e gases [16]. A Figura 6 traz uma visão microscópica da estrutura de uma argamassa padrão.

Figura 6 - Representação da microestrutura da argamassa colante no estado fresco



Fonte: Bellei, Poliana & Mohamad, Jihad & Kirchhof, Larissa [17]

De forma geral, as argamassas podem ser divididas em 4 grupos:

- **Argamassa de assentamento**

Tem como principal objetivo servir de união para os blocos cerâmicos convencionais como pisos ou estruturais como blocos. O ideal é que a espessura da aplicação seja de no máximo 1 cm, fazendo com que os blocos se unam através da ancoragem mecânica, que é quando a argamassa adere nos poros do bloco e se fixa ali, não permitindo que as partes unidas se movimentem [18].

- **Argamassa de revestimento**

A argamassa de revestimento é utilizada para recobrir, dar rugosidade e corrigir defeitos. Sua aplicação é geralmente dividida em três etapas: o chapisco que é uma argamassa com uma consistência um pouco mais mole e é aplicado nas paredes para melhorar a aderência entre a alvenaria e a própria parede. Depois do chapisco vem o emboço, que é um pouco mais consistente, mais rugoso e dá o formato desejado a parede que está sendo aplicado sendo conformado com o auxílio de taliscas, mestras e preenchimento. A última etapa, caso não exista nenhum revestimento cerâmico a ser aplicado, é o reboco, que permite corrigir todas as imperfeições ainda existentes [18].

- **Argamassa colante**

Esse tipo de argamassa é feito a partir de uma mistura já embalada de cimento Portland, agregado muito fino e aditivos químicos não tóxicos que conferem adesividade ao material. A argamassa colante é superior à argamassa feita na obra pois as proporções são muito bem definidas e feitas de forma industrializada. As proporções de cimento, agregado e polímeros depende da aplicação, ambiente e do esforço que o material será solicitado [18].

- **Argamassa de rejuntamento**

Similar a argamassa colante pois também pode ser comprada a partir de uma mistura pronta, porém é mais utilizada para preencher o vão entre peças cerâmicas, podendo receber diversos pigmentos e oferecer acabamento a obra. Suas principais características são baixa permeabilidade, acabamento liso facilidade de limpeza [18].

2.6 Fibras sintéticas e naturais

A incorporação de materiais como fibras, sendo elas sintéticas ou naturais em matrizes de materiais frágeis, é um tema estudado há bastante tempo, e era aplicado antes mesmo do ser humano realmente entender os conceitos de engenharia por trás dessa técnica. Exemplo disso, conforme explicado anteriormente, são as construções pau-a-pique.

Abordando mais especificamente as fibras sintéticas como aço, vidro e materiais poliméricos, elas são vitais hoje em dia para a construção civil. Em 1991 Agopyan classificou que a fibra de polipropileno era a mais adequada quando se tratava de incorporação de fibras em materiais de construção. A aplicabilidade de utilizar esse aditivo como reforço depende das propriedades do compósito, do teor de fibras, do módulo de elasticidade, comprimento e aderência à matriz [19]. Apesar de serem fundamentais para aumentar a aplicabilidade das cerâmicas no meio da construção civil, as fibras sintéticas consomem um grande volume, tanto de matéria prima mineral, quanto química, para a sua produção, gerando também uma grande quantidade de resíduo que é difícil de ser separado e tratado [20].

As fibras vegetais são definidas como materiais que são obtidos de fontes renováveis e que podem ser facilmente reciclados, ou em caso de descarte irregular, são facilmente biodegradáveis. As possibilidades de fibras naturais são inúmeras, alguns exemplos mais conhecidos são o coco, bambu, linho, algodão, cana-de-açúcar e linho. Todas elas proporcionam propriedades mecânicas razoavelmente boas em troca de um baixo custo, alta força específica, pegada ecológica e facilidade na fabricação. [20]

Ao misturar uma fibra sintética ou natural na argamassa, obtém-se fundamentalmente duas fases heterogêneas: o reforço e a matriz. O reforço será a própria fibra, que tem a habilidade de criar pontes entre as fissuras e controlar a propagação e abertura delas, aumentando a tenacidade e a rigidez à flexão. A matriz é a pasta cimentícia que irá formar a argamassa após a cura, portanto enquanto ela está

no seu estado maleável e pastoso, ela consegue envolver completamente as fibras, garantindo assim uma boa transferência de tensões dentro da estrutura do material. Essas transferências de tensões acontecem principalmente quando acontece a primeira fissura na matriz, fazendo com que a fibra sirva de ponte de transferência do esforço e minimizando a concentração de tensões na extremidade da fissura, o que ocasionaria na sua propagação e possível fratura do material [20].

2.7 Bambu

O bambu sempre esteve presente na civilização, em especial, a asiática, e acompanhou o ser humano nos últimos séculos servindo como abrigo, alimento, ferramenta e outras utilidades. Sabe-se que o primeiro filamento utilizado em uma lâmpada por Thomas Edson foi feito de bambu e que Santos Drumont utilizou colmos de bambu para a elaboração dos seus primeiros projetos de avião [21].

O que diferencia o bambu dos outros vegetais estruturais, que podem ser utilizados como fibras naturais, é a sua alta produtividade. Com um tempo médio de crescimento de 2 anos meio, esse material já encontra no seu estado mais maduro e com melhores propriedades aplicáveis à Engenharia. Além do fato de ter um formato tubular, o que o torna estruturalmente estável, sua alta resistência com baixa massa específica faz com que ele também seja destaque entre os outros vegetais em relação à trabalhabilidade, transporte e custos de produção, o que afeta diretamente o orçamento das obras da construção civil [22].

