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

EMANUEL BIZARELI DE MORAES

CARACTERIZAÇÃO DE FILAMENTOS DE ALGINATO DE SÓDIO COM NANOFIBRILA DE CELULOSE EM DIFERENTES DIÂMETROS

JERÔNIMO MONTEIRO
ESPÍRITO SANTO
2024

EMANUEL BIZARELI DE MORAES

CARACTERIZAÇÃO DE FILAMENTOS DE ALGINATO DE SÓDIO COM NANOFIBRILA DE CELULOSE EM DIFERENTES DIÂMETROS

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

JERÔNIMO MONTEIRO

ESPÍRITO SANTO

2024

EMANUEL BIZARELI DE MORAES

CARACTERIZAÇÃO DE FILAMENTOS DE ALGINATO DE SÓDIO COM NANOFIBRILA DE CELULOSE EM DIFERENTES DIÂMETROS

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

COMISSÃO EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
JORDAO CABRAL MOULIN
Data: 04/10/2024 14:49:10-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Jordão Cabral Moulin
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Documento assinado digitalmente
MICHEL PICANCO OLIVEIRA
Data: 04/10/2024 15:54:02-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Michel Picanço Oliveira
Universidade Federal do Espírito Santo
Avaliador

Documento assinado digitalmente
JOSINALDO DE OLIVEIRA DIAS
Data: 04/10/2024 19:43:46-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Josinaldo de Oliveira Dias
Universidade Federal do Espírito Santo
Avaliador

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço aos meus pais e a minha família por sempre me apoiarem e me darem suporte todo o tempo, sem eles nada seria possível, nunca deixaram faltar nada e sempre fizeram o possível para eu chegar até aqui. Agradeço aos meus amigos, pelo companheirismo desde os primeiros dias de aula até hoje, nas conversas, conselhos e estudos no dia a dia, é fundamental nós termos na nossa vida alguém que podemos conta a qualquer momento. Agradeço aos meus companheiros do laboratório de anatomia da madeira (LAM), por me ajudarem todo o tempo durante o desenvolvimento do projeto, em especial ao Lucas Moulin, ao Flávio Lima, Rômulo Pacheco, e ao meu orientador Jordão Moulin pelo tempo e compreensão durante todo o meu período no laboratório. Agradeço à empresa "Klabin S. A." por toda contribuição para a realização desse projeto, à Universidade Federal do Espírito Santo pela oportunidade de graduação e conclusão do curso de Engenharia Florestal. E principalmente agradeço a Deus pela minha vida com saúde, que é o mais importante para correr atrás dos objetivos que ainda almejo alcançar, e por tudo que já passei e me fez ser quem eu sou hoje.

RESUMO

À medida que as questões ambientais continuam a se intensificar negativamente, existe uma certa necessidade de desenvolver materiais que não causem impactos significativos no meio ambiente, substituindo materiais sintéticos por materiais renováveis, como materiais derivados da celulose. Portanto, pode-se dizer que o aumento na busca pelo desenvolvimento de materiais ecologicamente sustentáveis vem ganhando atenção significativa no cenário atual. Com isso, o objetivo deste trabalho foi verificar a influência do diâmetro nanofibrila de celulose (NFC) nas propriedades mecânicas e de absorção de água dos fios de NFC com alginato de sódio. Foram utilizadas NFC com 7 diferentes diâmetros, provenientes de diferentes fontes. Os fios foram produzidos pelo processo de fiação úmida, com NFC na concentração de 1% e 2% de alginato de sódio, onde coagularam no cloreto de cálcio. Os fios foram caracterizados quanto ao diâmetro do fio, resistência mecânica e absorção de água. O filamento de NFC Standard (34,35 Mpa, 13,92 mm, 11,074 MJ/m³, 66,69 Mpa), foi o que apresentou resultados mais significativos em relação aos demais tratamentos para a análise de caracterização mecânica, apresentando uma boa taxa de absorção de água também. Os filamentos feitos com a NFC 20min. (2,441 g/g) e NFC 40min. (2,691 g/g) também apresentaram resultados positivos para a análise de absorção de água. Dessa forma, os tratamentos que apresentaram um maior diâmetro médio de suas NFC's, foram os tratamentos que obtiveram melhores resultados.

Palavras-chave: Celulose; nanofibrila de celulose; filamentos.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....viii
LISTA DE FIGURAS.....ix
1. INTRODUÇÃO.....1
2. OBJETIVOS.....2
2.1 Objetivo Geral……..…….....……...2
2.2 Objetivo Específico……..…….....……2
3. REVISÃO DE LITERATURA.....3
3.1 Fibras de celulose….……...…….3
3.2 Filamentos de materiais celulósicos……...……..4
3.3 Alginato……...……5
3.4 Pré-tratamento químico.....5
4. METODOLOGIA……..…….……6
4.1 Materiais……...……6
4.2 Nanofibrila de celulose.....6
4.3 Preparo dos materiais.....7
4.4 Produção dos filamentos……...……...……8
4.5 Caracterização mecânica……...……....9
4.6 Absorção de água dos filamentos……...……10
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....……...…..…11
5.1 Resistência mecânica.....11
5.2 Propriedades dos filamentos.....12
6. CONCLUSÃO.....14
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA…….....15

