



UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DA BAHIA
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE BOM JESUS DA LAPA

MARCOS DYON SANTOS

**CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E PROPRIEDADES DE DEGRADAÇÃO DO
POLÍMERO CASEÍNA FORMALÍNA OBTIDA A PARTIR DA PROTEÍNA DO LEITE**

BOM JESUS DA LAPA
2025

MARCOS DYON SANTOS

**CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E PROPRIEDADES DE DEGRADAÇÃO DO
POLÍMERO CASEÍNA FORMALÍNA OBTIDA A PARTIR DA PROTEÍNA DO LEITE**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia mecânica da Universidade
Federal do Oeste da Bahia (UFOB).

Orientadora: Prof.^a Dra. Bruna de Souza Constantino

BOM JESUS DA LAPA
2025

FICHA CATALOGRÁFICA

S237

Santos, Marcos Dyon

Caracterização mecânica e propriedades de degradação do polímero caseína formalina obtida a partir da proteína do leite. / Marcos Dyon Santos. – 2025.

40f.: il.

Orientadora: Profa. Dra. Bruna de Souza Constantino
TCC - Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Oeste da Bahia. Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa - BA, 2025.

1. Polímeros. 2. Materiais de engenharia. 3. Engenharia Mecânica.
I. Constantino, Bruna de Souza. II. Universidade Federal do Oeste da Bahia – Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa - BA. III. Título.

CDD 547.7

Biblioteca Universitária de Bom Jesus da Lapa – UFOB

MARCOS DYON SANTOS

**CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E PROPRIEDADES DE DEGRADAÇÃO DO
POLÍMERO CASEÍNA FORMALÍNA OBTIDA A PARTIR DA PROTEÍNA DO LEITE**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia mecânica da Universidade
Federal do Oeste da Bahia (UFOB).

Banca examinadora:

Prof.^a Dra. Bruna de Souza Constantino (Orientadora) - UFOB

Prof. Dr. Jorge Luis Oliveira Santos - UFOB

Prof. Me. Lucas Aninger de Barros Rocha – UFOB

BOM JESUS DA LAPA

2025

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus, à minha família e a todos aqueles que, direta ou indiretamente, acompanharam e contribuíram para a minha trajetória até este momento.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, por me iluminar, por me conceder vitórias diárias e por direcionar os meus caminhos ao longo desta jornada.

Agradeço, também, aos meus pais, Eliete Conceição Santos e Marcelo, por todo o carinho, dedicação, orações e esforço na concretização de um sonho que hoje podemos celebrar juntos. Obrigado pelo apoio nos momentos difíceis e de pensamentos negativos, bem como por me incentivarem constantemente a evoluir e superar cada desafio.

À minha irmã Ana Caroline, pelo incentivo e pela participação direta na realização deste trabalho, deixo aqui minha profunda gratidão.

Aos meus colegas e irmãos Carlos Vinícius, Vinicius Montino, Vinicius Neves, Gabriel Medeiros, Lucas Amorim, Geovana e Cristiano Soares, agradeço por estarem sempre presentes nesta caminhada, oferecendo força, apoio e motivação para que eu continuasse lutando. Estendo meus agradecimentos a todos os demais colegas que, direta ou indiretamente, contribuíram para que eu chegasse até aqui.

À professora Dr.^a Bruna de Souza Constantino, agradeço pela compreensão e pelos esforços incansáveis dedicados ao desenvolvimento deste trabalho.

Meus sinceros agradecimentos ao amigo e irmão Eng. José Milton e ao companheiro e amigo Eng. Wesley, que de forma direta contribuíram para minha formação.

Aos demais Docentes da Universidade Federal do Oeste da Bahia (UFOB) pelos ensinamentos, até aqui transmitidos.

RESUMO

O presente trabalho aborda a produção e a caracterização mecânica e térmica do biopolímero caseína-formaldeído (Galalite), sintetizado a partir da extração da proteína caseína presente no leite bovino. A pesquisa propõe esse material como uma alternativa sustentável a objetos fabricados com plásticos sintéticos, cuja utilização gera impactos ambientais significativos. A caseína foi obtida por acidificação do leite, moldada e posteriormente submetida à reticulação com formaldeído, formando um polímero termorrígido. O material produzido foi submetido a análises por FTIR, ensaios mecânicos de tração e flexão e testes térmicos TGA e DTA. Os resultados confirmaram a formação de ligações cruzadas entre as cadeias proteicas, evidenciadas por alterações nas bandas do FTIR; indicaram um comportamento mecânico rígido e frágil, com módulo de elasticidade compatível com polímeros termorrígidos como a baquelite; e demonstraram que a degradação térmica ocorre principalmente entre 127 °C e 522 °C, faixa em que ocorre a maior perda de massa. Assim, conclui-se que a galalite apresenta propriedades relevantes e potencial de aplicação como biopolímero renovável e de menor impacto ambiental.

Palavras chaves: Biopolímero, Caseína-formaldeído, Comportamento mecânicos, Análises térmicas.

ABSTRACT

This work investigates the production and mechanical and thermal characterization of the casein-formaldehyde biopolymer (Galalite), synthesized from the extraction of casein protein present in bovine milk, as a sustainable alternative to some objects made of synthetic plastics that generate significant environmental impacts and to handcrafted objects of animal origin obtained illegally. Casein was obtained by acidifying milk, molded, and subsequently subjected to crosslinking with formaldehyde, forming a thermosetting polymer. The produced material was subjected to FTIR analysis, mechanical bending and tensile tests, and TGA and DTA thermal tests. The results confirmed the formation of crosslinks between the protein chains, evidenced by changes in the FTIR bands; showed rigid and brittle mechanical behavior, with a modulus of elasticity compatible with thermosetting polymers such as bakelite; and demonstrated that thermal degradation occurs mainly between 127 °C and 522 °C, the range in which the greatest mass loss occurs. Thus, it can be concluded that galalite presents relevant structural properties and potential for application as a renewable biopolymer with a lower environmental impact.

Keywords: Biopolymer, Casein-formaldehyde, Mechanical behavior, Thermal analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Cadeia polimérica do polietileno	14
Figura 2 – Estruturas moleculares dos polímeros (linear, ramificada, ligações cruzadas e rede)	15
Figura 3 – Comportamento tensão–deformação para polímeros	16
Figura 4 – Termograma típico de TGA	18
Figura 5 – Termograma típico de DTA	19
Figura 6 – Representação esquemática da micela de caseína	21
Figura 7 – Coagulação da caseína	22
Figura 8 – Estrutura da caseína formalina	23
Figura 9 – Béqueres contendo leite	24
Figura 10 – Aquecimento do leite em agitação magnética	24
Figura 11 – Mistura heterogênea com precipitação da caseína	25
Figura 12 – Processo de decantação	25
Figura 13 – Caseína fresca	26
Figura 14 – Moldes produzidos em impressora 3D	27
Figura 15 – Moldes preenchidos com caseína	27
Figura 16 – Amostras após cura	27
Figura 17 – Amostras imersas em formol	28
Figura 18 – Biopolímero após lixamento	28
Figura 19 – Ensaio de flexão em três pontos.....	29
Figura 20 – Dimensões das amostras para tração	31
Figura 21 – Ensaio de tração	32
Figura 22 – Equipamento FTIR	33
Figura 23 – Equipamento para TGA/DTA	34
Figura 24 – Espectros FTIR da caseína com e sem formol	35
Figura 25 – Curva tensão × deformação (flexão)	36
Figura 26 – Corpo de prova fraturado – flexão	36
Figura 27 – Curva tensão × deformação (tração)	37
Figura 28 – Corpo de prova fraturado – tração	37
Figura 29 - Gráfico TGA/DTA	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Propriedades mecânicas para alguns polímeros	17
---	----

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

TGA - Termogravimetria (Thermogravimetric Analysis)

DTA - Análise Térmica Diferencial (Differential Thermal Analysis)

DSC - Calorimetria Diferencial de Varredura (Differential Scanning Calorimetry)

FTIR - Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier

ATR - Acessório de Reflexão Total Atenuada

ASTM - American Society for Testing and Materials (Normas técnicas)

ONU - Organização das Nações Unidas

PNUMA - Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente

MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Brasil)

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

UFOB - Universidade Federal do Oeste da Bahia

mm - Milímetros (para dimensões mecânicas)

mg - Miligramas (para massa de amostras)

mL/min - Mililitros por minuto (para fluxo de gás)

°C - Graus Celsius (para temperatura)

ASTM D790 - Norma para ensaio de flexão em três pontos

ASTM D638 - Norma para ensaio de tração

ASTM E1131 - Norma para análise termogravimétrica (TGA)

ASTM E794 - Norma para determinação de temperaturas de fusão e cristalização por análise térmica diferencial (DTA)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVOS	14
1.1.1 Objetivo Geral.....	14
1.1.2 Objetivos Específicos.....	14
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1 Fundamentos de polímeros	14
2.1.1 Biopolímeros	16
2.1.2 Comportamento mecânico dos polímeros	17
2.1.3 Comportamento térmico dos polímeros.....	18
2.1.4 Caseína.....	21
2.1.5 Caseína formalina	23
2.1.6 Reticulação com formaldeído.....	24
3 . METODOLOGIA	25
3.1 Obtenção da caseína	25
3.2 Síntese do biopolímero.....	27
3.3 Ensaio de flexão em 3 pontos.....	29
3.4 Ensaio de tração	31
3.5 Análise por FTIR.....	33
3.6 Análises térmicas	34
4 . RESULTADOS E DISCUSSÕES	35
4.1 Análise de FTIR	35
4.2 Comportamento mecânico	36
4.3 Análises térmicas	39
5. CONCLUSÃO	41

1. INTRODUÇÃO

O termo polímero foi criado pelo químico alemão J. Berzelius em 1832. Enquanto, seu surgimento, do ponto de vista científico, ocorreu já na segunda metade do século XIX (HAGE JR, 1998). Na sociedade atual, os polímeros sintéticos representam um avanço tecnológico significativo, devido à sua versatilidade e da praticidade que proporciona à vida moderna. No entanto, do ponto de vista ambiental, sua produção e uso em larga escala pode causar sérios danos aos ecossistemas.