3 PROPRIEDADES MECÂNICAS

3.1 Tensão de ruptura

Materiais cerâmicos dificilmente podem ser ensaiados por tração devido a três fatores principais: baixa taxa de deformação desse tipo de material antes da ruptura; formas exigidas para confecção dos corpos de prova; a própria fixação da amostra nos aparelhos pode gerar trincas que impactariam no resultado do experimento.

Portanto, para calcular valores relacionados às propriedades de tensão de ruptura, é feito o ensaio de flexão em 3 ou 4 pontos até a fratura em corpos de prova de seção reta, circular ou retangular. Obtendo-se os valores de força máxima experimentalmente, conhecendo as dimensões do corpo de prova, espaçamento entre os suportes de apoio e utilizando a NBR 13279 (ABNT, 2005), é possível, através da Equação (5), calcular a resistência a flexão:

$$R_f = \frac{F_f L}{bd^2} \quad (5)$$

onde:

R_f: resistência à tração na flexão, em MPa;

F_f: carga máxima aplicada verticalmente no centro da amostra, em N;

L: distância entre os suportes, em mm;

b: largura do corpo de prova, em mm;

d: altura do corpo de prova, em mm.

No ensaio de flexão, a face inferior é submetida a um estado de tração, e a face superior a um estado de compressão. Como a fatura começa a se propagar a partir da face que está sendo submetida à tração e que a resistência à tração dos materiais cerâmicos é equivalente a 10% do limite de resistência a compressão desse mesmo material, pode-se trocar o teste padrão de tração pelo de flexão em 3 pontos para materiais cerâmicos frágeis.

3.2 Resistência à compressão

A resistência à compressão é caracterizada como a tensão máxima absorvida pelo corpo de prova até que ocorra a desagregação do material que faz parte de sua estrutura. No caso dos concretos, é a ruptura do agregado graúdo, já para o caso das argamassas, pode ser considerado a fratura da matriz de cimento que contém os agregados miúdos. No ramo da Engenharia Civil, a resistência à compressão é a propriedade mais importante das argamassas e concretos, pois é através dessa propriedade que diversas outras são associadas, como a fluênciia, módulo de elasticidade etc. [23]

Essa propriedade é muitas vezes abordada em textos e teses com o termo “Fck”, uma sigla em inglês que significa *Feature Compression Known*. Para o ensaio, a máquina irá exercer uma força gradual de compressão sobre o corpo de prova até sua fratura ou desagregação.

No campo da Engenharia Civil aplicado diretamente as obras de construção, quando o resultado do ensaio for inferior à resistência especificada pelo projeto estrutural, os engenheiros do projeto devem verificar a capacidade de carga da estrutura da construção. O primeiro passo é remover o corpo de uma estrutura chamado de testemunho. Se a eficácia do concreto não puder ser demonstrada ou se for considerada necessária ação corretiva para a estrutura após análise, podem ser necessários procedimentos como demolição, restrições de uso, restauração estrutural etc. [24]

Esses procedimentos mostram o quanto importante e relevante são os ensaios de resistência e a qualidade do concreto. Uma vez que o material falha ou apresenta propriedades inferiores ao presente nas embalagens do cimento, isso pode causar prejuízos financeiros enormes e muitas vezes até inviabilizar um projeto. [24]

Para o cálculo de resistência à compressão, foi utilizada a Equação (6) extraída da NBR 13279 (ABNT, 2005) como é mostrado abaixo:

$$R_c = \frac{F_c}{bd} \quad (6)$$

onde:

R_c: resistência à compressão, em MPa;

F_c: carga máxima aplicada, em N;

b: largura do corpo de prova, em mm;

d: comprimento do corpo de prova, em mm.

4 MATERIAIS E MÉTODOS:

4.1 Composição das amostras

Para a confecção dos corpos de prova foi utilizado o traço 1:1:6 (cimento:cal:areia) com o fator de água de 0,65 em relação ao cimento e cal. No total foram confeccionadas 16 amostras, sendo que, a cada 4, a mistura de fibra de bambu foi apresentada nas proporções de 0% (referência), 2,5%, 5% e 10% em relação ao peso dos aglomerantes. O cimento utilizado foi o CP III e as fibras de bambu utilizadas possuíam uma granulometria entre 2 mm, e 1,4 mm.

4.2 Fibra de bambu

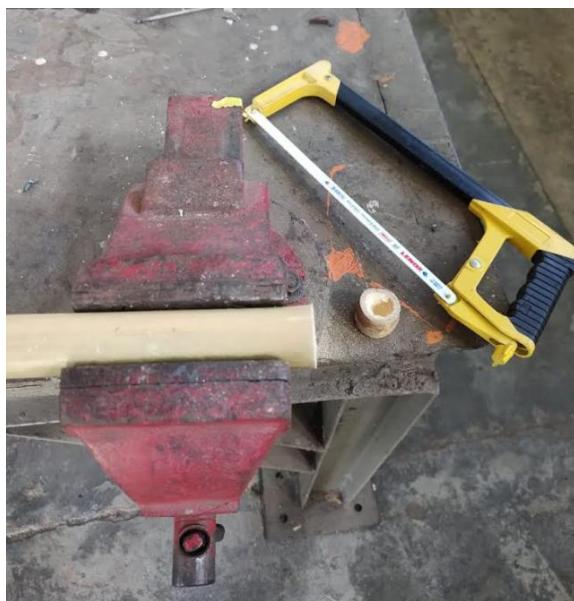
A fibra de bambu foi obtida nos laboratórios do Departamento de Engenharia de Materiais, onde foram selecionados bastões de bambu, maduros com 5 anos de idade, e cortados em pedaços menores com o auxílio de uma morsa e um serrote. Inicialmente, os pedaços menores deveriam ser cortados com o uso de uma serra circular de bancada, porém, devido ao atrito causado pela alta velocidade de rotação do equipamento, os fragmentos de bambu poderiam queimar, e consequentemente influenciar os resultados futuros do experimento. Os nós dos bambus foram desprezados após os cortes, utilizando-se apenas o colmo.

