

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS FLORESTAIS E DA MADEIRA

**FLÁVIO RODRIGUES LIMA**

**INFLUÊNCIA DO DIAMETRO DOS FIOS DE MICROFIBRILAS DE  
CELULOSE COM ALGINATO EM SUAS PROPIEDADES**

JERÔNIMO MONTEIRO  
ESPÍRITO SANTO

2023

**FLÁVIO RODRIGUES LIMA**

**INFLUÊNCIA DO DIAMETRO DOS FIOS DE MICROFIBRILAS DE  
CELULOSE COM ALGINATO EM SUAS PROPIEDADES**

“Monografia apresentada ao  
Departamento de Ciências Florestais e da  
Madeira da Universidade Federal do  
Espírito Santo como requisito parcial para  
obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Florestal”

**JERÔNIMO MONTEIRO  
ESPÍRITO SANTO  
2023**

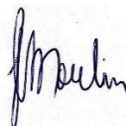
FLÁVIO RODRIGUES LIMA

INFLUÊNCIA DO DIAMETRO DOS FIOS DE MICROFIBRILAS DE  
CELULOSE COM ALGINATO EM SUAS PROPIEDADES

Monografia apresentada ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira da  
Universidade Federal do Espírito Santo como requisito parcial para obtenção do título  
de Bacharel em Engenharia Florestal.

Aprovada em 17 de julho de 2023.

COMISSÃO ORGANIZADORA



---

Dr. Jordão Cabral Moulin Orientador



---

Dr. Michel Picanço de Oliveira

Examinador



Documento assinado digitalmente  
DANILLO WISKY SILVA  
Data: 19/07/2023 13:51:28-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Dr. Danillo Wisky Silva Examinador

## AGRADECIMENTOS

Inicialmente, expresso minha profunda gratidão a Deus pelo presente da vida. Em seguida, gostaria de estender meus agradecimentos à minha mãe, pai e irmão, que fizeram tudo que estava ao alcance para a concretização desse sonho. Sua dedicação, amor, paciência e confiança foram fundamentais nessa jornada. Além disso, estendo meus agradecimentos a todos os membros da minha família que, de alguma maneira, contribuíram.

Gostaria também de expressar minha sincera gratidão a todos os colegas que conheci ao longo dessa jornada universitária. Sua presença e apoio foram de extrema importância para tornar esse sonho realidade. Seus auxílios durante as aulas, trabalhos e provas foram inestimáveis. Aos meus amigos mais próximos, que compartilharam casas e apartamentos comigo, gostaria de agradecer por tornarem essa caminhada mais leve e agradável. Seus conselhos, carinho e atenção quando necessário foram muito apreciados. Agradeço também às repúblicas Flanders, Salve Jorge, Os Ratos e 073, e agregados das republicas que sempre me receberam de braços abertos e contribuíram de diversas maneiras.

Ao professor Jordão Cabral, expresso minha gratidão pela paciência, confiança e por ter mostrado a importância da pesquisa no ambiente acadêmico. Seu apoio foi fundamental para o meu crescimento e aprendizado. Gostaria também de estender meus agradecimentos aos examinadores da banca, Michel e Danillo, pela confiança depositada em mim.

Com profunda gratidão, encerro esse ciclo e olho para o futuro com esperança e otimismo, na expectativa de que ele seja promissor.

## RESUMO

A utilização de materiais orgânicos na produção de fios é interessante do ponto de vista econômico e ambiental, mas é importante garantir que essas fibras atendam às mesmas especificações em termos de propriedades mecânicas que as fibras minerais ou sintéticas. Esse estudo tem como propósito analisar a influência de diferentes diâmetros da agulha na produção dos fios à base de microfibrilas de celulose com alginato de sódio. Os filamentos foram produzidos pelo método de fiação úmida e o solvente para coagulação foi o cloreto de cálcio. Foram utilizadas as agulhas com diâmetros médios de 1.636 mm, 1.350 mm, 1.046 mm, 0.806 mm e 0.648 mm com os respectivos códigos 14G, 16G, 18G, 20G e 22G, os fios foram analisados por meio das suas propriedades mecânicas, dimensões, fator de forma, densidade real, absorção de água, tensão, módulo de elasticidade, deformação e tenacidade. Os fios apresentaram seção circular em todas as dimensões, o maior resultado de resistência mecânica foi no fio de maior diâmetro (14G), sendo a tensão de 98,45 MPa, módulo de elasticidade de 258,785 MPa, tenacidade de 100,18 MJ/m<sup>3</sup> e deformação de 47,18 mm, uma maior densidade real nos fios de 18G (1,961 g/cm<sup>3</sup>), e uma maior absorção de água nos de 16G (3,422 g/g). Conclui-se que as características dos fios são variáveis conforme o seu diâmetro.

**Palavras-chave:** Celulose. Filamento. Nanocelulose.

## ABSTRACT

The use of organic materials in yarn production is interesting from an economic and environmental point of view, but it is important to ensure that these fibers meet the same specifications in mechanical properties as mineral or synthetic fibers. This study aims to analyze the influence of different needle diameters on the production of threads based on cellulose microfibrils with sodium alginate. The filaments were produced by the wet spinning method and the solvent for coagulation was calcium chloride. Needles with average diameters of 1,636 mm, 1,350 mm, 1,046 mm, 0,806 mm and 0,648 mm were used with the respective codes 14G, 16G, 18G, 20G and 22G, the threads were analyzed by their mechanical properties, dimensions, factor shape, actual density, water absorption, stress, modulus of elasticity, strain and toughness. The wires had a circular section in all dimensions, the highest result of mechanical resistance was in the wire with the largest diameter (14G), with a tension of 98.45 MPa, modulus of elasticity of 258.785 MPa, tenacity of 100.18 MJ/m<sup>3</sup> and deformation of 47.18 mm, greater real density in the 18G yarns (1.961 g/cm<sup>3</sup>), and greater water absorption in the 16G yarns (3.422 g/g). It is concluded that the characteristics of the wires are variable according to their diameter.

**Keywords:** Cellulose. Filament. Nanocellulose.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE TABELAS.....	ix
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	2
2.1 Objetivo geral.....	2
2.2 Objetivos específicos.....	2
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	2
3.1 Celulose.....	3
3.2 Microfibrila de celulose (MFC) .....	4
3.3 Filamentos de MFC .....	4
3.4 Alginato.....	5
4. METODOLOGIA.....	7
4.1 Material .....	7
4.2 Composição dos fios de MFC com alginato de sódio .....	7
4.3 Produção dos fios.....	7
4.4 Agulhas para a produção dos fios.....	8
4.5 Largura dos filamentos .....	9
4.6 Densidade real .....	9
4.7 Ensaio mecânico.....	10
4.8 Absorção de água .....	10
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	11

5.1 Propriedades dos filamentos .....	11
5.2 Propriedades mecânicas dos fios .....	13
6. CONCLUSÃO .....	14
7. REFERÊNCIAS .....	15



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Estrutura molecular do Alginato com cadeias lineares. ....	6
<b>Figura 2:</b> Equipamento utilizado para produção dos fios de MFC com alginato. ....	8
<b>Figura 3:</b> Relatório fotográfico dos filamentos nas 5 dimensões. ....	11
<b>Figura 4:</b> Gráficos dos resultados das propriedades mecânicas dos filamentos. ...	13

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Medidas de área da agulha e velocidade de injeção dos filamentos nas 5 dimensões. ....	9
<b>Tabela 2:</b> Resultados das propriedades dos filamentos nas 5 dimensões. ....	11

## 1. INTRODUÇÃO

O estudo da cadeia produtiva florestal é fundamental para o desenvolvimento sustentável da sociedade. A utilização de produtos florestais de forma consciente e responsável contribui para a preservação do meio ambiente, geração de empregos e renda, além de ser uma fonte renovável de recursos (JUVENAL e MATTOS, 2002).

