

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS MECÂNICAS**

**IMPACTOS AMBIENTAIS E PROPRIEDADES DE NANOCOMPÓSITOS DE CELULOSE  
DE JUTA E DE NANOPARTÍCULAS DE PRATA ADITIVADOS COM SORBITOL,  
GLICEROL E CARBOXIMETILCELULOSE**

**LAYS FURTADO DE MEDEIROS SOUZA KATAOKA**

**ORIENTADORA: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> SANDRA MARIA DA LUZ**

**COORIENTADORA: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> MARIA DEL PILAR HIDALGO FALLA**

**TESE DE DOUTORADO EM CIÊNCIAS MECÂNICAS**

**BRASÍLIA, MARÇO DE 2026**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS MECÂNICAS**

**LAYS FURTADO DE MEDEIROS SOUZA KATAOKA**

**IMPACTOS AMBIENTAIS E PROPRIEDADES DE NANOCOMPÓSITOS DE CELULOSE  
DE JUTA E DE NANOPARTÍCULAS DE PRATA ADITIVADOS COM SORBITOL,  
GLICEROL E CARBOXIMETILCELULOSE**

**TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
CIÊNCIAS MECÂNICAS DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE  
BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO  
GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS MECÂNICAS**

**ORIENTADORA: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> SANDRA MARIA DA LUZ**

**COORDINADORA: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> MARIA DEL PILAR HIDALGO FALLA**

**APROVADA POR:**

---

**Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Sandra Maria da Luz, FCTE - UnB  
Orientadora**

---

**Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Diana Sara Pereira Ferreira, UMinho - Portugal  
Examinadora externa**

---

**Prof Dr Daniel Pasquini, UFU  
Examinador externo**

---

**Prof Dr Cláudio Henrique Soares Del Menezzi, UnB  
Examinador interno**

**BRASÍLIA, 11 DE MARÇO DE 2026**

## FICHA CATALOGRÁFICA

KATAOKA, LAYS FURTADO DE MEDEIROS SOUZA  
IMPACTOS AMBIENTAIS E PROPRIEDADES DE NANOCOMPÓSITOS DE CELULOSE DE JUTA E DE NANOPARTÍCULAS DE PRATA ADITIVADOS COM SORBITOL, GLICEROL E CARBOXIMETILCELULOSE, Distrito Federal, 2026, 155 f. (PPGCM/FT/UnB, Doutorado, Ciências Mecânicas, 2026). Tese de Doutorado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Ciências Mecânicas.

- |                               |                            |
|-------------------------------|----------------------------|
| 1. FILMES CONDUTORES          | 2. CELULOSE REGENERADA     |
| 3. ADITIVOS                   | 4. NANOPARTÍCULAS DE PRATA |
| 5. AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA |                            |

**I.ENM/FT/UnBII.Brasília**

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

KATAOKA, L. F. M. S. (2026). IMPACTOS AMBIENTAIS E PROPRIEDADES DE NANOCOMPÓSITOS DE CELULOSE DE JUTA E DE NANOPARTÍCULAS DE PRATA ADITIVADOS COM SORBITOL, GLICEROL E CARBOXIMETILCELULOSE. Tese de Doutorado em Ciências Mecânicas. Programa de Pós-Graduação em Ciências Mecânicas, Universidade de Brasília – Faculdade de Tecnologia, Brasília, DF, 155 p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Lays Furtado de Medeiros Souza Kataoka

TÍTULO: IMPACTOS AMBIENTAIS E PROPRIEDADES DE NANOCOMPÓSITOS DE CELULOSE DE JUTA E DE NANOPARTÍCULAS DE PRATA ADITIVADOS COM SORBITOL, GLICEROL E CARBOXIMETILCELULOSE

GRAU: Doutor

ANO: 2026

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta tese de doutorado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

---

Lays Furtado de Medeiros Souza Kataoka  
[lays.furtado94@gmail.com](mailto:lays.furtado94@gmail.com)

Dedico este trabalho aos meus queridos pais, Raimundo e Eleninha, às minhas filhas, Clarice e Clara, e ao meu marido, Yoshio.

*“Que Ele conceda os desejos do seu coração e lhe dê sucesso em todos os seus planos.”*  
*Salmos 20:4*

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu fiel Deus, meu criador, por tudo, por me conceder saúde e capacidade para voar mais alto.

Aos meus queridos pais, Raimundo e Eleninha, por todo o apoio, amor, carinho, confiança, dedicação e orações.

Ao meu esposo Yoshio, por todo o apoio, incentivo, amor, amizade, paciência e cumplicidade.

Às minhas queridas filhas, Clarice e Clara, por serem a razão do meu viver e por me fazer querer crescer mais para contribuir para um futuro melhor.

Aos meus verdadeiros amigos e familiares, que sempre me apoiaram na torcida pelo meu sucesso.

À minha orientadora, professora Sandra Luz, por acreditar no meu potencial, pela oportunidade, pelo apoio, pelo incentivo e pelas contribuições para esse trabalho.

À minha coorientadora, professora Maria del Pilar, por todo o apoio, incentivo, motivação e contribuição para esse trabalho.

Aos meus colegas dos Laboratórios de Biomassa, Análise Instrumental e Nanotecnologia, por todo o apoio e o conhecimento compartilhados. Em especial à Michaela, ao Lincoln e à Renata.

A todos os professores da Universidade de Brasília, por todo o conhecimento transmitido.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), pela bolsa de estudo e por todo o apoio financeiro durante a realização deste projeto.

À FAPDF (Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal), ao DPG (Decanato de Pós-Graduação/UnB) e ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), pelo apoio financeiro a este projeto.

Por fim, agradeço a todos aqueles que, de alguma forma, auxiliaram e incentivaram a elaboração deste trabalho.

## RESUMO

Diante da necessidade urgente de mitigar o impacto ambiental causado pela crescente demanda por polímeros sintéticos, este trabalho dedicou-se ao desenvolvimento de filmes condutores de celulose regenerada (RCF) extraída da fibra de juta incorporados com nanopartículas de prata (AgNP) e aditivos. Além disso, apesar de a celulose ser de origem renovável, é necessário avaliar os impactos ambientais associados à sua obtenção e à produção de materiais derivados, que envolvem o uso intenso de diversos reagentes químicos e de energia. Neste trabalho, as nanopartículas de prata foram sintetizadas com borohidreto de sódio e nitrato de prata, e os filmes nanocompósitos de celulose regenerada (RCF) foram produzidos por meio da dissolução em NaOH e da incorporação de AgNP no sistema. A incorporação de carboximetilcelulose (CMC), sorbitol e glicerol em filmes contendo 0,5% (m/m) de AgNPs foi avaliada por espectroscopia Ultravioleta-Visível (UV-Vis), análise termogravimétrica, espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e análise elétrica pelo método de Vander Pauw. Foi demonstrado que a incorporação desses componentes reduziu a estabilidade térmica dos filmes, alterando a morfologia superficial e promovendo um aumento significativo da condutividade elétrica, com incrementos superiores a 290% para CMC, 230% para glicerol e 159% para sorbitol em relação ao filme sem aditivo, destacando-se o sistema com CMC como o mais promissor em termos de desempenho elétrico. Enquanto o glicerol foi descartado devido à sua fragilidade mecânica. Adicionalmente, foi estudada a influência da variação das concentrações de CMC e de sorbitol em filmes contendo 1,8% (m/m) de AgNPs, por meio de um planejamento fatorial  $2^2$ . Também foram produzidas amostras com aumento da concentração de AgNP para 2,8% (m/m) com a melhor concentração de aditivo observada no planejamento fatorial. Esses nanocompósitos, por sua vez, foram avaliados quanto às propriedades elétricas, ópticas, morfológicas, químicas e térmicas já citadas, além de espectroscopia de energia dispersiva (EDS) e de análise dinâmico-mecânica (DMA). Além disso, foi realizada a avaliação de ciclo de vida (ACV) do berço ao portão para a produção de 1 kg de filme nanocompósito RCF-AgNP, contendo 1,8% (m/m) de AgNP e sem aditivos, considerando dois cenários de extração de celulose com diferenças nos processos finais de tratamento da fibra: C1 – acidificação a 40 °C + branqueamento; e C2 – acidificação a 80 °C. Foi comprovado estatisticamente que tanto o teor de AgNP quanto o tipo e a concentração do aditivo exercem influência significativa sobre a condutividade elétrica, que atingiu valores na ordem de  $10^1$  S/cm, posicionando os filmes como nanocompósitos condutores funcionais. Os resultados de DMA demonstraram comportamento mecânico compatível com polímeros rígidos a moderadamente flexíveis, com estabilidade de até 150 °C, enquanto a caracterização eletromagnética confirmou a ausência de blindagem significativa, um atributo favorável para aplicações em sensores, eletrônica transitória e dispositivos de baixa potência. Aliada aos resultados de atributos técnicos, a ACV evidenciou que a eletricidade é o principal contribuinte dos impactos ambientais do sistema. Observou-se uma redução de 33% na pegada de carbono do C1 para o C2, resultando em 196,7 kg CO<sub>2</sub> eq/kg. Ao considerar a incorporação em massa de CMC ou de sorbitol, observou-se, ainda, uma redução adicional no potencial de aquecimento global, proporcional à fração de material substituído. Esses achados reforçam o potencial dos nanocompósitos avaliados como alternativas promissoras para aplicação em sensores, interconexões e dispositivos eletrônicos biodegradáveis.

Palavras-chave: filmes condutores, celulose regenerada, aditivos, nanopartículas de prata, avaliação de ciclo de vida.

## ABSTRACT

Given the urgent need to mitigate the environmental impact of the growing demand for synthetic polymers, this work focused on developing conductive films from regenerated cellulose (RCF) extracted from jute fiber, incorporating silver nanoparticles (AgNPs) and additives. Furthermore, although cellulose is renewable, it is necessary to assess the environmental impacts associated with its extraction and the production of derived materials, which involve intensive use of various chemical reagents and energy. In this work, silver nanoparticles were synthesized using sodium borohydride and silver nitrate, and regenerated cellulose (RCF) nanocomposite films were produced by dissolving the RCF in NaOH and incorporating AgNPs into the system. The incorporation of carboxymethylcellulose (CMC), sorbitol, and glycerol into films containing 0.5% (w/w) AgNPs was evaluated by Ultraviolet-Visible (UV-Vis) spectroscopy, thermogravimetric analysis, Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), scanning electron microscopy (SEM), and electrical analysis using the Vander Pauw method. It was demonstrated that incorporating these components reduced the thermal stability of the films, altering the surface morphology and increasing electrical conductivity by 290% for CMC, 230% for glycerol, and 159% for sorbitol compared to the film without the additive. The CMC system stood out as the most promising in terms of electrical performance. Glycerol was discarded due to its mechanical fragility. Additionally, the influence of varying CMC and sorbitol concentrations on films containing 1.8% (w/w) AgNPs was studied using a 2<sup>2</sup> factorial design. Samples were also produced with an increased AgNP concentration of 2.8% (w/w), which showed the best additive concentration observed in the factorial design. These nanocomposites were then evaluated for the electrical, optical, morphological, chemical, and thermal properties, as well as energy dispersive spectroscopy (EDS) and dynamic mechanical analysis (DMA). Furthermore, a cradle-to-gate life cycle assessment (LCA) was performed for the production of 1 kg of RCF-AgNP nanocomposite film containing 1.8% (w/w) AgNP and without additives, considering two cellulose extraction scenarios with differences in the final fiber treatment processes: C1 – acidification at 40 °C + bleaching, and C2 – acidification at 80 °C. It was statistically proven that both the AgNP content and the type and concentration of the additive exert a significant influence on the electrical conductivity, which reached values on the order of 10<sup>0</sup> S/cm, positioning the films as functional conductive nanocomposites. DMA results demonstrated mechanical behavior compatible with rigid to moderately flexible polymers, with stability up to 150 °C, while electromagnetic characterization confirmed the absence of significant shielding, a favorable attribute for applications in sensors, transient electronics, and low-power devices. In addition to the results for technical attributes, the LCA showed that electricity is the main contributor to the system's environmental impacts. A 33% reduction in the carbon footprint was observed from C1 to C2, resulting in 196.7 kg CO<sub>2</sub> eq/kg. When considering the mass incorporation of CMC or sorbitol, an additional reduction in global warming potential is observed, proportional to the fraction of material replaced. These findings reinforce the potential of the evaluated nanocomposites as promising alternatives for application in biodegradable sensors, interconnects, and electronic devices.

**Keywords:** conductive films, regenerated cellulose, additives, silver nanoparticles, life cycle assessment.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|                                                                                                                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2.1 – Classes de materiais condutores utilizados em filmes de celulose regenerada.                                                                                                          | 22 |
| Figura 2.2 – Estrutura molecular do sorbitol, do glicerol e da carboximetilcelulose (CMC).                                                                                                         | 31 |
| Figura 2.3 - Estrutura molecular da celulose ( $n$ = grau de polimerização), adaptada de [101].                                                                                                    | 34 |
| Figura 2.4 - Esquema de classificação de solventes de celulose, adaptado de Heinze et al. (2005) [107].                                                                                            | 35 |
| Figura 2.5 - Diagrama de fases de Na-celulose de algodão imersa em soluções aquosas de NaOH, adaptado de [109].                                                                                    | 36 |
| Figura 2.6 – Configuração da medição elétrica pelo método de Van der Pauw.                                                                                                                         | 38 |
| Figura 2.7 – Metodologia do capítulo II.                                                                                                                                                           | 40 |
| Figura 2.8– Fibras de juta (a) in natura e (b) celulose branqueada moída.                                                                                                                          | 40 |
| Figura 2.9 – Aparência da solução contendo 250 ppm de AgNP.                                                                                                                                        | 41 |
| Figura 2.10 – Passos adotados para a produção de RCFs e de nanocompósitos.                                                                                                                         | 43 |
| Figura 2.11 – Conectores ligados ao filme RCF – AgNP para medição da resistência de folha pelo método de Van der Pauw no B1500A Semiconductor Device Analyzer.                                     | 45 |
| Figura 2.12– Aparência dos filmes de RCF e de nanocompósitos obtidos neste trabalho.                                                                                                               | 46 |
| Figura 2.13 – (a) Micrografia de transmissão das nanopartículas de prata e (b) medidas de 60 pontos distintos do tamanho das nanopartículas.                                                       | 46 |
| Figura 2.14 – Micrografias dos filmes RCF e dos nanocompósitos (continua).                                                                                                                         | 48 |
| Figura 2.14 – Micrografias dos filmes RCF e dos nanocompósitos (continuação).                                                                                                                      | 49 |
| Figura 2.15 – Espectros de FTIR de RCFs aditivados e de nanocompósitos contendo AgNP.                                                                                                              | 51 |
| Figura 2.16 – Espectros UV-Vis dos filmes RCFs aditivados e dos nanocompósitos com AgNP.                                                                                                           | 52 |
| Figura 2.17 – Curvas de (a1) TG e (b1) DTG dos aditivos; e de (a2) TG e (b2) DTG dos RCFs aditivados e dos nanocompósitos com AgNP.                                                                | 54 |
| Figura 3.1 - Interpretação geométrica dos efeitos no planejamento $2^2$ . Os principais efeitos são contrastes entre arestas opostas. O efeito de interação é o contraste entre as duas diagonais. | 62 |
| Figura 3.2 - Esquema da metodologia adotada no Capítulo III.                                                                                                                                       | 63 |
| Figura 3.3 – (a) Porta-amostra para análise de blindagem EMI; (b) Porta-amostra com filme nanocompósito; e (c) Porta-amostra fechada para análise.                                                 | 68 |
| Figura 3.4 – Gráfico de resistência de folha em função da corrente para as amostras do planejamento fatorial.                                                                                      | 71 |
| Figura 3.5 – Efeito de interação nas respostas de condutividade.                                                                                                                                   | 74 |
| Figura 3.6 – Gráficos de diagnóstico do modelo previsto para a condutividade dos nanocompósitos; (a) Q-Q plot dos resíduos, (b) Resíduos studentizados vs ajustados.                               | 75 |
| Figura 3.7 - Gráfico de Tukey para amostras do planejamento fatorial e com aumento do teor de AgNPs.                                                                                               | 77 |
| Figura 3.8 - Gráfico de blindagem de interferência eletromagnética dos filmes nanocompósitos.                                                                                                      | 79 |
| Figura 3.9 – Espectros FTIR dos filmes nanocompósitos.                                                                                                                                             | 82 |
| Figura 3.10 – Aparência dos filmes nanocompósitos.                                                                                                                                                 | 83 |
| Figura 3.10 – Micrografias de MEV e aparência dos filmes nanocompósitos (continua).                                                                                                                | 84 |
| Figura 3.10 – Micrografias de MEV e aparência dos filmes nanocompósitos (continuação).                                                                                                             | 85 |

|                                                                                                                                                                                                           |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 3.11 – Mapeamento dos principais elementos dos filmes nanocompósitos por meio de EDS: Sódio (Na) representado pelo laranja, Oxigênio (O) pelo vermelho e prata (Ag) pelo verde (continua).....     | 87  |
| Figura 3.11 – Mapeamento dos principais elementos dos filmes nanocompósitos por meio de EDS: Sódio (Na) representado pelo laranja, Oxigênio (O) pelo vermelho e prata (Ag) pelo verde (continuação). .... | 88  |
| Figura 3.12 – Espectros UV-Vis dos filmes nanocompósitos.....                                                                                                                                             | 90  |
| Figura 3.13 – Curvas de (a) TG e (b) DTG dos filmes nanocompósitos. ....                                                                                                                                  | 92  |
| Figura 3.14 – Curvas de DMA dos filmes nanocompósitos.....                                                                                                                                                | 94  |
| Figura 4.1 - Etapas de uma avaliação do ciclo de vida conforme a ISO 14044 e suas aplicações.....                                                                                                         | 100 |
| Figura 4.2 – Fluxos e processos para a obtenção de filmes nanocompósitos. Os dois cenários de produção de celulose são apresentados. ....                                                                 | 105 |
| Figura 4.3 – Impacto do potencial de aquecimento global do RCF – AgNP em ambos os cenários.....                                                                                                           | 112 |
| Figura 4.4 – Impacto potencial da eutrofização do RCF – AgNP em ambos os cenários....                                                                                                                     | 114 |
| Figura 4.5 – Impacto do potencial de acidificação do RCF – AgNP em ambos os cenários. ....                                                                                                                | 115 |
| Figura 4.6 – Demanda de energia do RCF – AgNP para ambos os cenários.....                                                                                                                                 | 117 |
| Figura 4.7 – Potencial de aquecimento global com inserção de CMC ou sorbitol.....                                                                                                                         | 119 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                                                                                                                           |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 2.1 - Estudos que empregaram RCF associado a diferentes materiais condutores em dispositivos eletrônicos, bem como alguns resultados de pesquisas sobre a influência do teor de material condutor nas propriedades elétricas. .... | 23  |
| Tabela 2.2 – Resumo de alguns estudos da literatura sobre filmes de celulose regenerada contendo prata. ....                                                                                                                              | 28  |
| Tabela 2.3 – Resumos de alguns estudos da literatura que utilizaram aditivos em filmes de celulose regenerada. ....                                                                                                                       | 29  |
| Tabela 2.4 - Composição dos filmes de celulose regenerada preparados no Capítulo II. ....                                                                                                                                                 | 42  |
| Tabela 2.5 – Medidas de transmitância a 550 nm: média e desvio padrão dos filmes. ....                                                                                                                                                    | 53  |
| Tabela 2.6 – Temperaturas de estabilidade térmica e de degradação dos aditivos e dos filmes regenerados, com e sem aditivos e AgNP. ....                                                                                                  | 55  |
| Tabela 2.7 – Dados médios de resistência de folha, espessura média, resistividade e condutividade de três amostras de cada nanocompósito, com medidas realizadas em quadruplicata. ....                                                   | 57  |
| Tabela 3.1 - Descrição do Projeto Fatorial, Variáveis Experimentais e Níveis dos Fatores. .                                                                                                                                               | 64  |
| Tabela 3.2 - Composição dos filmes nanocompósitos. ....                                                                                                                                                                                   | 67  |
| Tabela 3.3 – Propriedades elétricas dos nanocompósitos. ....                                                                                                                                                                              | 72  |
| Tabela 3.4 - Resultados dos efeitos principais e de interação e da ANOVA do modelo adquirido. ....                                                                                                                                        | 73  |
| Tabela 3.5 – Propriedades térmicas e dinâmico-mecânicas dos filmes nanocompósitos. ....                                                                                                                                                   | 92  |
| Tabela 4.1 - Entradas da ACV para o filme nanocompósito 1 kg de RCF- AgNP. ....                                                                                                                                                           | 108 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

**ACV:** Avaliação de ciclo de vida  
**AgNP:** Nanopartículas de prata  
**AGU:** Unidade de anidrogucose  
**AICV:** Avaliação de impacto de ciclo de vida  
**ANOVA:** Análise de variância  
**ASTM:** American Society for Testing and Materials  
**CMC:** Carboximetilcelulose de sódio  
**DMA:** Análise dinâmico-mecânica  
**DSC:** Calorimetria exploratória diferencial  
**DTG:** Análise termogravimétrica derivada  
**EMBRAPA:** Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária  
**FT:** Faculdade de Tecnologia  
**FTIR:** Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier  
**GP:** Grau de polimerização  
**ICV:** Inventário do ciclo de vida  
**MET:** Microscopia eletrônica de transmissão  
**MEV:** Microscopia eletrônica de varredura  
**PA:** Potencial de acidificação  
**PAG:** Potencial de aquecimento global  
**PE:** Potencial de eutrofização  
**RCF:** Filme de celulose regenerada  
**TG:** Termogravimetria  
**TGA:** Análise termogravimétrica  
**UnB:** Universidade de Brasília  
**UV-Vis:** Espectroscopia no ultravioleta visível

## LISTA DE SÍMBOLOS

**%m/m:** concentração percentual massa por massa

**%m/v:** concentração percentual massa por volume

**°C:** grau Celsius (unidade de temperatura)

**CH<sub>3</sub>COOH:** ácido acético glacial

**CO<sub>2</sub>:** dióxido de carbono

**cm:** centímetro

**E':** Módulo de armazenamento

**E'':** Módulo de perda

**g:** grama

**g/mol:** grama por mol (unidade de peso molecular)

**h:** hora

**H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>:** ácido sulfúrico

**KOH:** hidróxido de potássio

**m:** metro

**mg:** miligrama

**min:** minuto

**mL:** mililitro

**mm:** milímetro

**N:** nitrogênio

**N<sub>2</sub>:** gás nitrogênio

**NaClO<sub>2</sub>:** clorito de sódio

**NaOH:** hidróxido de sódio

**nm:** nanômetro

**O<sub>2</sub>:** oxigênio

**P.A.:** reagente de grau analítico

**R<sup>2</sup>:** coeficiente de determinação

**rpm:** rotações por minuto

**R<sub>s</sub>:** resistência de folha

**β-(1-4):** ligações glicosídicas

**μm:** micrometro

**ρ:** resistividade

**σ:** condutividade

**Ω/□:** ohms por quadrado

**S/cm:** siemens por centímetro

**u. a.:** unidade adimensional

## SUMÁRIO

|                                                                                                                                                   |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. CAPÍTULO I – DESCRIÇÃO GERAL DO TRABALHO .....</b>                                                                                          | <b>16</b> |
| 1.1. INTRODUÇÃO DO CAPÍTULO I .....                                                                                                               | 16        |
| 1.2. OBJETIVOS .....                                                                                                                              | 18        |
| 1.1.1. Objetivo Geral .....                                                                                                                       | 18        |
| 1.1.2. Objetivos Específicos .....                                                                                                                | 18        |
| 1.3. ESTRUTURA DA TESE.....                                                                                                                       | 18        |
| <b>2. CAPÍTULO II – FILMES NANOCOMPÓSITOS DE CELULOSE REGENERADA E NANOPARTÍCULAS DE PRATA COM INSERÇÃO DE CMC, SORBITOL E GLICEROL .....</b>     | <b>20</b> |
| 2.1. INTRODUÇÃO DO CAPÍTULO II .....                                                                                                              | 20        |
| 2.2. REVISÃO DO CAPÍTULO II .....                                                                                                                 | 21        |
| 2.2.1. Filmes Condutores de Celulose Regenerada .....                                                                                             | 21        |
| 2.2.2. Nanopartículas de Prata (AgNP) .....                                                                                                       | 25        |
| 2.2.3. O Uso de Aditivos em Filmes de Celulose Regenerada .....                                                                                   | 29        |
| 2.2.4. Solubilidade e Regeneração de Celulose .....                                                                                               | 32        |
| 2.2.5. Medidas Elétricas e o Método de <i>Van der Pauw</i> para Filmes Finos .....                                                                | 37        |
| 2.3. METODOLOGIA DO CAPÍTULO II .....                                                                                                             | 40        |
| 2.3.1. Materiais .....                                                                                                                            | 40        |
| 2.3.2. Síntese das nanopartículas de prata .....                                                                                                  | 41        |
| 2.3.3. Microscopia Eletrônica de Transmissão (MET) das Nanopartículas de Prata .....                                                              | 41        |
| 2.3.4. Obtenção dos Filmes de Celulose Regenerada .....                                                                                           | 41        |
| 2.3.5. Determinação da Transmitância dos Filmes por Espectroscopia Ultravioleta-Visível (UV-Vis) .....                                            | 43        |
| 2.3.6. Caracterização Térmica dos Filmes por Análise Termogravimétrica (TGA) .....                                                                | 43        |
| 2.3.7. Caracterização Química dos Filmes por Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR).....                              | 44        |
| 2.3.8. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) .....                                                                                            | 44        |
| 2.3.9. Resistência de Folha dos Nanocompósitos pelo Método de <i>Vander Pauw</i> .....                                                            | 44        |
| 2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....                                                                                                                  | 45        |
| 2.3.1. Caracterização Morfológica das Nanopartículas de Prata (AgNP), dos RCFs Aditivados e dos Filmes Nanocompósitos.....                        | 45        |
| 2.3.2. Caracterização dos RCFs Aditivados e dos Filmes Nanocompósitos por Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)..... | 50        |
| 2.3.3. Caracterização dos RCFs Aditivados e dos Filmes Nanocompósitos por UV-Visível .....                                                        | 52        |
| 2.3.4. Caracterização Térmica (TG/DTG) dos Aditivos, RCFs Aditivados e dos Filmes Nanocompósitos .....                                            | 54        |
| 2.3.5. Caracterização Elétrica dos Filmes Nanocompósitos pelo Método de <i>Van der Pauw</i> .....                                                 | 56        |
| 2.4. CONCLUSÕES DO CAPÍTULO II .....                                                                                                              | 58        |
| <b>CAPÍTULO III – ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA CONCENTRAÇÃO E TIPO DE ADITIVO NOS NANOCOMPÓSITOS .....</b>                                             | <b>60</b> |
| 2.4. INTRODUÇÃO DO CAPÍTULO III .....                                                                                                             | 60        |
| 2.5. REVISÃO DO CAPÍTULO III .....                                                                                                                | 61        |
| 2.5.1. Planejamento Experimental para Avaliação da Influência de Variáveis na Produção de Filmes Nanocompósitos .....                             | 61        |

|                                                                                                                                                           |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>2.6. METODOLOGIA DO CAPÍTULO III .....</b>                                                                                                             | <b>63</b> |
| 2.6.1. Materiais .....                                                                                                                                    | 63        |
| 2.6.2. Planejamento Fatorial 2 <sup>2</sup> para Produção dos Filmes Nanocompósitos .....                                                                 | 63        |
| 2.6.3. Análise Estatística .....                                                                                                                          | 64        |
| 2.6.4. Obtenção de Celulose.....                                                                                                                          | 66        |
| 2.6.5. Síntese das Nanopartículas de Prata.....                                                                                                           | 66        |
| 2.6.6. Produção dos Filmes Nanocompósitos .....                                                                                                           | 67        |
| 2.6.7. Caracterização Elétrica dos Filmes Nanocompósitos .....                                                                                            | 67        |
| 2.6.8. Caracterização dos Nanocompósitos por Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR).....                                      | 69        |
| 2.6.9. Caracterização Morfológica dos Nanocompósitos por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e por Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS) ..... | 69        |
| 2.6.10. Determinação da Transmitância dos Filmes por Espectroscopia Ultravioleta-Visível (UV-Vis) .....                                                   | 69        |
| 2.6.11. Caracterização Térmica dos Nanocompósitos por Análise Termogravimétrica (TGA) .....                                                               | 70        |
| 2.6.12. Propriedades Mecânicas dos Filmes Nanocompósitos por Análise Dinâmico-Mecânica (DMA).....                                                         | 70        |
| <b>2.7. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>                                                                                                                   | <b>70</b> |
| 2.7.1. Caracterização Elétrica dos Filmes Nanocompósitos e Avaliação Estatística do Planejamento Experimental 2 <sup>2</sup> .....                        | 70        |
| 2.7.2. Prospecção de Aplicação dos Filmes Nanocompósitos para Blindagem de Interferência Eletromagnética .....                                            | 78        |
| 2.7.3. Análise dos Nanocompósitos por Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR).....                                             | 81        |
| 2.7.4. Análise Morfológica e Óptica dos Filmes Nanocompósitos .....                                                                                       | 82        |
| 2.7.5. Análise Termogravimétrica (TGA) e Análise Dinâmico-Mecânica (DMA) dos Filmes Nanocompósitos .....                                                  | 91        |
| <b>2.8. CONCLUSÃO DO CAPÍTULO III .....</b>                                                                                                               | <b>96</b> |
| <b>3. CAPÍTULO IV – IMPACTO AMBIENTAL DO FILME NANOCOMPÓSITO DE CELULOSE REGENERADA COM NANOPARTÍCULAS DE PRATA .....</b>                                 | <b>98</b> |
| 3.1. INTRODUÇÃO DO CAPÍTULO IV.....                                                                                                                       | 98        |
| 3.2. REVISÃO DO CAPÍTULO IV .....                                                                                                                         | 99        |
| 3.2.1. Estudo de Avaliação de Ciclo de Vida Aplicado a Nanocompósitos .....                                                                               | 99        |
| 3.2.2. Impactos Ambientais da Produção de CMC e Sorbitol .....                                                                                            | 102       |
| 3.3. METODOLOGIA DO CAPÍTULO IV .....                                                                                                                     | 103       |
| Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) da Obtenção do Nanocompósito RCF – AgNP .....                                                                            | 103       |
| 3.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....                                                                                                                          | 110       |
| 3.4.1. Potencial de Aquecimento Global do RCF-AgNP .....                                                                                                  | 112       |
| 3.4.2. Potencial de Eutrofização do RCF-AgNP .....                                                                                                        | 113       |
| 3.4.3. Potencial de Acidificação do RCF-AgNP .....                                                                                                        | 115       |
| 3.4.4. Demanda de Energia do RCF-AgNP.....                                                                                                                | 116       |
| 3.4.5. Influência da Adição de CMC ou Sorbitol nos Impactos Ambientais do RCF-AgNP .....                                                                  | 118       |
| 3.4.6. Prospecção de Melhoria dos Impactos Ambientais dos Nanocompósitos .....                                                                            | 120       |
| 3.5. CONCLUSÃO DO CAPÍTULO IV.....                                                                                                                        | 122       |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....                                                                                                                          | 123       |
| APÊNDICE .....                                                                                                                                            | 142       |

## CAPÍTULO I – DESCRIÇÃO GERAL DO TRABALHO

---

### 1.1. INTRODUÇÃO DO CAPÍTULO I

Preocupações relativas ao meio ambiente e à economia têm impulsionado pesquisas no campo do *design* de novos materiais para aplicação em dispositivos eletrônicos [1]. Os dispositivos eletrônicos são compostos principalmente por polímeros de origem fóssil e por vidros rígidos e densos, o que acarreta impactos ambientais por meio do consumo de recursos não renováveis [2]. Desta forma, biopolímeros baseados em recursos naturais renováveis podem mitigar os impactos ambientais no fim de vida desses dispositivos [1], [3], além de oferecer propriedades atrativas, como não toxicidade, biodegradabilidade, compostabilidade, biocompatibilidade e capacidade de formação de filmes [4], [5].

Dentre os biopolímeros, a celulose é abundante, renovável e de origem natural, podendo ser obtida a partir de fibras naturais. Além disso, pode ser utilizada na produção de filmes condutores aplicados em sensores, transistores, células solares, supercapacitores, blindagem eletromagnética e outros elementos eletrônicos [5].

Para a fabricação de filmes condutores de celulose regenerada, grande parte dos estudos na literatura utiliza a celulose comercial ou a celulose derivada de outras fontes, como o algodão [6], [7]. Dentre as fontes de celulose, a juta (*Corchorus capsularis*) é uma fibra natural abundante e barata, destacando-se como uma das fontes mais ricas em celulose [8]. Em trabalho anterior, a extração da celulose a partir da juta mostrou-se promissora para a produção de filmes condutores [9]. Além desse trabalho, não foram identificados na literatura outros estudos envolvendo a juta como fonte de celulose para produção de filmes condutores.

Além do uso de fontes comuns de celulose, os estudos realizam a dissolução da celulose utilizando solventes derivatizantes [10], [11], à base de líquido iônico [7], [12], ou o uso de bases contendo aditivos [13], [14]. Dentro desse contexto, os sistemas que utilizam soluções alcalinas, como hidróxido de sódio (NaOH), são considerados econômicos, não havendo uso ou produção de substâncias tóxicas nem de derivados ao longo do processo [15].

A fim de propiciar condutividade nos filmes de celulose regenerada, materiais condutores, como as nanopartículas de prata, podem ser incorporados durante o processo de regeneração da celulose, resultando em materiais com excelente condutividade [9]. Os filmes condutores de celulose regenerada podem integrar a montagem de dispositivos eletrônicos desde unidades eletrônicas básicas até dispositivos eletrônicos integrados [5], [10], [11].

Em trabalho anterior, utilizado como base para o prosseguimento do tema desta pesquisa [9], os filmes condutores apresentaram condutividade na ordem de grandeza  $10^{-2}$  S/cm, o que pode indicar potencial para aplicações em dispositivos eletrônicos, como em

blindagem de interferência eletromagnética [10], [11]. Apesar dos resultados de condutividade, a estrutura dos filmes se mostrou frágil, pois, em geral, as propriedades mecânicas dos filmes obtidos com solventes aquosos à base de NaOH, mesmo quando aditivados, são afetadas [9], [15]. Desta maneira, a incorporação de aditivos nos filmes pode ser uma alternativa para melhorar sua flexibilidade, ductilidade e resistência, ao mesmo tempo em que reduz sua rigidez e fragilidade [16].

A seleção adequada dos aditivos é influenciada por diversos fatores, como a compatibilidade entre os polímeros empregados e as propriedades finais desejadas [17]. Dentre os aditivos, o glicerol e o sorbitol são plastificantes, e a carboximetilcelulose sódica (CMC) é um polímero, todos derivados de fontes renováveis e que podem ser utilizados na obtenção de filmes de celulose regenerada [18].

Em filmes condutores de celulose regenerada, a inserção de aditivos e as respectivas concentrações devem ser foco de estudo, pois podem promover mudanças nas propriedades mecânicas, na transmitância, na composição química e na estabilidade térmica, além de alterar a condutividade [19]. Ferramentas como análises estatísticas e planejamento fatorial podem ser utilizadas na avaliação desses múltiplos fatores, determinando a influência deles sobre uma resposta de interesse [20]. Dessa maneira, ajustes de variáveis que levam à otimização do processo podem trazer benefícios funcionais, econômicos e ambientais [21], [22].

Esses filmes condutores de celulose regenerada podem ser reconhecidos como uma escolha mais sustentável em comparação aos polímeros petroquímicos, devido à utilização de matérias-primas renováveis em sua fabricação e à capacidade de biodegradação. No entanto, é essencial compreender que as práticas agrícolas empregadas no cultivo dessas matérias-primas, juntamente com a demanda energética, o uso de produtos químicos no beneficiamento e a produção de filmes, podem ter impactos ambientais semelhantes aos dos polímeros sintéticos [23], [24]. Portanto, é crucial reconhecer que o uso de recursos renováveis requer um equilíbrio cuidadoso [1], [3]. Nesse contexto, a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) pode ser empregada para avaliar a produção de filmes condutores de celulose regenerada, permitindo a análise dos impactos ambientais ao longo de todo o ciclo de vida [25].

Assim, em vista do potencial da celulose para a confecção de materiais com propriedades únicas em relação à literatura recente, filmes de celulose regenerada foram preparados a partir da fibra de juta, contendo nanopartículas de prata (AgNPs) e aditivos. Neste contexto, o efeito do aditivo sobre as propriedades elétricas, ópticas, morfológicas, químicas e térmicas foi estudado. E, como os processos para a obtenção de nanocompósitos demandam várias etapas, envolvendo agentes químicos e alto consumo energético, uma ACV

do berço ao portão para a obtenção de 1 kg de filme nanocompósito de celulose regenerada com nanopartículas de prata foi desenvolvida para estudar seus impactos ambientais.

## **1.2. OBJETIVOS**

### **1.1.1. Objetivo Geral**

Desenvolver filmes condutores de celulose regenerada, com a incorporação de nanopartículas de prata (AgNP) e de aditivos (carboximetilcelulose, glicerol e sorbitol), a fim de avaliar seu potencial para a fabricação de dispositivos condutores.

### **1.1.2. Objetivos Específicos**

Os objetivos específicos desse trabalho foram:

- Estudar a influência dos aditivos sobre as propriedades físicas, químicas, ópticas, mecânicas e elétricas dos filmes de nanocompósitos de celulose regenerada com AgNP;
- Estudar a influência do teor de aditivo (carboximetilcelulose sódica, glicerol e sorbitol), por meio de análise estatística sobre as propriedades do filme de nanocompósito;
- Estudar o potencial de aplicação do nanocompósito de celulose regenerada como material condutor;
- Estudar o impacto ambiental do filme de nanocompósito desenvolvido, desde a produção da juta até a obtenção do material.

## **1.3. ESTRUTURA DA TESE**

Esta tese está estruturada em quatro capítulos:

- **Capítulo I:** Abordou a descrição geral do trabalho, incluindo a introdução, a justificativa e o contexto da pesquisa, o objetivo geral, os objetivos específicos e a estrutura da tese.
- **Capítulo II:** Abordou o estudo da incorporação de carboximetilcelulose sódica (CMC), sorbitol e glicerol em filmes nanocompósitos de celulose regenerada contendo 0,5% de nanopartículas de prata (m/m), com ênfase na condutividade dos filmes. As nanopartículas de prata foram caracterizadas nesse capítulo. Os resultados descartaram o uso de glicerol como aditivo e indicaram potencial para o uso de CMC e de sorbitol.

- **Capítulo III:** Abordou o estudo da influência da variação da concentração de CMC e de sorbitol sobre a condutividade dos filmes nanocompósitos com 1,8% por meio de um planejamento fatorial  $2^2$ . Como o tipo e a concentração do aditivo influenciaram as propriedades elétricas dos filmes, também foram produzidas amostras com aumento de AgNP para 2,8% (m/m), com a melhor concentração de aditivo observada no planejamento fatorial. Os filmes foram caracterizados por meio de técnicas físicas e químicas.
- **Capítulo IV:** Abordou a avaliação do impacto ambiental do berço ao portão para 1 kg de filme nanocompósito de celulose regenerada contendo 1,8% (m/m) de nanopartículas de prata (AgNP), utilizando dois cenários de extração de celulose de juta.

## **CAPÍTULO II – FILMES NANOCOMPÓSITOS DE CELULOSE REGENERADA E NANOPARTÍCULAS DE PRATA COM INSERÇÃO DE CMC, SORBITOL E GLICEROL**

---

### **2.1. INTRODUÇÃO DO CAPÍTULO II**

O aumento do uso de dispositivos eletrônicos tem impulsionado a pesquisa de materiais sustentáveis como alternativa aos polímeros sintéticos tradicionalmente empregados na fabricação desses dispositivos. Embora esses polímeros apresentem propriedades funcionais relevantes, sua origem a partir de recursos não renováveis e sua baixa biodegradabilidade os tornam ambientalmente problemáticos, contribuindo para impactos significativos ao meio ambiente [2], [5]. Nesse cenário, os filmes de celulose regenerada (RCF) surgem como uma opção promissora, pois combinam a abundância e a renovabilidade da celulose com a possibilidade de obter materiais funcionais de baixo impacto ambiental.

Os RCFs são obtidos por meio da dissolução da celulose em solventes específicos e da subsequente regeneração em banhos coagulantes, resultando em uma matriz polimérica contínua [26]. Essa estrutura pode ser funcionalizada tanto durante a preparação quanto após a secagem do filme, por meio da incorporação de materiais condutores. Entre os aditivos mais relevantes estão os metais condutores e suas nanopartículas, como a prata (AgNPs), que apresentam elevada mobilidade eletrônica e, consequentemente, conferem condutividade elétrica ao sistema. Estudos prévios [9] demonstraram que a incorporação de nanopartículas de prata em RCFs pode elevar a condutividade para a ordem de  $10^{-2}$  S/cm, ainda que acompanhada de redução na transmitância óptica, evidenciando a interação efetiva entre as nanopartículas e a matriz polimérica. Esses resultados apontam para um material com potencial de aplicação em dispositivos eletrônicos flexíveis e sustentáveis.

Apesar dessas vantagens, o uso de AgNPs em filmes de celulose regenerada revelou limitações significativas nas propriedades mecânicas. A fragilidade estrutural, visualmente observada, compromete a aplicabilidade dos filmes, sobretudo em dispositivos que exigem flexibilidade. Nesse contexto, a incorporação de aditivos, como plastificantes ou outros polímeros, constitui uma estratégia relevante para superar essas deficiências. Plastificantes, ao se intercalarem entre as cadeias poliméricas da celulose, reduzem as interações intermoleculares secundárias, aumentando a distância entre as cadeias e promovendo maior mobilidade molecular. Como consequência, há aumento da flexibilidade, ductilidade e tenacidade, com redução da rigidez e da fragilidade do material [16].

A escolha do aditivo, no entanto, deve considerar fatores como compatibilidade química com a matriz polimérica e as propriedades finais almejadas [17]. Além de melhorar as características mecânicas, os aditivos podem modificar parâmetros essenciais, como a

transmitância, a estabilidade térmica, a composição química e a condutividade elétrica [19]. Entre os aditivos mais investigados para uso em RCFs, destacam-se compostos de origem renovável, como glicerol e sorbitol, que são utilizados como plastificantes, e carboximetilcelulose sódica (CMC), que podem atender aos requisitos de sustentabilidade e de baixo impacto ambiental [18].

A literatura, entretanto, ainda apresenta lacunas na compreensão do efeito dos aditivos sobre as propriedades condutoras de filmes de celulose regenerada contendo nanopartículas metálicas. A avaliação conjunta da incorporação de AgNPs e aditivos torna-se, portanto, essencial para estabelecer correlações entre propriedades mecânicas, ópticas e elétricas, possibilitando o desenvolvimento de materiais otimizados para aplicações tecnológicas. Nesse sentido, a caracterização detalhada de parâmetros elétricos, como resistência de folha, resistividade e condutividade, é indispensável para compreender a influência desses aditivos e, assim, consolidar o potencial dos RCFs como substratos sustentáveis para dispositivos eletrônicos avançados.

## **2.2. REVISÃO DO CAPÍTULO II**

### **2.2.1. Filmes Condutores de Celulose Regenerada**

Atualmente, filmes condutores de celulose regenerada estão sendo desenvolvidos e estudados para aplicação em dispositivos eletrônicos, a fim de substituir o uso de polímeros sintéticos e de vidros rígidos de alta densidade. Estes materiais sintéticos causam impactos ao meio ambiente devido ao consumo acelerado de recursos não renováveis e não biodegradáveis [2], [5].

Os filmes de celulose regenerada (RCFs) apresentam vantagens como transparência, flexibilidade, superfície lisa e baixo peso [27]. São fabricados por meio de um processo de dissolução da celulose em um solvente e de regeneração em um banho coagulante [26]. Durante esse processo, ou após a secagem do filme, materiais condutores podem ser inseridos para conferir condutividade ao filme. A Figura 2.1 apresenta as principais categorias e os materiais condutores que podem ser incorporados à estrutura dos filmes de celulose regenerada.

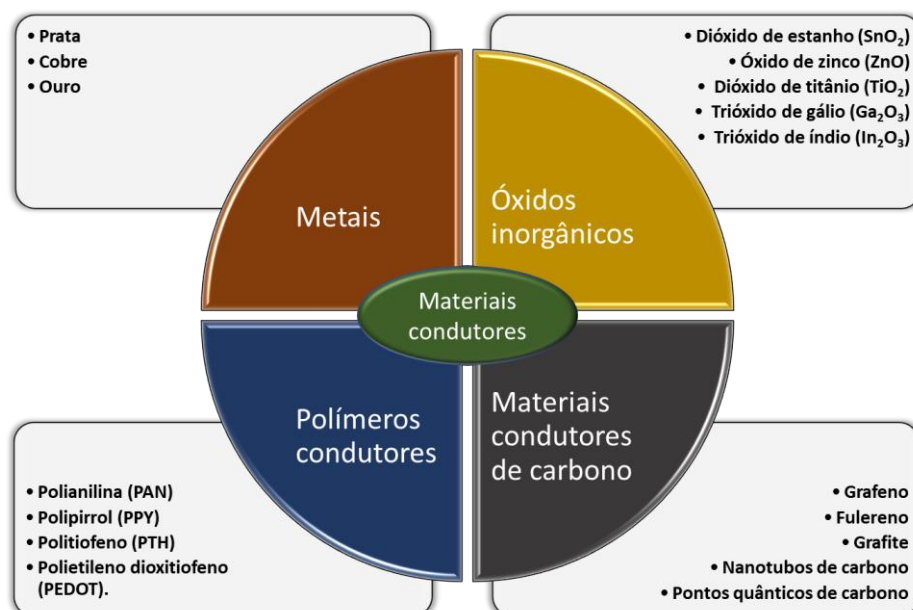


Figura 2.1 – Classes de materiais condutores utilizados em filmes de celulose regenerada.

Dentre os materiais aplicados em RCFs da Figura 2.1, os mais utilizados são os de metais condutores, nanopartículas ou nanofios, pois apresentam elétrons capazes de se mover livremente no sistema e, portanto, resultam em alta condutividade. Porém, devido ao brilho metálico, os RCFs baseados em materiais metálicos podem apresentar baixa transmitância. Os óxidos inorgânicos condutores podem ser obtidos dopando oxigênio nos materiais metálicos; no entanto, esses materiais são intrinsecamente rígidos, o que pode resultar em menor compatibilidade com substratos flexíveis para a fabricação de dispositivos eletrônicos flexíveis. Já os polímeros condutores possuem macromoléculas com elevadas densidades de ligações  $\pi$  nas cadeias principais e podem ser aplicados em RCFs, apresentando excelente flexibilidade. Embora apresentem limitações em relação aos demais materiais condutores, como condutividade e transmitância relativamente baixas. Os materiais condutores de carbono são compostos derivados principalmente do grafeno para a composição de outros materiais; porém, em relação aos metais, apresentam condutividade moderada em aplicações em RCFs [5].

A escolha do material condutor deve estar de acordo com as propriedades desejadas na produção do filme, visto que podem interferir na transmitância, na flexibilidade e na condutividade. Esses RCFs condutores podem integrar a montagem de dispositivos eletrônicos desde unidades eletrônicas básicas até dispositivos eletrônicos integrados [5], [6], [10], [28], [29]. A Tabela 2.1 apresenta alguns exemplos de estudos que empregaram filmes condutores de celulose regenerada em dispositivos eletrônicos. Além disso, apresenta estudos realizados com variações no teor de materiais condutores e na faixa de condutividade para RCF.

Tabela 2.1 - Estudos que empregaram RCF associado a diferentes materiais condutores em dispositivos eletrônicos, bem como alguns resultados de pesquisas sobre a influência do teor de material condutor nas propriedades elétricas.

| Autor                      | Dispositivo Eletrônico                     | Material Conductor                                                                      |
|----------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| Guo et. al (2024) [30]     | Blindagem de interferência eletromagnética | Nanofios de prata                                                                       |
| X. Wang et al. (2020) [31] | Sensor elétrico de deformação              | Nanofios de prata e poli(3,4-etilenodioxitiofeno) (PEDOT)                               |
| Zeng et al. (2020) [32]    | Blindagem de interferência eletromagnética | Nanofios de prata                                                                       |
| Ma et al. (2019) [28]      | Célula solar                               | Nanofios de prata (AgNW)                                                                |
| J. Li et al. (2018) [33]   | Célula solar sensibilizada por corante     | Óxido de índio-estanho (ITO)                                                            |
| Zhao et al. (2017) [34]    | Micro-supercapacitor planar (MSC)          | Material de carbono                                                                     |
| Lee et al. (2017) [35]     | Célula solar sensibilizada por corante     | Pontos de grafeno e poli(3,4-etilenodioxitiofeno):sulfonato de poliestireno (PEDOT:PSS) |
| Mun et al. (2016) [6]      | Sensor elétrico de deformação              | Nanofios de prata                                                                       |
| Kim et al. (2013) [36]     | Transistor                                 | Nanotubos de carbono                                                                    |
| Suresha et al. (2008) [37] | Antena retificada e transdutor interdital  | Nanotubos de carbono                                                                    |

| Autor                     | Solvente/ Material condutor                                                                                                 | Principais Resultados                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|---------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Zhang et al. (2024) [38]  | <b>Solvente:</b> Líquido iônico<br><b>Material Conductor:</b> Nanofios de prata                                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>A resistência de folha do filme foi de aproximadamente <math>\sim 45 \Omega/\text{sq}</math></li> <li>O filme teve transmitância de aproximadamente <math>\sim 86\%</math>, e excelente estabilidade em flexão (1000 ciclos)</li> <li>Resultados compatíveis para aplicação em e eletrônica flexível e dispositivos optoeletrônicos</li> </ul>                                                                                                                     |
| Chen et al. (2015) [11]   | <b>Solvente:</b> Cloreto de 1-butil-3-metilimidazólio (BmimCl)<br><b>Material Conductor:</b> Grafite (GP), polipirrol (PPy) | <ul style="list-style-type: none"> <li>A condutividade dos filmes de celulose/grafite/polipirrol foi aumentada com o aumento do teor de grafite;</li> <li>O filme com 0% em massa de grafite obteve condutividade de <math>8 \times 10^{-2} \text{ S/cm}</math>;</li> <li>O filme com 200% em massa de grafite obteve condutividade de <math>0,55 \text{ S/cm}</math>.</li> </ul>                                                                                                                         |
| Tian et al. (2017) [14]   | <b>Solvente:</b> LiOH/ureia<br><b>Material Conductor:</b> Polianilina (PANI), AgNPs                                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>O filme compósito de celulose regenerada/PANI obteve a condutividade de <math>3,45 \times 10^{-2} \text{ S/cm}</math>;</li> <li>Os filmes compósitos de celulose regenerada/PANI/AgNP contendo 0,46% em massa de AgNP obteve condutividade de <math>4,59 \times 10^{-2} \text{ S/cm}</math>;</li> <li>Quando o conteúdo de nanopartículas de AgNP foi aumentado para 4,54% em massa, a condutividade foi aumentada para <math>0,94 \text{ S/cm}</math>.</li> </ul> |
| S. Liu et al. (2014) [39] | <b>Solvente:</b> NaOH/ureia<br><b>Material Conductor:</b> Polianilina (PANI)                                                | <ul style="list-style-type: none"> <li>Os filmes compósitos celulose regenera/PANI obteve condutividade de <math>6,2 \times 10^{-4} \text{ S/cm}</math> para o teor de 15% em massa de PANI;</li> <li>Para o teor de 24,6% em massa de PANI a condutividade passou a ser de <math>6 \times 10^{-2} \text{ S/cm}</math>.</li> </ul>                                                                                                                                                                        |
| Huang et al. (2015) [29]  | <b>Solvente:</b> NaOH/ureia<br><b>Material Conductor:</b> Nanotubos de carbono                                              | <ul style="list-style-type: none"> <li>A condutividade dos filmes aumentou com o teor de nanotubos de carbono;</li> <li>O filme contendo 5% em massa de nanotubo de carbono obteve a condutividade de <math>5,6 \times 10^{-2} \text{ S/cm}</math>;</li> <li>O filme contendo 10% em massa de nanotubo de carbono obteve a condutividade de <math>7,2 \times 10^{-2} \text{ S/cm}</math>.</li> </ul>                                                                                                      |

|                                      |                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|--------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Lee and Jeong (2015) [10]            | <b>Solvente:</b> DMAc/LiCl<br><b>Material Condutor:</b> Nanotubos de carbono de paredes múltiplas (MWCNT) | <ul style="list-style-type: none"> <li>Houve aumento da condutividade com o aumento do teor de nanotubo de carbono de paredes múltipla;</li> <li>A condutividade passou de <math>10^{-3}</math> para <math>\sim 10^{-1}</math> S/cm com o aumento do teor de MWCNT de 3,0% para 10,0% em massa.</li> </ul> |
| Nayak, Mahadeva, and Kim (2012) [40] | <b>Solvente:</b> DMAc/LiCl<br><b>Material Condutor:</b> PPy                                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>O filme resultante com o PPy de três camadas apresentou uma condutividade de 0,042 S/cm.</li> </ul>                                                                                                                                                                 |
| Liu et al. (2014) [39]               | <b>Solvente:</b> LiOH/ureia<br><b>Material Condutor:</b> PANI                                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>Os filmes compostos de PANI/celulose com teor de PANI de 24,6% em massa exibiram condutividade elétrica de 0,06 S/cm;</li> <li>Essa faixa de condutividade permite o filme funcionar como um circuito condutor para iluminar um LED.</li> </ul>                     |
| Kataoka et al. (2022) [9]            | <b>Solvente:</b> NaOH<br><b>Material Condutor:</b> Nanopartículas de Prata (AgNPs)                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>Houve aumento da condutividade dos filmes nanocompósitos com o aumento do teor de AgNPs;</li> <li>Os filmes de celulose/AgNPs apresentaram condutividade na faixa de <math>10^{-2}</math> S/cm, sendo o filme mais condutor com 0,290% de AgNPs.</li> </ul>         |

Diante dos trabalhos expostos, é possível observar uma variedade de estudos com RCFs que empregam diferentes materiais condutores, solventes e aplicações. Dentre esses estudos, alguns avaliam o uso de materiais condutores metálicos, como a prata, porém com foco em nanofios desse material, em vez de nanopartículas. Pensando nisso, em trabalho anterior [9], indicado na última linha da Tabela 2.1, foi estudada a influência da incorporação de nanopartículas de prata nas propriedades de filmes nanocompósitos de celulose regenerada. Foi observado aumento da condutividade na faixa de  $10^{-2}$  S/cm e diminuição da transmitância com o aumento do teor de nanopartículas, o que indica interação dessas nanopartículas com a matriz do filme e, portanto, sugere que o material pode ser promissor para aplicação em dispositivos eletrônicos. Diante disso, esse estudo seguirá explorando outras propriedades de melhoramento desses filmes para avaliar sua aplicação em tais dispositivos.

Nesses filmes de celulose regenerada com nanopartículas metálicas, como a prata, o limiar de percolação ( $\phi_c$ ) descreve a transição crítica em que a adição de partículas condutoras a uma matriz polimérica inicialmente isolante passa a formar uma rede contínua de transporte elétrico. Em sistemas poliméricos contendo prata, essa transição ocorre quando a distância média entre as nanopartículas se torna suficientemente pequena para permitir contato elétrico direto ou o tunelamento quântico entre elas [41], [42].

Nos filmes de celulose regenerada, fatores como a síntese *in situ* de AgNPs, que resulta em distribuição homogênea e menor energia de aglomeração [43], destacam-se para

reduzir o limiar de percolação. O “hopping” é um mecanismo de transporte eletrônico no qual os elétrons realizam saltos entre estados localizados na matriz polimérica ou entre nanopartículas metálicas que não estão em contato direto. Nessa forma de condução, o elétron necessita de energia térmica para superar a barreira entre um estado e outro, de modo que sua ocorrência é favorecida em temperaturas mais altas [44]. O “hopping” se manifesta quando as distâncias interpartículas são maiores do que a distância de contato, mas ainda suficientemente pequenas para permitir algum nível de interação eletrônica. Esse tipo de condução é característico de polímeros semicondutores, compósitos essencialmente isolantes, materiais amorfos e regiões não cristalinas, sendo comum em filmes celulósicos com baixa concentração de nanopartículas metálicas [45].

Por outro lado, o tunelamento é um processo distinto, regido pela mecânica quântica. Nesse caso, os elétrons não precisam de energia térmica para superar uma barreira, mas simplesmente atravessam uma fina camada isolante por meio do espalhamento de sua função de onda. O tunelamento torna-se dominante quando as nanopartículas metálicas estão próximas; nessas condições, a condutividade passa a depender exponencialmente da distância entre elas [46].

Nos filmes poliméricos com nanopartículas metálicas, especialmente antes do limiar de percolação, o mecanismo de condução predominante depende diretamente da distância entre as nanopartículas: quando estão moderadamente separadas, prevalece o regime de “hopping”; quando estão muito próximas, como ocorre em materiais em que as partículas são sintetizadas *in situ* e apresentam melhor dispersão, o tunelamento tende a dominar. Após a formação da rede percolada, múltiplas ordens de magnitude surgem na condutividade, podendo atingir valores semicondutores ou metálicos ( $>10^0$  S/cm) dependendo da conectividade das partículas [41].

A formação de uma rede condutiva contínua em filmes de celulose regenerada amplia significativamente o leque de aplicações desses materiais, especialmente na eletrônica flexível e no sensoriamento biodegradável. Após a percolação, a rede condutora reflete e absorve ondas eletromagnéticas. Filmes à base de celulose/AgNP podem atingir a blindagem efetiva [47] e ser aplicáveis a invólucros sustentáveis de eletrônica leve.

### **2.2.2. Nanopartículas de Prata (AgNP)**

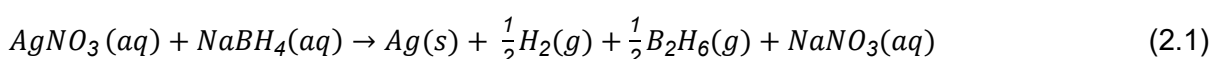
As nanopartículas de prata têm dimensões de 100 nm ou menos [48]. Esses materiais nanométricos são amplamente empregados devido à sua alta condutividade elétrica. Além disso, dispositivos fotônicos se beneficiam significativamente das propriedades ópticas desses nanomateriais, proporcionando ganhos de desempenho e de funcionalidade [49].

Diversos avanços têm levado ao desenvolvimento de novos processos para a produção de nanopartículas de prata (AgNPs), sendo os principais baseados na redução química de sais de prata em meio aquoso. Além disso, as AgNPs podem ser sintetizadas por meio de métodos como decomposição térmica, processos eletroquímicos, micelas reversas, irradiação por micro-ondas, entre outros [50].

Pelo método químico, diversos precursores podem ser utilizados na síntese de nanopartículas de prata (AgNP), como iodeto de prata (AgI), perclorato de prata (AgClO<sub>4</sub>), tetrafluorborato de prata (AgBF<sub>4</sub>), hexafluorofosfato de prata (AgPF<sub>6</sub>) e nitrato de prata (AgNO<sub>3</sub>) [51], [52]. Na síntese de nanopartículas de prata a partir de sais, o nitrato de prata (AgNO<sub>3</sub>) é frequentemente empregado como precursor [53].

Na síntese de nanopartículas de prata pelo método químico, é necessário empregar reagentes que atuem como agentes redutores [54]. Os principais reagentes empregados na síntese das nanopartículas de prata pela rota química são o citrato de sódio e o borohidreto de sódio [20], [55], [56], [57], que mantêm o coloide estável por algumas semanas.

