

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
(CEFET – MG)**

ALLEFY LINCON ALVES

**ESTUDO E CARACTERIZAÇÃO FÍSICA-QUÍMICA DE BLENDA BASEADAS EM
AMIDO TERMOPLÁSTICO/MODIFICADO E poli(butileno succinato)**

BELO HORIZONTE (MG)

2023

ALLEFY LINCON ALVES

**ESTUDO E CARACTERIZAÇÃO FÍSICA-QUÍMICA DE BLENDA BASEADAS EM
AMIDO TERMOPLÁSTICO/MODIFICADO E poli(butileno succinato)**

Trabalho apresentado ao Centro Federal de Educação
Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG, como requisito
parcial para obtenção do título de bacharel em Química.
Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Patrícia Santiago de Oliveira Patrício

CEFET-MG

BELO HORIZONTE (MG)

2023

ALLEFY LINCON ALVES

**ESTUDO E CARACTERIZAÇÃO FÍSICA-QUÍMICA DE BLENDA BASEADAS EM
AMIDO TERMOPLÁSTICO/MODIFICADO E poli(butileno succinato)**

**Trabalho de Conclusão de Curso do
Bacharelado em Química Tecnológica
CEFET-MG**

Belo Horizonte, 01 de julho de 2023

Prof^ª. Dr^ª. Patrícia Santiago de Oliveira Patrício

(orientadora – CEFET-MG)

Prof. Dr. Patterson Patricio de Souza

(avaliador – CEFET-MG)

Prof. Dr. Gabriel Leonardo Tacchi Nascimento

(avaliador – CEFET-MG)

AGRADECIMENTOS

Este trabalho é fruto não só da minha dedicação, mas também das pessoas que apoiaram ao longo da minha jornada na instituição.

Primeiramente gostaria de agradecer a todas pessoas que conheci no CEFET e que foram de grande ajuda para meu crescimento pessoal e para a conclusão deste trabalho. Agradeço a minha orientadora, a professora Dra. Patrícia Patrício, pelo auxílio ao longo de todo trabalho, paciência e por todo conhecimento que recebi. Também agradeço aos meus pais e minha irmã que me apoiaram e se esforçaram para que eu pudesse estudar nessa instituição. Agradeço a Rafaela, que está ao meu lado desde que eu entrei no CEFET, sempre me apoiou, teve e tem muita paciência comigo. Agradeço também a Ingrid pelo esforço em tirar minhas dúvidas. Também não posso esquecer do meu amigo Daniel que me apoiou em todos os momentos do curso. Por fim, agradeço a todos os professores do CEFET-MG e trabalhadores da instituição que foram fundamentais para minha formação!

RESUMO

ALVES, A. L.; PATRÍCIO, P. S. O. Caracterização De Blendas Baseadas em Amido Termoplástico/Modificado e Poli(Butileno Succinato).

O descarte de polímeros de fontes não renováveis não biodegradáveis é um problema que ocorre em todo o mundo. A utilização desses materiais no setor automobilístico, empacotamento e utensílios descartáveis se tornou um problema devido a sua alta estabilidade que contribui para a decomposição lenta desses materiais que pode durar de décadas até centenas de anos. Dessa forma, o desenvolvimento de novos materiais com capacidade de possuir as mesmas aplicações dos polímeros não biodegradáveis, ser de baixo custo e ser biodegradáveis, ou seja, capazes de se decompor na natureza, se tornou uma das principais soluções para esse problema. Nesse sentido, ao longo dos anos diversos novos polímeros e suas misturas, como compósitos e blendas, foram desenvolvidas, e a determinação de suas propriedades é de grande importância para a comparação com outros polímeros e verificar sua aplicabilidade. Com isso, amostras de *pellets* e canudos constituídos de duas blendas a base de amido termoplástico modificado (TPSM) e poli(butileno succinato) (PBS), nomeadas de amostras A e B desenvolvidas no Intechlab. A avaliação das propriedades estruturais, mecânicas e térmicas foram realizadas por caracterização de espectroscopia na região do infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), ensaio de tração e análise termogravimétrica (TG). De acordo com os resultados obtidos, ambas as blendas apresentaram resultados próximos entre si. Os módulos de Young de ambas as blendas foram próximos ao do TPSM. As análises de TG e FTIR mostram que ambas as blendas foram estáveis no processo de moldagem do canudo. Além disso, a análise FTIR, também, mostrou que no processo de fabricação das blendas não houve modificação química, sendo possível observar as bandas características do amido e do PBS, isoladamente.

Palavras-chave: Amido modificado, poli(butileno succinato), blenda biodegradável.

ABSTRACT

ALVES, A. L.; PATRÍCIO, P. S. O. Blends Based on Thermoplastic/Modified Starch and Poly(Butylene Succinate) Characterization.