Com o avanço da tecnologia, houve um grande aumento na demanda por recursos não renováveis, o que tem trazido efeitos problemáticos para o planeta, assuntos como poluição ambiental, uso excessivo de recursos e alterações climáticas (MARINELLI et al., 2008). Visto isso, é vantajoso o investimento em tecnologias com o intuito de minimizar impactos ambientais visando a sustentabilidade. De acordo com Toyoshima (1993) a celulose é o biopolímero mais abundante do planeta e pode ser encontrada, com variações na sua concentração, em fontes animais e vegetais (MARCHESSAULT e SUNDARARAJAN, 1983).

As principais fontes de celulose, que é um componente essencial para a produção de papel e diversos produtos derivados, são provenientes de florestas plantadas, como por exemplo, árvores de Pinus e Eucalipto, além de plantações de algodão, no entanto é possível encontrá-la em diversos modelos, bem como: biomassa lignocelulósica (cana-de açúcar, milho, soja, etc), nos exoesqueletos de alguns insetos, e também algumas bactérias, fungos e protozoários, os quais conseguem sintetizar a celulose (RODRIGUES, 2014). A celulose é um polissacarídeo composto por longas cadeias de glicose, essas cadeias são organizadas em microfibrilas de celulose (MFC), as fibras da polpa de celulose tornaram-se uma área muito importante de pesquisa pelo potencial de gerar outros nanomateriais. A MFC é um material de estrutura semi-cristalina com aparência e características semelhantes às de um gel e possui grande área superficial (YANO et al., 2007). Esse polímero pode ser transformado em inúmeros produtos industrializados, uma vez que seus derivados podem ser usados em uma ampla aplicação comercial, como reforço em compósitos biodegradáveis para incrementar as propriedades mecânicas dos materiais (NISHIYAMA, 2009).

O produto a ser confeccionado com as MFC que vem sendo estudados é o fio ou filamento, que para a sua formação tem-se usado um segundo componente químico para atuar como agente coagulante no processo de fiação úmida. Conforme

Wang (2017), o alginato de sódio teve suas características melhoradas depois de ser incorporado com a celulose. Além desse polímero possuir uma função de fixar a estrutura por meio da modificação química que visa unir suas cadeias poliméricas, gerando redes poliméricas híbridas (MAIELANO, 2018). É retratado como um pó, que consiste principalmente do sal sódico do ácido algínico, ou seja, uma mistura de ácidos poliurônicos composto de resíduos de ácido D-manurônico e ácido L-gulurônico (ROWE et al., 2009). Esse polímero natural se encontra em grande abundância nos organismos naturais, e possui um ótimo potencial de biocompatibilidade e biodegradabilidade (HUA et al. 2010).

Alguns produtos à base de celulose com alginato estão sendo desenvolvidos nos setores alimentícios, como embalagens para cobertura de alimentos (MEDEIROS, 2021), na área da saúde com fabricação de curativos cirúrgicos e bandagens (ALAMGIR, 2017), e na elaboração de hidrogéis (SULAEVA et al. 2020). Em função disso, existe o interesse de evoluir nessa área da pesquisa na produção de fios baseado na junção desses biopolímeros. Podendo se tornar viável a produção de fios de MFC com alginato em escala industrial para suprir uma demanda de produtos, levando em consideração a quantidade disponível e impactos ambientais (PETERSEN e GATENHOLM 2011; LIECHTY et al, 2010).

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Analisar a influência dos diâmetros dos fios à base de MFC provenientes de polpa branqueada de fibra curta com alginato de sódio nas propriedades dos fios.

### **2.2 Objetivos específicos**

Produção de fios com diferentes diâmetros, compreender e comparar a influência de cinco diâmetros de fios e estudo das suas propriedades físicas e mecânicas específicas.

## **3. REVISÃO DE LITERATURA**

### 3.1 Celulose

A celulose é um dos biopolímeros mais abundantes do mundo e pode ser produzida por diversas fontes, como plantas, fibras de sementes (algodão e fibras de coco), animais marinhos (tunicado), linho, cânhamo, gramíneas, algas, fungos e fontes bacterianas (BLANCO et al., 2018). É encontrada na estrutura básica das células das plantas, principalmente na parede celular secundária de fibras, compreendendo aproximadamente entre 40% e 45% de massa seca em várias espécies de madeira (SJÖSTRÖM e ALÉN, 1998; GULLICHSEN e PAULAPURO, 2000; BURNES, 2000). A fórmula química desse polímero é  $(C_6H_{10}O_5)_n$ , onde “n” representa o grau de polimerização, que pode variar entre os tipos de celulose de acordo com a origem (AGNETA, 1993).

A celulose é um polissacarídeo linear, fibroso e resistente, formado por unidades  $\beta$ -D-anidroglicopiranosose que se ligam entre si através dos carbonos 1- 4, que tendem a formar ligações de hidrogênio intra e intermolecular entre as moléculas de glucose (SJÖSTRÖM, 2013).

Devido a tendência de formar ligações de hidrogênio, as moléculas de celulose se associam formando fibrilas de celulose, com regiões amorfas e com sistema ordenado formando cristais (GULLICHSEN e PAULAPURO, 2000; FREIRE et al., 2003). As regiões cristalinas tornam a penetração de solventes por hidrólise mais difícil quando comparadas às regiões amorfas, sua porcentagem pode ser encontrada pelo método de difração de raio-x, o grau de cristalinidade da celulose de madeira pode variar entre 60 e 70% (FENGEL e WEGENER, 1989). O grau de polimerização (DP) da celulose (massa molecular =  $162 \text{ g.mol}^{-1}$ ) é definido pelo número de unidades de glucopiranosose ligadas entre si por ligações glicosídicas, possuindo um DP de aproximadamente entre 5.000 e 10.000 (SJÖSTRÖM, 2013).

As MFCs são localizadas em várias distribuições nas paredes e camadas da parede celular das fibras, associadas aos principais componentes macromoleculares hemiceluloses e lignina que estão presentes em todas as madeiras (POTULSKI, 2012). Quanto a organização das MFCs na parede celular, pode ser dividida em 2 grupos. Na parede primária, onde as fibrilas estão arranjadas de forma desorganizadas e na parede secundária, onde se encontra 3 camadas distintas em relação a organização das fibrilas: S1, S2 e S3, sendo a camada S2 a mais espessa

e com a maior quantidade e menor ângulo da microfibrila quando comparada com as outras (MARSON e EL SEOUD, 1999).