O borohidreto de sódio é um redutor potente que induz a formação de centros de nucleação, que crescem de forma estabilizada, formando pequenos aglomerados. Para isso, o borohidreto de sódio deve ser adicionado em excesso em relação ao nitrato de prata, atuando como agente redutor dos íons de prata e estabilizando as nanopartículas formadas [58]. A reação entre nitrato de prata e o borohidreto de sódio pode ser dada pela Equação 2.1 [59]:



Tanto a redução química dos sais de prata quanto o estado de agregação das nanopartículas variam de acordo com as quantidades relativas dos reagentes, as concentrações, a temperatura, a duração da reação, entre outros fatores. Além disso, o diâmetro das nanopartículas de prata resultantes da síntese também depende dessas condições. A concentração dos reagentes e a agitação precisam ser constantes para que haja mudança do tamanho da nanopartícula e sua agregação [59], [60].

Devido ao seu tamanho, as nanopartículas apresentam uma grande área superficial, o que leva a uma tendência natural de agregação, formando aglomerados. Essa aglomeração ocorre como uma maneira de minimizar a área total de superfície e reduzir a tensão superficial do sistema. No entanto, em certos casos, é essencial que as partículas permaneçam dispersas, como em materiais como pigmentos, tintas e revestimentos diversos. Portanto, durante a síntese das nanopartículas, é crucial garantir que elas não se aglomerem, pois isso pode comprometer suas propriedades e aplicações [61].

Para evitar a agregação das nanopartículas de prata, é comum preparar os sistemas coloidais na presença de estabilizantes. Esses estabilizantes adsorvem-se às superfícies das nanopartículas, formando uma camada organizada que impede a interação entre as nanopartículas [62]. Mesmo que o borohidreto de sódio atue como agente estabilizante na produção de nanopartículas, outros agentes podem ser incorporados para prolongar o tempo de estabilidade das soluções de nanopartículas. Dentre os estabilizadores mais eficientes estão os polímeros, como o poli(álcool vinílico) (PVA), o poli(vinilpirrolidona) (PVP), o ácido poliacrílico (PAA) e a carboximetilcelulose (CMC) [55].

A carboximetilcelulose sódica (CMC) é eficaz na estabilização de nanopartículas de prata (AgNPs) devido à combinação de repulsão eletrostática e de estabilização estérica proporcionada por sua estrutura polissacarídica. Os grupos carboxilatos ( $-\text{COO}^-$ ), quando ionizados em meio aquoso, adsorvem-se à superfície metálica das AgNPs e incorporam carga negativa à interface, promovendo repulsão entre as partículas e, consequentemente, reduzindo processos de agregação e de coalescência. Simultaneamente, as cadeias poliméricas da CMC atuam como barreiras físicas, limitando o contato direto entre as partículas e proporcionando estabilização estérica adicional. Esse mecanismo duplo é apontado como um dos mais eficientes para garantir a estabilidade coloidal de AgNPs em matrizes aquosas ou hidrofílicas [63], [64]

Além do efeito interfacial, a CMC desempenha um papel importante como modificador reológico, aumentando a viscosidade do meio e contribuindo para a formação de uma matriz contínua capaz de manter as nanopartículas uniformemente distribuídas. Em sistemas de filmes ou hidrogéis, essa característica reduz a sedimentação das partículas durante o processo de secagem, resultando em uma distribuição mais homogênea e maior uniformidade estrutural [65]. Esse efeito é relevante em compósitos poliméricos destinados a aplicações funcionais, como revestimentos antimicrobianos, sensores e embalagens ativas, nos quais a dispersão das nanopartículas influencia diretamente as propriedades finais do material.

As nanopartículas de prata obtidas com borohidreto de sódio possuem diâmetros entre 5 e 20 nm e podem ser caracterizadas por espectroscopia de absorção UV-Vis, apresentando absorção na faixa de 380-400 nm [60]. Essas nanopartículas de prata possuem formato esférico, já que as partículas pentagonais apresentam absorção em torno de 540 nm e as prismas triangulares em 670 nm [66], [67]. Quanto mais homogêneo o tamanho das nanopartículas, mais estreitas são as curvas de absorção, enquanto tamanhos dispersos resultam em curvas de absorção mais amplas [68], [69].

Existem extensos estudos com nanocompósitos de nanocristais de celulose com nanopartículas de prata ou com aerogéis de celulose, mas com foco principal na produção de materiais com atividade antibacteriana. Além disso, utilizam como fonte a celulose comercial ou celulose derivada de outras fontes usuais, como o algodão. Ainda nesse contexto, há uma

lacuna no estudo da produção de filmes de celulose regenerada, limitados à incorporação de AgNP como material condutor. A Tabela 2.2 apresenta estudos que utilizam celulose regenerada e nanomateriais de prata.

Tabela 2.2 – Resumo de alguns estudos da literatura sobre filmes de celulose regenerada contendo prata.

| Nº | Autores                                | Fonte Celulósica                             | Solvente                                               | Materiais Condutores                                                                        | Método de deposição                                                                                 |
|----|----------------------------------------|----------------------------------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | Shankar et al. (2018) [13]             | Linter de algodão e celulose microcristalina | NaOH/Ureia                                             | Nanopartículas de prata (Ag), óxido de cobre (CuO) e óxido de zinco (ZnO)                   | Mistura de nanopartículas durante o processo de regeneração da celulose                             |
| 2  | Chen et al. (2020) [70]                | Celulose                                     | LiCl/ DMAc                                             | Nanofios de Prata                                                                           | Dissolução de celulose junto com a solução de nanopartículas                                        |
| 3  | Meza et al. (2024) [71]                | Celulose Microcristalina                     | NaOH/Ureia                                             | Nanofios de Prata                                                                           | Serigrafia                                                                                          |
| 4  | Mun et al. (2015) [6]                  | Polpa celulósica de algodão                  | LiCl/ DMAc                                             | Nanofios de Prata                                                                           | Deposição de AgNW na superfície do filme                                                            |
| 5  | Ma et al. (2019) [6]                   | Polpa solúvel de coníferas comercial         | Líquido iônico (cloreto de 1-alil-3-metilimidazólio)   | Nanofios de Prata                                                                           | AgNW foi precipitado na celulose usando centrifugação de baixa velocidade.                          |
| 6  | Oliveira, Bizeto and Camilo (2018) [7] | Celulose microcristalina comercial           | Líquido iônico de cloreto de 1-butil-3-metilimidazólio | Polianilina combinada com nanopartículas de prata                                           | Dispersão de nanopartículas de prata e polianilina também preparada na solução iônica de dissolução |
| 7  | Tian et al. (2017) [14]                | Linter de algodão                            | LiOH/Ureia                                             | Nanopartículas de prata sobre filmes condutores de polianilina (PANI)/hidrogéis de celulose | Eletrodeposição                                                                                     |
| 8  | Kataoka et al. (2022) [9]              | Juta                                         | NaOH                                                   | Nanopartículas de Prata                                                                     | Dissolução de celulose junto com a solução de nanopartículas                                        |

Diante do exposto na Tabela 2.2, os artigos 1 e 2 relataram a produção de RCFs com nanomateriais de prata, com foco em sua aplicação com função antibacteriana. Nos trabalhos 3, 4 e 5 os RCFs foram produzidos por deposição de nanofios de prata na superfície, para aplicação em dispositivos eletrônicos, utilizando celulose comercial como matéria-prima.

Já nos trabalhos 6 e 7, estudaram-se RCFs como condutores, porém, utilizaram-se AgNP juntamente com outros materiais condutores. Nesse contexto, explorando a ausência de filmes nanocompósitos condutores de celulose regenerada, contendo AgNP como material condutor, o trabalho 8 estudou a variação do teor de AgNP, utilizando a juta como fonte de

celulose e um sistema de solvente simples, com NaOH. Embora os resultados tenham mostrado que essas nanopartículas de prata apresentaram boas interações com a matriz do filme, também foram observadas características frágeis nos filmes obtidos. Sendo assim, a incorporação de aditivos pode melhorar essas propriedades mecânicas. Diante disso, a incorporação de aditivos em RCFs é um ponto importante a ser considerado na propriedade final do material condutor.

**2.2.3. O Uso de Aditivos em Filmes de Celulose Regenerada**

A adição de plastificantes aos polímeros pode aumentar sua flexibilidade, ductilidade e tenacidade, ao mesmo tempo em que reduz sua rigidez e fragilidade [16]. Os plastificantes são componentes de baixo peso molecular que ocupam posições intermediárias entre as longas cadeias poliméricas, aumentando efetivamente a distância entre elas e reduzindo as interações intermoleculares secundárias, tornando-os adequados para aplicações que requerem flexibilidade e ductilidade, como folhas ou filmes finos [16], [72].

As propriedades físicas e mecânicas da matriz polimérica podem ser afetadas pela quantidade de plastificante adicionado. Portanto, a escolha do plastificante é determinada por diversos fatores, incluindo a compatibilidade com os polímeros e as propriedades finais desejadas [17]. A Tabela 2.3 apresenta alguns trabalhos que adicionaram aditivos, como plastificantes, a filmes de celulose regenerada.

Tabela 2.3 – Resumos de alguns estudos da literatura que utilizaram aditivos em filmes de celulose regenerada.

| Autor                   | Descrição                                                            | Solvente       | Principais Resultados                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|-------------------------|----------------------------------------------------------------------|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Meza et al. (2024) [71] | Filmes de celulose regenerada foram modificados com glicerol e PEGDE | NaOH/<br>Ureia | <ul style="list-style-type: none"><li>• Melhoria da flexibilidade mecânica, onde os filmes de RCF tornaram-se dobráveis e resistentes à deformação;</li><li>• Compatibilidade com impressão;</li><li>• Boa adesão da tinta de AgNW;</li><li>• Influência indireta na condutividade, mantendo a continuidade da rede de AgNW;</li><li>• Manutenção da condutividade mesmo sob dobra;</li><li>• Menor toxicidade comparado a aditivos sintéticos pesados.</li></ul> |

|                          |                                                                                                                                  |                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|--------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Cazón et al. (2018) [73] | Foi avaliado um filme compósito de celulose regenerada combinada com álcool polivinílico. Glicerol foi usado como plastificante. | NaOH/<br>Ureia                                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>Filmes com resistência à tração;</li> <li>Valores de 25,9 a 369 MPa, semelhantes aos dos filmes de polímeros sintéticos;</li> <li>O alongamento na ruptura dos filmes foi menor do que os filmes de polímeros sintéticos;</li> <li>O glicerol revelou um efeito antiplastificante;</li> <li>Filmes mostraram uma superfície lisa;</li> <li>Os resultados mostraram que é viável a realização de compósitos mecânicos aprimoradas;</li> <li>Altos valores de transparência;</li> <li>A adição de glicerol resultou em filmes com efeito protetor UV.</li> </ul>          |
| Wang et al. (2015) [74]  | RCF com ChCl/ureia e com glicerol e sorbitol para comparação.                                                                    | 1-butilo-<br>cloreto de 3-<br>metilimidazólio<br>([BMIM]C) | <ul style="list-style-type: none"> <li>ChCl/uréia mostrou boa compatibilidade com celulose, e nenhuma reação química e cristalização ocorreu entre o plastificante e a celulose;</li> <li>A incorporação de ChCl/ureia resultou no aumento do alongamento e diminuição da resistência à tração do RCF;</li> <li>Permitiu a produção de celulose flexível e transparente filmes;</li> <li>Houve diminuição da estabilidade térmica devido à redução de ligações de hidrogênio;</li> <li>ChCl/uréia é comparável ao glicerol e sorbitol, podendo ser utilizado como potencial plastificante para RCF.</li> </ul> |
| Xiao et al. (2003) [75]  | RCFs com glicerol e glicerina - monobutirato, glicerina-monocaproato, glicerina-monocaprilato e glicerina-monocaprato.           | NaOH/<br>Tioureia                                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>Os quatro monoglicerídeos exibiram plastificação dos RCFs e boa resistência à lavagem com água;</li> <li>A adição dos plastificantes diminuiu a resistência à tração e melhorou o alongamento na ruptura dos RCFs;</li> <li>A cristalinidade e a estabilidade térmica aumentaram após a plastificação dos filmes;</li> <li>Em comparação com o glicerol, o efeito plastificante dos monoglicerídeos diminuiu, porém a resistência à água lavagem foi melhorada.</li> </ul>                                                                                              |
| Pang et al. (2013) [18]  | RCFs com sorbitol, glicerol e CMC.                                                                                               | Cloreto de 1-<br>alil-3-<br>metilimidazólio<br>(AmimCl)    | <ul style="list-style-type: none"> <li>Os filmes de celulose exibiram uma estrutura de superfície homogênea e lisa;</li> <li>A estabilidade térmica do RCF contendo glicerol foi aumentada em comparação com outros filmes;</li> <li>A incorporação de plastificantes aumentou a resistência à tração e melhorou a hidrofobicidade dos filmes de celulose.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                          |

Embora existam diversos estudos, conforme mostrado na Tabela 2.3, sobre o uso de plastificantes em RCFs, há uma lacuna de estudo quanto à influência dos agentes plastificantes nas propriedades condutoras dos filmes. Dentre os plastificantes compatíveis com polímeros naturais e RCFs, destacam-se os polióis, como o glicerol e o sorbitol. A utilização desses polióis como plastificantes resulta em melhorias nas propriedades mecânicas dos filmes, incluindo o aumento da resistência à tração e do módulo de elasticidade [76]. Além disso, o glicerol, o sorbitol e a carboximetilcelulose (CMC), que podem ser usados como aditivos incorporados a RCFs, são derivados de fontes renováveis [18]. A Figura 2.2 mostra a estrutura molecular desses aditivos.

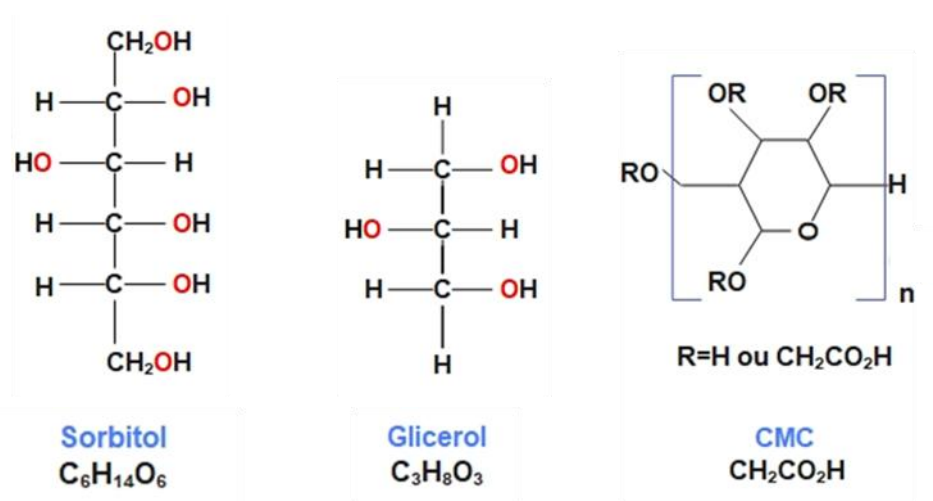


Figura 2.2 – Estrutura molecular do sorbitol, do glicerol e da carboximetilcelulose (CMC).

O sorbitol é um poliálcool amplamente encontrado na natureza, presente em concentrações consideráveis em várias frutas (como maçãs, pêras, pêssegos, ameixas e cerejas) e em plantas, incluindo algas marinhas. Além disso, é possível obter sorbitol industrialmente a partir da sacarose ou do amido. Sua temperatura de fusão situa-se entre 93 e 97 °C. O sorbitol é amplamente utilizado na produção de filmes a partir de polissacarídeos como matéria-prima [77].

O glicerol é um dos compostos mais comuns utilizados como plastificante, principalmente em filmes biodegradáveis [78]. É classificado como álcool, com propriedades hidrofílicas e alta miscibilidade com água, sendo amplamente produzido na indústria de biodiesel [79]. Quando utilizado como plastificante, o glicerol interage com as cadeias celulósicas, aumentando a mobilidade molecular e, conseqüentemente, a hidrofiliabilidade e a flexibilidade dos filmes contendo plastificante [76].

A carboximetilcelulose sódica é um derivado hidrossolúvel obtido por meio da reação em suspensão entre celulose, hidróxido de sódio e ácido monocloroacético [80]. É um polissacarídeo versátil amplamente utilizado em várias áreas, incluindo alimentos, biomédica,

farmacêutica e cosmética. É um produto industrial comumente comercializado na forma sódica [81] e apresenta grupos carboxilatos, que lhe conferem solubilidade em água. Pode ser obtida a partir do bagaço da cana-de-açúcar, uma biomassa abundante e de baixo custo, proveniente das usinas de açúcar e álcool [82]. É amplamente reconhecida como uma fonte importante de celulose utilizada para aprimorar as propriedades de biofilmes. Estudos demonstraram que a adição de CMC a filmes de amido de mandioca e de milho resultou em melhorias significativas nas propriedades mecânicas desses filmes [83].

Em sistemas celulósicos, a plasticização tradicionalmente envolve moléculas de baixo peso molecular, como glicerol, sorbitol ou polietilenoglicol (PEG), que reduzem as interações intermoleculares e aumentam a mobilidade segmentar [84], [85]. A função mais recorrente da CMC descrita na literatura é a de fase polimérica, modificadora reológica ou agente de compatibilização em blendas com outros biopolímeros, como pode ser o caso de filmes de celulose regenerada. As blendas poliméricas consistem na combinação física de dois ou mais polímeros, com o objetivo de ajustar propriedades específicas do material final, como flexibilidade, resistência mecânica e comportamento funcional, sem formação de novas ligações químicas entre as fases [86], [87].

Devido à sua natureza polieletrólítica e à alta capacidade de retenção de água, conferem-lhe propriedades compatíveis com a plasticização macromolecular, conceito discutido para polímeros hidrofílicos de maior massa molar [88]. A presença de grupos carboximetila ionizáveis reduz a densidade de ligações de hidrogênio intramoleculares e intermoleculares, aumenta o espaçamento médio entre as cadeias e altera o regime de empacotamento supramolecular da matriz celulósica, sendo considerada um aditivo para RCFs [89]. Em Pang et al. (2013) [18], foi adicionada CMC a filmes de celulose regenerada, o que melhorou as propriedades mecânicas dos filmes; portanto, foi utilizada como base para esse estudo.

Esses aditivos podem ser incorporados durante a solubilização da celulose, ou seja, durante o processo de dissolução e regeneração dos RCFs.

#### **2.2.4. Solubilidade e Regeneração de Celulose**

Nas paredes celulares das plantas, a celulose normalmente está combinada com lignina e hemiceluloses [90], sendo necessário passar por tratamentos específicos, químicos, físicos ou uma combinação de ambos para, então, remover os componentes não celulósicos e amorfos das fibras naturais [91], [92].

Para a fabricação de filmes condutores de celulose regenerada, normalmente utilizam-se celulose comercial ou celulose de algodão [6], [7]. Porém, dentre as fibras naturais que são fontes de celulose, a juta (*Corchorus capsularis*) é uma fibra abundante, destacando-se como

uma das fontes mais ricas em celulose [8]. Estudos disponíveis na literatura avaliaram o teor de fibra de juta e revelaram que as fibras contêm cerca de 58–73% de celulose, 13–24% de hemicelulose e 10–15% de lignina [93], [94], [95], [96], o que indica que o principal constituinte é a celulose, tornando a fibra promissora para a produção de filmes de celulose regenerada.

A utilização da juta como matéria-prima para a produção de filmes de celulose regenerada apresenta vantagens relevantes sob os pontos de vista social, ambiental e tecnológico. No contexto brasileiro, a juta possui forte inserção regional, especialmente na região amazônica, onde sua produção está historicamente associada a sistemas agrícolas adaptados às condições de várzea. Essa característica confere à fibra um importante papel socioeconômico, contribuindo para a geração de renda e a valorização de cadeias produtivas locais [97].

Além disso, a juta é uma fibra lignocelulósica renovável, de fácil obtenção no Brasil, o que favorece sua utilização como insumo estratégico para o desenvolvimento de materiais sustentáveis, diminuindo o caminho percorrido dessa matéria-prima e consequente impacto ambiental. Seu emprego na produção de celulose regenerada permite ampliar o valor agregado da biomassa, promovendo sua utilização além das aplicações tradicionais, como o setor têxtil. Esse aproveitamento está alinhado com os princípios da bioeconomia e da economia circular, que incentivam o uso eficiente de recursos renováveis e a substituição de materiais de origem fóssil [98].

A celulose apresenta fórmula empírica  $(C_6H_{10}O_5)_n$ . As moléculas de celulose são compostas por unidades de D-anidroglicose (AGU) conectadas por ligações  $\beta(1-4)$ -glicosídicas, nas quais os carbonos 1 e 4 se ligam, formando um polímero linear. Cada unidade de AGU se alterna com a unidade seguinte, com uma rotação de  $180^\circ$  da ligação glicosídica em relação à primeira [90]. As cadeias de celulose possuem duas extremidades: uma chamada extremidade não redutora, com um grupo  $C_4-OH$ , e outra, chamada extremidade redutora, com um grupo  $C_1-OH$ . Por meio de tratamentos químicos, como o uso de agentes branqueadores, é possível introduzir grupos funcionais, como carbonilas e carboxilas, na celulose [99], [100]. A Figura 2.3 ilustra a estrutura molecular esquemática da celulose.

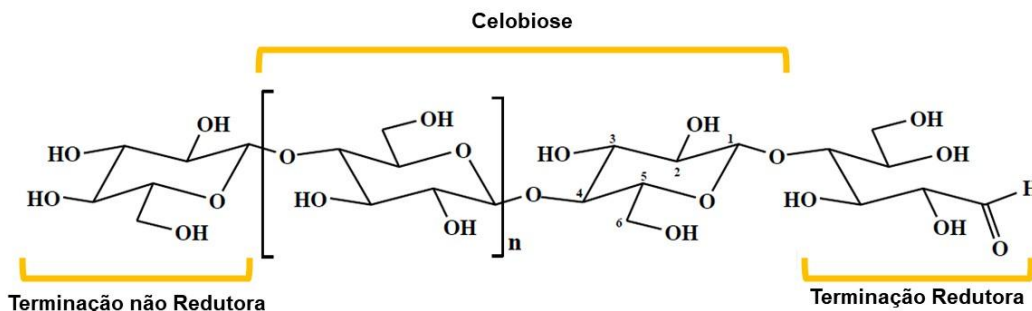


Figura 2.3 - Estrutura molecular da celulose ( $n$  = grau de polimerização), adaptada de [101].

No que se refere à estrutura supramolecular, as cadeias de celulose tendem a se agrupar e a formar entidades estruturais de diferentes níveis de organização. Isso ocorre devido a um equilíbrio entre diferentes interações, como ligação de hidrogênio intra e intermoleculares, interações hidrofóbicas e interações de dispersão (Van der Waals) [102]. As regiões onde os agregados de celulose apresentam maior ordem são comumente conhecidas como regiões cristalinas, que podem se rearranjar em diferentes polimorfos cristalinos bem definidos, denominados celulose I ( $I\alpha$  e  $I\beta$ ), II, III e IV [103].

A celulose I possui uma estrutura cristalina paralela, composta pelas fases  $I\alpha$  e  $I\beta$ , geralmente encontrada na celulose nativa, sendo a última termodinamicamente mais estável. As fases variam conforme a origem da matéria-prima. A celulose extraída de plantas superiores, como a madeira, é predominantemente composta pela fase  $I\beta$ , enquanto a celulose proveniente de organismos primitivos, como bactérias, é composta principalmente pela fase  $I\alpha$ . A celulose I pode ser convertida em celulose II por meio de tratamentos químicos de regeneração ou de mercerização. Os polimorfos III e IV podem ser obtidos tratando a celulose I e II com amônia [104] e por aquecimento [105].

Para que a celulose se dissolva, é necessário que o solvente não apenas quebre a extensa rede de ligações de hidrogênio, mas também destrua as interações hidrofóbicas entre as moléculas de celulose e desfaça sua estrutura supramolecular. Tipicamente, o primeiro passo na dissolução consiste na penetração do solvente na densa e complexa estrutura da celulose. Esse processo leva ao inchaço da celulose, alterando significativamente seu volume e suas propriedades físicas, mas mantendo-a ainda em estado sólido ou semissólido [26].

No processo de dissolução da celulose, envolvem-se diferentes estágios, desde a fusão da região cristalina da celulose e a transição das regiões amorfas para um estado elástico, até a solvatação das macromoléculas de celulose e a mistura da celulose solvatada com solventes [106].

Os solventes da celulose podem ser derivatizantes ou não derivatizantes. O grupo de solventes derivatizantes engloba os sistemas em que a celulose é dissolvida por meio da

formação química de intermediários éter, éster ou acetal instáveis. Em contraste, os sistemas de solventes não derivatizantes são aqueles em que a celulose é dissolvida apenas por interações físicas intermoleculares. A Figura 2.4 apresenta o esquema e exemplos de alguns solventes utilizados.

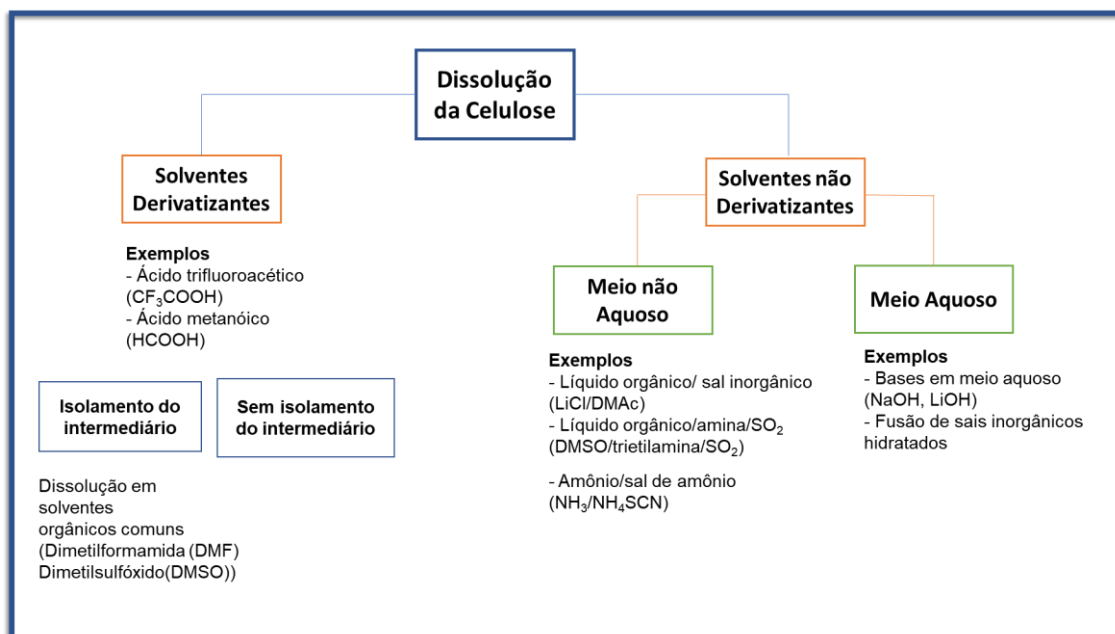


Figura 2.4 - Esquema de classificação de solventes de celulose, adaptado de Heinze et al. (2005) [107].

Dentre os solventes não derivatizantes em meio aquoso, Sobue et al. (1939) [108] apresentaram uma abordagem e descobriram que a celulose é solúvel em solução aquosa de NaOH abaixo de -5 °C, em uma faixa específica de concentração de NaOH (7-10%), na qual a solução de NaOH/H<sub>2</sub>O atua como um solvente direto (isto é, sem derivatização) para a celulose [108]. A celulose e o NaOH formam um complexo cristalino em determinadas concentrações. Esse complexo contém moléculas de NaOH e de água em sua estrutura cristalina. Diferentes alomorfos de Na-celulose podem ser obtidos ao imergir a celulose em soluções de NaOH de diferentes concentrações. Na faixa de concentração de NaOH de 12-15%, é produzida a Na-Celulose I. Em concentrações mais altas de NaOH (geralmente 32%), é produzida a Na-Celulose II. A Figura 2.5 apresenta um diagrama de fases do sistema Na-celulose do algodão. Esse diagrama baseia-se na presença de Na-Celulose I e II, juntamente com a região Q. Na região Q, observa-se um aumento na capacidade de expansão e de dissolução do NaOH em relação à celulose em baixas temperaturas. O diagrama de fases mostra seis regiões, incluindo duas zonas limítrofes, nas quais coexistem duas fases [109].

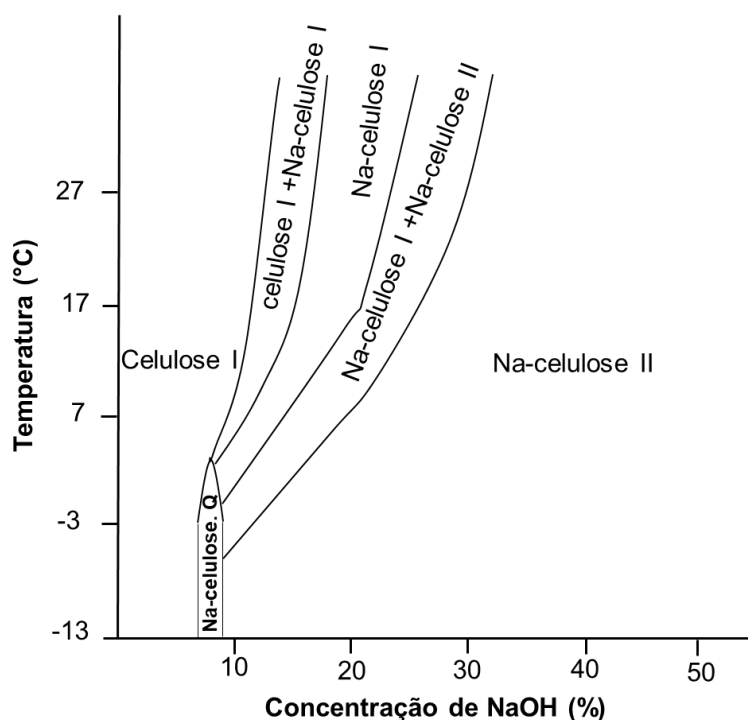


Figura 2.5 - Diagrama de fases de Na-celulose de algodão imersa em soluções aquosas de NaOH, adaptado de [109].

O sistema aquoso de dissolução em NaOH é de baixo custo, potencialmente não poluente, utiliza produtos químicos comuns e é relativamente fácil de manipular. No entanto, esses sistemas aquosos alcalinos podem não dissolver completamente as regiões semicristalinas da celulose, pois dependem do grau de cristalinidade e do arranjo cristalino. Esse processo é fortemente dependente da massa molar da celulose, sendo que cadeias com menor grau de polimerização apresentam maior solubilidade, enquanto a celulose de alta massa molar apresenta limitações de dissolução [101]. Além disso, as soluções podem apresentar baixa estabilidade, formada durante o processamento, o que se observa na sua gelificação. Este problema de estabilidade, assim como a capacidade de dissolução, pode ser reduzido por meio da adição de certos aditivos [102].

Após a dissolução da celulose, é necessário realizar o processo de regeneração, que consiste na coagulação do material e na separação do solvente [15]. A regeneração pode ocorrer em diferentes formas, como filmes, fibras e aerogéis, utilizando uma variedade de coagulantes. A regeneração ocorre quando a solução de celulose entra em contato com um banho coagulante, no qual os materiais são formados principalmente por meio de processos de difusão iônica, formação de partículas primárias, crescimento de partículas secundárias e aglomeração de partículas [110].

Durante o processo de regeneração, ocorrem a difusão do solvente para o banho coagulante e a do agente coagulante para a solução de celulose. Essas trocas resultam na reestruturação das ligações de hidrogênio, tanto intra- quanto intermoleculares [111]. Os

coagulantes mais comumente utilizados para a regeneração da celulose incluem água, ácidos (como ácido acético e ácido sulfúrico), bases, álcoois (como etanol, isopropanol, butanol, pentanol e hexanol) e acetona, além de sistemas que envolvem a mistura desses componentes [112].

Durante a etapa de dissolução da celulose, podem ser adicionados as nanopartículas de prata e os aditivos. Porém, estudos mostram as propriedades de RCFs com a incorporação desses componentes de forma separada, como mencionado anteriormente, isto é, com materiais condutores ou aditivos. Nesse contexto, há uma lacuna na literatura sobre a interação desses dois componentes, que podem ser adicionados para produzir filmes nanocompósitos condutores de celulose regenerada. Portanto, as propriedades físicas, elétricas, ópticas e térmicas, bem como as interações químicas desses filmes nanocompósitos de celulose regenerada e AgNP, trazem inovação à área de estudo dessa categoria de filmes, para aplicação como material condutor.

#### **2.2.5. Medidas Elétricas e o Método de *Van der Pauw* para Filmes Finos**

A incorporação de AgNP e aditivos aos filmes de celulose regenerada pode afetar as propriedades elétricas dos filmes, como a resistência de folha, a resistividade e a condutividade. Como esses filmes possuem propriedades finas, torna-se importante caracterizá-las com a técnica elétrica adequada.

A resistência de folha é uma medida da resistência elétrica de um plano bidimensional homogêneo (muito mais fina do que larga), frequentemente utilizada na indústria de semicondutores para caracterizar filmes finos. Existem diferentes métodos para determinar essa resistência de folha [113].

Para determinar a resistência de folha, métodos sem contato, como o teste de corrente parasita, ou métodos de contato, como a sondagem de quatro pontos, podem ser empregados [113]. Em padrões impressos em substratos flexíveis, a resistência de folha é frequentemente determinada por sondagem de dois pontos; porém, esse método é menos preciso, pois não considera a resistência de contato entre a amostra e o instrumento [114].

A sondagem de quatro pontos com sondas de mola pode ser utilizada, na qual pontas afiadas nas sondas são empregadas. No entanto, essa técnica pode ser problemática em substratos sensíveis, pois as pontas afiadas podem danificar a camada impressa e comprometer o contato adequado [48], [115]. É importante considerar essas diferentes abordagens e escolher o método mais apropriado de acordo com o tipo de amostra, a precisão desejada e as características específicas do material utilizado.

Uma variação da sondagem clássica de quatro pontos é o método de Van der Pauw. Esse método é uma técnica de medição que envolve a aplicação de corrente elétrica e a

medição da tensão, utilizando quatro pequenos contatos posicionados no perímetro de uma amostra plana, de formato arbitrário e de espessura fina e uniforme [116]. Para garantir a precisão e a validade dos resultados obtidos por meio da técnica de Van der Pauw, algumas condições devem ser atendidas: a amostra deve ser plana, com espessura uniforme, sem orifícios isolados, e os contatos devem ser posicionados ao longo do perímetro da amostra.

A utilização do método de Van der Pauw proporciona uma abordagem eficaz para medições elétricas em amostras de geometria complexa ou de tamanho reduzido, garantindo resultados confiáveis e precisos [116]. Diante disso, o método de Van der Pauw permite medir propriedades elétricas de filmes finos, como os nanocompósitos de celulose regenerada, por ser aproximadamente bidimensional (ou seja, muito mais fina do que larga), reduzindo erros experimentais [116].

A Figura 2.6 mostra onde são realizadas as medições elétricas pelo método de Van der Pauw em geometria típica. Nesse método, é aplicada uma corrente nos contatos elétricos 1 e 2 ( $I_{12}$ ) e a tensão é medida entre os contatos elétricos 4 e 3 ( $V_{43}$ ). O processo é repetido, com a corrente aplicada nos terminais 2 e 3 ( $I_{23}$ ) e a tensão medida entre os terminais 1 e 4 ( $V_{14}$ ).

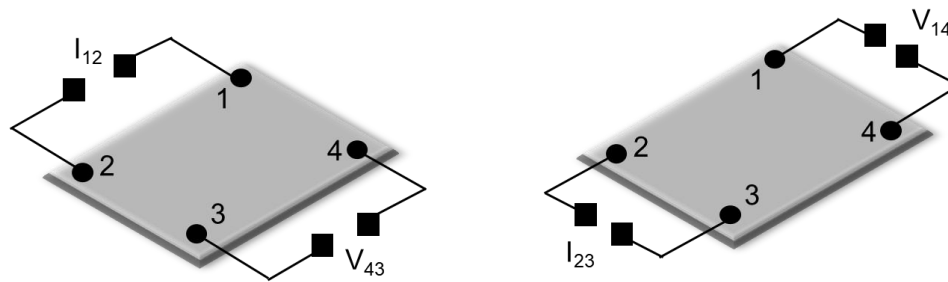


Figura 2.6 – Configuração da medição elétrica pelo método de Van der Pauw.

A partir dessas medições podemos calcular as resistências  $R_{12,34}$  e  $R_{23,14}$  por meio das Equações 2.2 e 2.3:

$$R_{12,34} = \frac{V_4 - V_3}{I_{12}} \quad (2.2)$$

$$R_{23,14} = \frac{V_1 - V_4}{I_{23}} \quad (2.3)$$

A partir dos valores das resistências, é possível determinar a resistividade  $\rho$  pelo método de Van der Pauw, utilizando a Equação 2.4.

$$\rho = \frac{\pi d}{\ln 2} \frac{R_{12,34} + R_{23,14}}{2} F(S) \quad (2.4)$$

onde S é o fator de simetria e F(S) fator de correção para assimetria geométrica, definidos pelas Equações 2.5 e 2.6, respectivamente:

$$S = \frac{V_{43} \times I_{14}}{I_{12} \times I_{23}} \quad (2.5)$$

$$F(S) = 1 - 0,34657 \left( \frac{S-1}{S+1} \right)^2 - 0,09236 \left( \frac{S-1}{S+1} \right)^4 \quad (2.6)$$

Por meio do método de Van de Pauw, também se obtém a resistência de folha, expressa em unidades de ohms por quadrado ( $\Omega/\square$ ), usada para caracterizar filmes finos. A variação de tamanho das amostras, desde que com espessura uniforme, não influencia a resistência de folha e pode ser utilizada para comparar propriedades elétricas de dispositivos de diferentes tamanhos [117]. A resistência de folha ( $R_s$ ) pode ser calculada pela Equação 2.7.

$$R_s = \frac{\rho}{t} \quad [\Omega/\square] \quad (2.7)$$

Onde t é a espessura do filme, ou pela Equação 2.8:

$$R_s = \frac{\pi}{\ln(2)} R_{12,34} = \frac{\pi}{\ln(2)} \frac{V_{34}}{I_{12}} \quad (2.8)$$

Dependendo da condutividade, os materiais podem ser classificados em condutores, semicondutores e isolantes. Condutores têm resistividade elétrica da ordem de  $10^{-8}$  a  $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ , enquanto isolantes têm resistividade elétrica da ordem de  $10^8$  a  $10^{18} \Omega \cdot \text{cm}$ . Semicondutores têm um valor de resistividade elétrica intermediário entre os de condutores e isolantes entre  $10^{-4}$  a  $10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ . A condutividade de filmes finos pode ser obtida a partir da resistividade de folha. A Equação 2.9 mostra o cálculo da resistividade de folha  $\rho_s$ ,

$$\rho_s = R_s \cdot t \quad [\Omega \cdot \text{cm}] \quad (2.9)$$

Onde então pode ser encontrada a condutividade  $\sigma_s$  pela Equação 2.10:

$$\sigma_s = \frac{1}{\rho_s} \quad [\text{S/cm}] \quad (2.10)$$

### 2.3. METODOLOGIA DO CAPÍTULO II

A metodologia apresentada nesse capítulo é ilustrada na Figura 2.7 e será descrita detalhadamente nos próximos tópicos.

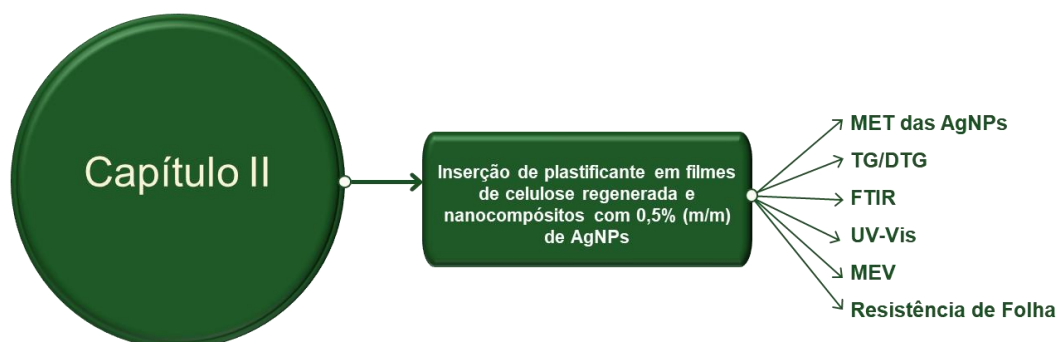


Figura 2.7 – Metodologia do capítulo II.

#### 2.3.1. Materiais

Neste trabalho, para todas as etapas envolvidas, desde a preparação da celulose até a do nanocompósito, foram utilizados os seguintes produtos químicos de grau reagente: hidróxido de sódio (NaOH, 97%, Greentec), nitrato de prata (AgNO<sub>3</sub>, 99,9%, Neon), borohidreto de sódio (NaBH<sub>4</sub>, 98%, Dinâmica), carboximetilcelulose de sódio (CMC, Sigma–Aldrich), sobitol (98%, Dinâmica) e glicerol (98%, Synth).

A celulose utilizada neste trabalho foi obtida a partir de juta, cujas etapas de preparação foram descritas por Kataoka et al. (2022) [9]. A fibra de juta foi submetida a tratamentos químicos de alcalinização com KOH e NaOH, seguidos de tratamento ácido com ácidos acético e nítrico e, por fim, branqueada com clorito de sódio (NaClO<sub>2</sub>). A Figura 2.8 mostra a aparência das fibras após os tratamentos.

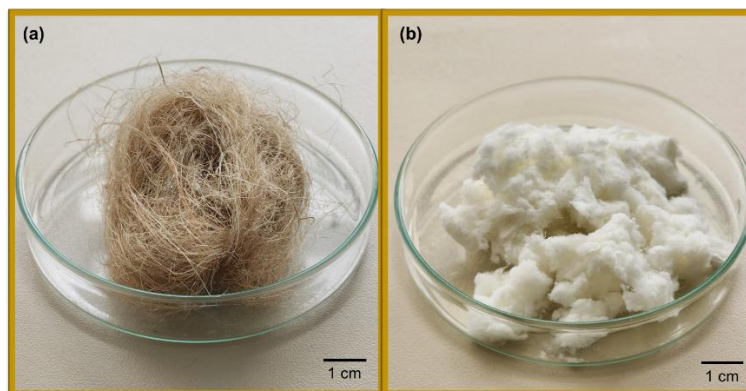


Figura 2.8– Fibras de juta (a) *in natura* e (b) celulose branqueada moída.

### 2.3.2. Síntese das nanopartículas de prata

A solução de nanopartículas de prata contendo 250 ppm foi preparada a partir de 450 mL de uma solução  $18,0 \times 10^{-6}$  mol/L de borohidreto de sódio mantida abaixo de  $3^\circ\text{C}$ . A solução foi vertida em um Erlenmeyer e submetida a agitação magnética vigorosa. Por meio de uma bureta, 150 mL de uma solução de nitrato de prata  $9,0 \times 10^{-6}$  mol/L foram adicionados a uma taxa adicional de 1 gota/s. A solução resultante foi estabilizada com 0,6 g de carboximetilcelulose (CMC) para evitar a agregação das nanopartículas de prata. A Figura 2.9 mostra a solução de AgNP obtida.

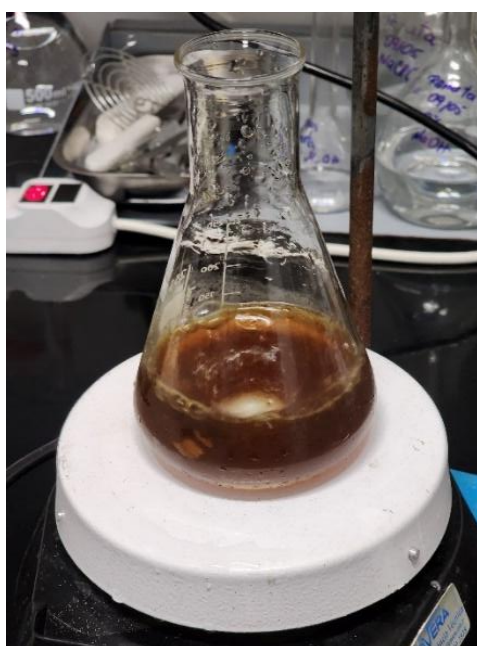


Figura 2.9 – Aparência da solução contendo 250 ppm de AgNP.

### 2.3.3. Microscopia Eletrônica de Transmissão (MET) das Nanopartículas de Prata

A solução de nanopartículas de prata foi caracterizada por Microscopia Eletrônica de Transmissão (MET) no equipamento JEOL JEM 1011, com tensão de 40 kV. Para realizar a análise de MET 1 gota da solução de AgNP diluída em água foi depositada em uma grade de cobre. As medidas de tamanho das nanopartículas de prata foram obtidas a partir de imagens geradas no software ImageJ, no qual foi possível realizar uma contagem estatística do tamanho médio das AgNP.

### 2.3.4. Obtenção dos Filmes de Celulose Regenerada

Para a produção de todos os filmes, inicialmente, a celulose de juta branqueada foi moída em moinho analítico automático Quimis Q298A (120–17.000 rpm) por 30 s (Figura 2.8 b).

*Preparação dos filmes de celulose regenerada com aditivos:* Para preparar os filmes de celulose regenerada com aditivos, 2,2 g de celulose foram dissolvidos em 100 mL de solução de NaOH 8% (m/v) pré-resfriada a -12 °C por 18 h. O processo de dissolução ocorreu sob agitação vigorosa a 3000 rpm e temperatura ambiente por 7 min. Em seguida, foram adicionados os aditivos CMC, sorbitol e glicerol, na proporção de 15% em relação à massa inicial de celulose. A Tabela 2.4 apresenta o detalhamento da composição dos filmes, com suas respectivas nomenclaturas.

*Preparação dos filmes de celulose regenerada com aditivos e nanopartículas de prata:* Para preparar os filmes nanocompósitos, uma solução de 100 mL foi preparada contendo NaOH 8% (m/v) e a solução de nanopartículas com 0,5% (m/m) de AgNP em quantidade correspondente à massa de celulose e aditivos. Essa solução foi pré-resfriada (-12 °C por 18 h) e utilizada para dissolver 2,2 g de celulose durante 7 min a 3000 rpm. Em seguida, foram adicionados os aditivos CMC, sorbitol e glicerol, na proporção correspondente a 15% da massa inicial de celulose (Tabela 2.4).

Tabela 2.4 - Composição dos filmes de celulose regenerada preparados no Capítulo II.

| Amostra               | Aditivo<br>(adicionado sobre a<br>massa inicial de celulose) | AgNP (m/m)<br>(massa total) |
|-----------------------|--------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| RCF                   | -                                                            | -                           |
| RCF - AgNP            | -                                                            | 0,5%                        |
| RCF - CMC             | 15% CMC                                                      | -                           |
| RCF - CMC - AgNP      | 15% CMC                                                      | 0,5%                        |
| RCF - Sorbitol        | 15% Sorbitol                                                 | -                           |
| RCF - Sorbitol - AgNP | 15% Sorbitol                                                 | 0,5%                        |
| RCF - Glicerol        | 15% Glicerol                                                 | -                           |
| RCF - Glicerol - AgNP | 15% Glicerol                                                 | 0,5%                        |

Para moldar os filmes regenerados, cada mistura, conforme descrito anteriormente e com sua respectiva composição, conforme a Tabela 2.4, foi submetida à centrifugação a 4000 rpm por 10 min, a fim de remover bolhas da solução viscosa e partes não dissolvidas de celulose. Em seguida, verteram-se 7 mL da solução em uma placa de Petri de polipropileno com diâmetro de 85 mm. Os filmes de RCF e de nanocompósitos foram pré-secos à temperatura ambiente por 18 h até a gelificação. Em seguida, a amostra foi imersa em banho coagulante de água à temperatura ambiente por 15 min para regenerar a celulose. Por fim,

os filmes foram secos à temperatura ambiente para caracterização. A Figura 2.10 apresenta as etapas da produção de filmes.

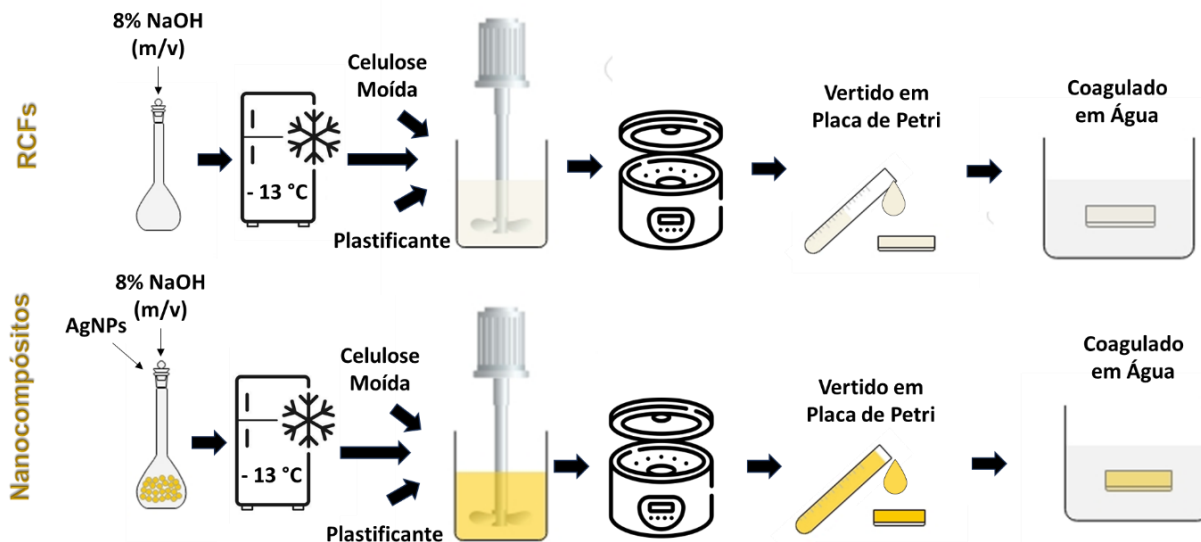


Figura 2.10 – Passos adotados para a produção de RCFs e de nanocompósitos.

Para a caracterização dos materiais de RCFs e nanocompósitos, eles foram mantidos à temperatura ambiente, entre 20 e 25  $^{\circ}\text{C}$ , e não passaram por secagem adicional, para que as propriedades físicas não fossem influenciadas.

### 2.3.5. Determinação da Transmitância dos Filmes por Espectroscopia Ultravioleta-Visível (UV-Vis)

Para determinar a transmitância, os filmes de RCF e de nanocompósitos foram avaliados no equipamento UV/Visível Evolution 220, da Thermo Scientific, na faixa de comprimentos de onda de 200 a 800 nm. Os filmes foram colocados em um suporte adaptado que permitiu a passagem do feixe simples diretamente pela amostra. As amostras foram analisadas em triplicata para, posteriormente, realizar a análise estatística dos dados.

### 2.3.6. Caracterização Térmica dos Filmes por Análise Termogravimétrica (TGA)

Os filmes RCFs e os aditivos utilizados nesse trabalho foram caracterizados por meio de análise termogravimétrica em um equipamento TGA SDT Q600, TA Instruments. Aproximadamente 10 mg de cada amostra foram analisados em cadinhos de alumina. A análise foi conduzida sob atmosfera de nitrogênio com vazão de 100 mL/min e taxa de aquecimento de 10  $^{\circ}\text{C min}^{-1}$  de 30 a 600  $^{\circ}\text{C}$ .

### **2.3.7. Caracterização Química dos Filmes por Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)**

Espectros FTIR de absorbância dos filmes RCFs foram obtidos em um espectrômetro infravermelho de transformada de Fourier NICOLET IS10 da Thermo Scientific, por meio de acessório de transmitância ATR, na região de 500 a 4000  $\text{cm}^{-1}$ , com 64 varreduras coletadas a 4  $\text{cm}^{-1}$ .

### **2.3.8. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)**

Os filmes RCFs foram colados sobre um porta-amostras com fita de carbono e metalizados com ouro no equipamento de recobrimento metálico da marca Balzers, modelo SCD 050 Sputter Coater. As amostras metalizadas foram analisadas em um microscópio eletrônico de varredura da marca JEOL, modelo JSM-7001F, disponível no Departamento de Biologia – Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura da UnB, com tensão de aceleração de 15 kV e detector de elétrons secundários. Como os filmes foram formados por evaporação, as amostras foram analisadas na superfície superior.

### **2.3.9. Resistência de Folha dos Nanocompósitos pelo Método de Vander Pauw**

As medidas de resistência de folha dos RCFs foram realizadas pelo método de Van der Pauw, por meio da medição de resistividade em quatro pontos, utilizando o equipamento B1500A Semiconductor Device Analyzer da Agilent. As amostras foram submetidas à faixa de 100  $\mu\text{A}$  até 1 mA com intervalo de 10  $\mu\text{A}$ , até o limite de 1 V. O método realizado nesse equipamento forneceu dados de gráfico com valores de resistência da folha de filme ( $\Omega/\square$ ) e a variação de voltagem ( $\Delta V$ ) gerados em função da corrente elétrica ( $i$ ) aplicada ao material. Para a realização dos cálculos de resistividade e condutividade, as espessuras dos filmes foram medidas com um micrômetro digital Mitutoyo (erro de 0,001 mm) em 10 pontos do material.

A Figura 2.11 mostra o suporte com os conectores para a realização das medidas. As medições foram realizadas em quadruplicata em três filmes de cada nanocompósito, a fim de avaliar as médias e os desvios-padrão e, posteriormente, realizar análise estatística dos dados.

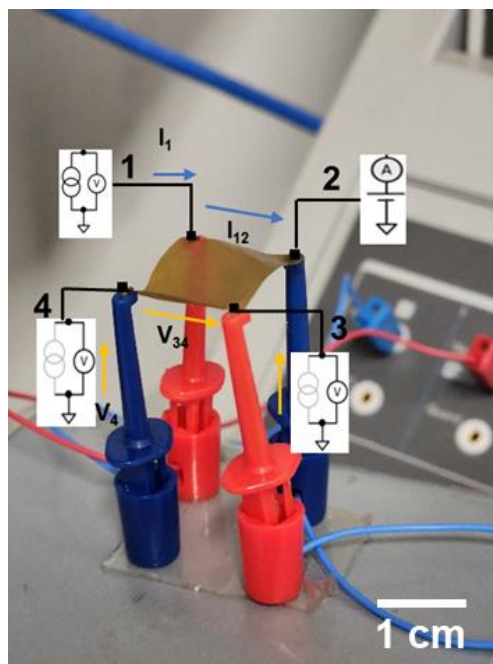


Figura 2.11 – Conectores ligados ao filme RCF – AgNP para medição da resistência de folha pelo método de Van der Pauw no B1500A Semiconductor Device Analyzer.

## 2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 2.3.1. Caracterização Morfológica das Nanopartículas de Prata (AgNP), dos RCFs Aditivados e dos Filmes Nanocompósitos

A caracterização de filmes poliméricos envolve a identificação e a avaliação da composição química e microestrutural de uma amostra, a fim de compreender suas propriedades físicas e químicas, necessárias à sua aplicação adequada, e prever seu desempenho. Características morfológicas, como rugosidade e porosidade, podem afetar as propriedades físicas, estruturais e elétricas desses filmes [118].

A Figura 2.12 mostra a aparência de cada filme estudado. A incorporação de AgNP causou escurecimento dos filmes devido à solução de nanopartículas, que apresenta coloração amarelada. Além disso, visualmente, os filmes RCF - CMC - AgNP e RCF - Glicerol - AgNP são mais opacos, assim como no filme RCF – Glicerol. Posteriormente, nesse trabalho, uma análise espectroscópica por UV-Vis mostrará o efeito da incorporação de aditivos e de AgNP nas propriedades ópticas desses filmes.

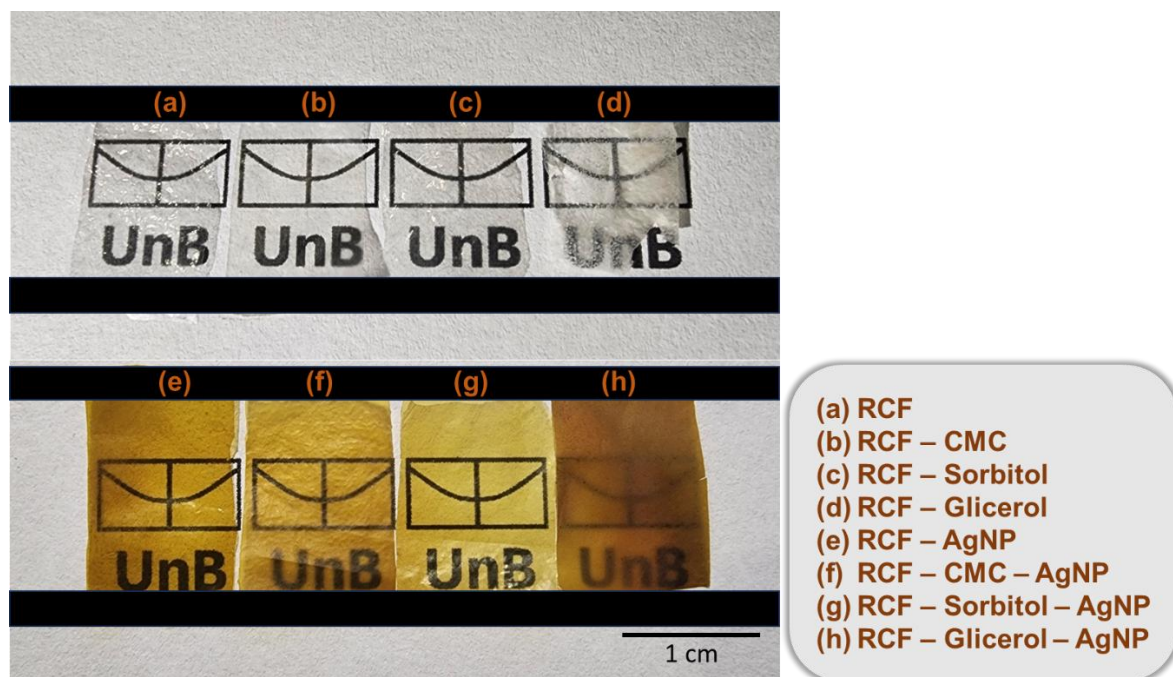


Figura 2.12– Aparência dos filmes de RCF e de nanocompósitos obtidos neste trabalho.

Observando as características visuais dos filmes, é importante conhecer as características morfológicas das AgNP obtidas por síntese incorporadas aos filmes nanocompósitos, pois sua forma e tamanho podem alterar as propriedades ópticas e elétricas do material. Essas nanopartículas podem apresentar diferentes formas e tamanhos, além de características físicas específicas [66].

Visando conhecer as características dessas nanopartículas, a Figura 2.13 apresenta a micrografia de transmissão da solução de nanopartículas de prata sintetizada neste trabalho. Por meio da micrografia, observa-se que as nanopartículas apresentam tamanho homogêneo. As nanopartículas esféricas apresentaram dimensões médias de  $9,0 \pm 2,0$  nm.

