

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE ZOOTECNIA E ENGENHARIA DE ALIMENTOS

GUILHERME FERNANDO CARMELLO

**Estudo da adesão entre fibras poliméricas e vegetais em matriz
cimentícia: caracterização físico-química e mecânica.**

Orientador: Holmer Savastano Jr.

Pirassununga-SP

2021

GUILHERME FERNANDO CARMELLO

**Estudo da adesão entre fibras poliméricas e vegetais em matriz
cimentícia: caracterização físico-química e mecânica.**

(Versão corrigida)

Dissertação apresentada à Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Desenvolvimento, Caracterização e Aplicação de Materiais Voltados à Agroindústria.

Orientador: Dr. Holmer Savastano Junior

Pirassununga-SP

2021

Ficha catalográfica elaborada pelo
Serviço de Biblioteca e Informação, FZEA/USP,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

C287e Carmello, Guilherme
Estudo da adesão entre fibras poliméricas e
vegetais em matriz cimentícia: caracterização físico-
química e mecânica. / Guilherme Carmello ;
orientador Holmer Savastano Junior. --
Pirassununga, 2021.
69 f.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação
em Engenharia e Ciência de Materiais) -- Faculdade
de Zootecnia e Engenharia de Alimentos,
Universidade de São Paulo.

1. Adesão. 2. Fibrocimento. 3. Teste de
Arrancamento. 4. Tratamento de superfície e térmico.
5. carbonatação acelerada. I. Savastano Junior,
Holmer, orient. II. Título.

Dedico este trabalho à toda a minha família, por todo o apoio e incentivo em toda minha vida, sem eles eu não conseguiria nada. Aos meus pais Carmello e Regina, à minha esposa Luana, ao meu filho Pedro Otávio,

aos meus sogros Luciane e Igor e ao meu irmão Felipe.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela minha vida, virtudes e graças recebidas.

A toda minha família por sempre estarem ao meu lado

Ao professor Doutor Holmer Savastano Junior por ser um grande professor e modelo de educador.

À Universidade de São Paulo e a Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos de Pirassununga.

A equipe de pós-graduação do programa de Engenharia e Ciência de Materiais, que em inúmeras oportunidades demonstraram empenho excepcional.

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de mestrado.

Aos colegas do Laboratório de Construções Rurais e Ambiente pelos momentos de aprendizado, cooperação e amizade.

RESUMO

CARMELLO, G. F. **Estudo da adesão entre fibras poliméricas e vegetais em matriz cimentícia: caracterização físico-química e mecânica.** 2021. 69f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos (FZEA), Universidade de São Paulo (USP), Pirassununga 2021.

A adesão entre as fibras e a matriz cimentícia é de suma importância em uma análise qualitativa de desempenho, visto que quanto maior a adesão, mais energia é necessária ser utilizada para que essa ligação seja rompida, além disso, após a ligação ser rompida, a fibra ainda pode sofrer trabalho mecânico, dado que as fibras são menos rígidas que a matriz cimentícia, fazendo com que ela se vá se despedaçando aos poucos, o que aumenta ainda mais a potência latente mecânica. Nesse contexto o presente trabalho avaliou o efeito do tratamento de hornificação, lavagem alcalina e carbonatação acelerada na adesão entre as fibras e a matriz cimentícia.

O tratamento de hornificação para as fibras vegetais apresentou aumento mecânico na adesão das fibras de Coco Verde de 29% para fricção inicial e 4,8% para fricção máxima. Para as fibras de Curauá não houve ganhos mecânicos.

Tratamento de lavagem alcalina nas fibras poliméricas não se mostrou eficaz quanto ao aumento de travamento mecânico para ambas as fibras poliméricas, porém para a fibra de PVA, o tratamento apresentou aumento de 31% na adesão química.

O tratamento da matriz cimentícia através da carbonatação acelerada aumentou o ganho mecânico em 33% para fibras de Coco Verde, 122% para fibras de Curauá e 9,5% para fibras de PP todas embutidas em matriz cimentícia.

Palavra-chave: Adesão, fibrocimento, teste de arrancamento, tratamento de superfície, tratamento térmico, carbonatação acelerada

ABSTRACT

CARMELLO, G.F. **Study of adhesion between polymeric and vegetable fibers in cementitious matrix: physicochemical and mechanical characterization.** 2021. 69f. Master Dissertation – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos (FZEA), Universidade de São Paulo (USP), Pirassununga 2021.

The adhesion between the fibers and the cementitious matrix is an important qualitative analysis, since the greater the adhesion is, the more energy is needed to be used for this bond to be broken, moreover, after the bond is broken, the fiber can still undergo mechanical work, since the fibers are less rigid than the cementitious matrix, causing it to gradually shatter, which further increases the latent mechanical power. In this context, the present work evaluated the effect of hornification, alkaline washing and accelerated carbonation treatments on the adhesion between the fibers and the cementitious matrix.

The hornification treatment for vegetable fibers showed a mechanical increase in the adhesion of Green Coir fibers by 29% for initial friction and 4.8% in terms of maximum friction. For Curauá fibers, there were no mechanical gains.

Alkaline washing treatment on polymeric fibers was not effective in increasing mechanical locking for both polymeric fibers, however for the PVA fibers, the treatment showed an increase of 31% in chemical adhesion.

The cementitious matrix treatment through accelerated carbonation increased the mechanical gain by 33% for Green Coir fibers, 122% for Curauá fibers and 9.5% for PP fibers all embedded in cementitious matrix.

Keyword: Adhesion, fiber cement, pullout test, surface treatment, heat treatment, accelerated carbonation

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Interação Fibra-Matriz em um ensaio de flexão do fibrocimento.....	18
Figura 2. Estrutura de uma fibrila em uma fibra vegetal.....	20
Figura 3a. Curauá branco.....	23
Figura 3b. Curauá roxo.....	23
Figura 4a. Esquema de cadeia linear do polipropileno.....	27
Figura 4b. Esquema de cadeia linear do polivinil álcool.....	27
Figura 5a. Exemplo da ocorrência de intertravamento mecânico.....	29
Figura 5b. Exemplo da não ocorrência de intertravamento.....	29
Figura 6. Curvas características do arrancamento.....	31
Figura 7a. Placa de alumínio do molde de arrancamento.....	45
Figura 7b. Desenho esquemático da placa de alumínio de arrancamento.....	45
Figura 8a. Placas de policarbonato do molde de arrancamento.....	45
Figura 8b. Desenho esquemático das placas de policarbonato do molde.....	45
Figure 9a. Molde de arrancamento completo.....	46
Figura 9b. Desenho esquemático do molde de arrancamento completo.....	46
Figura 10. Molde para ensaio de arrancamento.....	47
Figura 11a. Texturômetro.....	48
Figura 11b. Corpo de prova preparado para ensaio.....	48
Figura 12. Seção Transversal Fibra de Coco Verde.....	50
Figura 13 – Seção transversal fibra de Curauá.....	50

Figura 14 – Seção transversal fibra de PP.....	51
Figura 15 – Seção transversal fibra de PVA.....	51
Figura 16. Fator de correção para as fibras de Curauá.....	53
Figura 17. Fator de correção para as fibras de coco verde.....	53
Figura 18. Arrancamento característicos de fibras vegetais em matriz cimentícia.....	60
Figura 19. Arrancamento característicos de fibras poliméricas em matriz cimentícia.....	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de densidade e propriedades mecânicas de fibras naturais e poliméricas.....	21
Tabela 2 – Propriedades mecânicas de fibras.....	25
Tabela 3. Materiais utilizados no presente estudo.....	35
Tabela 4. Formulação dos compósitos com diversas macrofibras.....	41
Tabela 5. Medidas geométricas das fibras.....	52
Tabela 6. Densidade das fibras.....	54
Tabela 7. Resultados de ângulo de contato de fibras imersas em água deionizada.....	54
Tabela 8 Resultados de ensaios de tração direta em fibras sem tratamento.....	55
Tabela 9. Densidade aparente, absorção d'água aparente e porosidade aparente dos compósitos.....	56
Tabela 10. Resultados de Flexão de compósitos.....	56
Tabela 11. Resultados de arrancamento das fibras vegetais em matriz cimentícia.....	60
Tabela 12. Resultados de arrancamento das fibras poliméricas em matriz cimentícia.....	62

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	14
2.	OBJETIVOS.....	16
2.1	Objetivo geral	16
2.2	Objetivos específicos	16
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
3.1	Fibrocimento	17
3.2	Fibras vegetais.....	19
3.2.1	Fibra de Curauá	23
3.2.2	Fibra de Coco Verde	24
3.3	Fibras poliméricas	25
3.3.1	Fibra de Álcool Polivinílico	25
3.3.2	Fibra de Polipropileno.....	26
3.4	Adesão.....	28
3.4.1	Adesão mecânica (Frictional bond)	29
3.4.2	Adesão química (Chemical bond).....	30
3.5	Tratamentos da fibra	31
3.5.1	Tratamento alcalino.....	32
3.5.2	Tratamento térmico	33
3.6	Tratamento da matriz.....	33

3.6.1 Carbonatação acelerada.....	33
3.7 Ângulo de contato	35
4. MATERIAIS E MÉTODOS	35
4.1 Materiais	35
4.2 Métodos	36
4.2.1 Caracterização das fibras.....	36
4.2.2 Caracterização dos compósitos	42
4.2.3 Teste de adesão.....	45
4.2.4 Tratamentos	48
5. RESULTADOS	49
5.1 Caracterização das fibras	49
5.1.1 Análise Geométrica	49
5.1.2 Densidade real	54
5.1.3. Ângulo de contato das fibras.....	54
5.1.4. Tração Direta das fibras	55
5.2. Resultados dos compósitos	55
5.2.1. Densidade aparente, absorção de água aparente e porosidade aparente.	55
5.2.2. Flexão dos compósitos	56
5.3. Adesão das fibras nos compósitos	58
5.3.1. Adesão das fibras vegetais em matriz cimentícia	58

5.3.2. Adesão das fibras poliméricas em matriz cimentícia	60
6. CONCLUSÕES.....	63
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64

1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho tem como objetivo abordar a adesão entre fibras poliméricas (Polipropileno e Polivinil Álcool) e vegetais (Curauá e Coco Verde) em matriz cimentícia por meio de ensaios de arrancamento após tratar as fibras quanto a superfície (ataque em meio alcalino para aumentar a rugosidade e proporcionar o intertravamento mecânico) e também termicamente (hornificação) com o objetivo de garantir maior estabilidade dimensional da fibra. A adesão também será abordada com relação ao tratamento da matriz cimentícia, por meio de carbonatação acelerada, a fim de se modificar a matriz e a interface fibra-matriz, com potencial efeito positivo em relação à durabilidade do compósito. Este trabalho também aborda as variáveis físicas e químicas envolvidas na interface fibra-matriz e seu efeito na adesão entre as fibras (poliméricas e vegetais) e a matriz cimentícia, bem como os tratamentos aplicados.

Com relação às fibras poliméricas, o desafio é tratar as fibras de Polipropileno a fim de desenvolverem características de reforço semelhantes às fibras de Polivinil Álcool. Matrizes cimentícias com reforço de Polipropileno proporcionam geralmente um fibrocimento com desempenho mecânico inferior às encontradas no fibrocimento com reforço de Polivinil Álcool, o que em parte se explica pela adesão da fibra, no entanto, fibrocimento que utilizam fibras de Polipropileno como reforço podem até melhorar a absorção de energia em relação aos fibrocimentos com Polivinil Álcool. Fibras de Polipropileno são atrativas por custarem significativamente menos que fibras de Polivinil Álcool e por serem produzidas em território nacional. Quanto às fibras vegetais, o desafio é amenizar o efeito do ataque alcalino que estas sofrem (mineralização), quanto o efeito de retração sofrido pós-período de hidratação e secagem do fibrocimento. Ambos os casos ocasionam poros e conseqüentemente trincas ao serem submetidas a esforço mecânico. A Matriz cimentícia foi tratada com carbonatação acelerada a fim de se avaliar se a

densificação e preenchimento dos poros com carbonatos, ajuda na adesão do compósito e seu consequente desempenho mecânico.

Inicialmente foi demonstrado a relevância do fibrocimento no contexto atual e as implicações ambientais que acarretam seu uso, também foi explicado o motivo das escolhas de fibras vegetais, poliméricas e seus tratamentos. A adesão mecânica e química entre as fibras e a matriz cimentícia é apresentada de forma a equacionar e comparar valores entre os diferentes resultados, criando uma relação entre a adesão e diferentes fibras e tratamentos.

O foco do trabalho é o efeito que certos tratamentos causam na adesão entre fibra e matriz cimentícia e como isso afeta o desempenho físico e mecânico do compósito.

Este trabalho foi possível de ser completado devido a diversos avanços tecnológicos, como confecção de molde próprio para arrancamento, experiências realizadas por (ALMEIDA et al., 2010; CORREIA; SANTOS; SAVASTANO, JR., 2015; FILOMENO, 2018) em teses e dissertações anteriores, demonstrando a eficiência da carbonatação acelerada e o efeito do tratamento de molhagem e secam de fibras vegetais. Além disso o laboratório de Construções Rurais dispõe de todas as ferramentas necessárias para a realização dos ensaios.

O assunto abordado foi escolhido mediante a necessidade de melhor entender a adesão entre as fibras utilizadas como reforço mecânico em compósitos de fibrocimento, e sua matriz, uma vez que o fibrocimento vem sendo cada vez mais estudado devido ao apelo sustentável e socioeconômico.

Segundo Savastano Junior e Santos (2008) o fibrocimento é basicamente formado por cimento Portland, adições minerais, sem agregados e fibras de reforço distribuídas ao longo da matriz. As principais aplicações para esses produtos são

telhas para cobertura de casas e barracões, placas para divisórias leves, forros e paredes internas, no geral, construções não estruturais. É comum a população que pertence às classes econômicas C e D e grandes empresas comprarem esse tipo de produto, por se tratar de um produto de baixo custo.

As fibras poliméricas mais utilizadas para confecção de fibrocimento no Brasil são Polivinil Álcool (PVA) e Polipropileno (PP), derivadas do petróleo. A fibra de PVA possui elevada resistência mecânica, resistência em meio alcalino e apresentam alta adesão em matriz cimentícia, porém, são importadas do Japão e da China representando um maior custo em relação às fibras de PP que têm produção no Brasil.

Tanto a fibra de Coco Verde quanto a fibra de Curauá, podem ser encontradas na Amazônia, sendo a preservação das matas amazônicas assunto atual e de relevância mundial é necessário verificar se é viável a substituição das fibras derivadas de petróleo por essas fibras vegetais evitando o extrativismo das florestas e incentivando a plantação de tais fibras vegetais em regiões já desmatadas, uma vez que economicamente seria viável utilizá-las.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar a adesão entre as fibras poliméricas e vegetais em matriz cimentícia por meio de arrancamento.