Devido a sustentabilidade, biocompatibilidade, biossegurança e alto grau de polimerização (JORFI e FOSTER, 2015), a celulose fornece aos engenheiros uma oportunidade sempre inovadora em diversas áreas, uma vez que novos produtos surgem e substituem os materiais de fonte não renovável (KAMEL et al., 2008).

### **3.2 Microfibrila de celulose (MFC)**

A MFC é um material com estruturas de cadeias semi-cristalinas, com um diâmetro variando entre 10 e 300 nm, comprimento entre 0,5 e 10  $\mu\text{m}$ . Com dimensões que podem variar de acordo com a fonte vegetal (SIRÓ e PLACKETT, 2010). Esse material pode ser extraído por meio de tratamentos químicos, enzimáticos e mecânicos, ou alguma combinação entre eles, o mais utilizado é o mecânico, no qual a várias ferramentas como homogeneizadores de alta pressão ou microfluidificadores, refinadores comuns, moinho de bolas, explosão a vapor, ultrassonificação, misturadores de alta velocidade pode ser utilizado (KLEMM et al., 2018). Sua utilização é vantajosa, por possuir elevado módulo de elasticidade, baixa densidade, reciclabilidade, renovabilidade, sustentabilidade e biodegradabilidade (BUGGY, 2006).

O uso da MFC na produção de compósitos poliméricos apresenta diversas vantagens, uma vez que é derivada da celulose, que é encontrada em abundância na natureza. Além disso, sua produção geralmente envolve processos menos tóxicos e menos energia do que outros materiais sintéticos. Isso torna a MFC uma alternativa promissora aos materiais convencionais, onde que combinando as propriedades físicas e mecânicas com sua baixa densidade tornam a MFC um material com grande potencial industrial, podendo ser transformado em filamentos contínuos e utilizado em diversos processos (GHASEMI et al., 2018; LINDSTRÖM, 2017).

### **3.3 Filamentos de MFC**

A introdução das microfibrilas de celulose na produção de filamentos é de grande interesse nos setores industriais, além de estar junto com os interesses ambientais, em razão de ser sustentável, reciclável, e por uma possibilidade de

redução dos custos de materiais mais acessíveis (PATTINSON e HART, 2017). Esse material é bem versátil, podendo ser usado em diversos setores, as aplicações de uso dos filamentos podem citar as indústrias têxteis, embalagens (RASAL; JANORKAR; HIRT, 2010), produção de filmes não tecidos (DE MEDEIROS, 2021), e uma ampla aplicação no setor biomédico, podendo ser empregados em curativos, vestuário hospitalar, órgãos artificiais, *stent*, telas, membranas, *scaffolds*, sutura, entre outros (YAMAGUCHI et al., 2013).

Esse material possui características interessantes, pela possibilidade de produção em diferentes dimensões e escalas, alta resistência específica, rigidez e módulo de elasticidade, são seguras do ponto de vista toxicológico e podem ser quimicamente modificadas para melhorar sua compatibilidade, entre outras. (KARIMAH et al., 2021; KURANCHIE; YAYA; BENSAH, 2021). É um material com propriedades exclusivas em termos de boa transparência óptica, alta resistência mecânica, baixo peso molecular, boa estabilidade térmica e ser renovável (KIM et al., 2019; LAVOINE et al., 2012). Além de poder ser usados como matérias-primas para a preparação de vários compósitos poliméricos, por serem materiais incineráveis, não tóxicos e não corrosivos (LIU et al., 2021). Contudo, devido às vantagens que a MFC apresenta, o avanço no desenvolvimento de filamentos renováveis tem sido ampliado com intuito de possibilitar substituição de materiais não renováveis.

A produção de filamentos sustentáveis e duráveis que têm a celulose como base para sua formação estão se tornando cada vez mais significativos. Apesar do grande potencial, a maioria dos estudos desse ramo se encontram em níveis laboratoriais (LUNDAHL et al., 2016). Podendo destacar pesquisadores como Hua et al. (2020), que desenvolveram um método para produzir nanofilamentos de celulose de alta razão de aspecto; Jackson (2021), desenvolveu e estudou filamentos de celulose microfibrilar; Shen et al. (2022), criaram um processo para produzir filamento de nanofibra de alta resistência à tração por extrusão úmida em uma superfície escorregadia e Kafy et al. (2017), desenvolveram fibras longas de celulose por meio de fiação de suspensão de nanofibras de celulose (NFC).

### 3.4 Alginato

O alginato é um polissacarídeo de ocorrência natural proveniente de algas marrons (*Phaeophyceae*), esse polímero possui características em termos de biodegradabilidade, biocompatibilidade, não toxicidade, não imunogenicidade e elevada disponibilidade (JAIN e BAR-SHALOM, 2014). Possui uma vasta aplicação nos setores biomédicos, biomaterial, ferramentas odontológicas, engenharia de cartilagens, e como células (sistema) de entrega para reparação e regeneração de tecidos (SUN e TAN, 2013; TERZOPOULOU, et al. 2015; MARRELLA, et al. 2017; MA, et al. 2017).

Esse material é extraído com o auxílio de solução alcalina diluída que solubiliza o ácido algínico, onde posteriormente é alterado na forma de um sal, no que é comercializado atualmente (TØNNESEN e KARLSEN, 2002). Sua fórmula consiste em cadeias lineares de monômeros de ácido e  $\beta$ -D-manuronato (M) e de ácido  $\alpha$ -L-gulurônico (G), unidos por ligações glicosídicas (1 $\rightarrow$ 4) aleatoriamente e em várias proporções em blocos M, blocos G e blocos MG. A gelificação do alginato de sódio ocorre na presença de íons metálicos multivalentes ( $\text{Ca}_2^+$ ), resultante no complexo segmento G com  $\text{Ca}_2^+$  (SUN e TAN, 2013; MARRELLA, et al. 2017; MA, et al. 2017;).

Devido ao seu alto caráter hidrofílico, baixas propriedades mecânicas e baixa estabilidade térmica, o alginato de sódio puro possui desvantagens, o que resulta na redução de aplicações do seu uso (SUN e TON, 2013; VENKATESAN, et al. 2015; KUMAR, et al. 2017), devido a isso, várias pesquisas vem sendo desenvolvidas no reforço da matriz do polímero com a adição da celulose para melhorar sua resistência mecânica (WANG, et al. 2017; GHOSH, et al. 2014; KUMAR, et al. 2017; MA, et al. 2017).