Após a obtenção dos fragmentos menores de bambu, eles foram fragmentados com um martelo em pedaços ainda menores e foram colocados em um moinho de facas modelo Momesso no Departamento de Engenharia de Materiais (DEMAR). Os

pedaços foram adicionados de forma gradativa buscando não sobrecarregar a moagem da máquina e esse processo foi feito até obter-se uma porção de fibra em formato, tamanho e quantidade desejados. Após o uso do equipamento, ele foi higienizado com o auxílio de uma mangueira de ar comprimido.

O bambu moído foi coletado do equipamento e armazenado em uma caixa de plástico que permitiu um bom isolamento do ambiente externo. Além dessa primeira proteção, a caixa de plástico também ficou armazenada com a fibra de bambu no laboratório de cerâmicas dentro de barris de plástico lacrados que, também estavam armazenando a cal e o cimento que seriam utilizados posteriormente e também podem sofrer variações em suas propriedades caso fiquem em contato com ambientes muito úmidos ou não controlados. A Figura 7 ilustra os equipamentos utilizados para cortar o bambu (esquerda) e as fibras de bambu obtidas do moinho de faca.

Figura 7 – a) Serrote e morsa utilizados para a fragmentação dos bastões de bambu, b) Fibras de bambu



(a)



(b)

Fonte: Autor

Devido à grande irregularidade nos tamanhos obtidos, foi necessária a separação granulométrica em peneira para obtenção de porções homogeneizadas de fibra de bambu. Esse processo de separação foi realizado no Laboratório de Cerâmica com o auxílio de um vibrador de peneiras da marca Bertel e de peneiras disponíveis no laboratório (Figura 8). Foram encaixadas uma em cima da outra as peneiras de 2mm, 1,4mm e 1mm e a fibra de bambu adicionadas à peneira do topo até ser preenchida. Após essa etapa as peneiras foram levadas até ao agitador onde ficaram por 5 minutos sendo separadas. A fibra de bambu retida entre as peneiras de 2mm e 1,4mm foi separada em um recipiente à parte e esse processo foi repetido até que a quantidade de fibra de bambu peneirada fosse considerada a suficiente para a confecção de todos os corpos de prova a serem utilizados nos ensaios a seguir.

A Figura 8 ilustra o esquema em que as peneiras foram organizadas e as travas de segurança acopladas no agitador.

Figura 8 – Peneiras organizadas no agitador Bertel



Fonte: Autor

4.3 Obtenção corpos de prova

Obtendo-se a fibra com a granulometria desejada, e as massas de cimento CP III, água, cal e areia já definidos, realizou-se a elaboração dos corpos de prova. Na tabela

3, estão destacadas as quantidades de material utilizadas para cada um dos traços das amostras de argamassa. A norma utilizada foi NBR 13279 (ABNT, 2005).

Tabela 3 – Composição dos corpos de prova

	Areia (g)	Cimento (g)	Cal (g)	Água (g)	Bambu (g)	Bambu (%)
Traço 01	900 g	150 g	150 g	195 g	-	0%
Traço 02	900 g	150 g	150 g	195 g	7,5 g	2,5%
Traço 03	900 g	150 g	150 g	195 g	15 g	5%
Traço 04	900 g	150 g	150 g	195 g	30 g	10%

Fonte: Autor

A argamassa foi preparada em um misturador planetário da marca Cairo presente no Laboratório de Cerâmica para que fosse possível obter uma mistura homogênea. Primeiramente, foram adicionadas a areia, cimento, cal e fibra de bambu, mantendo o equipamento a uma velocidade de 60 rpm enquanto a água era despejada de forma gradual. Após os 195g de água serem completamente transferidos ao recipiente do misturador, o equipamento continuou operando por mais 2 minutos na velocidade de 60 rpm (rotações por minuto) e depois por mais 2 minutos operando na velocidade de 140 rpm, obtendo assim uma energia de cisalhamento maior. Na Figura 9, é possível observar o misturador planetário presente no Departamento de Engenharia de Materiais.

Figura 9 – Misturador Planetário



Fonte: Autor

Com o auxílio de uma espátula, a mistura totalmente homogeneizada foi colocada direto no molde de aço inox lubrificado com óleo automotivo. A massa cimentícia foi então levada até o vibrador de peneiras para que a vibração do equipamento auxiliasse no preenchimento total de todas as cavidades do molde, garantindo que não existisse bolhas de ar no meio dos corpos de prova. A mistura foi curada por 24h antes de ser desmoldada e cada traço foi capaz de reproduzir 5 amostras prismáticas de iguais dimensões (150 mm x 25 mm x 25 mm) que posteriormente foram colocadas sob as condições de cura. Na Figura 110é possível observar uma amostra de cada traço (0%, 2,5%, 5% e 10% de bambu da esquerda para a direita) que foi ensaiada posteriormente.

Figura 10 – Corpos de prova do Traço 1 ao Traço 4 (esquerda para direita)



Fonte: Autor

4.4 Cura

Para todos os 4 tipos de traço, a cura foi feita submersa em água durante o período de 28 dias. É importante destacar que antes dos 28 dias imerso na água, o processo de cura das amostras já se iniciou logo após sua confecção onde elas, durante 24h, ficaram em uma atmosfera saturada de água para garantir a resistência inicial necessária para desmoldagem. Portanto, pode-se considerar que o tempo de cura foi de 1+28 dias.