2.2 Objetivos específicos

Tratamento com solução alcalina em fibras poliméricas para observar mudanças na adesão

Tratamento térmico (hornificação) em fibras vegetais para melhorar estabilidade dimensional

Tratamento da matriz cimentícia com carbonatação acelerada para diminuir alcalinidade e refinar tamanho de poros no entorno da fibra aumentando assim a adesão das fibras com a matriz.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Fibrocimento

Fibrocimento é um material produzido a partir de cimento (matriz porosa e frágil) com a inserção de fibras (tanto vegetal quanto polimérica). Sozinho o cimento apresenta baixa absorção de energia e deformação, necessitando de algum agregado para desempenhar melhores funções mecânicas. Fibras inseridas na matriz cimentícia alteram suas propriedades mecânicas, melhorando e aumentando a tenacidade e seu desempenho após a fissura, pois ao invés do compósito romper subitamente, resultam em deformação pseudoplástica devido a transferência de tensões da matriz para as fibras (TOLÊDO FILHO et al., 2000).

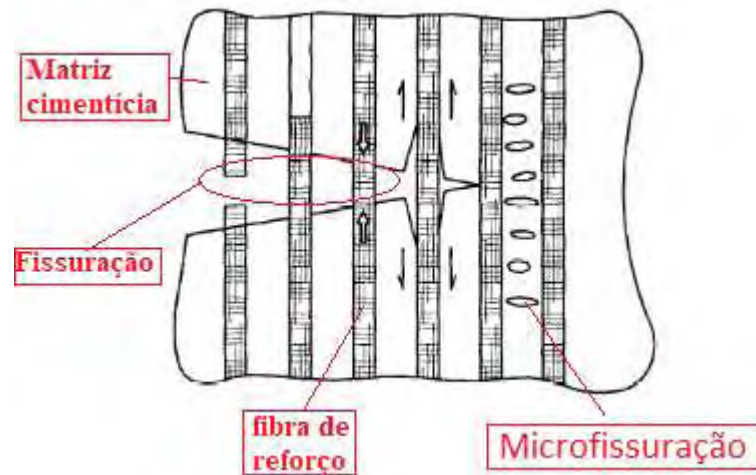


Figura 1. Interação Fibra-Matriz em um ensaio de tração

Fonte: Adaptado de Lameiras (2017)

Em suma, quanto mais travada/aderida a fibra está na matriz (intertravamento mecânico), mais energia será necessário utilizar para esticá-la, romper a ligação química entre a fibra e a matriz, iniciar o escorregamento da fibra e a microfissuração que antecede a ponta da trinca antes de rompê-la, dotando o compósito de melhores propriedades mecânicas, conforme figura 1 parte da tensão exercida na matriz cimentícia é absorvida pela fibra de reforço, diminuindo a fissuração (TOLÊDO FILHO et al., 2000).

As propriedades mais importantes do fibrocimento dependem da aplicação que ele terá, no caso de telhas de coberturas, resistência a impactos, alta resistência antes do início da deformação e densificação dos poros da matriz são mais importantes que resistência mecânica por exemplo, já que as telhas devem ter proteção contra chuvas de granizo (XU; MAGNANI; HANNANT, 1998). Placas planas, utilizadas para divisórias devem apresentar melhor isolamento térmico e acústico (IKAI et al., 2010).

A produção em escala industrial do fibrocimento utilizando amianto iniciou-se no século XX na Austrália (COUTTS, 2005). Aspectos econômicos forçaram o mundo a pesquisar alternativas para as fibras de amianto, pois se tratava do período da Segunda

Guerra Mundial, mais tarde também foi constatado o perigoso a saúde humana ao se utilizar amianto em forros e coberturas. Nesse contexto global, alternativas para a substituição parcial e total dessa fibra era necessário, e para tanto, pesquisas começaram a ser fortemente desenvolvidas na década de 1970 (HARDIE, 1947).

Das diversas fibras analisadas, a que obteve resultados mais destacados foram as fibras de eucalipto, utilizadas na forma de polpa celulósica. Essas vêm sendo utilizadas pela indústria para a produção de fibrocimento em produtos como telhas de cobertura (atualmente livre de amianto), painéis de vedação e painéis de revestimento (SILVA; MOBASHER; FILHO, 2009). Os principais interesses no uso das fibras estão relacionados às suas propriedades intrínsecas tais como ductilidade, baixa densidade, boas propriedades mecânicas como módulo elástico e resistência à tração), sendo possível proporcionar alto desempenho mecânico e flexibilidade aos compósitos vegetais. Além disso, possuem baixo custo se comparadas às fibras poliméricas, o que as tornam economicamente viáveis, ocasionam menor abrasão aos equipamentos de processamento e representam menos problemas à saúde humana (TONOLI et al., 2011).

Contudo, fibras vegetais possuem limitações inerentes a sua natureza, como alta absorção de água e suscetibilidade a degradação em meio alcalino (BERGSTRÖM; GRAM, 1984), sendo essas as principais razões para as fibras vegetais serem pouco utilizadas comercialmente, como reforço de matrizes frágeis de cimento (MOTTA; AGOPYAN, 2007)

3.2 Fibras vegetais

Estruturalmente fibras vegetais são compostas por um feixe de células denominadas fibras unitárias ou fibrilas (10-50 μm), que por sua vez, são compostas por distintas

paredes celulares, microfibrilas (10-30 nm) e Lumen (THOMAS et al., 2011), demonstrado na figura 2.

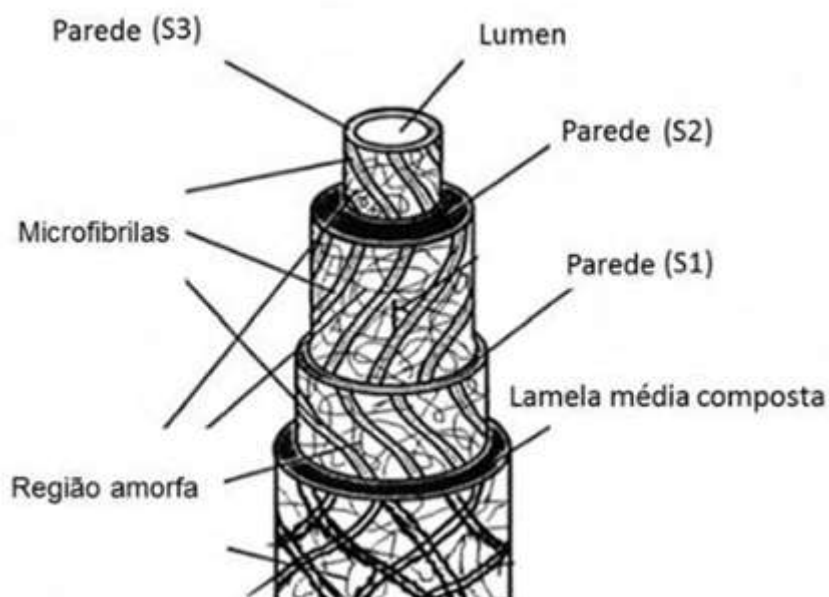


Figura 2. Estrutura de uma fibrila em uma fibra vegetal

Fonte: Adaptado de Barra (2014)

As paredes celulares são organizadas em camadas conhecidas por lamela média e parede primária (lamela média composta) e parede secundária (camadas S1, S2 e S3).

A lamela média é uma camada constituída de lignina, hemicelulose, celulose e pectinas. A parede primária é composta por celulose, hemicelulose, pectinas e proteínas embebidas à matriz de lignina (XU, 2010; GANDINI; BELGACEM, 2008).

As camadas S1, S2 e S3 são formadas fundamentalmente de celulose, diferem entre si com relação a orientação das microfibrilas e dimensão. A camada S1 tem dimensão na faixa de 100-200 nm e as microfibrilas apresentam estrutura reticulada. A camada S2 exibe dimensão na faixa de 0,5 -8 μm e suas microfibrilas estão orientadas em espiral. A camada S3 possui espessura de 70-100 nm (GANDINI; BELGACEM, 2008). No centro da fibrila encontra-se o lúmen, normalmente com seção elíptica.

De acordo com Thomas et. al (2011) as propriedades químicas, físicas e mecânicas são determinadas pelas paredes celulares das fibrilas, sendo que a propriedade mecânica tem como camada S2 a mais importante.

Lignina é uma macromolécula constituída especialmente de fenilpropano e grupos metoxi, originando uma organização inteiramente amorfa. Por apresentar essas ligações, a lignina é relativamente hidrofóbica.

Hemicelulose é composta por glucose, xilose e manose. Por ser ramificada e heterogênea, a hemicelulose é majoritariamente amorfa, facilitando a ligação de grupos hidroxila, tornando-a hidrofílica e sensível à degradação por álcalis (MORÁN et al., 2008; SPIRIDON; POPA, 2008; YANG; WYMAN, 2008).

Celulose consiste em repetições do monômero de glucose, apresentando três grupos hidroxila que aparecem em ambos os lados da cadeia onde estão ligados a outras hidroxilas de cadeias vizinhas através de ligações de hidrogênio, tornando-a hidrofílica (ZIMNIEWSKA et al., 2011, BRINCHI et al., 2013). A celulose possui regiões cristalinas e amorfas (MOON et al., 2011).

Tendo em vista toda a estrutura das fibras vegetais, é necessário considerar sua natureza hidrofílica, caracterizada pela presença de grupos hidroxila e outros grupos polares, que se ligam a água presente na solução de cimento. No entanto, a água é absorvida pelas fibras vegetais na hidratação fazendo com que a região em torno da fibra fique mais porosa, proporcionando retração da fibra, deslocando a matriz e causando microfissuração na zona de interface entre fibra e matriz (TONOLI et al., 2010)

Outro ponto importante é a mineralização, ataque alcalino que a lignina e a hemicelulose sofrem em contato com a matriz cimentícia, fragilizando as fibras,

reduzindo a capacidade de arrancamento, desempenho mecânico e durabilidade (TOLÊDO FILHO et al., 2000).

As fibras são adicionadas no cimento como macrofibras ou polpas celulósicas, tornando importantes os estudos de compatibilidades físico-químicas relacionadas a sua decomposição (SAVASTANO JÚNIOR, 2000). A decomposição das fibras ocorre através da mineralização sendo esse o processo de reprecipitação dos produtos de hidratação do cimento no interior das fibras (PIZZOL et al., 2014), pois a região em torno da fibra é caracterizada pela alta porosidade e alta concentração de hidróxido de cálcio $[Ca(OH)_2]$ que fica solubilizado em água o que proporciona menor durabilidade do fibrocimento (SAVASTANO; AGOPYAN, 1999). A durabilidade em compósitos pode ser aumentada através de tratamentos superficiais como pré-tratamento alcalino (SANTOS, PAULO A.; SPINACÉ, MÁRCIA A. S.; PAOLI, 2009) ou plasma a frio de metano (BARRA, 2014) que minimizam o ataque alcalino sofrido posteriormente pela fibra; tratamentos de ciclos de secagem e molhagem, proporcionando estabilidade dimensional (LIMA; FERREIRA; FILHO, 2012; FERREIRA et al., 2015, 2017); uma outra opção é a carbonatação acelerada, pois esta modifica a matriz cimentícia reduzindo o hidróxido de cálcio com a formação de carbonato de cálcio preenchendo os poros do material, melhorando inclusive suas propriedades mecânicas, além de proteger a fibra contra a degradação alcalina (ALMEIDA et al., 2013). A tabela 1 abaixo apresenta propriedades físicas e mecânicas das fibras naturais mais comuns

Tabela 1 – Valores de densidade e propriedades mecânicas de fibras naturais e poliméricas (SPINACÉ et al., 2009)

Fibra	Densidade (g/cm ³)	Alongamento (%)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de Young (GPa)
Fibra de Coco	1,2	30	175	4,0-6,0
Curauá	1,4	4,2	1250-3000	30-80

3.2.1 Fibra de Curauá

A fibra de curauá é extraída das folhas da planta *Ananas erectifolius var erectifolius*. A planta é uma bromélia coriácea terrestre não lenhosa que apresenta as variações de curauá branco e curauá roxo (figura 3a e figura 3b). Os fios extraídos podem chegar a 1,5m de comprimento, são claros e flexíveis. (CORDEIRO et al., 2009).



Figura 3a: Curauá branco



Figura 3b: Curauá roxo

Fonte: Neves, 2016

Por se tratar de uma planta cultivada em regiões distantes, sua produção é importante para o desenvolvimento da comunidade produtora impulsionadas por políticas agrícolas promovidas pelo governo brasileiro, incentivando a produção e expansão das áreas destinadas a culturas de fibra (SATYANARAYANA; RAGHUKUMAR; SHIVAJI, 2005), sendo sua principal produção encontrada no estado do Pará.

Entre os usos mais comuns da fibra de curauá estão a confecção de cordas e redes de pesca e no setor automobilístico (SPINACÉ et al., 2009). Em 2013, o curauá possuía plantios comerciais localizados na região oeste do estado do Pará, cerca 3 mil hectares e produção de 5 mil t de fibra/ano, destinados à indústria automobilística. A produção brasileira foi de cerca de 8 t/ano. A principal característica que incentiva o uso da fibra

de curauá como reforço em compósitos é sua natureza físico-mecânica atuando em substituição às fibras tradicionais na confecção de freios e peças de plástico da indústria automobilística (ZAH et al., 2007; EMBRAPA, 2007).

De acordo com a tabela 1, a fibra de Curauá apresenta maior módulo de elasticidade e resistência a tração direta se comparada a fibra de Coco, essas propriedades são interessantes visto que são maiores que as propriedades da fibra de PP, normalmente utilizado como reforço de compósitos à base de cimento (SANTOS et al.; PAULO A; SPINACÉ, MÁRCIA A. S.; PAOLI, 2009)

3.2.2 Fibra de Coco Verde

As fibras de coco verde são extraídas de coqueiros denominados *Cocos nucifera*, originários das ilhas de clima tropical e subtropical do Oceano Pacífico.

A idade com que o coco é colhido influencia as suas características. O coco é considerado maduro entre 10 e 11 anos de idade, sendo este utilizado principalmente nas indústrias de coco ralado e leite de coco. Coco verde é a denominação dada quando o fruto tem entre 6 e 8 meses de idade sendo consumido como água de coco. (BISMARCK et al., 2001; MARTINS, JESUS JÚNIOR, 2011).

Até 2011, o Brasil tinha produção de aproximadamente 3 milhões de toneladas, tornando-o um dos maiores produtores mundiais do fruto beneficiando diretamente pequenos produtores, visto que 70% da exploração de coqueiros é realizada em propriedades de até 10 hectares (MARTINS; JESUS JUNIOR, 2011). Tamanha produção precisa levar em conta o fator ambiental de descarte de material visto que 85% do peso bruto do material produzido é descartado como resíduo, levando ao esgotamento de lixões e aterros, e problemas de ordem sanitária e ambiental (ROSA et al., 2002; LIMA et al., 2012).