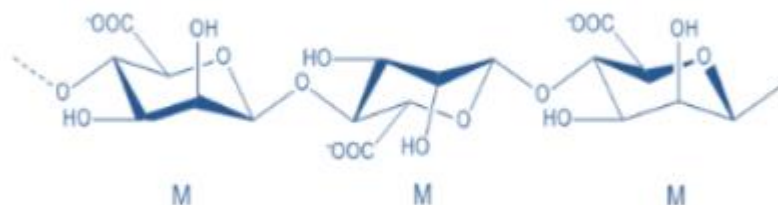




Figura 1 - Estrutura molecular do alginato com cadeias lineares de monômeros de ácido  $\beta$ -D manurônico (blocos homopoliméricos MM), unidos por ligações glicosídicas 1 $\rightarrow$ 4.

Fonte: Adaptado por ISLAM e KARIM 2010.

## **4. METODOLOGIA**

### **4.1 Material**

No processo foi utilizado microfibrilas de celulose (MFC) provenientes de polpa branqueada de fibras curtas e produzidas por processamento mecânico, doadas por uma empresa de celulose e papel. Também foram usados alginato de sódio da marca êxodo científica 250G e cloreto de cálcio (100%) da marca neon.

### **4.2 Composição dos fios de MFC com alginato de sódio**

A concentração de 4% (m/m) de alginato de sódio foi utilizada para a produção dos fios com MFC na concentração de 4,5% (m/m), o material foi misturado com o auxílio de um agitador mecânico pelo período de 30 minutos com uma velocidade de 2000 rpm até consistência homogênea.

### **4.3 Produção dos fios**

Para a realização do processo de fiação, foi utilizado um equipamento, que consiste em um tubo de 3 metros de comprimento para deposição dos filamentos em meio ao cloreto de cálcio, uma bomba periférica ¼ CV para auxiliar o fluxo, uma torneira e um registro para resgate e interrupção do fluxo, respectivamente. A injeção do filamento foi feita por meio de um motor ½ CV acionado por um inversor de frequência com controle de velocidade e sentido de rotação. A fiação foi realizada com injeção de alginato e MFC em corrente contínua no tanque com velocidade de 0,54 m/s para todos os códigos, permitindo a formação do filamento. Após a injeção os filamentos ficaram submersos no cloreto de cálcio para coagulação e em seguida foram retirados e conduzidos para secagem em estufa a 60°C durante um período de 4 horas. A Figura 2 mostra o sistema de produção dos fios.

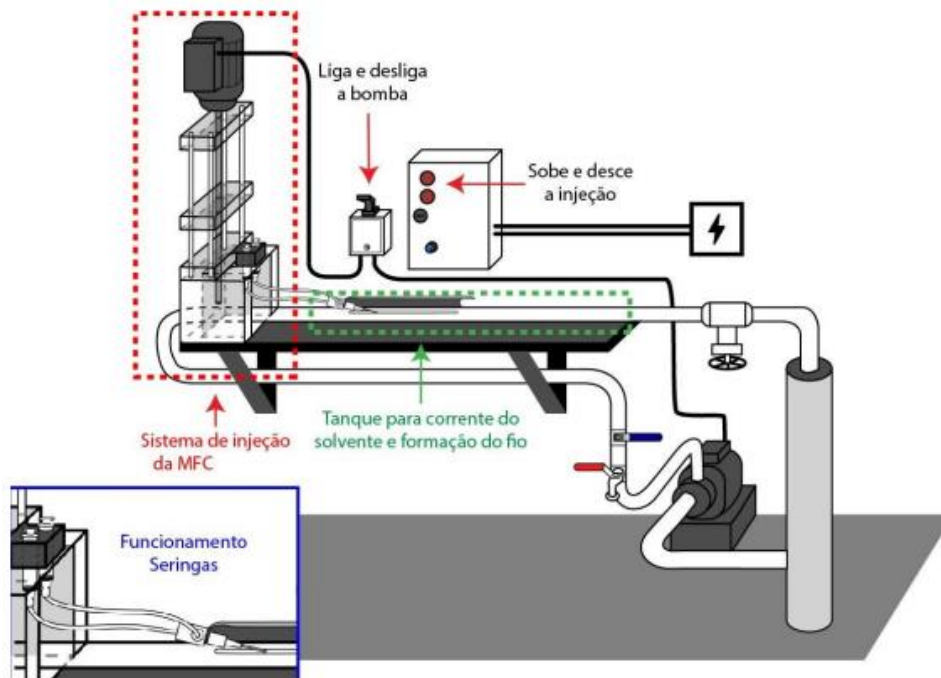


Figura 2 – Equipamento utilizado para a produção de fios de MFC e alginato.  
 Fonte: MENINI, 2022

#### 4.4 Agulhas para a produção dos fios

Para este trabalho foram utilizadas cinco agulhas com diâmetros diferentes e o comprimento foi padronizado para 2,5 cm. Como as áreas a serem preenchidas pelos materiais para a formação dos fios são distintas, foi necessário utilizar diferentes velocidades de injeção para conseguir a formação do fio. Na Tabela 1 é possível visualizar o diâmetro a área da seção transversal da agulha, velocidade de injeção e os respectivos códigos dos fios.

Tabela 1 - Medidas de área da agulha e velocidade de injeção dos filamentos.

<b>Código</b>	<b>Diâmetro da agulha (mm)</b>	<b>Área da agulha (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Tempo e velocidade da injeção(ml/s)</b>
14G	1,636	2,10	0,50
16G	1,350	1,43	0,68
18G	1,046	0,86	1,30
20G	0,806	0,51	2,14
22G	0,648	0,33	2,44

Fonte: Elaboração própria

#### **4.5 Largura dos filamentos**

As larguras dos filamentos foram medidas utilizando microscópio óptico com aproximação de 50x. Foram analisadas a medida do centro e das duas extremidades do fio com comprimento de 30 cm, sendo obtidos valores referentes a espessura e largura do fio. Com as duas dimensões foi calculado o fator de forma, sendo razão da medida da espessura com a medida da largura do filamento. Foram medidos 10 filamentos para cada configuração.

#### **4.6 Densidade real**

Para o cálculo a densidade real dos fios foi utilizada a metodologia com picnômetros (KHALDOUNE et al., 2022), com essa finalidade, os fios foram cortados para atingir comprimentos menores de 1 cm e posteriormente encaminhado para secagem em estufa a 60 °C durante o período de 24 horas, com os picnômetros colocados na mesma estufa 2 horas antes da realização dos ensaios. Também foram utilizados etanol com 99,7% de concentração (v/v) e densidade de 0,790 g/cm<sup>3</sup> e uma balança com precisão de 0,0001 g. Para esse processo foram realizadas 5 repetições com 0,2 gramas de fio seco para cada configuração. Por meio da Equação 1, foi calculada a densidade real do material.

$$\rho_r = \frac{m_f}{(m_{pe} + m_{pef}) - (2m_p + m_f)}$$

Onde que -  $\rho_r$ : densidade real do fio;  $m_f$ : massa seca do fio;  $m_p$ : massa do picnômetro;  $m_{pe}$ : massa do picnômetro cheio de etanol;  $m_{pef}$ : massa do picnômetro com fios cheios de etanol.