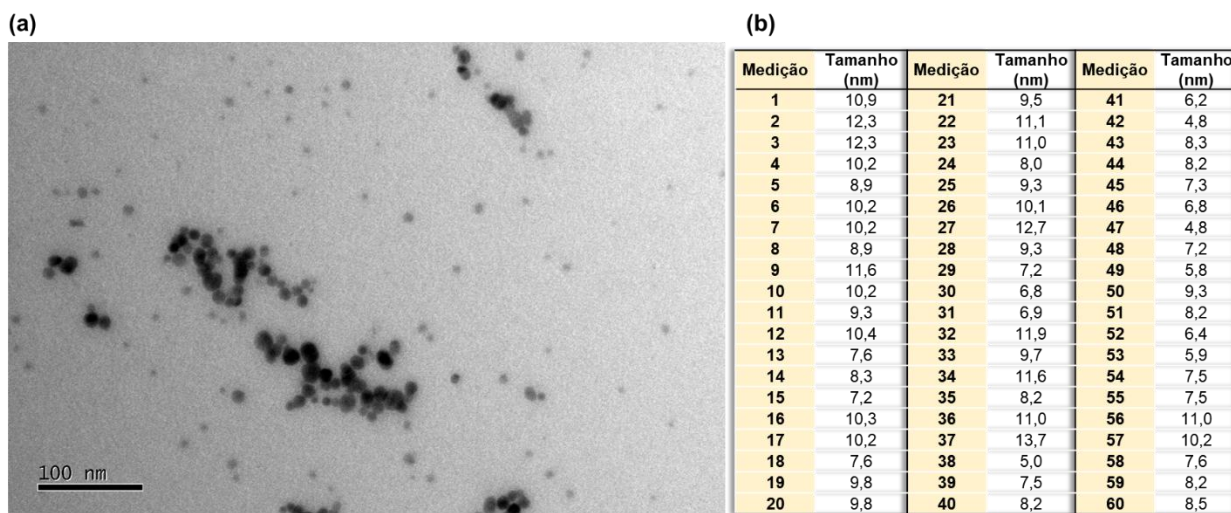


Figura 2.13 – (a) Micrografia de transmissão das nanopartículas de prata e (b) medidas de 60 pontos distintos do tamanho das nanopartículas.

O tamanho das nanopartículas está dentro da faixa normalmente obtida pelo método de síntese a partir de soluções de nitrato de prata e de borohidreto de sódio [60].

Além de conhecer as características das AgNP, é importante conhecer as propriedades morfológicas dos filmes em que essas nanopartículas foram inseridas. A técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV) permite obter informações morfológicas importantes, evidenciando a interação, a distribuição e a homogeneidade dos aditivos nos RCF e nanocompósitos. As micrografias de varredura dos filmes são apresentadas na Figura 2.14. Todas as amostras apresentam aglomerados, indicados pelas setas azuis, provavelmente decorrentes da dissolução incompleta da celulose no sistema solvente de NaOH [119].

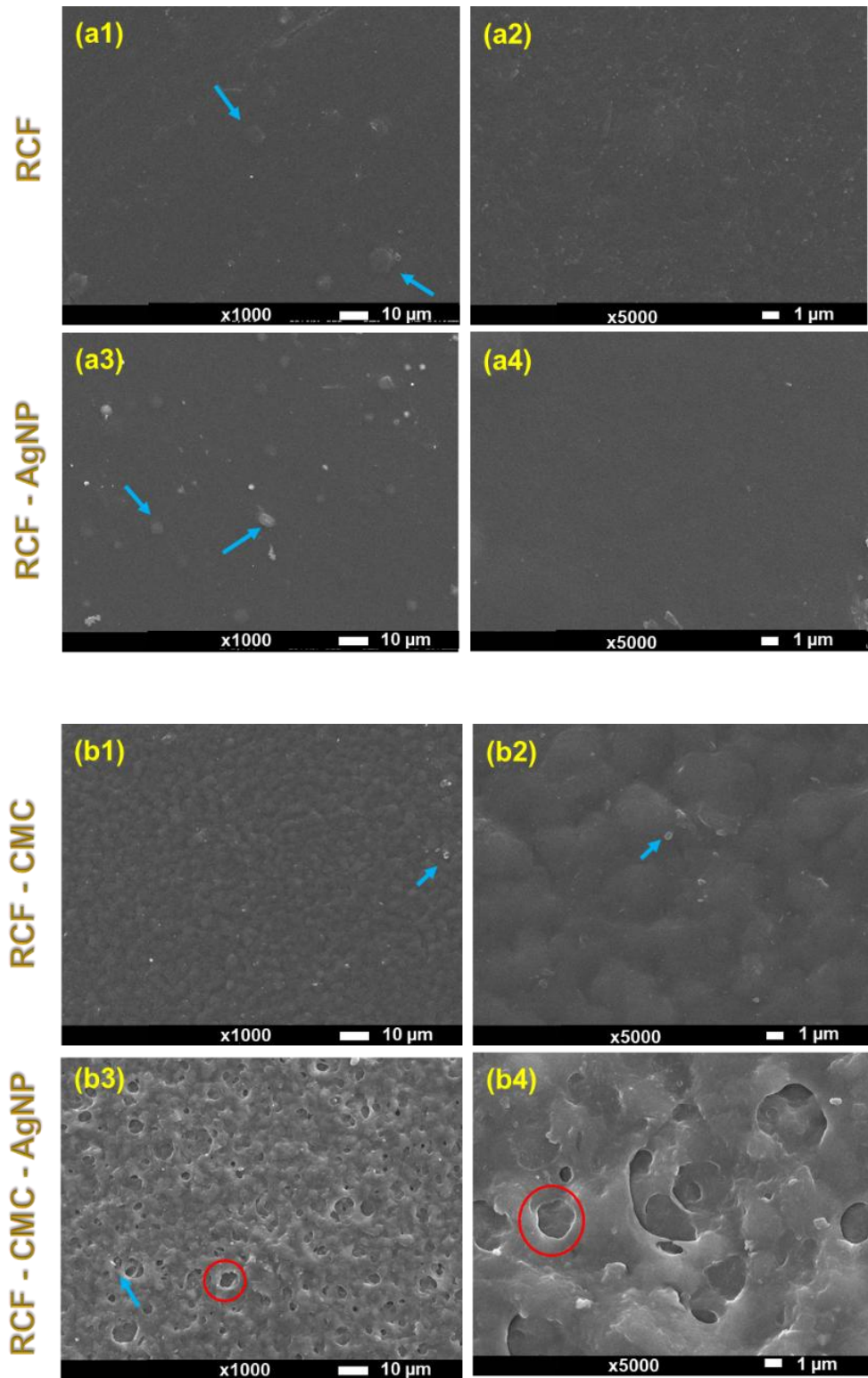


Figura 2.14 – Micrografias dos filmes RCF e dos nanocompósitos (continua).

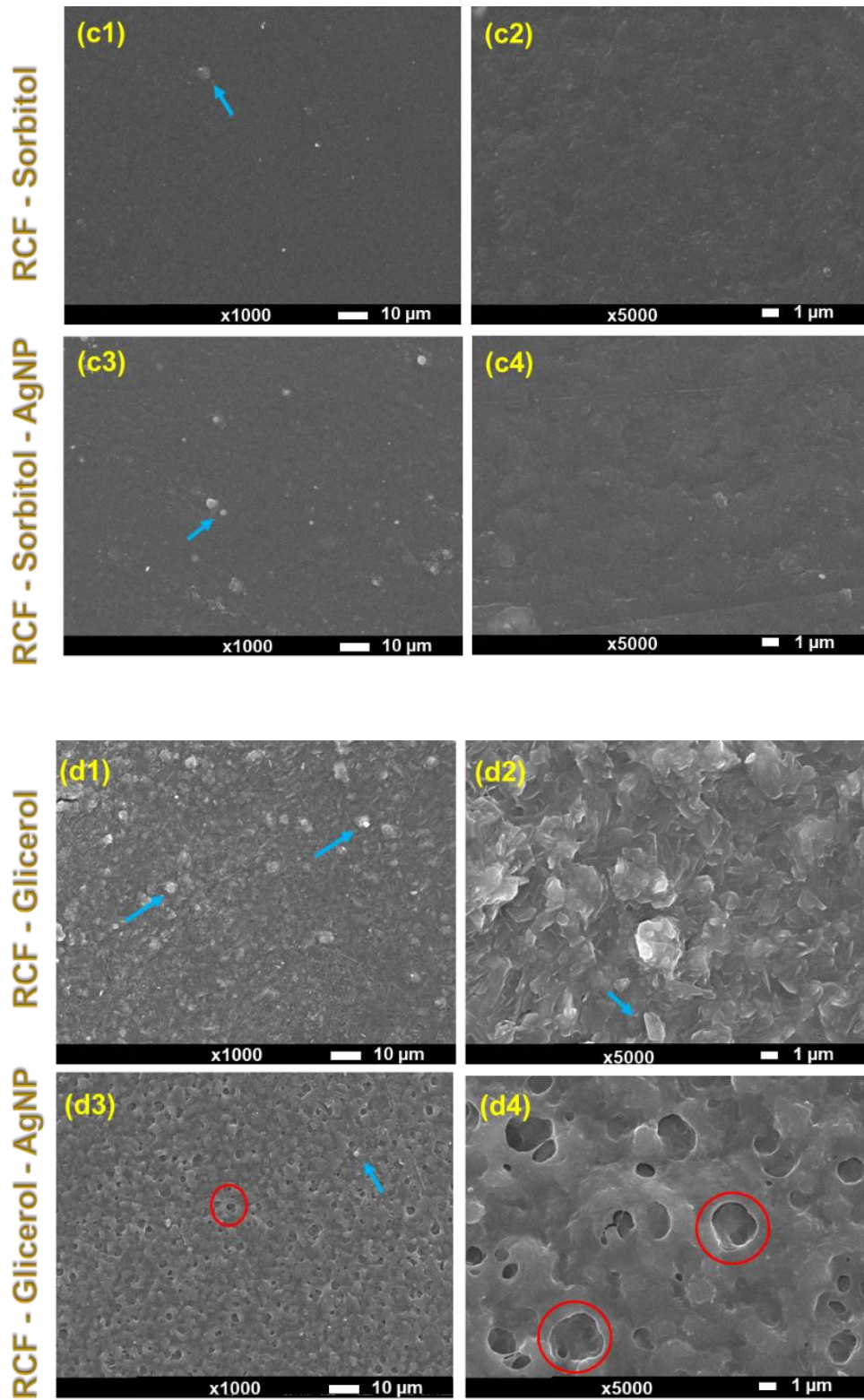


Figura 2.15 – Micrografias dos filmes RCF e dos nanocompósitos (continuação).

As amostras RCF e RCF-AgNP exibiram superfícies com características similares, apresentando superfícies uniformes e densas, com morfologia característica de filmes de celulose regenerada, o que indica boa dissolução da celulose de juta em sistema aquoso de NaOH [9].

A rugosidade dos filmes de celulose pode aumentar na presença de componentes como CMC e sorbitol. Esse efeito ocorreu na amostra RCF – CMC, como visto nas Figuras 2.14 (b1) e (b2) [18]. Ao inserir as nanopartículas, a superfície do filme RCF - CMC - AgNP apresenta poros, como observado nos círculos vermelhos destacados, de tamanhos irregulares e não homogêneos. As amostras RCF - Sorbitol e RCF - Sorbitol - AgNP exibiram superfícies com características semelhantes, mas provocaram mudanças na morfologia dos filmes em relação ao RCF, indicando que a incorporação do sorbitol aumentou a rugosidade da superfície dos filmes [120].

No filme RCF – Glicerol – AgNP, foi revelada uma superfície porosa com poros de tamanhos variados. Em estudos anteriores [121], [122], devido à adição de glicerol, correlacionada ao efeito plastificante observado nos filmes, a incorporação desse aditivo resulta em aumento da permeabilidade de gases. Isso ocorre porque o glicerol se liga às moléculas do biopolímero, promovendo maior mobilidade nas cadeias poliméricas e reduzindo a densidade entre as moléculas, o que facilita a passagem de gases por meio do material [77]. No filme RCF - Glicerol, observou-se visualmente quebra e rugosidade, provavelmente devidas a um efeito antiplastificante no filme [123], [124]. Diante disso, no próximo capítulo, que aborda o aumento da concentração de aditivo, o glicerol será descartado do estudo.

A análise da composição química dos filmes por meio da espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier complementa o MEV para entender a influência e a interação dos aditivos nas características dos filmes.

### **2.3.2. Caracterização dos RCFs Aditivados e dos Filmes Nanocompósitos por Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)**

A fim de conhecer os grupos funcionais presentes na estrutura dos filmes e as modificações químicas decorrentes da incorporação de aditivos, foi realizada a análise por espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier. Os espectros de FTIR dos RCFs e dos nanocompósitos são apresentados na Figura 2.15. As bandas de absorção em torno de  $3440\text{ cm}^{-1}$  correspondem ao estiramento da ligação de hidrogênio O-H, típico da celulose, e em torno de  $2900\text{ cm}^{-1}$ , ao alongamento do grupo funcional C-H [6].

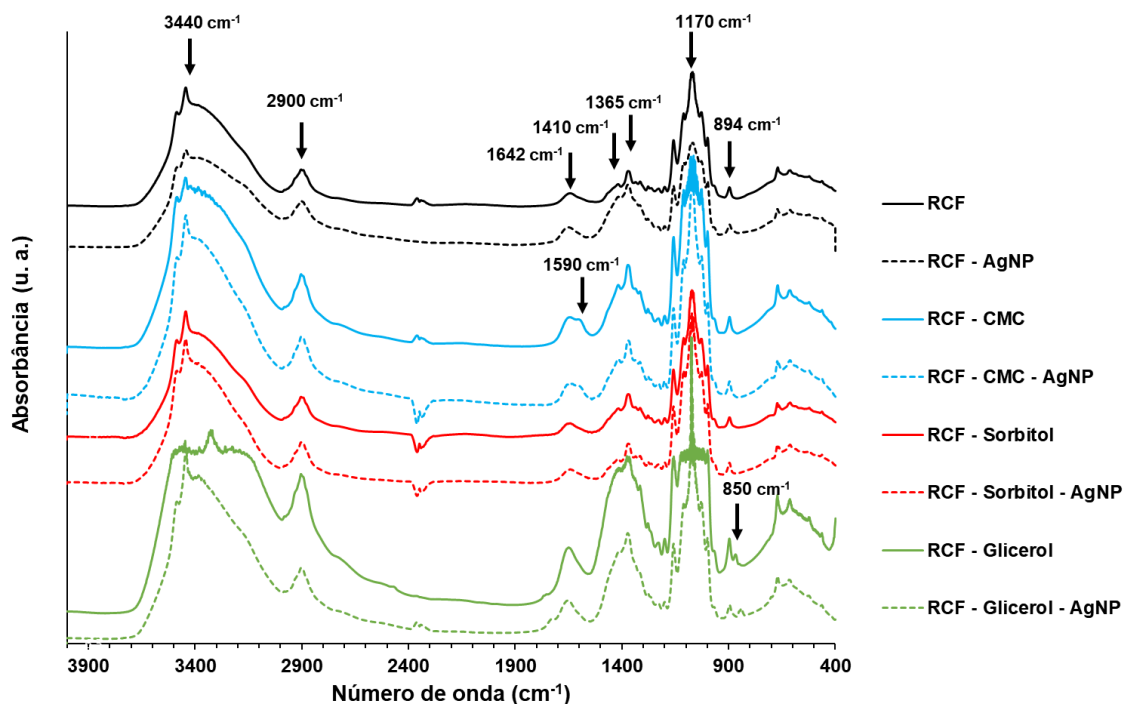


Figura 2.16 – Espectros de FTIR de RCFs aditivados e de nanocompósitos contendo AgNP.

A banda de absorção em torno de  $1410\text{ cm}^{-1}$  está associada ao dobramento simétrico do CH<sub>2</sub> na celulose, o que corresponde ao polimorfo da celulose II. Foram observados dois picos em  $1333\text{--}1311\text{ cm}^{-1}$  e uma banda em  $1365\text{ cm}^{-1}$ , correspondentes ao dobramento angular das ligações COH e HCC, normalmente presentes na celulose cristalina [9]. As bandas entre  $997$  e  $1200\text{ cm}^{-1}$  também são características da celulose.

As bandas em  $1170\text{ cm}^{-1}$ ,  $1040\text{--}1070\text{ cm}^{-1}$  e  $894\text{ cm}^{-1}$  estão relacionadas ao alongamento das vibrações C-O e à deformação C-H do anel piranose esquelético da celulose [5]. Em  $997\text{ cm}^{-1}$ , há um pico de estiramento C-O. Nenhuma ligação química entre celulose e NaOH foi identificada por meio de FTIR. Um pico relativo às ligações glicosídicas é de cerca de  $894\text{ cm}^{-1}$  [10].

Os polióis, como o sorbitol e o glicerol, apresentam bandas na faixa de  $1500$  a  $1200\text{ cm}^{-1}$ , atribuídas à sobreposição de C-H em planos e ao dobramento de O-H nas moléculas de polioli, coincidentes com os picos da celulose [125]. Assim como o CMC, também apresenta picos característicos da celulose, por ser um produto derivado dela. Nos filmes com adição de CMC, é evidente a presença da banda de absorção em  $1590\text{ cm}^{-1}$ , que corresponde à vibração de estiramento dos grupos carboxila ( $\text{COO}^-$ ) [126], [127], em que a desprotonação desses grupos está associada à estrutura da celulose [128].

Nos filmes com adição de glicerol, observa-se o aparecimento de um pico em torno de  $850\text{ cm}^{-1}$ , correspondente às vibrações dos grupos O-O [11]. A desprotonação do glicerol em ambiente alcalino pode favorecer a conversão catalítica do glicerol e levar à formação de

processos, como o de polimerização. Diante disso, o aumento da banda de ligação C=CO em  $1640\text{ cm}^{-1}$  [129], pode ser correlacionado a esses tipos de processo.

A mudança química nos filmes de celulose regenerada pode provocar alterações físicas. Nos próximos tópicos, serão apresentadas as mudanças químicas que afetaram as propriedades de transmitância e de estabilidade térmica desses filmes.

### 2.3.3. Caracterização dos RCFs Aditivados e dos Filmes Nanocompósitos por UV-Visível

A transmitância de filmes condutores é um importante fator a ser avaliado, pois as propriedades mutuamente opostas de condutividade e transparência, quando se utilizam materiais condutores metálicos em filmes, constituem uma tarefa desafiadora que pode limitar a aplicação em dispositivos eletrônicos, como os optoeletrônicos, como nas células solares e telas de toque [12], [130]. Além disso, a inserção de aditivos nos filmes de celulose regenerada pode influenciar a transmitância desses filmes, aumentando ou diminuindo-a [131].

Diante disso, o efeito da mistura de aditivos e da incorporação de AgNP na transmitância dos filmes de celulose regenerados foi investigado por meio de espectroscopia UV-Vis. As curvas de transmitância do filme RCF e dos filmes RCF aditivados foram observadas em toda a faixa de comprimento de onda de 200 a 800 nm [5] (Figura 2.16).

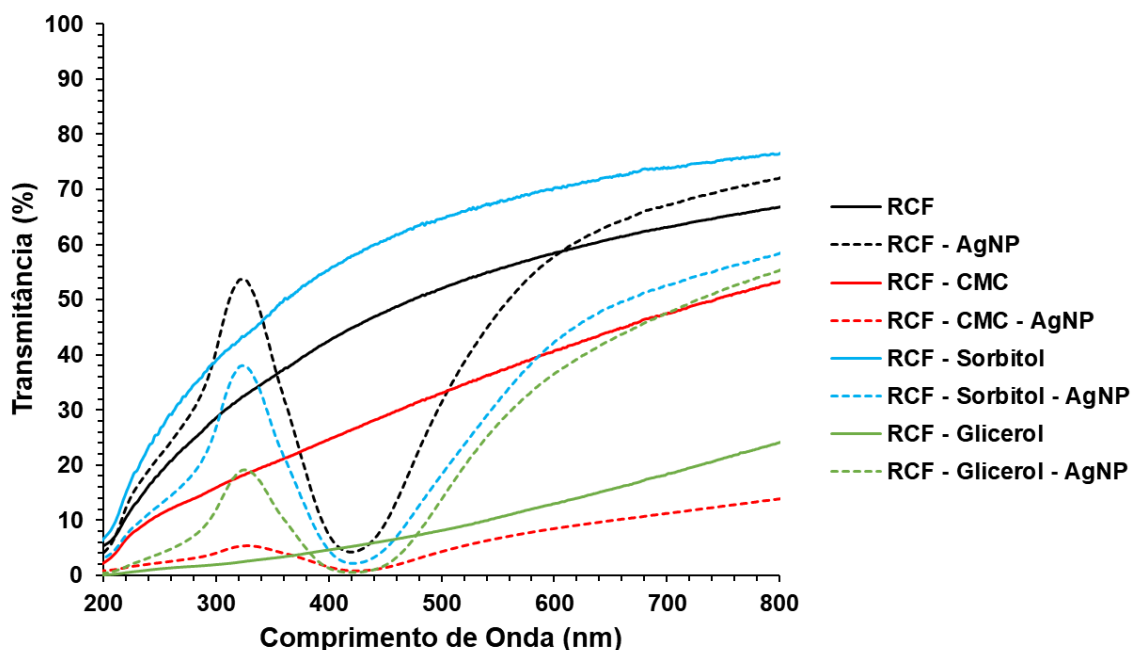


Figura 2.17 – Espectros UV-Vis dos filmes RCFs aditivados e dos nanocompósitos com AgNP.

A Figura 2.16 revela que a incorporação de AgNP, principalmente nas amostras RCF - Glicerol - AgNP e RCF - CMC - AgNP, propiciou baixa transmitância dos filmes na região do

UV, sugerindo que os nanocompósitos possuem propriedades anti-UV [132], [133], [134]. Na região visível do espectro, houve aumento da transmitância em todos os filmes. Além disso, a transmitância dos nanocompósitos de prata diminuiu com a incorporação de aditivos. A Tabela 2.5 apresenta as transmissividades dos filmes, medidas a 550 nm.

Tabela 2.5 – Medidas de transmitância a 550 nm: média e desvio padrão dos filmes.

| Amostra               | Transmitância a 550 nm (%) |      |      |            |
|-----------------------|----------------------------|------|------|------------|
|                       | 1                          | 2    | 3    | Média      |
| RCF                   | 55,6                       | 53,8 | 53,9 | 54,4 ± 0,8 |
| RCF - AgNP            | 8,7                        | 10,5 | 8,7  | 9,3 ± 0,8  |
| RCF - CMC             | 35,0                       | 36,2 | 36,9 | 36,0 ± 0,8 |
| RCF - CMC - AgNP      | 6,7                        | 4,4  | 5,2  | 5,4 ± 1,0  |
| RCF - Sorbitol        | 72,8                       | 67,8 | 73,1 | 71,2 ± 2,4 |
| RCF - Sorbitol - AgNP | 30,9                       | 31,5 | 31,4 | 31,2 ± 0,3 |
| RCF - Glicerol        | 8,7                        | 10,5 | 8,7  | 9,3 ± 0,8  |
| RCF - Glicerol - AgNP | 27,4                       | 25,1 | 21,6 | 24,7 ± 2,4 |

A amostra RCF apresentou um valor elevado de transmitância, conforme relatado em estudos com aplicações semelhantes em filmes de celulose regenerada [3]. A incorporação de sorbitol no RCF-Sorbitol aumentou a transmitância em relação ao RCF puro, enquanto, nas amostras de RCF-CMC e RCF-Glicerol, houve redução da transmitância em relação ao RCF.

Há diminuição da transmitância à medida que a luz tem mais dificuldade para atravessar a amostra [135]. Com a incorporação de AgNP, houve mudança de cor nos filmes nanocompósitos, com redução da transmitância em relação aos RCFs sem esse componente [136]. Não foram observados outros pontos de absorção significativos ao longo do espectro visível, indicando a ausência de aglomerados e de novas configurações das nanopartículas de prata [67].

A presença de uma banda de transmitância próxima a 300-400 nm para os filmes nanocompósitos contendo AgNPs, indica a existência deste componente nas amostras. As bandas nesta faixa de comprimento de onda estão associadas a essas nanopartículas esféricas de metal. AgNPs de menor tamanho apresentam um pico de absorção em comprimentos de onda mais curtos, conforme observado nos espectros [7].

Observou-se que os filmes RCF - CMC - AgNP e RCF - Glicerol - AgNP apresentaram uma diminuição significativa da transmitância em relação ao nanocompósito RCF – AgNP sem aditivo. A incorporação desses aditivos, que promovem estruturas com porosidade, como observado nas micrografias do MEV, proporcionou maior opacidade dos filmes [137].

### 2.3.4. Caracterização Térmica (TG/DTG) dos Aditivos, RCFs Aditivados e dos Filmes Nanocompósitos

O efeito da inserção de aditivos e de AgNP na estabilidade térmica dos filmes de celulose regenerados foi estudado por meio de análise termogravimétrica (TG) e termogravimetria derivada (DTG), com as curvas apresentadas na Figura 2.17 (a2) e (b2). Os aditivos, como o glicerol e o sorbitol, ocupam posições intermediárias entre as cadeias poliméricas da celulose, aumentando efetivamente a distância entre elas e reduzindo as interações intermoleculares secundárias [56]. Diante disso, torna-se importante conhecer os fenômenos térmicos associados à variação de massa dos RCFs decorrentes da adição desses componentes [18].

As curvas da Figura 2.17 (a1) e (b1) mostram os resultados das análises térmicas dos aditivos isoladamente, para comparação. A Tabela 2.6 mostra as temperaturas de estabilidade térmica, os picos de degradação dos aditivos, dos RCFs e dos nanocompósitos, e a perda de massa no intervalo de 100 °C a 600 °C.

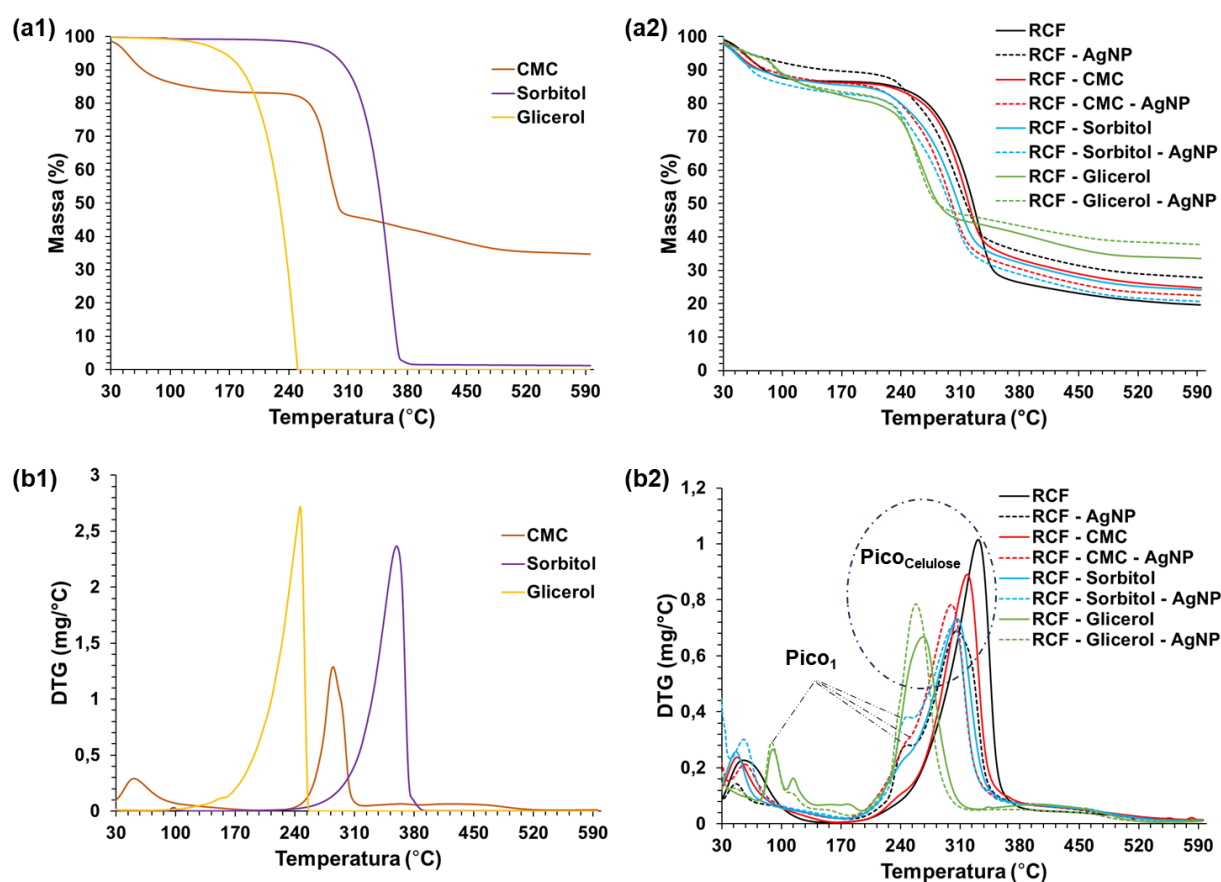


Figura 2.18 – Curvas de (a1) TG e (b1) DTG dos aditivos; e de (a2) TG e (b2) DTG dos RCFs aditivados e dos nanocompósitos com AgNP.

Tabela 2.6 – Temperaturas de estabilidade térmica e de degradação dos aditivos e dos filmes regenerados, com e sem aditivos e AgNP.

|                              | Estabilidade Térmica - Ti (°C) | Pico1 (°C) | Pico <sub>Celulose</sub> (°C) | Perda de Massa (%) |          |          |          |          |          |
|------------------------------|--------------------------------|------------|-------------------------------|--------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                              |                                |            |                               | 100 (°C)           | 200 (°C) | 300 (°C) | 400 (°C) | 500 (°C) | 600 (°C) |
| <b>CMC</b>                   | 243,9                          | 286,4      | -                             | 13,7               | 16,8     | 51,8     | 58,8     | 64,2     | 65,3     |
| <b>Sorbitol</b>              | 267,1                          | 362,5      | -                             | 0,6                | 0,9      | 7,1      | 98,5     | 98,7     | 98,8     |
| <b>Glicerol</b>              | 146,6                          | 246,8      | -                             | 0,8                | 17,8     | 100      | 100      | 100      | 100      |
| <b>RCF</b>                   | 230,3                          | -          | 334,1                         | 12,2               | 13,7     | 31,0     | 74,7     | 78,6     | 80,4     |
| <b>RCF - AgNP</b>            | 219,9                          | 243,0      | 309,9                         | 12,3               | 16,8     | 53,3     | 68,6     | 73,3     | 74,5     |
| <b>RCF - CMC</b>             | 222,2                          | 241,8      | 321,4                         | 12,1               | 14,0     | 33,8     | 68,1     | 73,2     | 75,2     |
| <b>RCF - CMC - AgNP</b>      | 197,2                          | 244,2      | 303,4                         | 11,3               | 14,7     | 50,0     | 71,0     | 76,1     | 77,6     |
| <b>RCF - Sorbitol</b>        | 212,5                          | 239,9      | 310,9                         | 11,9               | 15,2     | 44,4     | 69,1     | 74,3     | 75,9     |
| <b>RCF - Sorbitol - AgNP</b> | 219,9                          | 241,8      | 305,9                         | 14,1               | 17,8     | 52,1     | 72,6     | 77,9     | 79,3     |
| <b>RCF - Glicerol</b>        | 210,9                          | 116,0      | 270,9                         | 11,0               | 19,4     | 53,9     | 60,4     | 65,6     | 66,4     |
| <b>RCF - Glicerol - AgNP</b> | 201,0                          | 112,4      | 252,9                         | 11,6               | 17,6     | 52,4     | 57,7     | 61,3     | 62,3     |

\* Ti: Temperatura inicial de degradação, a partir da qual começa a ocorrer perda de massa significativa do material; determinada pelo método do “onset”.

Para a CMC há uma perda de massa abaixo de 100 °C devido à perda de umidade da amostra [9]. Os aditivos apresentam picos de degradação térmica únicos e bem definidos, o que evidencia sua pureza, devido à ausência de picos de outros compostos [138].

O glicerol é o aditivo com menor estabilidade térmica, seguido pelo CMC, com uma diferença superior a 98 °C. O sorbitol apresenta maior estabilidade térmica entre os aditivos; consequentemente, apresenta maior temperatura de pico de degradação térmica. O CMC apresenta temperatura final do pico de degradação de aproximadamente 325 °C, o sorbitol, de 403 °C, e o glicerol, de 268 °C. Essa diferença na estabilidade térmica dos aditivos decorre da estrutura molecular de cada um. O sorbitol, apesar de ser um poliol como o glicerol, possui uma cadeia molecular mais longa, com mais grupos hidroxila disponíveis, o que confere maior estabilidade térmica em comparação ao glicerol [77]. Já o CMC possui grupos carboxilatos que fazem com que a degradação ocorra mais tardiamente [82]. O sorbitol e o glicerol apresentam quase nenhum resíduo de degradação a 600 °C, indicando degradação completa dos aditivos. Já o CMC deixa um resíduo de aproximadamente 45% devido à sua forma sódica de comercialização e à presença de grupos carboxílicos em sua composição [126], [127].

Nas curvas de TG e DTG das amostras dos filmes regenerados, observa-se um evento térmico que ocorre a temperaturas inferiores a 100 °C em todas as amostras, devido à perda de umidade [9]. O pico principal de degradação da celulose variou de aproximadamente 253 °C a 334 °C, dentro da faixa observada na literatura [18], [74]. As amostras menos estáveis termicamente, com picos de degradação de celulose deslocados para temperaturas

mais baixas, foram aquelas com glicerol, provavelmente devido à degradação desse componente a temperaturas mais baixas [18].

Um pequeno pico de degradação das amostras RCF - CMC e RCF - CMC - AgNP está relacionado à degradação da CMC e coincide com a temperatura de estabilidade térmica observada para esse aditivo. Isso também é observado para RCF - AgNP, devido à CMC utilizado na solução de nanopartículas para estabilização.

A incorporação de AgNP em todos os filmes nanocompósitos deslocou o pico de degradação da celulose para temperaturas mais baixas. Esse fenômeno pode ser correlacionado à ação catalítica das AgNP sobre a matriz polimérica de celulose, atuando como iniciantes e facilitadores da degradação térmica da matriz polimérica devido à sua elevada condutividade térmica, como observado em outros trabalhos sobre aplicações em polímeros [139], [140].

Até 200 °C, a perda de massa das amostras foi abaixo de 20%, porém, para as amostras RCF - Glicerol e RCF - Glicerol - AgNP há uma perda de massa maior devido à temperatura de início de degradação do glicerol, visto pelo valor de sua estabilidade térmica [18]. Além disso, as amostras contendo glicerol possuem menor perda de massa em 600 °C, gerando resíduos com uma média de aproximadamente 35%. Isso pode ser devido à provável mudança química do glicerol, como observado pelo FTIR, que forma ligações mais complexas entre os átomos de carbono [129]. Para as demais amostras, os resíduos variaram entre 19,6% e 25,5%, dentro do esperado para RCFs [74], [141].

A partir dos resultados obtidos, observa-se que a adição de glicerol não conferiu mudança muito grande na estabilidade térmica dos filmes; porém, o pico principal de degradação dos filmes foi deslocado para temperaturas mais baixas, com uma diferença de 81,2 °C entre a amostra RCF - Glicerol - AgNP e a amostra RCF. Diante disso, a degradação principal dessas amostras com glicerol ocorreu abaixo de 330 °C, enquanto a das demais ocorreu acima de 385 °C.

A estabilidade térmica de todos os filmes aditivados foi inferior à do RCF puro. A incorporação de aditivos reduz a rigidez das cadeias poliméricas. Diante disso, a estabilidade térmica dos filmes foi comprometida. Dessa maneira, a incorporação de aditivo também reduziu as temperaturas iniciais e finais de decomposição de todos os filmes, evidenciando uma mistura estável e interações entre a celulose regenerada e os aditivos [120].

### **2.3.5. Caracterização Elétrica dos Filmes Nanocompósitos pelo Método de Van der Pauw**

A concentração de AgNP pode afetar a condutividade dos filmes de celulose regenerada; porém, há uma lacuna devido à escassez de estudos na área sobre a aditivação

desses filmes condutores. Podem ser encontrados estudos sobre a aditivação ou inserção de plastificantes em filmes de celulose regenerada, porém não empregados em filmes com inserção de condutores. Diante disso, é importante que a condutividade desses filmes seja avaliada também com a aditivação com CMC, sorbitol e glicerol. Ademais, o método de Van der Pauw permite medir propriedades elétricas desses filmes nanocompósitos de celulose regenerada, por serem aproximadamente bidimensionais (ou seja, muito mais finos do que largos), o que reduz erros experimentais, como os introduzidos pelo desalinhamento de contatos [116]. A Tabela 2.7 apresenta os valores médios de resistência de folha obtidos pelo método de Van der Pauw, bem como as espessuras, resistividades e condutividades dos filmes nanocompósitos.

Tabela 2.7 – Dados médios de resistência de folha, espessura média, resistividade e condutividade de três amostras de cada nanocompósito, com medidas realizadas em quadruplicata.

| Amostra               |     | Resistência de Folha Média *1 ( $\Omega/\square$ ) | Espessura média (cm) | Resistividade ( $\Omega\cdot\text{cm}$ ) | Condutividade (S/cm)    | Condutividade Média (S/cm) |
|-----------------------|-----|----------------------------------------------------|----------------------|------------------------------------------|-------------------------|----------------------------|
| RCF - AgNP            | 1   | 3.232 $\pm$ 118                                    | 0,0031               | 9,8595                                   | 0,1014                  | 0,06836 $\pm$ 0,0230       |
|                       | 2   | 4.562,5 $\pm$ 156                                  | 0,0041               | 18,6555                                  | 0,0536                  |                            |
|                       | 3   | 5.611,6 $\pm$ 460                                  | 0,0036               | 19,9773                                  | 0,0501                  |                            |
| RCF - CMC - AgNP      | 1   | 1.697 $\pm$ 112                                    | 0,0020               | 3,4506                                   | 0,2898                  | 0,2682 $\pm$ 0,0504        |
|                       | 2   | 2.664 $\pm$ 73                                     | 0,0019               | 5,1716                                   | 0,1934                  |                            |
|                       | 3   | 2.262 $\pm$ 33                                     | 0,0014               | 3,2395                                   | 0,3087                  |                            |
| RCF - Sorbitol - AgNP | 1   | 1.810 $\pm$ 153                                    | 0,0027               | 4,8532                                   | 0,2060                  | 0,1774 $\pm$ 0,0359        |
|                       | 2   | 3.106 $\pm$ 105                                    | 0,0025               | 7,8901                                   | 0,1267                  |                            |
|                       | 3   | 1.744 $\pm$ 20                                     | 0,0029               | 5,0153                                   | 0,1994                  |                            |
| RCF - Glicerol - AgNP | 1   | 2.544 $\pm$ 70                                     | 0,0019               | 4,8343                                   | 0,2069                  | 0,2260 $\pm$ 0,0506        |
|                       | 2   | 1.627 $\pm$ 91                                     | 0,0021               | 3,3858                                   | 0,2953                  |                            |
|                       | 3   | 3.872 $\pm$ 69                                     | 0,0015               | 5,6897                                   | 0,1758                  |                            |
| RCF *2                | [9] | 19.061                                             | 0,0016               | 30,50                                    | 3,28 x 10 <sup>-2</sup> |                            |
| RCF - 0,290% AgNP *2  | [9] | 12.532                                             | 0,0015               | 18,80                                    | 5,32 x 10 <sup>-2</sup> |                            |

\*1 Em cada amostra de filme, foi realizada a medição da resistência de folha em quadruplicata.

\*2 Dados retirados da literatura, desenvolvidos em trabalho anterior.

Em trabalho anterior, foram desenvolvidos nanocompósitos com variação no teor de AgNP, em que a condutividade aumentou com o aumento desse teor. Os dados elétricos do RCF puro e do nanocompósito mais condutivo, com o maior teor de AgNP estudado, estão apresentados na Tabela 2.7. Comparado ao trabalho anterior, o aumento do teor de nanopartículas de prata de 0,290% para 0,5% no RCF – AgNP (sem aditivo) resultou em um aumento de 28,5% na condutividade. Além disso, houve um aumento de 717,8% na condutividade do RCF-CMC-AgNP em relação à do RCF puro [9].

Os nanocompósitos aditivados apresentaram uma melhora significativa na condutividade devido à incorporação desses componentes, passando da faixa de  $10^{-2}$  para  $10^{-1}$  em relação ao RCF - AgNP possuindo o mesmo teor de nanopartículas, conferindo um aumento de 292,3% para RCF - CMC - AgNP, 159,50% para RCF - Sorbitol - AgNP e 230,6% para RCF - Glicerol - AgNP.

A CMC apresentou os melhores valores de condutividade no nanocompósito, seguido pelo glicerol e, em seguida, pelo sorbitol. A diferença entre os filmes aditivados RCF - CMC - AgNP, com maior condutividade, e RCF - Sorbitol - AgNP, com menor condutividade, foi de 51,2%. A diferença entre RCF - CMC - AgNP e RCF - Glicerol - AgNP foi menor, de 18,7%.

O efeito de aumento da condutividade decorrente de aditivos já foi observado em outros trabalhos. Filmes compósitos de poliuretano/nanopartículas de celulose regenerada obtiveram aumento da condutividade com a incorporação de RCNs, melhorando também as propriedades mecânicas dos filmes [19]. Em blendas de polianilina e borracha nitrílica, houve aumento da condutividade utilizando propriedades de líquidos iônicos à base de imidazólio como plastificantes [142].

Filmes condutores de celulose regenerada na ordem de grandeza de  $10^{-2}$  a  $10^{-1}$  S/cm, encontrados para os filmes nanocompósitos nesse trabalho, podem se mostrar potencialmente promissores para aplicações como supercapacitores [14], [34], [39], sensor de deformação [6], blindagem de interferência eletromagnética [10], [11], filmes de celulose antiestáticos [29].

## **2.4. CONCLUSÕES DO CAPÍTULO II**

A aditivação dos filmes reduziu as temperaturas iniciais e finais de decomposição de todos os filmes, evidenciando uma mistura homogênea e interações entre a celulose regenerada e os aditivos. A incorporação de AgNP em todos os filmes nanocompósitos deslocou o pico de degradação térmica da celulose para temperaturas mais baixas. A estabilidade térmica dos nanocompósitos variou entre 197 °C e 220 °C.

Os filmes RCF - Sorbitol, RCF - Sorbitol - AgNP, e RCF - CMC exibiram superfície rugosa. Ao inserir AgNP a superfície do filme RCF - CMC - AgNP mostra estrutura porosa de tamanhos irregulares e não homogêneos. Nos filmes RCF - Glicerol e RCF - Glicerol - AgNP, observou-se uma superfície porosa, com poros de tamanhos variados. Os aditivos apresentaram dispersão na matriz de celulose, sem agregação dos constituintes.

Com a incorporação de AgNP, houve mudança de cor nos filmes nanocompósitos, com redução da transmitância em relação aos RCFs sem esse componente. É visto que os filmes RCF - CMC - AgNP e RCF - Glicerol - AgNP apresentaram uma diminuição significativa da transmitância em relação aos nanocompósitos sem aditivos (RCF - AgNP), devido à

incorporação desses aditivos, que promovem estruturas com porosidade, como observado nas micrografias do MEV. O nanocompósito com aditivo de maior transmitância foi o RCF - Sorbitol - AgNP.

Os nanocompósitos aditivados apresentaram uma melhora significativa na condutividade devido à incorporação desses componentes, passando da faixa de  $10^{-2}$  para  $10^{-1}$  em relação ao RCF - AgNP possuindo o mesmo teor de nanopartículas. Ocorreu aumento de 292,3% para RCF - CMC - AgNP, de 159,50% para RCF - Sorbitol - AgNP e de 230,6% para RCF - Glicerol - AgNP, em relação ao RCF - AgNP. A CMC apresentou os melhores valores de condutividade no nanocompósito, seguido pelo glicerol e, em seguida, pelo sorbitol.

Diante dos resultados, o nanocompósito RCF - CMC - AgNP apresentou as melhores propriedades de aplicação, condutividade e estabilidade térmica aceitável, entretanto, apresentou o menor valor de transmitância em relação aos outros nanocompósitos. Devido ao aspecto frágil e quebradiço dos nanocompósitos contendo glicerol, esse aditivo foi descartado do estudo.

## **CAPÍTULO III – ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA CONCENTRAÇÃO E TIPO DE ADITIVO NOS NANOCOMPÓSITOS**

---

### **2.4. INTRODUÇÃO DO CAPÍTULO III**

Estudos recentes têm demonstrado que a funcionalização de filmes de celulose regenerada (RCFs) com nanopartículas de prata (AgNPs) pode conferir condutividade elétrica, ampliando seu potencial tecnológico [9]. No entanto, a fragilidade dos filmes pode acarretar limitações que comprometem sua aplicabilidade prática. Para superar esse desafio, a incorporação de aditivos tem se mostrado uma estratégia, não apenas por melhorar as propriedades mecânicas [88], mas também por influenciar diretamente as características elétricas do material, como visto no Capítulo II.

No Capítulo II, evidenciou-se que nanocompósitos aditivados com 0,5% de AgNPs apresentaram aumento da condutividade de  $10^{-2}$  S/cm para  $10^{-1}$  S/cm. Esse comportamento indica que os aditivos desempenham papel relevante não apenas na mobilidade segmentar da matriz, mas também na formação e estabilização das redes condutoras, reforçando a necessidade de explorar, de forma sistemática, sua influência no desempenho elétrico dos filmes.

Fatores como o tipo e a concentração do aditivo afetam diretamente propriedades como resistência elétrica, resistividade e flexibilidade, tornando essencial a otimização dessas variáveis para obter filmes de alto desempenho. Nesse sentido, ferramentas de planejamento experimental, como o método fatorial, permitem avaliar os efeitos principais e as interações entre os fatores de processo, possibilitando a determinação de condições ideais para as propriedades-alvo [22], [143]. O controle adequado dessas variáveis é especialmente relevante, pois, na faixa de condutividade ( $10^{-2}$  a  $10^{-1}$  S/cm), os filmes podem ser candidatos a aplicações tecnológicas avançadas.

Tradicionalmente, metais e ligas metálicas têm sido empregados como materiais de blindagem eletromagnética devido à sua elevada condutividade elétrica. Contudo, o alto peso específico, a suscetibilidade à corrosão e a baixa flexibilidade mecânica desses materiais limitam sua aplicação em dispositivos modernos, especialmente em sistemas de pequena escala, em eletrônica flexível e em dispositivos vestíveis [144]. Diante disso, nanocompósitos poliméricos condutores, como os filmes de celulose regenerada funcionalizados com AgNPs e aditivados, surgem como alternativas promissoras.

Esses filmes podem apresentar potencial crescente em áreas como sensores descartáveis, eletrônica flexível, dispositivos vestíveis e eletrônica transitória, setores nos quais a combinação entre desempenho elétrico, baixo impacto ambiental e possibilidade de degradação ao final do ciclo de vida é altamente desejável [5], [145], [146], [147]. Dessa forma,

compreender como os aditivos interferem simultaneamente nas propriedades mecânicas e elétricas dos filmes é um passo essencial para consolidar essas aplicações.

Portanto, o presente capítulo buscou aprofundar a compreensão da influência dos aditivos sobre as propriedades elétricas de filmes de celulose regenerada contendo nanopartículas de prata. Por meio da aplicação de métodos estatísticos e experimentais, pretende-se avaliar o impacto do tipo e da concentração de aditivo nas propriedades condutoras desses nanocompósitos, explorando seu potencial como materiais funcionais condutores.

## **2.5. REVISÃO DO CAPÍTULO III**

### **2.5.1. Planejamento Experimental para Avaliação da Influência de Variáveis na Produção de Filmes Nanocompósitos**

A condutividade de filmes nanocompósitos pode ser diretamente influenciada por fatores como a concentração e o tipo de aditivo, conforme evidenciado pelos resultados do Capítulo II. O avanço das tecnologias aplicáveis à produção desses filmes possibilita o controle e o ajuste de variáveis que conduzem à otimização do processo, trazendo benefícios tanto técnicos quanto ambientais. Nesse contexto, ferramentas de análise estatística se mostram essenciais, pois permitem avaliar, de forma sistemática, a influência de múltiplos fatores sobre respostas de interesse, identificando quais variáveis exercem maior impacto no desempenho do sistema [20], [22].

O planejamento experimental é, portanto, um recurso metodológico indispensável para compreender a relação entre variáveis de entrada e de saída em sistemas complexos. Nesse tipo de abordagem, os fatores correspondem às variáveis controláveis pelo pesquisador, enquanto as respostas representam os parâmetros de saída que indicam se houve ou não uma alteração significativa decorrente das modificações impostas. Ao explorar essa relação, é possível identificar as melhores condições de operação do processo, ampliando a compreensão da natureza do sistema estudado [148], [149].

Entre os diferentes métodos experimentais, o planejamento fatorial destaca-se por permitir a análise simultânea de múltiplos fatores e a determinação tanto de seus efeitos individuais quanto das interações entre eles. Nessa abordagem, os fatores são avaliados em diferentes níveis, sendo necessários, no mínimo, dois níveis distintos para que sua influência sobre uma resposta seja mensurável. A variação dos níveis permite observar como a resposta se comporta diante de alterações específicas, fornecendo dados quantitativos sobre a magnitude do efeito de cada fator.

O resultado desse processo é a identificação da influência direta e indireta dos fatores investigados. A intensidade dessa relação é expressa pelo valor do efeito, de modo que

quanto maior esse valor, mais forte é a associação entre o fator e a resposta. Além disso, o sinal do efeito indica a direção dessa dependência: efeitos positivos indicam que a resposta aumenta proporcionalmente ao aumento do fator, enquanto efeitos negativos sugerem que a resposta diminui à medida que o fator cresce [143]. Assim, o planejamento fatorial constitui uma ferramenta poderosa para a análise e otimização de processos, fornecendo subsídios para o desenvolvimento de nanocompósitos de alto desempenho.

A interação geométrica dos efeitos no caso da produção de um filme nanocompósito de celulose regenerada com nanopartículas de prata, com variações na concentração e no tipo de aditivo, é representada na Figura 3.1.

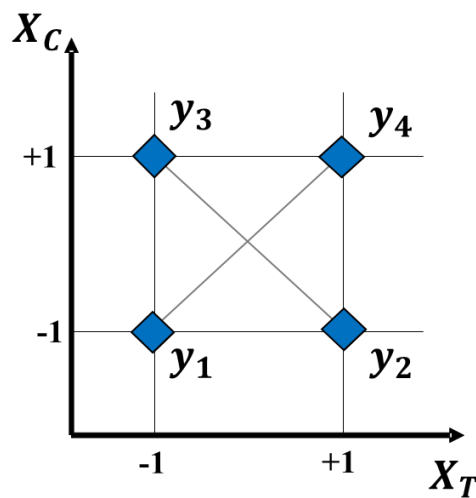


Figura 0.1 - Interpretação geométrica dos efeitos no planejamento  $2^2$ . Os principais efeitos são contrastes entre arestas opostas. O efeito de interação é o contraste entre as duas diagonais.

No gráfico mostrado,  $X_T$  é o fator principal de tipo de aditivo e  $X_C$  é o fator principal de concentração do aditivo; -1 é o nível inferior de variação do fator e +1 o nível superior;  $y_n$  são as respostas produzidas com a combinação dos fatores em seus respectivos níveis de variação. Os principais efeitos são definidos como a diferença entre as médias das respostas no nível superior e no nível inferior, correspondentes a cada fator. Os principais efeitos são contrastes entre valores situados em arestas opostas e perpendiculares ao eixo do fator correspondente, portanto, são diferenças médias. O efeito de interação entre os fatores é o contraste entre as duas diagonais, considerando positiva a diagonal que liga o nível (- -) ao nível (++) .

## 2.6. METODOLOGIA DO CAPÍTULO III

A metodologia apresentada nesse capítulo é ilustrada na Figura 3.2 e será descrita detalhadamente adiante.

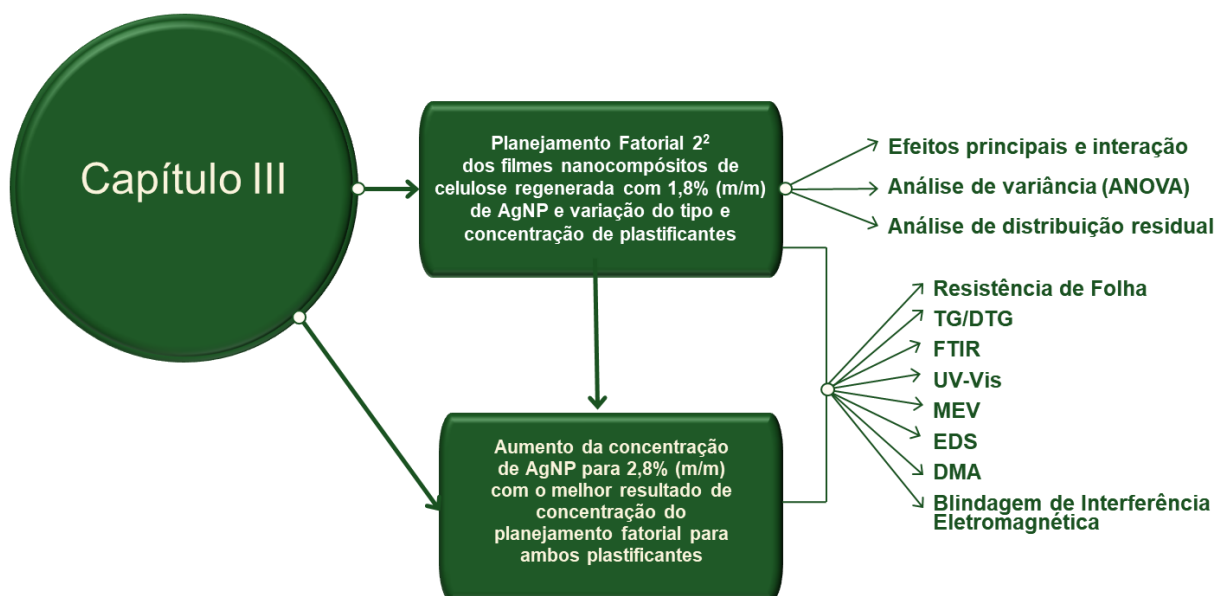


Figura 0.2 - Esquema da metodologia adotada no Capítulo III.

### 2.6.1. Materiais

Os materiais usados nesse capítulo foram os mesmos descritos na seção 2.3.1. do Capítulo II.

### 2.6.2. Planejamento Fatorial 2<sup>2</sup> para Produção dos Filmes Nanocompósitos

Foi realizado um planejamento fatorial 2<sup>2</sup> com o objetivo de avaliar a condutividade (S/cm) dos filmes nanocompósitos de celulose regenerada com 1,8% de AgNPs, considerando o tipo de aditivo e a concentração de aditivo. Fatores como esses tendem a modificar os resultados de condutividade dos filmes nanocompósitos, como visto no capítulo anterior. O planejamento fatorial foi realizado considerando os tipos de aditivos, carboximetilcelulose sódica (CMC) e sorbitol, e as concentrações de 15% e 20% (m/m) no filme nanocompósito. Para cada fator, os valores mais baixos e mais altos dos níveis de planejamento foram representados por -1 e +1, respectivamente, conforme apresentado na Tabela 3.1. O planejamento estatístico dos experimentos foi aleatorizado, e o fatorial foi utilizado para todas as combinações possíveis. As amostras foram caracterizadas em duplicata para cada condição, a fim de determinar o intervalo de confiança e o erro padrão.

Tabela 0.1 - Descrição do Projeto Fatorial, Variáveis Experimentais e Níveis dos Fatores.

| Fator independente | Nível |          | Símbolo |
|--------------------|-------|----------|---------|
|                    | -1    | 1        |         |
| Tipo de reagente   | CMC   | Sorbitol | T       |
| Concentração (%)   | 15    | 20       | C       |

### 2.6.3. Análise Estatística

#### 2.6.3.1. Modelagem matemática

A análise preditiva baseada em regressão múltipla é um método flexível que pode ser apropriado para avaliar uma resposta ou variável dependente em relação a dois ou mais fatores. A influência das variáveis C e T no processo de produção de alfacelulose foi aproximada usando o modelo estatístico da Equação 3.1:

$$\bar{C}(x_T, x_C) = \beta_0 + \beta_T x_T + \beta_C x_C + \beta_{TC} x_T x_C + \varepsilon(x_T, x_C) \quad (3.1)$$

onde  $\bar{C}(x_T, x_C)$  é o parâmetro da resposta média de condutividade (S/cm),  $x_T$  (tipo de aditivo) e  $x_C$  (concentração de aditivo) são os níveis (+1 ou -1) de fatores experimentais;  $x_T x_C$  representa a interação entre  $x_T$  e  $x_C$ ;  $\beta_0$  é o modelo de interceptação que corresponde à média de respostas ( $x_T = x_C = 0$ );  $\beta_T$  e  $\beta_C$  são os coeficientes dos termos lineares e  $\beta_{TC}$  é o coeficiente dos fatores de interação; e  $\varepsilon$  é o erro aleatório associado.

Assumindo que o nível de fator alto seja +1 e o nível de fator baixo seja -1, após a transformação dos fatores, o sistema experimental assume a forma de uma matriz, que, no caso de dois fatores, é mostrada na Equação 3.2:

$$\begin{array}{cc} \text{Experimento} & \begin{array}{cc} x_T & x_C \end{array} \\ \begin{array}{c} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{array} & \begin{bmatrix} CMC & 15 \\ Sorbitol & 15 \\ CMC & 20 \\ Sorbitol & 20 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & -1 \\ +1 & -1 \\ -1 & +1 \\ +1 & +1 \end{bmatrix} \end{array} \quad (3.2)$$

Para calcular os coeficientes, uma matriz X é construída estendendo-a pela coluna I para uma expressão constante e as colunas para todas as possíveis interações fatoriais no modelo na Equação 3.3:

$$X = \begin{bmatrix} I & x_T & x_C & x_{TC} \\ +1 & -1 & -1 & +1 \\ +1 & +1 & -1 & -1 \\ +1 & -1 & +1 & -1 \\ +1 & +1 & +1 & +1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

O modelo predito é resumido por meio da relação da matriz pela Equação 3.4:

$$\bar{R} = X \times \beta \quad (3.4)$$

correspondendo ao sistema matricial da Equação 3.5:

$$\begin{bmatrix} \bar{R}_1 \\ \bar{R}_2 \\ R_3 \\ R_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} +1 & -1 & -1 & +1 \\ +1 & +1 & -1 & -1 \\ +1 & -1 & +1 & -1 \\ +1 & +1 & +1 & +1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_I \\ \beta_C \\ \beta_T \\ \beta_{CT} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Por fim, os coeficientes são determinados resolvendo a Equação 3.6 usando o método dos mínimos quadrados:

$$\beta = (X^T \cdot X)^{-1} X^T \cdot \bar{C} \quad (3.6)$$

onde  $\beta$  - conjunto dos coeficientes;  $X^T$  - matriz transposta;  $\bar{C}$  - resposta média de condutividade.

Testes como análise de variância (ANOVA), análise de distribuição residual e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) foram utilizados para verificar a adequação do modelo. Os resultados experimentais obtidos nas execuções foram analisados no software Jamovi 2.6.44.

#### 2.6.3.2. Cálculo dos efeitos

Os principais efeitos de T e C e o fator de interação TC são definidos como a diferença entre a média das respostas no nível alto e a média das respostas no nível baixo correspondente a cada fator. Os respectivos efeitos foram obtidos pelas Equações 3.7, 3.8 e 3.9.

$$Efeito_T = \bar{C}_+ + \bar{C}_- = \left( \frac{\bar{y}_2 + \bar{y}_4}{2} \right) - \left( \frac{\bar{y}_1 + \bar{y}_3}{2} \right) \quad (3.7)$$

$$Efeito_C = \bar{C}_+ + \bar{C}_- = \left( \frac{\bar{y}_3 + \bar{y}_4}{2} \right) - \left( \frac{\bar{y}_1 + \bar{y}_2}{2} \right) \quad (3.8)$$

$$Efeito_{TC} = \bar{C}_+ + \bar{C}_- = \left( \frac{\bar{y}_1 + \bar{y}_4}{2} \right) - \left( \frac{\bar{y}_2 + \bar{y}_3}{2} \right) \quad (3.9)$$

Onde  $Efeito_T$  é o efeito do tipo de aditivo na condutividade do filme nanocompósito;  $Efeito_C$  é o efeito de concentração de aditivo na resistência de folha do filme nanocompósito;  $Efeito_{TC}$  é o efeito de interação entre T e C;  $\bar{C}_+$  é a média de todas as respostas de alto nível para o fator analisado e  $\bar{C}_-$  é a média das respostas de baixo nível para o fator analisado;  $\bar{y}_1$  é o rendimento de condutividade do filme no nível -1 para T e C;  $\bar{y}_2$  é o rendimento médio de condutividade do filme no nível +1 para T e -1 de C;  $\bar{y}_3$  é o rendimento médio de condutividade do filme no nível -1 para T e +1 para C; e  $\bar{y}_4$  é o rendimento médio de condutividade do filme no nível +1 para T e C.