4.5 Retificação

Após os 28 dias de cura, foi necessário retificar as amostras para que elas ficassem com as dimensões e paralelismos necessários para o ensaio de fratura e compressão. Com o auxílio da retificadora Ferdimat TA60A e um rebolo rotativo abrasivo, os copos de prova foram movidos lentamente pelo deslocamento da mesa até que as superfícies dos corpos de prova ficassem completamente planos. A retificação foi feita em bateladas de 5 amostras fixadas através de placas metálicas que são presas magneticamente.

Figura 11 – Retificadora Ferdimat TA60A



Fonte: Autor

4.6 Resistência flexão

Após a etapa de retificação, as amostras ficaram 24h em estufas presentes no DEMAR, para que toda a água intrínseca nas amostras fosse eliminada para o ambiente. Os corpos de prova então foram levados ao laboratório para realização do ensaio mecânico na Máquina Universal de Ensaios (Modelo EMIC) para obter-se a tensão de ruptura das amostras de cada traço, através do ensaio de tração em 3 pontos baseado na NBR 13279 (ABNT, 2005).

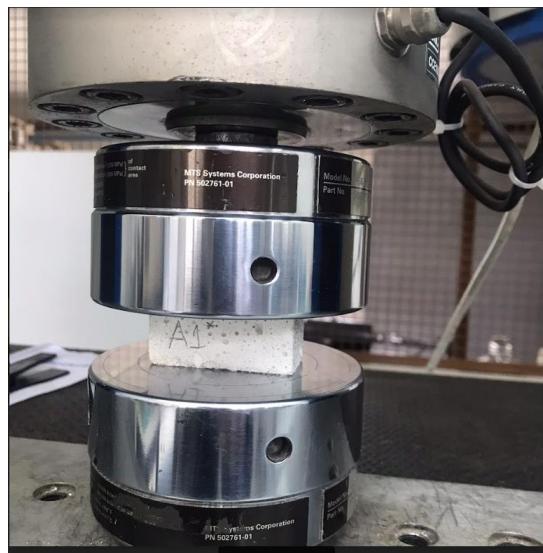
Para cada corpo de prova, foram obtidos experimentalmente os valores de força máxima necessária para ruptura. Esses valores quando aplicados na fórmula de resistência à tração na flexão, obtém-se em mega pascal (MPa) os valores de resistência a flexão para cada amostra e traço.

Um ponto importante a se destacar é que, com exceção do traço 3, foi realizado o ensaio para 4 corpos de prova de cada traço. No traço 3, uma das amostras fraturou no processo de desmoldagem, e na confecção de novas amostras com essa porcentagem de fibra de bambu esse acontecimento se repetiu.

4.7 Resistência à compressão axial

Após o ensaio de flexão os copos de prova foram fraturados em dois pedaços, portanto, a cada 4 corpos de prova para cada traço do ensaio de tração, foram obtidas 8 amostras para cada traço no ensaio de compressão axial. Essas metades foram levadas novamente à retificadora para que fosse possível criar uma superfície polida nas faces que foram fraturadas e obter o corpo de prova nos tamanhos ideais para os testes. Após a retificação, as amostras foram levadas ao equipamento de ensaio de compressão da marca *MTS Systems Corporation* que reproduz ambientes de compressão, variando a força (N) aplicada com o tempo até a fratura do material ensaiado, conforme mostra na Figura 12.

Figura 12 – Realização do ensaio de compressão axial para o traço 1.



Fonte: Autor

5 RESULTADO E DISCUSSÃO

Os resultados a seguir estão separados pelo tipo de ensaio e a influência do aumento da concentração de fibra de bambu na argamassa.

5.1 Resistência à flexão avaliando a variação da concentração de fibra de bambu na argamassa

Estão listados na tabela 4, os valores obtidos para a força máxima exercida nos corpos de prova para cada Traço, e os valores de resistência a flexão calculados a partir da Equação (5).

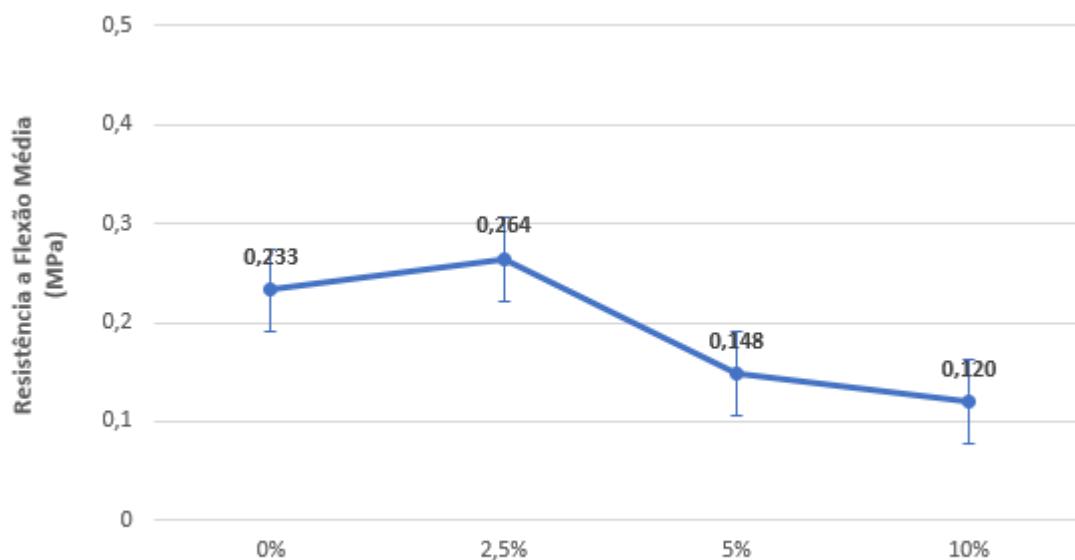
Tabela 4– Força máxima e resistência a flexão para as amostras em função a concentração de fibra de bambu