De acordo com o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA), são produzidas cerca de 460 milhões de toneladas de plástico por ano e estima-se que esse número triplicará até 2060. Adicionalmente, a Organização das Nações Unidas (ONU) aponta que a poluição plástica é a segunda maior ameaça ao meio ambiente, uma vez que o aumento na produção de plásticos descartáveis supera nossa capacidade em lidar com ele. De acordo com pesquisas feitas pela organização não governamental (ONG) norte americana *Center for Climate Integrity*, apenas 9% dos plásticos são reciclados no mundo. No Brasil esta situação é ainda mais preocupante, com 1,3% dos produtos plásticos passando pelo processo de reciclagem (ONU, 2023)

Os danos ecológicos causados pelos polímeros perpassam por diversas etapas de sua vida útil, desde a extração da matéria-prima para produção de plásticos sintéticos, até o descarte de forma irregular. E que, devido à sua elevada durabilidade após o uso, este último, configura-se como um desafio relevante à sociedade contemporânea, trazendo impactos significativos aos ecossistemas e à saúde humana (HEINRICH BÖLL STIFTUNG, 2020).

Paralelamente ao aumento da produção e do consumo de plástico, observa-se um elevado desperdício na cadeia produtiva do leite. Segundo dados do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA, 2023), cerca de 98% dos municípios brasileiros possuem atividade leiteira, concentrada majoritariamente em propriedades de pequeno e médio porte. As quais, em geral, demandam de melhorias em gestão, infraestrutura e sustentabilidade.

O desperdício de leite ocorre já nas fases iniciais da cadeia produtiva, ainda nas propriedades rurais (EMBRAPA, 2024). Diversos fatores contribuem para as perdas, como o planejamento inadequado de estoques, falhas e quebras de equipamentos, problemas sanitários relacionados à saúde dos animais, além de tempos excessivos de espera durante o processo de ordenha e transporte (BRITO, 2025).

Diante do exposto, o presente trabalho aborda a produção e investigação do bioplástico Galalite (caseína-formaldeído), como uma alternativa sustentável a alguns materiais de plástico sintéticos. Para avaliar sua viabilidade técnica, foram realizados ensaios mecânicos e térmicos. Para além de seu uso histórico como substituto ecológico do marfim em utensílios decorativos, a galalite demonstra relevância contemporânea em aplicações modernas como acessórios de moda (óculos e joias) e componentes eletrônicos (botões, knobs, isoladores elétricos e componentes personalizados de pequenos dispositivos). Dessa forma, a pesquisa visa não apenas resgatar as propriedades deste material clássico, mas também reposicioná-lo como uma solução viável e inovadora no contexto da economia circular.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Determinar o comportamento mecânico e de comportamento térmico do polímero caseína formalina produzido através de proteína extraída de leite impróprio para consumo.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Obter polímero termorrígido caseína formalina a partir de proteína extraída do leite;
- Identificar os grupos funcionais do polímero por meio da análise *Fourier Transform-Infrared Spectroscopy* (FTIR);
- Analisar o comportamento mecânico do polímero através de ensaio de flexão em três pontos e ensaio de tração;
- Avaliar a estabilidade térmica do polímero através de técnicas termo analíticas.

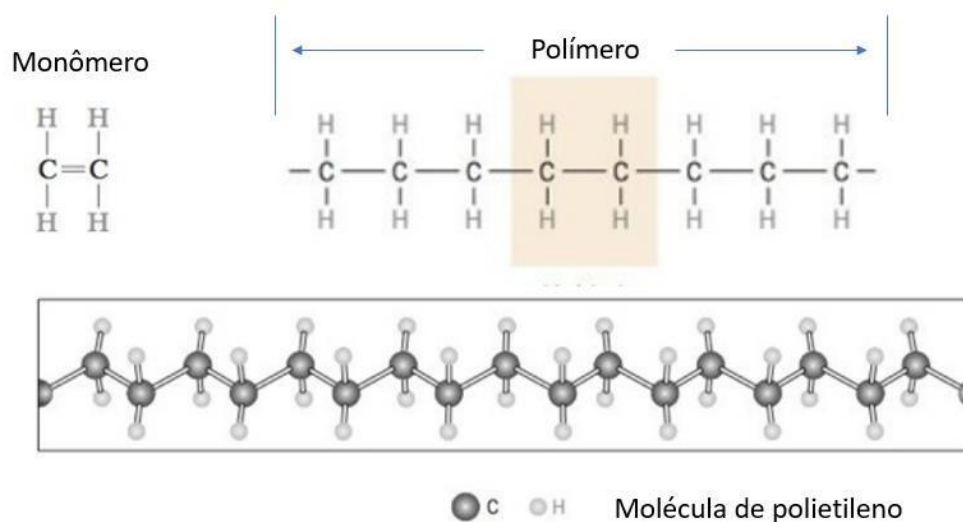
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Fundamentos de polímeros

Polímeros (*polymers*) são macromoléculas caracterizadas por seu tamanho, estrutura química e interações intramoleculares e intermoleculares. Possuem unidades químicas ligadas por covalências, repetidas regularmente ao longo da cadeia, denominadas meros. O número de meros

da cadeia polimérica é denominado grau de polimerização, sendo geralmente simbolizado por n ou DP (*degree of polymerization*) (MANO, 1999, p 3). A figura 1 apresenta um exemplo de molécula polimérica.

Figura 1. Cadeia polimérica do polietileno



Fonte: Callister (2008)

Esses compostos tiveram um grande desenvolvimento no século XX, sendo atualmente usados na forma de plásticos, fibras e borrachas (FELTRE, 2004).

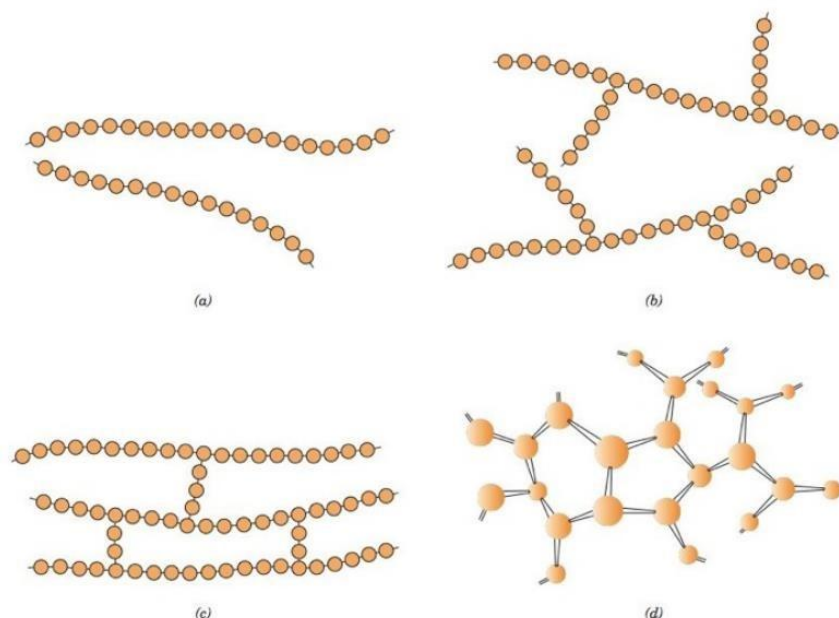
Os polímeros são obtidos através de dois tipos principais de reações de polimerização, as reações de adição e as de condensação. O tipo de reação que ocorre depende dos grupos funcionais existentes nos materiais de partida. Muitos desses materiais são produzidos a partir de derivados do petróleo, embora alguns polímeros sejam feitos a partir de produtos agrícolas como milho e soja. (ATKINS, 2018, p. 808).

Os polímeros podem ainda ser classificados através das características de fusibilidade e/ou solubilidade em termoplásticos e termofixos (MANO, 1999).

Os termoplásticos são matérias que podem ser conformados mecanicamente diversas vezes, desde que sejam reaquecidos, tornando-os facilmente recicláveis. Eles apresentam diferentes níveis de cristalinidade e suas cadeias poliméricas são lineares ou ramificadas (MANO, 1999).

Por outro lado, os polímeros termofixos só podem ser moldados durante um estágio intermediário do processo de fabricação. Uma vez curado, o produto final torna-se duro e não amolece com o aumento da temperatura. Eles são insolúveis, infusíveis, mais resistentes ao calor do que os termoplásticos, completamente amorfos e possuem uma estrutura tridimensional em rede. A figura 2 mostra a estrutura molecular de polímeros termoplásticos e termofixos (MANO, 1999).

Figura 2. Estruturas moleculares (a) linear, (b) ramificada, (c) com ligações cruzadas e (d) em rede (tridimensional).



Fonte: Callister (2008)

2.1.1 Biopolímeros

Os biopolímeros constituem uma classe de polímeros que desperta bastante atenção e interesse de pesquisadores e da indústria. Em contraste com os polímeros sintéticos, os biopolímeros são produzidos por organismos vivos, como plantas animais e fungos (HABITZREUTER *et al.*, 2024).

Os quais são capazes de se decompor de maneira mais eficiente, estando em consonância com as expectativas e necessidade global de soluções que reduzam os impactos ambientais decorrentes da produção massiva de plásticos (SILVA *et al.*, 2023).