#### 2.6.4. Obtenção de Celulose

As fibras de juta foram tratadas com uma solução de KOH a 10% (m/v) por 3 h, na proporção de 10:1 (solução:fibra), à temperatura ambiente, com agitação orbital a 320 rpm. Em seguida, as fibras tratadas com KOH foram filtradas e lavadas com água destilada até atingir pH neutro; em seguida, secas à temperatura ambiente por aproximadamente 120 h. A porção líquida da reação foi reservada para a extração da hemicelulose em outro trabalho. As fibras tratadas com KOH foram embebidas em solução de NaOH a 7,5% (m/v), na proporção 20:1 (solução:fibra), em banho termostático a 40 °C por 12 h. Em seguida, as fibras tratadas com NaOH foram filtradas e lavadas com água destilada até atingir pH neutro; em seguida, foram deixadas para secar à temperatura ambiente por aproximadamente 120 h. Por fim, as fibras tratadas com NaOH foram submetidas a uma solução de ácido acético glacial e ácido nítrico na proporção de 6:1 (v/v) e a uma relação fibra:solução de 0,6:14 (g/mL) por 3 h a 80 °C. Em seguida, essas fibras tratadas em meio ácido foram filtradas e lavadas com água destilada até atingirem pH neutro e secas à temperatura ambiente por aproximadamente 120 h.

#### 2.6.5. Síntese das Nanopartículas de Prata

Para aumentar o teor de nanopartículas de prata nos filmes nanocompósitos estudados neste capítulo, foi necessária a síntese de uma solução mais concentrada do que a utilizada no Capítulo II. Portanto, foi uma solução de nanopartículas de prata contendo 500 ppm, preparada a partir de 450 mL de uma solução de borohidreto de sódio a  $36,0 \times 10^{-6}$  mol/L, mantida a menos de 3 °C. A solução foi vertida em um Erlenmeyer e submetida à agitação magnética vigorosa. Por meio de uma bureta, 150 mL de uma solução de nitrato de prata  $18 \times 10^{-6}$  mol/L foram adicionados a uma taxa adicional de 1 gota/s. A solução resultante foi estabilizada com 0,9 g de carboximetilcelulose (CMC) para evitar a agregação das nanopartículas de prata.

### 2.6.6. Produção dos Filmes Nanocompósitos

As amostras dos filmes nanocompósitos aditivadas foram produzidas de acordo com o planejamento fatorial, considerando todas as combinações de tipo e concentração de aditivo, conforme apresentado na Tabela 3.2, pelo método descrito no Capítulo II, seção 2.3.4. A partir dos resultados do planejamento fatorial, foram produzidas amostras com aumento de concentração de 2,8% de AgNP, a fim de estudar a influência desse aumento na concentração de 20% de CMC e de sorbitol, que apresentou o melhor resultado no planejamento fatorial. Amostras sem aditivo com 1,8% e 2,8% de AgNP também foram produzidas para comparação com as amostras aditivadas. A Tabela 3.2 apresenta a nomenclatura e a composição das amostras, de acordo com o planejamento fatorial e o aumento da concentração de nanopartículas.

Tabela 0.2 - Composição dos filmes nanocompósitos.

|                                                                                 | Amostra               | Aditivo<br>(adicionado sobre a<br>massa inicial de celulose) | AgNP (m/m)<br>(massa total) |
|---------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|--------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| <b>Planejamento Fatorial</b>                                                    | 1,8% AgNP – 15% CMC   | 15% CMC                                                      | 1,8%                        |
|                                                                                 | 1,8% AgNP – 15% Sorb. | 15% Sorbitol                                                 | 1,8%                        |
|                                                                                 | 1,8% AgNP – 20% CMC   | 20% CMC                                                      | 1,8%                        |
|                                                                                 | 1,8% AgNP – 20% Sorb. | 20% Sorbitol                                                 | 1,8%                        |
| <b>Amostras bases e com aumento da concentração de AgNP para 20% de aditivo</b> | 1,8% AgNP             | -                                                            | 1,8%                        |
|                                                                                 | 2,8% AgNP             | -                                                            | 2,8%                        |
|                                                                                 | 2,8% AgNP – 20% CMC   | 20% CMC                                                      | 2,8%                        |
|                                                                                 | 2,8% AgNP – 20% Sorb. | 20% Sorbitol                                                 | 2,8%                        |

Para a caracterização dos nanocompósitos, foram mantidos à temperatura ambiente, entre 20 e 25 °C, e não passaram por secagem adicional, para que suas propriedades físicas não fossem influenciadas.

A fim de comparar todos os conjuntos de amostras, considerando o aumento da concentração de AgNP e 20% de aditivo, foi realizada a análise de Tukey, comparando todas as médias dos tratamentos.

### 2.6.7. Caracterização Elétrica dos Filmes Nanocompósitos

As medidas de resistência de folha dos filmes nanocompósitos foram realizadas pelo método de Van der Pauw, por meio da medição de resistividade de quatro pontos, no equipamento B1500A Semiconductor Device Analyzer da Agilent. Visto que, em correntes baixas, a resistência de folha dos filmes apresentou valores elevados, como visto no Capítulo

II e em testes preliminares com as amostras desse capítulo, a faixa de análise de corrente foi ampliada. As amostras foram submetidas à faixa de 1 mA até 10 mA com intervalo de 20 uA, até o limite de 1 V. As medições foram realizadas em triplicata para cada tipo de nanocompósito, a fim de obter a variância dos resultados. Para a realização dos cálculos de resistividade e condutividade, as espessuras dos filmes foram medidas com um micrômetro digital Mitutoyo (erro de 0,001 mm) em 10 pontos do material.

Os nanocompósitos foram testados por blindagem eletromagnética (EMI SE), com um analisador de rede vetorial da Keysight P5024B na faixa de 8,2 a 12,4 GHz. Os filmes foram analisados com dimensões de 28 mm x 25 mm. Uma transição coaxial para o guia de onda foi utilizada para a conexão com o VNA e para inserir a amostra na interface de duas transições, facilitando a aquisição dos parâmetros S necessários. Um kit de calibração de banda X foi utilizado para calibrar o plano de referência exatamente na interface entre as transições coaxiais e o guia de onda, onde a amostra é fixada, conforme mostrado na Figura 3.3. O resultado da análise das amostras é o parâmetro S (ou “scattering parameters”, em inglês, parâmetros de espalhamento).

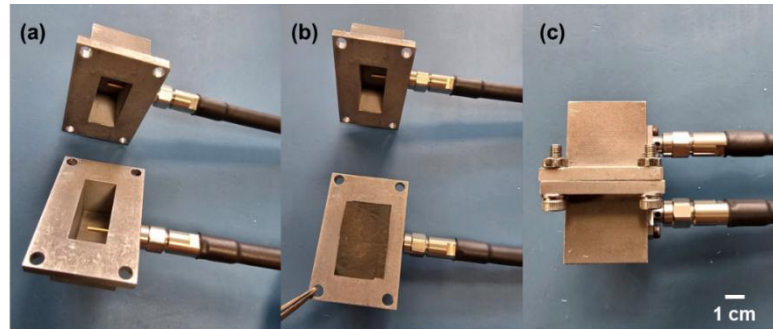


Figura 0.3 – (a) Porta-amostra para análise de blindagem EMI; (b) Porta-amostra com filme nanocompósito; e (c) Porta-amostra fechada para análise.

Os coeficientes de reflexão (R), transmissão (T) e absorção (A) foram calculados pelas equações 3.10, 3.11 e 3.12, respectivamente.

$$R = |S_{11}|^2 = |S_{22}|^2 \quad (3.10)$$

$$T = |S_{21}|^2 = |S_{12}|^2 \quad (3.11)$$

$$A = 1 - R - T \quad (3.12)$$

onde,  $S_{11}$  e  $S_{21}$ , são o coeficiente de reflexão direta e o coeficiente de projeção reversa, respectivamente. A SE total ( $SE_T$ ) de EMI foi representada como a soma da reflexão ( $SE_R$ ) e da absorção ( $SE_A$ ) [150], [151]:

$$SE_R = 10 \log \frac{1}{1-R} \quad (3.13)$$

$$SE_A = 10 \log \frac{1-R}{T} \quad (3.14)$$

$$SE_T = SE_R + SE_A + SE_M \quad (3.15)$$

#### **2.6.8. Caracterização dos Nanocompósitos por Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)**

Os espectros FTIR dos filmes nanocompósitos foram obtidos pela metodologia descrita no Capítulo II na seção 2.3.7.

#### **2.6.9. Caracterização Morfológica dos Nanocompósitos por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e por Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS)**

Os filmes nanocompósitos foram colados sobre um porta-amostras com fita de carbono e metalizados com ouro usando o equipamento de recobrimento metálico da marca Balzers, modelo SCD 050 Sputter Coater. As amostras metalizadas foram analisadas em microscópio eletrônico de varredura da marca JEOL, modelo JED-2300, disponível no Departamento de Engenharia Mecânica da UnB, com tensão de aceleração de 15 kV. A de AgNP foi investigada por meio da técnica de mapeamento por espectroscopia de raios X por dispersão de energia (EDS) acoplada ao microscópio. As amostras foram analisadas do lado superior do filme formado.

#### **2.6.10. Determinação da Transmitância dos Filmes por Espectroscopia Ultravioleta-Visível (UV-Vis)**

Para determinar a transmitância, os nanocompósitos foram avaliados pela metodologia descrita no Capítulo II na seção 2.3.3.

#### **2.6.11. Caracterização Térmica dos Nanocompósitos por Análise Termogravimétrica (TGA)**

Os filmes nanocompósitos foram caracterizados por análise termogravimétrica, conforme a metodologia descrita no Capítulo II, seção 2.3.6.

#### **2.6.12. Propriedades Mecânicas dos Filmes Nanocompósitos por Análise Dinâmico-Mecânica (DMA)**

Os filmes nanocompósitos foram submetidos à Análise Térmica Mecânica Dinâmica (DMA) em um equipamento NETZSCH DMA modelo 242 E Artemis, no Departamento de Engenharia Florestal da Universidade de Brasília. O teste foi conduzido em amostras com dimensões de 10 x 5 mm, utilizando o acessório de tração, no intervalo de temperatura de 35 a 200 °C ou até o rompimento das amostras, com uma taxa de aquecimento de 2 °C/min e uma frequência de 1 Hz.

### **2.7. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

#### **2.7.1. Caracterização Elétrica dos Filmes Nanocompósitos e Avaliação Estatística do Planejamento Experimental 2<sup>2</sup>**

Os gráficos das medidas de resistência de folha dos filmes nanocompósitos analisados no planejamento fatorial, obtidas pelo método de Van der Pauw, são apresentados na Figura 3.4. O gráfico mostra a resistência da folha de filme ( $\Omega/\square$ ) em função da corrente elétrica (i) aplicada ao material.

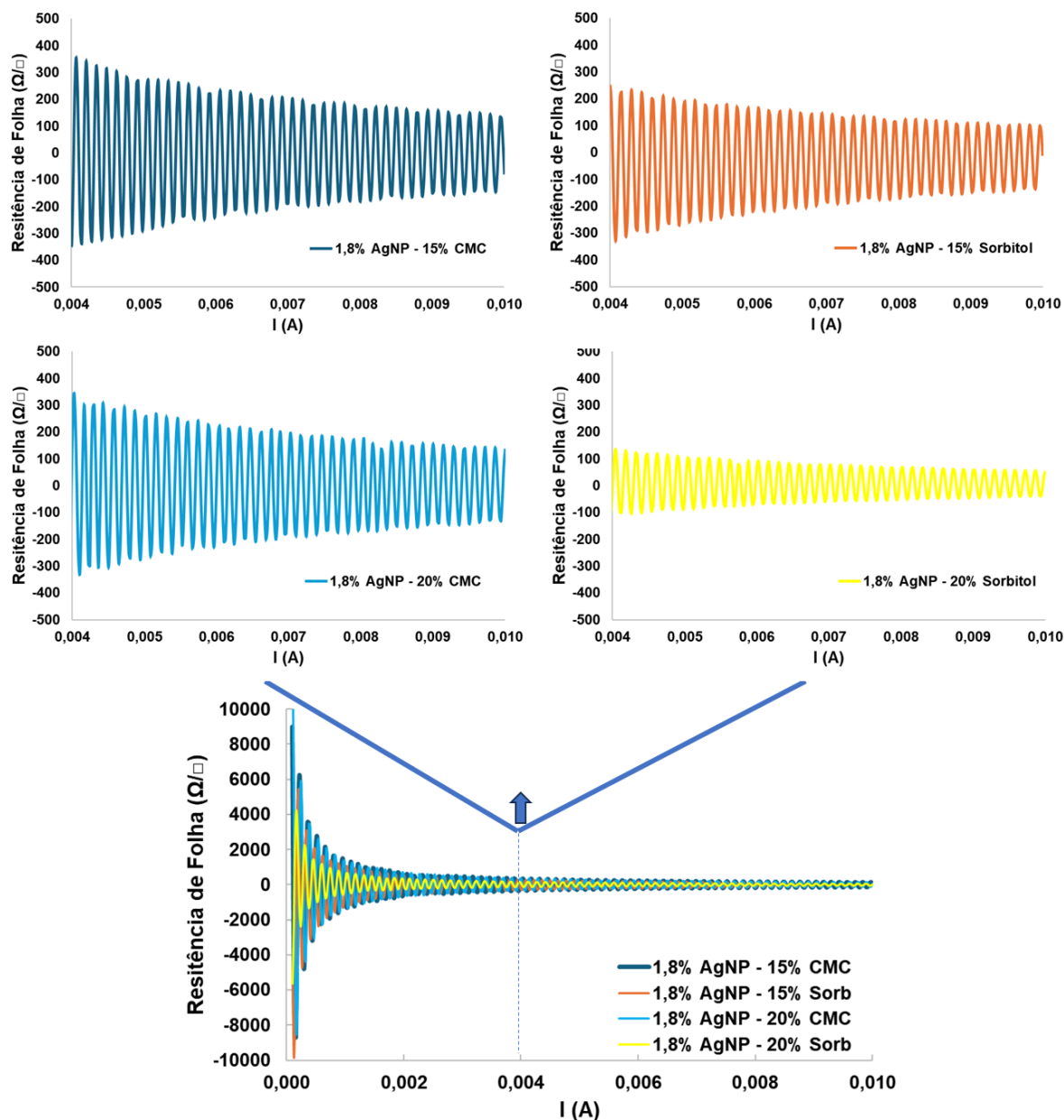


Figura 0.4 – Gráfico de resistência de folha em função da corrente para as amostras do planejamento fatorial.

A resistência de folha, medida para cada amostra, é o valor mais alto observado na curva R-folha a partir de 0,004 A, considerado o ponto em que a corrente mínima confere condutividade ao nanocompósito de forma homogênea. Em correntes muito baixas, observa-se uma desordem resistiva nos filmes, como observado na Figura 3.4. A Tabela 3.3 apresenta os valores de resistência de folha, espessura e condutividade, calculados com as Equações 2.7, 2.9 e 2.10, dos filmes nanocompósitos analisados no planejamento fatorial e, posteriormente, com aumento do teor de nanopartículas.

Tabela 0.3 – Propriedades elétricas dos nanocompósitos.

| Planejamento Fatorial | Amostra              | Resistência de folha ( $\Omega/\square$ ) | Espessura (cm) | Condutividade (S/cm) |
|-----------------------|----------------------|-------------------------------------------|----------------|----------------------|
|                       | 1,8% AgNP - 15% CMC  | 353,74                                    | 0,0022         | 1,29                 |
|                       | 1,8% AgNP - 15% Sorb | 246,91                                    | 0,0026         | 1,56                 |
|                       | 1,8% AgNP - 20% CMC  | 269,30                                    | 0,0023         | 1,61                 |
|                       | 1,8% AgNP - 20% Sorb | 121,99                                    | 0,0028         | 2,93                 |
|                       | 1,8% AgNP            | 314,27                                    | 0,0026         | 1,22                 |
|                       | 2,8% AgNP            | 278,30                                    | 0,0022         | 1,63                 |
|                       | 2,8% AgNP - 20% CMC  | 189,22                                    | 0,0024         | 2,20                 |
|                       | 2,8% AgNP - 20% Sorb | 225,24                                    | 0,0022         | 2,02                 |

Os resultados da Tabela 3.3 mostram que, embora a espessura influencie os valores de condutividade, os valores de resistência de folha foram maiores nas amostras com menor condutividade.

A influência da concentração do aditivo (15 e 20%) e do tipo de aditivo (CMC e sorbitol) sobre a resposta do sistema com 1,8% de AgNPs foi avaliada por meio de um planejamento fatorial completo 2<sup>2</sup>. A análise de variância foi conduzida por meio da soma de quadrados do tipo II, apropriada a delineamentos fatoriais balanceados.

O conjunto de distribuição da relação entre os fatores variáveis e as respostas médias de condutividade foi descrito por meio do modelo estatístico de regressão linear múltipla da Equação 3.1, resultando na Equação 3.16:

$$\bar{C}(x_T, x_C) = 1,8447 + 0,3989x_T + 0,4231x_C + 0,2681x_Tx_C \quad (3.16)$$

onde  $\bar{C}$  é o parâmetro da resposta média de condutividade (S/cm),  $x_T$  (tipo de aditivo) e  $x_C$  (concentração de aditivo) são os níveis (+1 ou -1) de fatores experimentais;  $x_Tx_C$  representa a interação entre  $x_T$  e  $x_C$ . Essa equação permite prever a resposta para qualquer combinação dos quatro tratamentos do fatorial, evidenciando explicitamente os efeitos principais e de interação.

O modelo empírico, obtido a partir do planejamento fatorial, demonstrou que tanto o tipo de aditivo quanto sua concentração exercem influência significativa sobre a condutividade elétrica dos filmes de celulose regenerada contendo nanopartículas de prata. Os coeficientes positivos associados aos efeitos principais indicam que o aumento da concentração de aditivo e a escolha do tipo de aditivo favorecem o aumento da condutividade elétrica do material.

Além disso, a presença de um termo de interação positivo e maior sugere que o efeito da concentração depende do tipo de aditivo utilizado, sendo esse efeito de interação relevante. Esse comportamento indica que a combinação entre o tipo e a concentração do

aditivo pode promover alterações na microestrutura do nanocompósito, possivelmente relacionadas à dispersão das nanopartículas de prata e à formação de caminhos condutores mais eficientes na matriz polimérica.

A Tabela 3.4 apresenta os valores dos efeitos principais e de interação, bem como os resultados da ANOVA do modelo adquirido. Os resultados da ANOVA do modelo linear múltiplo apresentado indicam que a equação do modelo pode ser utilizada adequadamente para descrever a condutividade dos nanocompósitos analisados. Um bom ajuste do modelo deve produzir um coeficiente de determinação  $R^2$  de pelo menos 0,8 [152].

Tabela 0.4 - Resultados dos efeitos principais e de interação e da ANOVA do modelo adquirido.

| Efeitos Principais e de Interação |        | ANOVA       |                    |                    |                |         |                       |
|-----------------------------------|--------|-------------|--------------------|--------------------|----------------|---------|-----------------------|
| Fonte                             | Efeito | Erro Padrão | Graus de Liberdade | Soma dos Quadrados | Quadrado Médio | Valor-F | Valor-P               |
| C                                 | 0,85   | 0,013       | 1                  | 2,1481             | 2,1481         | 1083,41 | $7,9 \times 10^{-10}$ |
| T                                 | 0,80   |             | 1                  | 1,9096             | 1,9096         | 963,13  | $1,26 \times 10^{-9}$ |
| TC                                | 0,54   |             | 1                  | 0,8627             | 0,8627         | 435,14  | $2,92 \times 10^{-8}$ |
| Resíduos                          | -      |             | 8                  | 0,0159             | 0,0019         | —       | —                     |

$R^2 = 0,9968$ ,  $R^2$  ajustado = 0,9956, Significativo <0,05%

A Tabela 3.4 de ANOVA mostra pelos valores que tanto a concentração quanto o tipo de aditivo têm efeito altamente significativo sobre a resposta, conforme os valores significativos da soma dos quadrados e do Valor-F, assim como Valor-P baixos ( $< 10^{-8}$ ) [153], [154]. A interação também é altamente significativa, indicando que o efeito da concentração depende do aditivo presente (e vice-versa).

O efeito principal da concentração indica que a elevação de 15% para 20% resulta em um aumento médio da resposta de aproximadamente 0,85 unidades, considerando a média entre os dois plastificantes avaliados. Esse resultado evidencia que o aumento da concentração da matriz contribui de forma significativa para a intensificação da propriedade analisada. De forma análoga, o efeito principal do tipo de plastificante demonstra que a substituição de CMC por sorbitol promove um incremento médio da resposta de aproximadamente 0,80 unidades, considerando ambas as concentrações. A Figura 3.5 apresenta o gráfico de efeito de interação.

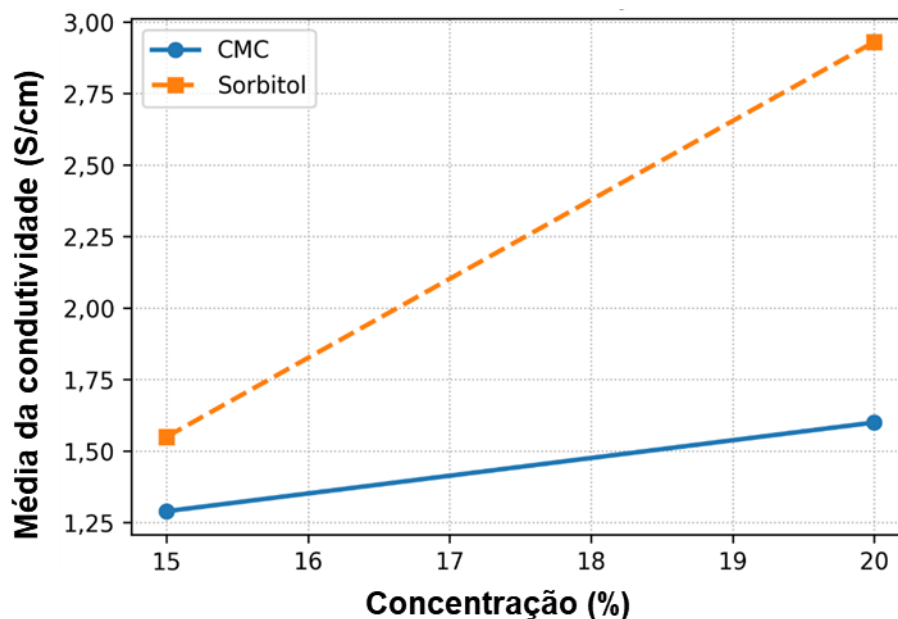


Figura 0.5 – Efeito de interação nas respostas de condutividade.

A análise do planejamento fatorial evidenciou uma interação altamente significativa entre o tipo de aditivo e a concentração utilizada, indicando que o efeito da concentração não é independente do tipo de aditivo, e vice-versa.

A média global da resposta aumenta de 15% para 20%, refletindo o forte efeito principal da concentração. Isso indica que, em média, formulações com 20% de fase contínua são mais condutivas do que as com 15%, embora a magnitude exata desse ganho dependa do aditivo, como evidenciado pela interação.

As linhas do gráfico de interação não são paralelas, e a inclinação para o sorbitol é mais acentuada ao passar de 15% para 20%. O ganho ao aumentar a concentração é moderado com CMC, porém grande com sorbitol. Para o planejamento de formulação, isso indica que decisões sobre concentração não podem ser tomadas sem considerar qual aditivo está presente.

O efeito principal do tipo de aditivo indica que o uso de sorbitol leva a médias de resposta maiores do que as de CMC, em termos globais. Esse resultado sugere que o sorbitol é mais eficiente para aumentar a condutividade com concentração de 1,8% de AgNP, possivelmente por favorecer uma microestrutura que contribui para o transporte de carga, como mostrado nos próximos tópicos de análise morfológica dos nanocompósitos.

Esses resultados demonstram que a resposta do sistema não é controlada apenas pelos efeitos individuais dos fatores, mas também por um efeito sinérgico entre a maior concentração da matriz e o uso do aditivo, o que é típico de sistemas poliméricos condutores, em que alterações microestruturais afetam a conectividade da rede condutora de nanopartículas.

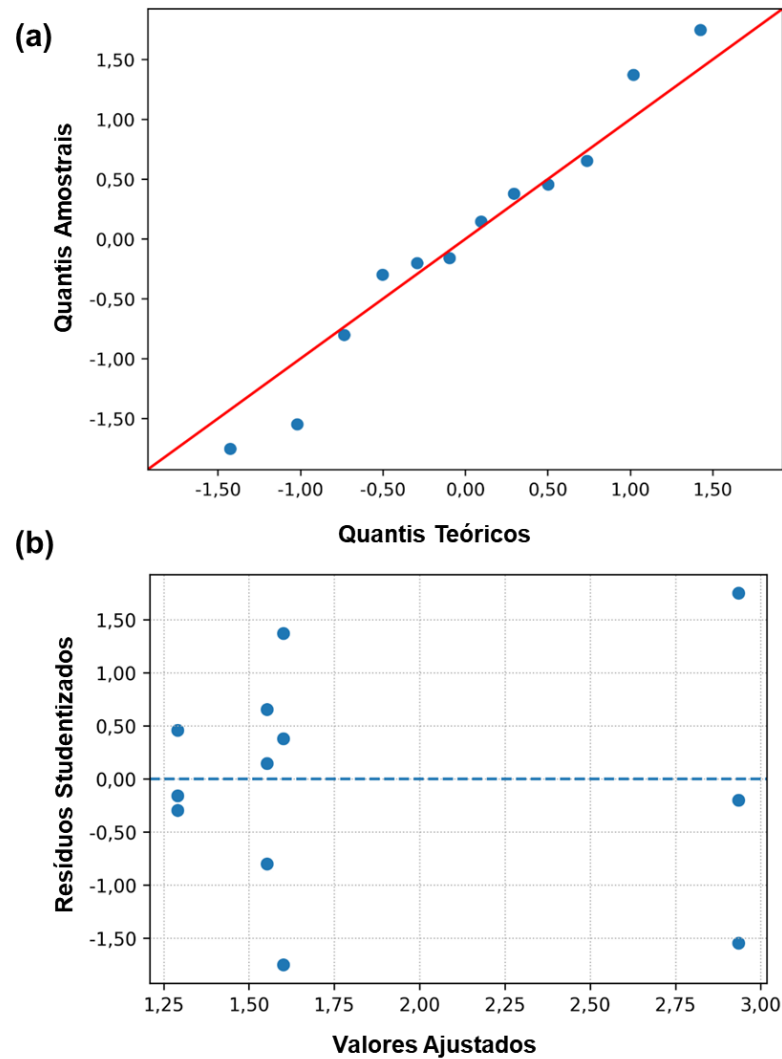


Figura 0.6 – Gráficos de diagnóstico do modelo previsto para a condutividade dos nanocompósitos; (a) Q-Q plot dos resíduos, (b) Resíduos studentizados vs ajustados.

Na Figura 3.6a os pontos do Q-Q plot seguem razoavelmente a linha de 45°, com pequenas oscilações compatíveis com o tamanho reduzido da amostra. Isso sugere que a normalidade dos resíduos é aceitável, reforçando a validade do uso da ANOVA e dos testes F e Tukey neste contexto experimental [21], [154], [155].

Na Figura 3.6b, os resíduos aparecem distribuídos de forma aproximadamente aleatória em torno de zero, sem tendência clara nem funil. Isso sugere que a suposição de homocedasticidade (variância constante) é razoável para este conjunto de dados. Os resíduos studentizados permanecem em módulo inferior a ~2, sem pontos extremos suspeitos. Isso indica a ausência de “outliers” influentes ou de observações com comportamento anômalo em relação ao modelo ajustado. Esse diagnóstico é importante para confirmar que nenhuma réplica apresentou comportamento exageradamente diferente [156].

Os resultados do planejamento fatorial realizado com 1,8% de AgNPs demonstraram que tanto a concentração da matriz polimérica (15–20%) quanto o tipo de aditivo (CMC ou Sorbitol) exercem influência altamente significativa sobre a resposta, além de uma forte interação entre esses fatores. A amostra 1,8% AgNP -20% Sorb apresentou desempenho estatisticamente superior, evidenciando um efeito sinérgico entre maior teor e aditivo mais eficiente, o que favoreceu a formação de uma rede condutora mais contínua.

A análise dos dados de condutividade elétrica evidencia de forma consistente a influência do teor de AgNPs, bem como do tipo e da concentração da matriz polimérica, sobre o desempenho dos nanocompósitos. Para os sistemas contendo 1,8% de AgNPs, os valores experimentais variam entre aproximadamente 1,19 e 1,23, indicando uma condutividade ainda limitada, característica de sistemas abaixo ou próximos ao limiar de percolação elétrica, nos quais a rede condutora ainda não está completamente estabelecida.

Com o aumento do teor de AgNPs para 2,8%, observa-se um incremento significativo na resposta, com valores variando entre aproximadamente 1,60 e 1,67. Esse aumento confirma que a maior fração de fase condutora favorece a formação de caminhos contínuos para o transporte eletrônico, reduzindo as lacunas isolantes da matriz e promovendo maior interconectividade entre as nanopartículas.

Quando o aumento do teor de 2,8% de AgNPs é combinado ao aumento da concentração da matriz para 20% com adição de aditivo, observam-se ganhos de condutividade. O sistema 2,8% AgNP – 20% CMC atinge valores da ordem de ~2,18–2,23, enquanto o sistema 2,8% AgNP – 20% Sorb apresenta condutividades de ~1,99–2,10. Esses resultados demonstram que, além do teor de nanopartículas, a microestrutura promovida pelo aditivo e a maior concentração da matriz desempenham um papel determinante na eficiência da rede condutora. A Figura 3.7 apresenta o gráfico de Tukey dos nanocompósitos analisados.

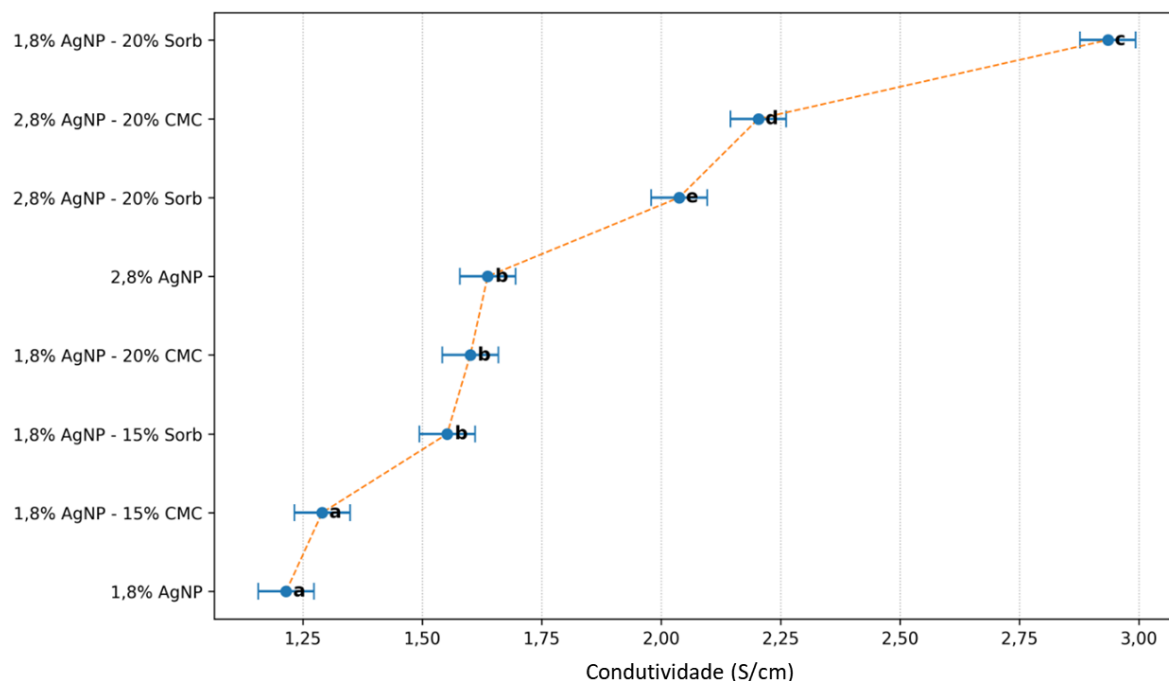


Figura 0.7 - Gráfico de Tukey para amostras do planejamento fatorial e com aumento do teor de AgNPs.

A análise de Tukey evidenciou a formação de grupos estatisticamente distintos entre as amostras. No gráfico, amostras identificadas pela mesma letra não diferem estatisticamente; já as com letras diferentes apresentam diferença significativa.

As amostras 1,8% AgNP e 1,8% AgNP – 15% CMC não diferem estatisticamente entre si pelo critério de Tukey, caracterizando um regime de menor condutividade em todas as observações. As amostras 1,8% AgNP – 20% CMC, 1,8% AgNP – 20% Sorb e 2,8% AgNP são estatisticamente similares entre si, mas diferem claramente tanto do grupo de baixa condutividade quanto dos grupos de maior desempenho. Neste intervalo, o aumento da concentração da matriz para 20% (no caso de 1,8% de AgNP) ou da carga de AgNP para 2,8% (sem aditivo) já permite a formação de caminhos condutores parciais mais estáveis, além de indicar que o aumento do teor de aditivo pode compensar a redução na quantidade de fase condutora.

O gráfico de Tukey evidencia que o efeito do aumento do teor de AgNPs desloca todo o sistema para patamares superiores de condutividade, especialmente quando combinado a 20% de matriz polimérica. A formulação 2,8% AgNP – 20% CMC emerge como a formulação estatisticamente eficiente em concentração de 2,8% de AgNP, enquanto o sorbitol apresenta melhor desempenho em regime de baixa carga de nanopartículas, como observado no planejamento fatorial a 1,8% de AgNP.

O aumento da densidade de partículas condutoras, com 2,8% de AgNPs, eleva a probabilidade de contato elétrico entre partículas, e a aditivação aumenta a mobilidade

segmentar da matriz e favorece a redistribuição mais homogênea das nanopartículas durante a formação do filme, próximo ao regime percolado.

No planejamento fatorial com 1,8% de AgNPs, o sorbitol apresentou desempenho superior ao CMC, especialmente a 20%, evidenciando maior eficiência e contribuição para a formação de caminhos condutores. Entretanto, ao elevar o teor de AgNPs para 2,8% em sistemas com 20% de matriz, observa-se que o sistema com CMC passa a apresentar condutividade ligeiramente superior à do sorbitol, sugerindo que, em teores elevados de carga condutora, o efeito estabilizante da CMC pode favorecer uma dispersão mais homogênea e conexões mais eficientes entre as nanopartículas.

No menor teor de AgNPs (1,8%), o desempenho é dominado principalmente pela eficiência do sorbitol em promover a mobilidade e a conectividade. Em alto teor de AgNPs (2,8%), a condutividade torna-se mais fortemente governada pela qualidade da dispersão promovida pela matriz e pelo CMC, que favorece uma rede condutora mais homogênea. Na análise morfológica realizada no decorrer desse capítulo, é vista pelo EDS diferença na distribuição de AgNPs, ao aumentar o teor de nanopartículas nos filmes com sorbitol.

Compósitos condutores à base de celulose destacam que a estrutura da matriz afeta diretamente a percolação, reduzindo  $\phi_c$  quando a rede polimérica favorece a formação de caminhos contínuos de partículas metálicas. Os aditivos reduzem o espaçamento entre as partículas e favorecem o surgimento de uma rede percolante [88]. Quando o teor de carga metálica é elevado, uma matriz que oferece maior controle e melhor manutenção da dispersão, como a CMC, pode gerar uma rede percolante mais homogênea e menos propensa a aglomerações grandes e regiões isolantes, otimizando a condutividade global [157].

O aumento do teor de AgNPs de 1,8% para 2,8% promove um aumento da condutividade. O aditivo desempenha papel importante, sendo o sorbitol mais eficiente em baixos teores de AgNPs, enquanto a CMC apresenta melhor desempenho em sistemas com maior teor de carga condutora. A concentração da matriz em 20% é uma condição estruturalmente superior, pois favorece a estabilidade dos caminhos condutores.

### **2.7.2. Prospecção de Aplicação dos Filmes Nanocompósitos para Blindagem de Interferência Eletromagnética**

O comportamento da eficiência de blindagem eletromagnética (SE Total) dos filmes nanocompósitos na faixa de 8 a 12 GHz é apresentado na Figura 3.8. O resultado revela que todos os sistemas apresentam valores baixos de blindagem, entre 0,02 e 0,16 dB. Esses valores estão muito abaixo do limiar mínimo de 20–30 dB normalmente exigido para materiais classificados como blindagem EMI efetiva, confirmando que os filmes desenvolvidos não atuam como escudos eletromagnéticos estruturais [158], [159].

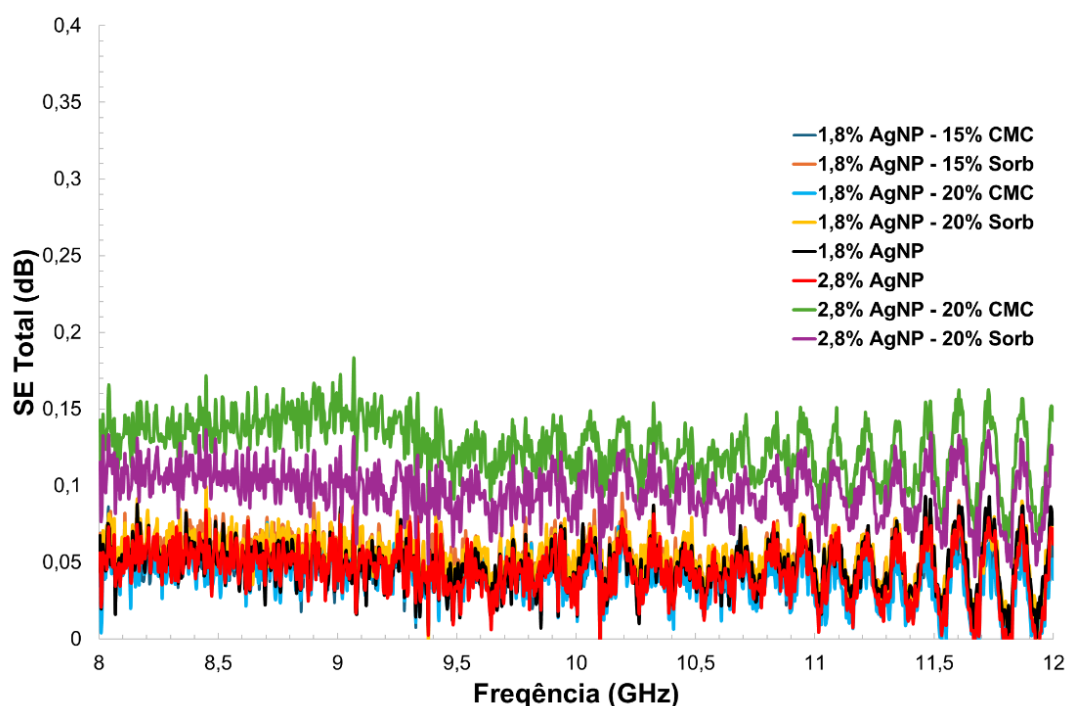


Figura 0.8 - Gráfico de blindagem de interferência eletromagnética dos filmes nanocompósitos.

Observa-se que as amostras com maior concentração de 2,8% de AgNP e 20% de aditivo apresentam os maiores valores de SE, situando-se entre 0,12 e 0,16 dB, enquanto as demais permanecem predominantemente abaixo de 0,08 dB. Esse comportamento indica que o aumento simultâneo da fração polimérica e da carga metálica promove apenas um incremento marginal na atenuação das ondas, insuficiente para caracterizar um mecanismo de blindagem efetivo. Tal resultado está diretamente relacionado à baixa espessura dos filmes, à ausência de uma rede condutora tridimensional contínua em escala macroscópica e à limitada perda dielétrica do sistema, fatores essenciais para a ocorrência de absorção eficiente em materiais EMI [159], [160]. Além disso, a ausência de variações abruptas de SE ao longo da frequência indica que não há formação de mecanismos de ressonância, múltiplas reflexões internas ou acoplamentos interfaciais intensos, fenômenos típicos de compósitos espessos ou multicamadas utilizadas para blindagem eletromagnética.

Embora a baixa eficiência de blindagem descaracterize esses materiais para aplicações clássicas de blindagem, essa característica não constitui uma limitação universal; ao contrário, em diversas aplicações tecnológicas, a presença de blindagem eletromagnética pode comprometer a transmissão de sinais, a comunicação sem fio e a sensibilidade de leitura de sensores [5], [161]. Em sistemas como sensores eletroquímicos, dispositivos RFID (identificação por radiofrequência), circuitos impressos flexíveis, dispositivos vestíveis e

eletrônica transitória, a eficiência depende justamente da livre propagação do campo eletromagnético, sendo requerida apenas a presença de uma camada condutora funcional [162], [163].

Os avanços recentes na área de nanocelulose e compósitos condutores têm destacado “nanopapers” e filmes finos como materiais promissores para aplicações em eletrodos e trilhas em circuitos de curta vida útil, interconexões descartáveis em sensores, embalagens inteligentes e etiquetas, bem como substratos ativos para eletrônica de papel, em função da combinação entre condutividade elétrica, leveza e caráter sustentável da matriz. Outra frente de grande relevância é a de sensores biodegradáveis e eletrônica vestível ou transitória, na qual nanocompósitos à base de biopolímeros associados a nanocarbono ou nanopartículas metálicas são empregados como sensores de pressão, deformação e umidade. Nesse contexto, compósitos à base de celulose e nanopartículas metálicas vêm sendo amplamente propostos para aplicações em eletrônica transitória, sensores ambientais, embalagens inteligentes e interconexões biodegradáveis, sendo que a fragilidade mecânica desses sistemas é normalmente contornada pelo uso de filmes como revestimentos funcionais sobre substratos mais robustos, e não como materiais estruturais autossuportados [161], [162], [163], [164], [165], [166].

Filmes de nanocelulose com nanopartículas de prata e óxido de grafeno reduzido, por exemplo, apresentam condutividade de 12 S/cm e são recomendados para eletrônica flexível, substratos condutores e materiais antibacterianos propostos para curativos inteligentes, revestimentos e interfaces de dispositivos em contato com o corpo [167]. Nesse cenário, os filmes desenvolvidos neste trabalho situam-se em um patamar aproximado de aplicações tipicamente atribuídas a eletrodos e camadas condutoras ativas. Materiais semelhantes vêm sendo utilizados como eletrodos e sensores eletroquímicos ou bioeletrônicos, explorando simultaneamente a condutividade elétrica, a área superficial e a biocompatibilidade da matriz celulósica [168], [169].

No campo da eletrônica transitória e de dispositivos descartáveis, diversos autores vêm propondo materiais condutores baseados em celulose para sensores e sistemas de energia de vida útil limitada, nos quais a prioridade reside na renovabilidade da matriz, na possibilidade de degradação ambiental e na baixa toxicidade, e não necessariamente na durabilidade mecânica de longo prazo [161], [163], [169]. Nesses cenários, os nanocompósitos desenvolvidos neste trabalho, como elementos sensoriais em circuitos impressos biodegradáveis, etiquetas ativas e sensores ambientais ou biomédicos de curta vida útil. Os valores de condutividade obtidos posicionam esses filmes no mesmo regime funcional dos eletrodos empregados em micro-supercapacitores e dispositivos de baixa corrente, como os “nanopapers” de nanocelulose com polímeros condutores e os filmes de

polianilina e polipirrol, situados tipicamente na faixa de dezenas a centenas de S/cm [168], [170].

Além disso, os filmes também podem ser promissores como interconexões condutoras em eletrônica flexível, de forma semelhante ao papel Ag/celulose descrito por Zhang et al. (2021) [171]. Ademais, os valores obtidos são compatíveis com o uso em sensores eletroquímicos de baixa blindagem, em linha com as membranas de nanocelulose condutora para sensores vestíveis e “smart skin” [164], [165].

Adicionalmente, a combinação entre condutividade elétrica, matriz celulósica porosa e a presença de nanopartículas de prata cataliticamente ativas torna os filmes desenvolvidos compatíveis com aplicação como sensores de gases. Na literatura, sensores baseados em AgNPs dispersas em matrizes poliméricas são amplamente empregados na detecção de  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  e vapores orgânicos, devido à elevada afinidade superficial da prata por moléculas polares e à consequente modulação da resistência elétrica do sistema [172], [173], [174]. Além disso, matrizes de nanocelulose e de celulose regenerada vêm sendo utilizadas como suportes porosos para materiais condutores em sensores químicos, devido à sua elevada área superficial, hidrofiliidade e excelente permeabilidade aos gases [175].

Sensores baseados em nanocelulose associada a fases condutoras, como óxido de grafeno reduzido, polímeros condutores ou nanopartículas metálicas, operam tipicamente em faixas de condutividade entre  $10^{-3}$  e  $10^2$  S/cm, compatíveis com os valores obtidos neste estudo, o que reforça de forma consistente o potencial de aplicação dos filmes desenvolvidos como camadas sensoriais ativas em dispositivos de monitoramento e biomédicos descartáveis [176], [177].

### **2.7.3. Análise dos Nanocompósitos por Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)**

Os espectros de FTIR dos filmes nanocompósitos são apresentados na Figura 3.9. Os espectros apresentam características semelhantes às dos nanocompósitos estudados no Capítulo II. As bandas de absorção em torno de  $3440\text{ cm}^{-1}$  correspondem ao estiramento da ligação de hidrogênio O-H, típico da celulose, e em torno de  $2900\text{ cm}^{-1}$  ao alongamento do grupo funcional C-H [6].

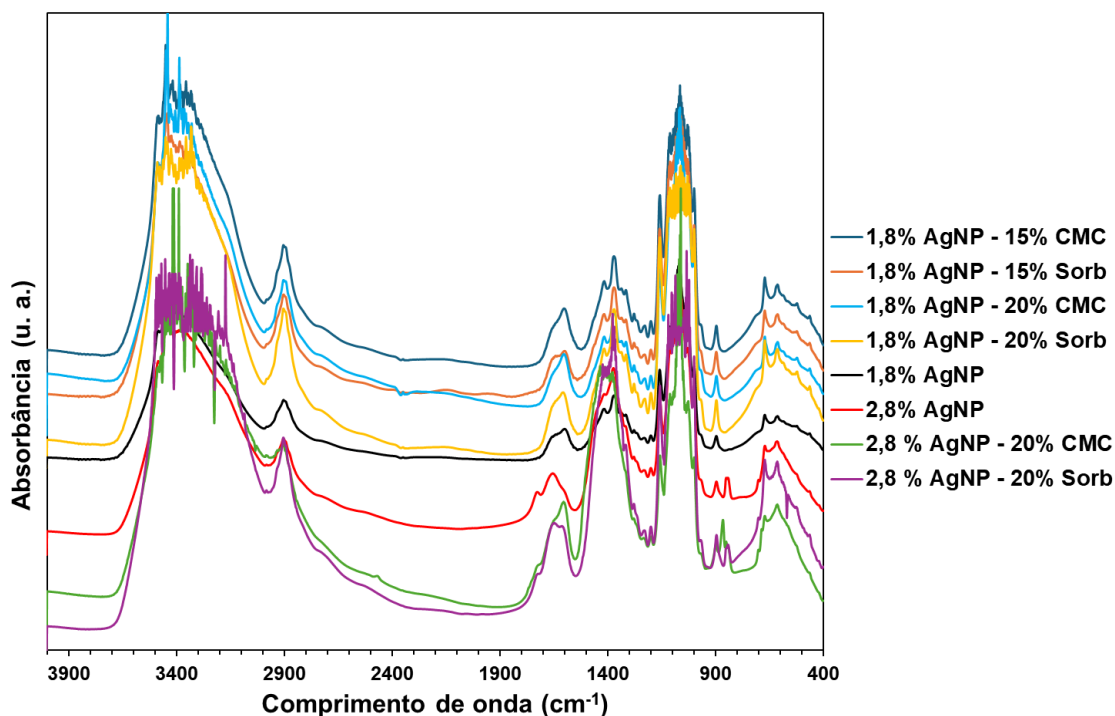


Figura 0.9 – Espectros FTIR dos filmes nanocompósitos.

De modo similar ao Capítulo II, a análise espectroscópica dos nanocompósitos mostrou bandas características da celulose:  $1410\text{ cm}^{-1}$  ( $\text{CH}_2$  e celulose II),  $1365$  e  $1333\text{--}1311\text{ cm}^{-1}$  (dobramentos COH e HCC da celulose cristalina), e  $997\text{--}1200\text{ cm}^{-1}$  (vibrações C–O e deformação C–H do anel da piranose). O pico em  $894\text{ cm}^{-1}$  está associado às ligações glicosídicas.

Em todos os filmes observa-se a presença da banda de absorção em  $1590\text{ cm}^{-1}$ , correspondente à vibração de estiramento dos grupos carboxila ( $\text{COO}^-$ ) [107], [108], devido à inserção de CMC sódica como aditivo e estabilizante da solução de AgNP, em que a desprotonação desses grupos está associada à estrutura da celulose [128].

Observa-se que os nanocompósitos com maior teor de nanopartículas de prata (2,8%) apresentam uma nova banda em  $1728\text{ cm}^{-1}$ , atribuída a AgNPs acopladas a grupos hidroxila e carbonila [178], [179]. Nas menores concentrações, não foram observadas novas bandas relacionadas às AgNPs, devido ao teor de prata mais baixo, que pode estar abaixo do limite de detecção do FTIR [180].

#### 2.7.4. Análise Morfológica e Óptica dos Filmes Nanocompósitos

As imagens dos filmes e as micrografias de varredura dos filmes nanocompósitos, são exibidas nas Figuras 3.10 e 3.11, respectivamente. Assim como no capítulo anterior e em Kataoka et al. (2022) [9], todas as amostras apresentam aglomerados, indicados pelas setas

azuis, provavelmente devido à dissolução incompleta da celulose no sistema solvente de NaOH [119].

Os filmes com 1,8% e 2,8% de AgNP exibiram superfícies com características similares, apresentando superfícies uniformes, com morfologia característica de filmes de celulose regenerada, como observado no capítulo anterior para filmes sem aditivos.

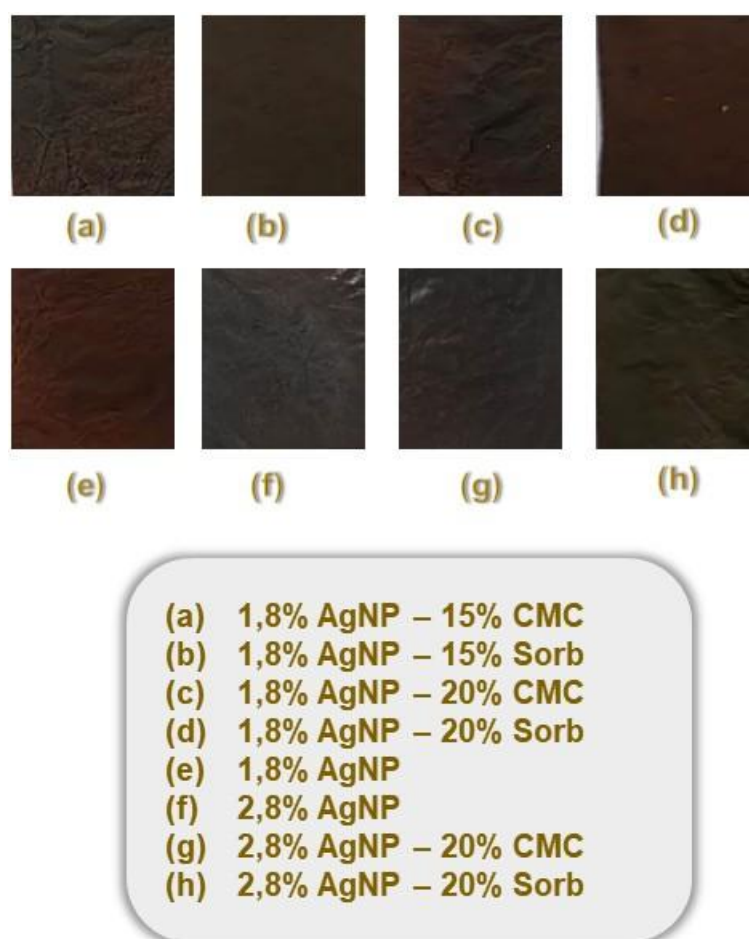


Figura 0.10 – Aparência dos filmes nanocompósitos.

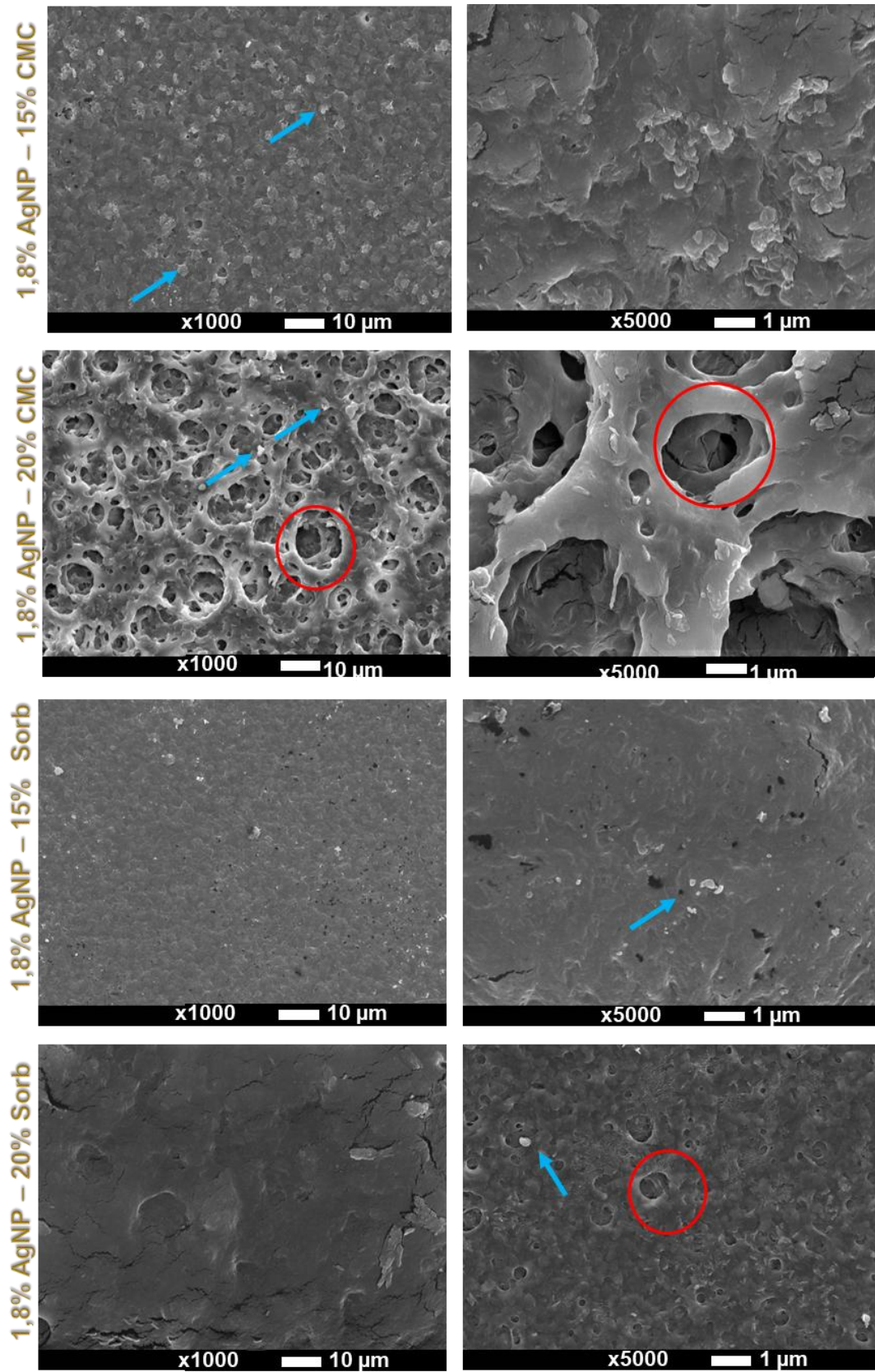


Figura 0.11 – Micrografias de MEV e aparência dos filmes nanocompósitos (continua).

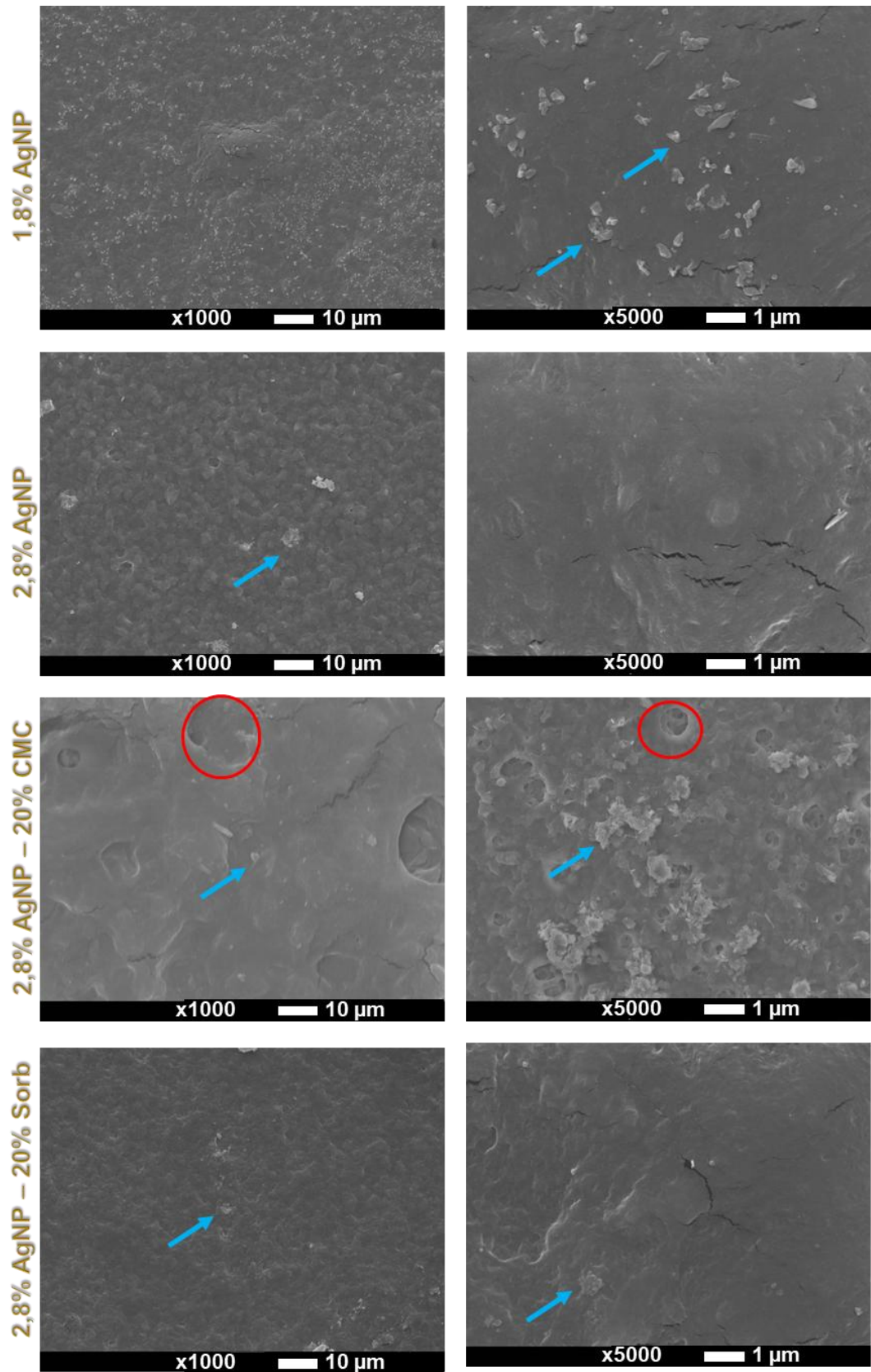


Figura 0.12 – Micrografias de MEV e aparência dos filmes nanocompósitos (continuação).