Fibras do coco verde são constituídas principalmente por celulose e lignina apresentando, de acordo com Brígida et al. (2010), Devido ao fato de haver variação quanto a porcentagem de celulose, as fibras também apresentam variação mecânica. Em fibras de coco verde contendo 37,2- 43,9% de lignina e 31,5-37,4% de celulose, Corradini et al. (2009) obtiveram e MOE variando de 1 a 2,3 GPa e resistência a tração na faixa de 65 a 106 MPa. Segundo Fidelis et. al. (2013) e Thomas et. al. (2011) o alto teor de lignina confere as fibras de coco verde a alta capacidade de deformação.

Motta e Agopyan (2007) apresentaram para fibra de coco verde 106 MPa de resistência a tração, 32% de deformação máxima, 1,3 g/cm³ de densidade e 1,9 GPa de Módulo de elasticidade

3.3 Fibras poliméricas

O fibrocimento utilizando fibras poliméricas como reforço produzido atualmente no Brasil é normalmente composto por mais de quatro matérias-primas, que vão desde o cimento mais utilizando (Portland) e adições minerais como carbonato de cálcio, até diferentes tipos de fibras curtas (polipropileno e polivinil álcool) e polpa celulósica (Negro et al., 2006). A diversidade das matérias primas dificulta o planejamento das misturas, de modo a variar a quantidade destes materiais e avaliar o seu efeito nas propriedades finais do fibrocimento.

3.3.1 Fibra de Álcool Polivinílico

Fibras de PVA têm sido desenvolvidas principalmente para substituir o uso de amianto em indústrias como a de fibrocimento por exemplo, utilizadas como reforço em telhas de cobertura e placas cimentícias (AKERS; STUDINKA, 1989). Os motivos para

essa fibra ser interessante é seu alto módulo de elasticidade e resistência da fibra de PVA em relação a outras fibras (como mostrado na tabela 2 abaixo). Se combinados a tecnologia de tratamento de superfície com um dos principais aspectos dessa fibra, que é a presença de grupos OH⁻ em sua composição química, o resultado é uma fibra com forte afinidade com a água e dispersão eficiente (BENTUR, ARNON; MINDESS, 2007). Ao se realizar arrancamento da fibra de PVA, ela tende a se romper ao invés de ser “descascada” dentro da matriz cimentícia, isso se deve ao fato de a fibra ter forte ligação química, formada entre os grupos hidroxila e a água presente nos poros do fibrocimento (BETTERMAN; OUYANG; SHAH, 1995)

Tabela 2 – Propriedades mecânicas de fibras (MOTTA; AGOPYAN, 2007 modificada)

Fibras	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à tração (MPa)	Deformação máxima (%)	Massa específica (g/cm ³)
PP	4,7 ± 0,9	727 ± 199	24 ± 8	0,92 ± 0,01
PVA	20 ± 7,2	1450 ± 397	10 ± 2	1,3 ± 0,1

3.3.2 Fibra de Polipropileno

A Shell em 1966 patenteou o processo de fabricação de fibras de polipropileno para utilização em concreto, material caracterizado por permitir adição máxima de fibra de 1% em volume (TANESI e FIGUEIREDO, 1999). Segundo IKAI, 2010. as fibras de polipropileno apresentam-se como uma malha de finos filamentos de seção circular, a qual fornece ganho de adesão entre fibra e matriz, devido a um efeito de intertravamento mecânico. Boas características das fibras de polipropileno são: boa compatibilidade com o cimento, alta resistência mecânica, habilidade de reter os grãos

da matriz inorgânica durante processo, disponibilidade para o mercado consumidor e custo compatível. Adicionalmente, alta tenacidade, alto módulo de ruptura e reduzido alongamento até ruptura são considerados os atributos chave para as fibras alternativas (IKAI et al., 2010).

As fibras de polipropileno são um dos exemplos de fibras poliméricas utilizadas em larga escala na indústria de fibrocimento brasileiro curados ao ar. E portanto, a oferta e demanda desse produto precisa sempre ser levado em consideração para não acarretar elevado custo do produto final. Uma alternativa a esse problema é a diminuição gradativa do teor de fibras utilizadas nas formulações de fibrocimento ou diminuir a qualidade da fibra adquirida. (DIAS; SAVASTANO JR.; JOHN, 2010).

Segundo Rodrigues e Montardor (2002), fibras de polipropileno já foram bastante estudadas como reforços em concretos, sendo atrativas por sofrerem menos degradação e terem um custo relativamente menor que as fibras de PVA.

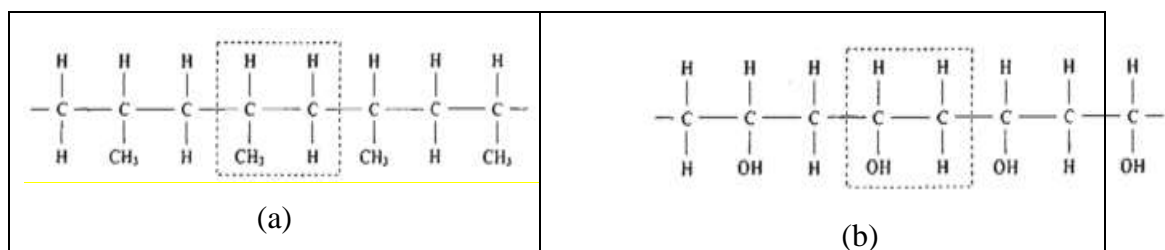


Figura 4. Esquema de cadeia linear do polipropileno (a) e polivinil álcool (b)

(fonte: MOTTA; AGOPYAN, 2007)

A Figura 4 acima mostra as estruturas das moléculas dos polímeros polipropileno e polivinil álcool. São destacados os monômeros, unidades que se repetem ao longo da cadeia. A diferença química entre as duas fibras poliméricas é que o PP tem um grupo metil e o PVA tem um grupo hidroxila, sendo que grupos

hidroxila tem comportamento hidrofílico e grupos metil tem comportamento hidrofóbico. Considerando tais fatores, essas fibras em contato com uma solução cimento/água, garante ao PVA maior adesão à matriz cimentícia em comparação ao PP, já que segundo Savastano e Agopyan (1999), no fibrocimento, há uma quantidade considerável de água livre no entorno das fibras.

3.4 Adesão

A adesão entre a fibra e a matriz na qual ela é adicionada como reforço é um dos principais indicadores de qualidade do desempenho de sistemas multifásicos (cimento, água, fibra, outros finos e agregados).

A adesão implica a formação de uma interface ou região interfacial onde a fibra e a matriz sofrem interações após contato ainda no estado plástico, sendo modificada ao longo do tempo devido a cinética de hidratação. (COSTA; JOHN, 2011)

Fibras poliméricas como PP e PVA têm sido modificadas e tratadas para se obterem melhores propriedades como módulo de elasticidade e adesão à matriz (BENTUR, ARNON; MINDESS, 2007). Um mesmo nome de fibra pode ter diferentes propriedades e comportamentos, em função da necessidade de se melhorarem suas características.

Em compósitos cimentícios uma boa adesão fibra-matriz é conseguida por meio do melhor desempenho da zona de transição, fazendo com que as duas fases (fibra e matriz) trabalhem em conjunto. A melhor adesão é obtida através da redução da porosidade e pela menor concentração de portlandita (cristais de hidróxido de cálcio) no entorno da fibra.

Define-se zona de transição como a região ou interface da pasta de aglomerante próximo à fibra, com espessura de 10 μm a 100 μm , apresentando características diferentes do restante da matriz (SAVASTANO; AGOPYAN, 1999)

3.4.1 Adesão mecânica (Frictional bond)

Adesão por atrito é um fenômeno que ocorre quando as tensões da matriz são transferidas para as fibras quando estas são arrancadas, tal fenômeno é particularmente interessante pois aumenta a absorção da energia do compósito, melhorando suas propriedades mecânicas (TOLÊDO FILHO et al., 2000)

A topografia define a morfologia de uma superfície, sendo essa dividida entre rugosidade e textura (RECUM et al., 1996). A rugosidade é caracterizada pela topografia com picos e vales de tamanhos aleatórios podendo ser o resultado de algum tratamento da fibra ou então da estrutura cristalina do material; propicia a ocorrência do intertravamento mecânico o qual depende da estrutura física da superfície do substrato e da capacidade de molhamento da solução empregada sobre o que ainda no estado plástico, esse deve ser capaz de penetrar nas irregularidades superficiais (poros) exercendo a função de ancoragem após seu endurecimento (COSTA, 2014)

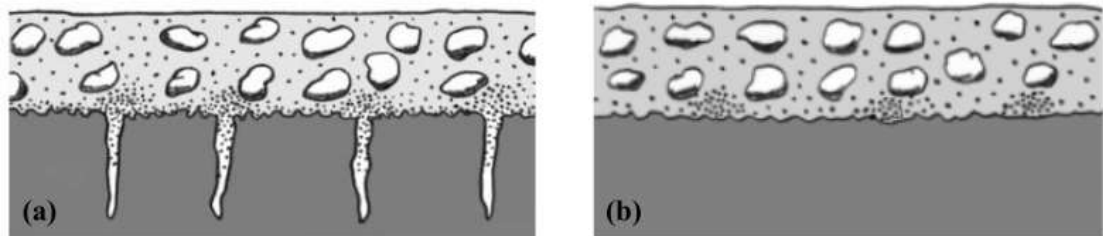


Figura 5. Exemplo da ocorrência de intertravamento mecânico (a) e exemplo da não ocorrência de intertravamento (b) (fonte: COSTA, 2014)

Redon et al. (2001) equacionaram a fricção inicial e a fricção total que ocorrem no ensaio de arrancamento

$$\tau_0 = \frac{P_b}{\pi * d_f * l_e} \quad \text{Eq. 1}$$

$$\tau = \tau_0 * \left(1 + \beta * \frac{S'}{d_f}\right) \quad \text{Eq. 2}$$

Onde τ_0 é a fricção inicial (MPa); P_b (N) é a força alcançada ao se quebrar a ligação química entre a fibra e a matriz cimentícia; d_f é o diâmetro da fibra (mm); l_e é o comprimento de fibra embutido na matriz cimentícia (mm); τ é a fricção total (MPa); β é um número adimensional que demonstra o tipo de arrancamento que ocorreu; S' é o deslocamento alcançado ao se atingir P_b .

3.4.2 Adesão química (Chemical bond)

A adesão química é resultante das forças de atração moleculares entre as fases: ligações primárias – iônicas; covalentes e metálicas – e, secundárias – forças intermoleculares, também denominadas forças de van der Waals. As forças intermoleculares são as principais responsáveis pela adesão dos materiais multifásicos. Em média as ligações primárias energia de ligação na faixa de 100 a 1000 kJ/mol, enquanto as ligações secundárias têm em torno de 50 kJ/mol. As ligações secundárias são fortes o suficiente para explicarem a adesão. Essas ligações são fortes o suficiente para explicarem a adesão, não sendo necessário ocorrerem ligações primárias, pois estas são difíceis de serem constatadas (COSTA, 2014)

Para o cálculo da energia de arrancamento (G_d) relacionada com a adesão química foi utilizada a Equação 3 (REDON et al., 2001)

$$G_d = \frac{2(P_a - P_b)^2}{\pi^2 E_f d_f^3} \quad \text{Eq. 3}$$

Onde:

P_a (N): Força máxima alcançada até que a fibra comece a se desprender da matriz;

E_f (Pa): Módulo de elasticidade da fibra.

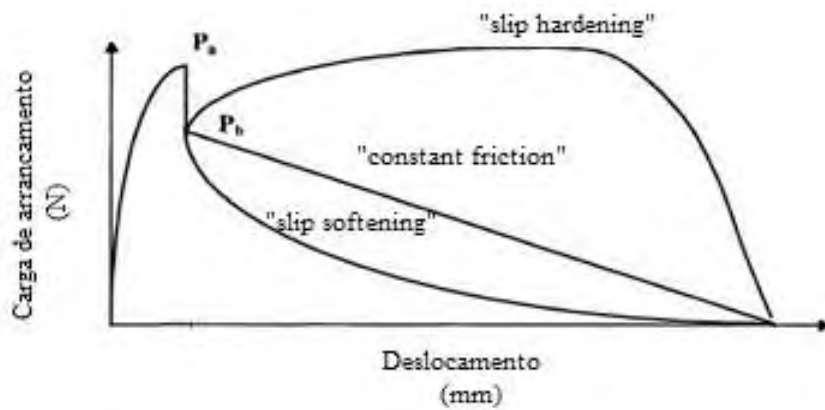


Figura 6. Curvas características do arrancamento (REDON et al., 2001)

As curvas características são equacionadas de acordo com a equação 4 abaixo. Sendo β menor que zero “slip softening”, β igual a zero “constant friction” e β maior que zero “slip hardening”

$$\beta = \left(\frac{d_f}{l_f}\right) * \left[\frac{1}{\tau_0 * \pi * d_f}\right] * \left[\frac{\Delta P}{\Delta S} + 1\right] \quad \text{Eq. 4}$$

A força total exercida no ensaio de arrancamento é calculado pela equação 9 abaixo.

$$P = \tau_0 * \pi * d_f [l_e + S * (\beta \frac{l_e}{d_f} - 1)] \quad \text{Eq. 5}$$

Onde: ΔP (N) é a variação de força entre P_b e a força mínima alcançada no final do ensaio; ΔS (mm) é a variação de deslocamento entre S' e o deslocamento mínimo alcançado no final do ensaio; S (mm) é o deslocamento total alcançado

3.5 Tratamentos da fibra

Apesar dos ganhos ambientais e econômicos proporcionados pelo uso de fibras vegetais como reforço de matrizes cimentícias, fatores como degradação durante o processamento dos compósitos, baixa adesão química com algumas matrizes poliméricas hidrofóbicas e cerâmicas, a ordem de grandeza do “calibre” das fibras vegetais e a

suscetibilidade à degradação química e biológica e a alta absorção de umidade praticamente inviabilizam sua aplicação (MEGIATTO JR. et al., 2008; SAHA et al., 2012; REDDY et al., 2013). Essas características resultando em compósitos com baixas propriedades mecânicas e durabilidade FUENTES et al., 2011). Métodos de modificação dessas características foram propostos por Calado et al. (2000), Rong et al. (2001), Toledo et al. (2003), Troedec et al. (2008), Megiatto Jr. et al. (2008), Bertoti et al. (2009), Brígida et al. (2010), Kim, Netravali (2010), Saha et al. (2010), Saha et al. (2012), Reddy et al. (2013), Tonoli et al. (2013) com o objetivo de melhorar tais características. Esses métodos envolvem tratamento químico, físico, físico-químico e mecânico.

Os tratamentos químicos geralmente empregados para melhorar a hidrofobicidade, durabilidade e resistência mecânica são: alcalino e silanos (LI et al., 2007; SAHA et al., 2012; TONOLI et al. 2013). Plasma a frio foi utilizado como tratamento físico por Barra, (2015) a fim de se modificar a superfície da fibra. Os tratamentos propostos no presente estudo serão os de hornificação para as fibras vegetais, a fim de diminuir a posterior absorção de água das fibras vegetais, a lavagem alcalina para as fibras poliméricas tentando aumentar as “falhas” na superfície das fibras e assim aumentar seu travamento mecânico na matriz e por último a carbonatação acelerada a fim de densificar a matriz cimentícia e por consequência aumentar a adesão mecânica entre as fibras e a matriz.