LISTA DE TABELAS E GRÁFICOS

Tabela 1 – Diâmetro das Nanofibrilas, código e fonte de onde foram obtidas.....7

Tabela 2 – Diâmetro dos filamentos……9

Tabela 3 – Diâmetros, resultados de abs. de água e densidade.....13

Gráfico 1 – Resultados de Absorção de água.....13

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema de uma estrutura de celulose…….……4
Figura 2 – Esquema da cadeia de uma molécula de alginato……..5
Figura 3 - Agitador mecânico.....7
Figura 4 – Equipamento utilizado para a produção dos filamentos……8
Figura 5 – Equipamento utilizado para realizar o teste de resistência mecânica.....9
Figura 6 – Imagem da análise de absorção de água dos filamentos.....10
Figura 7 – Gráficos dos resultados de resistência mecânica.....12

1. INTRODUÇÃO

Devido ao desenvolvimento das civilizações, houve um aumento nas demandas de diversas matérias primas, principalmente no uso das reservas naturais e também de produtos sintéticos não renováveis. O que têm colaborado para certas consequências ao planeta, como alterações climáticas, desequilíbrio de ecossistemas e desastres ambientais, com isso têm-se despertado um grande interesse da comunidade científica e da sociedade em geral em buscar novas alternativas de produtos, pois os efeitos locais, regionais e globais já são associados à forma destrutiva de ação do ser humano sobre a natureza (MARINELLI et al., 2008). Desse modo, a biotecnologia oferece oportunidades em termos de alternativas mais sustentáveis para diversos produtos e em distintos mercados.

Neste contexto, pode-se dizer que a celulose está amplamente difundida, pois além da sua alta versatilidade de utilização, é um material renovável, e também é considerado o biopolímero mais abundante do mundo (DONINI et al., 2010), com uma produção mundial estimada de 518,4 milhões de toneladas por ano (FAO, 2021), e sendo de grande importância econômica. Ela é o principal componente da parede celular das plantas, e pode ser encontrada em diferentes formas de vida, como em plantas verdes, fungos, protozoários, e procariontes, é correto dizer que a principal fonte de celulose hoje é proveniente da polpação da madeira (CHINGA-CARRASCO et al., 2011). Portanto, este material veem sendo estudado por diversos pesquisadores, e a sua aplicação tem se destacado em algumas áreas, como nas indústrias de papel e embalagens, indústria alimentícia, biomedicina, indústria química, e também o setor têxtil que veem buscando alternativas para a produção de fios de celulose sintética (EICHHORN et al., 2022).

Existem três tipos de técnicas aplicadas para a produção de fios em escala comercial, que são a fiação do fundido e as fiações de solução a seco e úmida. Essas produções podem ser feita com ou sem a adição de um polímero, sendo necessário também um solvente no processo de fiação de solução a úmida. Com isto, há uma grande variedade de polímeros e produtos orgânicos aplicáveis nos processos de fiação, incluindo solventes como acetona, dimetilacetamida (DMAc), dimetilformamida (DMF), cloreto de cálcio ($CaCl_2$) e biopolímeros como o amido, quitosana e o alginato (CLARKSON

E YOUNGBLOOD et al., 2018). O alginato é um polissacarídeo composto principalmente de unidades de ácido β-d-manurônico (1,4)-ligadas e unidades de ácido α-l-gulurônico, e tem sido bastante utilizado comercialmente, isso se dá devido a algumas de suas características, como a biodegradabilidade, biocompatibilidade, não toxicidade e sua ampla diversidade de uso, como para a utilização no desenvolvimento de materiais para a produção de embalagem em diversos mercados (MARANGONI JUNIOR et al., 2022).

No entanto, os materiais com uma base de biopolímeros apresentam certas desvantagens, como a solubilidade, baixa resistência mecânica e alta permeabilidade ao vapor de água, dentre outras (MARANGONI JUNIOR et al., 2022). Dessa forma, é interessante buscar novas alternativas com base na pesquisa para tentar superar as deficiências desses materiais de biopolímeros. Existe alguns estudos que já testaram certos componentes, como outros biopolímeros, além de extratos vegetais, nano enchimentos ou ingredientes ativos puros são adicionados junto do material (MARANGONI JUNIOR et al., 2022). Portanto, neste presente estudo foram produzidos filamentos a base de nanofibrilas de celulose (NFC) em diferentes dimensões.

2. Objetivos

2.1 Objetivo Geral

- Avaliar o efeito do diâmetro da NFC nas propriedades dos filamentos produzidos com NFC e alginato de sódio.