Os nanocompósitos com CMC apresentam superfícies porosas, como as destacadas pelos círculos vermelhos nas micrografias, com tamanhos de poro irregulares. Na concentração de 1,8% de AgNP, os filmes apresentam aumento da porosidade à medida que aumenta a concentração de CMC. Assim, nos filmes com sorbitol, observa-se o aparecimento de poros nessa concentração de nanopartículas (20% de aditivo). Comportamento semelhante pode ser observado na literatura [18].

Ao aumentar a quantidade de AgNP para 2,8%, os filmes nanocompósitos apresentaram diminuição da quantidade de poros, com superfícies mais homogêneas, como no caso do nanocompósito com sorbitol, que exibiu superfícies com características similares às do sem aditivo [120].

A Figura 3.11 mostra o mapeamento da espectroscopia de raios X por dispersão de energia (EDS), que permite avaliar de forma qualitativa as substâncias químicas restritas à superfície dos filmes, estimando a presença de elementos químicos. As superfícies dos filmes nanocompósitos mostram a presença de oxigênio (O) em vermelho, de sódio (Na) em laranja e de prata (Ag) em verde. Oxigênio está presente principalmente devido à composição intrínseca da celulose.

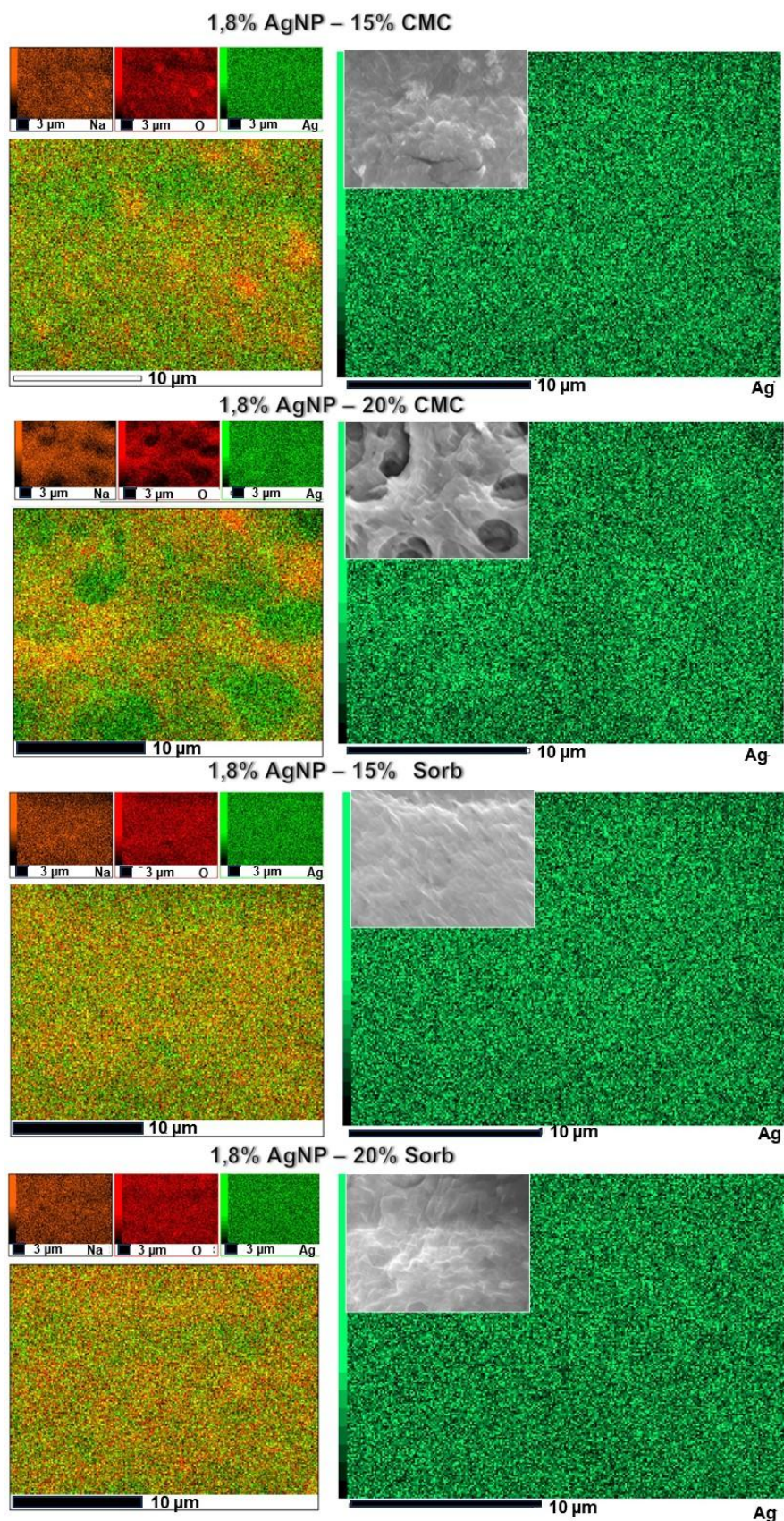


Figura 0.13 – Mapeamento dos principais elementos dos filmes nanocompósitos por meio de EDS: Sódio (Na) representado pelo laranja, Oxigênio (O) pelo vermelho e prata (Ag) pelo verde (continua).

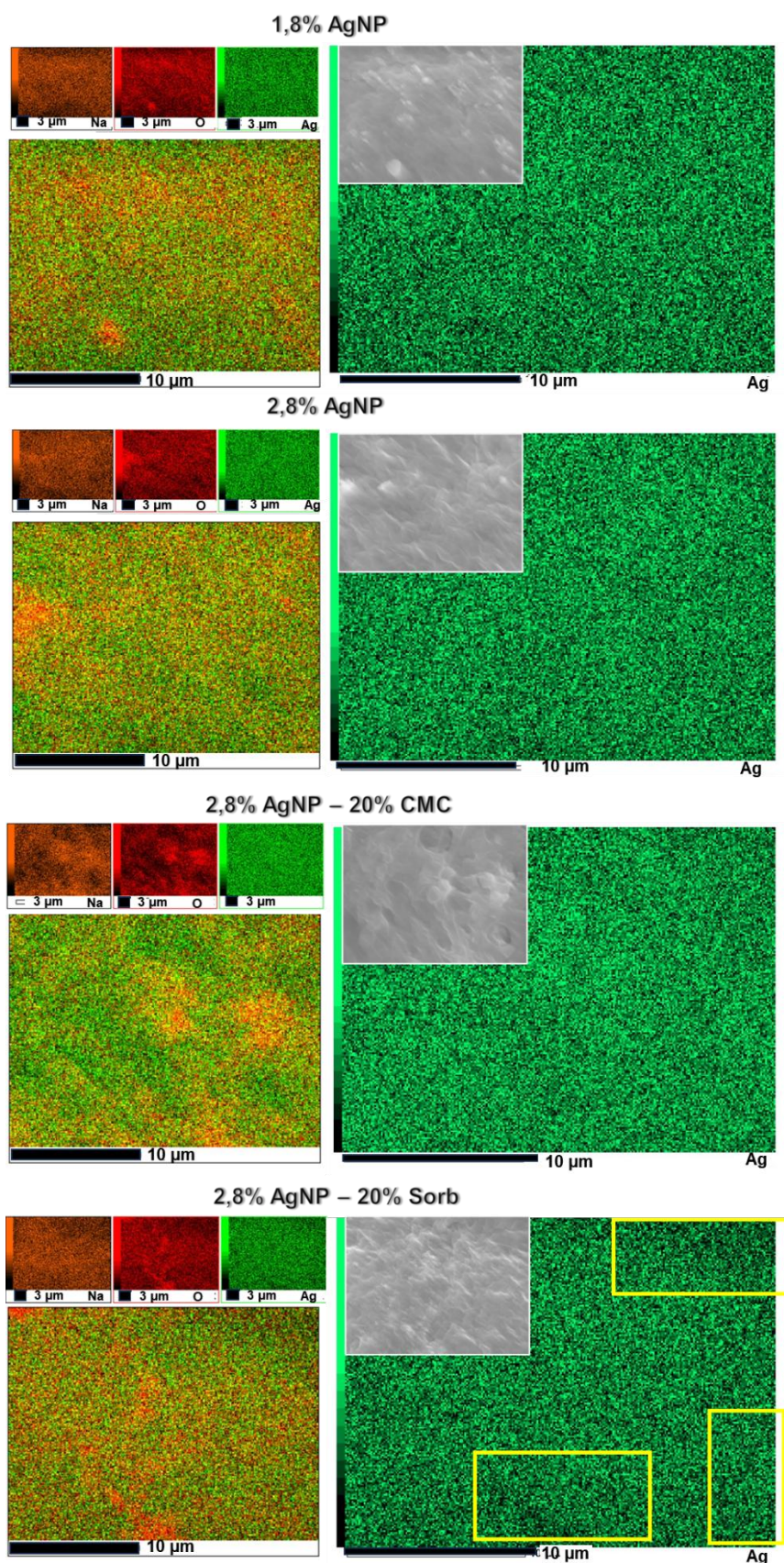


Figura 0.14 – Mapeamento dos principais elementos dos filmes nanocompósitos por meio de EDS: Sódio (Na) representado pelo laranja, Oxigênio (O) pelo vermelho e prata (Ag) pelo verde (continuação).

A análise por EDS foi realizada com tensão de aceleração de 15 kV e não se restringe à superfície do filme, uma vez que o feixe de elétrons penetra no material, gerando um volume de interação no interior da amostra. Para materiais poliméricos contendo nanopartículas metálicas, como os filmes de celulose regenerada com AgNP, a profundidade típica de penetração do feixe eletrônico a 15 kV situa-se entre 1 e 3  $\mu\text{m}$ , podendo variar conforme a composição local e a densidade do sistema. Isso significa que o sinal obtido por EDS corresponde a uma análise volumétrica (subsuperficial) e não exclusivamente à análise superficial [181].

Considerando a espessura dos nanocompósitos, a profundidade de análise do EDS representa uma fração da espessura total, mas ainda assim suficientemente significativa para refletir a distribuição interna das nanopartículas próximas à região analisada. Dessa forma, os resultados podem ser interpretados como uma média composicional do volume excitado pelo feixe.

A dispersão de prata observada nos quadros verdes indica uma distribuição homogênea na superfície dos filmes. Mesmo nos filmes que mostram morfologia com poros, como no caso dos com CMC, como observado nas micrografias de MEV, a dispersão das nanopartículas é relativamente uniforme. Além disso, um pequeno aumento da incidência de AgNPs é observado à medida que a concentração de nanopartículas nos filmes nanocompósitos aumenta. Em comparação com Kataoka et al. (2022), em que foram utilizadas concentrações abaixo de 0,3% (m/m) de AgNP, observa-se um aumento considerável de AgNPs na superfície do filme, o que pode ser responsável por criar redes de elétrons que proporcionem maior condutividade aos filmes.

Na Figura 3.12, no mapeamento nanocompósito 2,8% AgNP – 20% Sorb é visto que, ao aumentar o teor de AgNPs, o filme contém algumas falhas de homogeneidade de dispersão das nanopartículas, o que pode ter influenciado a condutividade do nanocompósito, como visto no tópico 3.4.1. Esse resultado também corrobora a micrografia dessa amostra observada na Figura 3.10, que, ao aumentar o teor de AgNPs, altera a morfologia superficial. Esse fator pode ser devido a alguma interação da CMC utilizada para estabilizar as AgNPs, que, nessa amostra, possui maior concentração, como também visto pelo TG/DTG, a presença da faixa de degradação desse componente.

A detecção de Na (sódio) no mapeamento por EDS está associada à CMC sódica e ao solvente residual que permaneceu após o processo de dissolução e regeneração da celulose, evidenciando que a etapa de coagulação em banho-maria não foi suficiente para eliminar totalmente esse solvente dos filmes. Nesse processo, a difusão do coagulante (água) promove a remoção do solvente da solução de celulose, levando à separação das fases. Ao entrar em contato com a água do banho coagulante, as regiões hidrofóbicas da celulose tendem a se agrupar, formando folhas agregadas (matriz celulósica) estabilizadas por

interações de hidrogênio, resultando no filme regenerado [39]. Observa-se, ainda, que, com o aumento da concentração de aditivo, a quantidade de sódio na superfície dos filmes aumenta, pois dificulta a remoção mais completa do Na durante a coagulação, além da CMC ser em forma sódica que também contribui para esse efeito.

A inserção de aditivos nos filmes de celulose regenerada pode influenciar a transmitância desses filmes, aumentando ou diminuindo-a [131]. Diante disso, o efeito da mistura de aditivos e da incorporação de AgNPs na transmitância dos filmes de celulose regenerados foi investigado por meio de espectroscopia UV-Vis, com as curvas apresentadas na Figura 3.12. Na região UV, os nanocompósitos apresentam baixas transmitâncias, como observado em outras literaturas [132], [133], [134].

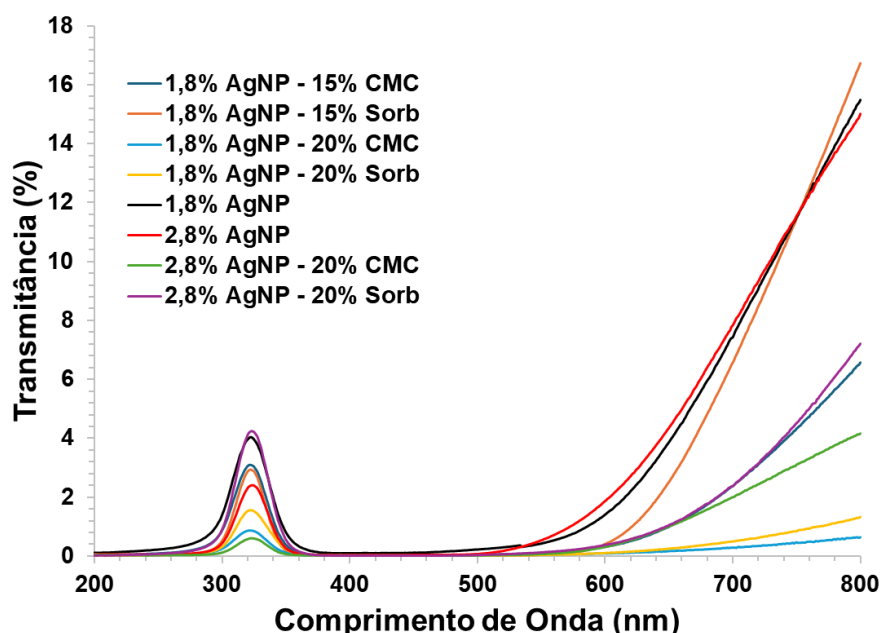


Figura 0.15 – Espectros UV-Vis dos filmes nanocompósitos.

A presença de uma banda de transmitância próxima a 300-400 nm nos filmes nanocompósitos indica a existência de AgNP esféricas [7]. Nessa região, as bandas com maiores concentrações de AgNP apresentam intensidades mais elevadas.

Há uma diminuição nas bandas de transmitância dos filmes nanocompósitos devido ao aumento do teor de AgNP, visto que a luz tem dificuldade de atravessar a amostra [9], [135]. Com a incorporação de AgNP, houve escurecimento na cor nos filmes nanocompósitos. A incorporação de AgNP às amostras com aditivo diminuiu a transmitância dos filmes na região do visível. A transmitância dos nanocompósitos diminuiu com a incorporação de aditivos.

Todas as amostras apresentam baixa transmitância, porém há um pequeno aumento em aproximadamente 600 nm. As amostras sem aditivo apresentaram transmitâncias

maiores quando comparadas às demais; isso indica que os aditivos reduziram a transmitância dos filmes. O aumento da concentração de aditivo, assim como o aumento do teor de nanopartículas, contribuiu para a redução da transmitância.

Foi observado, pelas micrografias do MEV, que os filmes com CMC apresentaram estruturas com porosidade, proporcionando maior opacidade, assim como no capítulo anterior. Diante disso, os aditivos proporcionaram poros de diferentes tamanhos, o que pode comprometer a transmitância do filme. Em comparação aos dois tipos de aditivos, a CMC influenciou para menor transmitância que o sorbitol.

#### **2.7.5. Análise Termogravimétrica (TGA) e Análise Dinâmico-Mecânica (DMA) dos Filmes Nanocompósitos**

O efeito do aumento da concentração de aditivo e de AgNP na estabilidade térmica dos filmes nanocompósitos foi investigado por meio de análises termogravimétricas (TG) e da derivada da termogravimetria (DTG), com as curvas apresentadas na Figura 3.13.

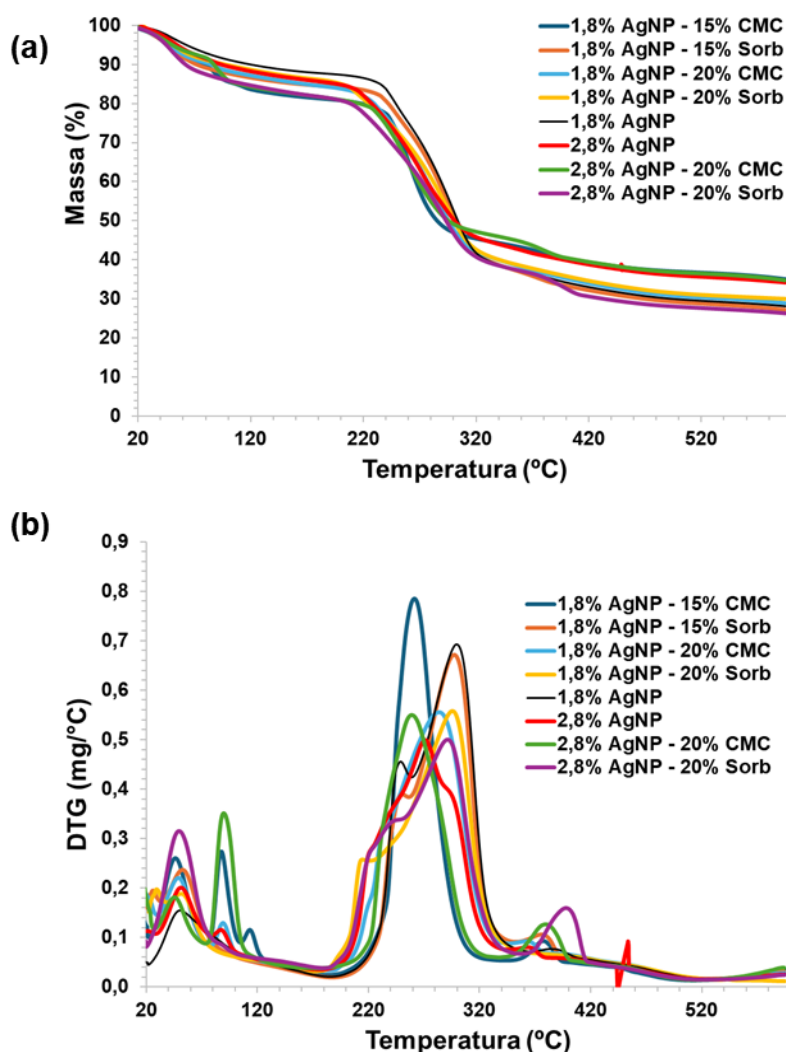


Figura 0.16 – Curvas de (a) TG e (b) DTG dos filmes nanocompósitos.

A Tabela 3.5 apresenta as informações térmicas de degradação dos filmes nanocompósitos e a perda de massa no intervalo de 100 °C a 600 °C.

Tabela 0.5 – Propriedades térmicas e dinâmico-mecânicas dos filmes nanocompósitos.

|                      | Pico <sub>Celulose</sub><br>(°C) | Perda de Massa (%) |             |             |             |             |             | E'<br>40°C<br>(MPa) |
|----------------------|----------------------------------|--------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------------|
|                      |                                  | 100<br>(°C)        | 200<br>(°C) | 300<br>(°C) | 400<br>(°C) | 500<br>(°C) | 600<br>(°C) |                     |
| 1,8% AgNP – 15% CMC  | 261,4703                         | 14,4               | 19,2        | 53,0        | 59,7        | 63,0        | 65,0        | 2776,4              |
| 1,8% AgNP – 15% Sorb | 297,2087                         | 12,3               | 15,8        | 48,8        | 66,7        | 70,8        | 72,8        | 3118,4              |
| 1,8% AgNP – 20% CMC  | 283,7912                         | 11,7               | 16,2        | 52,2        | 64,8        | 69,3        | 71,1        | 2046,2              |
| 1,8% AgNP – 20% Sorb | 295,4856                         | 10,2               | 15,0        | 49,7        | 64,2        | 68,6        | 70,0        | 1269,3              |
| 1,8% AgNP            | 299,4349                         | 8,8                | 12,6        | 47,4        | 65,8        | 70,1        | 71,9        | 1116,8              |
| 2,8% AgNP            | 271,0423                         | 10,5               | 15,2        | 49,7        | 60,1        | 64,0        | 65,8        | 2514,3              |
| 2,8% AgNP – 20% CMC  | 258,5989                         | 14,1               | 19,2        | 53,2        | 67,4        | 72,0        | 73,7        | 934,3               |
| 2,8% AgNP – 20% Sorb | 291,3078                         | 14,0               | 19,1        | 50,8        | 59,5        | 63,2        | 65,3        | 2852,9              |

A etapa inicial de perda de massa a 100 °C, que variou de aproximadamente 8,8% a 14,4%, está diretamente associada ao teor de umidade e às interações hidrofílicas da matriz [9]. Observa-se que as amostras com aditivo e maior teor de CMC apresentam perdas iniciais mais elevadas, devido à maior retenção de água promovida pelos aditivos hidrofílicos [16], [18]. A amostra de 1,8% de AgNP sem aditivo apresentou a menor perda inicial, indicando uma estrutura menos higroscópica.

O pico principal de degradação da celulose situou-se entre 258 e 299 °C, uma faixa compatível com os valores reportados para celulose regenerada, nanocelulose e seus derivados [18], [74]. Observa-se que a amostra de 1,8% AgNP sem aditivo exibiu o maior pico de degradação térmica, enquanto as formulações com maior teor de nanopartículas e aditivos, especialmente 2,8% AgNP – 20% CMC, apresentaram deslocamento do pico para temperaturas inferiores. Esse comportamento indica que a presença simultânea de AgNPs e aditivo acelera os processos de degradação térmica, tanto pelo efeito catalítico das nanopartículas metálicas quanto pela maior mobilidade segmentar induzida pelos aditivos [139], [140], [120].

Um pequeno ombro de degradação em aproximadamente 220 °C nas amostras está relacionado à degradação da CMC, coincidindo com a temperatura de estabilidade térmica observada para esse aditivo [126], [127], devido ao uso da CMC na solução de nanopartículas para estabilização.

Entre as amostras aditivadas, os sistemas contendo sorbitol exibiram, de modo geral, picos de degradação ligeiramente mais elevados do que os equivalentes com CMC, tanto em 15% quanto em 20%. Por outro lado, a CMC, por atuar também como modificador reológico e estabilizante de partículas, favorece uma organização microestrutural que, quando combinada a maiores teores de AgNPs, pode facilitar a degradação térmica em temperaturas mais baixas [63], [122].

A perda de massa a 300 °C, que variou entre 47% e 53%, corresponde à região mais crítica de degradação da celulose e dos aditivos. Nessa faixa, todas as amostras já apresentam degradação severa da matriz polimérica, indicando que a estabilidade térmica operacional segura desses filmes deve ser considerada abaixo de 200–220 °C, limite compatível com aplicações em sensores, eletrônica flexível e dispositivos descartáveis, mas inadequado para ambientes de alta temperatura [5].

Não se observa um comportamento linear claro associado ao aumento do teor de aditivo no resíduo térmico, observado em aproximadamente 600 °C, dos nanocompósitos; porém, existe uma faixa de variação de ~25–35%, associada à presença de componentes inorgânicos, incluindo nanopartículas de prata e resíduos de sais alcalinos provenientes do processo de dissolução da celulose e da forma sódica da CMC [74], [141]. Em comparação com o Capítulo II, observa-se um pequeno aumento dessa faixa de variação dos resíduos

nessa temperatura, que pode ser correlacionado ao aumento da incorporação de AgNP no estudo desse capítulo.

As curvas de módulo de armazenamento ( $E'$ ) em função da temperatura estão apresentadas na Figura 3.14 e evidenciam diferenças no comportamento viscoelástico dos filmes nanocompósitos, dependentes do tipo de aditivo, da concentração da matriz e do teor de AgNP. O módulo de armazenamento em 40 °C é destacado na Tabela 3.5, a fim de comparar as amostras nessa temperatura.

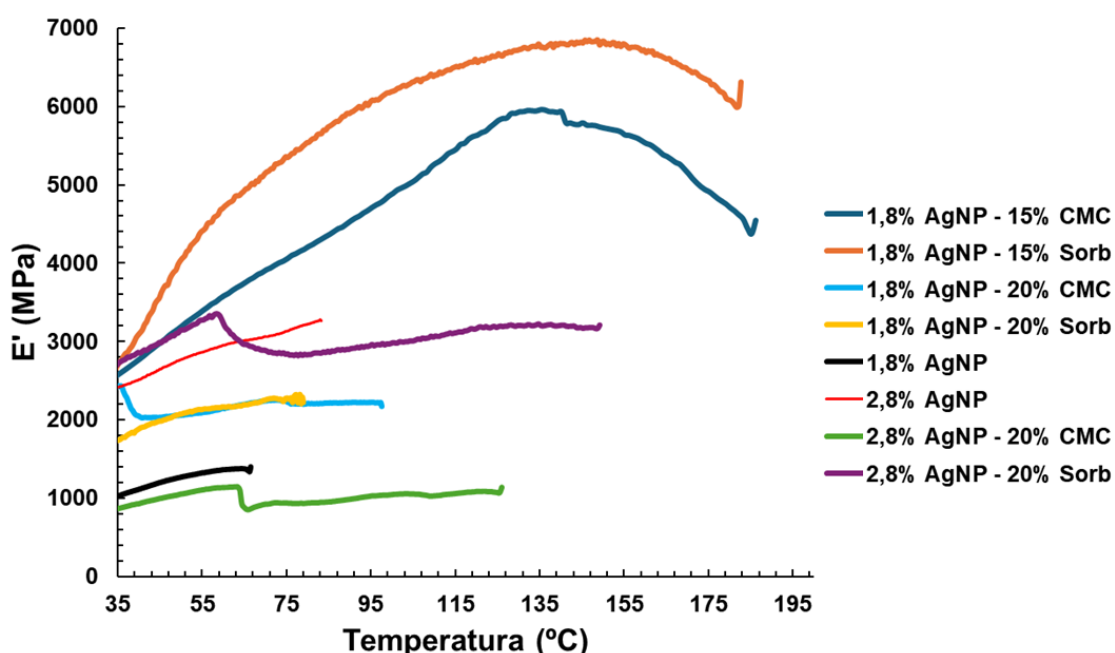


Figura 0.17 – Curvas de DMA dos filmes nanocompósitos.

De modo geral, observa-se que os filmes com sorbitol apresentam os maiores valores de  $E'$  em praticamente toda a faixa de temperatura analisada, atingindo valores entre 6500–7000 MPa para a amostra 1,8% AgNP – 15% Sorb, enquanto os sistemas contendo CMC exibem módulos inferiores.

O sorbitol, por ser um aditivo do tipo plastificante de baixo peso molecular, reduz as tensões internas, mas preserva parcialmente a rigidez da rede celulósica por meio de extensas ligações de hidrogênio, resultando em filmes simultaneamente rígidos e mais estáveis termicamente [18], [182]. Em contraste, a CMC atua como aditivo macromolecular e modificador reológico, aumentando o espaçamento entre cadeias e reduzindo a densidade de ligações intermoleculares fortes, o que leva à redução do módulo elástico, como amplamente observado em sistemas celulósicos contendo polissacarídeos hidrofílicos de alta massa molar [18], [183].

A Tabela 3.5 mostra que os filmes aditivados retêm maior umidade, com perdas de massa até 100 °C. O aumento inicial de  $E'$  com a temperatura observado pode ser atribuído à combinação de efeitos estruturais e físico-químicos. Esse comportamento nas amostras com aditivos ocorre devido à remoção de água adsorvida por esses componentes, que então promove maior rigidez do sistema. Simultaneamente, ocorrem a reorganização das cadeias de celulose regenerada e intensificação das interações intermoleculares, especialmente ligações de hidrogênio, contribuindo para o aumento do módulo [184].

A influência do teor de AgNP também é perceptível, com as amostras com 1,8% de AgNPs, especialmente quando combinadas ao sorbitol, apresentando os maiores valores de  $E'$ , indicando que, nesse regime, as nanopartículas atuam como reforço rígido, restringindo a mobilidade segmentar por meio de interações interfaciais com a matriz celulósica. Entretanto, ao elevar o teor de AgNP para 2,8%, observa-se uma redução do módulo nas formulações com CMC [185].

De forma geral, os aditivos aumentaram a temperatura de rompimento das amostras, indicando maior mobilidade dos filmes, já que as amostras sem aditivo rompem precocemente devido à evaporação de umidade e ausência de aditivos para melhorar a mobilidade das amostras.

A amostra 2,8% AgNP – 20% Sorb exibe comportamento intermediário, com valores de  $E'$  em torno de 3000 MPa e de rompimento em aproximadamente 150 °C, o que indica que o aumento simultâneo do teor de nanopartículas e do aditivo promove uma estrutura termicamente menos estável. Esse efeito é atribuído ao aumento da mobilidade segmentar induzido pelo aditivo, conforme descrito para diversos biocompósitos [88], [182].

Os nanocompósitos com sorbitol e 1,8% de AgNP apresentam maior rigidez e estabilidade termomecânica. As amostras com CMC, especialmente as com 2,8% de AgNP, apresentam menor  $E'$ , porém são adequadas para camadas funcionais flexíveis, sensores descartáveis e revestimentos condutores, em que a elevada rigidez não é um requisito. Assim, os resultados de DMA corroboram que o tipo de aditivo é o fator determinante da rigidez mecânica, enquanto o teor de AgNP influencia o reforço estrutural, determinando a resposta viscoelástica final dos filmes.

A análise conjunta dos resultados de DMA e das curvas de DTG permite uma correlação direta entre a resposta viscoelástico-mecânica dos filmes e os eventos térmicos de degradação da matriz celulósica. As curvas de DMA revelam que o rompimento mecânico dos filmes ocorre muito antes da degradação térmica propriamente dita, tipicamente entre 90 e 190 °C, dependendo da formulação. Esse comportamento é típico de biopolímeros contendo aditivos como plastificantes, nos quais a perda de rigidez está associada não à quebra química das cadeias, mas ao aumento da mobilidade segmentar, à evaporação de umidade ligada e à plastificação térmica progressiva [88], [186].

Assim, enquanto o DTG indica estabilidade química da celulose entre 250 e 300 °C e dos aditivos ligeiramente abaixo dessa faixa de temperatura, o DMA demonstra que a estabilidade mecânica funcional dos filmes é limitada a temperaturas significativamente inferiores, o que é essencial para definir suas aplicações.

A comparação entre os aditivos evidencia que as formulações com sorbitol mantêm valores de  $E'$  mais elevados ao longo de toda a faixa de temperatura, em comparação às equivalentes com CMC. Essa maior rigidez mecânica observada no DMA está diretamente relacionada, no DTG, ao deslocamento do pico principal de degradação para temperaturas ligeiramente mais altas nas amostras com sorbitol, indicando uma estrutura térmico-mecânica mais estável, compatível com o efeito descrito para plastificantes de baixo peso molecular que promovem homogeneidade [18], [186].

Em contraste, os nanocompósitos contendo CMC, especialmente os com 2,8% de AgNP, apresentam os menores valores de  $E'$  no DMA e rompimentos mecânicos mais precoces. Essas mesmas amostras exibem picos de degradação ligeiramente deslocados para temperaturas menores, o que indica que a CMC, ao atuar como aditivo macromolecular e estabilizante coloidal, aumenta o espaçamento intermolecular e favorece tanto a mobilidade térmica precoce da matriz quanto a antecipação da degradação, comportamento já descrito em sistemas celulósicos contendo polieletrólitos hidrofílicos [183], [187], [188].

Esses resultados mostram que a análise de DMA é sensível à estabilidade física e viscoelástica, enquanto o DTG responde à estabilidade química e térmica da estrutura, e que ambos os mecanismos são governados por fenômenos distintos, ainda que interligados. Essa análise integrada confirma que os filmes nanocompósitos desenvolvidos são termicamente adequados para aplicações de baixa e média temperatura, como sensores, eletrônica flexível, dispositivos descartáveis e camadas funcionais condutoras, mas não devem ser empregados como materiais estruturais submetidos a esforços mecânicos em temperaturas elevadas.

## **2.8. CONCLUSÃO DO CAPÍTULO III**

A análise estatística permitiu avaliar a influência da CMC e do sorbitol nos filmes nanocompósitos de celulose regenerada contendo nanopartículas de prata (AgNP), proporcionando compreensão das relações entre a composição, a microestrutura e as propriedades funcionais. Tanto o teor de AgNP quanto o tipo e a concentração de aditivo exercem influência significativa sobre a condutividade elétrica.

O sorbitol mostrou-se mais eficiente em promover mobilidade segmentar e desempenho elétrico em menores teores de AgNP, sendo o nanocompósito 1,8% AgNP – 20% Sorb o mais condutor. Já a CMC favoreceu a estabilidade da dispersão e a homogeneidade da rede condutora nos sistemas com aumento da concentração de AgNP,

sendo o nancompósito 2,8% AgNP – 20% CMC o mais condutor. Esse comportamento foi comprovado pela dispersão de AgNP observada por EDS e pela morfologia superficial das amostras. Os resultados de DMA mostraram que os filmes apresentam estabilidade mecânica dimensional de até 150 °C, a depender da formulação. As amostras contendo sorbitol apresentaram, em geral, maior rigidez inicial e comportamento mais estável em temperaturas intermediárias, enquanto os sistemas com CMC exibiram maior flexibilidade e colapsos mecânicos mais precoces.

De forma integrada, os resultados demonstram que a combinação entre AgNPs, matriz de celulose regenerada e aditivos permite ajustar eficientemente as propriedades elétricas, térmicas e mecânicas dos filmes. Os valores de condutividade elétrica na ordem de  $10^0$  S/cm posicionam os filmes como promissores no regime de compósitos condutores funcionais, compatíveis com aplicações como sensores, eletrodos de baixa potência, interconexões biodegradáveis e eletrônica flexível, proporcionando campo de sinais livre, visto a ausência de blindagem eletromagnética, com estabilidade térmica compatível, resposta mecânica adequada para baixas deformações e caráter biodegradável da matriz, em alinhamento com as demandas atuais por materiais eletrônicos ambientalmente responsáveis.

## CAPÍTULO IV – IMPACTO AMBIENTAL DO FILME NANOCOMPÓSITO DE CELULOSE REGENERADA COM NANOPARTÍCULAS DE PRATA

---

### 3.1. INTRODUÇÃO DO CAPÍTULO IV

O aumento exponencial da produção de plásticos e a intensificação da geração de resíduos configuram desafios ambientais de relevância global. Entre as alternativas propostas para mitigar tais impactos, destaca-se a substituição de polímeros de origem fóssil por materiais naturais, como a celulose. Este polímero, amplamente disponível, renovável e obtido a partir de fibras vegetais, apresenta características favoráveis à sustentabilidade. Dentre as diferentes fontes, a juta (*Corchorus capsularis*) desponta como matéria-prima estratégica, em virtude de sua abundância, baixo custo e elevado teor de celulose [8].

Os biopolímeros celulósicos, a exemplo dos filmes condutores de celulose regenerada, têm sido empregados em dispositivos eletrônicos, representando uma alternativa ambientalmente mais promissora em comparação com os polímeros sintéticos convencionais [23]. Resultados descritos no Capítulo III deste trabalho e corroborados por estudos prévios [9] demonstram o potencial da celulose extraída da juta para a produção de filmes condutores. Tais materiais podem ser reconhecidos como opções mais sustentáveis em relação aos polímeros petroquímicos, em razão da utilização de matérias-primas renováveis e de sua capacidade de biodegradação. Todavia, é imprescindível considerar que fatores associados ao cultivo agrícola, ao consumo energético e ao emprego de agentes químicos durante o processamento e a fabricação desses filmes podem, em determinados contextos, gerar impactos ambientais comparáveis aos dos polímeros de origem fóssil [23], [24]. Dessa forma, a adoção de recursos renováveis deve ser acompanhada de uma análise criteriosa que considere o equilíbrio entre os benefícios e os potenciais impactos [1], [3].

Nesse cenário, o desenvolvimento de produtos renováveis não assegura, de forma imediata, sua sustentabilidade ambiental. É necessário validar essa hipótese por meio de metodologias científicas consolidadas, capazes de quantificar insumos, avaliar fluxos energéticos e identificar as substâncias envolvidas ao longo de todas as etapas do ciclo de vida do produto. A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma metodologia para mensurar e compreender os impactos ambientais associados à produção de filmes condutores de celulose regenerada [25].

Com esse propósito, o presente capítulo conduz uma análise abrangente de ACV, considerando a produção de filmes nanocompósitos de celulose regenerada, obtidos a partir de fibras de juta e incorporados a nanopartículas de prata (AgNPs). A unidade funcional adotada foi de 1 kg de nanocompósito. Ressalta-se que a literatura ainda apresenta uma lacuna significativa no tocante à ACV de materiais desse tipo, evidenciada pela escassez de

dados. Assim, a implementação desta abordagem não apenas contribui para a consolidação de informações inéditas, como também fortalece os fundamentos metodológicos da ACV aplicados a biopolímeros e amplia o corpo de conhecimento científico sobre o tema.

## **3.2. REVISÃO DO CAPÍTULO IV**

### **3.2.1. Estudo de Avaliação de Ciclo de Vida Aplicado a Nanocompósitos**

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma metodologia essencial para elucidar os impactos ambientais associados aos produtos ao longo de todo o seu ciclo de vida, desde a obtenção das matérias-primas até o descarte final [25]. Ao considerar os polímeros derivados de fontes fósseis amplamente utilizados na produção de filmes para dispositivos eletrônicos, como polietileno, polipropileno, polissulfona, poli(fluoreto de vinilideno), poliimida e poli(benzimidazol), observa-se que aproximadamente 12% desses polímeros são incinerados após o uso, resultando na liberação de CO<sub>2</sub>, enquanto 80% acabam em aterros sanitários, podendo contaminar os oceanos. Embora esses materiais apresentem bom desempenho, não são renováveis nem biodegradáveis.

Em contrapartida, os biopolímeros surgem como uma alternativa mais sustentável, uma vez que são derivados de recursos naturais e possuem propriedades como não toxicidade, biodegradabilidade, compostabilidade, biocompatibilidade e capacidade de formação de filmes [4]. Entre os biopolímeros, encontram-se a celulose, quitina, quitosana, amido, ácido polilático (PLA), polihidroxialcanoatos (PHA) e polihidroxibutirato (PHB), que podem ser obtidos a partir de fontes naturais ou sintetizados por vias bioquímicas/biocatalíticas, utilizando monômeros de origem biológica provenientes de biomassa [73], [189].

Apesar das vantagens dos biopolímeros, é necessário considerar os impactos ambientais associados ao cultivo das matérias-primas, ao uso de reagentes químicos e à demanda energética na produção desses materiais, os quais podem ser semelhantes aos dos polímeros petroquímicos [23]. Nesse contexto, a ACV é uma metodologia cientificamente reconhecida que permite avaliar os impactos ambientais associados aos biopolímeros ao longo de seu ciclo de vida, identificando oportunidades de melhoria e de tomada de decisões embasadas [25]. A ACV pode ser conduzida seguindo os padrões ISO 14040 e ISO 14044, que estabelecem as etapas e diretrizes para o processo de avaliação, conforme mostrado na Figura 4.1, que também apresenta aplicações diretas do uso dessa ferramenta.

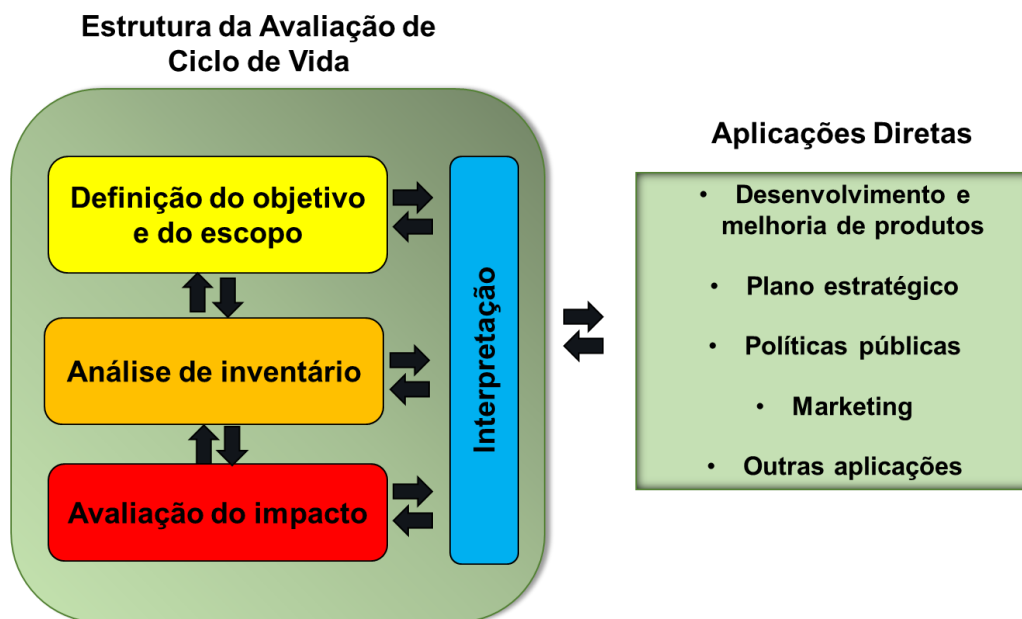


Figura 3.1 - Etapas de uma avaliação do ciclo de vida conforme a ISO 14044 e suas aplicações.

A primeira etapa da ACV é a definição do objetivo e do escopo do estudo, na qual são tomadas decisões abrangentes para estabelecer o sistema da ACV de forma clara e coerente. Em seguida, ocorre a análise do Inventário do Ciclo de Vida (ICV), que consiste na coleta e na quantificação das entradas e saídas de um sistema de produto ao longo de seu ciclo de vida. Após a análise do inventário, inicia-se a fase de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV), na qual são identificados e avaliados os potenciais impactos ambientais decorrentes das entradas e das saídas do ICV. Esses impactos são atribuídos a categorias específicas e quantificados com base em fatores de caracterização. É nessa etapa que se selecionam as categorias de impacto relevantes e se realizam a classificação e a caracterização. Por fim, ocorre a interpretação dos resultados, na qual são analisados os impactos ambientais identificados na AICV e tomam-se decisões embasadas nos dados obtidos. Essa etapa é fundamental para identificar oportunidades de melhoria e alternativas mais sustentáveis ao longo do ciclo de vida dos biopolímeros.

No contexto dos biopolímeros, a ACV tem sido empregada em diversos estudos. Um estudo em particular avaliou polímeros como poliláctico (PLA), amido termoplástico (TPS), polietileno tereftalato (PET), PET de origem biológica (Bio-PET), polietileno de alta densidade (PEAD), PEAD de origem biológica (Bio-PEAD), polietileno de baixa densidade (PEBD), PEBD de origem biológica (Bio-PEBD), desde a fabricação até o descarte, onde os resultados mostraram as compensações ambientais reais associadas à produção agrícola de plásticos, bem como as mudanças resultantes da transição de produtos recicláveis para compostáveis [190].

Várias outras ACVs foram realizadas para avaliar biopolímeros a partir do uso de fibras vegetais, celulose e seus derivados como reforço em polímeros termoplásticos e termorrígidos [1], [191]. Esses estudos buscaram compreender o ciclo de vida desses compósitos e seus impactos ambientais. Em um dos casos, foi realizada a ACV do berço ao portão de filmes compósitos de quitosana reforçados com nanofibrilas de celulose (CNF) para aplicações em embalagens. Os resultados demonstraram que os impactos ambientais desses compósitos são comparáveis ou inferiores aos de polímeros de base fóssil e de outros biopolímeros utilizados em aplicações de embalagens flexíveis [24].

Em outro estudo, foram avaliados os impactos ambientais decorrentes de diversos processos de obtenção de nanocristais de celulose a partir de bagaço-de-cana para aplicação em nanocompósitos, com fronteiras do sistema que abrangem a cadeia produtiva dos principais insumos necessários aos processos de extração até a obtenção dos nanocristais (do portão ao portão) [192]. Já na indústria automotiva, uma ACV foi realizada para avaliar o uso da fibra de juta como substituto das fibras de vidro na produção de compósitos para um capô frontal estrutural de um veículo “buggy”, abrangendo desde a extração de matérias-primas até os processos de produção e o uso, até o fim da vida útil.

Nesses estudos de ACV, geralmente usou-se como unidade funcional 1 kg de biopolímero [190], [24], [187]; porém, outras unidades também podem ser utilizadas, como no caso da fabricação do capô frontal do “buggy”, que foi considerado unidade funcional do sistema [1]. Além disso, dentre as categorias de impacto, cruciais para atribuir os impactos reais da produção desses biopolímeros, estão a destruição da camada de ozônio, poluição atmosférica, potencial de aquecimento global, acidificação, eutrofização, uso da água e da energia [192].

Diante da literatura exposta, a metodologia de ACV permite identificar oportunidades de melhoria e tomar decisões mais bem informadas para promover o desenvolvimento de materiais mais sustentáveis. Nesse sentido, a produção de nanocompósitos de celulose regenerada com AgNP precisa ser avaliada para identificar quais estágios do ciclo de vida têm contribuição mais significativa para o impacto ambiental do processo. Essa avaliação permite propor melhorias e alternativas para reduzir os impactos ambientais do produto, especialmente no contexto dos polímeros empregados em dispositivos eletrônicos.

Atualmente, há uma lacuna na literatura sobre a ACV desse tipo de material, com escassez de dados. Portanto, a implementação da ACV nesse contexto pode contribuir para a produção de dados e para enriquecer as bases de ACV e a literatura existente sobre o tema.

### 3.2.2. Impactos Ambientais da Produção de CMC e Sorbitol

O uso de aditivos em matrizes poliméricas de base celulósica é amplamente reportado como estratégia para melhorar as propriedades mecânicas, a flexibilidade e a processabilidade, especialmente em sistemas destinados a aplicações em filmes, embalagens e dispositivos funcionais. Entretanto, do ponto de vista ambiental, a introdução desses aditivos pode alterar o perfil de impactos do material final, tornando necessária a avaliação de seus efeitos à luz da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Dentre esses, os aditivos empregados nesse trabalho, o sorbitol e a carboximetilcelulose (CMC), ambos são de origem renovável, porém obtidos por rotas industriais distintas e com perfis ambientais próprios.

Estudos de ACV dedicados à produção de sorbitol indicam que seus impactos ambientais são fortemente condicionados pelo consumo de energia do processo e pela origem da matéria-prima glicídica. Akmalina et al. (2019) [193] reportaram, para a produção de 1 kg de sorbitol (95%), valores de potencial de aquecimento global de 3,55 kg CO<sub>2</sub> eq, potencial de acidificação de  $1,81 \times 10^{-2}$  kg SO<sub>2</sub> eq e potencial de eutrofização de  $1,31 \times 10^{-2}$  kg PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> eq. Os autores identificaram a glicose e a eletricidade como os principais contribuintes para todas as categorias avaliadas, com destaque para a energia necessária no reator de hidrogenação e nos sistemas auxiliares.

Foroughi et al. (2021) [194] indicam que os valores de potencial de aquecimento global do sorbitol geralmente se situam entre 2 e 5 kg CO<sub>2</sub> eq/kg, enquanto os potenciais de acidificação e eutrofização permanecem tipicamente na ordem de  $10^{-2}$  kg SO<sub>2</sub> eq/kg e  $10^{-2}$  kg PO<sub>4</sub> eq/kg, respectivamente. Resultados semelhantes, embora com variações na magnitude absoluta, são reportados em estudos “cradle-to-gate” associados ao projeto europeu “SWEET”, nos quais os valores de potencial de aquecimento global do sorbitol variam entre 1,6 e 5,1 kg CO<sub>2</sub> eq/kg, dependendo do mix elétrico, da eficiência do processo e da fronteira adotada [195]. Essas diferenças evidenciam que o perfil ambiental do sorbitol é altamente sensível às escolhas metodológicas e às condições regionais, particularmente quanto à eletricidade e ao tratamento de utilidades térmicas.

Para a CMC, a literatura sobre ACV é menos abundante e, em grande parte, baseada em estudos comparativos de ligantes e de derivados de celulose. Gboe et al. (2025) [196], em um estudo cradle-to-gate, utilizando os métodos CML-IA e ReCiPe, reportaram para a CMC valores de potencial de aquecimento global entre 4,02 e 4,15 kg CO<sub>2</sub> eq/kg, de potencial de acidificação em torno de 0,017 kg SO<sub>2</sub> eq/kg e de potencial de eutrofização de aproximadamente 0,0018 kg PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> eq/kg. Baniyadi et al. (2025) [197] estudaram a produção de filmes com CMC e relataram um impacto de potencial de aquecimento global de 4,98 kg CO<sub>2</sub> eq/kg para o filme de CMC puro.

Foroughi et al. (2021) [194] analisam dados de ACV disponíveis para diversos derivados de celulose, incluindo a CMC. Os autores relatam que os valores de potencial de aquecimento global da CMC variam amplamente, entre 3 e 10 kg CO<sub>2</sub> eq/kg, dependendo da rota de produção, do mix energético e da fronteira do sistema. A revisão aponta ainda que os potenciais de acidificação situam-se tipicamente entre 0,005 e 0,05 kg SO<sub>2</sub> eq/kg, enquanto os potenciais de eutrofização permanecem na ordem de 10<sup>-3</sup> a 10<sup>-2</sup> kg PO<sub>4</sub> eq/kg. O estudo enfatiza que a CMC apresenta impactos ambientais superiores aos de polissacarídeos naturais não modificados, principalmente devido às etapas químicas adicionais envolvidas em sua produção.

Embora de origem renovável, esses componentes, em aplicações como aditivos, devem ter seus impactos unitários interpretados à luz da fração mássica efetivamente incorporada ao material final. A contribuição direta do aditivo para os impactos totais do filme tende a ser significativamente inferior àquela associada à matriz celulósica processada, especialmente quando esta envolve etapas energéticas intensivas.

### **3.3. METODOLOGIA DO CAPÍTULO IV**

#### **Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) da Obtenção do Nanocompósito RCF – AgNP**

A modelagem da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) foi realizada no software LCA for Experts da Sphera, na versão 10.9 e utilizado seu respectivo banco de dados. Este estudo foi conduzido de acordo com as normas ISO 14040 e ISO 14044. As etapas de modelagem estão descritas a seguir, e os diagramas, processos e fluxos de entradas e saídas foram incluídos no Apêndice, trazendo informação adicional aos leitores.

##### **3.3.1.1. *Objetivo e escopo da ACV***

Este estudo tem como objetivo analisar os impactos ambientais associados à produção de filme de celulose regenerada com nanopartículas de prata (RCF-AgNP) a partir de juta, comparando dois cenários distintos de extração de celulose. Este estudo justifica-se pela necessidade de aprofundar a compreensão dos impactos ambientais associados à fabricação do nanocompósito RCF-AgNP, a partir de juta, para utilização como componente condutor. Para tanto, foi elaborado um inventário de entradas e saídas, considerando o uso de insumos químicos e o consumo de energia.

A unidade funcional adotada foi de 1 kg de RCF- AgNP. A função do sistema em estudo será a obtenção de RCF - AgNP para aplicação como material condutor em dispositivos/sensores eletrônicos.

#### 3.3.1.2. *Limites do sistema*

Os limites do sistema foram definidos do berço ao portão, considerando a extração e o processamento da matéria-prima até a produção de RCF- AgNP. Os principais processos de produção de celulose por RCF- AgNP podem ser divididos em: produção de fibra de juta; obtenção de celulose de juta em ambos os cenários estudados; síntese de AgNP; e produção de filmes nanocompósitos, como visto na Figura 4.2.

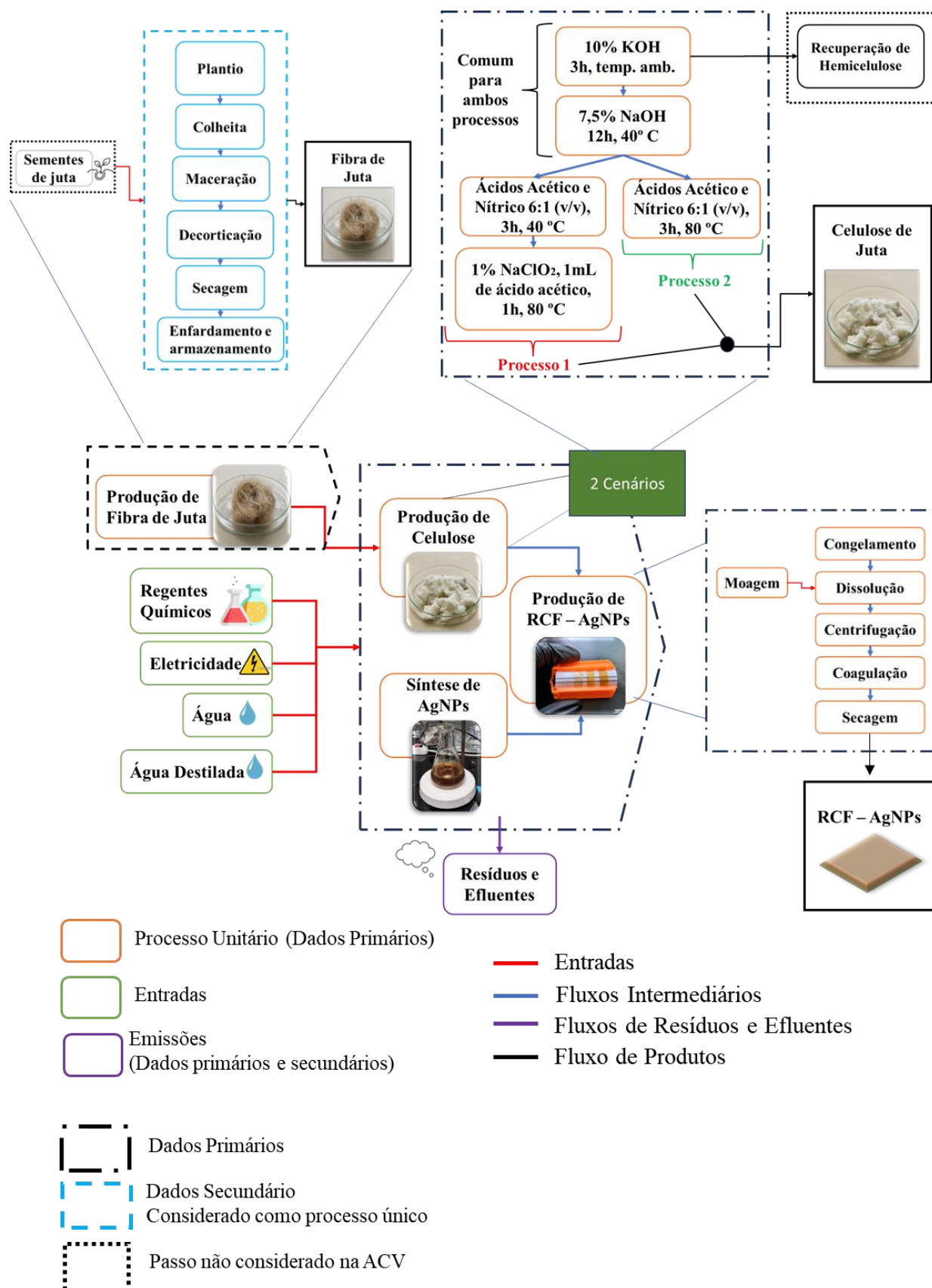


Figura 3.2 – Fluxos e processos para a obtenção de filmes nanocompósitos. Os dois cenários de produção de celulose são apresentados.

### 3.3.1.3. *Descrição do processo de produção para Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) da obtenção do nanocompósito RCF - AgNP*

Fibras de juta, plantadas no Brasil e obtidas da Sisalsul LTDA, foram utilizadas para produzir um filme nanocompósito de celulose regenerada com nanopartículas de prata (RCF-AgNP). Dois cenários para obtenção de celulose de juta foram estudados.

- Cenário 1 (C1 – acid. 40 °C + branq.): Dois tratamentos alcalinos com KOH e NaOH são realizados, seguidos de tratamento ácido com ácido acético e ácido nítrico a 40 °C e, por fim, de branqueamento das fibras com clorito de sódio e ácido acético [3].
- Cenário 2 (C2 – acid. 80 °C): Após os dois primeiros tratamentos com KOH e NaOH, houve uma alteração na etapa final, na qual o tratamento ácido foi realizado a 80 °C, resultando em uma fibra que também permitiu a dissolução e a regeneração satisfatórias dos filmes, eliminando, assim, a necessidade de branqueamento.

A Figura 4.2 mostra a diferença entre os processos avaliados. Além disso, ilustra a representação do sistema do produto analisado. O fluxo de referência estava relacionado às quantificações dos componentes e processos necessários para cumprir a função do sistema e atender à unidade funcional estabelecida.

No tratamento alcalino com KOH, a hemicelulose pode ser recuperada por métodos químicos; no entanto, esse processo de recuperação não foi considerado no escopo, apenas a alocação da porção de hemicelulose. Energia elétrica e água foram utilizadas nas etapas de obtenção de celulose, de síntese de nanopartículas de prata (AgNP) e de produção do filme nanocompósito.

O nanocompósito considerado na ACV foi o filme de celulose regenerada com 1,8% (m/m) de nanopartículas de prata, sem aditivo (RCF – AgNP). Uma relação de potencial de impacto do aquecimento global foi realizada posteriormente, com a adição de 15% e 20% (m/m) dos aditivos estudados no Capítulo III, para fins de comparação, mas fora do escopo da ACV.

Os processos de síntese de AgNPs e de produção de filmes de celulose regenerada são descritos na metodologia de Kataoka et al. (2022) [9]. AgNPs foram produzidas a partir de soluções de nitrato de prata e borohidreto de sódio e, posteriormente, estabilizadas com carboximetilcelulose.

### 3.3.1.4. *Inventário do Ciclo de Vida (ICV)*

O estudo de ACV foi conduzido com base em dados primários da produção do filme em laboratório e em dados secundários de uma revisão da literatura existente na área ou do banco de dados do software de ACV, quando os dados primários foram insuficientes para concluir o estudo. Dados secundários foram utilizados para os seguintes processos: produção

de juta, produção de insumos (reagentes, água, água destilada, eletricidade), emissões, efluentes e resíduos. Para a análise ambiental na síntese de AgNPs, os reagentes foram quantificados; no entanto, os impactos ambientais da produção desses reagentes não foram considerados nesta etapa, com foco apenas no uso de eletricidade e água. A Figura 4.2 apresenta o sistema de produtos estudado.