3.5.1 Tratamento alcalino

O pré-tratamento alcalino de fibras tem por objetivo aumentar a área de superfície da biomassa e reduzir a cristalinidade da celulose. Esse efeito é especialmente interessante com relação a adesão mecânica (item 6.4.1), pois o aumento de “falhas” na superfície propicia a penetração da pasta de cimento na fibra.

Enquanto o tratamento ácido promove a hidrólise da camada de hemicelulose, o tratamento alcalino promove a remoção de parte da camada de lignina deixando a hemicelulose intacta, a qual necessita de enzimas. Por promoverem uma intensa deslignificação da biomassa, os álcalis são utilizados no tratamento de matérias (PIETROBON, 2008) com reduzido teor de lignina como, por exemplo, resíduos agroindustriais.

3.5.2 Tratamento térmico

O tratamento térmico (hornificação) é um processo de molhagem e secagem onde a secagem é feita em uma certa temperatura controlada, com o objetivo de diminuir a retração sofrida pela fibra vegetal após a cura do compósito. Segundo Diniz et al. (2004), durante a hornificação as cadeias de polissacarídeos da celulose são organizadas de um modo mais compactado, no estado seco, enrijecendo a estrutura polimérica das fibrocélulas. Como consequência, os vazios capilares da fibra são gradualmente fechados e não conseguem mais preencher totalmente de água com a molhagem posterior ou reumidificação. Diminuir a retração sofrida na cura pela fibra vegetal implica em gerar uma menor zona de transição, altamente porosa (SAVASTANO; AGOPYAN, 1999), melhorando a adesão entre a fibra e a matriz cimentícia (TONOLI et al., 2009)

3.6 Tratamento da matriz

3.6.1 Carbonatação acelerada

A carbonatação acelerada tem sido utilizada como método auxiliar à modificação da matriz para aumentar a durabilidade de compósitos (ALMEIDA et al., 2010, 2013) apontam que a carbonatação aumenta a resistência do compósito e reduz a absorção de água da fibra (TOLÊDO FILHO et al., 2000).

Tolêdo Filho et al. (2003) observaram significativo aumento na durabilidade de compósitos reforçados com fibras após exposição à atmosfera de dióxido de carbono.

A carbonatação acelerada é um processo de modificação da matriz, que acontece por meio da difusão do dióxido de carbono (CO₂) nos poros insaturados do material cimentício, reagindo com o hidróxido de cálcio e formando carbonato de cálcio (CaCO₃).

A carbonatação acontece pela reação do CO₂ com os íons livres do hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂) presentes na matriz cimentícia, formando o carbonato de cálcio (CaCO₃) conforme mostra a Equação 6. Todo esse processo depende de algumas variáveis relacionadas aos fatores ambientais (temperatura, umidade, concentração de CO₂) e características próprias do cimento (ALMEIDA et al., 2013)



O processo de carbonatação acontece por meio do CO₂ que se difunde pelos poros insaturados da matriz de cimento. Inicialmente, o Ca(OH)₂ formado na hidratação do cimento sofre dissociação como apresentado pela Equação 7.



Em seguida, o CO₂ é então dissolvido nos poros da matriz pela solução aquosa, formando os íons carbonato (Equações 8 e 9), e por fim, ocorre a reação dos produtos dissolvidos (Ca e CO₃) para a formação do CaCO₃, conforme a Equação 10.



3.7 Ângulo de contato

Uma das características importantes dos materiais se refere a energia de superfície e o ângulo de contato formado (estático ou dinâmico) entre sólidos e líquidos, tais informações demonstram qual é o tipo de interação sofrida entre eles (TRAN et al., 2011).

Quando o ângulo de contato formado entre um sólido e a água é inferior a 90°C, entende-se que o sólido é facilmente molhável (hidrofílico); ângulos maiores que 90°C indicam natureza hidrofóbica (YUAN; LEE, 2013).

A análise do ângulo de contato estático para esse tipo de situação não é adequada, sendo necessário utilizar o método de ângulo de contato dinâmico (YUAN; LEE, 2013).

Ângulo de contato dinâmico varia conforme a velocidade de ensaio, sendo que a baixas velocidades são próximos ou iguais ao ângulo de contato medido estaticamente. (YUAN; LEE, 2013)

Essa informação é especialmente importante em estudos de adesão pois analisa a interação na interface fibra/matriz de modo a comparar o efeito de tratamentos e as diferentes características das fibras estudadas.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

Os materiais utilizados neste estudo são mostrados na tabela abaixo. As caracterizações de todos os materiais serão abordadas no capítulo resultados.

Tabela 3. Materiais utilizados no presente estudo.

Fibras poliméricas	PP da Saint Gobain
	PVA da Inner Mongólia
Fibras vegetais	Curauá
	Coco Verde
Matriz cimentícia	Calcário CPV-ARI (Cauê)
	Calcário Moído (ITAÚ)

4.2 Métodos

4.2.1 Caracterização das fibras

As fibras foram caracterizadas quanto a natureza física (caracterização geométrica e picnometria das fibras), química (ângulo de contato) e mecânica (tração direta)

4.2.1.1 Caracterização Geométrica (Seção Transversal e Perímetro)

A geometria é uma importante característica a ser determinada visto que seu resultado afeta diretamente os ensaios mecânicos das fibras e os ensaios de adesão entre fibras e matrizes, portanto foi necessária sua avaliação.

Os métodos utilizados para se conhecer a geometria da fibra, bem como sua seção transversal e perímetro foi utilizado em estudos anteriores como no trabalho de Neves (2016) e Barra (2014) que trabalharam com fibras de coco verde e curauá, as fibras foram analisadas primeiramente quanto a geometria, confirmando se são circulares, elípticas ou em forma de ferradura. Por se tratar de fibras vegetais, as medidas das fibras tendem a variar, portanto, se faz necessário analisá-las individualmente.

4.2.1.1.1 Preparação dos corpos de prova para análise em microscopia óptica

A metodologia de preparação utilizada será conforme o trabalho de Barra (2014) onde as fibras são impregnadas com 5,3 mL de resina epóxi (Epofix Resin, marca Struers) e 0,7 mL de catalisador (Epofix Hardener, marca Struers) e após 24 h lixadas com lixa d'água com gramatura 400, 600 e 1000 com auxílio de álcool isopropílico e polidas com suspensão de diamante de 6, 3 e 1 μm .

4.2.1.1.2. Fator de correção para seção transversal das fibras vegetais

A utilização de fibras vegetais como reforço de um compósito cimentício depende, dentre outras, de suas propriedades mecânicas (BENTUR; MINDES, 1990).

A caracterização mecânica está diretamente relacionada com a seção transversal da fibra, logo um estudo mais detalhado na seção transversal se fez necessário

Para cálculo da área da seção transversal primeiramente foi realizada uma análise dessa seção para identificar sua forma geométrica através de um microscópio óptico, sendo constatado que as fibras se aproximavam da forma geométrica conhecida como elipse.

Para observação da seção transversal, as fibras vegetais foram agrupadas em tufo, impregnadas em uma mistura de 5,3 mL de resina epóxi (Epofix Resin, marca Struers) e 0,7 mL de catalisador (Epofix Hardener, marca Struers), lixadas com lixa d'água gramaturas 400, 600 e 1000 (com álcool isopropílico como refrigerante) e polidas com suspensão lubrificante de diamante (tamanho médio de partículas de 6, 3 e 1 μm – marca Struers, nessa sequência). Foi utilizado microscópio óptico da marca Zeiss e, para aquisição de micrografias, utilizou-se lente objetiva com aumento de 5x (marca Zeiss EC EPIPLAN). Para ajustar a heterogeneidade das geometrias encontradas, foi realizada uma

correlação entre as áreas, e o coeficiente angular da equação obtida. O coeficiente angular funcionará como um fator de correção para ajustar o valor da área.

O cálculo do fator de correção, foi realizado através de 30 medidas de fibras e analisadas por imagem através do software Axio Vision Release 4.8.2 06-20. A área “real”, foi obtida ao se contornar as fibras com o uso de uma ferramenta do software e a área elíptica foi calculada conforme equação 11

$$\text{Área elipse} = \pi D * d \quad \text{Eq.11}$$

Onde D é a diagonal maior e d é a diagonal menor.

4.2.1.1.3 Ensaio de caracterização geométrica

Utilizando um microscópio óptico Carl Zeiss, modelo Axio ImagerA2m, com câmera acoplada modelo AxioCam MRc e software de aquisição de imagens Axiovision Rel. 4.8, medidas da área transversal e perímetro foram realizadas. Essas informações são especialmente importantes para a análise do ensaio de tração direta e arrancamento, que consideram tais dados para os cálculos

4.2.1.2. Picnometria

A picnometria é necessária para se conhecer a densidade real de cada fibra visto que isso afeta diretamente a formulação utilizada nos compósitos.

4.2.1.2.1 Preparação dos corpos de prova para ensaio de picnometria

Uma certa quantidade de fibras foram secas em estufa com circulação de ar por 24 h a 60°C. A quantidade de fibras utilizada é especialmente interessante pois quanto mais enche-se o cadinho de ensaio, menos variam os resultados.

4.2.1.2.2. *Ensaio de picnometria*

A densidade das fibras de Coco Verde, Curauá, polipropileno e álcool polivinílico foi analisada em multiplicômetro Quantachrom, modelo MVP-6DC, utilizando-se hélio gasoso.

A técnica de análise consiste em medir a variação de pressão do gás na câmara de volume conhecida contendo a amostra. O volume da amostra pode ser calculado seguindo a equação 12.

$$V_s = V_c - V_r * \left(\frac{P_1}{P_2} - 1\right) \quad \text{Eq.12}$$

Onde V_s é o volume da amostra, V_c é o volume da câmara e V_r é o volume da referência; P_1 é a pressão do gás na câmara que contém a amostra e P_2 é a pressão quando o gás de expansão está aberto. A densidade é dada pela razão entre a massa da amostra e o volume da amostra de acordo com a equação 13.

$$\text{Densidade} = \frac{\text{massa}}{V_s} \quad \text{Eq.13}$$

4.2.1.3. *Ângulo de contato dinâmico das fibras*

O ensaio de ângulo de contato foi realizado a fim de se conhecer a natureza hidrofílica ou hidrofóbica das fibras.

4.2.1.3.1 *Preparação dos corpos de prova para ângulo de contato*

As fibras com e sem tratamento foram secas em estufa com circulação forçada de ar por 24 h a 60°C. Após a secagem, as fibras devem permanecer em dessecador para que não acumulem umidade, desviando o ângulo do real.

4.2.1.3.2. Ensaio de ângulo de contato

A propriedade pode ser mensurada por diferentes métodos, portanto, medições de ângulo de contato dinâmico serão realizadas em Tensiômetro de ângulo de contato dinâmico (modelo DCAT21, marca Data-Physics Instruments GmbH). Os ensaios deverão ocorrer em água deionizada a 20°C, com 5 mm de penetração da fibra no líquido, 0,08 mm/min de velocidade imersão, 0,2 mg de limite de detecção, Adaptado dos parâmetros utilizados por (TRAN et al., 2011; BARRA, 2014).

4.2.1.3.3. Tração direta da fibra

O ensaio de tração direta das fibras foi utilizado nas fibras estudadas a fim de se verificar o desempenho mecânico.

A preparação das fibras foi feita de acordo com a norma ASTM C1557 14 (ASTM, 2017), sendo suas extremidades fixadas com cola branca a base de acetato de polivinila em suporte de papel de gramatura de 180 g/m² (BARRA, 2014).

Os testes das fibras vegetais foram conduzidos em máquina universal de ensaios, marca MTS Landmark Servo Hydraulic Test Systems, modelo 393. A velocidade de ensaio foi de 0,2 mm/min e os comprimentos de ensaio da fibra foram de 30 mm (BARRA, 2014) com célula de carga de 100 N. As fibras poliméricas foram testadas em um Texturômetro marca TA instruments, modelo TA.XT2i com velocidade 0,2 mm/min, 30 mm de comprimento útil para ensaio e célula de carga de 5 N.

As amostragens foram baseadas na norma ASTM D3822M – 14 (Standard Test Method for Tensile Properties of Single Textile Fibers, ASTM, 2017).

As propriedades mecânicas como resistência à tração, módulo de elasticidade, alongamento máximo e energia específica foram adquiridas pela relação entre tensão (σ) versus deformação específica (ϵ).

A resistência à tração é a última tensão da curva antes do material romper e o módulo elástico foi dado como a proporcionalidade entre tensão e deformação específica dado pela tangente do ângulo α .

A resistência à tração do material, σ , é dada pela razão da força aplicada F (N) pela área transversal da fibra A (mm^2), conforme representado na Equação 14:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \text{Eq.14}$$

A deformação específica é dada pela relação entre variação de comprimento ΔL ($L_{\text{final}} - L_{\text{inicial}}$) pelo comprimento inicial do material (L_{inicial}), conforme expressa a Equação 15:

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad \text{Eq. 15}$$

O módulo de elasticidade é dado pela relação entre a Tensão e a sua correspondente deformação na região linear da curva de carregamento de força de acordo com a equação 16 abaixo

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad \text{Eq. 16}$$

4.2.2 Caracterização dos compósitos

4.2.2.1 Definições de formulações utilizadas para os ensaios físicos

Quatro diferentes formulações foram testadas, alterando a macrofibra e a porcentagem dos demais componentes de acordo com a densidade das fibras, a fim de manter o volume de macrofibras presentes nos corpos de prova. As formulações dos compósitos foram baseadas em formulações industriais, que utilizaram as fibras de PP e PVA como parâmetros para referências a fibra de. A equação utilizada garante o mesmo volume de fibras entre determinadas fibras quando se tem um parâmetro a ser seguido e é mostrada na figura abaixo.

$$m_2 = m_1 * \frac{d_2}{d_1} \quad \text{Eq. 17}$$

Onde m_1 é a massa (g) do PP ou PVA usado na formulação da indústria; m_2 é a massa (g) da fibra que será testada; d_1 é a densidade (g/cm^3) do PP ou do PVA se for o caso comparativo usado na formulação da indústria; d_2 é a densidade (g/cm^3) da fibra que foi testada. A tabela 4 abaixo mostra a formulação utilizada nos ensaios de absorção de água aparente e flexão dos compósitos.