#### 4.7 Ensaio mecânico

As propriedades mecânicas dos filamentos foram caracterizadas conforme a norma Standard Test Method (ASTM) D 2256 – 02 (2015), por meio do testador de tração aplicando uma célula de carga de 5 N na taxa de 0,3 N/min. O comprimento dos filamentos utilizados foi de 30 cm e utilizou-se 10 filamentos de cada diâmetro de agulha, a seção tracionada foi de 30 mm.

#### 4.8 Absorção de água

A análise de foi realizada conforme o método descrito por Liu et al. (2022), chamado de *tea-bag* (sache de chá). Os fios foram cortados em tamanhos menores de 1 cm de comprimento, os sachês de chá vazios foram submersos em água destilada pelo período de 1 hora, ao final desse tempo ficaram suspensos por 10 minutos para a retirada do excesso de água e em seguida pesados com o auxílio de uma balança de precisão de 0,0001 g. Posteriormente, 0,2g dos fios secos foram pesados e depositados nos sachês de chá úmido para a submersão em água destilada pelo período de 1 hora e ao final suspensos por 10 minutos para a retirada do excesso de água, e por fim foram pesados novamente. A absorção de água foi calculada de acordo com a Equação 2. Utilizou-se 5 repetições para cada material.

$$Ab_{H_2O} = \frac{m_{tbf} - (m_{tb} + m_f)}{m_f}$$

Em que -  $Ab_{H_2O}$ : absorção de água;  $m_{tbf}$ : massa do sachê de chá úmido com fios;  $m_{tb}$ : massa do sachê de chá úmido;  $m_f$ : massa seca do fio.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Propriedades dos filamentos

As medidas de largura e espessura dos fios, o fator de forma, densidade e absorção de água são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados das propriedades dos filamentos nas 5 dimensões.

<b>Código</b>	<b>Largura (mm)</b>	<b>Espessura (mm)</b>	<b>Fator de forma</b>	<b>Densidade real (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Absorção de água (g/g)</b>
14G	0,480	0,474	0,99	1,651	1,993
16G	0,424	0,412	0,97	1,278	3,422
18G	0,333	0,327	0,98	1,961	1,558
20G	0,290	0,287	0,99	1,658	2,737
22G	0,277	0,225	0,81	1,560	2,518

Fonte: Elaboração Própria.

As medidas dos fios reduziram com a diminuição da área da agulha, como já era esperado. O fator de forma com resultado mais próximo de 1 indica aproximação entre as medidas de espessura e largura do filamento, sendo um indicador de seção transversal circular do fio, por este formato cilíndrico se obtém maior resistência mecânica, ou seja, enquanto o retangular ou achatados são indicados para aplicações que necessitam de maior área superficial e atrito (LUNDAHL et al., 2018).

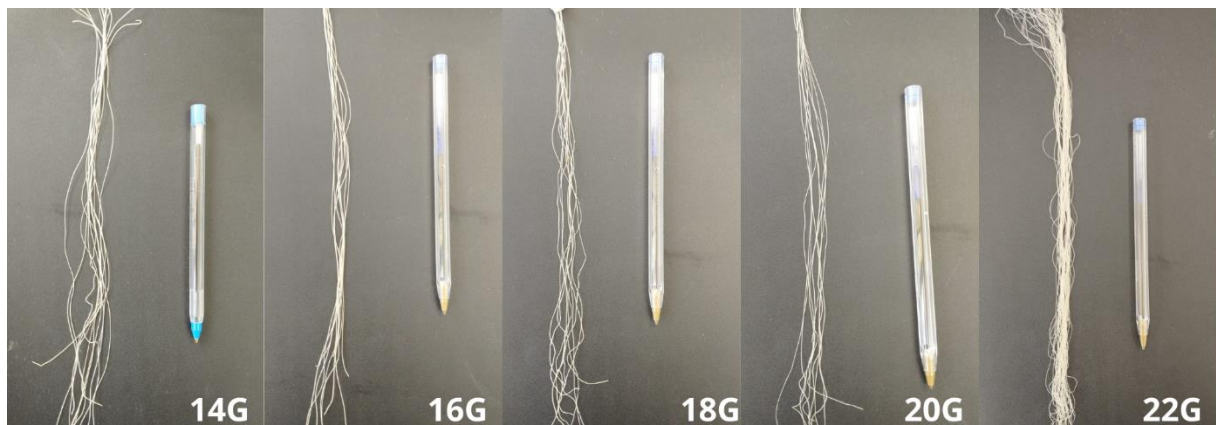


Figura 3 – Relatório fotográfico dos filamentos nas 5 dimensões.

Fonte: Elaboração própria

O alginato de sódio possui a capacidade de absorver água cerca de 200-300 vezes o seu peso (ABDUL KHALIL et al., 2017), e a absorção de água da MFC está relacionada com a sua cristalinidade (MOUDOOD et al., 2019). Os valores médios de absorção de água nesse estudo variaram de 1,558 a 3,422 g/g. Os polímeros como celulose e alginato possuem a capacidade de absorver água em suas estruturas internas. Esses materiais têm uma estrutura que contém espaços vazios entre as cadeias moleculares ou poliméricas, os quais podem ser preenchidos pela água (LUNDAHL et al., 2018; LIMA et al., 2007). Essa absorção pode resultar em alterações físicas e químicas do material, como expansão dimensional podendo causar um aumento no volume. Além do volume, pode afetar outras propriedades dos fios, como a resistência mecânica, a transparência e a estabilidade dimensional (LUNDAHL et al., 2018; LIMA et al., 2007).

Em pesquisas de absorção de água com filamentos de celulose, vale destacar o estudo de Lundahl et al. (2018), com filamentos bicomponentes de nanofibrilas de celulose (NFC) e goma guar, e encontraram uma absorção de água de 4,3 g/g, e Menini (2022) que desenvolveu pesquisas de filamentos de MFC com goma xantana e goma guar, onde das diferentes configurações propostas de tipos de fios, encontraram resultados que variaram de 8,78 a 30,34 g/g. Como nos trabalhos citados anteriormente, ao final da análise o material apresentava integridade estrutural e foi possível manuseá-los.

A densidade real dos filamentos feitos de celulose com alginato é um parâmetro importante a ser considerado para a caracterização desses materiais. Nesse estudo os valores variaram de 1,278 a 1,961 g/cm<sup>3</sup>, e verificado que não houve uma variação significativa e nem um padrão estabelecido pelo estudo de acordo com os códigos propostos. Silva (2022) desenvolveu a pesquisa do efeito da lignina *kraft* de *Eucalyptus* sp. nas propriedades dos filamentos bicomponentes de microfibrilas de celulose, e Alves (2023) sobre o efeito da concentração de microfibrila de celulose na qualidade dos fios bicomponentes, encontraram resultados de densidade real para os filamentos que variaram de 1,35 a 1,88 g/cm<sup>3</sup> e 1,27 a 2,11 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente. São valores que se assemelham ao estudo realizado nesse trabalho.