O fluxo de referência foi delimitado de modo que todos os dados primários e secundários se refiram à medição dos componentes e das operações necessárias para atender à função e à unidade funcional do sistema. A Tabela 4.1 apresenta os insumos do ICV.

Sobre as limitações do inventário, destaca-se que os dados primários utilizados em escala laboratorial tendem a apresentar menor eficiência energética, ausência de recuperação e reaproveitamento de solventes, além de maior consumo específico de energia por unidade produzida, quando comparados a sistemas industriais otimizados e contínuos. Dessa forma, os resultados obtidos podem superestimar determinados impactos ambientais, especialmente aqueles associados ao consumo de energia, não refletindo integralmente o desempenho ambiental esperado em uma produção em escala industrial.

Tabela 3.1 - Entradas da ACV para o filme nanocompósito 1 kg de RCF- AgNP.

| Processo               | Entradas | Quantidade |    |  | Processo                    | Entradas | Quantidade |    |  | Processo                           | Entradas | Quantidade |      |  |
|------------------------|----------|------------|----|--|-----------------------------|----------|------------|----|--|------------------------------------|----------|------------|------|--|
|                        |          | C1         | C2 |  |                             |          | C1         | C2 |  |                                    |          | C1         | C2   |  |
| <b>Fibra de Juta</b>   |          |            |    |  | <b>Produção de Celulose</b> |          |            |    |  | <b>Produção do RCF - AgNP</b>      |          |            |      |  |
| Dióxido de carbono     | 19       | 17,7       | kg |  | <i>Tratamento com KOH</i>   |          |            |    |  | <i>Moagem</i>                      |          |            |      |  |
| Sementes de juta       | 0,01     | 0,01       | kg |  | Eletricidade (MJ)           | 1,12     | 1,04       | MJ |  | Eletricidade                       | 30,42    | 23,18      | MJ   |  |
| <b>Síntese de AgNP</b> |          |            |    |  | Água destilada              | 25,75    | 24,02      | kg |  | Celulose de Juta                   | 1,55     | 1,18       | kg   |  |
| Eletricidade           | 0,038    | 0,029      | MJ |  | Fibra de juta               | 2,6      | 2,4        | kg |  | <i>Congelamento</i>                |          |            |      |  |
| Água destilada         | 31,76    | 24,3       | kg |  | Hidróxido de potássio       | 3,02     | 2,82       | kg |  | Solução de AgNP                    | 31,87    | 24,32      | kg   |  |
| Água                   | 9,65     | 7,37       | kg |  | Água                        | 207,81   | 193,8      | kg |  | Eletricidade                       | 739,73   | 564,2      | MJ   |  |
| Carboximetilcelulose   | 0,038    | 0,029      | kg |  | <i>Tratamento com NaOH</i>  |          |            |    |  | Água destilada                     | 38,55    | 29,4       | kg   |  |
| Nitrato de prata       | 0,012    | 0,009      | kg |  | Eletricidade                | 949,74   | 886,6      | MJ |  | Hidróxido de sódio                 | 5,85     | 4,46       | kg   |  |
| Borohidreto de sódio   | 0,016    | 0,012      | kg |  | Água destilada              | 41,57    | 38,75      | kg |  | <i>Dissolução</i>                  |          |            |      |  |
|                        |          |            |    |  | Fibras tratadas com KOH     | 2,08     | 1,94       | kg |  | Eletricidade                       | 2        | 1,34       | 1.76 |  |
|                        |          |            |    |  | Hidróxido de sódio          | 3,21     | 3,00       | kg |  | Solução para dissolução            | 76       | 58,18      | kg   |  |
|                        |          |            |    |  | Água                        | 343,81   | 320,9      | kg |  | Celulose de juta moída             | 1,55     | 1,18       | kg   |  |
|                        |          |            |    |  | <i>Acidificação</i>         |          |            |    |  | <i>Centrifugação</i>               |          |            |      |  |
|                        |          |            |    |  | Ácido acético               | 41,03    | 38,44      | kg |  | Eletricidade                       | 22,53    | 17,17      | MJ   |  |
|                        |          |            |    |  | Eletricidade                | 260,23   | 243,4      | MJ |  | Solução de RCF - AgNP              | 77,82    | 59,4       | kg   |  |
|                        |          |            |    |  | Fibras tratadas com NaOH    | 1,96     | 1,83       | kg |  | <i>Coagulação</i>                  |          |            |      |  |
|                        |          |            |    |  | Ácido Nítrico (60%)         | 8,92     | 8,34       | kg |  | Solução de RCF - AgNP centrifugado | 57,4     | 51,22      | kg   |  |
|                        |          |            |    |  | Água                        | 323,33   | 302,3      | kg |  | Água                               | 5633,8   | 4298       | kg   |  |
|                        |          |            |    |  | <i>Branqueamento</i>        |          |            |    |  | <i>Secagem</i>                     |          |            |      |  |
|                        |          |            |    |  | Ácido acético               | 0,37     | -          | kg |  | RCF - AgNP gel                     | 53       | 47,38      | kg   |  |
|                        |          |            |    |  | Fibras acidificadas         | 1,78     | -          | kg |  |                                    |          |            |      |  |
|                        |          |            |    |  | Eletricidade                | 74,08    | -          | MJ |  |                                    |          |            |      |  |
|                        |          |            |    |  | Água destilada              | 35,67    | -          | kg |  |                                    |          |            |      |  |
|                        |          |            |    |  | Clorito de sódio            | 0,45     | -          | kg |  |                                    |          |            |      |  |
|                        |          |            |    |  | Água                        | 251,4    | -          | kg |  |                                    |          |            |      |  |

As fibras de juta são comumente cultivadas e utilizadas em países como Índia, Bangladesh, China, Nepal, Tailândia e Brasil. O processo de plantio de fibras de juta no Brasil difere dos de outros países. No Brasil, o cultivo da juta, até o refino da planta, é realizado por meio de trabalho manual em comunidades de pequenos agricultores na região do Rio Amazonas [198]. Os métodos de cultivo de juta adotados na região amazônica serão empregados neste estudo. Nessa região, as plantas de juta são arbustos de rápido crescimento, com altura média de 2 a 4 metros e ciclo vegetativo de aproximadamente 6 meses. O rendimento médio de fibra considerado é de 1500 kg/ha [10].

De acordo com os produtores, os campos de juta não necessitam de irrigação desde que a precipitação anual exceda 2200 mm, condição assumida na presente ACV. O solo não necessita de preparo, pois o rio contribui para o enriquecimento de nutrientes para as plantas durante o transbordamento [198].

Durante a maceração, os feixes fibrosos são separados dos tecidos da casca por fermentação anaeróbica, na qual os feixes de fibras são submersos em água e os troncos são colocados sobre eles para evitar que os feixes do caule flutuem. A maceração no rio dura entre 8 e 10 dias devido ao clima quente da região, que favorece a fermentação dos caules e a extração subsequente das fibras. A decorticação e a lavagem das fibras são feitas manualmente. Os caules são mergulhados e agitados diversas vezes em água para remover a casca escura durante o processo de decorticação. Em seguida, as fibras são separadas e levadas para secagem, sendo espalhadas em grades próximas ao local da maceração. Por fim, as fibras são enfardadas e armazenadas [199].

As fases de cultivo, colheita, secagem e armazenamento das fibras foram atribuídas sem impactos. A etapa de maceração e decorticação da fibra tem alguns impactos relacionados a esse processo e, considerando a literatura disponível em bases de dados, há escassez de informações brasileiras. Portanto, no processo de maceração e decorticação de fibras, foram utilizados dados secundários de Ecolabel [200], na Índia, apenas para esses processos, visto que os demais diferem devido ao uso de água, pesticidas e outros fatores.

Os impactos do processo de maceração dessa fonte foram avaliados em tanques de maceração com água parada. No Brasil, esse processo é realizado na água corrente do rio, reduzindo as emissões de atividade anaeróbica e, portanto, sugerindo impactos menores. No entanto, considerando esse cenário, os dados foram utilizados neste estudo. Além disso, a captura de CO<sub>2</sub> pelas plantas foi considerada insumo do processo de cultivo, por meio da fotossíntese.

As fibras de juta foram extraídas para a produção de celulose, com aplicação como filme nanocompósito. Nas etapas de produção de celulose e de RCF – AgNP, conduzidas em laboratório, serão contabilizados dados de consumo de água, energia, reagentes e resíduos para cada subprocesso, com base em dados primários dos experimentos realizados. Nos

processos de síntese de AgNPs, os reagentes foram quantificados, mas os impactos ambientais da produção desses reagentes não foram considerados nesta etapa, limitando-se à eletricidade e à água.

O banco de dados do software LCA for Experts foi utilizado para avaliar os impactos ambientais associados à produção e síntese de produtos químicos auxiliares (hidróxido de sódio, hidróxido de potássio, ácido acético, ácido nítrico). Além disso, foi utilizado para avaliar os impactos associados à produção e ao fornecimento de eletricidade e de água, bem como ao tratamento de efluentes.

O processo de água destilada foi modelado com base em dados primários de demanda coletados em laboratório e em informações de consumo fornecidas pelo fabricante do destilador.

O consumo de eletricidade foi estimado para cada processo unitário, considerando a potência do equipamento (kW), o tempo de utilização (h) e a capacidade utilizada, em massa (kg) ou em volume (L). Ou seja, o consumo elétrico total de cada equipamento foi considerado em função do volume ou da massa nele ocupado, sem levar em conta a capacidade máxima de cada equipamento.

#### 3.3.1.5. *Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV)*

A partir dos resultados da etapa de ACV, os impactos foram quantificados considerando as categorias de impacto Potencial de Aquecimento Global (PAG 100 anos) [kg CO<sub>2</sub> eq.], Potencial de Eutrofização (PE) [kg Fósforo eq.] e Potencial de Aquecimento Global (PAG 100 anos) [kg CO<sub>2</sub> eq.], pelo método CLM 2001 e pelo uso de energia, categorias estudadas em [12].

### 3.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise comparativa entre os cenários C1 (acid. 40 °C + branq.) e C2 (acid. 80 °C) evidenciou que a etapa de produção da celulose é o principal determinante do desempenho ambiental do filme nanocompósito. A modificação da rota no C2, com tratamento ácido conduzido a 80 °C e eliminação da etapa de branqueamento, resultou no aumento do rendimento do processo de formação do filme, que passou de 64,7% para 84,6%, que pode ser devido à provável mudança na massa molar da celulose, pois cadeias com menor grau de polimerização apresentam maior solubilidade [101].

Considerando a unidade funcional de 1 kg de filme, o C1 requer 1,55 kg de celulose, enquanto o C2 necessita apenas de 1,18 kg, o que representa uma redução de 23,5% na massa processada. Essa melhoria de rendimento se refletiu diretamente em todas as categorias de impacto ambiental avaliadas, como mostrado nos tópicos a seguir. A presença de branqueamento no C1, com clorito de sódio e ácido acético, aumenta a carga química do processo e a complexidade das correntes residuais, enquanto sua eliminação no C2 contribui diretamente para a redução desses impactos.

O tratamento aplicado no C2 promoveu uma modificação da fibra, aumentando sua reatividade e facilitando a dissolução em meio alcalino, bem como a regeneração da celulose. A literatura demonstra que a dissolução da celulose depende da acessibilidade da estrutura supramolecular, do grau de cristalinidade, do grau de polimerização (GP) e da presença de frações residuais, como lignina e hemiceluloses, que dificultam a penetração do solvente e favorecem a formação de frações insolúveis. Revisões amplamente citadas indicam que celuloses com maior cristalinidade e maior GP apresentam dissolução mais difícil, enquanto estratégias aumentam a acessibilidade e reduzem limitações, favorecendo a formação de soluções mais homogêneas e regenerações mais eficientes [201].

A diferença decisiva entre C1 e C2 encontra-se justamente na etapa final. O tratamento ácido conduzido a 80 °C no C2 pode ter intensificado a modificação das superfícies acessíveis e favorecido a remoção ou a transformação de frações recalcitrantes, resultando em uma fibra mais reativa à dissolução em NaOH. A maior temperatura acelera reações heterogêneas, altera o equilíbrio das ligações de hidrogênio, promove maior inchamento e penetração do solvente, reduzindo a fração insolúvel. Estudos sobre dissolução de celulose em sistemas alcalinos mostram que pequenas alterações estruturais podem modificar drasticamente a estabilidade da solução e a qualidade do regenerado, impactando diretamente o rendimento do filme [75], [108].

A eliminação do branqueamento no C2 não se limita à retirada de uma etapa do fluxograma, mas indica que a fibra obtida após o tratamento ácido mais severo já apresenta reatividade suficiente para a dissolução e a regeneração. O branqueamento com clorito de sódio acidificado é um método clássico de deslignificação empregado para aumentar a pureza da fibra. Assim, o fato de o C2 dispensar essa etapa e ainda apresentar melhor desempenho de dissolução/regeneração é compatível com a interpretação de que a condição de C2 levou a uma fibra estruturalmente menos restritiva, reduzindo a formação de gel e de frações insolúveis e, conseqüentemente, as perdas no processo.

### 3.4.1. Potencial de Aquecimento Global do RCF-AgNP

A Figura 4.3 apresenta o impacto de potencial de aquecimento global (PAG) das principais etapas da ACV, como mostrado na Figura 4.2. A contribuição percentual comparativa da produção de celulose de cada processo, em cada cenário, também é ilustrada na Figura 4.3, bem como a contribuição percentual de cada etapa do processo de produção do nanocompósito RCF – AgNP. Essa última contribuição é apresentada em um único gráfico, pois as etapas são as mesmas em ambos os cenários, sendo proporcionalmente distribuídas entre eles.

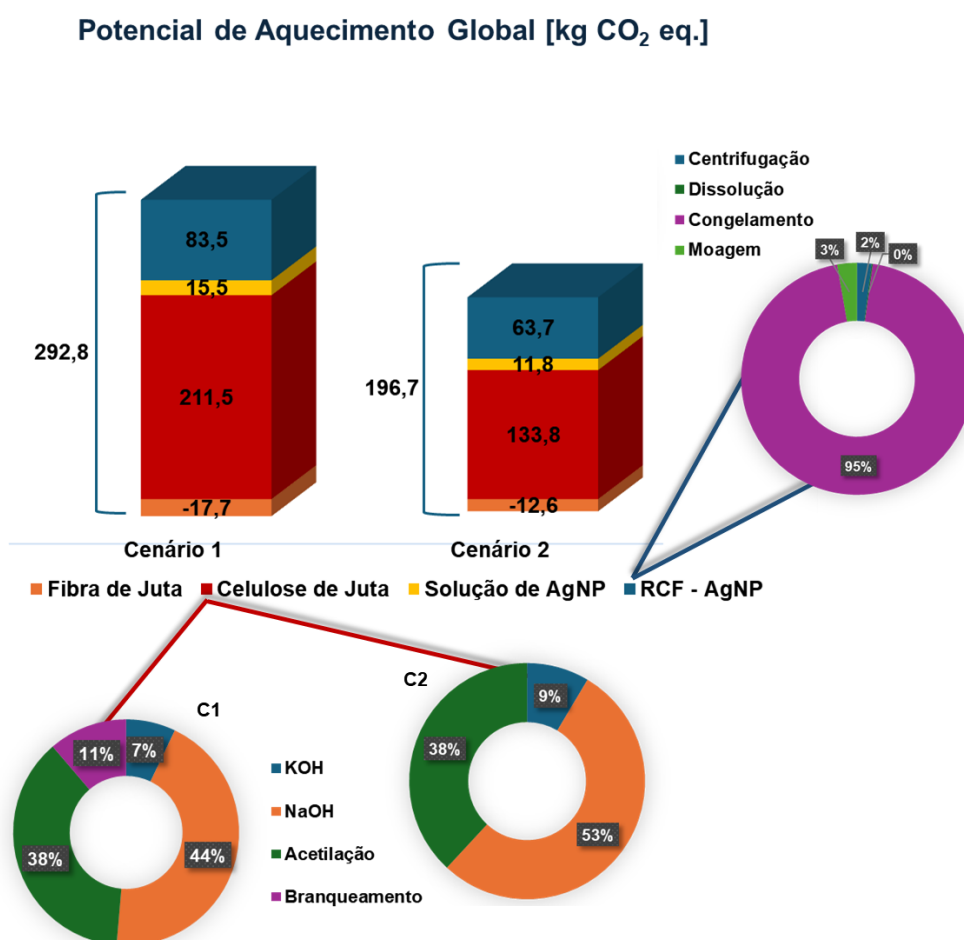


Figura 3.3 – Impacto do potencial de aquecimento global do RCF – AgNP em ambos os cenários.

Os valores de impacto do potencial de aquecimento global indicaram que o processo de produção de celulose, em ambos os cenários, é o principal contribuinte para essa categoria de impacto, devido ao alto consumo de água, energia e insumos químicos.

No Cenário 1 (C1), o PAG total é de aproximadamente 292,8 kg CO<sub>2</sub> eq.. Desse total, a etapa da produção da celulose de juta responde por cerca de 72,2% do impacto, a produção

do filme nanocompósito por 28,5%, e a síntese das nanopartículas de prata por aproximadamente 5,3%. A contribuição negativa da produção da juta (-6,0%) está associada ao crédito de carbono biogênico.

O potencial de aquecimento global da produção de fibra de juta foi negativo, devido à captura de CO<sub>2</sub> pelas plantas durante a fase de cultivo, o que contribuiu positivamente para o balanço final de impactos nesta categoria, como também observado por Guest et al. (2013) [202].

No Cenário 2 (C2), o PAG total reduz para aproximadamente 196,7 kg CO<sub>2</sub> eq.. A participação da produção da celulose de juta permanece dominante, representando cerca de 68,0% do total. A produção do filme nanocompósito passa a contribuir com 32,4%, enquanto a síntese de AgNPs representa aproximadamente 6,0%. Novamente, a produção da juta apresenta contribuição negativa (-6,4%) devido ao carbono biogênico.

Comparando os cenários, observa-se uma redução global de aproximadamente 32,8% no PAG ao passar do C1 para o C2. Essa redução não decorre apenas da eliminação de uma etapa de processamento, mas, principalmente, do aumento do rendimento do processo, o que reduz a massa total de material submetida às etapas subsequentes. Consequentemente, tanto a etapa de produção da celulose quanto a produção do nanocompósito apresentam reduções absolutas expressivas.

Katakojwala et al. (2020) [203] apresentam valores entre 146,6 e 261,35 kg de CO<sub>2</sub> eq. para a extração de celulose microcristalina (MCC), já Gupta et al. (2023) [204] obtiveram resultados próximos de 170 kg CO<sub>2</sub> eq. por kg de nanofibras de celulose, o que é compatível com os valores de impacto da extração de celulose neste estudo.

Em ambos os cenários estudados nesse trabalho, assim como em Katakojwala et al. [5] na produção de MCC, a eletricidade e a água deionizada consumidas em vários estágios, juntamente com a utilização de hidróxido de sódio para pré-tratamento, foram identificadas como contribuintes significativos.

No processo de produção do RCF-AgNP a etapa que mais contribuiu para o potencial de aquecimento global foi a de congelamento, pelo fato do uso de maior demanda de energia, que é, mais uma vez, o maior contribuinte.

### **3.4.2. Potencial de Eutrofização do RCF-AgNP**

Em relação ao potencial de eutrofização (PE), a Figura 4.4, mostra que o processo de produção de celulose é o principal contribuinte para esta categoria de impacto. O PE total cai de 0,204 para 0,133 kg PO<sub>4</sub> eq. de C1 para C2, mostrando redução de 34,8% no impacto nesta categoria. A produção de celulose contribui para o impacto nessa categoria em torno de 56,4% para C1 e em torno de 52,6% para C2, devido à presença de matéria orgânica e

inorgânica na água, resultante de produtos de degradação de fibras, combinados com alta demanda de eletricidade.

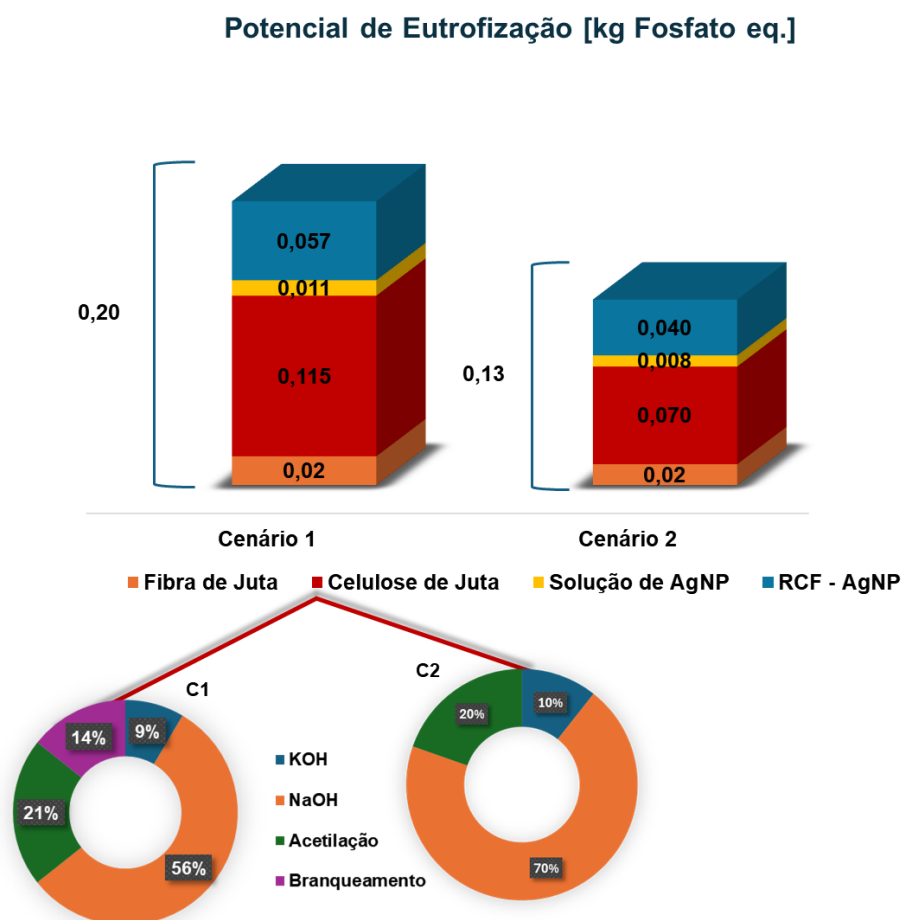


Figura 3.4 – Impacto potencial da eutrofização do RCF – AgNP em ambos os cenários.

A produção do nanocompósito também apresenta contribuição relevante nesta categoria, correspondendo a cerca de 27,9% do PE total no C1 e 30,1% no C2, evidenciando que essa etapa mantém proporção semelhante, embora com redução absoluta devido à menor massa processada no C2. Já a etapa de produção da fibra de juta contribui com aproximadamente 9,5% do PE total no C1, 10,3% e 11,3% no C2. Essa contribuição está associada principalmente aos processos de maceração e lavagem das fibras, que liberam matéria orgânica nos corpos hídricos, fenômeno já descrito na literatura para fibras naturais obtidas por processos úmidos.

No processo de produção de celulose, os tratamentos com NaOH e o tratamento ácido são os principais contribuintes para o impacto nessa categoria, enquanto, no processo de produção de nanocompósitos, o congelamento da solução é o fator contribuinte. Entre os fatores que têm maior influência nessa categoria de emissão, estão o consumo de energia, principal contribuinte, e o consumo de água destilada, que também demanda elevados valores energéticos.

Katakojwala et al. (2020) [203] relataram valores entre 0,06 e 0,12 kg de fosfato eq. associados à extração de celulose microcristalina. Segundo Figueirêdo et al. (2012) [205], a produção e distribuição de energia elétrica são as principais responsáveis pelos impactos nas mudanças climáticas e na eutrofização nos sistemas de produção de derivados de celulose, como é o caso deste estudo, evidenciado nos processos de obtenção de celulose, produção de filmes nanocompósitos e síntese de nanopartículas de prata.

### 3.4.3. Potencial de Acidificação do RCF-AgNP

Para o Potencial de Acidificação (PA), a Figura 4.5 mostra que a etapa de produção de celulose, em ambos os cenários, contribui novamente mais nesta categoria, devido ao uso de reagentes, água destilada e eletricidade, como na etapa de congelamento durante a produção de nanocompósitos. No C1 o PA total é de 1,897 kg SO<sub>2</sub> eq., sendo 62,8% correspondente à etapa de produção da celulose. No C2, o PA total reduz para 1,280 kg SO<sub>2</sub> eq., dos quais 53,3% estão associados à etapa de produção de celulose.

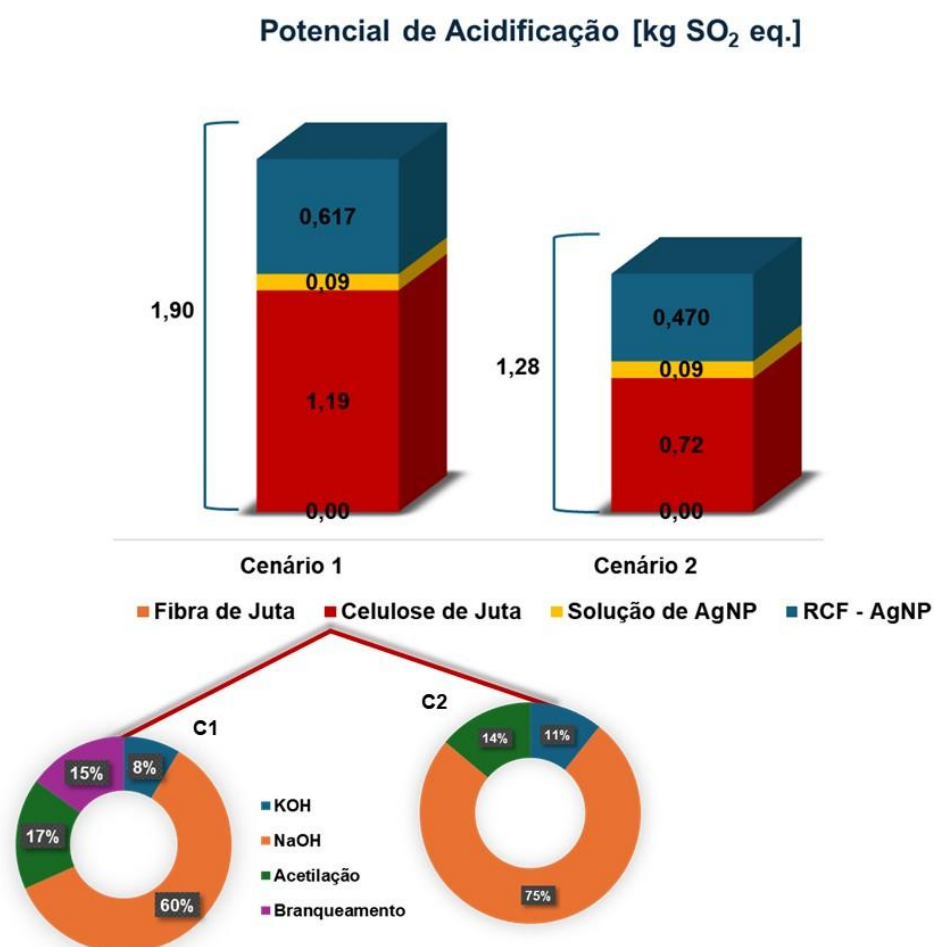


Figura 3.5 – Impacto do potencial de acidificação do RCF – AgNP em ambos os cenários.

A produção do nanocompósito (RCF–AgNP) também apresenta contribuição relevante, correspondendo a 32,5% no C1 e 36,7% no C2. A solução de AgNP contribui com cerca de 4,6% no C1 e 7,0% no C2, enquanto a produção da fibra de juta não apresenta contribuição direta nessa categoria.

Em termos do impacto total da categoria, a mudança do C1 para o C2 resulta em uma redução global de aproximadamente 32,5% no PA. Essa redução está diretamente relacionada à eliminação da etapa de branqueamento no C2 e, principalmente, ao maior rendimento do processo, que reduz a massa total de material submetida às etapas de tratamento químico, lavagem e aquecimento. O subprocesso de tratamento com NaOH, responsável pela remoção parcial de lignina e pela modificação da estrutura da fibra, permanece como um dos principais contribuintes na etapa de celulose, em concordância com o que é reportado por Katakojwala et al. (2020) [203], que apresentam valores entre 0,53 e 0,94 kg SO<sub>2</sub> eq. para extração de celulose microcristalina, faixa compatível com os valores observados neste estudo.

Assim como observado por Gupta et al. (2023) [204] e evidenciado nas demais categorias avaliadas, o impacto nessa categoria está fortemente associado ao uso de eletricidade e de energia de processo nas diversas etapas (tratamentos alcalinos, tratamento ácido, lavagens e congelamento) da produção do nanocompósito. Embora reagentes químicos como NaOH, NaClO<sub>2</sub> e ácido acético contribuam para o impacto, a quantidade total de material processado e a energia empregada nas etapas operacionais mostram-se fatores mais determinantes para o potencial de acidificação.

Tanto para os impactos PA quanto para os PE foram reduzidos os valores de impacto. Um dos fatores, em concordância com a literatura, indica que essas categorias respondem fortemente a rotas que envolvem branqueamentos oxidativos, neutralizações e grande volume de efluentes, sendo sensíveis ao consumo de reagentes inorgânicos e ácidos [206]. Assim, a presença do branqueamento com clorito de sódio no C1 tende a elevar PA e PE, enquanto sua eliminação no C2, aliada ao maior rendimento do processo, reduz essas cargas ambientais proporcionalmente.

#### **3.4.4. Demanda de Energia do RCF-AgNP**

Em relação à demanda de energia, os valores da Figura 4.6 mostram a redução 32,8% do C1 para C2. A etapa de obtenção da celulose de juta é a mais intensiva energeticamente em ambos os cenários, correspondendo a 66,8% do C1 e 62,2% do C2. Essa predominância está diretamente associada aos subprocessos de tratamento alcalino com NaOH e tratamento ácido, que utilizam banho-maria e demandam longos tempos de reação e de aquecimento, sendo os principais responsáveis pelo consumo energético na etapa de celulose. Apesar do

tratamento ácido ser conduzido a 80 °C no C2, o consumo energético total foi menor. Isso ocorre porque o maior rendimento do processo (84,6% contra 64,7%) reduziu a massa de material necessária para produzir 1 kg de filme.

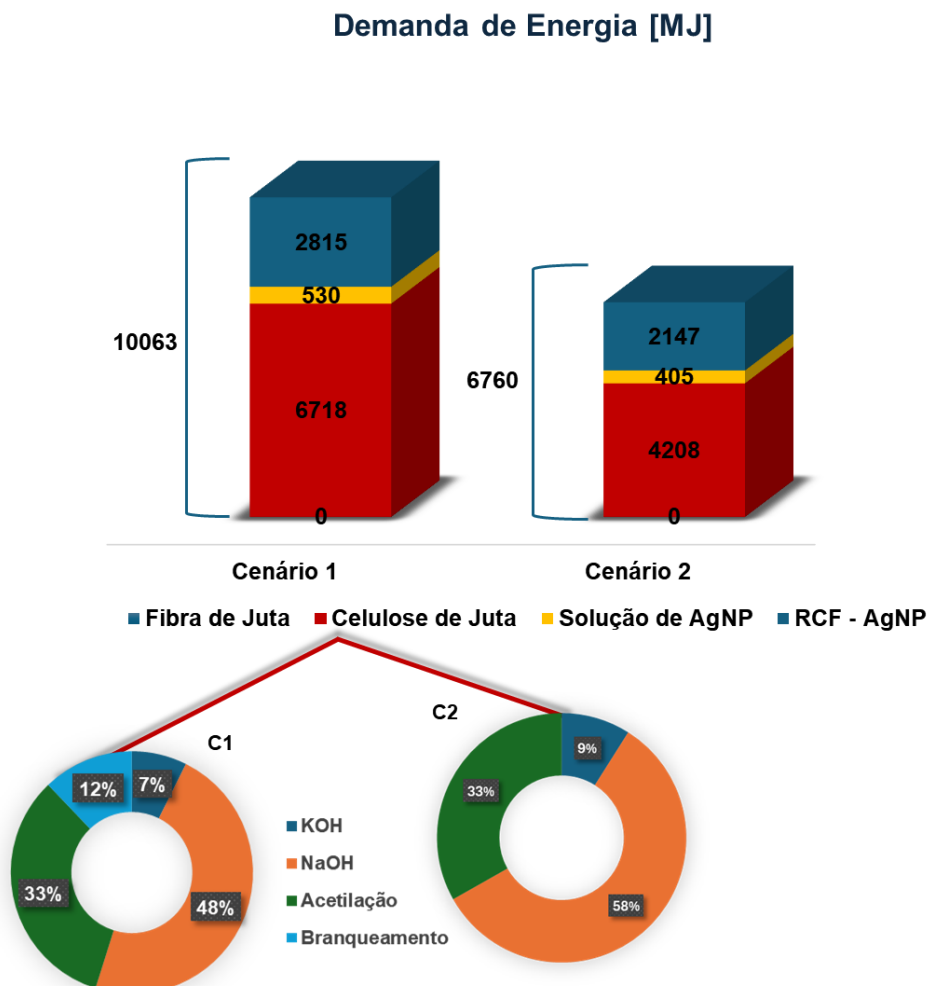


Figura 3.6 – Demanda de energia do RCF – AgNP para ambos os cenários.

O processo de produção do RCF–AgNP aparece como a segunda etapa mais intensiva em energia, consumindo 28% no C1 e 31,7% no C2. Nessa etapa, o congelamento da solução de celulose para posterior dissolução do filme é o principal fator responsável por essa demanda energética, devido ao elevado consumo de energia elétrica do sistema de refrigeração. A etapa de síntese da solução de AgNPs representa uma contribuição menor, porém relevante, correspondente a 5,3% no C1 e 6,0% no C2. Já o cultivo da juta não apresenta consumo de energia, pois é realizado manualmente, sem o uso de equipamentos.

De acordo com Figueirêdo et al. (2012) [205] e Gupta et al. (2023) [204] a produção e distribuição de eletricidade são os principais contribuintes para os impactos ambientais relacionados às mudanças climáticas e à eutrofização em processos de produção de derivados de celulose, como os examinados neste estudo, incluindo a extração de celulose,

a produção de filmes nanocompósitos e a síntese de nanopartículas de prata. Ambos os cenários são consistentes com as demandas de energia relatadas por Leão et al. (2017) [192], que obtiveram nanocristais de celulose com necessidades energéticas variando de 756 a  $1,14 \times 10^5$  MJ/kg.

Esse comportamento está alinhado com o que é descrito na literatura de ACV aplicada a materiais celulósicos, como em Arvidsson et al. (2015) [206] que mostraram que a etapa de purificação/extração da celulose é tipicamente a mais intensiva em energia e que melhorias de rendimento têm impacto mais significativo sobre o consumo energético do que mudanças moderadas nas condições operacionais.

A eletricidade é responsável pela maioria dos impactos em todas as categorias estudadas. O consumo de eletricidade é um ponto crítico ambiental no ciclo de vida do nanocompósito RCF–AgNP. O uso de fontes de energias renováveis no local durante a produção de RCF–AgNP pode ser uma estratégia eficaz para reduzir esses impactos. A ampliação do processo, de escala laboratorial para piloto, também pode ser uma opção para diminuição do consumo energético, como visto em Gupta et al. (2023) [204], com diferença de mais

As descobertas do processo em escala de laboratório ajudam a identificar as limitações de cada etapa sob uma perspectiva ambiental. Uma limitação da análise comparativa deste estudo é a ausência de ACVs em filmes de celulose regenerada, além da potencial variação nas matérias-primas, dependendo dos métodos de dissolução de celulose utilizados. Estudos futuros também poderiam ampliar o escopo da ACV para abranger uma análise mais abrangente do ciclo de vida de filmes condutores de nanocompósitos de celulose regenerada. Isso envolveria a consideração de fases adicionais, como a fase de uso e os cenários de fim de vida, para obter uma compreensão holística do desempenho ambiental.

#### **3.4.5. Influência da Adição de CMC ou Sorbitol nos Impactos Ambientais do RCF–AgNP**

Os valores de impacto ambiental adotados para CMC e sorbitol nesta análise foram selecionados com base em referências que apresentam resultados consistentes com a média observada na literatura. Os trabalhos de Gboe et al. (2025) [196], para CMC, e Akmalina et al. (2019) [193], para sorbitol, foram escolhidos por reportarem dados completos e metodologicamente compatíveis com o escopo desta pesquisa, além de apresentarem valores numéricos coerentes com outros estudos de ACV aplicados a derivados de celulose e poliálcoois.

A Figura 4.7 mostra o gráfico dos valores de potencial de aquecimento global para a inserção de 15% e 20% em massa de CMC ou de sorbitol.

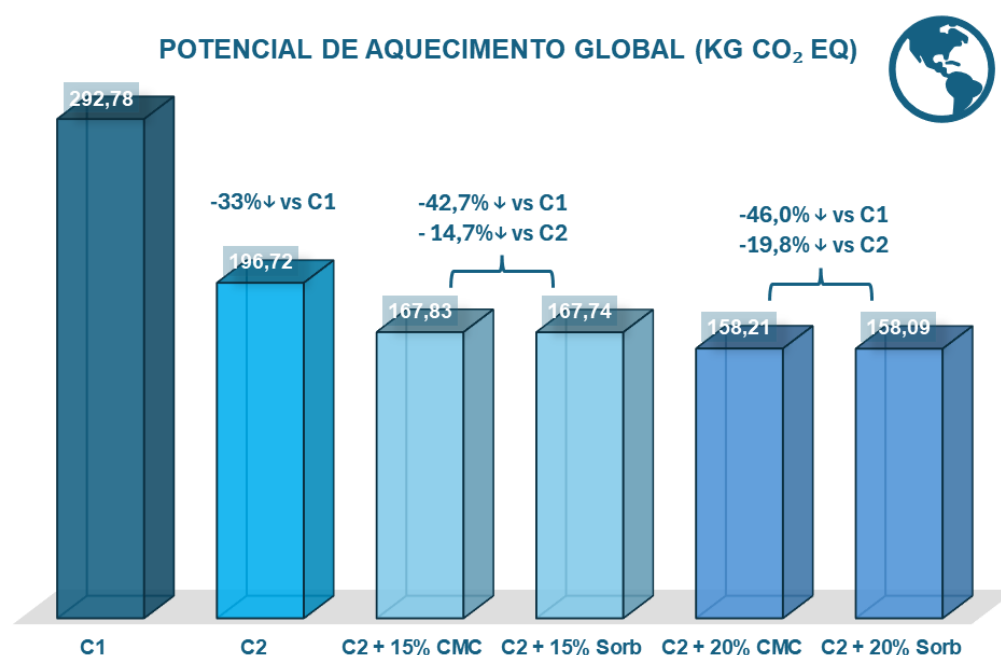


Figura 3.7 – Potencial de aquecimento global com inserção de CMC ou sorbitol.

A consolidação dos resultados para a unidade funcional de 1 kg de filme permite observar, de forma integrada, o efeito combinado da mudança na rota de obtenção da celulose e da incorporação de aditivos de baixo impacto específico na redução dos impactos ambientais do RCF–AgNP. Inicialmente, a transição do C1 para C2 já promove reduções da ordem de 32–33% em todas as categorias avaliadas. Esse resultado está diretamente associado ao maior rendimento do processo (64,7% → 84,6%) e à eliminação da etapa de branqueamento, o que reduz a massa total de material processada para produzir a mesma quantidade de filme.

Quando se considera ainda a incorporação de 15% e 20% em massa de aditivos como CMC ou sorbitol, utilizando valores da literatura para seus impactos ambientais específicos, observa-se uma redução adicional proporcional à fração substituída. Em relação ao C2, a adição de 15% de aditivo reduz aproximadamente 14–15% adicionais no PAG, PA e PE, enquanto 20% de aditivo promove reduções próximas de 19–20%. Numericamente, o PAG do C2 cai de 196,72 para cerca de 167,8 kg CO<sub>2</sub> eq/kg (15% de aditivo) e para ≈158,2 kg CO<sub>2</sub> eq/kg (20% de aditivo). Comportamento análogo é observado para PA e PE, sendo que o CMC apresenta desempenho ligeiramente superior na redução do PE, devido ao seu valor específico inferior ao do sorbitol relatado na literatura. Para o C2 com 15% de CMC, o PA cai para aproximadamente 1,090 kg SO<sub>2</sub> eq e o PE para 0,119 kg PO<sub>4</sub> eq, enquanto, com 20% de CMC, os valores reduzem para cerca de 1,027 kg SO<sub>2</sub> eq e 0,112 kg PO<sub>4</sub> eq, o que representa reduções adicionais próximas de 15–20% em relação ao C2. Tendência semelhante é observada com o sorbitol, embora a diminuição no PE seja ligeiramente menor

(0,121 e 0,115 kg PO<sub>4</sub> eq para 15% e 20%, respectivamente), devido ao maior PE específico desse aditivo reportado na literatura.

O efeito combinado é expressivo quando se compara o pior cenário C1 ao melhor cenário C2 + 20% de aditivo. Nesse caso, o GWP do filme reduz-se de 292,78 para cerca de 158 kg CO<sub>2</sub> eq/kg, o que corresponde a uma redução total de cerca de 46% no impacto ambiental do material. Tendência semelhante é observada para AP e EP, confirmando que a estratégia conjunta de otimização da rota de produção da celulose e formulação do filme com aditivo de baixo impacto atua de forma sinérgica na mitigação ambiental do sistema. Esses resultados evidenciam que, além do ganho ambiental obtido pela otimização da rota de produção da celulose, a formulação do filme com aditivos de baixo impacto específico constitui uma estratégia adicional eficaz para a mitigação ambiental do material, reforçando a premissa, amplamente discutida na literatura de ACV aplicada a sistemas celulósicos, de que a eficiência de conversão do material e a escolha adequada de insumos são fatores determinantes para a redução simultânea de impactos.

#### **3.4.6. Prospecção de Melhoria dos Impactos Ambientais dos Nanocompósitos**

Apesar dos avanços na utilização de fibras lignocelulósicas, para a produção de celulose regenerada, ainda existem oportunidades significativas para a redução adicional dos impactos ambientais. A melhoria do desempenho ambiental dos processos de produção de nanocompósitos de celulose regenerada pode ocorrer por meio da substituição ou otimização de etapas, especialmente na obtenção da celulose a partir de biomassa lignocelulósica. Nesse contexto, os tratamentos biológicos têm se destacado como alternativas promissoras aos métodos convencionais, especialmente por operarem em condições mais brandas e com menor uso de reagentes agressivos. Esses tratamentos utilizam enzimas, como celulasas e ligninases, para promover a degradação seletiva da estrutura da biomassa, aumentando a acessibilidade da celulose e reduzindo a necessidade de etapas químicas intensivas [207]. Além disso, tais abordagens contribuem para reduzir o consumo energético e a geração de efluentes tóxicos, sendo consideradas estratégias alinhadas aos princípios sustentáveis.

No âmbito dos tratamentos químicos, há crescente interesse no uso de reagentes menos tóxicos, como o bicarbonato de sódio, em substituição parcial a bases fortes ou agentes altamente alcalinos. Embora métodos alcalinos tradicionais sejam eficientes na remoção de lignina e hemicelulose, frequentemente apresentam elevado impacto ambiental devido ao consumo de reagentes e à geração de resíduos. Assim, abordagens mais suaves, combinadas com pré-tratamentos físicos ou biológicos, podem reduzir a severidade do processo, mantendo níveis adequados de eficiência e diminuindo os impactos ambientais globais. A literatura recente reforça que a escolha do método de pré-tratamento é um dos

principais fatores que influenciam tanto a eficiência quanto o impacto ambiental de processos envolvendo biomassa lignocelulósica [208].

Outra estratégia importante consiste na integração de processos e na reutilização de insumos, com destaque para o reaproveitamento de solventes e a recuperação de frações residuais. A intensificação de processos e o conceito de biorrefinaria visam maximizar o aproveitamento da biomassa e minimizar perdas, promovendo um sistema mais eficiente e sustentável [209]. Em sistemas de dissolução baseados em soluções alcalinas, como NaOH/ureia, a literatura destaca a viabilidade de recuperação e reutilização dos solventes, o que contribui para a redução de custos operacionais e impactos ambientais. Adicionalmente, o reaproveitamento de frações celulósicas remanescentes, quando tecnicamente viável, favorece o aproveitamento integral da biomassa, reduzindo perdas de material e aumentando a eficiência global do processo [201].

A recuperação de fibras curtas, provenientes das etapas de extração e de processamento, também constitui uma estratégia importante no conceito de biorrefinaria. Essas frações podem ser reincorporadas ao processo ou direcionadas a outras aplicações, dependendo de suas propriedades físico-químicas, como o grau de polimerização e a pureza. Tal abordagem está alinhada com a maximização do uso da biomassa e a redução do desperdício, princípios fundamentais da produção sustentável de materiais lignocelulósicos.

Em sistemas de dissolução da celulose regenerada, sistemas alternativos, como solventes eutéticos profundos (DES) e soluções aquosas modificadas, vêm sendo investigados como opções mais sustentáveis. Esses sistemas apresentam vantagens, como menor toxicidade, menor custo e maior potencial de biodegradabilidade, embora ainda existam desafios relacionados à eficiência de dissolução e à estabilidade ao longo dos ciclos de reutilização [5]. A literatura aponta que não existe um solvente ideal universalmente, sendo a escolha dependente de um equilíbrio entre eficiência, custo e impacto ambiental.

Na síntese de nanopartículas de prata (AgNP) é tradicionalmente realizada por métodos químicos que utilizam agentes redutores fortes, como o borohidreto de sódio ( $\text{NaBH}_4$ ), e estabilizantes sintéticos. Embora esses métodos sejam eficientes e permitam controle sobre o tamanho e a morfologia das partículas, eles frequentemente envolvem o uso de reagentes tóxicos, geração de subprodutos indesejáveis e elevado consumo de insumos químicos. Nesse contexto, o desenvolvimento de rotas mais sustentáveis para a obtenção de coloides de AgNP tem se tornado um tema central na literatura recente [210].

Uma das abordagens mais promissoras é a chamada síntese verde (green synthesis), que utiliza extratos de plantas, microrganismos ou biomoléculas como agentes redutores e estabilizantes. Essa abordagem elimina a necessidade de reagentes tóxicos e reduz significativamente o impacto ambiental do processo [210], [211].

Além de reduzir a toxicidade, a síntese verde apresenta vantagens operacionais, como condições de reação mais brandas (temperatura e pressão ambiente), menor consumo de energia e simplicidade de execução. No entanto, um dos desafios associados a essa abordagem é o controle limitado sobre o tamanho, a distribuição e a morfologia das nanopartículas, uma vez que a composição química dos extratos naturais pode variar significativamente [211].

Além das rotas biológicas, métodos físicos também têm sido investigados como alternativas mais limpas, incluindo processos baseados em radiação, ultrassom e plasma. Esses métodos permitem reduzir íons metálicos sem a necessidade de agentes químicos adicionais, o que pode reduzir a geração de resíduos e simplificar o processo. Entretanto, tais abordagens frequentemente apresentam limitações relacionadas ao custo energético e à escalabilidade industrial, sendo mais adequadas para aplicações específicas ou em escala laboratorial [210].

Dessa forma, a melhoria do impacto ambiental na produção de nanocompósitos não está associada a uma única tecnologia, mas sim a uma combinação de estratégias complementares, incluindo a substituição parcial de reagentes agressivos por alternativas mais brandas; o uso de tratamentos biológicos para reduzir a severidade do processo; a recuperação e a reutilização de solventes e insumos; a valorização de resíduos lignocelulósicos; e a avaliação sistemática por meio de ACV.

Essa abordagem integrada é um método de melhorias implementadas no nível de processo que resultem em benefícios ambientais globais, evitando a transferência de impactos entre diferentes etapas do ciclo de vida do material, o que pode contribuir para melhoria dos valores de impactos obtidos nesse estudo.

### **3.5. CONCLUSÃO DO CAPÍTULO IV**

Embora a celulose seja um recurso renovável e amplamente associada a conceitos de sustentabilidade, os elevados insumos energéticos e a intensa utilização de reagentes químicos em determinadas rotas de obtenção e purificação justificam uma análise crítica baseada em ACV. Nesse sentido, a ACV mostrou-se uma ferramenta essencial para compreender o desempenho ambiental da produção de nanocompósitos RCF-AgNP, permitindo identificar, de forma quantitativa, os processos e subprocessos que mais contribuem para as categorias de impacto e para a demanda energética do sistema.

O C2 obteve menor impacto ambiental, sendo o potencial de aquecimento global de 196,72 CO<sub>2</sub> eq/kg. Adicionalmente, quando se considera a incorporação em massa de CMC ou sorbitol, observa-se redução adicional proporcional à fração substituída. A transição de C1 para o C2 resultou em reduções consistentes de aproximadamente 32,6% em PA, 33,3% em

PE, 32,8% em PAG e 32,8% na demanda energética. A comparação entre os dois cenários de produção de celulose evidenciou a importância da otimização do processo produtivo. Esses resultados indicam que a melhoria não se restringiu à etapa de obtenção da celulose, mas também refletiu uma maior eficiência do sistema produtivo, uma vez que menos material precisou ser processado para atingir a mesma unidade funcional. A eliminação do branqueamento com clorito de sódio e ácido acético, aliada ao maior rendimento do processo e à possibilidade de recuperação de hemicelulose no C2, foi determinante para a redução da carga química, resíduos e do consumo energético global. Além disso, a incorporação de aditivos pode reduzir ainda mais os impactos ambientais associados ao filme nanocompósito, além de melhorar as propriedades elétricas, como visto no Capítulo III.

A eletricidade foi identificada como o principal fator de impacto ambiental em todas as categorias avaliadas. Assim, a adoção de fontes de energia renováveis surge como uma estratégia complementar fundamental para ampliar ainda mais os ganhos ambientais observados. De forma integrada, os resultados deste capítulo fornecem subsídios técnicos relevantes para orientar decisões de projeto e de processo, contribuindo para a melhoria da sustentabilidade ambiental na produção de filmes condutores de nanocompósitos de celulose regenerada destinados a aplicações em dispositivos eletrônicos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] C. Alves *et al.*, “Ecodesign of automotive components making use of natural jute fiber composites,” *J. Clean. Prod.*, vol. 18, no. 4, pp. 313–327, Mar. 2010, doi: 10.1016/j.jclepro.2009.10.022.
- [2] S. Wang, A. Lu, and L. Zhang, “Recent advances in regenerated cellulose materials,” *Prog. Polym. Sci.*, vol. 53, pp. 169–206, 2016, doi: 10.1016/j.progpolymsci.2015.07.003.
- [3] A. L. Leao, ; Roger Rowell, and N. Tavares, “Applications of Natural Fibers in Automotive Industry in Brazil — Thermoforming Process,” *Science and Technology of Polymers and Advanced Materials*, pp. 755–761, 1998, doi: doi:10.1007/978-1-4899-0112-5\_66.
- [4] S. Van Vlierberghe, P. Dubruel, and E. Schacht, “Biopolymer-based hydrogels as scaffolds for tissue engineering applications: A review,” May 09, 2011. doi: 10.1021/bm200083n.
- [5] X. Liu *et al.*, “Conductive Regenerated Cellulose Film and Its Electronic Devices – A Review,” *Carbohydr. Polym.*, vol. 250, pp. 1–16, 2020, doi: 10.1016/j.carbpol.2020.116969.
- [6] S. Mun, L. Zhai, S. K. Min, Y. Yun, and J. Kim, “Flexible and transparent strain sensor made with silver nanowire-coated cellulose,” *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 27, no. 8, pp. 1011–1018, 2016, doi: 10.1177/1045389X15577651.

- [7] R. da S. Oliveira, M. A. Bizeto, and F. F. Camilo, "Production of self-supported conductive films based on cellulose, polyaniline and silver nanoparticles," *Carbohydr. Polym.*, vol. 199, pp. 84–91, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.carbpol.2018.06.049.
- [8] U. H. Erdoğan, Y. Seki, G. Aydoğdu, B. Kutlu, and A. Akşit, "Effect of Different Surface Treatments on the Properties of Jute," *Journal of Natural Fibers*, vol. 13, no. 2, pp. 158–171, 2016, doi: 10.1080/15440478.2014.1002149.
- [9] L. F. de M. S. Kataoka, R. M. Leão, A. B. Gontijo, M. del P. H. Falla, and S. M. Luz, "Regenerated cellulose films from jute fibers applied in conductive nanocomposites," *Mater. Today Commun.*, vol. 33, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.mtcomm.2022.104645.
- [10] T. W. Lee and Y. G. Jeong, "Regenerated cellulose/multiwalled carbon nanotube composite films with efficient electric heating performance," *Carbohydr. Polym.*, vol. 133, pp. 456–463, 2015, doi: 10.1016/j.carbpol.2015.06.053.
- [11] J. Chen, J. Xu, K. Wang, X. Qian, and R. Sun, "Highly Thermostable, Flexible, and Conductive Films Prepared from Cellulose, Graphite, and Polypyrrole Nanoparticles," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 7, no. 28, pp. 15641–15648, 2015, doi: 10.1021/acsami.5b04462.
- [12] X. Ma *et al.*, "Cellulose transparent conductive film and its feasible use in perovskite solar cells," *RSC Adv.*, vol. 9, no. 17, pp. 9348–9353, 2019, doi: 10.1039/C9RA01301F.
- [13] S. Shankar, A. A. Oun, and J. W. Rhim, "Preparation of antimicrobial hybrid nanomaterials using regenerated cellulose and metallic nanoparticles," *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 107, no. PartA, pp. 17–27, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2017.08.129.
- [14] J. Tian, D. Peng, X. Wu, W. Li, H. Deng, and S. Liu, "Electrodeposition of Ag nanoparticles on conductive polyaniline/cellulose aerogels with increased synergistic effect for energy storage," *Carbohydr. Polym.*, vol. 156, pp. 19–25, 2017, doi: 10.1016/j.carbpol.2016.09.005.
- [15] T. Budtova and P. Navard, "Cellulose in NaOH–water based solvents: a review," *Cellulose*, vol. 23, no. 1, pp. 5–55, 2016, doi: 10.1007/s10570-015-0779-8.
- [16] W. Callister and D. Rethwisch, *Materials science and engineering: an introduction. Materials Science and Engineering*, 7th ed., vol. 94. New York: John Wiley & Son, 2007.
- [17] N. P. Cheremisinoff, *Advanced Polymer Processing Operations*, 1st ed. New Jersey: Noyes Publications, 1998.
- [18] J. Pang, X. Liu, X. Zhang, Y. Wu, and R. Sun, "Fabrication of cellulose film with enhanced mechanical properties in ionic liquid 1-allyl-3-methylimidazolium chloride (AmimCl)," *Materials*, vol. 6, no. 4, pp. 1270–1284, 2013, doi: 10.3390/ma6041270.

- [19] S. M. Choi, S. S. Han, and E. J. Shin, "Highly Stretchable Conductive Nanocomposite Films Using Regenerated Cellulose Nanoparticles," *ACS Appl. Polym. Mater.*, vol. 2, no. 11, pp. 4387–4398, Nov. 2020, doi: 10.1021/acsapm.0c00294.
- [20] E. A. B. Neto, "Desenvolvimento de nanobiocompósitos contendo nanopartículas de prata para aplicações bactericidas," Universidade de São Paulo, 2010.
- [21] L. Manzato, M. L. Takeno, W. A. G. Pessoa-Junior, L. A. M. Mariuba, and J. Simonsen, "Optimization of Cellulose Extraction from Jute Fiber by Box-behnken Design," *Fibers and Polymers*, vol. 19, no. 2, pp. 289–296, 2018, doi: 10.1007/s12221-018-1123-8.
- [22] L. F. de M. S. Kataoka, M. D. P. Hidalgo Falla, and S. M. Da Luz, "The Influence of Potassium Hydroxide Concentration and Reaction Time on the Extraction Cellulosic Jute Fibers," *Journal of Natural Fibers*, pp. 1–13, 2021, doi: 10.1080/15440478.2021.1934934.
- [23] M. R. Yates and C. Y. Barlow, "Life cycle assessments of biodegradable, commercial biopolymers - A critical review," 2013, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.resconrec.2013.06.010.
- [24] P. G. Ponnusamy and S. Mani, "Life cycle assessment of manufacturing cellulose nanofibril-reinforced chitosan composite films for packaging applications," *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 27, no. 3, pp. 380–394, Mar. 2022, doi: 10.1007/s11367-022-02035-y.
- [25] G. Z. B. dos Santos, L. R. Caldas, J. de A. Melo Filho, N. B. R. Monteiro, S. I. M. Rafael, and N. Marques da Silva, "Circular alternatives in the construction industry: An environmental performance assessment of sisal fiber-reinforced composites," *Journal of Building Engineering*, vol. 54, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.jobbe.2022.104603.
- [26] A. S. Gross and J. W. Chu, "On the molecular origins of biomass recalcitrance: The interaction network and solvation structures of cellulose microfibrils," *Journal of Physical Chemistry B*, vol. 114, no. 42, pp. 13333–13341, Oct. 2010, doi: 10.1021/jp106452m.
- [27] S. Li *et al.*, "Preparation and Characterization of Cellulose-Based Nanofiltration Membranes by Interfacial Polymerization with Piperazine and Trimesoyl Chloride," *ACS Sustain. Chem. Eng.*, 2018, doi: 10.1021/acssuschemeng.8b02720.
- [28] X. Ma *et al.*, "Cellulose transparent conductive film and its feasible use in perovskite solar cells," *RSC Adv.*, vol. 9, no. 17, pp. 9348–9353, 2019, doi: 10.1039/C9RA01301F.
- [29] H. D. Huang, C. Y. Liu, L. Q. Zhang, G. J. Zhong, and Z. M. Li, "Simultaneous reinforcement and toughening of carbon nanotube/cellulose conductive nanocomposite films by interfacial hydrogen bonding," *ACS Sustain. Chem. Eng.*, vol. 3, no. 2, pp. 317–324, 2015, doi: 10.1021/sc500681v.
- [30] Z. Guo *et al.*, "Silver nanowires/cellulose flexible transparent conductive films for electromagnetic interference shielding and electrothermal conversion," *Physical*

- Chemistry Chemical Physics*, vol. 26, no. 5, pp. 4524–4532, 2024, doi: 10.1039/D3CP05506J.
- [31] X. Wang *et al.*, “Assembly of silver nanowires and PEDOT:PSS with hydrocellulose toward highly flexible, transparent and conductivity-stable conductors,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 392, p. 123644, 2020, doi: 10.1016/j.cej.2019.123644.
- [32] Z. Zeng, T. Wu, D. Han, Q. Ren, G. Siqueira, and G. Nyström, “Ultralight, Flexible, and Biomimetic Nanocellulose/Silver Nanowire Aerogels for Electromagnetic Interference Shielding,” *ACS Nano*, vol. 14, no. 3, pp. 2927–2938, Mar. 2020, doi: 10.1021/acsnano.9b07452.
- [33] J. Li *et al.*, “Conductive regenerated cellulose film as counter electrode for efficient dye-sensitized solar cells,” *Cellulose*, vol. 25, no. 9, pp. 5113–5122, 2018, doi: 10.1007/s10570-018-1913-1.
- [34] D. Zhao *et al.*, “High Performance, Flexible, Solid-State Supercapacitors Based on a Renewable and Biodegradable Mesoporous Cellulose Membrane,” *Adv. Energy Mater.*, vol. 7, no. 18, 2017, doi: 10.1002/aenm.201700739.
- [35] C. P. Lee *et al.*, “A paper-based electrode using a graphene dot/PEDOT:PSS composite for flexible solar cells,” *Nano Energy*, vol. 36, pp. 260–267, Jun. 2017, doi: 10.1016/j.nanoen.2017.04.044.
- [36] J. H. Kim, S. Yun, H. U. Ko, and J. Kim, “A flexible paper transistor made with aligned single-walled carbon nanotube bonded cellulose composite,” *Current Applied Physics*, vol. 13, no. 5, pp. 897–901, 2013, doi: 10.1016/j.cap.2013.01.036.
- [37] K. M. Suresha, S. Y. Yang, M. H. Lee, J. H. Kim, and J. Kim, “Actuator, sensor and MEMS devices based on regenerated cellulose,” *Compos. Interfaces*, vol. 15, no. 7, pp. 679–685, 2008, doi: 10.1163/156855408786778393.
- [38] W. Zhang *et al.*, “Fabrication of surface embedded silver cellulose-based flexible transparent electrodes by self-assembly,” *Bioresources*, vol. 19, no. 1, pp. 1571–1589, Jan. 2024, doi: 10.15376/biores.19.1.1571-1589.
- [39] S. Liu, T. Yu, Y. Wu, W. Li, and B. Li, “Evolution of cellulose into flexible conductive green electronics: A smart strategy to fabricate sustainable electrodes for supercapacitors,” *RSC Adv.*, vol. 4, no. 64, pp. 34134–34143, 2014, doi: 10.1039/c4ra07017h.
- [40] J. Nayak, S. K. Mahadeva, and J. Kim, “Characteristics of flexible electrode made on cellulose by soluble polypyrrole coating,” *Proc. Inst. Mech. Eng. C J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 226, no. 11, pp. 2605–2609, 2012, doi: 10.1177/0954406212439965.
- [41] D. Stauffer and A. Aharony, *Introduction To Percolation Theory*. Taylor & Francis, 2018. doi: 10.1201/9781315274386.