Tabela 4. Formulação dos compósitos com diversas macrofibras

Macrofibra	Coco Verde	Curauá	PP	PVA
Formulação	62,94	62,80	63,35	62,99
Cimento (% m)	31,45	31,38	31,65	31,47
Calcário (% m)	3,63	3,63	3,63	3,63
Polpa celulósica (% m)	1,98	2,19	1,37	1,91
Macrofibra (% m)	62,94	62,80	63,35	62,99
cimento/calcário	2	2	2	2

4.2.2.2. Ensaio de absorção de água aparente, densidade aparente e porosidade *aparente*

Para a determinação da absorção de água, da densidade aparente e da porosidade aparente, foram utilizados os procedimentos descritos na norma ASTM C-948-81 (1981). Os corpos de prova retirados das placas de fibrocimento com diferentes composições, de acordo com as formulações estipuladas no item e com as dimensões nominais de 165 mm x 40 mm x 5 mm foram submersos em água por 24 h, a temperatura ambiente (~23°C), medindo-se a massa imersa (M_i), com a amostra dentro da água. A massa úmida (M_u) foi medida retirando-se a amostra da água e enxugando levemente sua superfície para retirada do excesso de água com um pano limpo e seco. Após a secagem das amostras por 24 h, realizada em estufa com circulação de ar a $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$, foi obtida a massa seca (M_s). Para determinação das propriedades físicas foram utilizadas as Eq. 18 a 20.

$$\text{Absorção de água aparente (\%)} = \frac{M_u - M_s}{M_s} \quad \text{Eq. 18}$$

$$\text{Densidade aparente } \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right) = \frac{M_s}{M_u - M_i} * d \quad \text{Eq. 19}$$

$$\text{Porosidade aparente (\%)} = \frac{M_u - M_s}{M_u - M_i} * 100 \quad \text{Eq. 20}$$

Em que: d = densidade da água, igual a 1 g/cm^3 ; M_s = massa seca; M_i = massa imersa; M_u = massa úmida.

4.2.2.3. Flexão dos compósitos cimentícios

As propriedades mecânicas de 4 diferentes composições e 2 foram determinadas usando corpos de prova com as dimensões nominais de 165 mm x 40 mm x 5 mm. Foi realizado o ensaio de tração na flexão com quatro cutelos, com vão inferior igual a 135 mm, vão superior igual a 45 mm e velocidade de deslocamento de 5 mm/min, baseado nas recomendações da RILEM (Testing Methods for Fibre Reinforced Cement-Based

Composites). Utilizando-se o software Tesc, versão 1.3, interligado à máquina universal de ensaios mecânicos, marca EMIC, modelo DL 30000 juntamente com seus acessórios (célula de carga com capacidade de 1 kN e deflectômetro para medição de deformações de até 30 mm), foi determinada a força aplicada e a deformação sofrida pelo material. Foram determinados módulo de ruptura (MOR, Eq.21), limite de proporcionalidade (LOP, Eq.22), módulo de elasticidade (MOE, Eq.23), e energia específica (EE, Eq.24), com determinação da área sob a curva no gráfico carga x deformação. A finalização do ensaio ocorre ao se constatar redução de 70% da carga máxima de ruptura, para cálculo da energia específica, que é a energia absorvida dividida pela área da seção transversal do corpo de prova. Antes da execução do ensaio, os corpos de prova ficaram imersos em água por 24 h à temperatura ambiente (~23°C). Após completar esse tempo, os corpos de prova foram removidos da água e sua superfície levemente seca, para retirar o excesso de água. Suas dimensões foram aferidas em três pontos diferentes (largura e espessura), por meio de um paquímetro digital. As equações para cálculo das propriedades foram as seguintes:

$$\text{Módulo de Ruptura (MPa)} = \frac{3 * P_{\text{máx}} * (L_{\text{inf}} - L_{\text{sup}})}{2 * b * d^2} \quad \text{Eq.21}$$

$$\text{Limite de Proporcionalidade (MPa)} = \frac{3 * P_{\text{Lop}} * (L_{\text{inf}} - L_{\text{sup}})}{2 * b * d^2} \quad \text{Eq.22}$$

$$\text{Módulo Elástico (MPa)} = \frac{276 * (L_{\text{inf}})^3}{1296 * b * d} * \alpha \quad \text{Eq.23}$$

$$\text{Energia Específica} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{m}^2} \right) = \frac{\text{Energia absorvida}}{A} \quad \text{Eq.24}$$

Em que: $P_{m\acute{a}x}$ = carga maxima aplicada em N; P_{Lop} = carga maxima aplicada antes da curva carga x deformao desviar-se da linearidade em N; L_{inf} = distância entre apoios inferiores em mm; L_{sup} = distância entre apoios superiores em mm; b = largura do corpo-de-prova em mm; d = espessura do corpo-de-prova em mm; Energia absorvida = área sob a curva do gráfico carga x deformao em N.mm; A = rea da seção transversal do corpo de prova em mm^2 ; α = coeficiente angular da região linear da curva carga x deformao.

4.2.3 Teste de adesão

4.2.3.1 *Preparao do molde de arrancamento*

O molde foi idealizado para fixar a ancoragem (1 mm - 30 mm) em uma placa de alumínio (Figura 7a) com 330 x 150 x 6,5 mm^3 com três linhas de orifícios espaçados longitudinais para a fixao de três placas de policarbonato (Figura 8a). A Figura 7(b) mostra a figura esquemática.



Figure 7. Placa de alumínio do molde de arrancamento. Original (a) e desenho esquemático (b). Fonte: Própria autoria

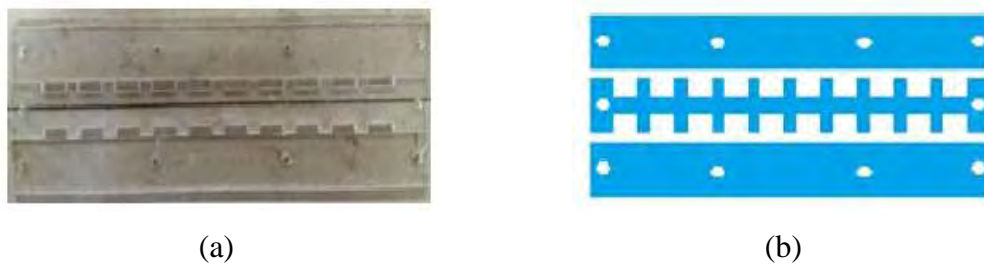
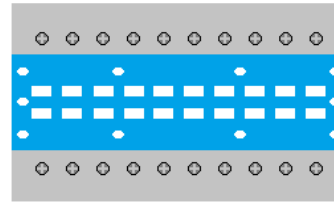


Figure 8. Placa de policarbonato do molde de arrancamento. Original (a) e desenho esquemático (b)



(a)



(b)

Figura 9. Molde de arrancamento completo. Original (a) e desenho esquemático (b)

Nas figuras 7, 8 e 9 esquemáticas (b) as partes em azuis são placas de policarbonato, as cinzas alumínio e as brancas são espaços vazios.

4.2.3.2 *Preparação dos corpos de prova*

Utilizou-se um molde caseiro, conforme item 4.2.4.1. foi usado com comprimento maior que o necessário para ancoragem, pois é necessário o alinhamento da fibra nos parafusos fixados no molde, para que a fibra seja enrolada em torno dos parafusos, garantindo assim que ao preencher o espaço vazio do molde com pasta de cimento, formando uma espécie de "sanduíche". A pasta de cimento composta por cimento Portland (CPV-ARI, marca Cauê) e calcário moído (Itaú), água e superplastificante Melflux na proporção de 1: 0,43: 0,35: 0,0005 respectivamente. A ancoragem utilizada foi de 5 mm em todos os casos.

Posteriormente o conjunto foi colocado em saco plástico, para impedir a evaporação de água do sistema, onde o cimento foi curado por 14 dias a temperatura ambiente. Após esse período, 20 corpos de prova com 5 mm com fibras ancoradas foram retirados.

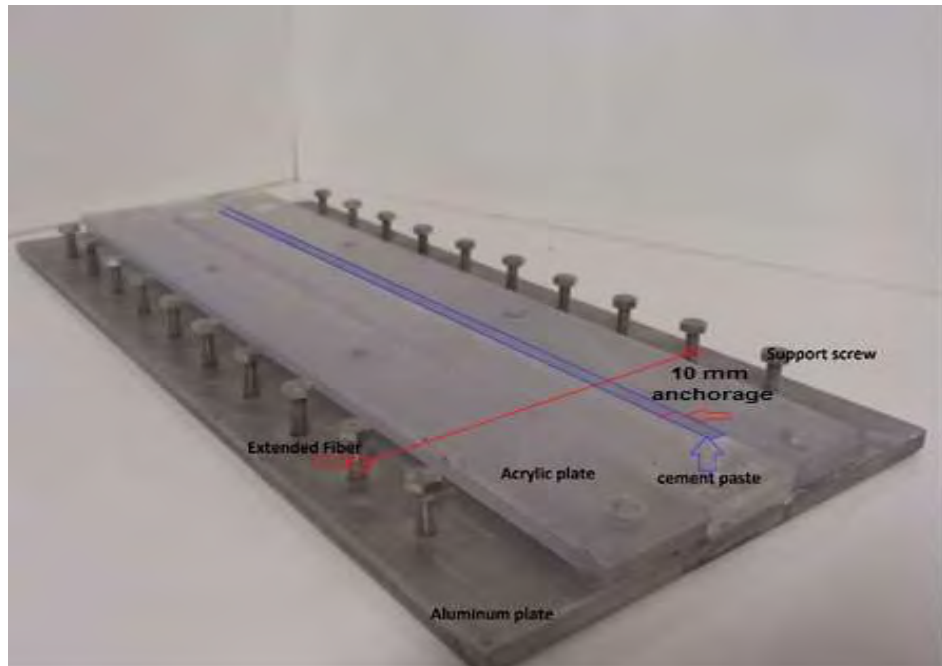


Figura 10. Molde para ensaio de arrancamento

4.2.3.3 Ensaio de arrancamento

Os ensaios de arrancamento (Pull-out) foram realizados para determinação de propriedades da interface fibra/matriz, sendo realizados em uma máquina de ensaio do tipo Texturômetro TA.XT2i (marca TA Instruments) (Figura 11a) com célula de carga de 5 N, distância entre a matriz e a garra de 2 mm e velocidade de deslocamento de 0,02 mm/s repetindo 20 vezes para cada tipo de amostra. Os gráficos foram gerados no software Exponent.

As amostras foram presas no equipamento adaptado que simula as garras (Figura 11b). Na parte de baixo do suporte fixador foi utilizado uma fita adesiva de papel para imobilizar a parte externa da fibra a ser arrancada, pois o comprimento que não pode ser alterado para o ensaio é o comprimento de fato embutido na matriz cimentícia. A fita adesiva é colocada rente ao suporte fixador inferior de modo que a fita não interfira no comprimento livre entre a garra e a amostra a ser ensaiada (2 mm)

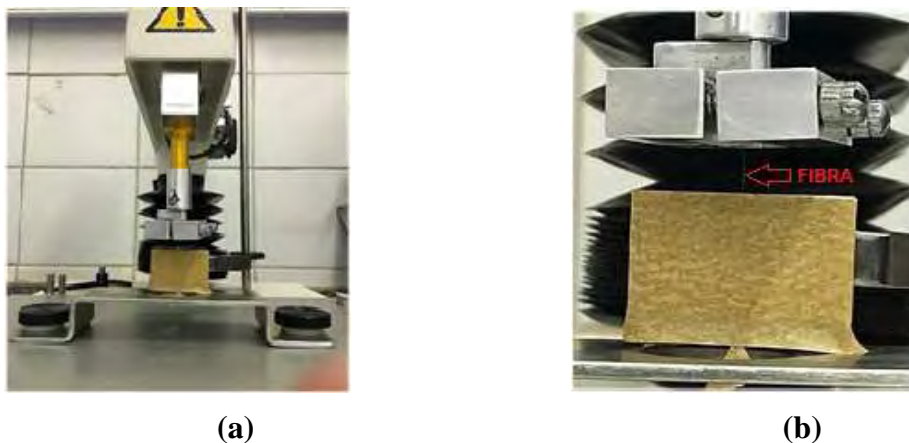


Figura 11. Texturômetro (a) e corpo de prova preparado para ensaio (b)

4.2.4 Tratamentos

4.2.4.1 *Tratamento das fibras poliméricas (Lavagem alcalina)*

Fibras poliméricas sem tratamento com o comprimento de 30 mm foram mantidas imersas em uma solução altamente alcalina com pH 13 (água do processo de produção de telhas de fibrocimento) em um balão de vidro, durante 24 h em temperatura de 60°C. Após o período de lavagem, as fibras foram retiradas do balão e mantidas por 24 h em estufa com circulação forçada de ar (Marconi, modelo MA035) a 60°C. (RAMAKRISHNA; SUNDARARAJAN, 2005; BARRA, 2014)

4.2.4.2 *Tratamento térmico das fibras vegetais (Hornificação)*

A hornificação seguirá a metodologia Claramunt et al (2010) que constitui a imersão das fibras em água em temperatura a 23°C por 3 h até a sua saturação, sendo posteriormente secas em estufa com circulação forçada de ar (Marconi, modelo MA035) com 1°C/min de taxa de aquecimento e 16 h de patamar na temperatura 80°C. Após o tempo de secagem, o aquecimento deve ser desligado e a fibra resfriada até 23°C

(CLARAMUNT; ARDANUY; GARCÍA-HORTAL, 2010). Essas etapas caracterizam 1 ciclo e foi repetido por 10 vezes.

4.2.4.3 Tratamento da matriz cimentícia (Carbonatação acelerada)

Após a moldagem de 20 corpos de prova para cada tipo de formulação para o ensaio de arrancamento, o conjunto passou por carbonatação acelerada de acordo com o método realizado por Pizzol (2013) em câmara climática Thermotron a 60°C com umidade relativa a 70% em ambiente com 15% de concentração de CO₂ por 6 h e posteriormente as fibras foram arrancadas dessa matriz modificada

5. RESULTADOS

5.1 Caracterização das fibras

5.1.1 Análise Geométrica

As seções transversais das fibras são apresentadas nas figuras e tabela abaixo.