2.2 Objetivos Específicos

- Produção e caracterização dos filamentos para apontar suas respectivas propriedades mecânicas, físicas e de absorção de água.
- Analisar a influência da dimensão da NFC nas propriedades dos fios;

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Fibras de celulose

Pode-se dizer que as fibras de celulose da madeira é atualmente uma importante área de pesquisa para diversas aplicações (CARRASCO et al., 2011). As fibras de celulose (Figura 1) são montadas em uma estrutura ordenada hierarquicamente, e suas cadeias se agregam em domínios cristalinos e amorfos alternados na forma de fibrilas elementares, que são alinhadas e posteriormente agregadas em microfibrilas ou macrofibrilas maiores. Portanto, as fibras de celulose podem ser quebradas em suas unidades estruturais microfibrilares por processos químicos, enzimáticos e mecânicos, onde os tratamentos mecânicos intensivos, como homogeneização de alta pressão, microfluidização ou moagem, resultam em redes altamente emaranhadas de NFC (AGARWAL E FOSTER et al., 2019). Dessa forma, os nanomateriais celulósicos podem ser divididos em cinco grupos, nanofibrilas de celulose (NFC), nanocristais de celulose (CNC), nanocristais de celulose tunicados (t-CNC), celulose de algas (AC) e celulose bacteriana (BC) (AGARWAL e FOSTER et al., 2018).

Durante a última década, NFC foram produzidas usando materiais mais agressivos, como os tratamentos mecânicos de alto cisalhamento ou alta energia, como homogeneizadores que levaram a agregados de fibrilas altamente emaranhados e redes mecanicamente fortes (AGARWAL E FOSTER et al., 2018). Diante disso, alguns estudos foram direcionados nesse sentido, como o de Henriksson e Lindstrom et al. (2007) que estudaram pré-tratamentos à base de endoglucanase (que é uma enzima que cliva internamente a celulose) ou hidrólise ácida em combinação com cisalhamento mecânico, para desintegrar o NFC da parede celular da fibra de madeira. Em seguida a desintegração bem sucedida, as NFC foram estudadas por microscopia de força atômica (AFM), e descobriu-se que o tratamento enzimático facilita a desintegração. Alguns estudos mostram aplicações dessas NFC altamente interligadas para diversos fins, como reforço em nanocompósitos, filtração de meios, produção de barreira de oxigênio em alimentos e produtos farmacêuticos (AGARWAL E FOSTER et al., 2018).

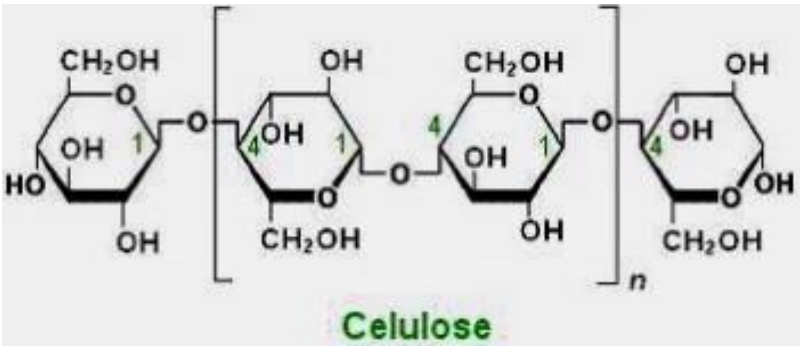

Figura 1 - Esquema de uma estrutura de celulose. Fonte: Toda matéria, 2024.

3.2 Filamentos de materiais celulósicos

A produção de filamentos pode ser realizada de algumas formas, uma delas é através da extrusão de um filamento contínuo, e a outra é através de fiação, que é a torção conjunta de pequenas fibras para a produção de um filamento longo, dessa forma a produção de filamentos celulósicos é realizada através da fiação. A produção desses filamentos pode ser realizada por meio de 3 técnicas distintas, como a fiação por fusão e as outras principais que são por fiação em solução (fiação a seco e fiação a úmido).

Na fiação por fusão, o polímero é derretido e estruturado através de uma fieira para um resfriador, onde passa por diversas etapas de pós-processamento. Na fiação a seco, soluções de polímero e solvente também são extraídas de uma fieira, mas a fiação a seco é um processo mais complexo, pois a solidificação depende da evaporação do solvente, que por sua vez depende de muitas variáveis. Já na fiação a úmido o processo é mais lento, onde a solução é injetada em um banho de solvente e a solidificação ocorre por difusão do solvente da fibra no solvente do banho (CLARKSON et al., 2018). Na produção dos filamentos por meio da fiação a úmido, é utilizado de polímeros ou compostos orgânicos solúveis ou miscíveis em água, como acetona e a dimetilformamida (DMF), Clarkson et al. (2018) também são utilizados o álcool polivinílico (PVA), ácido polilático (PLA), óxido de polietileno (PEO), poliacrilonitrila (PAN) e alginato (CLARKSON et al., 2019). A utilização de um polímero na produção de filamentos celulósicos tem como objetivo uma reação de polimerização/coagulação do material quando entra em contato com o solvente, dessa forma, ocorrendo à formação do filamento (CLARKSON et al., 2018).