- [42] I. BALBERG, D. AZULAY, D. TOKER, and O. MILLO, "PERCOLATION AND TUNNELING IN COMPOSITE MATERIALS," *Int. J. Mod. Phys. B*, vol. 18, no. 15, pp. 2091–2121, Jun. 2004, doi: 10.1142/S0217979204025336.
- [43] J. Wu *et al.*, "In situ synthesis of silver-nanoparticles/bacterial cellulose composites for slow-released antimicrobial wound dressing," *Carbohydr. Polym.*, vol. 102, pp. 762–771, Feb. 2014, doi: 10.1016/j.carbpol.2013.10.093.
- [44] S. N. Mott, *Conduction in Non-Crystalline Materials*. Oxford University Press Oxford, 1993. doi: 10.1093/oso/9780198539797.001.0001.
- [45] Q. Xue and J. Sun, "Electrical Conductivity and Percolation Behavior of Polymer Nanocomposites," in *Polymer Nanocomposites*, Cham: Springer International Publishing, 2016, pp. 51–82. doi: 10.1007/978-3-319-28238-1\_3.
- [46] P. Sheng, "Fluctuation-induced tunneling conduction in disordered materials," *Phys. Rev. B*, vol. 21, no. 6, pp. 2180–2195, Mar. 1980, doi: 10.1103/PhysRevB.21.2180.
- [47] J. T. Orasugh, L. T. Temane, and S. S. Ray, "Nanocellulose-based conductive composites: A review of systems for electromagnetic interference shielding applications," *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 277, p. 133891, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2024.133891.
- [48] M. E. Morales Rodriguez and P. L. Fuhr, "Printed Conductive Transparent Films for the Fabrication of Sensors by Aerosol Inkjet Systems," *International Research Journal of Engineering and Technology*, vol. 6, no. 12, 2019, [Online]. Available: [www.irjet.net](http://www.irjet.net)
- [49] M. Ismail and R. Jabra, "Investigation the parameters affecting on the synthesis of silver nanoparticles by chemical reduction method and printing a conductive pattern.," *J. Mater. Environ. Sci*, vol. 8, no. 11, pp. 4152–4159, 2017.
- [50] H. Yin, T. Yamamoto, Y. Wada, and S. Yanagida, "Large-scale and size-controlled synthesis of silver nanoparticles under microwave irradiation," *Mater. Chem. Phys.*, vol. 83, no. 1, pp. 66–70, Jan. 2004, doi: 10.1016/j.matchemphys.2003.09.006.
- [51] D. P. M. Ballottin, "Caracterização de nanopartículas de prata e sua aplicação na produção de tecidos antimicrobianos," Universidade Estadual de Campinas, 2014.
- [52] L. Sun, Z. Zhang, and H. Dang, "A novel method for preparation of silver nanoparticles," *Mater. Lett.*, vol. 57, no. 24, pp. 3874–3879, 2003, doi: 10.1016/S0167-577X(03)00232-5.
- [53] R. Patakfalvi, Z. Virányi, and I. Dékány, "Kinetics of silver nanoparticle growth in aqueous polymer solutions," *Colloid Polym. Sci.*, vol. 283, no. 3, pp. 299–305, 2004, doi: 10.1007/s00396-004-1138-8.
- [54] M. L. Gulrajani, D. Gupta, S. Periyasamy, and S. G. Muthu, "Preparation and application of silver nanoparticles on silk for imparting antimicrobial properties," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 108, no. 1, pp. 614–62, 2008, doi: 10.1002/app.27584.

- [55] M. V. D. Garcia, “Síntese ,caracterização e estabilização de nanopartículas de prata para aplicações bactericidas em têxteis,” Universidade Estadual de Campinas, 2011.
- [56] D. D. Evanoff and G. Chumanov, “Size-controlled synthesis of nanoparticles. 1. ‘silver-only’ aqueous suspensions via hydrogen reduction,” *Journal of Physical Chemistry B*, vol. 108, no. 37, pp. 13948–13956, 2004, doi: 10.1021/jp047565s.
- [57] S. Guzmán, M.G., Dille, J., Godet, “Synthesis of silver nanoparticles by chemical reduction method and their antibacterial activity,” *International Journal of Chemical and Biomolecular Engineering*, vol. 11, no. 9, pp. 714–721, 2009.
- [58] D. L. Van Hyning, W. G. Klemperer, and C. F. Zukoski, “Characterization of colloidal stability during precipitation reactions,” *Langmuir*, vol. 17, no. 11, pp. 3120–3127, 2001, doi: 10.1021/la000855p.
- [59] S. D. Solomon, M. Bahadory, A. V. Jeyarajasingam, S. A. Rutkowsky, C. Boritz, and L. Mulfinger, “Synthesis and study of silver nanoparticles,” *J. Chem. Educ.*, vol. 84, no. 2, pp. 322–325, 2007, doi: 10.1021/ed084p322.
- [60] K. C. Song, S. M. Lee, T. S. Park, and B. S. Lee, “Preparation of colloidal silver nanoparticles by chemical reduction method,” *Korean J. Chem. Eng.*, vol. 26, no. 1, pp. 153–155, 2009.
- [61] R. J. Gibbs, *Silver Colloids - Do They Work?*, 1st ed., vol. 1. R. Gibbs, 1999.
- [62] M. Alves Melo Jr, L. Samuel Soares Santos, and M. do Carmo Gonçalves Ana Flávia Nogueira, “Preparação de nanopartículas de prata e ouro: um método simples para a introdução da nanociência em laboratório de ensino,” *Quim. Nova*, vol. 35, no. 9, pp. 1872–1878, 2012.
- [63] M. H. Pourrafsanjani, R. Taghavi, A. Hasanzadeh, and S. Rostamnia, “Green stabilization of silver nanoparticles over the surface of biocompatible Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@CMC for bactericidal applications,” *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 277, p. 134227, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2024.134227.
- [64] M. Fernandes *et al.*, “Polysaccharides and Metal Nanoparticles for Functional Textiles: A Review,” *Nanomaterials*, vol. 12, no. 6, p. 1006, Mar. 2022, doi: 10.3390/nano12061006.
- [65] W. Xiong, C. Ren, J. Li, and B. Li, “Characterization and interfacial rheological properties of nanoparticles prepared by heat treatment of ovalbumin-carboxymethylcellulose complexes,” *Food Hydrocoll.*, vol. 82, pp. 355–362, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.foodhyd.2018.03.048.
- [66] Z. S. Pillai and P. V. Kamat, “What factors control the size and shape of silver nanoparticles in the citrate ion reduction method?,” *Journal of Physical Chemistry B*, vol. 108, no. 3, pp. 945–951, 2004, doi: 10.1021/jp037018r.

- [67] J. J. Mock, M. Barbic, D. R. Smith, D. A. Schultz, and S. Schultz, "Shape effects in plasmon resonance of individual colloidal silver nanoparticles," *Journal of Chemical Physics*, vol. 116, no. 15, pp. 6755–6759, 2002, doi: 10.1063/1.1462610.
- [68] N. Leopold and B. Lendl, "A new method for fast preparation of highly surface-enhanced raman scattering (SERS) active silver colloids at room temperature by reduction of silver nitrate with hydroxylamine hydrochloride," *Journal of Physical Chemistry B*, vol. 107, no. 24, pp. 5723–5727, 2003, doi: 10.1021/jp027460u.
- [69] D. W. Brandl, N. A. Mirin, and P. Nordlander, "Plasmon modes of nanosphere trimers and quadrumers," *Journal of Physical Chemistry B*, vol. 110, no. 25, pp. 12302–12310, 2006, doi: 10.1021/jp0613485.
- [70] Q. Y. Chen, S. L. Xiao, S. Q. Shi, and L. P. Cai, "A one-pot synthesis and characterization of antibacterial silver nanoparticle-cellulose film," *Polymers (Basel)*, vol. 12, no. 2, Feb. 2020, doi: 10.3390/polym12020440.
- [71] L. Meza, D. Shukla, H. Sadeghifar, L. Hsiao, Y. Zhu, and R. A. Venditti, "Sustainable Soft Electronics with Biodegradable Regenerated Cellulose Films and Printed Recyclable Silver Nanowires," *Adv. Sustain. Syst.*, vol. 9, no. 2, Feb. 2025, doi: 10.1002/adsu.202400713.
- [72] F. M. Vanin, P. J. A. Sobral, F. C. Menegalli, R. A. Carvalho, and A. M. Q. B. Habitante, "Effects of plasticizers and their concentrations on thermal and functional properties of gelatin-based films," *Food Hydrocoll.*, vol. 19, no. 5, pp. 899–907, 2005, doi: 10.1016/j.foodhyd.2004.12.003.
- [73] P. Cazón, M. Vázquez, and G. Velazquez, "Composite films of regenerate cellulose with chitosan and polyvinyl alcohol: Evaluation of water adsorption, mechanical and optical properties," *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 117, pp. 235–246, 2018, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2018.05.148.
- [74] S. Wang *et al.*, "Choline chloride/urea as an effective plasticizer for production of cellulose films," *Carbohydr. Polym.*, vol. 117, pp. 133–139, Mar. 2015, doi: 10.1016/j.carbpol.2014.08.113.
- [75] C. Xiao, Z. Zhang, J. Zhang, Y. Lu, and L. Zhang, "Properties of Regenerated Cellulose Films Plasticized with-Monoglycerides," *J Appl Polym Sci*, vol. 89, pp. 3500–3505, 2003.
- [76] S. Mali, L. S. Sakanaka, F. Yamashita, and M. V. E. Grossmann, "Water sorption and mechanical properties of cassava starch films and their relation to plasticizing effect," *Carbohydr. Polym.*, vol. 60, no. 3, pp. 283–289, May 2005, doi: 10.1016/j.carbpol.2005.01.003.
- [77] T. H. Mchught and J. M. Krochta', "Sorbitol-vs Glycerol-Plasticized Whey Protein Edible Films: Integrated Oxygen Permeability and Tensile Property Evaluation," *American Chemical Society*, vol. 42, no. 4, 1994.

- [78] O. E. Pérez, C. C. Sánchez, A. M. R. Pilosof, and J. M. Rodríguez Patino, "Dynamics of adsorption of hydroxypropyl methylcellulose at the air-water interface," *Food Hydrocoll.*, vol. 22, no. 3, pp. 387–402, May 2008, doi: 10.1016/j.foodhyd.2006.12.005.
- [79] A. Beatriz, Y. J. K. Araújo, and D. Pires De Lima, "Glicerol: Um breve histórico e aplicação em sínteses estereoseletivas," *Quim. Nova*, vol. 34, no. 2, pp. 306–319, 2011.
- [80] J. C. Caraschi and S. P. C. Filho, "Influência do Grau de Substituição e da Distribuição de Substituintes Sobre as Propriedades de Equilíbrio de Carboximetilcelulose em Solução Aquosa," *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, vol. 9, no. 2, pp. 70–77, 1999.
- [81] P. L. R. Cunha, R. C. M. de Paula, and J. P. A. Feitosa, "Polissacarídeos da biodiversidade brasileira: uma oportunidade de transformar conhecimento em valor econômico," *Quim. Nova*, vol. 32, no. 3, pp. 649–660, 2009.
- [82] J. Fujimoto, E. Alexandre, O. Reis, D. F. S. Petri, and S. P. C. Filho, "Formação de multicamadas de polissacarídeos e proteína," *Quim. Nova*, vol. 25, no. 5, pp. 757–761, 2002.
- [83] K. M. Tavares, A. de Campos, B. R. Luchesi, A. A. Resende, J. E. de Oliveira, and J. M. Marconcini, "Effect of carboxymethyl cellulose concentration on mechanical and water vapor barrier properties of corn starch films," *Carbohydr. Polym.*, vol. 246, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.carbpol.2020.116521.
- [84] J. Fernández-Santos, C. Valls, O. Cusola, and M. B. Roncero, "Improving Filmogenic and Barrier Properties of Nanocellulose Films by Addition of Biodegradable Plasticizers," *ACS Sustain. Chem. Eng.*, vol. 9, no. 29, pp. 9647–9660, Jul. 2021, doi: 10.1021/acssuschemeng.0c09109.
- [85] J. A. Sirviö, M. Visanko, J. Ukkola, and H. Liimatainen, "Effect of plasticizers on the mechanical and thermomechanical properties of cellulose-based biocomposite films," *Ind. Crops Prod.*, vol. 122, pp. 513–521, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.indcrop.2018.06.039.
- [86] S. Esteghlal, M. Niakousari, and S. M. H. Hosseini, "Physical and mechanical properties of gelatin-CMC composite films under the influence of electrostatic interactions," *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 114, pp. 1–9, Jul. 2018, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2018.03.079.
- [87] P. Worajittiphon *et al.*, "Carboxymethyl cellulose/poly(vinyl alcohol) blended films reinforced by buckypapers of carbon nanotubes and 2D material (MoS<sub>2</sub>): Enhancing mechanical strength, toughness, and barrier properties," *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 242, p. 124726, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2023.124726.
- [88] M. G. A. Vieira, M. A. da Silva, L. O. dos Santos, and M. M. Beppu, "Natural-based plasticizers and biopolymer films: A review," *Eur. Polym. J.*, vol. 47, no. 3, pp. 254–263, Mar. 2011, doi: 10.1016/j.eurpolymj.2010.12.011.

- [89] R. Sothornvit and J. M. Krochta, "Plasticizers in edible films and coatings," in *Innovations in Food Packaging*, Elsevier, 2005, pp. 403–433. doi: 10.1016/B978-012311632-1/50055-3.
- [90] R. A. Festucci-Buselli, W. C. Otoni, and C. P. Joshi, "Structure, organization, and functions of cellulose synthase complexes in higher plants," *Brazilian Journal of Plant Physiology*, vol. 19, pp. 1–13, 2007, doi: 10.1590/s1677-04202007000100001.
- [91] A. N. Frone, D. M. Panaitescu, and D. Donescu, "Some aspects concerning the isolation of cellulose micro- and nano-fibers," *UPB Scientific Bulletin, Series B: Chemistry and Materials Science*, vol. 73, no. 2, pp. 133–152, 2011.
- [92] G. Mondragon *et al.*, "A common strategy to extracting cellulose nanoentities from different plants," *Ind. Crops Prod.*, vol. 55, pp. 140–148, 2014, doi: 10.1016/j.indcrop.2014.02.014.
- [93] N. C. Pan, A. Day, and K. K. Mahalanabis, "Chemical composition of jute and its estimation," *Man-Made Textiles in India*, vol. 42(11), pp. 467 – 473, 1999.
- [94] E. Abraham *et al.*, "Extraction of nanocellulose fibrils from lignocellulosic fibres: A novel approach," *Carbohydr. Polym.*, vol. 86, no. 4, pp. 1468–1475, 2011, doi: 10.1016/j.carbpol.2011.06.034.
- [95] V. Alvarez, E. Rodriguez, and A. Vázquez, "Thermal degradation and decomposition of jute/vinylester composites," *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 85, no. 2, pp. 383–389, 2006, doi: 10.1007/s10973-005-7102-0.
- [96] L. Y. Mwaikambo and M. P. Ansell, "Chemical Modification of Hemp, Sisal, Jute, and Kapok Fibers by Alkalization," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 84, pp. 2222–2234, 2002.
- [97] K. G. Satyanarayana, J. L. Guimarães, and F. Wypych, "Studies on lignocellulosic fibers of Brazil. Part I: Source, production, morphology, properties and applications," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 38, no. 7, pp. 1694–1709, Jul. 2007, doi: 10.1016/j.compositesa.2007.02.006.
- [98] L. F. Valadares, "Biobased fibers and materials in Brazil," *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, vol. 1, no. 1, p. 16, Dec. 2014, doi: 10.1186/s40538-014-0016-y.
- [99] J. Cruces Cerro, "Aplicação de nanoceluloses em fibras não branqueadas para obtenção de papéis.," Universidade de São Paulo, 2016.
- [100] M. L. O. D'Almeida, "Composição química dos materiais lignocelulósicos.," in *Celulose e Papel - Tecnologia de fabricação da pasta celulósica.*, 2nd ed., São Paulo: IPT/SENAI, 1988, ch. 3, p. 1777.
- [101] L. Carlos and H. Alves, "Cellulose solutions: Dissolution, regeneration, solution structure and molecular interactions," Universidade de Coimbra , 2015.

- [102] H. M. M. Duarte, “Desenvolvimento e caracterização de solventes aquosos para a dissolução de celulose: reologia e comportamento de fase,” Universidade do Algarve, 2014.
- [103] D. Klemm, B. Philipp, T. Heinze, U. Heinze, and W. Wagenknecht, *Comprehensive Cellulose Chemistry*, vol. 1. Wiley VCH, 1998.
- [104] E. E. Souza, “Síntese e caracterização de membranas de celulose regenerada a partir da celulose extraída do bagaço de cana-de-açúcar para produção de cupro- fane,” Universidade Federal de Uberlândia, 2009.
- [105] R. G. P. Viera, G. R. Filho, R. M. N. de Assunção, C. da Carla, J. G. Vieira, and G. S. de Oliveira, “Synthesis and characterization of methylcellulose from sugar cane bagasse cellulose,” *Carbohydr. Polym.*, vol. 67, no. 2, pp. 182–189, 2007, doi: 10.1016/j.carbpol.2006.05.007.
- [106] Y. Wang, “Cellulose Fiber Dissolution in Sodium Hydroxide Solution at Low Temperature: Dissolution Kinetics and Solubility Improvement,” Georgia Institute of Technology, 2008.
- [107] T. Heinze and A. Koschella, “Solvents Applied in the Field of Cellulose Chemistry - A Mini Review,” *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, vol. 15, no. 2, pp. 84–90, 2005.
- [108] H. Sobue, H. Kiessig, and K. Hess, “The cellulose-sodium hydroxide- water system as a function of the temperature,” *Z. Physik. Chem*, vol. 43, pp. 309–328, 1939.
- [109] F. Porro, O. Bédué, H. Chanzy, and L. Heux, “Solid-state <sup>13</sup>C NMR study of Na-cellulose complexes,” *Biomacromolecules*, vol. 8, no. 8, pp. 2586–2593, Aug. 2007, doi: 10.1021/bm0702657.
- [110] M. Inamoto, I. Miyamoto, T. Hongo, M. Iwata, and K. Okajima, “Morphological formation of the regenerated cellulose membranes recovered from its cuprammonium solution using various coagulants,” *Polym. J.*, vol. 28, no. 6, pp. 507–512, 1996, doi: 10.1295/polymj.28.507.
- [111] T. C. Shen and I. Cabasso, *Macromolecular solutions, solvent-property relationship in polymers*. New York: Seymour Gase, 1982.
- [112] R. Gavillon and T. Budtova, “Kinetics of cellulose regeneration from cellulose-NaOH-water gels and comparison with cellulose-n-methylmorpholine-N-oxide-water solutions,” *Biomacromolecules*, vol. 8, no. 2, pp. 424–432, 2007, doi: 10.1021/bm060376q.
- [113] J. Zikulnig, A. Roshanghias, L. Rauter, and C. Hirschl, “Evaluation of the sheet resistance of inkjet-printed ag-layers on flexible, uncoated paper substrates using van-der-pauw’s method,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 20, no. 8, Apr. 2020, doi: 10.3390/s20082398.

- [114] R. Bollström, F. Pettersson, P. Dolietis, J. Preston, R. Österbacka, and M. Toivakka, "Impact of humidity on functionality of on-paper printed electronics," *Nanotechnology*, vol. 25, no. 9, Mar. 2014, doi: 10.1088/0957-4484/25/9/094003.
- [115] A. Pammo *et al.*, "Nanocellulose films as substrates for printed electronics," in *International Conference on Manipulation, Automation and Robotics at Small Scales (MARSS)*, Helsing, 2019, pp. 1–6.
- [116] L. J. van der Pauw, "A method of measuring specific resistivity and Hall effect of discs of arbitrary shapes," *Philips Research Report*, vol. 13, pp. 1–9, 1958.
- [117] D. K. Schroder, *Semiconductor Material and Device Characterization*, 3rd ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005. doi: 10.1002/0471749095.
- [118] T. F. Guo, G. He, S. Pyo, and Y. Yang, "Investigation of the interfacial properties of laminated polymer diodes," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 80, no. 21, pp. 4042–4044, May 2002, doi: 10.1063/1.1481542.
- [119] L. P. da Silva, "Preparação e caracterização de híbridos de celulose do bagaço de cana-de-açúcar e óxido de alumínio hidratado para aplicação em membranas.," Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.
- [120] A. Khan, M. B. K. Niazi, S. R. Naqvi, and W. Farooq, "Influence of Plasticizers on Mechanical and Thermal Properties of Methyl Cellulose-Based Edible Films," *J. Polym. Environ.*, vol. 26, no. 1, pp. 291–300, Jan. 2018, doi: 10.1007/s10924-017-0953-1.
- [121] P. G. de Melo, M. Fornazier Borges, J. Afonso Ferreira, M. Vicente Barbosa Silva, and R. Ruggiero, "Bio-based cellulose acetate films reinforced with lignin and glycerol," *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 19, no. 4, Apr. 2018, doi: 10.3390/ijms19041143.
- [122] J. Wu *et al.*, "Facile preparation of collagen fiber–glycerol-carboxymethyl cellulose composite film by immersing method," *Carbohydr. Polym.*, vol. 229, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.carbpol.2019.115429.
- [123] A. A. Shimazu, S. Mali, M. Victória, and E. Grossmann, "Efeitos plastificante e antiplastificante do glicerol e do sorbitol em filmes biodegradáveis de amido de mandioca Plasticizing and antiplasticizing effects of glycerol and sorbitol on biodegradable cassava starch films," *Semin. Cienc. Agrar.*, vol. 28, no. 1, pp. 79–88, 2007.
- [124] D. Lourdin, H. Bizot, and P. Colonna, "“Anti-plasticization” in Starch-Glycerol Films?," John Wiley & Sons, Inc, 1997.
- [125] A. Pourfarzad, Z. Ahmadian, M. B. Habibi-Najafi, and A. Pourfarzad, "Interactions between polyols and wheat biopolymers in a bread model system fortified with inulin: A Fourier transform infrared study," *Heliyon*, vol. 4, p. e01017, 2018, doi: 10.1016/j.heliyon.2018.

- [126] J. F. Su, Z. Huang, X. Y. Yuan, X. Y. Wang, and M. Li, "Structure and properties of carboxymethyl cellulose/soy protein isolate blend edible films crosslinked by Maillard reactions," *Carbohydr. Polym.*, vol. 79, no. 1, pp. 145–153, Jan. 2010, doi: 10.1016/j.carbpol.2009.07.035.
- [127] M. I. H. Mondal, M. S. Yeasmin, and M. S. Rahman, "Preparation of food grade carboxymethyl cellulose from corn husk agrowaste," *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 79, pp. 144–150, Aug. 2015, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2015.04.061.
- [128] K. M. Tavares, A. de Campos, B. R. Luchesi, A. A. Resende, J. E. de Oliveira, and J. M. Marconcini, "Effect of carboxymethyl cellulose concentration on mechanical and water vapor barrier properties of corn starch films," *Carbohydr. Polym.*, vol. 246, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.carbpol.2020.116521.
- [129] D. Kansy, K. Bosowska, K. Czaja, and A. Poliwoda, "The formation of glycerol oligomers with two new types of end groups in the presence of a homogeneous alkaline catalyst," *Polymers (Basel)*, vol. 11, no. 1, Jan. 2019, doi: 10.3390/polym11010144.
- [130] J. K. Wassei and R. B. Kaner, "Graphene, a promising transparent conductor," *Materials Today*, vol. 13, no. 3, pp. 52–59, Mar. 2010, doi: 10.1016/S1369-7021(10)70034-1.
- [131] H. Kaco, S. Zakaria, C. H. Chia, and L. Zhang, "Transparent and printable regenerated kenaf cellulose/PVA film," *Bioresources*, vol. 9, no. 2, pp. 2167–2178, 2014, doi: 10.15376/biores.9.2.2167-2178.
- [132] D. Rahmadiawan *et al.*, "The Enhanced Moisture Absorption and Tensile Strength of PVA/Uncaria gambir Extract by Boric Acid as a Highly Moisture-Resistant, Anti-UV, and Strong Film for Food Packaging Applications," *Journal of Composites Science*, vol. 6, no. 11, Nov. 2022, doi: 10.3390/jcs6110337.
- [133] X. He, Q. Liu, Y. Zhou, Z. Chen, C. Zhu, and W. Jin, "Graphene oxide-silver/cotton fiber fabric with anti-bacterial and anti-UV properties for wearable gas sensors," *Front. Mater. Sci.*, vol. 15, no. 3, pp. 406–415, Sep. 2021, doi: 10.1007/s11706-021-0564-6.
- [134] R. Guo *et al.*, "Photochromic nanocellulose composite films with excellent anti-UV capacity," *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process.*, vol. 126, no. 10, Oct. 2020, doi: 10.1007/s00339-020-03988-3.
- [135] C. Chang, A. Lue, and L. Zhang, "Effects of crosslinking methods on structure and properties of cellulose/PVA hydrogels," *Macromol. Chem. Phys.*, 2008, doi: 10.1002/macp.200800161.
- [136] D. A. Skoog, F. J. Holler, and T. A. Nieman, "Principios de Analisis Intrumental," 2001.
- [137] R. Villalobos, J. Chanona, P. Hernández, G. Gutiérrez, and A. Chiralt, "Gloss and transparency of hydroxypropyl methylcellulose films containing surfactants as affected by their microstructure," *Food Hydrocoll.*, vol. 19, no. 1, pp. 53–61, Jan. 2005, doi: 10.1016/j.foodhyd.2004.04.014.

- [138] M. Almazrouei, I. Adeyemi, and I. Janajreh, "Thermogravimetric assessment of the thermal degradation during combustion of crude and pure glycerol," *Biomass Convers. Biorefin.*, vol. 12, no. 10, pp. 4403–4417, Oct. 2022, doi: 10.1007/s13399-022-02526-w.
- [139] W. T. A. Silva, "Espumas de poliestireno impregnadas com nanopartículas de prata para a redução catalítica de p-nitrofenol em água," Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande - PB, 2021.
- [140] F. de S. Costa, "Desenvolvimento de nanocompósitos de poli(3-hidroxitirato-co-3-hidroxitirato) com nanopartículas de prata," Universidade Federal de São Paulo, São José dos Campos, 2016.
- [141] G. Cheng, P. Zhu, J. Li, F. Cheng, Y. Lin, and M. Zhou, "All-cellulose films with excellent strength and toughness via a facile approach of dissolution–regeneration," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 136, no. 2, Jan. 2019, doi: 10.1002/app.46925.
- [142] L. Prudêncio, F. F. Camilo, and R. Faez, "Líquidos iônicos como plastificantes em blendas de borracha nitrílica/polianilina," *Quim. Nova*, vol. 37, no. 4, pp. 618–623, 2014, doi: 10.5935/0100-4042.20140103.
- [143] A. C. Atkinson, "Methods for experimental design, Jacques L. Goupy, Elsevier, Amsterdam, 1993, ISBN 0-444-89529-9, 465 pp., 325 fl," *J. Chemom.*, 1994, doi: 10.1002/cem.1180080408.
- [144] D. A. Gopakumar *et al.*, "Cellulose Nanofiber-Based Polyaniline Flexible Papers as Sustainable Microwave Absorbers in the X-Band," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 10, no. 23, pp. 20032–20043, Jun. 2018, doi: 10.1021/acsami.8b04549.
- [145] Z. Zhang *et al.*, "Highly Sensitive Flexible Humidity Sensor Based on Bacterial Cellulose/MXene/Graphene Oxide Composite Film," *ACS Appl. Electron. Mater.*, vol. 7, no. 21, pp. 9946–9954, Nov. 2025, doi: 10.1021/acsaelm.5c01819.
- [146] J. Zhu, H. Wen, H. Zhang, P. Huang, L. Liu, and H. Hu, "Recent advances in biodegradable electronics- from fundament to the next-generation multi-functional, medical and environmental device," *Sustainable Materials and Technologies*, vol. 35, p. e00530, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.susmat.2022.e00530.
- [147] M. Irimia-Vladu, "'Green' electronics: biodegradable and biocompatible materials and devices for sustainable future," *Chem. Soc. Rev.*, vol. 43, no. 2, pp. 588–610, 2014, doi: 10.1039/C3CS60235D.
- [148] R. E. Barros Neto, B. Scarmino, I. S., & Bruns, *Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na indústria*. 2010.
- [149] B. BARROS NETO, I. S. Scarminio, and R. E. Bruns, "Planejamento e otimização de experimentos," *Ed. da UNICAMP*, 2. ed., 1996.

- [150] N. Maruthi, M. Faisal, and N. Raghavendra, "Conducting polymer based composites as efficient EMI shielding materials: A comprehensive review and future prospects," *Synth. Met.*, vol. 272, p. 116664, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.synthmet.2020.116664.
- [151] X. Jiang *et al.*, "A low-temperature stretchable XNBR film containing Li-TFSI doped PEDOT:PSS for electromagnetic interference shielding," *Chemical Engineering Journal*, vol. 489, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.cej.2024.151252.
- [152] M. Burton and K. C. Kurien, "Effects of solute concentration in radiolysis of water," *Journal of Physical Chemistry*, vol. 63, no. 6, pp. 899–904, 1959, doi: 10.1021/j150576a031.
- [153] Z. Zhang and H. Zheng, "Optimization for decolorization of azo dye acid green 20 by ultrasound and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> using response surface methodology," *J. Hazard. Mater.*, vol. 172, no. 2–3, pp. 1388–1393, 2009, doi: 10.1016/j.jhazmat.2009.07.146.
- [154] B. Gurukarthik Babu, D. Princewinston, V. C. Padmanaban, G. A. Lathief Sherief, M. Kiruba Sankar, and P. V. Aravind Bhaskar, "Optimization Studies on Improving the Dielectric Properties of Alkali Treated Fibers from Phaseolus Vulgaris Reinforced Polyester Composites by Central Composite Design," *Journal of Natural Fibers*, vol. 00, no. 00, pp. 1–11, 2019, doi: 10.1080/15440478.2019.1697985.
- [155] M. A. Rauf, N. Marzouki, and B. K. Körbahti, "Photolytic decolorization of Rose Bengal by UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and data optimization using response surface method," *J. Hazard. Mater.*, vol. 159, no. 2–3, pp. 602–609, 2008, doi: 10.1016/j.jhazmat.2008.02.098.
- [156] B. K. Körbahti, N. Aktaş, and A. Tanyolaç, "Optimization of electrochemical treatment of industrial paint wastewater with response surface methodology," *J. Hazard. Mater.*, vol. 148, no. 1–2, pp. 83–90, 2007, doi: 10.1016/j.jhazmat.2007.02.005.
- [157] J. S. Park, T. Kim, and W. S. Kim, "Conductive Cellulose Composites with Low Percolation Threshold for 3D Printed Electronics," *Sci. Rep.*, vol. 7, no. 1, p. 3246, Jun. 2017, doi: 10.1038/s41598-017-03365-w.
- [158] D. D. L. Chung, "Carbon materials for structural self-sensing, electromagnetic shielding and thermal interfacing," *Carbon N. Y.*, vol. 50, no. 9, pp. 3342–3353, Aug. 2012, doi: 10.1016/j.carbon.2012.01.031.
- [159] D. Li *et al.*, "Polymer-based composites for electromagnetic interference shielding: principles, fabrication, and applications," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 194, p. 108927, Jul. 2025, doi: 10.1016/j.compositesa.2025.108927.
- [160] H. Zhao *et al.*, "Electromagnetic Interference Shielding Films: Structure Design and Prospects," May 17, 2025, *John Wiley and Sons Inc.* doi: 10.1002/smt.202401324.
- [161] E. Tamjid, P. Najafi, M. A. Khalili, N. Shokouhnejad, M. Karimi, and N. Sepahdoost, "Review of sustainable, eco-friendly, and conductive polymer nanocomposites for

- electronic and thermal applications: current status and future prospects,” *Discover Nano*, vol. 19, no. 1, p. 29, Feb. 2024, doi: 10.1186/s11671-024-03965-2.
- [162] A. Dufresne, “Nanocellulose Processing Properties and Potential Applications,” *Current Forestry Reports*, vol. 5, no. 2, pp. 76–89, Jun. 2019, doi: 10.1007/s40725-019-00088-1.
- [163] D. Klemm *et al.*, “Nanocellulose as a natural source for groundbreaking applications in materials science: Today’s state,” *Materials Today*, vol. 21, no. 7, pp. 720–748, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.mattod.2018.02.001.
- [164] L. Han *et al.*, “Self-Healable Conductive Nanocellulose Nanocomposites for Biocompatible Electronic Skin Sensor Systems,” *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 11, no. 47, pp. 44642–44651, Nov. 2019, doi: 10.1021/acsami.9b17030.
- [165] L. Chen *et al.*, “Nanocellulose-based functional materials for advanced energy and sensor applications,” *Nano Res.*, vol. 15, no. 8, pp. 7432–7452, Aug. 2022, doi: 10.1007/s12274-022-4374-7.
- [166] H.-L. Nguyen *et al.*, “Mussel-Inspired Anisotropic Nanocellulose and Silver Nanoparticle Composite with Improved Mechanical Properties, Electrical Conductivity and Antibacterial Activity,” *Polymers (Basel)*, vol. 8, no. 3, p. 102, Mar. 2016, doi: 10.3390/polym8030102.
- [167] Y. Hua, C. Liu, and Y. Tang, “Conductive and antibacterial films by loading reduced graphene oxide/silver nanoparticles on cellulose nanofiber films,” *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 242, p. 124752, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2023.124752.
- [168] A. Kausar, “Overview on conducting polymer in energy storage and energy conversion system,” *Journal of Macromolecular Science, Part A*, vol. 54, no. 9, pp. 640–653, Sep. 2017, doi: 10.1080/10601325.2017.1317210.
- [169] M. Dong *et al.*, “Transient Starch-Based Nanocomposites for Sustainable Electronics and Multifunctional Sensing,” *Adv. Funct. Mater.*, vol. 35, no. 1, Jan. 2025, doi: 10.1002/adfm.202412138.
- [170] H. H. Hsu and W. Zhong, “Nanocellulose-Based Conductive Membranes for Free-Standing Supercapacitors: A Review,” *Membranes (Basel)*, vol. 9, no. 6, p. 74, Jun. 2019, doi: 10.3390/membranes9060074.
- [171] S. Zhang, C. Hua, B. He, P. Chang, M. Du, and Y. Liu, “High-conductivity, stable Ag/cellulose paper prepared via in situ reduction of fractal-structured silver particles,” *Carbohydr. Polym.*, vol. 262, p. 117923, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.carbpol.2021.117923.
- [172] W. Kh. Mahmood and A. N. Naje, “Fabrication of Room Temperature NO<sub>2</sub> Gas Sensor based on Silver Nanoparticles-Decorated Carbon Nanotubes,” *Journal of Nano- and Electronic Physics*, vol. 10, no. 5, pp. 05020-1-05020-6, 2018, doi: 10.21272/jnep.10(5).05020.

- [173] S. M. M. Morsi and M. E. Abd El-Aziz, "Polymer nanocomposites for gas sensing and solar applications," in *Polymer and Biopolymer Nanocomposites*, Elsevier, 2026, pp. 347–375. doi: 10.1016/B978-0-443-26625-6.00002-4.
- [174] B. Wu, X. Zhang, B. Huang, Y. Zhao, C. Cheng, and H. Chen, "High-Performance Wireless Ammonia Gas Sensors Based on Reduced Graphene Oxide and Nano-Silver Ink Hybrid Material Loaded on a Patch Antenna," *Sensors*, vol. 17, no. 9, p. 2070, Sep. 2017, doi: 10.3390/s17092070.
- [175] Q. Yang, T. Saito, and A. Isogai, "Transparent, flexible, and high-strength regenerated cellulose/saponite nanocomposite films with high gas barrier properties," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 130, no. 5, 2013, doi: 10.1002/app.39564.
- [176] M. M. Langari, M. Nikzad, and J. Labidi, "Nanocellulose-based sensors in medical/clinical applications: The state-of-the-art review," *Carbohydr. Polym.*, vol. 304, p. 120509, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.carbpol.2022.120509.
- [177] L. Chen *et al.*, "Nanocellulose-based functional materials for advanced energy and sensor applications," *Nano Res.*, vol. 15, no. 8, pp. 7432–7452, Aug. 2022, doi: 10.1007/s12274-022-4374-7.
- [178] A. J. Kora, S. Rao Beedu, and A. Jayaraman, "Size-controlled green synthesis of silver nanoparticles mediated by gum ghatti (*Anogeissus latifolia*) and its biological activity," 2012. [Online]. Available: <http://www.orgmedchemlett.com/content/2/1/17>
- [179] Y. M. Mohan, K. M. Raju, K. Sambasivudu, S. Singh, and B. Sreedhar, "Preparation of acacia-stabilized silver nanoparticles: A green approach," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 106, no. 5, pp. 3375–3381, Dec. 2007, doi: 10.1002/app.26979.
- [180] S. H. Sonawane, A. Terrien, A. S. Figueiredo, M. Clara Gonçalves, and M. N. De Pinho, "The role of silver nanoparticles on mixed matrix Ag/cellulose acetate asymmetric membranes," *Polym. Compos.*, vol. 38, no. 1, pp. 32–39, Jan. 2017, doi: 10.1002/pc.23557.
- [181] K Kanaya and S Okayama, "Penetration and energy-loss theory of electrons in solid targets," *J. Phys. D Appl. Phys.*, vol. 5, no. 1, pp. 43–58, Jan. 1972, doi: 10.1088/0022-3727/5/1/308.
- [182] D. Ruan, L. Zhang, Z. Zhang, and X. Xia, "Structure and properties of regenerated cellulose/tourmaline nanocrystal composite films," *J. Polym. Sci. B Polym. Phys.*, vol. 42, no. 3, pp. 367–373, Feb. 2004, doi: 10.1002/polb.10664.
- [183] S. Maciejka, B. Środa, B. Zielińska, S. Roy, A. Bartkowiak, and Ł. Łopusiewicz, "Bioactive Carboxymethyl Cellulose (CMC)-Based Films Modified with Melanin and Silver Nanoparticles (AgNPs)—The Effect of the Degree of CMC Substitution on the In Situ Synthesis of AgNPs and Films' Functional Properties," *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 23, no. 24, p. 15560, Dec. 2022, doi: 10.3390/ijms232415560.

- [184] Y. Zhang, J. Ma, C. Wu, X. Han, W. Zhang, and W. Zhang, "Effects of moisture ingress on the mesoscale mechanical properties of epoxy adhesives under elevated temperature," *Polym. Test.*, vol. 94, p. 107049, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.polymertesting.2020.107049.
- [185] K. Król-Morkisz and K. Pielichowska, "Thermal Decomposition of Polymer Nanocomposites With Functionalized Nanoparticles," in *Polymer Composites with Functionalized Nanoparticles*, Elsevier, 2019, pp. 405–435. doi: 10.1016/B978-0-12-814064-2.00013-5.
- [186] K. P. Menard, *Dynamic Mechanical Analysis*. CRC Press, 2008. doi: 10.1201/9781420053135.
- [187] E. Saarikoski, M. Rissanen, and J. Seppälä, "Effect of rheological properties of dissolved cellulose/microfibrillated cellulose blend suspensions on film forming," *Carbohydr. Polym.*, vol. 119, pp. 62–70, Mar. 2015, doi: 10.1016/j.carbpol.2014.11.033.
- [188] W. P. F. Neto *et al.*, "Preparation and Characterization of Nanocomposites of Carboxymethyl Cellulose Reinforced with Cellulose Nanocrystals," *Macromol. Symp.*, vol. 319, no. 1, pp. 93–98, Sep. 2012, doi: 10.1002/masy.201100194.
- [189] Y. Fan, C. Zhou, and X. Zhu, "Selective catalysis of lactic acid to produce commodity chemicals," 2009. doi: 10.1080/01614940903048513.
- [190] T. A. Hottle, M. M. Bilec, and A. E. Landis, "Biopolymer production and end of life comparisons using life cycle assessment," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 122, pp. 295–306, 2017, doi: 10.1016/j.resconrec.2017.03.002.
- [191] D. Nabi and J. P. Jog, "Natural Fiber Polymer Composites: A Review," *Advances in Polymer Technology*, vol. 18, no. 4, pp. 351–363, 1999.
- [192] R. M. Leão, P. C. Miléo, J. M. L. L. Maia, and S. M. Luz, "Environmental and technical feasibility of cellulose nanocrystal manufacturing from sugarcane bagasse," *Carbohydr. Polym.*, vol. 175, pp. 518–529, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.carbpol.2017.07.087.
- [193] R. Akmalina, "Environmental Impacts Evaluation of Sorbitol Production from Glucose," *Eksergi*, vol. 16, no. 1, p. 7, Jul. 2019, doi: 10.31315/e.v0i0.2695.
- [194] F. Foroughi, E. Rezvani Ghomi, F. Morshedi Dehaghi, R. Borayek, and S. Ramakrishna, "A Review on the Life Cycle Assessment of Cellulose: From Properties to the Potential of Making It a Low Carbon Material," *Materials*, vol. 14, no. 4, p. 714, Feb. 2021, doi: 10.3390/ma14040714.
- [195] J. Suckling *et al.*, "Environmental life cycle assessment of production of the high intensity sweetener steviol glycosides from *Stevia rebaudiana* leaf grown in Europe: The SWEET project," *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 28, no. 3, pp. 221–233, Mar. 2023, doi: 10.1007/s11367-022-02127-9.

- [196] N. A. Gboe, M. Garnevičius, and R. Grubliauskas, "Assessment of Potential Environmental Impact: Synthetic and Natural Binders," *Environmental and Climate Technologies*, vol. 29, no. 1, pp. 300–312, Jan. 2025, doi: 10.2478/rtuct-2025-0021.
- [197] H. Baniasadi *et al.*, "Structure-property correlations and environmental impact assessment of sustainable antibacterial food packaging films reinforced with fungal chitin nanofibrils," *Food Hydrocoll.*, vol. 162, p. 110987, May 2025, doi: 10.1016/j.foodhyd.2024.110987.
- [198] T. De, J. Pinto, F. / Aldenor, and S. Ferreira, "New juta and malva fibers dry processing extraction technique in the State of Amazonas: the rescue of utopia," Inc.Soc.
- [199] M. C. Dias, J. Jackson Bacelar, N. Xavier, and J. Ferdinando Barreto, "Recomendação Técnica para Juta Produção de sementes de juta".
- [200] PricewaterhouseCoopers, "JUTE ECOLABEL: ANNEXURES TO LIFE CYCLE ASSESSMENT STUDY," 2006. [Online]. Available: [www.jute.com/](http://www.jute.com/)
- [201] S. Acharya, Y. Hu, H. Moussa, and N. Abidi, "Preparation and characterization of transparent cellulose films using an improved cellulose dissolution process," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 134, no. 21, pp. 1–12, 2017, doi: 10.1002/app.44871.
- [202] G. Guest, R. M. Bright, F. Cherubini, and A. H. Strømman, "Consistent quantification of climate impacts due to biogenic carbon storage across a range of bio-product systems," *Environ. Impact Assess. Rev.*, vol. 43, pp. 21–30, Nov. 2013, doi: 10.1016/j.eiar.2013.05.002.
- [203] R. Katakojwala and S. V. Mohan, "Microcrystalline cellulose production from sugarcane bagasse: Sustainable process development and life cycle assessment," *J. Clean. Prod.*, vol. 249, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119342.
- [204] Bulbul Gupta, Amita Sharma, S. D. Anjana, Subhasish Dutta, and Saswata Goswami, "Environmental Impact Assessment and Process Upscaling for Sustainable Production of Cellulose Nanofibre, a Biopolymer Derived from Lignocellulosic Biomass," *Sustainable Chemical Engineering*, pp. 47–70, Oct. 2023, doi: 10.37256/sce.5120243625.
- [205] M. C. B. De Figueirêdo, M. De Freitas Rosa, C. M. Lie Ugaya, M. D. S. M. De Souza Filho, A. C. C. Da Silva Braid, and L. F. L. De Melo, "Life cycle assessment of cellulose nanowhiskers," *J. Clean. Prod.*, vol. 35, pp. 130–139, 2012, doi: 10.1016/j.jclepro.2012.05.033.
- [206] R. Arvidsson, D. Nguyen, and M. Svanström, "Life Cycle Assessment of Cellulose Nanofibrils Production by Mechanical Treatment and Two Different Pretreatment Processes," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 49, no. 11, pp. 6881–6890, Jun. 2015, doi: 10.1021/acs.est.5b00888.

- [207] V. Humera Farheen, M. Aslam Abdullah, and I. Ganesh Moorthy, "Lignocellulosic bioethanol production: a review on pretreatment strategies, biofuel separation, and artificial intelligence/machine learning – based sustainable optimization," *Curr. Res. Biotechnol.*, vol. 11, p. 100355, 2026, doi: 10.1016/j.crbiot.2025.100355.
- [208] C. Dias *et al.*, "Green valorization of lignocellulosic residues: advances in pretreatment and fractionation into cellulose and lignin for nanoparticles production," *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, Jan. 2026, doi: 10.1002/jctb.70126.
- [209] A. Woźniak, K. Kuligowski, L. Świerczek, and A. Cenian, "Review of Lignocellulosic Biomass Pretreatment Using Physical, Thermal and Chemical Methods for Higher Yields in Bioethanol Production," *Sustainability*, vol. 17, no. 1, p. 287, Jan. 2025, doi: 10.3390/su17010287.
- [210] S. Iravani, H. Korbekandi, S. V Mirmohammadi, and B. Zolfaghari, "Synthesis of silver nanoparticles: chemical, physical and biological methods.," *Res. Pharm. Sci.*, vol. 9, no. 6, pp. 385–406, 2014.
- [211] S. Ahmed, M. Ahmad, B. L. Swami, and S. Ikram, "A review on plants extract mediated synthesis of silver nanoparticles for antimicrobial applications: A green expertise," *J. Adv. Res.*, vol. 7, no. 1, pp. 17–28, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.jare.2015.02.007.

## APÊNDICE

Neste apêndice, estão elencadas, em 36 figuras, as etapas da modelagem de ACV do RCF-AgNP no software LCA for Experts, versão 10.9, conforme descrito na metodologia.

### Processo de produção da fibra de juta

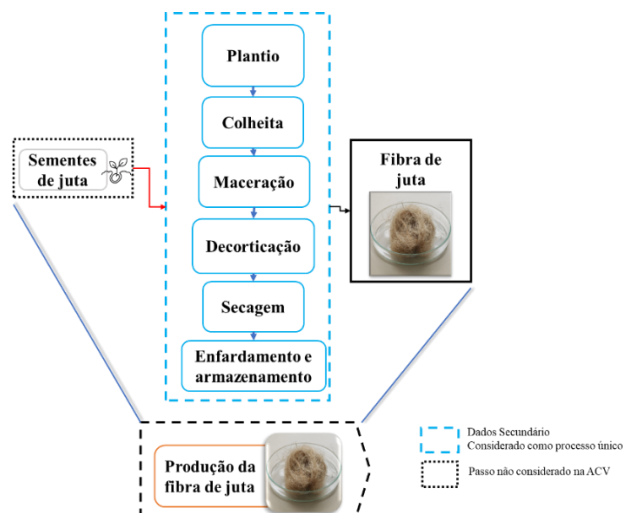


Figura 1 – Fluxograma do processo de produção da fibra de juta.



Figura 2 – Diagrama resumido da produção da fibra de juta modelado no software LCA for Experts.

| Name: <i>Nation</i> Jute Cult |                                     |   |          |         |         |                                   |
|-------------------------------|-------------------------------------|---|----------|---------|---------|-----------------------------------|
| Parameters                    |                                     |   |          |         |         |                                   |
| Parameter                     | Formula                             | / | Value    | Minimum | Maximum | Standard Comment, units, defaults |
| BOB_kg_fiber                  |                                     |   | 0.024    |         | 0 %     | BOB por kg de fibra na maceração  |
| CarbonD_kg_fibe               |                                     |   | 0.018    |         | 0 %     | maceração                         |
| COD_kg_fiber                  |                                     |   | 0.069    |         | 0 %     | maceração                         |
| ha                            |                                     |   | 1E004    |         | 0 %     | 1ha = 10000 m2*yr                 |
| ha_BOB                        | $(BOB\_kg\_fiber) * (ha\_fiber)$    |   | 36       |         |         |                                   |
| ha_CarbonD_emis               | $CarbonD\_kg\_fibe * ha\_fiber$     |   | 27       |         |         |                                   |
| ha_carbondioxid               |                                     |   | 1.11E004 |         | 0 %     | absorbed                          |
| ha_COD                        | $(COD\_kg\_fiber) * (ha\_fiber)$    |   | 104      |         |         |                                   |
| ha_fiber                      |                                     |   | 1.5E003  |         | 0 %     | 1ha=1500kg fibra                  |
| ha_leaf                       |                                     |   | 1.45E003 |         | 0 %     |                                   |
| ha_Methane                    | $(Methane\_kg\_fibe) * (ha\_fiber)$ |   | 27       |         |         |                                   |
| ha_oxygen_emiss               |                                     |   | 8.08E003 |         | 0 %     |                                   |
| ha_phosphate                  | $(phosphate\_kg\_fi) * ha\_fiber$   |   | 9        |         |         |                                   |
| ha_seeds                      |                                     |   | 6        |         | 0 %     | 1ha=6kg of seed                   |
| ha_sitcks                     |                                     |   | 3.5E003  |         | 0 %     |                                   |
| ha_sulphate                   | $(Sulphate\_kg\_fib) * (ha\_fiber)$ |   | 0.6      |         |         |                                   |
| ha_TDS                        | $(TDS\_kg\_fiber) * (ha\_fiber)$    |   | 39       |         |         |                                   |
| ha_TSS                        | $(TSS\_kg\_fiber) * (ha\_fiber)$    |   | 25.5     |         |         |                                   |
| Methane_kg_fibe               |                                     |   | 0.018    |         | 0 %     |                                   |
| phosphate_kg_fi               |                                     |   | 0.006    |         | 0 %     |                                   |
| Sulphate_kg_fib               |                                     |   | 0.0004   |         | 0 %     |                                   |
| TDS_kg_fiber                  |                                     |   | 0.026    |         | 0 %     |                                   |
| TSS_kg_fiber                  |                                     |   | 0.017    |         | 0 %     |                                   |
| Parameter                     |                                     |   |          |         |         |                                   |

Figura 3 – Lista de parâmetros da produção de fibra de juta modelada no software LCA for Experts.

|                 |                                          |            |
|-----------------|------------------------------------------|------------|
| Name            | Nation                                   | Jute Cult  |
| Parameters      |                                          |            |
| Parameter       | Formula                                  | Value      |
| LCA             | VF                                       | LCC: 0 EUR |
| LCWE            |                                          |            |
| Documentation   |                                          |            |
| Completeness    | No statement                             |            |
| Inputs          |                                          |            |
| Parameter       | Flows                                    | Quantities |
| ha_carbondioxid | Carbon dioxide [Renewable reso           | Mass       |
| ha_seeds        | jute seeds [Resources]                   | Mass       |
| ha              | Land occupation [Occupation]             | Mass       |
|                 | Flows                                    |            |
| Amount          | Factor                                   | Units      |
| 1.11E004        | 1                                        | kg         |
| 6               | 1                                        | kg         |
| 1E004           | 1                                        | kg         |
| Outputs         |                                          |            |
| Parameter       | Flows                                    | Quantities |
| ha_fiber        | Jute Fiber [Renewable resource]          | Mass       |
| ha_BOB          | Biological oxygen demand (BOD) [Ana      | Mass       |
| ha_carbonD_emis | Carbon dioxide [Inorganic emissions tr   | Mass       |
| ha_COD          | COD, Chemical Oxygen Demand [ecoi        | Mass       |
| ha_TDS          | Dissolved solids [ecoinvent long-term    | Mass       |
| ha_leaf         | Jute leaf [Production residues in life c | Mass       |
| ha_sitdks       | Jute Sticks [Production residues in life | Mass       |
| ha_Methane      | Methane [Organic emissions to air (gr    | Mass       |
| ha_oxygen_emiss | Oxygen [Inorganic emissions to air]      | Mass       |
| ha_phosphate    | Phosphate [Inorganic emissions to fre    | Mass       |
| ha_TSS          | Solids (suspended) [Particles to fresh   | Mass       |
| ha_sulphate     | Sulphate [Inorganic emissions to air]    | Mass       |
| ha              | Land occupation [Occupation]             | Mass       |
|                 | Flows                                    |            |
| Amount          | Factor                                   | Units      |
| 1.5E003         | 1                                        | kg         |
| 36              | 1                                        | kg         |
| 27              | 1                                        | kg         |
| 104             | 1                                        | kg         |
| 39              | 1                                        | kg         |
| 1.45E003        | 1                                        | kg         |
| 3.5E003         | 1                                        | kg         |
| 27              | 1                                        | kg         |
| 8.08E003        | 1                                        | kg         |
| 9               | 1                                        | kg         |
| 25.5            | 1                                        | kg         |
| 0.6             | 1                                        | kg         |
| 1E004           | 1                                        | kg         |

Figura 4 – Entradas e saídas da produção de fibra de jute inseridas no software LCA for Experts.

### Processo de síntese de AgNP

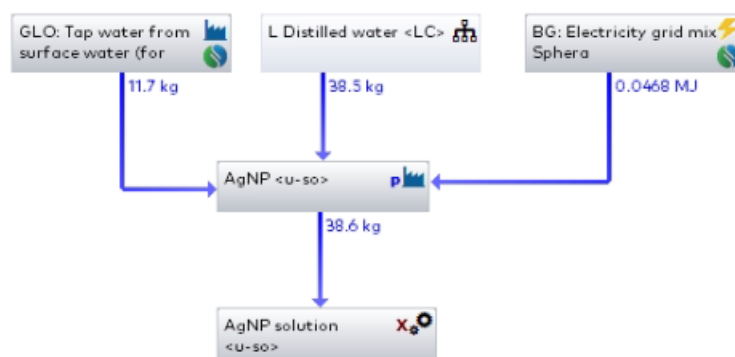


Figura 5 – Diagrama resumido da síntese de AgNP modelado no software LCA for Experts.

Name

Nation

▼

AgNP

Parameters

| Parameter     | Formula                                   | / | Value  | Minimum | Maximum | Standard | Comment, units, defaults |
|---------------|-------------------------------------------|---|--------|---------|---------|----------|--------------------------|
| A_AgNO3       |                                           |   | 0.0147 |         |         | 0 %      |                          |
| A_CMC         |                                           |   | 0.0463 |         |         | 0 %      |                          |
| A_dis_water   |                                           |   | 38.5   |         |         | 0 %      |                          |
| A_electricity |                                           |   | 0.0468 |         |         | 0 %      |                          |
| A_NaBH4       |                                           |   | 0.0197 |         |         | 0 %      |                          |
| A_residue     |                                           |   | 11.7   |         |         | 0 %      |                          |
| A_water       |                                           |   | 11.7   |         |         | 0 %      |                          |
| AgNP_solution | (A_CMC)+(A_AgNO3)+(A_NaBH4)+(A_dis_water) |   | 38.6   |         |         |          |                          |
| Parameter     |                                           |   |        |         |         |          |                          |

LCA

VF

LCC: 0 EUR

LCWE

Documentation

Completeness

No statement

▼

Inputs

| Parameter     | Flows                                | Quantities     | Amount | Factor | Units | Trz | Standard | Origin         | Comment |
|---------------|--------------------------------------|----------------|--------|--------|-------|-----|----------|----------------|---------|
| A_electricity | BR: electricity mix [production n    | Energy (net ca | 0.0468 | 1      | MJ    | X   | 0 %      | (No statement) |         |
| A_dis_water   | Distilled water [Resources]          | Mass           | 38.5   | 1      | kg    | X   | 0 %      | (No statement) |         |
| A_water       | Water (tap water) [Operating m       | Mass           | 11.7   | 1      | kg    | X   | 0 %      | (No statement) |         |
| A_CMC         | Carboxymethylcellulose (Sodium) [Org | Mass           | 0.0463 | 1      | kg    |     | 0 %      | (No statement) |         |
| A_AgNO3       | Silver Nitrate [Resources]           | Mass           | 0.0147 | 1      | kg    |     | 0 %      | (No statement) |         |
| A_NaBH4       | Sodium borohydride [Resources]       | Mass           | 0.0197 | 1      | kg    |     | 0 %      | (No statement) |         |
| Flows         |                                      |                |        |        |       |     |          |                |         |

Outputs

| Parameter     | Flows                                    | Quantities | Amount | Factor | Units | Trz | Standard | Origin         | Comment |
|---------------|------------------------------------------|------------|--------|--------|-------|-----|----------|----------------|---------|
| AgNP_solution | AgNP solution [Resources]                | Mass       | 38.6   | 1      | kg    | X   | 0 %      | (No statement) |         |
| A_residue     | Liquid residue [Production residues in l | Mass       | 11.7   | 1      | kg    | *   | 0 %      | (No statement) |         |
| Flows         |                                          |            |        |        |       |     |          |                |         |

Figura 6 – Lista de parâmetros, entradas e saídas da síntese de AgNP inseridos no software LCA for Experts.

### Processo de produção da água destilada



Figura 7 – Diagrama resumido da produção de água destilada modelado no software LCA for Experts.