## 5.2 Propriedades mecânicas dos fios

Na Figura 4 são apresentados os resultados de propriedades mecânicas dos fios nos diferentes diâmetros. Foram obtidos valores de tensão média de ruptura, módulo de elasticidade, deformação e tenacidade.

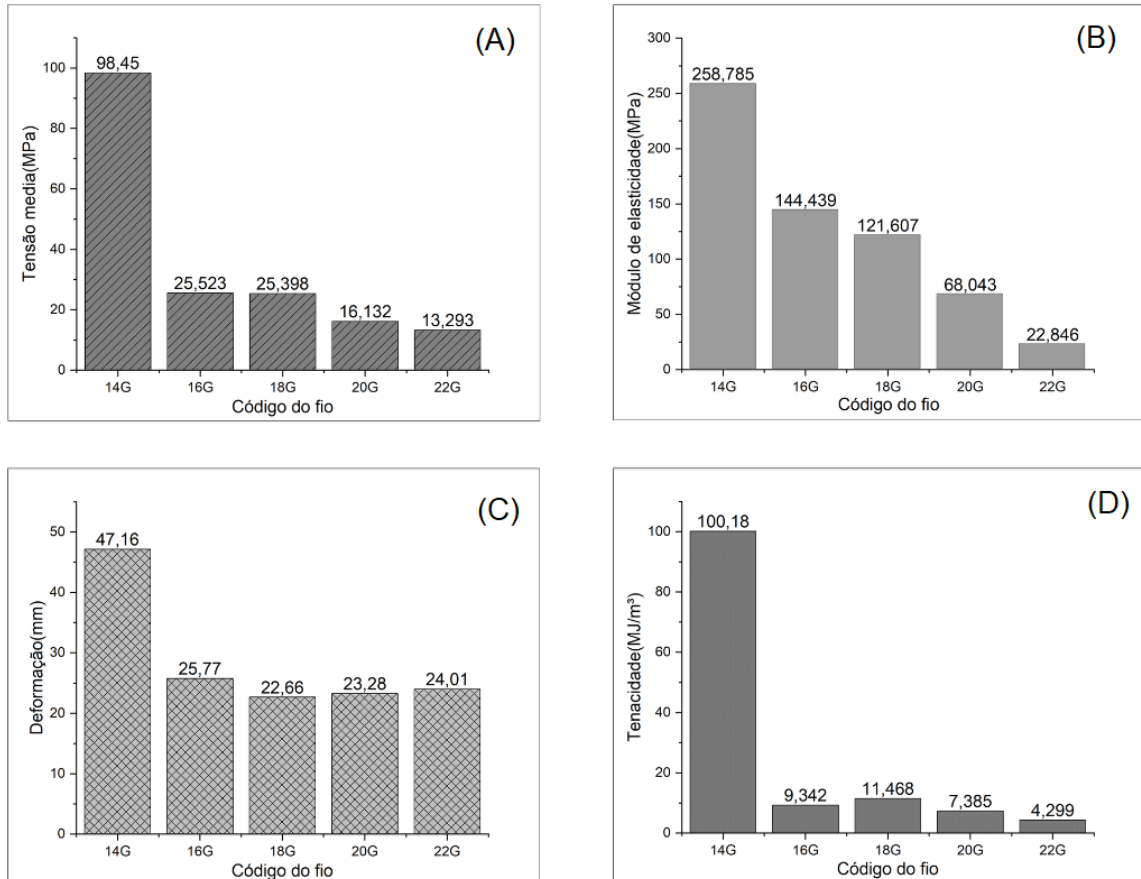


Figura 4 – Gráficos dos resultados das propriedades mecânicas dos filamentos (A: MOR; B: MOE; C: Deformação e D: Tenacidade)

Fonte: Elaboração própria.

Os valores de tensão foram encontrados pela carga necessária para continuar uma deformação até a ruptura dos fios, ou seja, a tensão máxima em que o fio pode ser submetido sob tração. Os fios de 14G apresentaram valores de resistência mecânica maiores quando comparados aos demais fios. Por meio da produção de fios bicomponentes compostos por NFC e goma guar por meio de fiação úmida contínua, Lundahl et al. (2018) apresentaram resultados de resistência à tração de 70 MPa. Hooshmand et al. (2015) produziram filamentos de NFC (biorresíduo de ráquis de

banana) por meio de fiação seca, obtiveram resultados variando de 131 a 222 MPa, e Menini (2022) apresentou resultados de resistência mecânica de filamentos de MFC com goma xantana e goma guar variando de 6,62 a 28,69 MPa.

O módulo de elasticidade (MOE) demonstra a capacidade de que o fio tem de deformar e retornar a sua forma original quando a carga é liberada (CALLISTER e RETHWISCH, 2013). Os valores médios de MOE nesse estudo variaram de 22,846 a 258,785 MPa, no sentido do fio de menor para o de maior diâmetro. Segundo Lopes (2011), quanto maior esse módulo, menor será a deformação elástica resultante da aplicação de uma determinada tensão, ou seja, apresentara uma maior rigidez.

Syukri et al. (2021) desenvolveram pesquisas de suturas de monofilamentos de náilon e obtiveram um módulo de elasticidade de 24,20 MPa, e Menini (2022) que desenvolveu filamentos de MFC com goma xantana e goma guar encontraram resultados variando de 23,77 a 408,57 MPa

Ao fim da fase elástica, tem o início da fase plástica, onde ocorre a deformação permanente do material, mesmo que cesse a tensão posteriormente. Nesse estudo os resultados de deformação variaram de 22,66 a 47,16 mm, sendo que a deformação dos fios consiste no alongamento em milímetros em que o corpo de prova está sofrendo durante o período do ensaio (LIU et al., 2021). No trabalho de Menini (2022) de fios de MFC com gomas guar e xantana, obtiveram resultados de deformação variando de 10,87 a 91,73 mm.

Para os valores de tenacidade nesse estudo, os fios de 14G obtiveram valores superiores aos demais, com 100,18 MJ/m<sup>3</sup>, seguido pelos fios de 18G com 11,468 MJ/m<sup>3</sup> e 16G com 9,342 MJ/m<sup>3</sup>. A tenacidade se refere ao estresse específico que uma fibra pode suportar antes de quebrar. Normalmente, os valores de tenacidade das fibras naturais possuem maior tenacidade, associada de um menor alongamento, ou vice-versa (REEDY; YANG, 2005). Dado a importância que fibras com maior resistência permite a produção de fios com uma boa tenacidade a altas velocidades e taxas de estiragem (SAVILLE, 2007; KASWELL, 1963).

## **6. CONCLUSÃO**

As diferentes propriedades dos fios de MFC e alginato variaram conforme o diâmetro da agulha utilizada para a produção. Embora as dimensões dos fios tenham reduzidos conforme a diminuição do diâmetro da agulha, o fio formado com a agulha



de menor diâmetro formou fio com a menor seção circular, devido ao menor resultado de fator de forma. Mas vale ressaltar que a densidade não foi afetada pelo diâmetro da agulha e não houve padrão de variação da absorção de água.