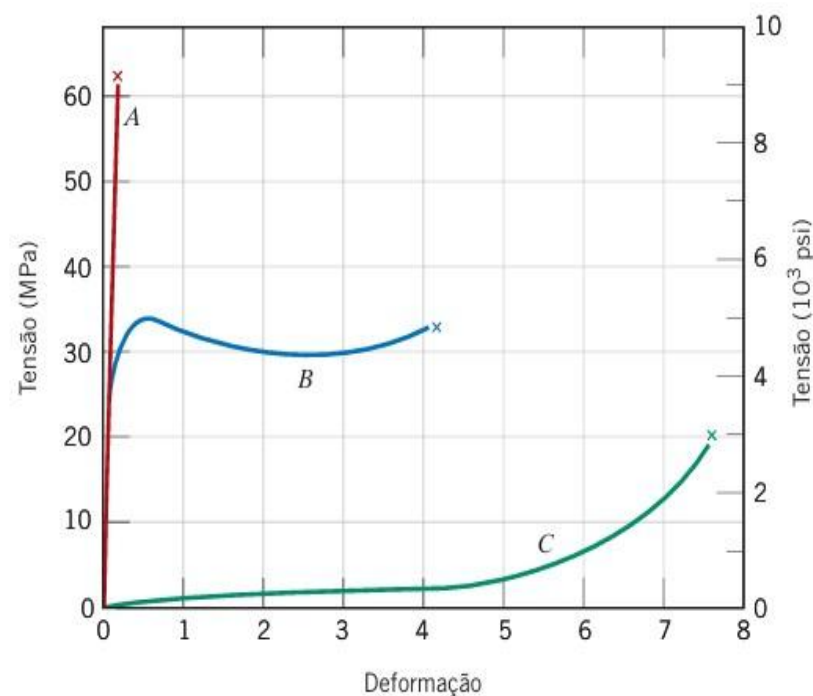
Os biopolímeros apresentam diversas vantagens em relação aos polímeros sintéticos como o seu caráter biodegradável, o qual pode ser degradado por microrganismos em condições específicas do ambiente. Além disso, os biopolímeros podem ter propriedades físico-químicas ajustadas conforme a aplicação desejada (GRIZZO *et al.*, 2019).

Pesquisas e desenvolvimento acerca dos biopolímeros e de derivados do petróleo tem avançado bastante nos últimos anos de forma significativa. Em que, um dos pontos principais em relação aos biopolímeros é a melhoraria a funcionalidade e a viabilidade (SANTOS, 2025).

2.1.2 Comportamento mecânico dos polímeros

Tipicamente, os polímeros exibem diferenças de comportamentos tensão-deformação, figura 3. A curva A ilustra o comportamento tensão-deformação para um polímero frágil, mostrando que ele fratura enquanto se deforma elasticamente. O comportamento para um material plástico, curva B, é semelhante ao de muitos materiais metálicos, em que, observa-se uma deformação inicial elástica, seguida por escoamento e uma região de deformação plástica. Enquanto, a curva C apresenta um comportamento totalmente elástico, onde são observadas grandes deformações recuperáveis e produzidas sob baixos níveis de tensão, com uma elasticidade típica de borrachas ou elastômeros (CALLISTER JR, 2008).

Figura 3. Comportamento tensão-deformação para polímeros frágeis (curva A), plásticos (curva B) e altamente elásticos (elastoméricos) (curva C).



Fonte Callister (2008)

As resistências à fratura dos materiais poliméricos são baixas em relação às dos metais e das cerâmicas. Como regra geral, os polímeros termofixos apresentam fratura do tipo frágil, devido às suas redes compostas por muitas ligações cruzadas. Em que, durante o processo de fratura, trincas se formam em regiões onde há concentradores de tensões, como riscos, entalhes e defeitos afilados, seguido da propagação desta trinca e da ruptura do corpo de prova. (CALLISTER JR, 2008).

Na tabela 1, é apresentado os valores de modulo de elasticidade, cisalhamento e a razão de Possion para alguns polímeros.

Tabela 1. Propriedades mecânicas para alguns polímeros

Material	Módulo de Yuang (Gpa)	Modulo de cisalhamento (Gpa)	Razão de Poisson (Gpa)
Polietileno (PET)	2,46 - 4,14	-	-
Cloreto de polivinila (PVC)	2,41 - 4,14	-	0,38
Baquelite	2,76 - 4,83	-	-
Epóxi	2,41	-	-
Policarbonato (PC)	2,38	-	0,36
Poliéster	2,04 - 4,41	-	-
Naylon	1,59 - 3,79	-	0,39

Fonte: Modern Plastics (2022)

2.1.3 Comportamento térmico dos polímeros

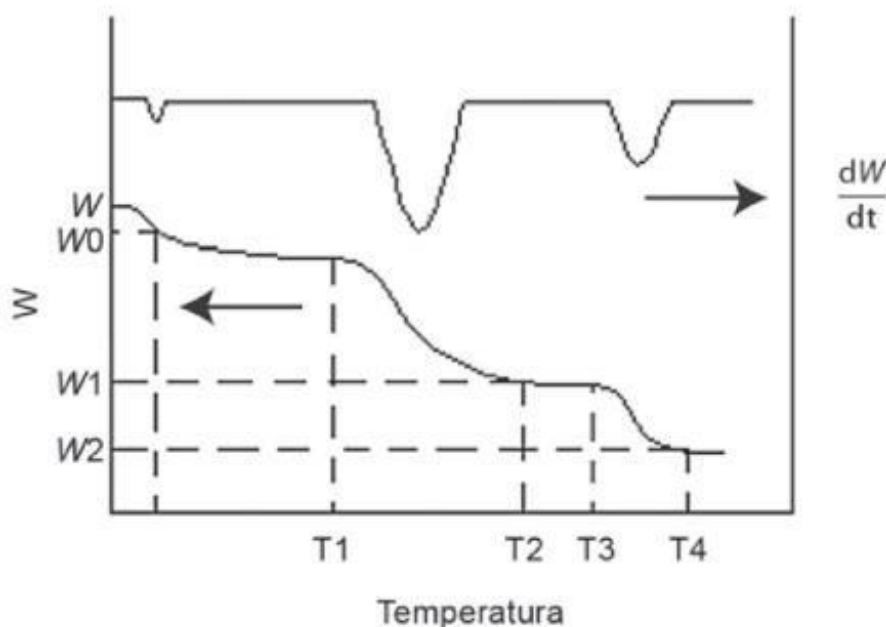
A diferença que pode ser mais facilmente observada nos polímeros é o seu comportamento térmico. Nos polímeros termoplásticos, cujas cadeias não estão interligadas, ao serem submetidos a um aumento de temperatura, tem-se o deslizamento das cadeias umas sobre as outras. Assim, o material vai se tornando um líquido viscoso. Nos termofixos, por sua vez, como as cadeias apresentam ligações primárias entre si formando ligações cruzadas, este movimento é restrito. Dessa forma, esses materiais apresentem boa resistência à temperatura e não podem ser remoldados nem reprocessados (ANDRADE, 2021).

Entre os principais ensaios térmicos para polímeros está a termogravimetria (TGA - *Thermogravimetric Analysis*). Essa é uma técnica dinâmica na qual a perda de peso de uma amostra é medida de forma continua, enquanto a temperatura é aumentada a uma taxa constante.

Alternativamente, a perda de peso pode ser medida como uma função do tempo a uma temperatura constante. Este ensaio é utilizado no estudo da sua estabilidade e decomposição térmica de polímeros. Outras aplicações incluem a determinação da composição de compostos intermediários que possam formar o polímero, composição de resíduos se presentes, extensão da cura em polímeros de condensação, composição e alguma informação sobre a distribuição das sequências de monômeros nos copolímeros, entre outras aplicações (SPINA, 2014).

A figura 4 mostra um termograma típico de TGA, em que a pequena perda inicial de peso (de w a w_0) resulta geralmente da perda de solvente. Se ocorrer a $100\text{ }^\circ\text{C}$, assume-se normalmente como perda de água e (de T_1 a T_2) as temperaturas.

Figura 4. Termograma típico de TGA para polímeros



Fonte: Gustavo Spina (2014)

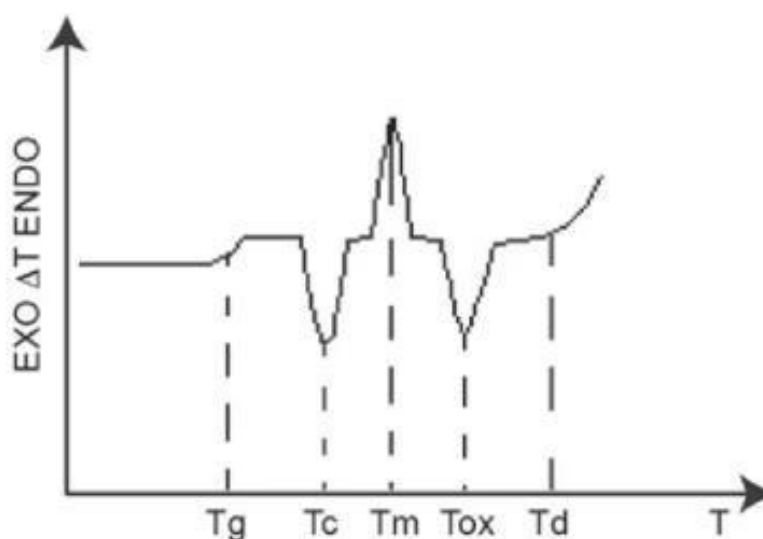
Bonilla e Sobral 1965, destacaram o uso da termogravimétrica para mostrar a decomposição em vários estágios e descobriram que a caseína começa a se degradar a $104\text{ }^\circ\text{C}$, enquanto a comercial se degrada a $84\text{ }^\circ\text{C}$. Nos estudos de Kaner *et. al.* (2020), a caseína apresentou perda de massa até $\sim 100\text{ }^\circ\text{C}$ devido à desidratação ($\sim 10\%$), seguida por duas grandes etapas de degradação entre $248\text{--}380\text{ }^\circ\text{C}$ e $380\text{--}680\text{ }^\circ\text{C}$, resultando em um resíduo de aproximadamente $15\text{--}22\%$.

Portanto, espera-se que a galalite apresente comportamento similar, com possíveis alterações na temperatura de início e nas massas residuais devido à reticulação com formaldeído.