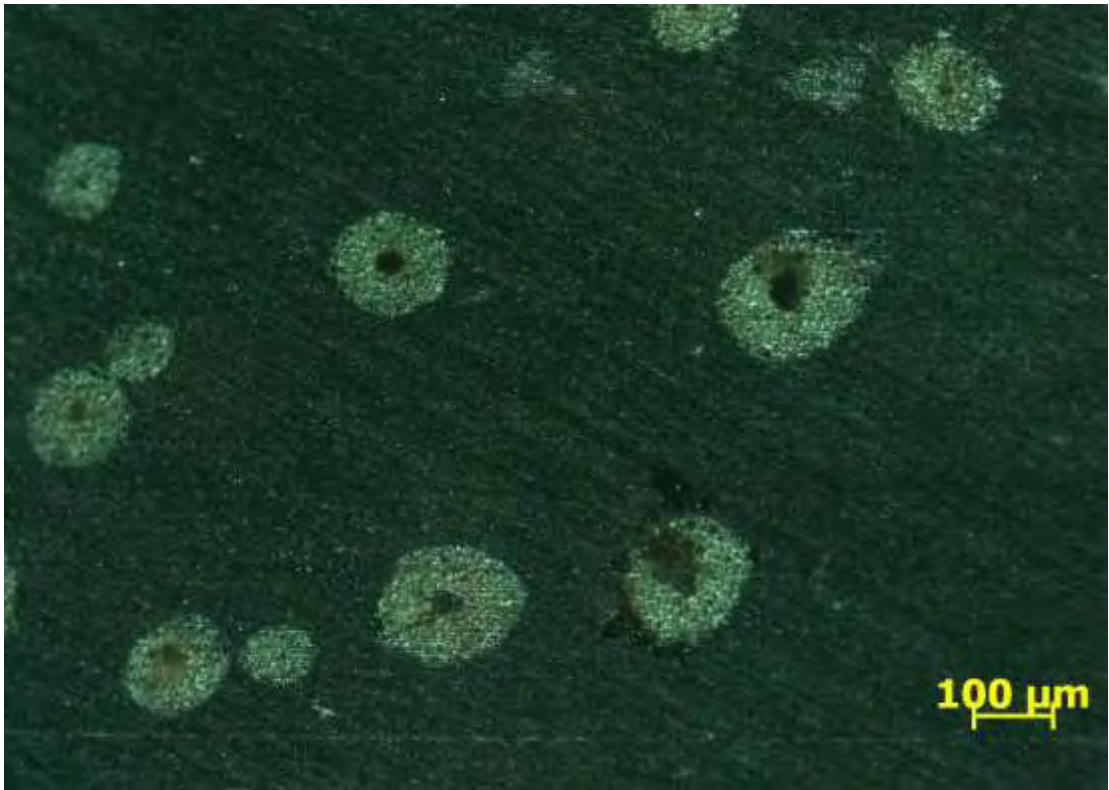


Figura 12 – Seção Transversal Fibra de Coco Verde.

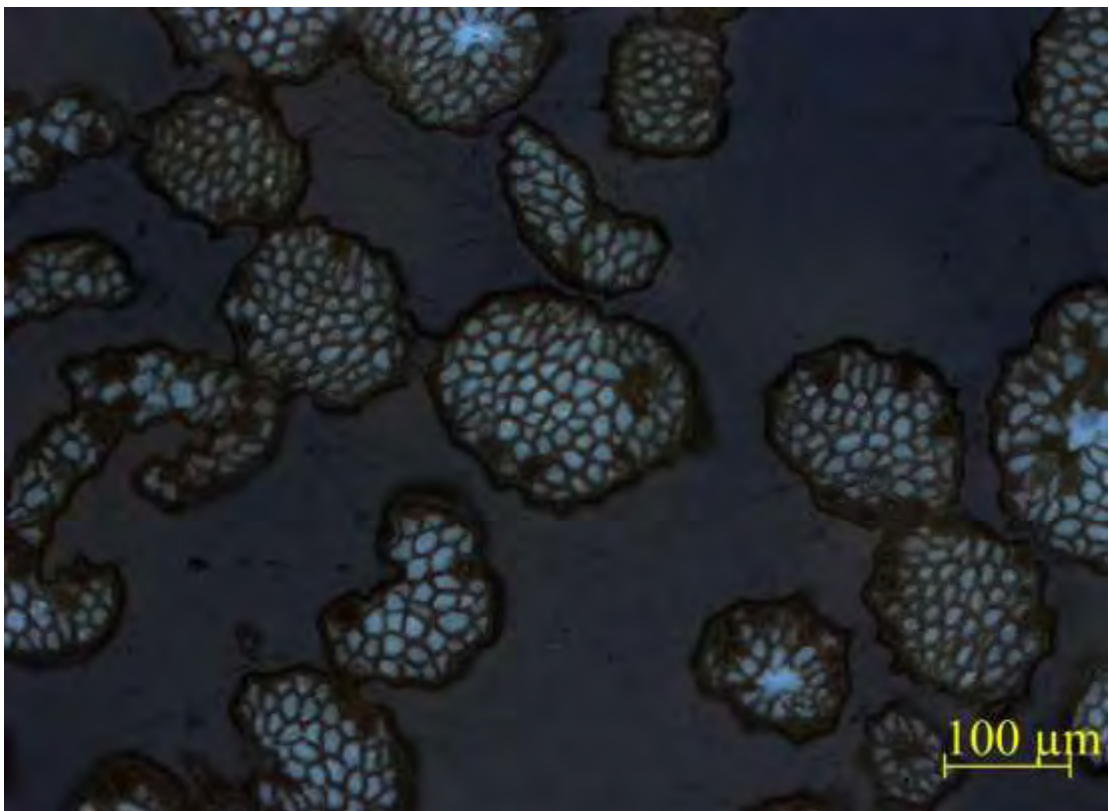


Figura 13 – Seção transversal fibra de Curauá

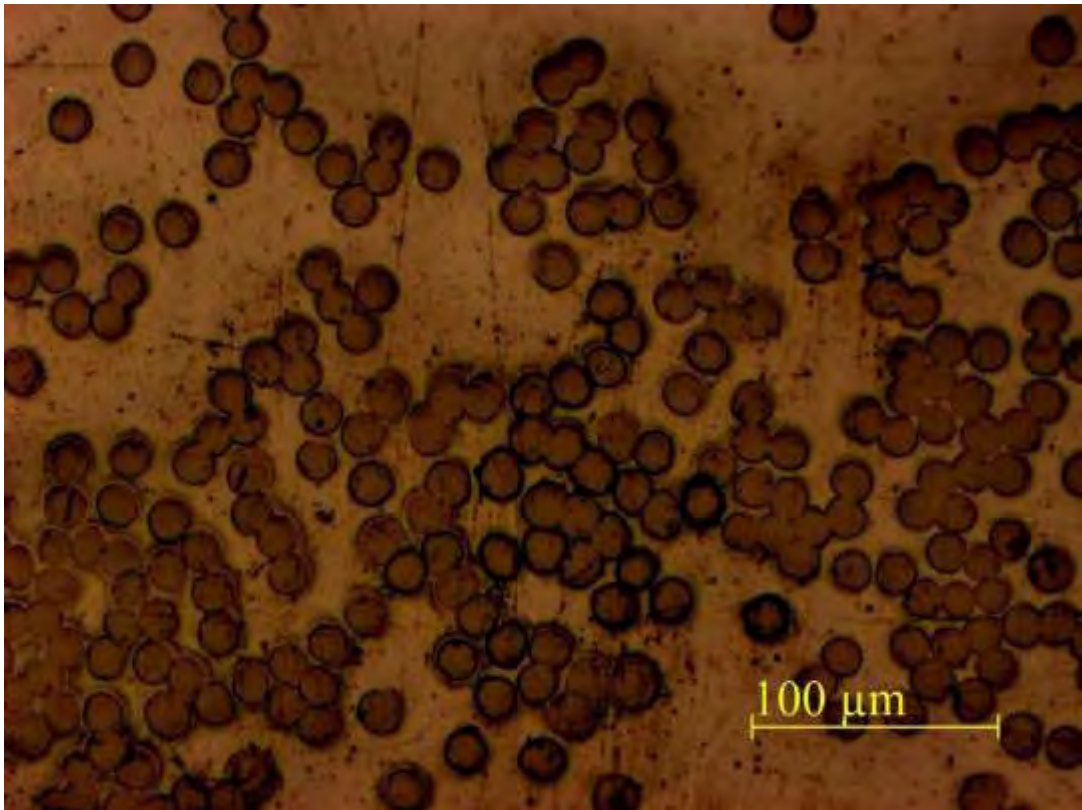


Figura 14 – Seção transversal fibra de PP



Figura 15 – Seção transversal fibra de PVA

Tabela 5. Medidas geométricas das fibras

Fibra	Coco Verde	Curauá	PP	PVA
Seção Transversal (μm^2)	18235 \pm 5728	15519 \pm 5729	246 \pm 3,75	209 \pm 20,8
Perímetro (μm^2)	474 \pm 75	437 \pm 78	56 \pm 2	59 \pm 4

Conforme apresentado nas Figuras 12 e 13, as fibras de Coco Verde e Curauá apresentam variação em sua geometria e, portanto, se fez necessário o cálculo de um fator de correção a área calculada das fibras de acordo com item 4.2.1.1.2. Foram utilizadas 30 fibras de Coco Verde e 30 fibras de Curauá como amostragem

Os valores do fator de correção obtidos foram de 0,2506 para a fibra de Coco verde e de 1,0412 para a fibra de Curauá (Figuras 16 e 17). As diferentes morfologias entre as fibras de coco verde e curauá são responsáveis pela variabilidade do fator de correção dessas fibras. Nas Figuras 16 e 17, área real se trata da área obtida através do uso de software citado no item 4.2.1.1.2 e área calculada se refere ao uso da equação da obtenção da área de uma elipse, que mais se aproxima da geometria encontrada.

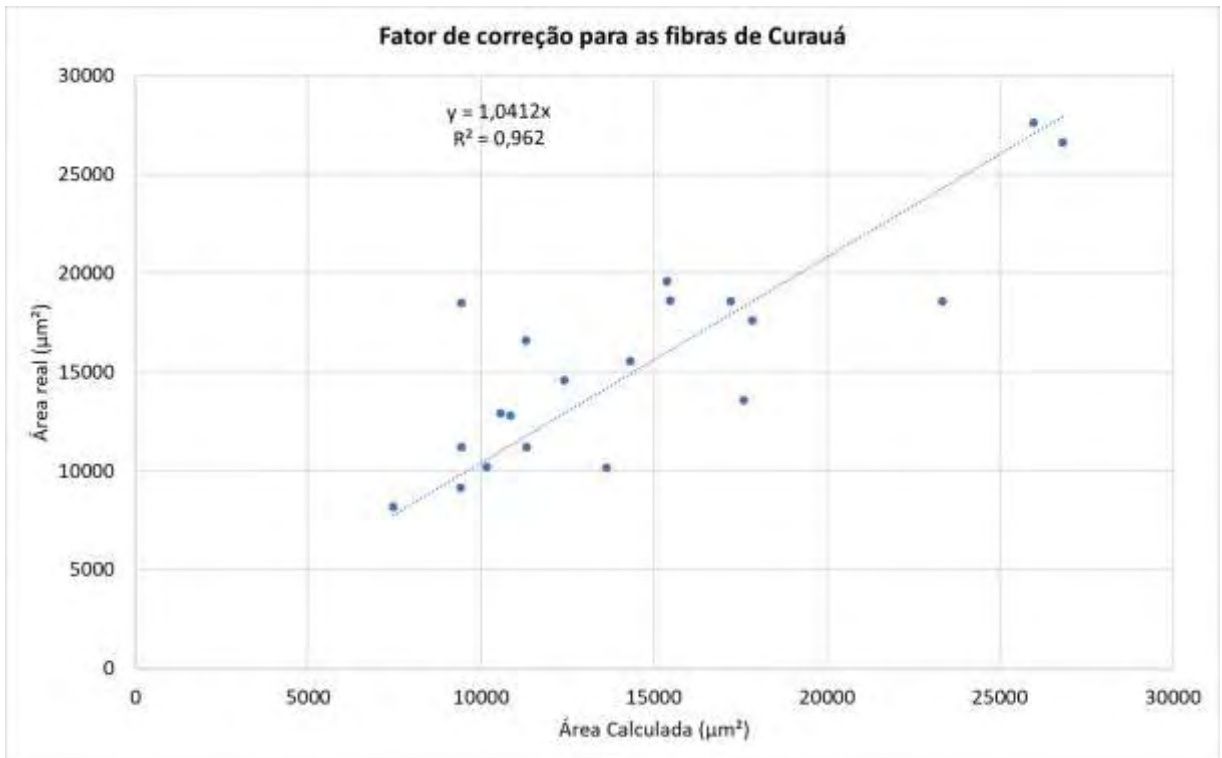


Figura 16. Fator de correção para as fibras de Curauá. (área real vs área calculada)

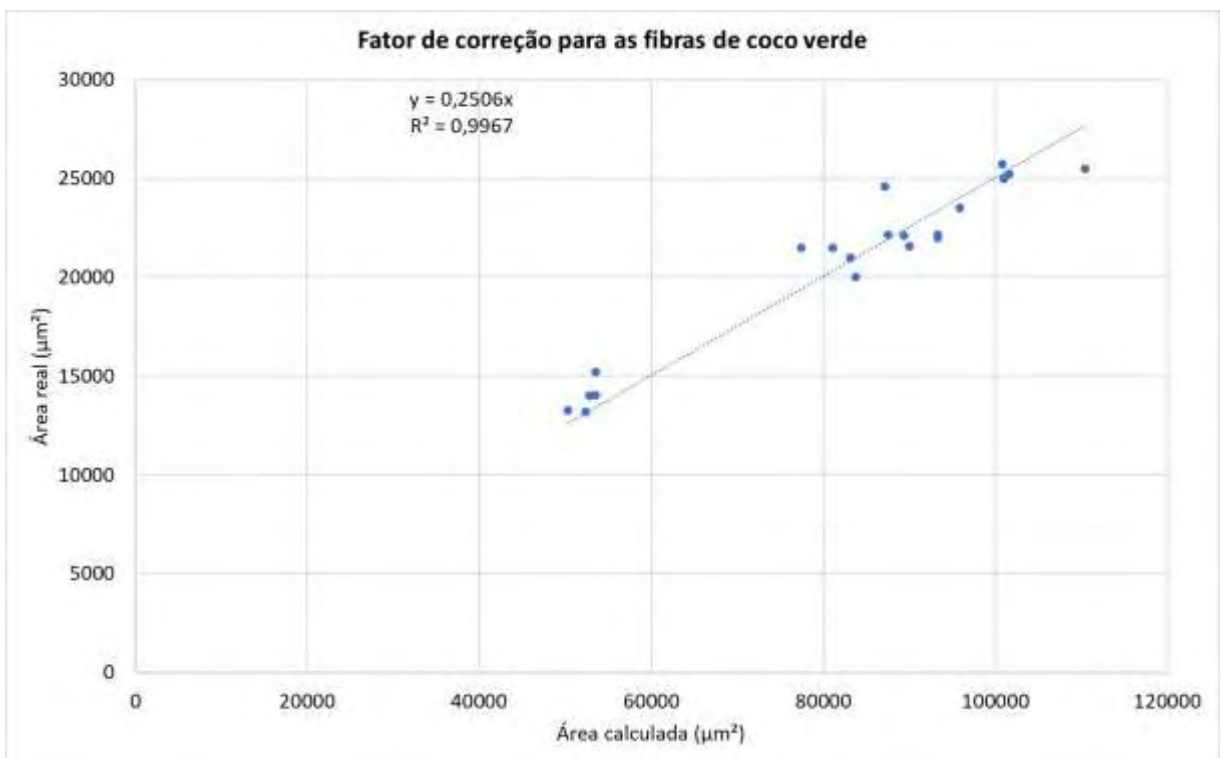


Figura 17. Fator de correção para as fibras de coco verde (área real vs área calculada)

5.1.2 Densidade real

A densidade real das fibras é apresentada na tabela abaixo.