Argamassa	Força Máxima (N)	Resistência a flexão (MPa)
Traço 01 (0%)	$218,74 \pm 15,40$	$0,233 \pm 0,016$
Traço 02 (2,5%)	$247,76 \pm 16,54$	$0,264 \pm 0,017$
Traço 03 (5%)	$138,67 \pm 71,31$	$0,148 \pm 0,076$
Traço 04 (10%)	$112,39 \pm 39,71$	$0,120 \pm 0,042$

Fonte: Autor

A Figura 13, mostra a variação da resistência à flexão de cada traço conforme a concentração de fibra de bambu vai crescendo.

Figura 13 – Variação da resistência a tração conforme o aumento da porcentagem de fibra de bambu na composição



Fonte: Autor

Com os resultados obtidos, foi possível verificar que houve um aumento de aproximadamente 12% na resistência a flexão da argamassa, quando comparada a padrão, após a inclusão de 2,5% de fibra de bambu. Nesse tipo de teste, para esse tipo de composição, esse aumento pode ser explicado devido ao fato de a fibra, conforme é descrito na literatura em algumas porcentagens de adição, atuar como um reforço estrutural e criando pontes de distribuição de tensão ao longo do material. Uma analogia que pode ser feita é o funcionamento similar que as barras de aço têm em concretos reforçados [26]. Do ponto de vista microscópico, o aumento da resistência à flexão pode ser explicado devido ao fato de a fibra preencher os poros internos da argamassa e reforçar a matriz cimentícia, levando à uma redistribuição da tensão interna, evitando pontos de acúmulo de tensão e permitindo com que as trincas na

argamassa se propagassem de forma mais branca, retardando a fratura da amostra. [25].

Porém, conforme a porcentagem de fibra de bambu foi aumentando, verificou-se na Tabela 4 e Figura 13 que os valores de força e resistência a flexão diminuíram. Quando comparada à argamassa de referência sem fibra, os valores de resistência para 5% e 10% de bambu diminuíram aproximadamente 36% e 48% respectivamente. Essa diminuição tão elevada pode ser explicada pelo fato de que, ao se preparar uma massa cimentícia como a argamassa com um volume elevado de fibra, essas frações tornam a mistura mais rígida e mais difícil de ser trabalhada, resultando em um aparecimento maior de defeitos na matriz devido à baixa compactação da argamassa, gerando assim acúmulos de tensão ao longo do ensaio [26]. Uma quantidade não suficiente de matriz, não permite que todas as fibras sejam envolvidas pela massa, resultando em uma má transferência de tensão ao longo do corpo de prova e provocando a fratura do material com maior facilidade.

O ensaio de flexão em 3 pontos cessa quando ocorre a fratura das amostras, e para os corpos de prova com fibra de bambu em sua composição, foi possível observar que a fratura não acontecia de forma abrupta como tende a acontecer em materiais frágeis como as cerâmicas. Isso se deve ao fato de que, por mais que altos acréscimos de fibra em relação à matriz na composição da argamassa levem à diminuição da resistência à flexão total, também proporcionam a ela uma maior durabilidade e resistência após a fissuração da matriz cimentícia, podendo serem utilizados em aplicações onde seja de interesse uma maior tenacidade [27].

5.2 Resistência à compressão avaliando a variação da concentração de fibra de bambu na argamassa

Na tabela 5 é possível observar os valores obtidos para a força máxima exercida nos corpos de prova para cada Traço, e os valores de resistência à compressão calculados a partir da Equação (6).

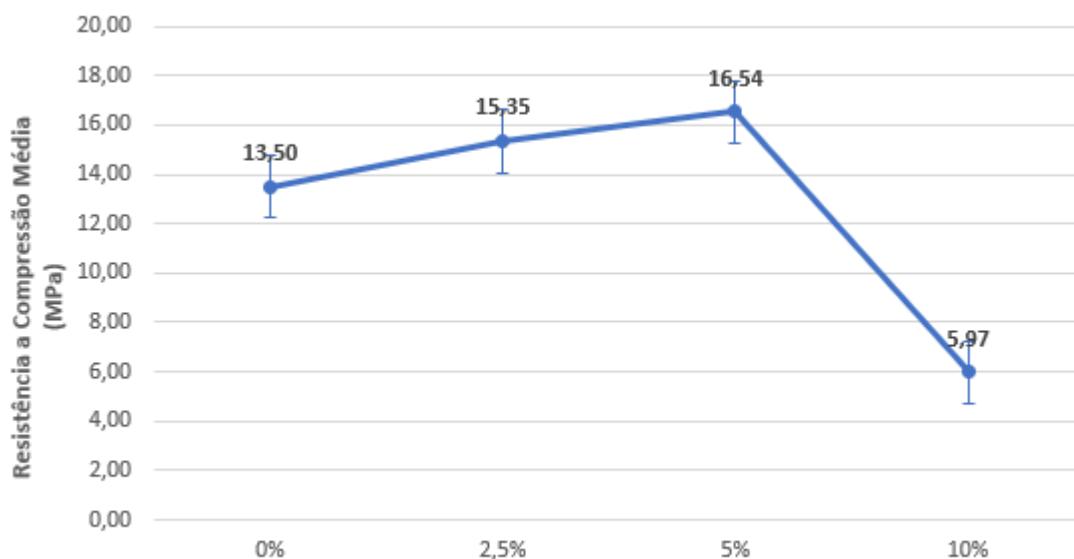
Tabela 5– Força máxima e resistência à compressão para as amostras variando a concentração de fibra de bambu

Argamassa	Força Máxima (N)	Resistência à Compressão (MPa)
Traço 01	18420 ± 1806	$13,50 \pm 1,27$
Traço 02	20246 ± 1558	$15,35 \pm 1,15$
Traço 03	21132 ± 1530	$16,54 \pm 1,34$
Traço 04	8105 ± 1960	$5,97 \pm 1,46$

Fonte: Autor

A Figura 14 mostra a influência da fibra de bambu na resistência à compressão de cada um dos traços.