3.3 Alginato

O alginato é um polissacarídeo linear natural composto principalmente por unidades de ácido β-d-manurônico e unidades de ácido α-l-gulurônico, sendo que para fins comerciais ele é extraído das algas marinhas marrons comuns como a *Laminaria hyperborea, Macrocytis pyrifera e Ascophyllum nodosum*etc, tendo bastante relevância nas indústrias farmacêuticas, biomédicas e alimentícias (MARANGONI et al., 2022). O alginato contém um grande número de grupos carboxila e hidroxila livres como na (Figura 2), o que o torna capaz de se ligar a íons metálicos, como o Fe^{3+}, Al^{3+}, Cr^{3+}, Cu^{2+}, Ba^{2+}, Ca^{2+}, entre outros (KARMAKAR et al., 2022). E também possuindo diversas propriedades vantajosas, como maior solubilidade em água, maior biocompatibilidade, baixo perfil de toxicidade e melhor perfil de biodegradabilidade; e por isso são amplamente utilizados nas indústrias como mencionado anteriormente (KARMAKAR et al., 2022). Dentre os diferentes sais de alginato disponíveis na natureza, o alginato de sódio é amplamente utilizado devido à sua melhor propriedade de solubilidade em diversos solventes aquosos, portanto, vários cátions divalentes como Zn, Ba2+, Ca2+ e também em cátions trivalentes como Al3+, o alginato de sódio sofrerá uma gelificação ionotrópica (que é uma técnica simples, que não utiliza solventes orgânicos tóxicos e com possibilidade de produção em escala industrial) (KARMAKAR et al., 2022).

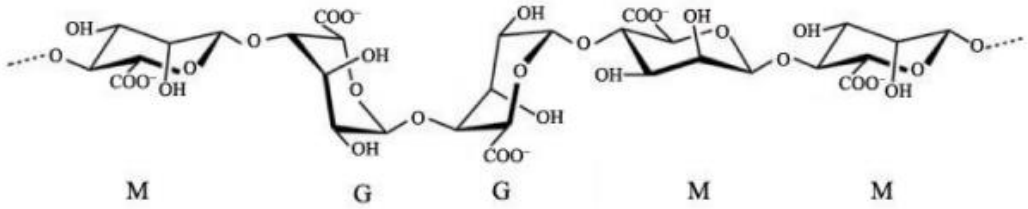

Figura 2– Esquema da cadeia de uma molécula de alginato. Fonte: Zhang et al., 2022.

3.4 Pré-tratamento químico

Devido a versatilidade do uso da celulose, alguns pesquisadores começaram a modificar a sua composição utilizando de pré-tratamentos químicos, (Ghanadpour et al. (2015) fez a adição de grupos fosfóricos $(NH_4)_2$ HPO_4 na presença de ureia, junto as nanofibrilas de celulose (NFC). A presença de grupos fosfato na estrutura do NFC foi encontrado para melhorar a retardância de chamas deste material, as folhas de nanopapel preparadas

a partir de (NFC) fosforilado mostraram propriedades autoextinguíveis após aplicações consecutivas de uma chama de metano por 3 segundos e não inflamaram sob um fluxo de calor de 35 kW/m ^{2} (GHANADPOUR et al., 2015). Dessa forma, a utilização de grupos fosfóricos para pré-tratamento químico tem se mostrado promissora, pois este pré-tratamento é considerado mais econômico e apresenta baixa toxicidade ambiental.

A criação de grupos fosfóricos carregados negativamente (como fosfato de celulose ou fosfito de celulose) na celulose é uma estratégia bem conhecida na produção de materiais aplicáveis em diversos setores (KOKOL et al., 2015). Portanto, com a importância dos grupos funcionais fosfóricos, muitos métodos para fosforilação de celulose no pré-tratamento das fibras foram desenvolvidos pela reação nos grupos hidroxila (-OH) livres de celulose nas posições C2, C3 e C6 ou via deslocamento de um grupo éster ou éter já presente na celulose, como descrito por (KOKOL et al., 2015).

4. METODOLOGIA

4.1 Materiais

Foram utilizadas NFC de diferentes fontes, a concentração de todas foi ajustada para a concentração de 1% (m/m). Também foram utilizados o alginato de sódio em concentração de 2% (m/m) da (Êxodo Científica) para a produção das amostras com os materiais mencionados anteriormente, e uma solução de cloreto de cálcio.

4.2 Nanofibrilas de celulose

Foram usadas NFC de diferentes fontes para conseguir obter maior variação de diâmetro, como demonstrado na (Tabela 1). Sendo do trabalho de Mulin et al. (2023) que fez pré-tratamentos com fósforo nas fibras de eucalipto branqueada nos tempos de 5, 20 e 40 min, em seguida foram produzidas as NFC conforme o método de Martins et al. (2021). Na pesquisa de Zortea et al. (2024) as fibras do bagaço-da-açúcar foram branqueadas e tratadas com enzimas, posteriormente foram produzidas as NFC também de acordo com Martins et al. (2021). E também as NFC Premium apresentando 100% de refino de suas fibras, e NFC Standard apresentando 90% de refino de suas fibras, que são fabricadas e comercializadas pela empresa Klabin S.A.

Tabela 1. Diâmetro das NFC, código e fonte de onde foram obtidas.