Os maiores resultados de resistência mecânica dos fios feitos de MFC com alginato estão relacionados com o maior diâmetro. Estes fios de maior diâmetro apresentaram características de alta resistência mecânica, alta rigidez, alta deformação e tenacidade. Vale destacar que os fios de menor diâmetro podem apresentar o seu valor a depender do tipo de aplicação do fio, quando for desejável fios mais maleáveis, ou seja, com menor rigidez, estes fios podem ser úteis.

## 7. REFERÊNCIAS

ABDOLLAHI, Mehdi et al. Comparing physic-mechanical and thermal properties of alginate nanocomposite films reinforced with organic and/or inorganic nanofillers. **Food Hydrocolloids**, v. 32, n. 2, p. 416-424, 2013.

AGNETA, M. et al. Kraft Pulping. A Compilation of Notes. 1993.

ALAMGIR, A. N. M. Fibers, surgical dressings, and bandages of natural origin. In: **Therapeutic Use of Medicinal Plants and Their Extracts: Volume 1**. Springer, Cham, 2017. p. 355-378.

ALVES, Fernando da Silva. **Efeito da concentração de microfibrila de celulose na qualidade dos fios bicomponentes**: Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Industrial Madeireira) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jeronimo Monteiro, 2023.

BARTELS, V. (Ed.). **Handbook of medical textiles**. Elsevier, 2011.

BEER, Ferdinand P.; JOHNSTON, E. R.; DEWOLF, John T.; MAZUREK, David F. **Mecânica dos Materiais**. São Paulo: AMGH, 2015.

BLANCO, Angeles et al. Nanocellulose for industrial use: cellulose nanofibers (CNF), cellulose nanocrystals (CNC), and bacterial cellulose (BC). In: **Handbook of nanomaterials for industrial applications**. Elsevier, 2018. p. 74-126.

BUGGY, M. Natural fibers, biopolymers, and biocomposites. Edited by Amar K Mohanty, Manjusri Misra and Lawrence T Drzal. **Polymer International**, v. 55, n. 12, p. 1462-1462, 2006.

BURNES, T. Wood degradation and biological pulping and bleaching. **Pulp Paper Industry**, p. 2646-2651, 2000.

CALLISTER JR, William D.; RETHWISCH, David G. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

DE MEDEIROS, Jackson Andson. Filmes de alginato como carreadores de probióticos. 2021.

FAVIER, V. et al. Mechanical percolation in cellulose whisker nanocomposites. **Polymer Engineering & Science**, v. 37, n. 10, p. 1732-1739, 1997.

FENGEL, D.; WEGENER, G.; GREUNE, A. Studies on the delignification of spruce wood by organosolv pulping using SEM-EDXA and TEM. **Wood Science and Technology**, v. 23, n. 2, p. 123-130, 1989.

FREIRE, C. S. R.; Compostos orgânicos de baixo peso molecular de Eucalyptus globulus: comportamento durante o cozimento Kraft da madeira e branqueamento da pasta celulósica. Tese de doutorado, Universidade de Aveiro, 2003.

GHASEMI, Hamid; PARK, Harold S.; RABCZUK, Timon. A multi-material level set-based topology optimization of flexoelectric composites. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, v. 332, p. 47-62, 2018.

GHOSH, Tapas Kumar et al. Assessment of morphology and property of graphene oxide-hydroxypropylmethylcellulose nanocomposite films. **International journal of biological macromolecules**, v. 66, p. 338-345, 2014.

GULLICHSEN, Johan; PAULAPURO, Hannu; STENIUS, Per. Forest products chemistry. **Paper Making Science and Technology. Book**, v. 3, 2000.

HIBBELER, R. C. Resistência dos Materiais. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2018.

HUA, Shuibo et al. pH-sensitive sodium alginate/poly (vinyl alcohol) hydrogel beads prepared by combined Ca<sup>2+</sup> crosslinking and freeze-thawing cycles for controlled release of diclofenac sodium. **International journal of biological macromolecules**, v. 46, n. 5, p. 517-523, 2010.

HUA, X. et al. HIGH ASPECT RATIO This invention relates to a unique method of producing, on a commercial scale, high aspect ratio cellulose nanofilaments from natural fibers such as wood or agricultural fibers using high co refining. v. 1, n. 11, 2020.

HOOSHMAND, S. et al. Dry-Spun Single-Filament Fibers Comprising Solely Cellulose Nanofibers from Bioresidue. **ACS Applied Materials and Interfaces**, v. 7, n. 23, p. 13022–13028, 2015.

ISLAM, Md Shahidul; KARIM, Mohammad Rezaul. Fabrication and characterization of poly (vinyl alcohol)/alginate blend nanofibers by electrospinning method. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 366, n. 1-3, p. 135-140, 2010.

IWAMOTO, S.; NAKAGAITO, A. N.; YANO, HJAPA. Nano-fibrillation of pulp fibers for the processing of transparent nanocomposites. **Applied Physics A**, v. 89, n. 2, p. 461-466, 2007.

JACKSON, D. M. (11) br 112015009359-0 b1 (22). v. 1, n. 11, 2021.

JAIN, Dharmendra; BAR-SHALOM, Daniel. Alginate drug delivery systems: application in context of pharmaceutical and biomedical research. **Drug development and industrial pharmacy**, v. 40, n. 12, p. 1576-1584, 2014.

JORFI, Mehdi; FOSTER, E. Johan. Recent advances in nanocellulose for biomedical applications. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 132, n. 14, 2015

JUVENAL, Thais Linhares; MATTOS, René Luiz Grion. O setor florestal no Brasil e a importância do reflorestamento, 2002.

KAMEL, Samir et al. Pharmaceutical significance of cellulose: A review. **Express Polym Lett**, v. 2, n. 11, p. 758-778, 2008.

KAFY, A. et al. Cellulose long fibers fabricated from cellulose nanofibers and its strong and tough characteristics. **Scientific Reports**, v. 7, n. 1, 2017.

KARIMAH, Azizatul et al. A review on natural fibers for development of eco-friendly bio-composite: Characteristics, and utilizations. **Journal of materials research and technology**, v. 13, p. 2442-2458, 2021.

KHALDOUNE, Abd Raouf et al. Determination of the rupture parameters of a plant fiber by using two diameter measurement techniques. **Materials Today: Proceedings**, v. 53, p. 237-243, 2022.

KHALIL, HPS Abdul et al. Seaweed based sustainable films and composites for food and pharmaceutical applications: A review. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 77, p. 353-362, 2017.

KLEMM, Dieter et al. Nanocellulose as a natural source for groundbreaking applications in materials science: Today's state. **Materials Today**, v. 21, n. 7, p. 720-748, 2018.

KUMAR, Alok et al. Biodegradable hydrogel-based biomaterials with high absorbent properties for non-adherent wound dressing. **International wound journal**, v. 14, n. 6, p. 1076-1087, 2017.

KURANCHIE, Charles; YAYA, Abu; BENSAH, Yaw Delali. The effect of natural fibre reinforcement on polyurethane composite foams—a review. **Scientific African**, v. 11, p. e00722, 2021.