Figura 14 – Variação da resistência à tração conforme o aumento da porcentagem de fibra de bambu na composição



Fonte: Autor

Para a resistência à compressão, o comportamento foi similar à resistência à flexão, onde inicialmente houve uma melhora no desempenho da argamassa no ensaio, porém com um acréscimo muito alto de fibras, o material tende a ceder com mais facilidade. As amostras com fibra de bambu até 5%, apresentaram uma melhora

de até 19% na propriedade da argamassa quando comparada à amostra sem adição. Isso pode ser explicado pelo fato de que ao sofrer os esforços de compressão, a compactação da matriz com a fibra de bambu aumenta a energia superficial de coesão entre as interfaces, sendo necessária uma força compressiva ainda maior para superar essa ancoragem na matriz e levar a amostra à fratura [25].

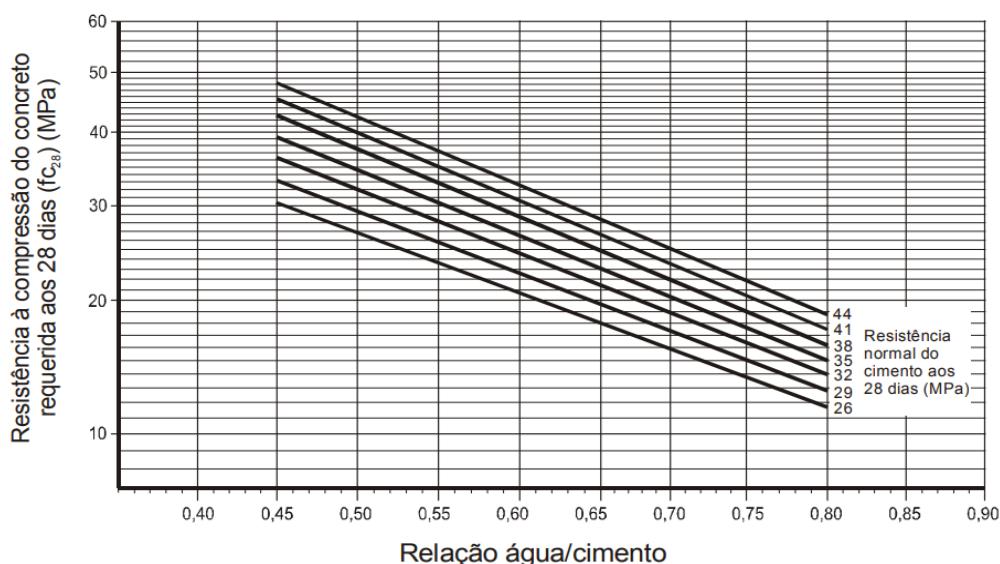
Analizando o Traço 4 (10%), a queda de resistência à compressão quando comprada a amostra padrão foi de 55%, e comparando com o Traço 3 (5%), uma diminuição na faixa de 64%. Esse fato pode ser atribuído devido ao excesso de fibra na mistura, pois a energia de ancoragem que a adição de fibra de bambu gera na argamassa acontece na interface entre a fibra e a matriz cimentícia, portanto quando existe uma quantidade muito elevada de fibra, a energia da adesão mecânica que precisa acontecer na interface fibra-matriz acaba acontecendo em grande parte também na interface fibra-fibra, onde essa energia é baixa entre elas, gerando uma compactação ineficaz da mistura após a cura e endurecimento. Quando a argamassa não está compacta, isso aumenta a porosidade na zona de interface com a presença de impurezas, aumentando o surgimento de defeitos na argamassa, diminuindo sua capacidade de resistir à propagação de fissuras e finalmente levando à uma diminuição nos valores de resistência à compressão [28].

Outro fator que pode explicar a diminuição da resistência à compressão quando a tem-se uma fibra de bambu em excesso na composição da argamassa é a taxa de absorção de água do bambu. As fibras vegetais apresentam uma taxa de absorção de água por capilaridade muito elevada (por volta de 80%), isso acaba criando zonas de transição próximas às fibras muito distintas do restante da matriz no que dizer respeito à relação água/cimento, e isso produz um fluxo de água no sentido da fibra, inibindo a aderência com a matriz [28]. A superfície da interface com menos aderência leva a uma diminuição da característica que a princípio proporcionou um aumento na resistência à compressão das amostras, que é a ancoragem da interface fibra-matriz.

5.3 Análise comparativa dos resultados obtidos

De forma geral, foi possível observar que os valores totais de resistência à flexão e compressão foram relativamente menores do que os valores encontrados nas literaturas de apoio. Um fator que pode ter contribuído para os baixos valores de resistência quando comparados ao da literatura é o fator de água. Neste trabalho o fator de água utilizado foi de 0,65 e, na maioria dos outros trabalhos, esse valor ficou próximo de 0,40. Quando é adicionada mais água do que o necessário, tem-se um excesso de água que sobra do processo de hidratação do cimento, e essa água tende a gerar vazios na estrutura da argamassa na forma de poros capilares que, conforme já foi descrito anteriormente, gera efeitos destrutivos para a estrutura da cerâmica gerando à uma diminuição em sua resistência e aumentando o surgimento de trincas [29]. As Curvas de Walz, por exemplo, demonstram o comportamento do concreto, que pode ser análogo ao da argamassa, em relação ao fator de água e sua resistência a compressão.