Outro ensaio de temperatura importante é a análise térmica diferencial (DTA - *Differential Thermal Analysis*). Nesse ensaio, a amostra e uma substância de referência inerte são aquecidas por uma mesma fonte de aquecimento a uma taxa constante. A substância de referência não deve sofrer transições térmicas na faixa de temperatura de interesse. A diferença de temperatura ($\Delta T = T_s - T_r$) entre a amostra e a referência é medida e registrada num gráfico como uma função da temperatura. Este método permite identificar e caracterizar mudanças térmicas em materiais, como pontos de fusão, transições de fase e reações exotérmicas ou endotérmicas (SPINA, 2014).

A figura 5 ilustra um gráfico de DTA que apresenta as transições possíveis de serem observadas em polímeros. Em que T_g é a transição vítrea, T_c é a temperatura de cristalização, T_m é a temperatura de fusão, T_{ox} é a temperatura de oxidação e T_d é a temperatura de degradação.

Figura 5. Termograma típico DTA para polímeros



Fonte: Gustavo Spina (2014)

Embora a caseína formaldeído seja classificada como um polímero termofixo, análises de Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC - *Differential Scanning Calorimetry*) evidenciam que o material apresenta, inicialmente, um comportamento térmico semelhante ao de polímeros termoplásticos. Tal ambiguidade já havia sido relatada por Sutermeister 1959, o qual descreveu que, ao ser aquecida, a galalite amolece em uma faixa de temperatura entre 190 °C e 212 °C, retornando rapidamente ao seu estado rígido após o resfriamento (KANER, 2017). Esse comportamento sugere que, embora a estrutura reticulada da caseína formaldeído a caracterize como um termofixo, suas propriedades térmicas iniciais revelam uma resposta transitória compatível com materiais termoplásticos.

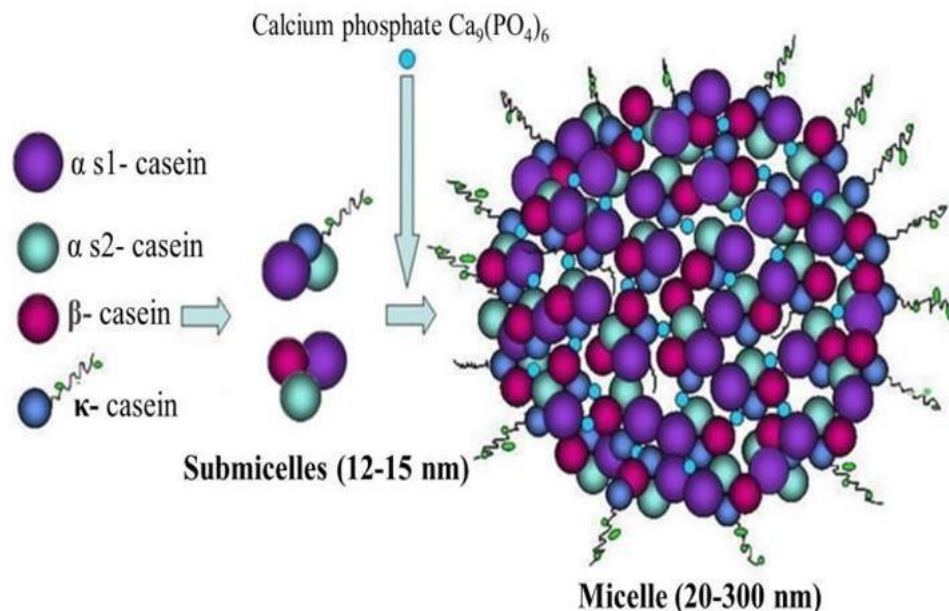
Ainda em seu trabalho, Karner faz menção a um possível ponto de fusão da galalite que estar acima de $\sim 230^{\circ}\text{C}$. A rigor, à caseína formalina não tem um ponto de fusão real, entretanto, a certas temperaturas, ela amolece pouco antes de sua degradação. Sutermeister afirma ainda que é possível dobrar e gravar em relevo o plástico caseína até certo ponto, mas não para moldá-lo.

2.1.4 Caseína

O leite é um produto que reúne várias proteínas em sua composição. Nesse grupo encontra-se a caseína, que representa cerca de 85% das proteínas lácteas. A caseína pode ser classificada em α_{s1} -, α_{s2} -, β - caseína e κ -caseína. As caseínas são anfipáticas (características hidrofílicas e hidrofóbicas) e se agregam formando grânulos insolúveis chamados “micelas”, unidas através de fosfato de cálcio.

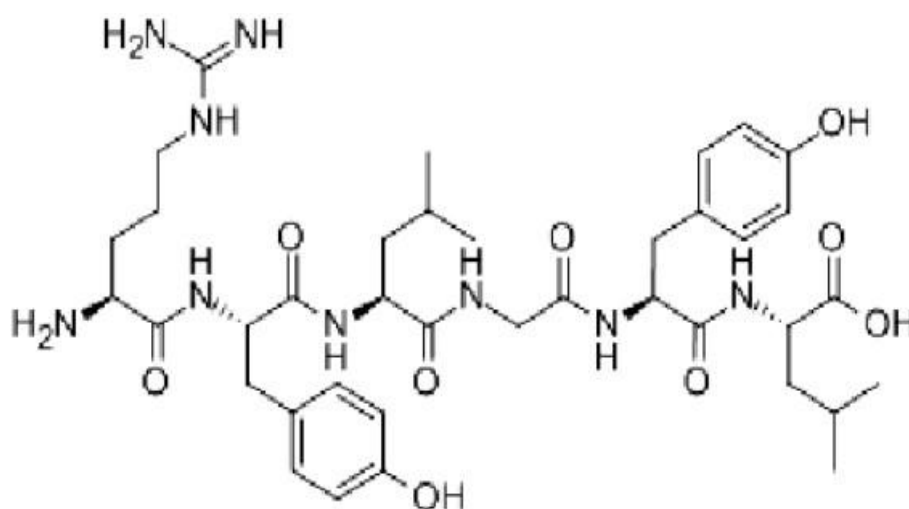
Por mais de 40 anos a estrutura interna e a composição das micelas da caseína tem sido estudadas e as informações disponíveis são bastante precisas (HORNE, 2006; QI, 2007). A figura 6 apresenta uma representação esquemática da caseína.

Figura 6. Representação esquemática da (a) Molécula da micela da caseína e (b)



Fonte: Petrova (2018)

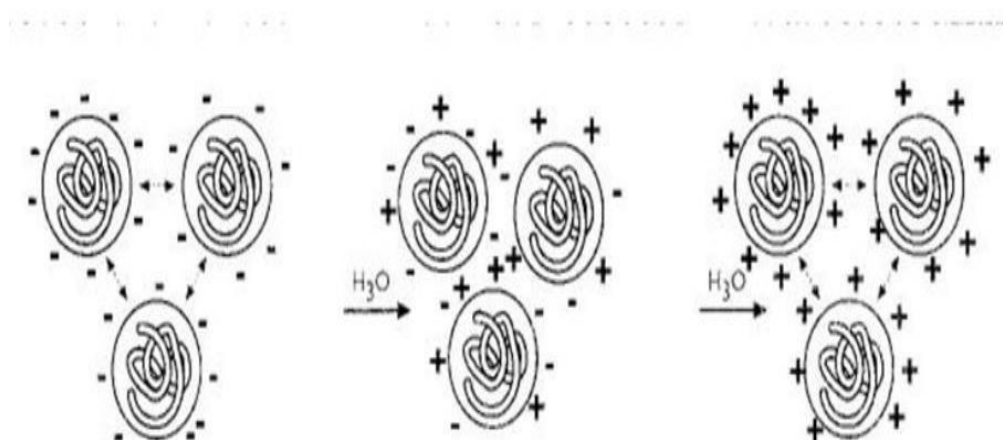
(b) Estrutura molecular da caseína



Fonte: DHASMANA (2022)

A caseína possui um comportamento dependendo do pH do meio. Em soluções alcalinas, a caseína encontra-se estabilizada e dissolvida, seu ponto isoelétrico é o pH no qual há equilíbrio entre as cargas negativas e positivas, nessa fase a proteína está estável e não se agrega. Quando o pH diminui (fica ácido), a k-caseína que é a molécula mais externa é removida ou modificada fazendo com que a caseína chegue perto do seu ponto isoelétrico (pH de aproximadamente 4,6) e, com isso, gerando um desequilíbrio de cargas elétricas, tornando a proteína instável e ocasionado a coagulação (ANDRADE, 2015). A figura 7 ilustra o processo de coagulação da caseína.

Figura 7. Coagulação da caseína a partir da instabilidade de cargas



Fonte: Capellano (2022)

2.1.5 Caseína formalina

O polímero caseína formalina ou galalite do grego “*gala*” (leite) e “*litos*” (pedra) é um polímero termorrígido cuja rigidez não se altera com o aquecimento, não pode ser fundido ou remoldado.

Registrado na Alemanha em 1899 por Spitteler e Krische, mas só produzido industrialmente a partir de 1904, a caseína formalina obtida a partir da proteína extraída do leite de vaca, pode apresentar níveis diferentes de plasticidade.

A produção desse polímero iniciou-se com as sobras da indústria de laticínios em um processo lento, tóxico e poluente. A caseína era tratada com substâncias ácidas, lavada, refinada e pigmentada, formando uma massa que poderia ser extrudada e moldada em formas básicas como placas e cilindros. Após esse processo, a massa era então mergulhada em formol por semanas ou até mesmo meses permitindo que as moléculas da proteína se reticulassem formando um material rígido que poderia ser cortado, usinado, termoformado e polido. (LESSA, 2008).

Inicialmente, suas aplicações incluíam o uso como material decorativo para projetos imobiliários e na manufatura de pequenos objetos como botões, fivelas, bijuteria, ornamentos, material de escrita, etc. (KANER *et al*, 2017; LESSA, 2008).