LIECHTY, William B. et al. Polymers for drug delivery systems. **Annual review of chemical and biomolecular engineering**, v. 1, p. 149, 2010.

LIMA, Aline Margarete Furuyama et al. Influência da adição de plastificante do processo de reticulação na morfologia, absorção de água e propriedades mecânicas de filmes de alginato de sódio. **Química Nova**, v. 30, p. 832-837, 2007.

LINDSTRÖM, Tom. Aspects on nanofibrillated cellulose (NFC) processing, rheology and NFC-film properties. **Current Opinion in Colloid & Interface Science**, v. 29, p. 68-75, 2017.

LIU, Y. et al. A review of cellulose and its derivatives in biopolymer-based for food packaging application. *Trends in Food Science and Technology*, v. 112, n. April, p. 532–546, 2021.

LOPES, Anne Neiry de Mendonça. Mitigação da retração autógena em concretos de alta resistência contendo aditivo redutor de retração e seus efeitos na macro e microestrutura, 2011.

LUNDAHL, M. J. et al. Strength and Water Interactions of Cellulose i Filaments WetSpun from Cellulose Nanofibril Hydrogels. *Scientific Reports*, v. 6, n. July, p. 1–13, 75 2016

LUNDAHL, Meri J. et al. Absorbent filaments from cellulose nanofibril hydrogels through continuous coaxial wet spinning. **ACS applied materials & interfaces**, v. 10, n. 32, p. 27287-27296, 2018.

MA, Xiaomei et al. Biopolymer composite fibres composed of calcium alginate reinforced with nanocrystalline cellulose. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 96, p. 155-163, 2017.

MAIELANO, Benjamim José Pedro. **Produção e caracterização de estruturas de celulose microfibrilada (CMF) e nanofibrilada (CNF) para o transporte e liberação controlada de anti-inflamatórios**. Tese de Doutorado.

MARCHESSAULT, R. H.; SUNDARARAJAN, P. R. Cellulose. In: **The polysaccharides**. Academic press, 1983. p. 11-95.

MARINELLI, Alessandra L. et al. Desenvolvimento de compósitos poliméricos com fibras vegetais naturais da biodiversidade: Uma contribuição para a sustentabilidade amazônica. **Polímeros**, v. 18, p. 92-99, 2008.

MARRELLA, A. et al. Enhanced mechanical performances and bioactivity of cell laden-graphene oxide/alginate hydrogels open new scenario for articular tissue engineering applications. **Carbon**, v. 115, p. 608-616, 2017.

MARSON, Guilherme A.; EL SEOUD, Omar A. A novel, efficient procedure for acylation of cellulose under homogeneous solution conditions. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 74, n. 6, p. 1355-1360, 1999.

MAZIZ, Ali et al. Knitting and weaving artificial muscles. **Science advances**, v. 3, n. 1, p. e1600327, 2017.

MENINI, Poliana Dariva. Desenvolvimento de filamentos de celulose microfibrilada com gomas. 2022. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, ES.

MOUDOOD, A. et al. Environmental effects on the durability and the mechanical performance of flax fiber/bio-epoxy composites. *Composites Part B: Engineering*, v. 171, n. March, p. 284–293, 2019.

NISHIYAMA, Yoshiharu. Structure and properties of the cellulose microfibril. **Journal of wood science**, v. 55, n. 4, p. 241-249, 2009.

PATTINSON, Sebastian W.; HART, A. John. Additive manufacturing of cellulosic materials with robust mechanics and antimicrobial functionality. **Advanced Materials Technologies**, v. 2, n. 4, p. 1600084, 2017.

PETERSEN, Nathan; GATENHOLM, Paul. Bacterial cellulose-based materials and medical devices: current state and perspectives. **Applied microbiology and biotechnology**, v. 91, n. 5, p. 1277-1286, 2011.

POTULSKI, Daniele Cristina. Efeito da incorporação de microfibrilas de celulose sobre as propriedades do papel. 2012.

RASAL, Rahul M.; JANORKAR, Amol V.; HIRT, Douglas E. Poly (lactic acid) modifications. **Progress in polymer science**, v. 35, n. 3, p. 338-356, 2010.

RODRIGUES, Bruno Vinícius Manzolli. **Valorização de fibras de sisal: síntese de ésteres de celulose e preparação de materiais**. 2014. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

ROWE, Raymond C.; SHESKEY, Paul; QUINN, Marian. **Handbook of pharmaceutical excipients**. Libros Digitales-Pharmaceutical Press, 2009.

SILVA, Pedro Ygor Correia. **Efeito da lignina kraft de eucalyptus sp. nas propriedades dos filamentos bicomponentes de microfibrilas de celulose: Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Industrial Madeireira) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jeronimo Monteiro, 2022.**

SIRÓ, István; PLACKETT, David. Microfibrillated cellulose and new nanocomposite materials: a review. **Cellulose**, v. 17, n. 3, p. 459-494, 2010.

SJÖSTRÖM, Eero. **Wood chemistry: fundamentals and applications**. Elsevier, 2013.

SJÖSTRÖM, Eero; ALÉN, Raimo (Ed.). **Analytical methods in wood chemistry, pulping, and papermaking**. Springer Science & Business Media, 1998.

SULAEVA, Irina et al. Fabrication of bacterial cellulose-based wound dressings with improved performance by impregnation with alginate. **Materials Science and Engineering: C**, v. 110, p. 110619, 2020.

SUN, Jinchun; TAN, Huaping. Alginate-based biomaterials for regenerative medicine applications. **Materials**, v. 6, n. 4, p. 1285-1309, 2013.

TERZOPOULOU, Zoi; KYZAS, George Z.; BIKIARIS, Dimitrios N. Recent advances in nanocomposite materials of graphene derivatives with polysaccharides. **Materials**, v. 8, n. 2, p. 652-683, 2015.

TØNNESEN, Hanne Hjorth; KARLSEN, Jan. Alginate in drug delivery systems. **Drug development and industrial pharmacy**, v. 28, n. 6, p. 621-630, 2002.

TOYOSHIMA, Iwao. Highly advanced utilization and functionalization of cellulose from the aspects of both chemistry and industry. **Cell Chem Biochem Mater Aspects**, p. 125-134, 1993.

VENKATESAN, Jayachandran et al. Alginate composites for bone tissue engineering: A review. **International journal of biological macromolecules**, v. 72, p. 269-281, 2015.

WANG, Long-Feng; SHANKAR, Shiv; RHIM, Jong-Whan. Properties of alginate-based films reinforced with cellulose fibers and cellulose nanowhiskers isolated from mulberry pulp. **Food Hydrocolloids**, v. 63, p. 201-208, 2017.

YAMAGUCHI, Seiichi et al. Nonanastomotic rupture of thoracic aortic Dacron graft treated by endovascular stent graft placement. **General thoracic and cardiovascular surgery**, v. 61, n. 7, p. 414-416, 2013.

ZOHOURIAN, MEHR MJAD; KABIRI, Kouros. Superabsorbent polymer materials: a review. 2008.