Figura 15 –Gráfico para a determinação da relação água/cimento (a/c) em função das resistências do concreto e do cimento aos 28 dias de idade



Fonte: ASSUNÇÃO, José Wilson [30]

Conclui-se também que, tanto para o ensaio de resistência à flexão, quanto para o de resistência à compressão, os valores de desvio padrão foram altos, indicando grandes variações nos resultados obtidos experimentalmente. Esses valores podem ser associados devido presença da fibra de bambu e sua quantidade incorporada nas matrizes, pois, por exemplo, no Traço 04 (10%), a porcentagem de desvio padrão foi a maior tanto para flexão quanto para a compressão. Nas literaturas de apoio também se observa altos valores de desvio (5-10%). As fibras naturais, como seu próprio nome já diz, são retiradas da natureza, sem qualquer tipo de tratamento prévio, sem nenhum controle de qualidade ou processo industrial envolvido que gere uma padronização do reforço, portanto essas variações podem ser explicadas pela inerente heterogeneidade da própria natureza do material. Uma possível solução para evitar que poderia diminuir as porcentagens de desvio padrão seria efetuar um tratamento superficial prévio na fibra de bambu, pois além de auxiliar na mitigação dos problemas citados acima, ele também tende a tornar a superfície de contato da fibra mais áspera aumentando a interface entre a fibra e os grãos de cimento da matriz, diminuindo o número de vazios e reduzindo o teor de ar incorporado na argamassa [25].

6 CONCLUSÃO

A incorporação de fibras, sejam elas sintéticas ou naturais nas composições de massas cimentícias como a argamassa, até um teor ótimo, cria pontes entre as possíveis fissuras dentro do material, controlando seu aumento e evitando que toda a energia aplicada se acumule em um lugar e possa gerar uma possível fratura. A argamassa atingiu sua resistência máxima à flexão com a inclusão de 2,5% de fibra de bambu em relação ao peso dos aglomerantes, e o maior valor para a resistência à compressão com 5% de fibra de bambu.

Um excesso de fibra comprometeu a capacidade da massa cimentícia de envolver as fibras e gerar estabilidade na estrutura, resultando nos valores mais baixos de resistência à flexão e compressão. Um teor muito elevado de fibra também diminui a compactação da argamassa e torna sua energia de coesão interna mais baixa. A alta taxa de absorção de água também influenciou no aumento do surgimento de defeitos

acumuladores de tensão na estrutura da argamassa, levando a uma fratura sob menor esforço conclui-se também que, a falta de tratamento prévio na fibra, pode causar grandes variações nas médias e no desvio padrão dos valores de resistência.

De forma geral, analisando os resultados para cada traço e as aplicações da argamassa no ramo da indústria da construção civil, a incorporação de até 5% de fibra de bambu é interessante para as argamassas de assentamento, onde os blocos cerâmicos e azulejos sofrem uma maior força de compressão e em ambientes não estruturais com baixa solicitação mecânica pois, embora a resistência a flexão diminua, há um aumento na tenacidade, permitindo a identificação de fissuras antes da fratura. Já para o caso da argamassa com 2,5%, sua aplicação é viável tanto para argamassas de assentamento devido ao fato de aumentar a resistência do material, quanto argamassas de revestimento, onde o esforço de flexão e compressão acontecem de forma simultânea e esse traço resiste mais a esses esforços quando comparado as outras porcentagens de fibra de bambu e a argamassa padrão sem fibra.

REFERÊNCIAS

1. OLENDER, Mônica Cristina Henriques Leite. **A TÉCNICA DO PAU-A-PIQUE:** subsídios para a sua preservação. 2006. 146 f. Tese (Doutorado) - Curso de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2006. Disponível em: <https://repositorio.ufba.br/> Acesso em: 05 mar. 2022. [1]
2. MARQUES, Evandro. **Taipa: da antiguidade até os dias atuais entrelaçando construções.** 2017. Disponível em: <https://www.coisasdaroca.com/coisas-antigas-da-roca/taipa.html>. Acesso em: 05 set. 22.
3. AUERSVALDT, Bianca Lara; LAY, Luís Antonio; MIRANDA, Thales Liebl. **Incorporação de Fibras Vegetais de Bambu ao Concreto em Substituição à Fibras Sintéticas.** 2019. 12 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Produção, IX Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção, Ponta Grossa, 2019.
4. SOUZA, Bruno Almeida *et al.* Análise dos indicadores PIB nacional e PIB da indústria da construção civil. **Revista de Desenvolvimento Econômico**, Salvador, v. 17, n. 31, p. 140-150, jun. 2015.
5. GOMES, Victor. **O cenário da construção civil para 2022.** 2022. Disponível em: <https://monitormercantil.com.br/o-cenario-da-construcao-civil-para-2022/>. Acesso em: 01 abr. 2022.
6. PORTAL DO CONCRETO. Cimento. **Site do Portal do Concreto.** Disponível em: <<https://www.portaldoconcreto.com.br/o-que-e-cimento>>. Acesso em: 01 abr. 2022. [6]
7. PORTAL DO CONCRETO. Cimento. **Site do Portal do Concreto.** Disponível em: <<https://www.portaldoconcreto.com.br/tipos-de-cimento>>. Acesso em: 01 abr. 2022. [7]