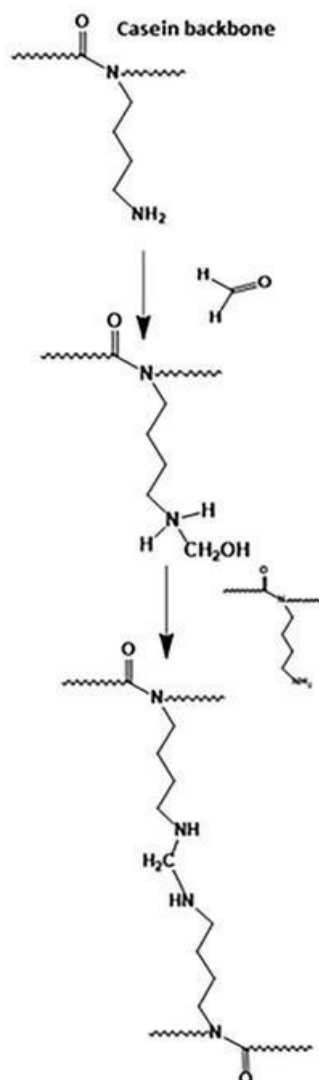
Nos últimos anos, autores tem estudado a possibilidade expansão da utilização desse material para uso comercial. Cappellano e Licco (2017) investigaram a possibilidade de valorização do leite não comercializado dentro do período de validade, o qual é normalmente descartado pela indústria de laticínios e considerado um resíduo agroindustrial. O estudo teve como objetivo transformar esse subproduto em um bem econômico com valor agregado, por meio da produção do bioplástico Galalite, destinado à confecção de artigos artesanais. Para isso, os autores analisaram as principais rotas químicas para a extração da caseína - proteína presente no leite - e avaliada a viabilidade técnica da produção da Galalite utilizando mão de obra não especializada. Os resultados obtidos demonstraram que o aproveitamento do leite descartado pelo comércio e pela cadeia produtiva é tecnicamente viável para a fabricação desse biopolímero.

Haezel e Lewandovski (2023) estudaram o desenvolvimento de um fio e polímero biodegradável a partir da caseína extraída do leite impróprio para consumo humano, com a adição de compostos naturais para melhorar características como maleabilidade, resistência e durabilidade.

2.1.6 Reticulação com formaldeído

Como o formaldeído é um monoaldeído, o processo de reticulação da caseína ocorre em duas etapas distintas. Na primeira etapa, o formaldeído reage com um grupo amina ($-NH_2$) presente na estrutura da caseína, formando um β -aminoálcool (ou metilolamina). Em seguida, esse intermediário reage com outra função amina de uma cadeia proteica vizinha, originando uma ponte metileno ($-CH_2-$) que conecta as duas cadeias de caseína. Esse mecanismo de reação é ilustrado na Figura 8.

Figura 8. Estrutura da caseína formalina



Fonte: Viora (2023)

3 . METODOLOGIA

3.1 Obtenção da caseína

O biopolímero caseína formalina foi sintetizado a partir da caseína derivada do leite bovino com um formaldeído, conforme metodologia originalmente proposta por Spitteler e Krische 1899.

Para obtenção da caseína, foram transferidos 4 L de leite bovino impróprio para consumo, provenientes de uma propriedade rural do município de Bom Jesus da Lapa - BA. A Figura 9 apresenta béqueres com capacidade de 1000 mL contendo o leite.

Figura 9. Béqueres de contendo leite.



Fonte: Autor (2025)

Então, o leite foi submetido ao aquecimento em agitadores magnéticos (LUCADEMA modelo LUCA-0851) durante 15 minutos até atingir a temperatura média de 40 °C, Figura 10.

Figura 10. Aquecimento do leite sobre agitação magnética.



Fonte: Autor (2025)

Em seguida, ácido acético (vinagre) foi adicionado na proporção de 1:20, isto é, 5 mL para cada 100 mL de leite. A adição do ácido foi realizada de forma gradual, sob agitação contínua, para uma eficiente separação da fase proteica, da gordura e do soro, em um processo denominado sedimentação. Desse modo, ocorreu a formação de uma mistura heterogênea, com a precipitação da caseína no fundo do recipiente conforme figura 11.

Figura 11. Mistura heterogênea obtida pela precipitação da caseína (depositada no fundo do recipiente).



Fonte: Autor (2025)

Com a identificação da fase proteica, esperou-se 10 minutos para permitir a completa separação da caseína dos demais componentes. Em seguida, por meio do processo de decantação, Figura 12, a maior parte da fase líquida (composta por soro e gorduras) foi cuidadosamente removida.

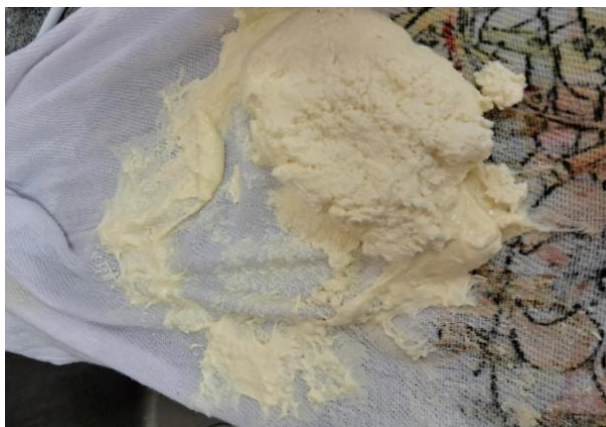
Figura 12. Processo de decantação para extração da caseína do leite.



Fonte: Autor (2025)

Finalmente, obtém-se a caseína em um estado semissólido, Figura 13, utilizada na síntese do biopolímero.

Figura 13. Caseína fresca



Fonte: Autor (2025)

3.2 Síntese do biopolímero

O biopolímero foi obtido por meio de vazamento da caseína em moldes previamente fabricados em impressora 3D (GTMAX, Core H4), Figura 14.

Figura 14. Moldes: (a) fabricados em impressora 3D e (b) preenchidos com a caseína.



Fonte: Autor (2025)

O preenchimento do molde foi realizado manualmente, utilizando a caseína ainda em seu estado fresco, Figura 15. Em seguida, os moldes foram armazenados e mantidos à temperatura ambiente. Após um período de sete dias, o material adquiriu um aspecto mais rígido, conforme apresentado na Figura 16.

Figura 15. Moldes preenchidos com a caseína.



Fonte: Autor (2025)

Figura 16. Amostras após cura da caseína.



Fonte: Autor (2025)

Posteriormente, os corpos de prova foram removidos dos moldes. Para conferir a rigidez das amostras, foi utilizada uma solução contendo 500mL de formol a 37% inibido, comercializado pela Top Chemical. O formol atua como agente de reticulação, promovendo a formação de ligações cruzadas entre as cadeias proteicas da caseína, o que resulta em maior rigidez e resistência mecânica do material.

Assim, após a remoção dos corpos de prova dos moldes, as amostras foram imersas na solução em um recipiente que, posteriormente seria vedado para conter a liberação de vapores pelo formol, Figura 17.

Figura 17. Amostras imersas em formol.



Fonte: Autor (2025)

Após um período de sete dias, as amostras foram removidas da solução, secadas ao ar livre por dois dias e então lixadas para regularização da superfície, Figura 18.

Figura 18. Biopolímero.



Fonte: Autor (2025)

3.3 Ensaio de flexão em 3 pontos

Os corpos de prova utilizados no ensaio de flexão foram confeccionados conforme os critérios estabelecidos pela norma ASTM D790, cujas dimensões são definidas em: 150 mm de comprimento, 12,7 mm de largura e 10 mm de altura.

Os ensaios mecânicos de flexão foram realizados em duplicata, utilizando uma máquina universal de ensaios (Emic, modelo DL 30000).

Inicialmente, foi checada as dimensões finais dos corpos de prova com paquímetro, observando-se uma contração das amostras:

- corpo de prova 1 (CPF1): comprimento $L_0 = 132$ mm, altura $h = 7$ mm e largura b aproximada de 10 mm;
- corpo de prova 2 (CP2) foram mensuradas, obtendo-se comprimento inicial $L_0=134$ mm, altura $h=7$ mm e largura aproximada $b=10$ mm.

Para o ensaio, mostrado na Figura 19, o corpo de provas foi posicionado sobre apoios distância (L), estimada conforme a equação 1, foi de 112 mm. Sendo aplicada uma carga crescente com uma com velocidade de 5 mm/min.

$$L = 16h \quad (1)$$

Figura 19. Ensaio de flexão de três pontos.



Fonte: Autor (2025)

A tensão de flexão (σ_f) foi calculada utilizando a equação 2, onde F representa a força aplicada sob o corpo de prova, L é a distância entre os apoios, b corresponde á largura e h a altura da seção transversal.

$$\sigma_F = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (2)$$

A deformação de flexão ε foi calculada pela Equação 3, em que s representa a deflexão da amostra, h é a altura da seção transversal e L corresponde à distância entre os pontos de apoio.

$$\varepsilon = \frac{6sh}{L^2} \quad (3)$$

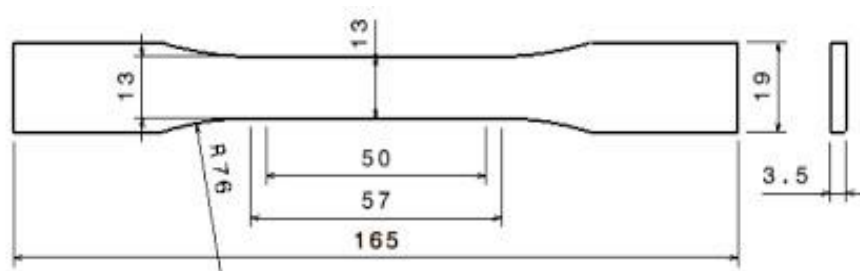
O módulo de flexão E é representado pela equação 4, onde σ_{f1} é a tensão no ponto 1, σ_{f2} é tensão no ponto 2, ε_{f1} é deformação no ponto e ε_{f2} é deformação no ponto 2.

$$E = \frac{\sigma_{f2} - \sigma_{f1}}{\varepsilon_{f2} - \varepsilon_{f1}} \quad (4)$$

3.4 Ensaio de tração

Os corpos de prova utilizados no ensaio de tração foram confeccionados seguindo os critérios estabelecidos pela norma ASTM D638, cujas dimensões estão ilustradas na figura 20.

Figura 20. Dimensões das amostras para os ensaios de flexão.