Tabela 6. Densidade das fibras

Fibras sem tratamento	Densidade (g/cm³)	
Coco Verde	1,33	±0,06
Curauá	1,47	±0,01
Polipropileno	0,92	±0,01
Polivinil Álcool	1,28	±0,01

5.1.3. Ângulo de contato das fibras

Tabela 7. Resultados de ângulo de contato de fibras imersas em água deionizada

Fibra	Sem tratamento (°)	Com tratamento (°)
Coco Verde	79,9 ± 4,8	92,6 ± 2,4
Curauá	89,3 ± 0,4	92,6 ± 6,3
PP	79,9 ± 0,1	80,5 ± 0,5
PVA	93,0 ± 0,5	94 ± 2

O tratamento nas fibras vegetais aparentemente aumentou a hidrofobicidade (aumentando seu ângulo de contato) das fibras, visto que seus poros foram perdendo a capacidade de absorver água com os sucessivos ciclos de hornificação. Ambas as fibras vegetais se comportavam como hidrofílicas antes do tratamento e hidrofóbicas após o tratamento. Para as fibras poliméricas é interessante notar que o tratamento não surtiu grande diferença pois se levarmos em consideração o desvio padrão, não houve mudança sensível. As fibras de PVA antes e após o tratamento ainda tem a característica hidrofílica e as fibras de PP ainda possuem características hidrofóbicas

5.1.4. Tração Direta das fibras

O resultado de tração direta das fibras revelou que fibras de Curauá e PVA tem elevada resistência a tração direta e módulo de elasticidade em relação as fibras de Coco Verde e PP, no entanto, o alongamento máximo que a fibra pode apresentar é maior nas fibras de Coco Verde e PP, sendo o alongamento máximo nas fibras de PP o maior dentre eles de 71,7%. Conforme tabela 8 abaixo.

Tabela 8 Resultados de ensaios de tração direta em fibras sem tratamento

Fibra	Resistência a tração direta (MPa)	Alongamento máximo (%)	Módulo de elasticidade (GPa)
Coco Verde	169 ± 46,8	24,6 ± 6,58	5,53 ± 1,47
Curauá	1550 ± 334	4,75 ± 0,55	7,11 ± 1,68
Polipropileno	873 ± 220	71,7 ± 13,4	9,08 ± 2,32
Polivinil Álcool	1196 ± 26,4	7,63 ± 1,21	13,1 ± 1,95

5.2. Resultados dos compósitos

5.2.1. Densidade aparente, absorção de água aparente e porosidade aparente.

Os compósitos foram testados quanto a densidade aparente, absorção de água e porosidade após serem ensaiados por flexão conforme norma especificada no item 4.2.2.2 e demonstradas nas tabelas abaixo.

Tabela 9. Densidade aparente, absorção d'água aparente e porosidade aparente dos compósitos

Fibra	Tratamento	Densidade Aparente (g/cm ³)	Porosidade Aparente (%)	Absorção de água Aparente (%)
Coco Verde	Sem tratamento	1,58 ± 0,05	38,08 ± 3,98	23,55 ± 2,18
	Matriz Carbonatada	1,62 ± 0,07	35,18 ± 1,03	22,25 ± 1,33
Curauá	Sem tratamento	1,51 ± 0,03	36,92 ± 1,26	23,94 ± 1,43
	Matriz Carbonatada	1,54 ± 0,05	34,71 ± 0,83	22,98 ± 0,88
PP	Sem tratamento	1,48 ± 0,15	37,20 ± 5,29	24,27 ± 6,09
	Matriz Carbonatada	1,58 ± 0,03	35,28 ± 1,03	23,62 ± 1,09
PVA	Sem tratamento	1,53 ± 0,04	36,82 ± 1,19	23,23 ± 1,13
	Matriz Carbonatada	1,59 ± 0,03	32,26 ± 0,81	21,13 ± 0,97

De maneira geral a carbonatação da matriz aumentou a densidade, diminuiu a porosidade e absorção de água além de ter diminuído o desvio padrão. Isso se deve ao fato da carbonatação acelerada preencher os poros do compósito principalmente com carbonato de cálcio, aumentando assim sua densidade.

5.2.2. Flexão dos compósitos

Tabela 10. Resultados de Flexão de compósitos.

Fibra	Condição	MOR (MPa)	LOP (MPa)	MOE (GPa)	EE (kJ/m ²)
Coco Verde	Sem tratamento	5,04 ± 0,44	4,98 ± 0,42	7,84 ± 0,94	0,87 ± 0,21
	Com matriz carbonatada	5,91 ± 0,54	5,81 ± 0,56	9,08 ± 1,23	1,11 ± 0,21

Curauá	Sem tratamento	4,66 ± 0,33	4,39 ± 0,34	6,75 ± 0,68	1,02 ± 0,11
	Com matriz carbonatada	4,90 ± 0,54	4,14 ± 0,69	6,44 ± 1,42	1,53 ± 0,11
PP	Sem tratamento	6,21 ± 0,72	3,50 ± 0,91	6,14 ± 0,57	3,72 ± 0,59
	Com matriz carbonatada	7,11 ± 1,72	4,37 ± 1,69	6,56 ± 0,66	4,08 ± 0,84
PVA	Sem tratamento	7,43 ± 1,38	4,50 ± 0,76	6,25 ± 0,77	4,31 ± 0,70
	Com matriz carbonatada	7,61 ± 1,08	3,69 ± 0,73	6,59 ± 0,67	4,31 ± 0,65

A carbonatação densificou a matriz cimentícia, de acordo com a Tabela 10, aumentando o MOR de todos os compósitos, de maneira mais evidente para os compósitos com Coco Verde (~17% de aumento) e PVA (~14% de aumento).

O LOP apresentou diferentes resultados, aumentando em compósitos com fibra de Coco Verde e PP, mas diminuiu quando as fibras se tratava de Curauá e PVA.

Com relação ao MOE, o tratamento da matriz aumentou tal propriedade para os compósitos contendo Coco Verde, PP e PVA, sendo mais evidente para a fibra de Coco Verde (aumento em torno de 16%), no entanto nos compósitos contendo Curauá, o MOE teve uma queda de aproximadamente 5%.

É interessante notar também que a EE de todos os compósitos apresentou aumento e o PP carbonatado em relação a referência aumentou, sendo o maior deles nos compósitos contendo fibras de Curauá (~50% de aumento) mas o PVA não seguiu essa tendência permanecendo estatisticamente inalterado

5.3. Adesão das fibras nos compósitos

5.3.1. Adesão das fibras vegetais em matriz cimentícia

O arrancamento das fibras vegetais em matriz cimentícia mostrou graficamente que não houve quebra de adesão química e, portanto, a tensão obtida é exclusivamente devida a fricção entre as fibras e as paredes da matriz ao puxá-la.

O arrancamento da fibra de Coco verde apresentou aumento na fricção inicial e fricção máxima após a fibra ser tratada e após a matriz ser tratada conforme a tabela 11 abaixo em relação a referência (sem tratamento). Quanto a fricção inicial, apresentou um ganho de 29% quando a fibra foi tratada e 33% de ganho quando a matriz é tratada em relação à sem tratamento. Em termos de fricção máxima, o tratamento de hornificação da fibra de Coco Verde apresentou ganho de 4,8% em relação a referência e a carbonatação acelerada na matriz obteve um aumento de 17%. O arrancamento da fibra de Curauá apresenta valores menores aos apresentados pelas fibras de Coco Verde. A fricção inicial das fibras de Curauá sendo arrancadas da matriz cimentícia demonstram que a hornificação não altera esse resultado, porém quando comparamos a referência com a carbonatação acelerada da matriz notamos um ganho de 122%. Comparando as fricções máximas, notamos que a hornificação aumentou em 25% com relação a referência e a carbonatação acelerada da matriz manteve os 122% de ganho. Esses resultados podem ser explicados pelo fato da carbonatação diminuir os poros existentes ao redor das fibras em ambos os casos, dotando de maior potencial mecânico o compósito e a hornificação diminui a água absorvida pela fibra durante o processo de hidratação do cimento, também diminuindo os poros na interface fibra matriz. (MEJIA et al., 2015)

A informação do beta (perfil de arrancamento) apresentada na Tabela 11 demonstra que o tratamento de hornificação foi benéfico para a fibra de Curauá e houve benefícios

ao se tratar a matriz cimentícia que envolvia a fibra de Coco Verde. O restante dos casos se mostra inalterado.

Apesar do ângulo de contato das fibras de Coco Verde e Curauá (tabela 8) com e sem tratamento apresentarem valores elevados, demonstrando caráter hidrofílico, tal comportamento não foi possível de ser calculado de acordo com a figura 19 abaixo por não apresentar uma região inicialmente linear, o que caracterizaria um esforço para romper a ligação química da interface fibra matriz. Esse resultado pode ser explicado pelo fato de que apesar de haver atração química entre as fibras vegetais e a água da matriz cimentícia, o ângulo de contato elevado, a região ao redor da fibra pode haver espaços vazios impedindo tal ligação, esse é um problema comum com relação a interação entre fibras vegetais e cimento pois quando a água evapora no processo de hidratação do cimento, surgem esses poros. Referencia!!!

O aumento de fricção máxima em relação a fricção inicial para arrancamento de fibras de Coco Verde sem tratamento foi de 24% e com matriz tratada (8,8%), sendo o maior ganho quando não é utilizado nenhum tratamento. Vale ressaltar que mesmo a matriz carbonatada apresenta diminuição na relação de fricção máxima e inicial, em valores a tensão necessária para se arrancar a fibra de Coco Verde da matriz cimentícia é mais elevada. A fricção máxima ser maior que a fricção inicial demonstra caráter “slip hardening” o qual é vantajoso do ponto de vista mecânico, uma vez que aumenta a tensão necessária para de fato arrancar por completo a fibra do interior da matriz.

É interessante de se notar também que em nenhum dos casos testados a fibra foi totalmente arrancada, por se tratar de 10 mm de comprimento inicial de fibra embutida na matriz cimentícia e verificar no gráfico da figura 18.

Tabela 11. Resultados de arrancamento das fibras vegetais em matriz cimentícia

Fibra	Tratamento	Interação Química (J/m ²)	Fricção inicial (MPa)	Beta Perfil de arrancamento	Fricção máxima (MPa)
Coco Verde	Sem tratamento	NA	0,51±0,27	0,02±0,01	0,63±0,22
	Matriz Carbonatada	NA	0,68±0,39	0,01±0,01	0,74±0,37
	Fibra tratada	NA	0,66±0,30	0	0,66±0,26
Curauá	Sem tratamento	NA	0,36±0,018	0	0,36±0,018
	Matriz Carbonatada	NA	0,80±0,2	0	0,80±0,1
	Fibra tratada	NA	0,35±0,04	0,01±0,01	0,45±0,26

NA=Não Apresentou

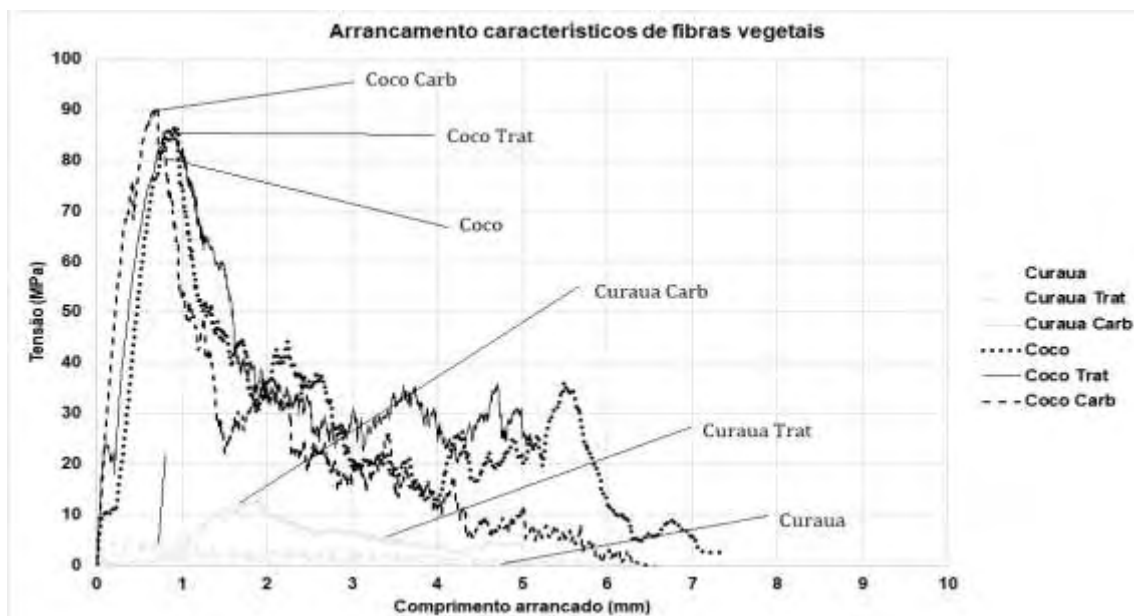


Figura 18. Arrancamento característicos de fibras vegetais em matriz cimentícia

5.3.2. Adesão das fibras poliméricas em matriz cimentícia

A fibra de PP, independente do tratamento, não apresentou adesão química graficamente observável, como encontrado em arrancamentos de fibras de PVA em matriz cimentícia, isso pode ser explicado pela natureza hidrofóbica da fibra de PP a qual

interage fracamente com a água presente na matriz cimentícia. Com relação aos ganhos mecânicos em comparação a referência (sem tratamento) as fibras tratadas apresentaram menores resultados, devido a lavagem alcalina, além disso não garantiu adesão química (as tornando mais hidrofílicas) na interface fibra matriz ainda ocasionou degradação indesejada nas fibras de PP, no entanto apresentaram aumento nos resultados mecânicos de 9,5% na fricção inicial e 33,3% na fricção máxima quando a matriz cimentícia foi carbonatada. Nota-se que houve ganho mecânico em decorrência do escorregamento interno de uma melhor ancoragem da fibra no interior da matriz conforme essa era tracionada. O perfil de escorregamento, atrelado ao parâmetro “beta” tem valor mais elevado para fibras de PP tratadas, apresentando um ganho mecânico de 62,5% de fricção máxima em relação a fricção mínima, sendo superior ao ganho observado na referência 21,7%, ambos os casos apresentam perfil “slip hardening” sendo este característico de um escorregamento interno resistivo da fibra no interior da matriz. A carbonatação da matriz não alterou o perfil do arrancamento da fibra de PP.