8. PINHEIRO, Igor. **Cimento: Entenda os Tipos e suas Aplicações**. 2019. Disponível em: <https://www.inovacivil.com.br/entenda-os-tipos-de-cimento-e-suas-aplicacoes/>. Acesso em: 12 abr. 2022.[8]
9. PUGLIESE, Nataly. **Cimento: Diferentes tipos e aplicações**. Disponível em: <https://www.aecweb.com.br/revista/materias/cimento-diferentes-tipos-e-aplicacoes/11959>. Acesso em: 12 ago. 2022.
10. MORAIS, Bruno. **Como é feito o cimento Youtube, 6 de setembro de 2015**. Disponível em <<https://www.youtube.com/watch?v=jIwdDAGqGiE>>. Acesso em: 02 set. 22.
11. RODRIGUES, Antônio Fernando da Silva. **Insumos minerais para fabricação de cimento**. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/outras-publicacoes-1/8-2-2013-calcario-2013-gipsita-cimento>. Acesso em: 17 maio 2022. [10]
12. QUARCIONI, V. A. **Influência da cal hidratada nas idades iniciais da hidratação do cimento Portland** - Estudo em pasta. Tese de doutorado, São Paulo, 04 maio 2008. 188. Acesso em: 30 abr. 2022. [9]
13. LEONI, Matheus. AULA #034: **HIDRATAÇÃO DO CIMENTO - O QUE VOCÊ PRECISA SABER SOBRE ISSO?** Youtube, 20 de abril de 2021. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=l5AF5wvpXcc&t=1471s>>. Acesso em: 01 jun. 2022.
14. LAGUNA, L. A.; IKEMATSU, P. A influência da temperatura na desforma do concreto, setembro 2009
15. : **VIABILIDADE PARA IMPLEMENTAÇÃO DE FIBRAS DE BAMBU EM ARGAMASSAS**. São Paulo: Anap Brasil, v. 12, n. 24, 2019. Acesso em: 22 maio 2022. [11]
16. SILVA, Narciso Gonçalves da. **ARGAMASSA DE REVESTIMENTO DE CIMENTO, CAL E AREIA BRITADA DE ROCHA CALCÁRIA**. 2006. 181 f.

- Dissertação (Mestrado) - Curso de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006. Acesso em: 22 maio 2022 [12].
17. Bellei, Poliana & Mohamad, Jihad & Kirchhof, Larissa. (2016). **DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE UTILIZAÇÃO POR VISCOSIMETRIA DE ARGAMASSAS COLANTES.** 10.13140/RG.2.1.5126.8889. Acesso em: 22 maio 2022 [13].
18. PEREIRA, Caio. Argamassa: O que é, principais tipos e propriedades. **Escola Engenharia**, 2018. Disponível em: . Acesso em: 21 de maio de 2022.
19. LOURENCI, Sidnei; GERMELLI, Enori; FOLGUERAS, Marilena V.; KAYAMA, Eduardo T.. **Estudo do Mecanismo de Hidratação de Argamassas Fabricadas com Resíduo Sólido Industrial.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA
20. AUERSVALDT, Bianca Lara; LAY, Luís Antonio; MIRANDA, Thales Liebl. **Incorporação de Fibras Vegetais de Bambu ao Concreto em Substituição à Fibras Sintéticas.** 2019. 12 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Produção, IX Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção, Ponta Grossa, 2019.
21. CATARINA, Universidade Federal de Santa. **Avaliação do ciclo de vida do bambu.** Disponível em: <https://materioteca.pginas.ufsc.br/files/2017/08/ACV-Bambu.pdf>. Acesso em: 01 jun. 2022.
22. MARÇAL, Vitor Hugo Silva. **Uso do Bambu na Construção Civil.** 2008. 60 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil e Ambiental, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2008.
23. ALMEIDA, Silvio Martins de. **ANÁLISE DO MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO E DINÂMICO DO CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND ATRAVÉS DE ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES E DE FREQUÊNCIA RESSONANTE.** 2012. 213 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Departamento de Engenharia de Materiais e Construção, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

24. ENGENHARIA, Apl. **Resistência do concreto: entenda a importância da realização de testes.** Disponível em: <https://blog.apl.eng.br/resistencia-do-concreto-entenda-a-importancia-da-realizacao-de-testes/>. Acesso em: 01 jul. 2022.
25. AZEVEDO, Afonso R.G. de. Technological performance of açaí natural fibre reinforced cement-based mortars. **Journal Of Building Engineering.** p. 1-11.
26. **DEVELOPMENT OF MORTAR FOR LAYING AND COATING WITH PINEAPPLE FIBERS.** Campina Grande, Pb: Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 24, n. 3, 2020.
27. PICANÇO, Marcelo de Souza; GHAVAMI, Khosrow. Comportamento à compressão de argamassas reforçadas com fibras vegetais da Amazônia. **Engenharia Civil.** Ouro Preto - Mg, p. 13-18. mar. 2008
28. SILVA, Everton J. da; SILVA, Paola D. da; MARQUES, Maria L.; FORNARI JUNIOR, Celso C. M.; GARCIA, Fermin C.; LUZARDO, Francisco H. M.. Resistência à compressão de argamassas em função da adição de fibra de coco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, Pb, v. 18, n. 12, p. 1268-1273, nov. 2013.
29. GUERRA, Ruy Serafim de Teixeira. **O efeito do excesso de água no concreto.** Disponível em: <http://www.clubedoconcreto.com.br/2014/06/o-efeito-do-excesso-de-agua-no-concreto.html>. Acesso em: 25 nov. 2022.
30. ASSUNÇÃO, José Wilson. **CURVAS DE DOSAGEM PARA CONCRETOS CONVENCIONAIS E ADITIVADOS CONFECIONADOS COM MATERIAIS DA REGIÃO NOROESTE DO PARANÁ.** 2002. 254 f. Pós-Graduação - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.