Fonte: ASTM D638 (2023)

De maneira análoga aos ensaios de flexão, os ensaios de tração também foram realizados em duplicata. As dimensões das amostras foram determinadas com o auxílio de um paquímetro com resolução de 0,05 mm. Para o primeiro corpo de prova de tração (CPT1), o comprimento inicial L_0 foi de 143 mm, a espessura t de 7 mm, w_c a altura com valor de 10 mm e um comprimento útil L de 57 mm.

Os ensaios de tração foram realizados em uma máquina universal de ensaios (Emic, modelo DL 30000). Inicialmente, o equipamento foi devidamente calibrado e configurado. Em seguida, o corpo de prova CPT1 foi posicionado e fixado firmemente nas garras da máquina, garantindo o alinhamento adequado. Posteriormente, os parâmetros do software de controle foram ajustados, estabelecendo-se a força inicial de 13 N e a velocidade de ensaio de 5 mm/min. Em seguida, o

equipamento é acionado e a força de tração é aplicada sobre o material até a sua ruptura. A Figura 21 ilustra o posicionamento do corpo de prova no equipamento durante o ensaio.

Figura 21. Ensaio de tração para a caseína formalina



Fonte: Autor (2025)

O segundo corpo de prova de tração (CPT2), possuía comprimento inicial de $L_0 = 143$ mm, altura $w_c = 10$ mm, espessura $t = 7$ mm e comprimento útil de $L = 57$ mm. Subsequentemente, foi submetido ao mesmo procedimento experimental descrito anteriormente. O espécime foi posicionado e fixado nas garras da máquina universal de ensaios, assegurando o correto alinhamento. Os parâmetros de ensaio mantiveram-se constantes, com força inicial de 13 N e velocidade de 5 mm/min, de forma a garantir a reprodutibilidade dos resultados.

Para o ensaio de tração, a tensão de engenharia σ foi obtida a partir da equação 5, onde F é força aplicado sobre a amostra e A_0 a área inicial.

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (5)$$

A deformação de engenharia \mathcal{E} foi calculada utilizando a equação 6, em que ΔL é deformação e L_0 o comprimento inicial.

$$\mathcal{E} = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (6)$$

Finalmente, o módulo de elasticidade E foi calculado pela equação 7, onde σ_1 é a tensão no ponto 1, σ_2 é tensão no ponto 2, ε_1 é deformação no ponto 1 e ε_2 é deformação no ponto 2.

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (7)$$

3.5 Análise por FTIR

A espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) é uma técnica analítica utilizada para identificar grupos funcionais e caracterizar a composição química de materiais orgânicos e inorgânicos. O método baseia-se na absorção de radiação infravermelha pela amostra, resultando em um espectro característico que permite avaliar a estrutura molecular, a pureza, possíveis contaminações e processos de degradação (GALLAGHER, 2005).

Os testes de FTIR foram realizados no equipamento (Shimadzu, modelo IR Spirit) Figura 22, utilizando duas amostras de caseína: uma antes e outra após a imersão em solução de formol. Para a análise, as amostras foram previamente transformadas em pó.

Figura 22. Equipamento para análise de FTIR.



Fonte: Autor (2025)

Figura 23. Ensaios de DTA e TGA



Fonte: Autor (2025)

3.6 Análises térmicas

De início, o cadinho metálico utilizado para conter a amostra no equipamento foi lavado com ácido – e carbonizado, a fim de eliminar possíveis impurezas que poderiam interferir no ensaio. Em seguida, o cadinho vazio foi inserido no equipamento (Figura 23) DTG - 60 SIMULTANEQUS APPARATUS da marca SHIMADZU para ser feito a calibragem. Tal processo foi realizado seis vezes, a cada cinco minutos, totalizando trinta minutos, para garantir a segurança do ensaio.

Após a calibragem, o cadinho foi retirado do equipamento e foi realizada a pesagem de 0,01 g de amostra, espalhada de forma homogênea dentro do cadinho. Logo depois, o cadinho foi inserido novamente no aparelho em uma atmosfera de nitrogênio. Após a configuração do equipamento, deu-se início ao ensaio térmico. Depois de 1h18min de tratamento térmico, esperou-se trinta minutos para o resfriamento do ambiente para que a amostra fosse retirada do equipamento.

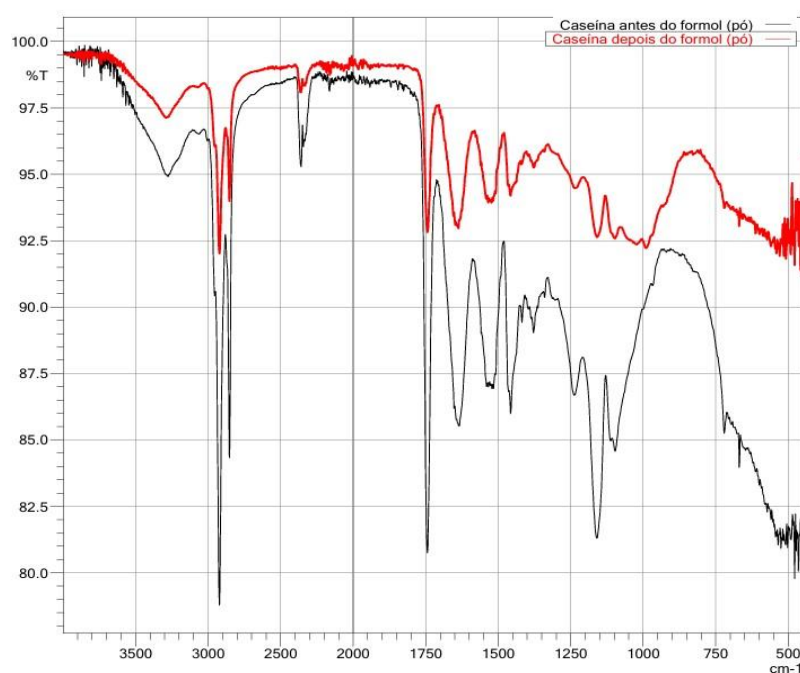
O aquecimento foi feito de 0 a 800 °C com uma taxa de aquecimento de 10 °C/min sob uma atmosfera controlada de nitrogênio.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Análise de FTIR

A Figura 24 apresenta os espectros de FTIR da caseína em pó antes (linha preta) e após (linha vermelha) a imersão em formaldeído. O eixo y (ordenadas) indica o quanto de luz vermelha é transmitida através da amostra e o eixo x (abscissa) representa a energia de radiação absorvida.

Figura 24. Espectros de FTIR da caseína antes e após o tratamento com formol.



Fonte: Autor (2025)

Na região de 3000 a 3500 cm^{-1} , correspondente às vibrações de estiramento dos grupos O-H e N-H, observou-se uma alteração significativa na intensidade das bandas. Essa modificação está associada à reação do formaldeído com os grupos amina da caseína, levando à formação de pontes metilênicas (CH_2) entre cadeias proteicas, caracterizando o processo de reticulação (crosslinking).

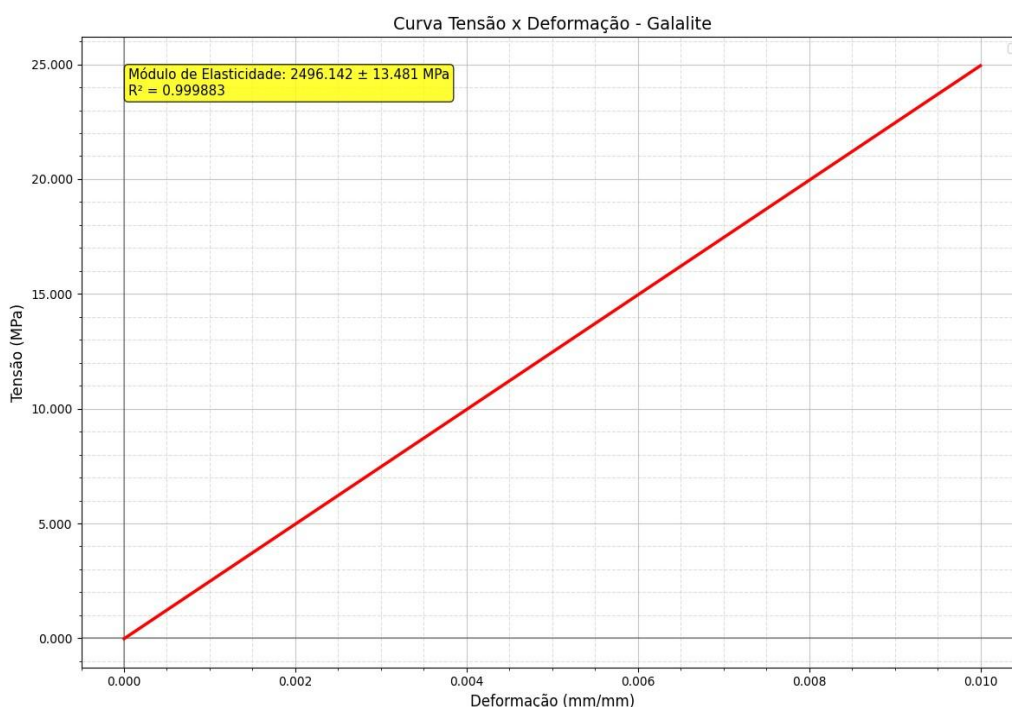
Posteriormente, observaram-se bandas características dos grupos funcionais de amidas primárias, atribuídas ao estiramento da ligação C=O na faixa de 1600 a 1700 cm^{-1} , e Amidas secundárias, relacionadas ao estiramento C-N e à deformação N-H, localizadas entre 1500 e 1550 cm^{-1} , típicas da estrutura proteica da caseína. As alterações observadas nessas bandas indicam modificações químicas nas ligações, associadas à reação do formol com grupos amina, resultando

na formação de pontes metilênicas (CH_2) entre cadeias proteicas, evidenciando a ocorrência de ligações cruzadas (crosslinking), de acordo com a teoria.