NFC	Código	Diâmetro médio (nm)	Fonte
NFC 5 min	A	32,90	Mulin et al. (2023)
NFC S/T	B	37,10	Mulin et al. (2023)
NFC 20 min	C	38,30	Mulin et al. (2023)
NFC Enzimática	D	39,00	Zortea et al. (2024)
NFC 40 min	E	41,60	Mulin et al. (2023)
NFC Premiun	F	76,45	Klabin S.A.
NFC Standard	G	93,23	Klabin S.A.

4.3 Preparo dos materiais

Para a realização do preparo do material, foi adicionado as NFC's em concentração de 1% (m/m) com o alginato de sódio em concentração de 2% á um agitador mecânico (Figura 3), pelo período de 1 hora com uma velocidade de 2000 rpm, até que o material aparentasse uma consistência homogênea. Posteriormente a realização deste processo para todos os tratamentos, foi realizado a produção dos filamentos.

Figura 3 – Agitador mecânico. Fonte: Fitson.

4.4 Produção dos filamentos

A produção dos filamentos foi pelo método de fiação em solução úmida com o solvente em fluxo contínuo como proposto por (HAKANSSO et al., 2014). Para isso, o cloreto de cálcio foi inserido no equipamento demostrado na (Figura 4), com concentração de 1 mol/L, e foi mantido em um fluxo contínuo em velocidade de 0,242 m/s. A mistura de NFC com alginato foi injetada através de uma seringa de 10 mL, acoplada da parte externa de uma agulha 2,1 mm de diâmetro e comprimento de 6 cm, a uma taxa constante de 0,8 mL/s no cloreto de cálcio para a coagulação imediata do fio. Após a sua confecção, os fios foram levados para uma estufa a uma temperatura de 60º C durante 4 horas para serem secados.

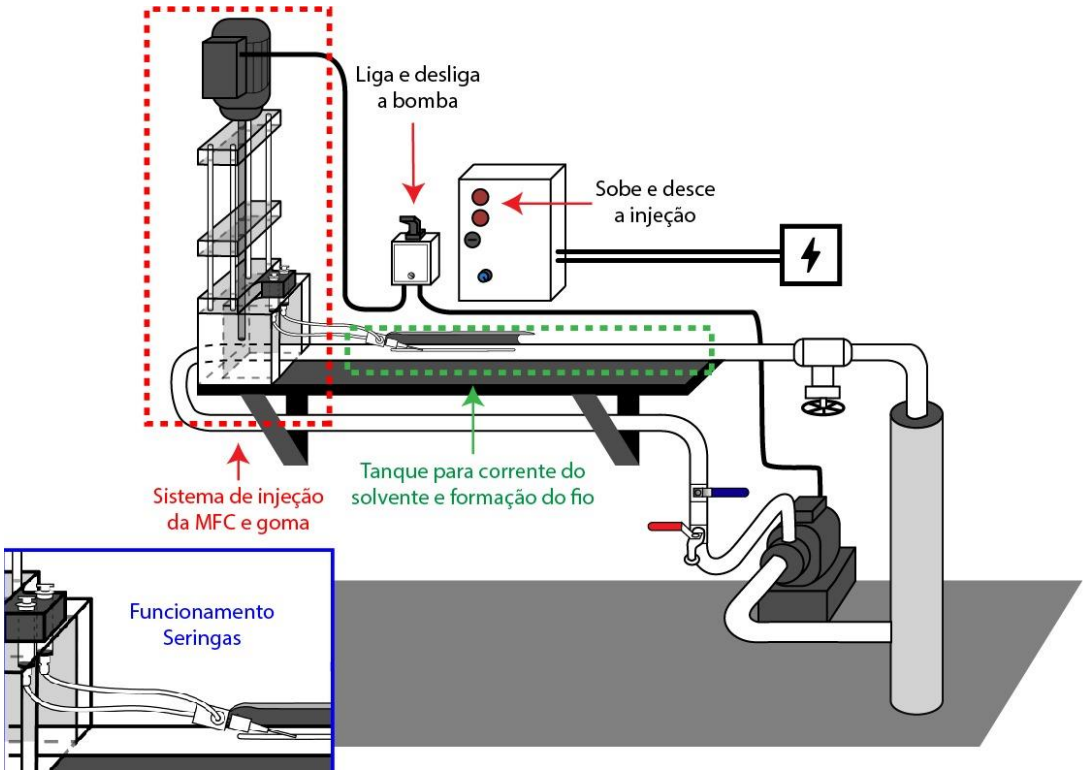

Figura 4 – Equipamento utilizado para a produção dos filamentos.

Fonte: Menini, 2023.

4.5 Resistência mecânica dos filamentos

A obtenção do diâmetro dos filamentos para o cálculo de tensão, foram realizadas três medições em partes equidistantes do filamento com aproximadamente 30 cm, utilizado o microscópio confocal (Olympus LEXT OLS5100) com aproximação de 500x. Foram realizados testes de tração nos filamentos seguindo os parâmetros definidos pela norma ASTM D2256-21 (2021), através do equipamento (AME-2KN Oswaldo Filizola) que aplica uma célula de carga de 5 N na taxa de 0,3 N/segundo, sendo ensaiados 12 repetições para cada tratamento. Na realização desta análise, é possível obter os resultados de módulo de ruptura, módulo de elasticidade, tenacidade e deformação dos filamentos produzidos.