Com relação ao arrancamento das fibras de PVA em matriz cimentícia, na interface entre a fibra hidrofílica e a matriz cimentícia é possível verificar a quebra da adesão química, graficamente ocorre quando após ele subir linearmente, há abrupta queda, e não é possível notar um escorregamento posterior, isso se deve ao fato de que quando a adesão química se rompe a fibra em si também se rompe, perdendo toda a ancoragem. Esse fato é visto unicamente nas fibras de PVA na tabela 12 e gráfico da figura 19 abaixo. O tratamento da fibra de PVA aumentou seu ângulo de contato (tabela 8) e de acordo com a tabela 12 abaixo, também aumentou a energia (cerca de 31%) necessária para romper a ligação química (G_d) entre a fibra dentro da matriz cimentícia. Com isso podemos presumir que quanto maior for o ângulo de contato entre a fibra e água, maior será a adesão química entre a fibra e a matriz cimentícia, visto que a matriz cimentícia contém

água. Com relação ao tratamento da matriz, a adesão química sofreu queda de 28%, tal fenômeno pode ser explicado pelo consumo da água presente na interface fibra matriz no processo de carbonatação acelerada.

Não havendo escorregamento da fibra internamente de dentro da matriz, não existe fricção inicial, máxima e consequentemente não se pode calcular o comportamento característico de escorregamento (beta)

Tabela 12. Resultados de arrancamento das fibras poliméricas em matriz cimentícia

Fibra	Tratamento	Interação Química (J/m ²)	Fricção inicial (MPa)	Beta Perfil de arrancamento	Fricção máxima (MPa)
PP	Sem tratamento	NA	0,21±0,11	0	0,21±0,10
	Matriz Carbonatada	NA	0,23±0,08	0,001	0,28±0,11
	Fibra tratada	NA	0,16±0,09	0,02±0,03	0,26±0,22
PVA	Sem tratamento	57,96±29,20	NA	NA	NA
	Matriz Carbonatada	41,61±29,89	NA	NA	NA
	Fibra tratada	75,84±17,68	NA	NA	NA

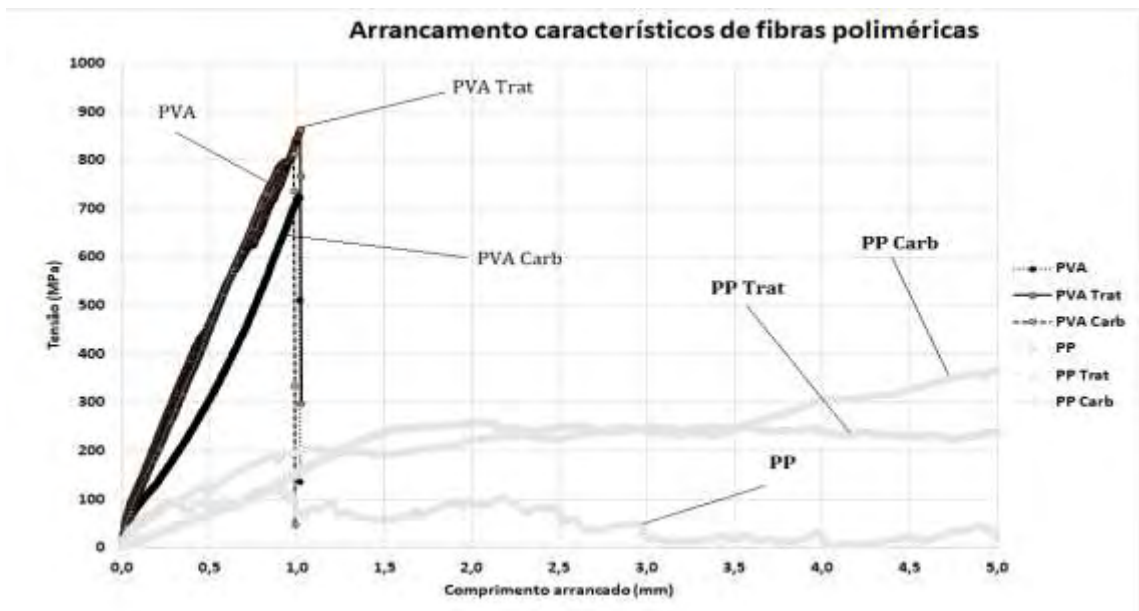


Figura 19. Arrancamento característico de fibras poliméricas em matriz cimentícia

6. CONCLUSÕES

Os resultados de adesão para as fibras sem tratamento e a matriz sem tratamento apresentaram que após iniciada a extração da fibra de Coco Verde, 24% de tensão é necessária para efetivamente retirar a fibra, não houve mudança para a fibra de Curauá e PP e inexistência de travamento mecânico para fibras de PVA embutidas em matriz cimentícia.

O tratamento de hornificação para as fibras vegetais apresentou aumento mecânico na adesão das fibras de Coco Verde 28% em matriz cimentícia e não houve alteração para as fibras de Curauá. Adesão química entre as fibras vegetais e a matriz é graficamente inexistente, talvez fosse o caso de se tentar combinações de tratamento, hornificação para melhorar o travamento mecânico (pois este diminui a formação de poros ao redor da fibra dentro da matriz) e algum outro tratamento que garanta que a água na interface da fibra matriz não evapore na fase de hidratação do cimento.

Tratamento de lavagem alcalina nas fibras poliméricas não se mostrou eficaz quanto ao aumento de travamento mecânico para ambas as fibras poliméricas, porém para a fibra de PVA, o tratamento apresentou aumento no Ângulo de contato entre a fibra de PVA e água e conseqüentemente aumento da adesão química da fibra dentro da matriz, aumentando (31%) a energia necessária para se arrancar a fibra, no entanto, como a fibra de PVA não foi totalmente arrancada, visto que foi embutido 5mm e não deslocamento desse comprimento, conclui-se que a fibra rompeu dentro da matriz, o que poderia ser evitado com um comprimento de fibra embutida menor ou diminuir a interação química entre a fibra de PVA e a matriz cimentícia através para torna-la mais hidrofóbica.

O tratamento da matriz cimentícia através da carbonatação acelerada aumentou o módulo de resistência e módulo de elasticidade dos compósitos em todas as variações de

fibras, através da densificação da matriz e diminuição de poros. Com relação a adesão mecânica houve aumento de travamento mecânico de 33% para fibras de Coco Verde, 122% para fibras de Curauá e 9,5% para fibras de PP, porém em relação a fibras de PVA não houve mudanças no travamento mecânico, visto que sua elevada interação química com a matriz cimentícia torna insignificante o travamento mecânico. A carbonatação acelerada diminuiu em 28% a interação química entre a fibra de PVA e a matriz cimentícia por retirar água do sistema, diminuindo a principal ligação entre a fibra de PVA e o cimento, a ligação de hidrogênio.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKERS, S. A. S.; STUDINKA, J. B. Ageing behaviour of cellulose fibre cement composites in natural weathering and accelerated tests. **International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete**, v. 11, n. 2, p. 93–97, 1989.

ALMEIDA, A. E. F. D. S. et al. Carbonatação acelerada efetuada nas primeiras idades em compósitos cimentícios reforçados com polpas celulósicas. **Ambiente Construído (Online)**, v. 10, n. 4, p. 233–246, 2010.

ALMEIDA, A. E. F. S. et al. Improved durability of vegetable fiber reinforced cement composite subject to accelerated carbonation at early age. **Cement and Concrete Composites**, v. 42, p. 49–58, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.05.001>>.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTINT AND MATERIALS. **ASTM C948-81**: test

method for dry and wet bulk density, water absorption, and apparante porosity of thin sections of glass-fiber reinfordec concrete. West Conshohocken, PA, USA, 1981

BARRA, B. N. **Funcionalização de fibras vegetais com plasma frio de metano para desenvolvimento de novos produtos em fibrocimento**. 2014. Tese (Doutorado) – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga 2014.

BENTUR, ARNON; MINDESS, S. Fibre Reinforced Cementitious Composites. **Civil Engineering**, p. 625, 2007.

BERGSTRÖM, S. G.; GRAM, H. E. Durability of alkali-sensitive fibres in concrete. **International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete**, v. 6, n. 2, p. 75–80, 1984.

BETTERMAN, L. R.; OUYANG, C.; SHAH, S. P. Fiber-matrix interaction in microfiber-reinforced mortar. **Advanced Cement Based Materials**, v. 2, n. 2, p. 53–61, 1995.

CLARAMUNT, J.; ARDANUY, M.; GARCÍA-HORTAL, J. A. Effect of drying and rewetting cycles on the structure and physicochemical characteristics of softwood fibres for reinforcement of cementitious composites. **Carbohydrate Polymers**, v. 79, n. 1, p. 200–205, 2010.

COSTA, E. C. **Análise De Parâmetros Influentes Na Aderência De Matrizes Cimentícias**. 2013. 135f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013

COSTA, E. C. C.; JOHN, V. M. State of the art of substrate-cementitious matrix adhesion. **IX Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas**, n. 1, 2011.

COUTTS, R. S. P. A review of Australian research into natural fibre cement composites.

In: Cement and Concrete Composites, **Anais...**2005.

DIAS, C. M. R.; SAVASTANO, H.; JOHN, V. M. Exploring the potential of functionally graded materials concept for the development of fiber cement. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 2, p. 140–146, 2010.

FERREIRA, S. R. et al. Effect of Natural Fiber Hornification on the Fiber Matrix Interface in Cement Based Composite Systems. **Key Engineering Materials**, v. 668, p. 118–125, 2015. Disponível em: <<http://www.scientific.net/KEM.668.118>>.

FERREIRA, S. R. et al. Effect of hornification on the structure, tensile behavior and fiber matrix bond of sisal, jute and curau?? fiber cement based composite systems. **Construction and Building Materials**, v. 139, p. 551–561, 2017.

IKAI, S. et al. Asbestos-free technology with new high toughness polypropylene (PP) fibers in air-cured Hatschek process. **Construction and Building Materials**, 2010a.

LAMEIRAS, M. R. **Contribuição ao estudo das propriedades dos materiais cimentícios reforçados com fibras de vidro (glass fibre reinforced cement – grc)**. 2007. 175 f. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007

LIMA, P. R. L.; FERREIRA, S. R.; FILHO, T. Effect of sisal fiber hornification on the adhesion with portland cement matrices. **Revista Matéria**, v. 17, n. 2, p. 1024–1034, 2012.

MARTINS, C. R.; JESUS JUNIOR, L. A. De. Evolução da produção de coco no Brasil e o comércio internacional: panorama 2010. **Documentos Embrapa**, v. 164, p. 32, 2011. Disponível em: <http://www.cpatc.embrapa.br/publicacoes_2011/doc_164.pdf>.

E. MEJIA B, JULIAN ; Fiorelli, Juliano ; SAVASTANO JR, HOLMER ; VIDIL, LISA . Evaluation of the Effect of Drying and Rewetting Cycles in Eucalyptus Pulps.

International Journal of Engineering and Technology (IJET), v. 7, p. 397-400, 2015.

MOTTA, A.; AGOPYAN, V. Caracterização de Fibras Curtas Empregadas na Construção Civil Leila Aparecida de Castro Motta. **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP Departamento**, p. 23, 2007.

PIETROBON, V. C. Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “ Luiz de Queiroz ” Hidrólise do bagaço de cana-de-açúcar pré-tratado com ácido e álcali utilizando enzimas microbianas comerciais Piracicaba 2008. 2008.

PIZZOL, V. D. et al. Mineralogical and microstructural changes promoted by accelerated carbonation and ageing cycles of hybrid fiber-cement composites. **Construction and Building Materials**, v. 68, p. 750–756, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.055>>.

RAMAKRISHNA, G.; SUNDARARAJAN, T. Studies on the durability of natural fibres and the effect of corroded fibres on the strength of mortar. In: Cement and Concrete Composites, 5, **Anais...**2005.

RECUM, A. F. Von et al. Surface Roughness, Porosity, and Texture as Modifiers of Cellular Adhesion. **Tissue Engineering**, v. 2, n. 4, p. 241–253, 1996. Disponível em: <<http://www.liebertonline.com/doi/abs/10.1089/ten.1996.2.241>>.

REDON, C. et al. Measuring and Modifying Interface Properties of PVA Fibers in ECC Matrix. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 13, n. December, p. 399–406, 2001.

RODRIGUES, P. P. F.; MONTARDO, J. P. A Influência da Adição de Fibras de Polipropileno nas Propriedades dos Concretos para Pisos e Pavimentos. **Instituto Brasileiro de Concreto**, n. 1, p. 16, 2002.

ROSA, M. F. et al. Cellulose nanowhiskers from coconut husk fibers: Effect of

preparation conditions on their thermal and morphological behavior. **Carbohydrate Polymers**, v. 81, n. 1, p. 83–92, 2010.

SANTOS, PAULO A.; SPINACÉ, MÁRCIA A. S.; PAOLI, M. A. De. Efeito da Forma de Processamento e do Tratamento da Fibra de Curauá nas Propriedades de Compósitos com Poliamida-6. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 19, n. 1, p. 31–39, 2009.

SATYANARAYANA, T.; RAGHUKUMAR, C.; SHIVAJI, S. . Extremophilic microbes: Diversity and perspectives (2005), 2005 [Satyanarayana, T., Raghukumar, C., Shivaji, S.]. **Special Section: Microbial Diversity**, v. 89, n. 1, p. 78–90, 2005. Disponível em: <<http://en.scientificcommons.org/17677401>>.

SAVASTANO, H.; AGOPYAN, V. Transition zone studies of vegetable fibre-cement paste composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 21, n. 1, p. 49–57, 1999.

SAVASTANO JÚNIOR, H. Materiais à base de cimento reforçados com fibra vegetal - reciclagem de resíduos para a construção de baixo custo. v. 0, p. 144, 2000.

SILVA, F. de A.; MOBASHER, B.; FILHO, R. D. T. Cracking mechanisms in durable sisal fiber reinforced cement composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 31, n. 10, p. 721–730, 2009.

SPINACÉ, M. A. S. et al. Characterization of lignocellulosic curaua fibres. **Carbohydrate Polymers**, v. 77, n. 1, p. 47–53, 2009.

THOMAS, S. et al. Natural Fibres: Structure, Properties and Applications. In: **Cellulose Fibers: Bio- and Nano-Polymer Composites**. 2011

TOLÊDO FILHO, R. D. et al. Durability of alkali-sensitive sisal and coconut fibres in cement mortar composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 22, n. 2, p. 127–143, 2000.

TONOLI, G. H. D. et al. Effect of accelerated carbonation on cementitious roofing tiles reinforced with lignocellulosic fibre. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 2, p. 193–201, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.11.018>>.

TONOLI, H. G. D. et al. Thermal performance of sisal fiber-cement roofing tiles for rural constructions. v. 68, p. 1-7, 2011.

TRAN, L. Q. N. et al. Wetting analysis and surface characterisation of coir fibres used as reinforcement for composites. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 377, n. 1–3, p. 251–260, 2011.

XU, G.; MAGNANI, S.; HANNANT, D. J. Durability of hybrid polypropylene-glass fibre cement corrugated sheets. **Cement and Concrete Composites**, v. 20, n. 1, p. 79–84, 1998.

YUAN, Y.; LEE, T. R. Contact Angle and Wetting Properties BT - Surface Science Techniques. In: **Surface Science Techniques**. [s.l: s.n.]51p. 3–34.