4.2 Comportamento mecânico

A Figura 25 apresenta a curva tensão x deflexão referente ao ensaio de flexão do biopolímero, ajustada pelo método dos mínimos quadrados.

Figura 25. Curva tensão x deflexão gerada pelo ensaio de flexão para a galalite.



Fonte: Autor (2025)

A partir dessa curva, predominantemente linear até o ponto de ruptura, observa-se que o comportamento mecânico do material foi indicando um regime essencialmente elástico e ausência de escoamento plástico. O módulo de elasticidade para a caseína formalina foi de $2496,14 \pm 13,41$ MPa. Esse valor situa-se na faixa típica de polímeros termo endurecidos comerciais, como a baquelite com valores na faixa de 2040 a 4410 MPa, e aproxima-se do valor reportado para resinas epóxi que é de 2410 MPa. A concordância entre o módulo experimental e os valores tabelados reforça a caracterização do material como um polímero rígido, embora diferenças possam decorrer de variabilidade amostral, condições de ensaio (taxa de deformação, temperatura, umidade), presença de aditivos ou tratamentos na amostra e erro humano.

A Figura 26 é apresenta um corpo de prova fraturado após o ensaio de flexão, na qual observa-se uma fratura tipicamente frágil, comum em polímeros termorrígidos. Verifica-se que a falha ocorreu de forma brusca, compatível com o caráter frágil do material, sem apresentar sinais de deformação plástica significativa. Esse resultado reforça a natureza termorrígida do polímero analisado, cuja fratura tende a ser súbita, com baixa capacidade de absorção de energia antes da ruptura.

Figura 26. Corpo de provas fraturado no ensaio de flexão.

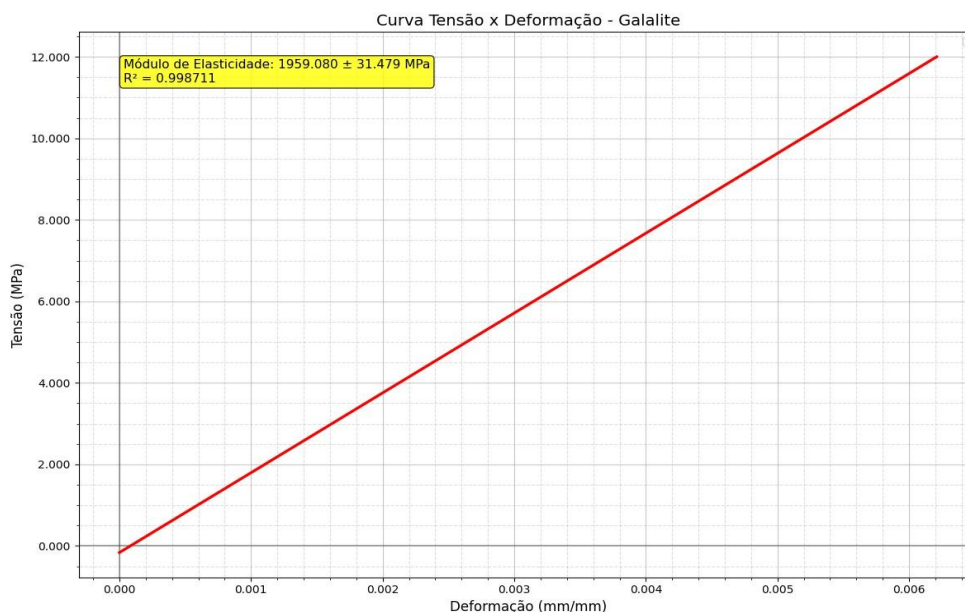


Fonte: Autor (2025)

Portanto, os resultados experimentais obtidos nos testes de flexão corroboram as características mecânicas já descritas para a Galalite, evidenciando que este é um material rígido e resistente, mas com baixa ductilidade.

A Figura 27 apresenta a curva tensão-deformação da galalite submetida a esforços de tração.

Figura 27. Curva tensão x deformação gerada pelo ensaio de tração para a galalite.



Fonte: Autor (2025)

A partir dos resultados dos ensaios de tração realizados no biopolímero, fica evidenciado um comportamento essencialmente linear até o ponto de ruptura, sem indícios de deformação plástica. Sendo um material que apresenta rigidez moderada e baixa ductilidade, indicando um comportamento predominantemente frágil deste material.

A partir do ajuste linear dos dados experimentais, foi obtido o módulo de elasticidade de $1959,08 \pm 31,48$ MPa, com coeficiente de determinação $R^2 = 0,9987$, o que demonstra a forte correlação entre a tensão aplicada e a deformação elástica da amostra. Ao comparar esse valor com os de polímeros termorrígidos comerciais, observa-se que o módulo de elasticidade da galalite encontra-se muito próximo ao intervalo para a baquelite indicando semelhanças no comportamento mecânico. Entretanto, esse valor é significativamente inferior ao observado em resinas epóxi, confirmando que a galalite possui menor rigidez em comparação a esse material, embora ainda se enquadre como um polímero com propriedades estruturais de fundamental importância.

A Figura 28 é apresenta um corpo de prova fraturado após o ensaio de tração. Em que, observa-se que a fratura também ocorreu de maneira abrupta, e ausência de deformação plástica significativa antes da falha, evidenciando a natureza frágil do material. A ruptura ocorreu na região central, local de menor seção transversal, onde se concentram as tensões durante o ensaio.

Figura 28. Corpo de provas fraturado no ensaio de tração.



Fonte: Autor (2025)

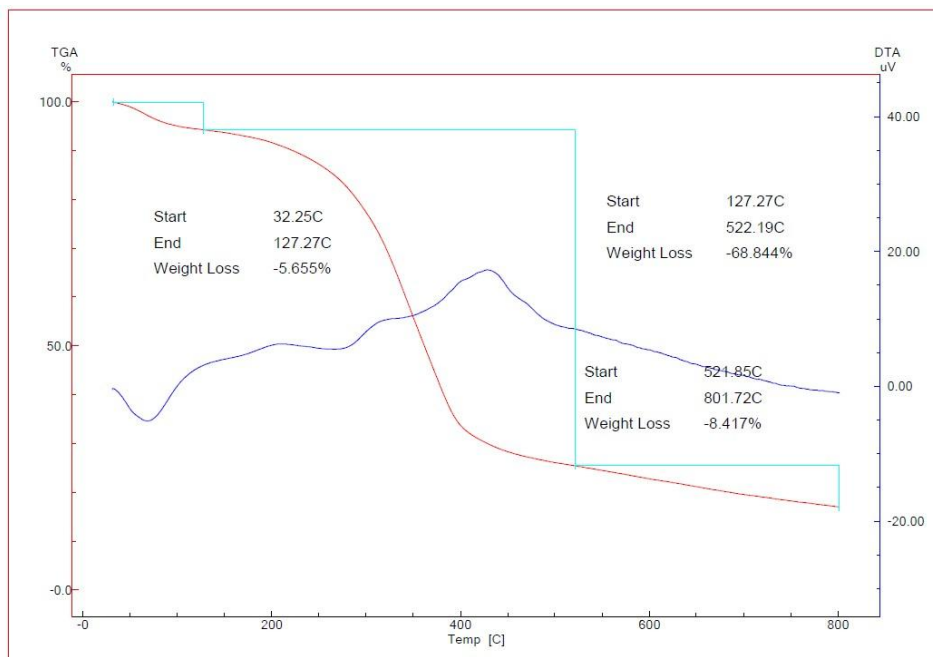
Assim, com base nos resultados experimentais valida-se a hipótese de que a galalite apresenta propriedades mecânicas compatíveis com outros polímeros termorrígidos.

4.3 Análises térmicas

A Figura 29 apresenta o gráfico termo analítico (TGA/DTA) da caseína formalina. O eixo Y à esquerda representa a variação percentual de massa do material obtida pela análise termogravimétrica (TGA) em função da temperatura ($^{\circ}\text{C}$), mostrada no eixo X, variando de 0 a 800°C . Já o eixo Y à direita apresenta o sinal de variação térmica (μV) correspondente à análise térmica diferencial (DTA), representada pela curva azul, que indica os eventos endotérmicos e exotérmicos ocorridos durante o aquecimento da amostra.

Na faixa de temperaturas entre $32 - 128^{\circ}\text{C}$ observa-se uma perda de massa de cerca de 5,6%. esta faixa de temperatura, não ocorre degradação química significativa, apenas a remoção de componentes fisicamente retidos. Portanto, acredita-se que essa variação de massa esteja associada à uma certa quantidade de água eliminada (adsorção) ficando retida na superfície da matéria. Esse processo é caracterizado por um evento endotérmico (curva para baixo) na curva DTA, evidenciando a absorção de calor necessária para a evaporação da água.

Figura 29. Curvas de TGA (curva em vermelho) e DTA (curva em azul) para a galalite.



Fonte: Autor (2025)

Em temperaturas superiores a ~ 127 °C e que se estende ~ 522 °C, verifica-se uma perda de massa de aproximadamente 68,8 %. O que indica que a degradação efetiva da caseína formalina ocorre nesta faixa de temperaturas. De acordo com a curva DTA, este é um processo exotérmico, no qual ocorre liberação de calor com pico acentuado para cima em torno de 400 a 450°C. Nessa fase ocorre a ruptura das cadeias peptídicas e a decomposição dos grupos orgânicos ligados a formalina, fazendo com que compostos e outras substâncias orgânicas voláteis sejam liberados. Dessa forma, tal comportamento evidencia a instabilidade térmica da matriz orgânica do material.

Finalmente, entre ~ 522 e 802 °C, tem-se uma perda de massa correspondente a 8,4%, associada à carbonização e à decomposição final dos resíduos orgânicos que resultam na formação de um resíduo carbonáceo e em cinzas minerais.

A curva tende à estabilização após 800 °C, indicando que a decomposição térmica do material está praticamente completa. Dessa forma, pode-se afirmar que a degradação térmica da caseína formalina inicia-se por volta de 127 °C e se estende até cerca de 522 °C, faixa em que ocorre a maior perda de massa e as principais transformações químicas estruturais do material.

5. CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos neste trabalho, conclui-se que a síntese do biopolímero caseína formaldeído (Galalite) foi bem sucedida, com a análise de FTIR confirmando a formação de ligações cruzadas entre as cadeias proteicas. Os ensaios mecânicos caracterizaram o material como um polímero rígido e frágil, típico da classe dos termorrígidos, com módulos de elasticidade de aproximadamente 2.500 MPa na flexão e 1.950 MPa na tração, valores compatíveis com polímeros comerciais como a baquelite. A análise térmica (TGA/DTA) revelou que a degradação mais significativa ocorre entre 127 °C e 522 °C, definindo a janela de estabilidade térmica do material. Dessa forma, a Galalite demonstra propriedades relevantes que, aliadas à sua origem renovável, a posicionam como uma alternativa sustentável e viável para substituir plásticos sintéticos em aplicações específicas, como artigos artesanais e componentes eletrônicos. Estudos futuros focados na incorporação de plastificantes e na avaliação de sua degradação ambiental são recomendados para ampliar seu potencial de aplicação.

REFERÊNCIAS

HAGE JR., Elias. **Aspectos históricos sobre o desenvolvimento da ciência e da tecnologia de polímeros.** *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, São Carlos, v. 8, n. 2, p. 6–9, abr./jun. 1998.

NAÇÕES UNIDAS. **ONU alerta que poluição plástica ameaça milhões de pessoas e propõe soluções globais.** *ONU News*, 2023. Disponível em: <https://news.un.org/pt/story/2023/06/1815442>. Acesso em: 9 jul. 2025.

HEINRICH BÖLL STIFTUNG. **Atlas do plástico: fatos e números sobre o mundo dos polímeros sintéticos.** Rio de Janeiro: Fundação Heinrich Böll, 2020.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). **Mapa do leite: Políticas públicas e privadas para o leite.** Brasília, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/producao-animal/mapa-do-leite>. Acesso em: 9 jul. 2025.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Desperdício de leite na cadeia produtiva: desafios e oportunidades.** Brasília, 2024. Disponível em: <https://www.embrapa.br/>. Acesso em: 9 jul. 2025.

BRITO, Maria Aparecida Vasconcelos Paiva; BRITO, José Renaldi Feitosa. **Qualidade do leite.** In: [Material técnico sobre produção e qualidade do leite]. [S.l.]: [s.n.], [s.d.]. Disponível em: <https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/37410903/qualidadedoleite-libre.pdf>. Acesso em: 13 dez. 2025.

Gallagher, W. *FTIR Analysis of Protein Structure*. UW-Eau Claire: Chem455 Desk Manual, 2005. Disponível em: http://www.chem.uwec.edu/Chem455_S05/Pages/Manuals/FTIR_of_proteins.pdf. Acesso em: 29 nov. 2025.

MANO, Eloisa Biasotto; MENDES, Luís Cláudio. **Introdução a polímeros.** 2. ed. rev. e ampla. São Paulo: Blucher, 1999.

CALLISTER, William D., Jr.; RETHWISCH, David G. *Materials Science and Engineering: An Introduction*. 10. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2020. ISBN 978-1-119-45391-8.

FELTRE, Ricardo. **Química: química orgânica.** Volume 3. São Paulo: Moderna, 2004.

ATKINS, Peter; JONES, Loretta. **Princípios de química: questionando a vida moderna e o meio ambiente.** 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2018.

HABITZREUTER, Rafael et al. **Evaluating the future effectiveness of cooling strategies in subtropical terrace houses under climate change.** *Buildings*, [S.l.], v. 14, n. 11, p. 3619, 2024.

Disponível em: <https://doi.org/10.3390/buildings14113619>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-5309/14/11/3619>. Acesso em: 8 jul. 2025.

SILVA, E. G. S.; CARDOSO, S.; BETTENCOURT, A. F.; RIBEIRO, I. A. C. Lates Trends in Sustainable Polymeric Food Packaging Films. *Foods*, v. 12, n. 1, p. 168, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods12010168>. Acesso em: 14 dez. 2025.

GRIZZO; SEMENSATO, Leonardo Henrique; SANTOS, Danilo Martins dos; CAMPANA FILHO, Sérgio Paulo. *Biopolímeros, processamento e aplicações*. In: HABITZREUTER, F. et al. (org.). *Nanotecnologia aplicada a polímeros*. São Paulo: Blucher, 2022. p. 91-132. DOI: 10.5151/9786555502527-03.

SANTOS de carvalho, G. H., BARRETO da Silva, J., & Angeli, R. (2025). Mapeamento tecnológico de tecnologias para o desenvolvimento sustentável - Biocombustível e Biopolímeros. *Acta Scientiae Et Technicae*, 10. <https://doi.org/10.12957/acta.2022.89130>

DHASMANA, S.; DAS, S.; SHRIVASTAVA, S. Potential nutraceuticals from the casein fraction of goat's milk. *Journal of Food Biochemistry*, v. 46, n. 1, p. e13982, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1111/jfbc.13982>.

CALLISTER JR., William D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 848 p.

ANDRADE, J.; CALIXTO, C.; GABRIEL, J.; GOMES, L.; SILVA, T.; PALUMBO, M. Extração, purificação e determinação do ponto isoelétrico da caseína do leite. In: 52º Congresso Brasileiro de Química (CBQ), 2012, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: ABQ – Associação Brasileira de Química, 2012. Disponível em: <https://www.abq.org.br/cbq/2012/trabalhos/14/557-14229.html>. Acesso em: 16 abr. 2025.

MODERN Plastics Encyclopedia '96, The McGraw-Hill Companies, New York, NY; R. F. Floral and S. T.

SPINA, R. **Processamento de polímeros por extrusão e injeção: conceitos, equipamentos e aplicações**. São Paulo: erica, 2014.

KANER, Jake; IORAS, Florin; RATNASINGAM, Jega. *Performance and stability of historic casein formaldehyde e-plastory*, v. 2, p. 1–18, 2017. ISSN 2190-9598. Disponível em:

https://bnu.repository.guildhe.ac.uk/id/eprint/15903/1/15903_Ioras_F.pdf. Acesso em: 13 dez. 2025

THIAGARAJAN, M. **Processamento de polímeros: extrusão, injeção, sopro e moldagem rotacional**. São Paulo: Editora Blücher, 2017. 250 p.

SUTERMEISTER, S. A. **Galalith: The casein formaldehyde plastics**. New York: Reinhold Publishing, 1959.

KANER, R. B. **Casein and its thermal properties**. *Journal of Polymer Science*, v. 45, n. 3, p. 123–130, 2017.

HORNE, D. S. **The structure of casein micelles**. *International Dairy Journal*, v. 16, n. 11, p. 1344–1354, 2006.

QI, P. et al. **Casein micelle structure and stability: A review**. *Food Hydrocolloids*, v. 21, n. 7, p. 1162–1171, 2007.

PETROVA, Stanislava Yu.; KHLGATIAN, Svetlana V.; EMELYANOVA, Olga Yu.; PISHULINA, Larisa A.; BERZHETS, Valentina M. *Structure and biological functions of milk caseins*. *Russian Open Medical Journal*, **v. 11, n. 2, p. e0209, 2022. DOI: 10.15275/rusomj.2022.0209. Disponível em: <https://www.romj.org/2022-0209>. Acesso em: 16 dez. 2025.

DHASMANA, S.; DAS, S.; SHRIVASTAVA, S. Potential nutraceuticals from the casein fraction of goat's milk. *Journal of Food Biochemistry*, v. 46, n. 1, p. e13982, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1111/jfbc.13982>.

ANDRADE, J.; CALIXTO, C.; GABRIEL, J.; GOMES, L.; SILVA, T.; PALUMBO, M. Extração, purificação e determinação do ponto isoelétrico da caseína do leite. In: 52º Congresso Brasileiro de Química (CBQ), 2012, Recife. *Anais...* Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Química – ABQ, 2012. Disponível em: <https://www.abq.org.br/cbq/2012/trabalhos/14/557-14229.html>. Acesso em: 16 dez. 2025.

KANER, Jake; IORAS, Florin; RATNASINGAM, Jega. *Performance and stability of historic casein formaldehyde e-plastory*, v. 2, p. 1–18, 2017. ISSN 2190-9598. Disponível em: https://bnu.repository.guildhe.ac.uk/id/eprint/15903/1/15903_Ioras_F.pdf. Acesso em: 13 dez. 2025

CARVALHO, Giovanna Cappellano Amaral de; LICCO, Eduardo Antonio. Valorização de resíduos: produção de galalite a partir de leite não comercializado. *Iniciação – Revista de Iniciação Científica, Tecnológica e Artística*, São Paulo, v. 7, n. 1, p. 13-23, nov. 2017. ISSN 2179-474X.

Disponível em: https://www1.sp.senac.br/hotsites/blogs/revistainiciacao/wp-content/uploads/2017/11/2-245_ARTIGO_ORIGINAL_FINAL.pdf. Acesso em: 16 dez. 2025.

HAEZEL, Alana Taís; LEWANDOWSKI, Gabrielle Mariáh; ZIENTARSKI, Diane Raquel; SILVA, Augusto Cesar Huppés da; TOLOMINI, Lusiane Cristiana Ziemann. *Tecideína: polímero e fio biodegradáveis a partir de proteína extraída do leite impróprio ao consumo humano – fase II*. Relatório apresentado à 7ª FEMIC – Feira Mineira de Iniciação Científica, Horizontina-RS, 2023. Disponível em: <https://apiportal.femic.com.br/project/docs/f543-9130-5e53-1698030879421.pdf>. Acesso em: 16 dez. 2025.

VIORA, Laurianne; TICHANÉ, Teddy; NOTTELET, Benjamin; MOUTON, Julia; GARRIC, Xavier; VAN DEN BERGHE, Hélène; COUDANE, Jean. *Casein-based conjugates and graft copolymers. Synthesis, properties, and applications. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, v. 23, n. 2, p. e13306, 2024. DOI: 10.1111/1541-4337.13306.