Name

Nation

Distilled water

Parameters

| Parameter       | Formula                                | / | Value | Minimum | Maximum | Standard | Comment, units, defaults |
|-----------------|----------------------------------------|---|-------|---------|---------|----------|--------------------------|
| distilled_water |                                        |   | 1     |         |         | 0 %      |                          |
| electricity_d   | (distilled_water)*2.52                 |   | 2.52  |         |         |          |                          |
| tap_water       | (distilled_water)+(distilled_water*10) |   | 11    |         |         |          |                          |
| water_sewage    | (distilled_water)*10                   |   | 10    |         |         |          |                          |

Parameter

LCA

VF

LCC: 0 EUR

LCWE

Documentation

Completeness

No statement

Inputs

| Parameter   | Flows                             | Quantities     | Amount | Factor | Units | Trz | Standard | Origin         | Comment |
|-------------|-----------------------------------|----------------|--------|--------|-------|-----|----------|----------------|---------|
| electricity | BR: electricity mix [production n | Energy (net ca | 6.35   | 2.52   | MJ    | X   | 0 %      | (No statement) |         |
| tap_water   | Water (tap water) [Operating m    | Mass           | 121    | 11     | kg    | X   | 0 %      | (No statement) |         |

Flows

Outputs

| Parameter   | Flows                                  | Quantities | Amount | Factor | Units | Trz | Standard | Origin         | Comment |
|-------------|----------------------------------------|------------|--------|--------|-------|-----|----------|----------------|---------|
| distilled_w | Distilled water [Resources]            | Mass       | 1      | 1      | kg    | X   | 0 %      | (No statement) |         |
| water_sewa  | Wastewater [Production residues in lif | Mass       | 100    | 10     | kg    | *   | 0 %      | (No statement) |         |

Flows

Figura 8 – Lista de parâmetros, entradas e saídas da produção de água destilada inseridos no software LCA for Experts.

### Produção cradle-to-gate do RCF – AgNPs pelo Cenário 1

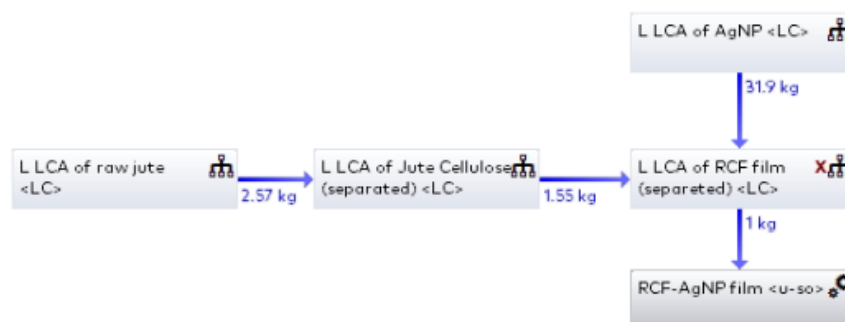


Figura 9 – Diagrama resumido da produção do RCF- AgNPs pelo cenário 1 modelado no software LCA for Experts.

### Produção da celulose de juta pelo Cenário 1

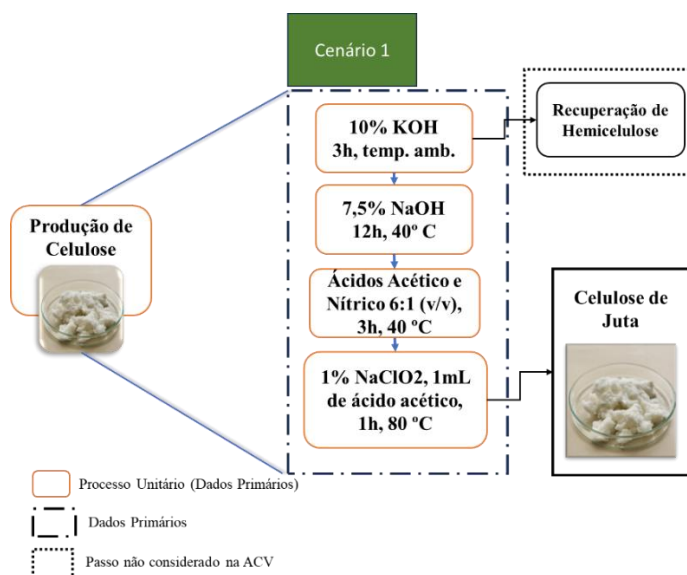


Figura 10 – Fluxograma de produção da celulose do cenário 1.



Figura 11 – Diagrama resumido da produção da celulose do cenário 1 modelado no software LCA for Experts.

Name

Nation

KOH Treatment

Parameters

| Parameter      | Formula                                 | Value  | Minimum | Maximum | Standard | Comment, units, defaults |
|----------------|-----------------------------------------|--------|---------|---------|----------|--------------------------|
| hemicellulose  | jute_fiber*0.16                         | 0.266  |         |         |          |                          |
| jute_fiber     |                                         | 1.66   |         | 0 %     |          |                          |
| jute_residual  | jute_fiber-hemicellulose-KOH_jute_fiber | 0.0515 |         |         |          |                          |
| KOH_dis_water  |                                         | 16.6   |         | 0 %     |          |                          |
| KOH_electricit |                                         | 0.724  |         | 0 %     |          |                          |
| KOH_jute_fibe  |                                         | 1.34   |         | 0 %     |          |                          |
| KOH_liquid_re  | (KOH_dis_water)+(KOH_tap_water)+(K      | 153    |         |         |          |                          |
| KOH_reag       |                                         | 1.95   |         | 0 %     |          |                          |
| KOH_tap_wat    |                                         | 134    |         | 0 %     |          |                          |
| Parameter      |                                         |        |         |         |          |                          |

LCA

VF

LCC: 0 EUR

LCWE

Documentation

Completeness

No statement

Inputs

| Parameter       | Flows                             | Quantities     | Amount | Factor | Units | Trz | Standard | Origin         | Comment |
|-----------------|-----------------------------------|----------------|--------|--------|-------|-----|----------|----------------|---------|
| KOH_electricity | BR: electricity mix [production n | Energy (net ca | 0.724  | 1      | MJ    | X   | 0 %      | (No statement) |         |
| KOH_dis_water   | Distilled water [Resources]       | Mass           | 16.6   | 1      | kg    | X   | 0 %      | (No statement) |         |
| jute_fiber      | Jute Fiber [Renewable resource]   | Mass           | 1.66   | 1      | kg    | X   | 0 %      | (No statement) |         |
| KOH_reag        | Potassium hydroxide (potash) [    | Mass           | 1.95   | 1      | kg    | X   | 0 %      | (No statement) |         |
| KOH_tap_water   | Water (tap water) [Operating m    | Mass           | 134    | 1      | kg    | X   | 0 %      | (No statement) |         |
| Flows           |                                   |                |        |        |       |     |          |                |         |

Outputs

| Parameter       | Flows                                   | Quantities | Amount | Factor | Units | Trz | Standard | Origin         | Comment |
|-----------------|-----------------------------------------|------------|--------|--------|-------|-----|----------|----------------|---------|
| hemicellulose   | Hemicellulose [Valuable substan         | Mass       | 0.266  | 1      | kg    | X   | 0 %      | (No statement) |         |
| KOH_jute_fiber  | KOH treated jute fiber [Resource        | Mass       | 1.34   | 1      | kg    | X   | 0 %      | (No statement) |         |
| jute_residual   | Jute Residue [Organic emissions to fre  | Mass       | 0.0515 | 1      | kg    | *   | 0 %      | (No statement) |         |
| KOH_liquid_resi | Liquid effluent [Production residues in | Mass       | 153    | 1      | kg    | *   | 0 %      | (No statement) |         |
| Flows           |                                         |            |        |        |       |     |          |                |         |

Figura 12 – Lista de parâmetros, entradas e saídas do processo de tratamento com KOH do cenário 1 inseridos no software LCA for Experts.

Name

Nation

NaOH treatment

Parameters

| Parameter       | Formula                                       | Value  | Minimum | Maximum | Standard | Comment, units, defaults |
|-----------------|-----------------------------------------------|--------|---------|---------|----------|--------------------------|
| KOH_fiber       |                                               | 1.34   |         |         | 0 %      |                          |
| NaOH_dis_water  |                                               | 26.8   |         |         | 0 %      |                          |
| NaOH_electricit |                                               | 612    |         |         | 0 %      |                          |
| NaOH_fiber      |                                               | 1.26   |         |         | 0 %      |                          |
| NaOH_jute_resid | KOH_fiber*0.05728                             | 0.0769 |         |         |          |                          |
| NaOH_liquid_res | (NaOH_dis_water)+(NaOH_reag)+(NaOH_tap_water) | 251    |         |         |          |                          |
| NaOH_reag       |                                               | 2.07   |         |         | 0 %      |                          |
| NaOH_tap_water  |                                               | 222    |         |         | 0 %      |                          |
| Parameter       |                                               |        |         |         |          |                          |

LCA

VF

LCC: 0 EUR

LCWE

Documentation

Completeness

No statement

Inputs

| Parameter       | Flows                             | Quantities     | Amount | Factor | Units | Trz Standard | Origin | Comment        |
|-----------------|-----------------------------------|----------------|--------|--------|-------|--------------|--------|----------------|
| NaOH_electricit | BR: electricity mix [production n | Energy (net ca | 612    | 1      | MJ    | X            | 0 %    | (No statement) |
| NaOH_dis_water  | Distilled water [Resources]       | Mass           | 26.8   | 1      | kg    | X            | 0 %    | (No statement) |
| KOH_fiber       | KOH treated jute fiber [Resource  | Mass           | 1.34   | 1      | kg    | X            | 0 %    | (No statement) |
| NaOH_reag       | Sodium hydroxide (100%; caust     | Mass           | 2.07   | 1      | kg    | X            | 0 %    | (No statement) |
| NaOH_tap_water  | Water (tap water) [Operating m    | Mass           | 222    | 1      | kg    | X            | 0 %    | (No statement) |
| Flows           |                                   |                |        |        |       |              |        |                |

Outputs

| Parameter       | Flows                                   | Quantities | Amount | Factor | Units | Trz Standard | Origin | Comment        |
|-----------------|-----------------------------------------|------------|--------|--------|-------|--------------|--------|----------------|
| NaOH_fiber      | NaOH treated fiber [Resources]          | Mass       | 1.26   | 1      | kg    | X            | 0 %    | (No statement) |
| NaOH_liquid_res | Liquid effluent [Production residues in | Mass       | 251    | 1      | kg    | *            | 0 %    | (No statement) |
| NaOH_jute_resid | Jute Residue [Organic emissions to fre  | Mass       | 0.0769 | 1      | kg    | *            | 0 %    | (No statement) |
| Flows           |                                         |            |        |        |       |              |        |                |

Figura 13 – Lista de parâmetros, entradas e saídas do processo de tratamento com NaOH da fibra do cenário 1 inseridos no software LCA for Experts.

Name

Nation

Acetylation

Parameters

| Parameter        | Formula                                             | Value | Minimum | Maximum | Standard | Comment, units, defaults |
|------------------|-----------------------------------------------------|-------|---------|---------|----------|--------------------------|
| Acet_reag_aa     |                                                     | 26.5  |         |         | 0 %      |                          |
| Acet_reag_an     |                                                     | 5.77  |         |         | 0 %      |                          |
| Acet_tap_wat     |                                                     | 209   |         |         | 0 %      |                          |
| NaOH_fiber       |                                                     | 1.26  |         |         | 0 %      |                          |
| Acet_electricity |                                                     | 168   |         |         | 0 %      |                          |
| Acet_fiber       |                                                     | 1.15  |         |         | 0 %      |                          |
| Acet_jute_res    | (NaOH_fiber)*0.089634                               | 0.113 |         |         |          |                          |
| Acet_liquid_re   | (Acet_reag_aacet)+(Acet_reag_anit)+(Acet_tap_water) | 241   |         |         |          |                          |
| Parameter        |                                                     |       |         |         |          |                          |

LCA

VF

LCC: 0 EUR

LCWE

Documentation

Completeness

No statement

Inputs

| Parameter        | Flows                             | Quantities     | Amount | Factor | Units | Tr: Standard | Origin         | Comment |
|------------------|-----------------------------------|----------------|--------|--------|-------|--------------|----------------|---------|
| Acet_reag_aacet  | Acetic acid [Organic intermediat  | Mass           | 26.5   | 1      | kg    | X 0 %        | (No statement) |         |
| Acet_electricity | BR: electricity mix [production n | Energy (net ca | 168    | 1      | MJ    | X 0 %        | (No statement) |         |
| NaOH_fiber       | NaOH treated fiber [Resources]    | Mass           | 1.26   | 1      | kg    | X 0 %        | (No statement) |         |
| Acet_reag_anit   | Nitric acid (60%) [Inorganic inte | Mass           | 5.77   | 1      | kg    | X 0 %        | (No statement) |         |
| Acet_tap_water   | Water (tap water) [Operating m    | Mass           | 209    | 1      | kg    | X 0 %        | (No statement) |         |
| Flows            |                                   |                |        |        |       |              |                |         |

Outputs

| Parameter       | Flows                                   | Quantities | Amount | Factor | Units | Tr: Standard | Origin         | Comment |
|-----------------|-----------------------------------------|------------|--------|--------|-------|--------------|----------------|---------|
| Acet_fiber      | Acetylated fiber2 [Valuable subs        | Mass       | 1.15   | 1      | kg    | X 0 %        | (No statement) |         |
| Acet_jute_resid | Jute Residue [Organic emissions to fre  | Mass       | 0.113  | 1      | kg    | * 0 %        | (No statement) |         |
| Acet_liquid_res | Liquid effluent [Production residues in | Mass       | 241    | 1      | kg    | * 0 %        | (No statement) |         |
| Flows           |                                         |            |        |        |       |              |                |         |

Figura 14 – Lista de parâmetros, entradas e saídas do processo de tratamento de ácido da fibra do cenário 1 inseridos no software LCA for Experts.

|                                      |                                                                         |                |         |         |          |                             |  |
|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|----------------|---------|---------|----------|-----------------------------|--|
| Name                                 | Nation                                                                  | Bleaching      |         |         |          |                             |  |
| Parameters                           |                                                                         |                |         |         |          |                             |  |
| Parameter                            | Formula                                                                 | Value          | Minimum | Maximum | Standard | Comment, units, default     |  |
| Bleach_liquid_r                      | (Bleach_tap_wate)+(Bleach_reag_ace)+(Bleach_dis_wate)+(Bleach_reag_chl) | 186            |         |         |          |                             |  |
| Bleach_jute_res                      | (Acet_fiber*0.1304)                                                     | 0.15           |         |         |          |                             |  |
| Jute_cellulose                       |                                                                         | 1              |         |         | 0 %      |                             |  |
| Bleach_tap_wate                      |                                                                         | 162            |         |         | 0 %      |                             |  |
| Bleach_reag_chl                      |                                                                         | 0.288          |         |         | 0 %      |                             |  |
| Bleach_reag_ace                      |                                                                         | 0.242          |         |         | 0 %      |                             |  |
| Bleach_electrici                     |                                                                         | 47.8           |         |         | 0 %      |                             |  |
| Bleach_dis_wate                      |                                                                         | 23             |         |         | 0 %      |                             |  |
| Acet_fiber                           |                                                                         | 1.15           |         |         | 0 %      |                             |  |
| Parameter                            |                                                                         |                |         |         |          |                             |  |
| LCA VF LCC: 0 EUR LCWE Documentation |                                                                         |                |         |         |          |                             |  |
| Completeness                         | No statement                                                            |                |         |         |          |                             |  |
| Inputs                               |                                                                         |                |         |         |          |                             |  |
| Parameter                            | Flows                                                                   | Quantities     | Amount  | Factor  | Units    | Tr: Standard Origin Comment |  |
| Bleach_reag_ace                      | Acetic acid [Organic intermediat                                        | Mass           | 0.242   | 1       | kg       | X 0 % (No statement)        |  |
| Acet_fiber                           | Acetylated fiber2 [Valuable subs                                        | Mass           | 1.15    | 1       | kg       | X 0 % (No statement)        |  |
| Bleach_electrici                     | BR: electricity mix [production n                                       | Energy (net ca | 47.8    | 1       | MJ       | X 0 % (No statement)        |  |
| Bleach_dis_wate                      | Distilled water [Resources]                                             | Mass           | 23      | 1       | kg       | X 0 % (No statement)        |  |
| Bleach_reag_chl                      | Sodium hypochlorite [Inorganic                                          | Mass           | 0.288   | 1       | kg       | X 0 % (No statement)        |  |
| Bleach_tap_wate                      | Water (tap water) [Operating m                                          | Mass           | 162     | 1       | kg       | X 0 % (No statement)        |  |
| Flows                                |                                                                         |                |         |         |          |                             |  |
| Outputs                              |                                                                         |                |         |         |          |                             |  |
| Parameter                            | Flows                                                                   | Quantities     | Amount  | Factor  | Units    | Tr: Standard Origin Comment |  |
| Bleach_liquid_r                      | Liquid effluent [Production residues in                                 | Mass           | 186     | 1       | kg       | * 0 % (No statement)        |  |
| Bleach_jute_res                      | Jute Residue [Organic emissions to fre                                  | Mass           | 0.15    | 1       | kg       | * 0 % (No statement)        |  |
| Jute_cellulose                       | Jute Cellulose [Resources]                                              | Mass           | 1       | 1       | kg       | X 0 % (No statement)        |  |
| Flows                                |                                                                         |                |         |         |          |                             |  |

Figura 15 – Lista de parâmetros, entradas e saídas do processo branqueamento da fibra do cenário 1 inseridos no software LCA for Experts.

### Processo de produção do RCF – AgNPs pelo cenário 1

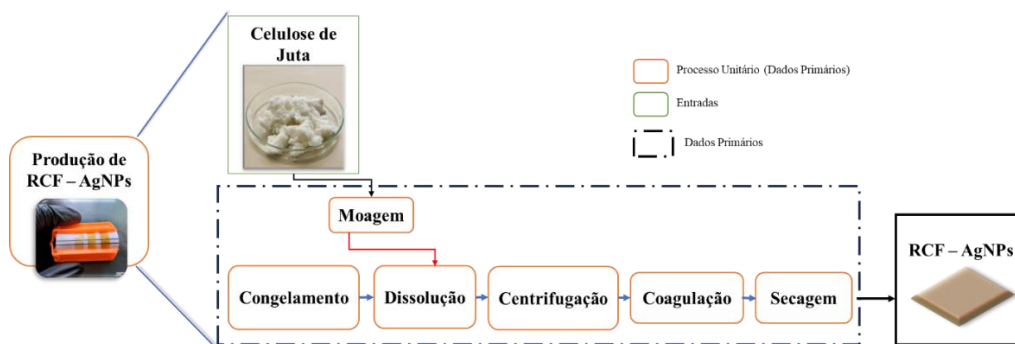


Figura 16 – Fluxograma de produção do RCF - AgNPs.



Figura 17 – Diagrama resumido da produção do RCF – AgNPs pelo cenário 1 modelado no software LCA for Experts.

|                                      |                                    |                |         |         |          |                            |  |
|--------------------------------------|------------------------------------|----------------|---------|---------|----------|----------------------------|--|
| Name                                 | Nation                             |                | Milling |         |          |                            |  |
| Parameters                           |                                    |                |         |         |          |                            |  |
| Parameter                            | Formula                            | Value          | Minimum | Maximum | Standard | Comment, units, defaults   |  |
| jute_cellulose                       |                                    | 1.55           |         |         | 0 %      |                            |  |
| Mil_electricity                      |                                    | 30.4           |         |         | 0 %      |                            |  |
| milled_cellulos                      | 1*jute_cellulose                   | 1.55           |         |         |          |                            |  |
| Parameter                            |                                    |                |         |         |          |                            |  |
| LCA VF LCC: 0 EUR LCWE Documentation |                                    |                |         |         |          |                            |  |
| Completeness                         | No statement                       |                |         |         |          |                            |  |
| Inputs                               |                                    |                |         |         |          |                            |  |
| Parameter                            | Flows                              | Quantities     | Amount  | Factor  | Units    | Trz Standar Origin Comment |  |
| Mil_electricity                      | BR: electricity mix [production n  | Energy (net ca | 25.5    | 0.839   | MJ       | X 0 % (No statement)       |  |
| jute_cellulose                       | Jute Cellulose [Resources]         | Mass           | 1.3     | 0.839   | kg       | X 0 % (No statement)       |  |
|                                      | Flows                              |                |         |         |          |                            |  |
| Outputs                              |                                    |                |         |         |          |                            |  |
| Parameter                            | Flows                              | Quantities     | Amount  | Factor  | Units    | Trz Standar Origin Comment |  |
| milled_cellulos                      | Jute cellulose milled [Valuable si | Mass           | 1.3     | 0.839   | kg       | X 0 % (No statement)       |  |
|                                      | Flows                              |                |         |         |          |                            |  |

Figura 18 – Lista de parâmetros, entradas e saídas do processo de moagem do cenário 1 inseridos no software LCA for Experts.

Name

Nation

Freezing

Parameters

| Parameter      | Formula                              | / | Value | Minimum | Maximum | Standard | Comment, units, defaults |
|----------------|--------------------------------------|---|-------|---------|---------|----------|--------------------------|
| f_AgNP         |                                      |   | 31.9  |         |         | 0 %      |                          |
| f_dis_solution | (f_reagent)+(f_AgNP)+(f_distilled_w) |   | 76.3  |         |         |          |                          |
| f_distilled_w  |                                      |   | 38.5  |         |         | 0 %      |                          |
| f_electricity  |                                      |   | 740   |         |         | 0 %      |                          |
| f_jute         |                                      |   | 1.55  |         |         | 0 %      |                          |
| f_reagent      |                                      |   | 5.85  |         |         | 0 %      |                          |
| Parameter      |                                      |   |       |         |         |          |                          |

LCA

VF

LCC: 0 EUR

LCWE

Documentation

Completeness

No statement

Inputs

| Parameter     | Flows                             | Quantities     | Amount | Factor | Units | Trz | Standard | Origin         | Comment |
|---------------|-----------------------------------|----------------|--------|--------|-------|-----|----------|----------------|---------|
| f_AgNP        | AgNP solution [Resources]         | Mass           | 31.9   | 1      | kg    | X   | 0 %      | (No statement) |         |
| f_electricity | BR: electricity mix [production n | Energy (net ca | 740    | 1      | MJ    | X   | 0 %      | (No statement) |         |
| f_distilled_w | Distilled water [Resources]       | Mass           | 38.5   | 1      | kg    | X   | 0 %      | (No statement) |         |
| f_reagent     | Sodium hydroxide (100%; caust     | Mass           | 5.85   | 1      | kg    | X   | 0 %      | (No statement) |         |
| Flows         |                                   |                |        |        |       |     |          |                |         |

Outputs

| Parameter      | Flows                             | Quantities | Amount | Factor | Units | Trz | Standard | Origin         | Comment |
|----------------|-----------------------------------|------------|--------|--------|-------|-----|----------|----------------|---------|
| f_dis_solution | Dissolving solution to RCF [Valua | Mass       | 76.3   | 1      | kg    | X   | 0 %      | (No statement) |         |
| Flows          |                                   |            |        |        |       |     |          |                |         |

Figura 19 – Lista de parâmetros, entradas e saídas do processo de congelamento do cenário 1 inseridos no software LCA for Experts.

|                                      |                                    |                |             |         |         |          |                          |                |         |
|--------------------------------------|------------------------------------|----------------|-------------|---------|---------|----------|--------------------------|----------------|---------|
| Name                                 | Nation                             |                | Dissolution |         |         |          |                          |                |         |
| Parameters                           |                                    |                |             |         |         |          |                          |                |         |
| Parameter                            | Formula                            | /              | Value       | Minimum | Maximum | Standard | Comment, units, defaults |                |         |
| dis_cellulose_m                      |                                    |                | 1.55        |         |         | 0 %      |                          |                |         |
| dis_dissol_sol                       |                                    |                | 76.3        |         |         | 0 %      |                          |                |         |
| dis_electricity                      |                                    |                | 1.76        |         |         | 0 %      |                          |                |         |
| dis_rcf_solutio                      | dis_dissol_sol+dis_cellulose_m     |                | 77.8        |         |         |          |                          |                |         |
| Parameter                            |                                    |                |             |         |         |          |                          |                |         |
| LCA VF LCC: 0 EUR LCWE Documentation |                                    |                |             |         |         |          |                          |                |         |
| Completeness No statement            |                                    |                |             |         |         |          |                          |                |         |
| Inputs                               |                                    |                |             |         |         |          |                          |                |         |
| Parameter                            | Flows                              | Quantities     | Amount      | Factor  | Units   | Trz      | Standard                 | Origin         | Comment |
| dis_electricity                      | BR: electricity mix [production n  | Energy (net ca | 1.76        | 1       | MJ      | X        | 0 %                      | (No statement) |         |
| dis_dissol_sol                       | Dissolving solution to RCF [Valua  | Mass           | 76.3        | 1       | kg      | X        | 0 %                      | (No statement) |         |
| dis_cellulose_m                      | Jute cellulose milled [Valuable si | Mass           | 1.55        | 1       | kg      | X        | 0 %                      | (No statement) |         |
| Flows                                |                                    |                |             |         |         |          |                          |                |         |
| Outputs                              |                                    |                |             |         |         |          |                          |                |         |
| Parameter                            | Flows                              | Quantities     | Amount      | Factor  | Units   | Trz      | Standard                 | Origin         | Comment |
| dis_rcf_solutio                      | RCF Solution [Valuable substanc    | Mass           | 77.8        | 1       | kg      | X        | 0 %                      | (No statement) |         |
| Flows                                |                                    |                |             |         |         |          |                          |                |         |

Figura 20 – Lista de parâmetros, entradas e saídas do processo de dissolução do cenário 1 inseridos no software LCA for Experts.

Name

Nation

Centrifugation

Parameters

| Parameter     | Formula             | / | Value | Minimum | Maximum | Standard | Comment, units, defaults |
|---------------|---------------------|---|-------|---------|---------|----------|--------------------------|
| c_electricity |                     |   | 22.5  |         |         | 0 %      |                          |
| c_rcf         | 0.7375*(c_solution) |   | 57.4  |         |         |          |                          |
| c_residue     | 0.2625*(c_solution) |   | 20.4  |         |         |          |                          |
| c_solution    |                     |   | 77.8  |         |         | 0 %      |                          |
| Parameter     |                     |   |       |         |         |          |                          |

LCA

VF

LCC: 0 EUR

LCWE

Documentation

Completeness

No statement

Inputs

| Parameter     | Flows                             | Quantities     | Amount | Factor | Units | Trz | Standard | Origin         | Comment |
|---------------|-----------------------------------|----------------|--------|--------|-------|-----|----------|----------------|---------|
| c_electricity | BR: electricity mix [production n | Energy (net ca | 22.5   | 1      | MJ    | X   | 0 %      | (No statement) |         |
| c_solution    | RCF Solution [Valuable substanc   | Mass           | 77.8   | 1      | kg    | X   | 0 %      | (No statement) |         |
| Flows         |                                   |                |        |        |       |     |          |                |         |

Outputs

| Parameter | Flows                                   | Quantities | Amount | Factor | Units | Trz | Standard | Origin         | Comment |
|-----------|-----------------------------------------|------------|--------|--------|-------|-----|----------|----------------|---------|
| c_rcf     | RCF solution centrifuged [Valuat        | Mass       | 57.4   | 1      | kg    | X   | 0 %      | (No statement) |         |
| c_residue | residual RCF [Production residues in li | Mass       | 20.4   | 1      | kg    | *   | 0 %      | (No statement) |         |
| Flows     |                                         |            |        |        |       |     |          |                |         |

Figura 21 – Lista de parâmetros, entradas e saídas do processo de centrifugação do cenário 1 inseridos no software LCA for Experts.

Name

Nation

Coagulation

Parameters

| Parameter     | Formula                | / | Value    | Minimum | Maximum | Standard | Comment, units, defaults          |
|---------------|------------------------|---|----------|---------|---------|----------|-----------------------------------|
| coag_gel_film | coag_solution - 4.3107 |   | 53.1     |         |         |          |                                   |
| coag_residue  | (coag_water) + 4.3107  |   | 5.64E003 |         |         |          | 4.3107 referente ao NaOH removido |
| coag_solution |                        |   | 57.4     |         |         | 0 %      |                                   |
| coag_water    |                        |   | 5.63E003 |         |         | 0 %      |                                   |
| Parameter     |                        |   |          |         |         |          |                                   |

LCA

VF

LCC: 0 EUR

LCWE

Documentation

Completeness

No statement

Inputs

| Parameter     | Flows                            | Quantities | Amount   | Factor | Units | Trz | Standard | Origin         | Comment |
|---------------|----------------------------------|------------|----------|--------|-------|-----|----------|----------------|---------|
| coag_solution | RCF solution centrifuged [Valuat | Mass       | 57.4     | 1      | kg    | X   | 0 %      | (No statement) |         |
| coag_water    | Water (tap water) [Operating m   | Mass       | 5.63E003 | 1      | kg    | X   | 0 %      | (No statement) |         |
| Flows         |                                  |            |          |        |       |     |          |                |         |

Outputs

| Parameter     | Flows                                 | Quantities | Amount   | Factor | Units | Trz | Standard | Origin         | Comment |
|---------------|---------------------------------------|------------|----------|--------|-------|-----|----------|----------------|---------|
| coag_gel_film | RCF gel films [Valuable substanc      | Mass       | 53.1     | 1      | kg    | X   | 0 %      | (No statement) |         |
| coag_residue  | Residue of coagulation [Production re | Mass       | 5.64E003 | 1      | kg    | *   | 0 %      | (No statement) |         |
| Flows         |                                       |            |          |        |       |     |          |                |         |

Figura 22 – Lista de parâmetros, entradas e saídas do processo de coagulação do cenário 1 inseridos no software LCA for Experts.

Name

Nation

▼

Drying

Parameters

| Parameter  | Formula                   | / | Value | Minimum | Maximum | Standard | Comment, units, defaults |
|------------|---------------------------|---|-------|---------|---------|----------|--------------------------|
| d_gel_film |                           |   | 53.1  |         |         | 0 %      |                          |
| d_RCF_film |                           |   | 1     |         |         | 0 %      |                          |
| d_residue  | (d_gel_film)-(d_RCF_film) |   | 52.1  |         |         |          |                          |
| Parameter  |                           |   |       |         |         |          |                          |

LCA

VF

LCC: 0 EUR

LCWE

Documentation

Completeness

No statement

▼

Inputs

| Parameter  | Flows                               | Quantities | Amount | Factor | Units | Trz | Standard | Origin         | Comment |
|------------|-------------------------------------|------------|--------|--------|-------|-----|----------|----------------|---------|
| d_gel_film | RCF gel films [Valuable substances] | Mass       | 53.1   | 1      | kg    | X   | 0 %      | (No statement) |         |
|            | Flows                               |            |        |        |       |     |          |                |         |

Outputs

| Parameter  | Flows                                 | Quantities | Amount | Factor | Units | Trz | Standard | Origin         | Comment |
|------------|---------------------------------------|------------|--------|--------|-------|-----|----------|----------------|---------|
| d_RCF_film | RCF film [Valuable substances]        | Mass       | 1      | 1      | kg    | X   | 0 %      | (No statement) |         |
| d_residue  | Evaporated residue of RCF [Emissions] | Mass       | 52.1   | 1      | kg    | *   | 0 %      | (No statement) |         |
|            | Flows                                 |            |        |        |       |     |          |                |         |

Figura 23 – Lista de parâmetros, entradas e saídas do processo de secagem do cenário 1 inseridos no software LCA for Experts.

### Produção cradle-to-gate do RCF – AgNPs pelo Cenário 2

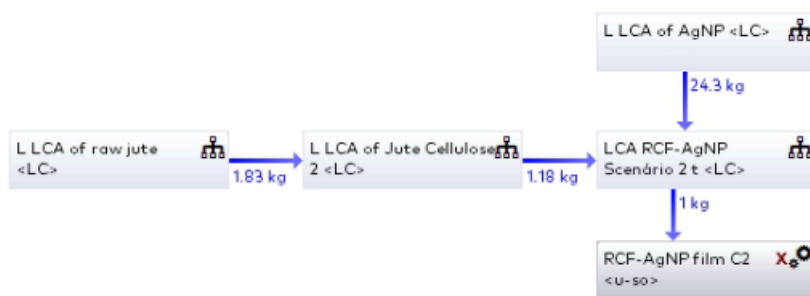


Figura 24 – Diagrama resumido da produção do RCF- AgNPs pelo cenário 1 modelado no software LCA for Experts.

### Produção da celulose de juta pelo Cenário 2

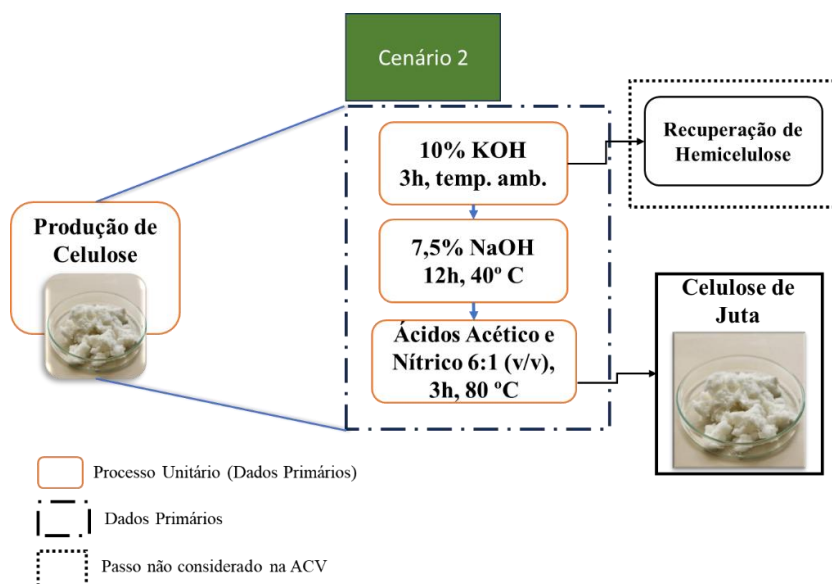


Figura 25 – Fluxograma de produção da celulose do cenário 2.

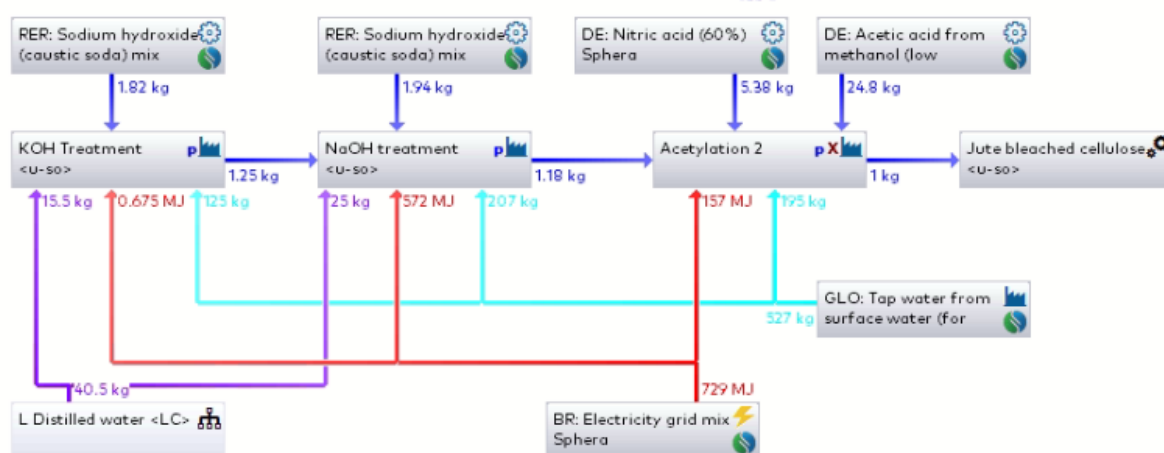


Figura 26 – Diagrama resumido da produção da celulose do cenário 1 modelado no software LCA for Experts.

Name

Nation

KOH Treatment

Parameters

| Parameter                                                    | Formula                                 | / | Value  | Minimum | Maximum | Standard | Comment, units, defaults |
|--------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|---|--------|---------|---------|----------|--------------------------|
| hemicellulose                                                | jute_fiber*0.16                         |   | 0.266  |         |         |          |                          |
| jute_fiber                                                   |                                         |   | 1.66   |         |         | 0 %      |                          |
| jute_residual                                                | jute_fiber-hemicellulose-KOH_jute_fiber |   | 0.0515 |         |         |          |                          |
| KOH_dis_water                                                |                                         |   | 16.6   |         |         | 0 %      |                          |
| KOH_electricity                                              |                                         |   | 0.724  |         |         | 0 %      |                          |
| KOH_jute_fiber                                               |                                         |   | 1.34   |         |         | 0 %      |                          |
| KOH_liquid_resi (KOH_dis_water) +(KOH_tap_water) +(KOH_reag) |                                         |   | 153    |         |         |          |                          |
| KOH_reag                                                     |                                         |   | 1.95   |         |         | 0 %      |                          |
| KOH_tap_water                                                |                                         |   | 134    |         |         | 0 %      |                          |
| Parameter                                                    |                                         |   |        |         |         |          |                          |

LCA

VF

LCC: 0 EUR

LCWE

Documentation

Completeness

No statement

Inputs

| Parameter       | Flows                             | Quantities     | Amount | Factor | Units | Trz | Standard | Origin         | Comment |
|-----------------|-----------------------------------|----------------|--------|--------|-------|-----|----------|----------------|---------|
| KOH_electricity | BR: electricity mix [production n | Energy (net ca | 0.724  | 1      | MJ    | X   | 0 %      | (No statement) |         |
| KOH_dis_water   | Distilled water [Resources]       | Mass           | 16.6   | 1      | kg    | X   | 0 %      | (No statement) |         |
| jute_fiber      | Jute Fiber [Renewable resource]   | Mass           | 1.66   | 1      | kg    | X   | 0 %      | (No statement) |         |
| KOH_reag        | Potassium hydroxide (potash) [    | Mass           | 1.95   | 1      | kg    | X   | 0 %      | (No statement) |         |
| KOH_tap_water   | Water (tap water) [Operating m    | Mass           | 134    | 1      | kg    | X   | 0 %      | (No statement) |         |
|                 | Flows                             |                |        |        |       |     |          |                |         |

Outputs

| Parameter       | Flows                                   | Quantities | Amount | Factor | Units | Trz | Standard | Origin         | Comment |
|-----------------|-----------------------------------------|------------|--------|--------|-------|-----|----------|----------------|---------|
| hemicellulose   | Hemicellulose [Valuable substan         | Mass       | 0.266  | 1      | kg    | X   | 0 %      | (No statement) |         |
| KOH_jute_fiber  | KOH treated jute fiber [Resource        | Mass       | 1.34   | 1      | kg    | X   | 0 %      | (No statement) |         |
| jute_residual   | Jute Residue [Organic emissions to fre  | Mass       | 0.0515 | 1      | kg    | *   | 0 %      | (No statement) |         |
| KOH_liquid_resi | Liquid effluent [Production residues in | Mass       | 153    | 1      | kg    | *   | 0 %      | (No statement) |         |
|                 | Flows                                   |            |        |        |       |     |          |                |         |

Figura 27 – Lista de parâmetros, entradas e saídas do processo de tratamento com KOH do cenário 2 inseridos no software LCA for Experts.

Name

Nation

NaOH treatment

Parameters

| Parameter       | Formula                                       | / | Value  | Minimum | Maximum | Standard | Comment, units, defaults |
|-----------------|-----------------------------------------------|---|--------|---------|---------|----------|--------------------------|
| KOH_fiber       |                                               |   | 1.34   |         |         | 0 %      |                          |
| NaOH_dis_water  |                                               |   | 26.8   |         |         | 0 %      |                          |
| NaOH_electricit |                                               |   | 612    |         |         | 0 %      |                          |
| NaOH_fiber      |                                               |   | 1.26   |         |         | 0 %      |                          |
| NaOH_jute_resid | KOH_fiber*0.05728                             |   | 0.0769 |         |         |          |                          |
| NaOH_liquid_res | (NaOH_dis_water)+(NaOH_reag)+(NaOH_tap_water) |   | 251    |         |         |          |                          |
| NaOH_reag       |                                               |   | 2.07   |         |         | 0 %      |                          |
| NaOH_tap_water  |                                               |   | 222    |         |         | 0 %      |                          |
| Parameter       |                                               |   |        |         |         |          |                          |

LCA

VF

LCC: 0 EUR

LCWE

Documentation

Completeness

No statement

Inputs

| Parameter       | Flows                             | Quantities     | Amount | Factor | Units | Trz | Standard | Origin         | Comment |
|-----------------|-----------------------------------|----------------|--------|--------|-------|-----|----------|----------------|---------|
| NaOH_electricit | BR: electricity mix [production n | Energy (net ca | 612    | 1      | MJ    | X   | 0 %      | (No statement) |         |
| NaOH_dis_water  | Distilled water [Resources]       | Mass           | 26.8   | 1      | kg    | X   | 0 %      | (No statement) |         |
| KOH_fiber       | KOH treated jute fiber [Resource  | Mass           | 1.34   | 1      | kg    | X   | 0 %      | (No statement) |         |
| NaOH_reag       | Sodium hydroxide (100%; caust     | Mass           | 2.07   | 1      | kg    | X   | 0 %      | (No statement) |         |
| NaOH_tap_water  | Water (tap water) [Operating m    | Mass           | 222    | 1      | kg    | X   | 0 %      | (No statement) |         |
|                 | Flows                             |                |        |        |       |     |          |                |         |

Outputs

| Parameter       | Flows                                   | Quantities | Amount | Factor | Units | Trz | Standard | Origin         | Comment |
|-----------------|-----------------------------------------|------------|--------|--------|-------|-----|----------|----------------|---------|
| NaOH_fiber      | NaOH treated fiber [Resources]          | Mass       | 1.26   | 1      | kg    | X   | 0 %      | (No statement) |         |
| NaOH_liquid_res | Liquid effluent [Production residues in | Mass       | 251    | 1      | kg    | *   | 0 %      | (No statement) |         |
| NaOH_jute_resid | Jute Residue [Organic emissions to fre  | Mass       | 0.0769 | 1      | kg    | *   | 0 %      | (No statement) |         |
|                 | Flows                                   |            |        |        |       |     |          |                |         |

Figura 28 – Lista de parâmetros, entradas e saídas do processo de tratamento com NaOH do cenário 2 inseridos no software LCA for Experts.

Name

Nation

Acetylation 2

Parameters

| Parameter       | Formula                                             | / | Value | Minimum | Maximum | Standard | Comment, units, defaults |
|-----------------|-----------------------------------------------------|---|-------|---------|---------|----------|--------------------------|
| Acet_electr     |                                                     |   | 157   |         |         | 0 %      |                          |
| Acet_fiber      |                                                     |   | 1     |         |         | 0 %      |                          |
| Acet_jute_resid | (NaOH_fiber)*0.089634                               |   | 0.106 |         |         |          |                          |
| Acet_liquid_res | (Acet_reag_aacet)+(Acet_reag_anit)+(Acet_tap_water) |   | 225   |         |         |          |                          |
| Acet_reag_aacet |                                                     |   | 24.8  |         |         | 0 %      |                          |
| Acet_reag_anit  |                                                     |   | 5.38  |         |         | 0 %      |                          |
| Acet_tap_water  |                                                     |   | 195   |         |         | 0 %      |                          |
| NaOH_fiber      |                                                     |   | 1.18  |         |         | 0 %      |                          |
| Parameter       |                                                     |   |       |         |         |          |                          |

LCA

VF

LCC: 0 EUR

LCWE

Documentation

Completeness

No statement

Inputs

| Parameter       | Flows                               | Quantities     | Amount | Factor | Units | Tr: Standard | Origin         | Comment |
|-----------------|-------------------------------------|----------------|--------|--------|-------|--------------|----------------|---------|
| Acet_reag_aacet | ⇌ Acetic acid [Organic intermediat  | Mass           | 24.8   | 1      | kg    | X 0 %        | (No statement) |         |
| Acet_electr     | ⇌ BR: electricity mix [production n | Energy (net ca | 157    | 1      | MJ    | X 0 %        | (No statement) |         |
| NaOH_fiber      | ⇌ NaOH treated fiber [Resources]    | Mass           | 1.18   | 1      | kg    | X 0 %        | (No statement) |         |
| Acet_reag_anit  | ⇌ Nitric acid (60%) [Inorganic inte | Mass           | 5.38   | 1      | kg    | X 0 %        | (No statement) |         |
| Acet_tap_water  | ⇌ Water (tap water) [Operating m    | Mass           | 195    | 1      | kg    | X 0 %        | (No statement) |         |
| Flows           |                                     |                |        |        |       |              |                |         |

Outputs

| Parameter       | Flows                                     | Quantities | Amount | Factor | Units | Tr: Standard | Origin         | Comment |
|-----------------|-------------------------------------------|------------|--------|--------|-------|--------------|----------------|---------|
| Acet_fiber      | ⇌ Jute Cellulose [Resources]              | Mass       | 1      | 1      | kg    | X 0 %        | (No statement) |         |
| Acet_jute_resid | ⇌ Jute Residue [Organic emissions to fre  | Mass       | 0.106  | 1      | kg    | * 0 %        | (No statement) |         |
| Acet_liquid_res | ⇌ Liquid effluent [Production residues in | Mass       | 225    | 1      | kg    | * 0 %        | (No statement) |         |
| Flows           |                                           |            |        |        |       |              |                |         |

Figura 29 – Lista de parâmetros, entradas e saídas do processo de tratamento ácido do cenário 2 inseridos no software LCA for Experts.

### Processo de produção do RCF – AgNPs pelo cenário 2

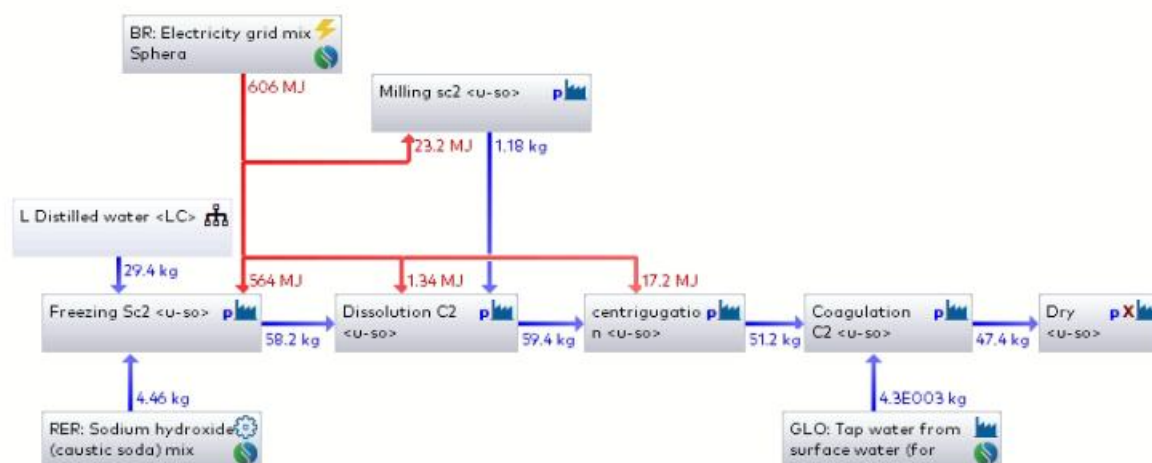


Figura 30 – Diagrama resumido da produção do RCF – AgNPs pelo cenário 2 modelado no software LCA for Experts.

Name

Nation

Milling sc2

Parameters

| Parameter       | Formula | Value | Minimum | Maximum | Standard | Comment, units, defaults |
|-----------------|---------|-------|---------|---------|----------|--------------------------|
| jute_cellulose  |         | 1.18  |         |         | 0 %      |                          |
| mil_elect       |         | 23.2  |         |         | 0 %      |                          |
| miled_cellulose |         | 1.18  |         |         | 0 %      |                          |
| Parameter       |         |       |         |         |          |                          |

LCA

VF

LCC: 0 EUR

LCWE

Documentation

Completeness

No statement

Inputs

| Parameter      | Flows                             | Quantities     | Amount | Factor | Units | Trz | Standar | Origin         | Comment |
|----------------|-----------------------------------|----------------|--------|--------|-------|-----|---------|----------------|---------|
| mil_elect      | BR: electricity mix [production n | Energy (net ca | 23.2   | 1      | MJ    | X   | 0 %     | (No statement) |         |
| jute_cellulose | Jute Cellulose [Resources]        | Mass           | 1.18   | 1      | kg    | X   | 0 %     | (No statement) |         |
|                | Flows                             |                |        |        |       |     |         |                |         |

Outputs

| Parameter       | Flows                              | Quantities | Amount | Factor | Units | Trz | Standar | Origin         | Comment |
|-----------------|------------------------------------|------------|--------|--------|-------|-----|---------|----------------|---------|
| miled_cellulose | Jute cellulose milled [Valuable si | Mass       | 1.18   | 1      | kg    | X   | 0 %     | (No statement) |         |
|                 | Flows                              |            |        |        |       |     |         |                |         |

Figura 31 – Lista de parâmetros, entradas e saídas do processo de moagem do cenário 2 inseridos no software LCA for Experts.

Name

Nation

Freezing Sc2

Parameters

| Parameter      | Formula                              | Value | Minimum | Maximum | Standard | Comment, units, defaults |
|----------------|--------------------------------------|-------|---------|---------|----------|--------------------------|
| f_AgNP         |                                      | 24.3  |         |         | 0 %      |                          |
| f_dis_solution | (f_reagent)+(f_AgNP)+(f_distilled_w) | 58.2  |         |         |          |                          |
| f_distilled_w  |                                      | 29.4  |         |         | 0 %      |                          |
| f_electricity  |                                      | 564   |         |         | 0 %      |                          |
| f_jute         |                                      | 0     |         |         | 0 %      |                          |
| f_reagent      |                                      | 4.46  |         |         | 0 %      |                          |
| Parameter      |                                      |       |         |         |          |                          |

LCA

VF

LCC: 0 EUR

LCWE

Documentation

Completeness

No statement

Inputs

| Parameter     | Flows                             | Quantities     | Amount | Factor | Units | Trz Standar | Origin | Comment        |
|---------------|-----------------------------------|----------------|--------|--------|-------|-------------|--------|----------------|
| f_AgNP        | AgNP solution [Resources]         | Mass           | 24.3   | 1      | kg    | X           | 0 %    | (No statement) |
| f_electricity | BR: electricity mix [production n | Energy (net ca | 564    | 1      | MJ    | X           | 0 %    | (No statement) |
| f_distilled_w | Distilled water [Resources]       | Mass           | 29.4   | 1      | kg    | X           | 0 %    | (No statement) |
| f_reagent     | Sodium hydroxide (100%; caust     | Mass           | 4.46   | 1      | kg    | X           | 0 %    | (No statement) |
| Flows         |                                   |                |        |        |       |             |        |                |

Outputs

| Parameter      | Flows                             | Quantities | Amount | Factor | Units | Trz Standar | Origin | Comment        |
|----------------|-----------------------------------|------------|--------|--------|-------|-------------|--------|----------------|
| f_dis_solution | Dissolving solution to RCF [Valua | Mass       | 58.2   | 1      | kg    | X           | 0 %    | (No statement) |
| Flows          |                                   |            |        |        |       |             |        |                |

Figura 32 – Lista de parâmetros, entradas e saídas do processo de congelamento do cenário 2 inseridos no software LCA for Experts.

|                 |                                    |                |                |         |              |          |                          |                |         |
|-----------------|------------------------------------|----------------|----------------|---------|--------------|----------|--------------------------|----------------|---------|
| Name            | Nation                             |                | Dissolution C2 |         |              |          |                          |                |         |
| Parameters      |                                    |                |                |         |              |          |                          |                |         |
| Parameter       | Formula                            | /              | Value          | Minimum | Maximum      | Standard | Comment, units, defaults |                |         |
| dis_cellulose_m |                                    |                | 1.18           |         |              | 0 %      |                          |                |         |
| dis_dissol_sol  |                                    |                | 58.2           |         |              | 0 %      |                          |                |         |
| dis_electricity |                                    |                | 1.34           |         |              | 0 %      |                          |                |         |
| dis_rcf_solutio | dis_dissol_sol+dis_cellulose_m     |                | 59.4           |         |              |          |                          |                |         |
| Parameter       |                                    |                |                |         |              |          |                          |                |         |
| LCA             |                                    |                |                |         | VF           |          |                          |                |         |
| LCC: 0 EUR      |                                    |                |                |         | LCWE         |          |                          |                |         |
| Documentation   |                                    |                |                |         |              |          |                          |                |         |
| Completeness    |                                    |                |                |         | No statement |          |                          |                |         |
| Inputs          |                                    |                |                |         |              |          |                          |                |         |
| Parameter       | Flows                              | Quantities     | Amount         | Factor  | Units        | Trz      | Standard                 | Origin         | Comment |
| dis_electricity | BR: electricity, production mix BI | Energy (net ca | 1.34           | 1       | MJ           | X        | 0 %                      | (No statement) |         |
| dis_dissol_sol  | Dissolving solution to RCF [Valua  | Mass           | 58.2           | 1       | kg           | X        | 0 %                      | (No statement) |         |
| dis_cellulose_m | Jute cellulose milled [Valuable si | Mass           | 1.18           | 1       | kg           | X        | 0 %                      | (No statement) |         |
| Flows           |                                    |                |                |         |              |          |                          |                |         |
| Outputs         |                                    |                |                |         |              |          |                          |                |         |
| Parameter       | Flows                              | Quantities     | Amount         | Factor  | Units        | Trz      | Standard                 | Origin         | Comment |
| dis_rcf_solutio | RCF Solution [Valuable substanc    | Mass           | 59.4           | 1       | kg           | X        | 0 %                      | (No statement) |         |
| Flows           |                                    |                |                |         |              |          |                          |                |         |

Figura 33 – Lista de parâmetros, entradas e saídas do processo de dissolução do cenário 2 inseridos no software LCA for Experts.

Name

Nation

centrifugation

Parameters

| Parameter     | Formula                    | / | Value | Minimum | Maximum | Standard | Comment, units, defaults |
|---------------|----------------------------|---|-------|---------|---------|----------|--------------------------|
| c_electricity |                            |   | 17.2  |         |         | 0 %      |                          |
| c_rcf         | $(1-0.1371)*(c\_solution)$ |   | 51.2  |         |         |          |                          |
| c_residue     | $0.1371*(c\_solution)$     |   | 8.14  |         |         |          |                          |
| c_solution    |                            |   | 59.4  |         |         | 0 %      |                          |
| Parameter     |                            |   |       |         |         |          |                          |

LCA

VF

LCC: 0 EUR

LCWE

Documentation

Completeness

No statement

Inputs

| Parameter     | Flows                             | Quantities     | Amount | Factor | Units | Trz | Standard | Origin         | Comment |
|---------------|-----------------------------------|----------------|--------|--------|-------|-----|----------|----------------|---------|
| c_electricity | BR: electricity mix [production n | Energy (net ca | 17.2   | 1      | MJ    | X   | 0 %      | (No statement) |         |
| c_solution    | RCF Solution [Valuable substanc   | Mass           | 59.4   | 1      | kg    | X   | 0 %      | (No statement) |         |

Flows

Outputs

| Parameter | Flows                                    | Quantities | Amount | Factor | Units | Trz | Standard | Origin         | Comment |
|-----------|------------------------------------------|------------|--------|--------|-------|-----|----------|----------------|---------|
| c_rcf     | RCF solution centrifuged [Valuat         | Mass       | 51.2   | 1      | kg    | X   | 0 %      | (No statement) |         |
| c_residue | residual RCF [Production residues in lit | Mass       | 8.14   | 1      | kg    | *   | 0 %      | (No statement) |         |

Flows

Figura 34 – Lista de parâmetros, entradas e saídas do processo de centrifugação do cenário 2 inseridos no software LCA for Experts.

Name

Nation

Coagulation C2

Parameters

| Parameter     | Formula                            | / | Value   | Minimum | Maximum | Standard | Comment, units, defaults          |
|---------------|------------------------------------|---|---------|---------|---------|----------|-----------------------------------|
| coag_gel_film | $coag\_solution - (4.46 * 0.8629)$ |   | 47.4    |         |         |          |                                   |
| coag_residue  | $(coag\_water) + (4.46 * 0.8629)$  |   | 4.3E003 |         |         |          | 4.3107 referente ao NaOH removido |
| coag_solution |                                    |   | 51.2    |         |         | 0 %      |                                   |
| coag_water    |                                    |   | 4.3E003 |         |         | 0 %      |                                   |
| Parameter     |                                    |   |         |         |         |          |                                   |

LCA

VF

LCC: 0 EUR

LCWE

Documentation

Completeness

No statement

Inputs

| Parameter | Flows                            | Quantities | Amount  | Factor | Units | Trz Standard | Origin         | Comment |
|-----------|----------------------------------|------------|---------|--------|-------|--------------|----------------|---------|
| coag_solu | RCF solution centrifuged [Valuat | Mass       | 51.2    | 1      | kg    | X 0 %        | (No statement) |         |
| coag_wat  | Water (tap water) [Operating m   | Mass       | 4.3E003 | 1      | kg    | X 0 %        | (No statement) |         |
| Flows     |                                  |            |         |        |       |              |                |         |

Outputs

| Parameter   | Flows                                 | Quantities | Amount  | Factor | Units | Trz Standard | Origin         | Comment |
|-------------|---------------------------------------|------------|---------|--------|-------|--------------|----------------|---------|
| coag_gel    | RCF gel films [Valuable substanc      | Mass       | 47.4    | 1      | kg    | X 0 %        | (No statement) |         |
| coag_residu | Residue of coagulation [Production re | Mass       | 4.3E003 | 1      | kg    | * 0 %        | (No statement) |         |
| Flows       |                                       |            |         |        |       |              |                |         |

Figura 35 – Lista de parâmetros, entradas e saídas do processo de coagulação do cenário 2 inseridos no software LCA for Experts.

|                                                                                                                                                                                                   |                                       |            |        |         |         |          |                          |                |         |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|------------|--------|---------|---------|----------|--------------------------|----------------|---------|
| Name                                                                                                                                                                                              | Nation                                |            | Dry    |         |         |          |                          |                |         |
| Parameters                                                                                                                                                                                        |                                       |            |        |         |         |          |                          |                |         |
| Parameter                                                                                                                                                                                         | Formula                               | /          | Value  | Minimum | Maximum | Standard | Comment, units, defaults |                |         |
| d_gel_film                                                                                                                                                                                        |                                       |            | 47.4   |         |         | 0 %      |                          |                |         |
| d_RCF_film                                                                                                                                                                                        |                                       |            | 1      |         |         | 0 %      |                          |                |         |
| d_residue                                                                                                                                                                                         | (d_gel_film)-(d_RCF_film)             |            | 46.4   |         |         |          |                          |                |         |
| Parameter                                                                                                                                                                                         |                                       |            |        |         |         |          |                          |                |         |
| <input checked="" type="radio"/> LCA <input checked="" type="radio"/> VF <input checked="" type="radio"/> LCC: 0 EUR <input checked="" type="radio"/> LCWE <input type="checkbox"/> Documentation |                                       |            |        |         |         |          |                          |                |         |
| Completeness                                                                                                                                                                                      | No statement                          |            |        |         |         |          |                          |                |         |
| Inputs                                                                                                                                                                                            |                                       |            |        |         |         |          |                          |                |         |
| Parameter                                                                                                                                                                                         | Flows                                 | Quantities | Amount | Factor  | Units   | Trz      | Standard                 | Origin         | Comment |
| d_gel_film                                                                                                                                                                                        | RCF gel films [Valuable substance]    | Mass       | 47.4   | 1       | kg      | X        | 0 %                      | (No statement) |         |
| Flows                                                                                                                                                                                             |                                       |            |        |         |         |          |                          |                |         |
| Outputs                                                                                                                                                                                           |                                       |            |        |         |         |          |                          |                |         |
| Parameter                                                                                                                                                                                         | Flows                                 | Quantities | Amount | Factor  | Units   | Trz      | Standard                 | Origin         | Comment |
| d_RCF_film                                                                                                                                                                                        | RCF AgNP film [Valuable substance]    | Mass       | 1      | 1       | kg      | X        | 0 %                      | (No statement) |         |
| d_residue                                                                                                                                                                                         | Evaporated residue of RCF [Emissions] | Mass       | 46.4   | 1       | kg      | *        | 0 %                      | (No statement) |         |
| Flows                                                                                                                                                                                             |                                       |            |        |         |         |          |                          |                |         |

Figura 36 – Lista de parâmetros, entradas e saídas do processo de secagem do cenário 2 inseridos no software LCA for Experts.