Figura:5. Máquina de ensaio mecânico dos filamentos. Fonte: Autor,2024.

4.6 Absorção de água dos filamentos

A absorção de água será medida utilizando a metodologia do tea bag, ou metodologia do sachê de chá, apresentada por (LIU et al., 2022). Os filamentos serão cortados em comprimentos de aproximadamente 1 cm, os sachês de chá vazios serão submersos em água destilada por cerca 1 hora, posteriormente os sachês ficarão suspensos por 10 minutos para a retirada do excesso de água e pesados com o auxílio de uma balança de precisão. Em seguida, os filamentos secos foram pesados e depositados nos sachês de chá para a submersão em água destilada por cerca de 1 hora, e logo após será realizado a pesagem novamente. Para esse processo foram realizadas 5 repetições com 0,2 gramas de fio seco para cada configuração. A absorção de água foi calculada de acordo com a seguinte equação:

$$Ab_{H_20} = \frac{m_{tbf} - (m_{tb} + m_f)}{m_f}$$

Em que - $AbH20$: absorção de água; $mtbf$: massa do sachê de chá úmido com fios; mtb: massa do sachê de chá úmido; mf: massa seca do fio.

Figura:6. Sache para análises de absorção de água. Fonte: Autor,2024.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Resistência mecânica

Os resultados mecânicos podem ser visualizados na (Figura 7). Dentre os tratamentos analisados, o que melhor se destacou foi a NFC Standard, apresentando um maior módulo de ruptura (MOR) com uma maior tensão máxima, maior módulo de elasticidade (MOE) e uma maior tenacidade em comparação com os outros tratamentos. Para a análise de deformação dos filamentos, obteve-se valores próximos entre os tratamentos, com uma ênfase para o tratamento com NFC 20min (NFC com um pré-tratamento químico de 20 min + Alginato), e os tratamentos de "NFC S/T, NFC 5min, NFC Premiun e NFC Standard" tiveram valores próximos uns aos outros. Dessa forma, Lundahl et al. (2018) apresentou valores de resistência a tração de aproximadamente 38 a 9,9 MPa para filamentos a partir de GG na concentração de 1% (m/v) e nanofibrila de celulose (NFC) na concentração de 1,5% (m/v) com coagulação em etanol, e os resultados são similares aos apresentados na presente pesquisa.

Em comparação com um estudo realizado por Lima et al. (2023) com filamentos de NFC Standard em concentração de 4,5% e alginato de sódio em 4% encontrou-se uma tensão de 96,45 Mpa, MOE de 258,79 MPa, deformação de 47,16 mm e tenacidade de 100,18 MJ/m^3. Observa-se que os resultados das análises de resistência mecânica apresentados neste presente estudo são inferiores, em função da menor concentração utilizada tanto de MFC e quanto de alginato de sódio.

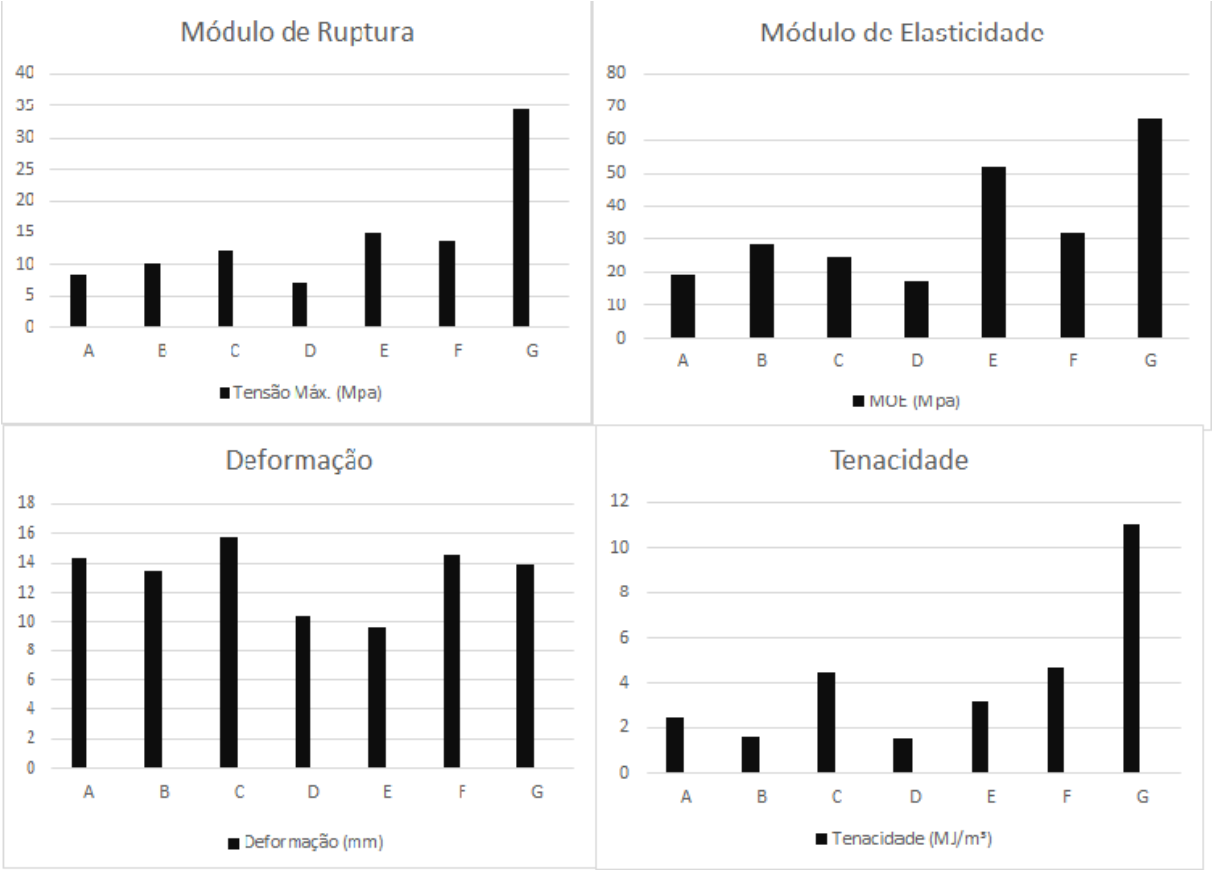

Figura 7- Gráficos dos resultados de resistência mecânica. Fonte: Autor,2024.

5.2 Propriedades dos filamentos

Na Tabela 3 são apresentados os resultados de diâmetro dos fios e absorção de água. Averiguando os resultados de absorção de água, observa-se que os tratamentos de NFC 40min, seguido dos tratamentos de NFC 20min. e NFC Standard expressaram valores superiores aos demais, variando de 2,029 a 2,691 (g/g). Materiais como NFC e o próprio alginato, são materiais com capacidade de absorção de água, segundo Abdul Khalil et al. (2017), o alginato de sódio possui a capacidade de absorver água cerca de 200-300 vezes o seu peso e a absorção de água da NFC está relacionada com a sua cristalinidade e também com os espaços vazios entre as cadeias moleculares, que podem ser preenchidos por água (LUNDAHL et al., 2018).

No estudo realizado por Lima et al. (2023), encontrou-se valores de absorção de água que variam entre 1,558 a 3,422 (g/g) para filamentos de (MFC + Alginato), valores similares ao do presente estudo. Já Colares Neto et al. (2022) apresentou valores de absorção de água que variam entre 0,51 a 2,42 (g/g) para filamentos com (MFC + Goma

guar). Dessa forma, filamentos que a presença de MFC, Alginato e também Goma guar apresentam em sua estrutura grupos de hidroxilas livres (-OH), fazendo com que o material tenha mais afinidade com a água, aumentando a sua absorção de água.

Tabela 3 – Diâmetros, resultados de abs. de água e densidade.

Tratamento	Diâmetros médios dos fios (mm)	Abs. de água
NFC S/T	0,3120	1,676
NFC 5 min	0,3571	1,752
NFC 20 min	0,3404	2,441
NFC 40 min	0,2967	2,691
NFC Premiun	0,3294	1,051
NFC Standard	0,2919	2,029
NFC Enzimática	0,3956	0,54

Fonte: Autor,2024.

6. CONCLUSÃO

Diante dos resultados apresentados neste presente estudo, pode-se dizer que a NFC Standard apresentou melhores resultados nas análises de caracterização mecânica dos filamentos em relação aos outros tratamentos, isso devido ao seu maior diâmetro médio das fibras diante das demais NFC´s. Apesar da NFC Standard não ter apresentado o melhor resultado em relação a capacidade de absorção de água, ela apresentou um resultado promissor quando relacionados a uma estrutura absorvente que requere um certo grau de resistência mecânica.

Com relação as NFC's que sofreram um pré-tratamento químico de fosforilação, a NFC 40min. e a NFC 20min. foram as se destacaram mais nas análises de caracterização mecânica, e apresentaram no geral os resultados mais significativos para a análise de absorção de água. Dentre todos os tratamentos o que apresentou os piores resultados foi a NFC Enzimática, apresentando o menor diâmetro médio das fibras entre todos os tratamentos.

Portanto, conclui-se que o tratamento que apresentou um maior diâmetro médio de suas NFC's, foi o tratamento que obteve melhor resultado em comparação com os demais.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

DONINI, I. A.N.; DE SALVI, D.T.B.;, et al., (2010). Biossíntese e recentes avanços na produção de celulose bacteriana. **Eclética Química**,*35*(4), 165–178.

MOULIN, L. B.; MOULIN J.C. **Efeito da fosforilação na produção de nanofibrilas de celulose de Eucalyptus sp.** .2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Industrial Madeireira) - Universidade Federal do Espírito Santo, ES, 2022.

LIMA F.R.; MOULIN J.C. **Influência do diâmetro dos fios de microfibrilas de celulose com alginato em suas propriedades**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Espírito Santo, ES, 2023.

COLARES NETO J.R.; MOULIN J.C. **Desenvolvimento de fios de microfibrilas de celulose com goma guar.** 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Industrial Madeireira) - Universidade Federal do Espírito Santo, ES, 2022.

HAKANSSON, K. M. O.; FALL, A. B.; LUNDELL, F.; YU, S.; KRYWKA, C.; ROTH, S. V.; SANTORO, G.; KVICK, M.; WITTBERG, L. P.; WAGBERG, L.; SODERBERG, L. D. Hydrodynamic alignment and assembly of nanofibrils resulting in strong cellulose filaments. **Nat. Commun.**, v. 5, n. 4018, p. 1-10, 2014.

LIU, R. W. et al. Nanofibras de embalagem inspiradas em estômatos de folhas com liberação de timol desencadeada por umidade com base em eletrofiação coaxial de timol/EVOH. **Food Research International**, v. 112093, 2022.

CHINGA-CARRASCO, G. et al. Fibras de celulose, nanofibrilas e microfibrilas: A sequência morfológica dos componentes do MFC do ponto de vista da fisiologia vegetal e da tecnologia da fibra. **Cartas de pesquisa em nanoescala**, v. 6, p.1-7, 2011.

AGARWAL, D. et al. Efeito do teor de umidade nas propriedades térmicas e de absorção de água da celulose microfibrilar com aditivos poliméricos. **Polímeros de carboidratos** , v. 211, p. 91-99, 2019.

AGARWAL, D.; MACNAUGHTAN, W.; FOSTER, T. J. et al. Interações entre celulose microfibrilar e carboximetilcelulose em suspensão aquosa. **Polímeros de carboidratos**, v. 185, p.112-119, 2018.

HENRIKSSON, M. et al. Um método ecologicamente correto para preparação assistida por enzimas de nanofibras de celulose microfibrilada (MFC). **Revista Europeia de Polímeros**, v.8, pág.3434-3441, 2007.

MARANGONI, L. J. et al. Preparação e caracterização de filmes de alginato de sódio com extrato de própolis e nano-SiO2. **Hidrocolóides Alimentares para a Saúde**, v. 2, p.100094, 2022.

KARMAKAR, S. et al. Progresso recente em transportadores à base de alginato para direcionamento ocular de terapêutica. **Hidrocolóides Alimentares para a Saúde**, v. 2, p. 100071, 2022.

CLARKSON, C. M. et al. Fiação por fusão de fibras compostas de nanofibrilas de celulose/ácido polilático (CNF/PLA) para alta rigidez. **ACS Applied Polymer Materials** , v. 1, n. 2, pág. 160-168, 2018.

CLARKSON, C. M. et al. Laminação de empilhamento úmido de folhas de nanofibrilas de celulose (CNF) mecanicamente fibriladas multicamadas com maior desempenho mecânico para uso em aplicações estruturais e de embalagem leves e de alta resistência. **ACS Applied Polymer Materials**, v. 1, n.9, pág.2525-2534, 2019.

CLARKSON, C. M.; YOUNGBLOOD, J. P. Fiação a seco de fibras compostas de nanocristais de celulose/ácido polilático. **Green Materials** , v. 6, n. 1, p. 6-14, 2018.

ISOGAI, A.; SAITO, T.; FUKUZUMI, H.; Nanofibras de celulose oxidadas por TEMPO. **Nanoscale** , v. 3, n. 1, p. 71-85, 2011.

GHANADPOUR, M. et al. Phosphorylated cellulose nanofibrils: a renewable nanomaterial for the preparation of intrinsically flame-retardant materials. **Biomacromolecules**, v. 16, n. 10, p. 3399-3410, 2015.

KOKOL, V. et al. Caracterização e propriedades de nanocelulose homo e heterogeneamente fosforilada. **Carbohydrate polymers** , v. 125, p. 301-313, 2015.

LUNDAHL, Meri J. et al. Filamentos absorventes de hidrogéis de nanofibrilas de celulose por meio de fiação úmida coaxial contínua. **ACS applied materials & interfaces** , v. 10, n. 32, p. 27287-27296, 2018.

EICHHORN, Stephen J. et al. Pesquisa internacional atual sobre celulose como um nanomaterial funcional para aplicações avançadas. **Journal of Materials Science** , v. 57, n. 10, p. 5697-5767, 2022.

MULIN, Lucas Braga et al. Efeito da fosforilação na produção de nanofibrilas de celulose de Eucalyptus sp. **Industrial Crops and Products** , v. 193, p. 116173, 2023.

ZORTEA L.F.; MOULIN J.C. **Obtenção de nanocelulose do resíduo de bagaço de cana-de-açúcar para o reforço em máscaras cirúrgicas de Tecido Não Tecido (TNT).** Dissertação de mestrado em Engenharia Química (Universidade Federal do Espírito Santo, 2024).