The disposal of non-renewable, non-biodegradable polymer waste is a problem that occurs worldwide. The use of these materials in the automotive sector, packaging, and disposable utensils has become problematic due to their high stability, which contributes to the slow decomposition of these materials, which can take decades to hundreds of years. Thus, the development of new materials with the ability to possess the same applications as non-biodegradable polymers, be low-cost, and biodegradable, i.e., capable of decomposing in nature, has become one of the main solutions to this problem. In this sense, over the years, various new polymers and their blends, such as composites and blends, have been developed, and the determination of their properties is of great importance for comparison with other polymers and to verify their applicability. Therefore, samples of pellets and straws made from two blends based on modified thermoplastic starch (TPSM) and poly(butylene succinate) (PBS), named samples A and B, provided by Inteclab, were evaluated. The evaluation of the structural, mechanical, and thermal properties was performed by Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), tensile testing, and Thermogravimetric Analysis (TGA). According to the results obtained, both blends presented similar results. The Young's modulus of both blends was close to that of TPSM. The TGA and FTIR analyses show that both blends were stable during the straw molding process. Furthermore, the FTIR analysis also showed that there was no chemical modification during the blending process, making it possible to observe the characteristic bands of starch and PBS separately.

Keywords: Modified starch, poly(butylene succinate), biodegradable blends.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURAS

Figura 1 – Representação de polímeros: (a) polietileno; (b) polipropileno; (c) politereftalato de etileno.	4
Figura 2 – Representação da estrutura da amilose e amilopectina.	8
Figura 3 – Imagens de microscopia eletrônica de varredura de grânulos: (a) batata; (b) mandioca; e (g) arroz.	9
Figura 4 – Reação de reticulação do amido com Trimetafosfato de sódio.	12
Figura 5 – Representação da estrutura química do poli(butileno succinato).	13
Figura 6 – Processo de produção de blenda extrusada.	15
Figura 7 – Representação de moldagem de canudo por meio de sopro.	16
Figura 8 - Tensão versus deformação de um canudo hipotético.	17
Figura 9 – Amostra de canudo inteiro e cortado (a) e amostra de pellet em tubos de eppendorf (b).	19
Figura 10 – Esquema ilustrado resumo da metodologia desenvolvida.	20
Figura 11 – Espectrofotômetro Infravermelho por transformada de Fourier do Laboratório Intechlab (a) e ilustração do processo de análise com refletância total atenuada – ATR (b).	20
Figura 12 – Esquema de ensaio de tração realizado em um canudo (a) e máquina universal de ensaios mecânicos do laboratório Intechlab (b).	21
Figura 13 – Analisador Térmico DTG-60 Shimadzu do Laboratório Intechlab (a) e diagrama do equipamento de análise térmica.	22
Figura 14 – Espectro FTIR das amostras analisadas.	24
Figura 15 – Moléculas de a) PBS b) Amido c) glicerina d) sorbitol.	25
Figura 16 – Espetro FTIR com normalização na banda CH.	26
Figura 17 – Curvas de tensão à tração versus deformação à tração das amostras CA e CB.	28
Figura 18 – Curva/s de tensão à tração versus deformação à tração representativa das de tração das amostras CA e CB.	29
Figura 19 – Análise termogravimétrica da amostra AF.	30
Figura 20 – Análise termogravimétrica da blenda B.	31
Figura 21 – Análise termogravimétrica da blenda A.	32

TABELAS

Tabela 2 – Atribuição das principais bandas de absorção e a presença no componente.	27
Tabela 3 – Valores de tensão máxima, módulo de Young e tensão de escoamento das amostras CA e CB.	29
Tabela 4 – Eventos térmicos e seus dados.	33

QUADROS

Quadro 1 – Reações de biodegradação.	5
Quadro 2 – Formas de modificação do amido, tipos e modos de preparação.	9

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DTG	Termogravimetria Derivada
DSC	Calorimetria Exploratória Diferencial
FTIR	Espectroscopia de Infravermelho
PBS	Polibutileno succinato
TPS	Amido Termoplástico
TPSR	Amido Termoplástico reticulado com ácido cítrico
TPSM	Amido Termoplástico reticulado com fosfato
TG	Termogravimetria
UR	Umidade Relativa

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	3
2.1 Objetivo Geral.....	3
2.1 Objetivos Específicas	3
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1 POLÍMEROS BIODEGRADÁVEIS	4
3.1.1 Biodegradação	5
3.1.2 Tipos de polímeros biodegradáveis	6
3.2 AMIDO	6
3.2.1 Características Gerais.....	6
3.2.2 Composição e estrutura	7
3.2.3 Amido modificado	9
3.2.4 Amido termoplástico modificado.....	12
3.3 POLIBUTILENO SUCCINATO	13
3.4 BLENDS POLIMÉRICAS	14
3.4.1 Produção das blendas	15
3.4.2 Processamento da blenda	15
3.5 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA.....	16
4 MATERIAIS E MÉTODOS	19
4.1 MATERIAIS	19
4.2 MÉTODOS.....	19
4.2.1 Caracterização por espectroscopia na região do infravermelho.....	20
4.2.2 Caracterização mecânica por ensaio de tração	21
4.2.3 Caracterização por termogravimetria	22
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	23
5.1 ESPECTROSCOPIA DE ABSORÇÃO DO INFRAVERMELHO – FTIR.....	23
5.2 ENSAIO DE TRAÇÃO.....	28
5.3 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA	30
6 CONCLUSÃO.....	35

REFERÊNCIAS.....36
APÊNDICE40

1 INTRODUÇÃO

Polímeros de origem fóssil não biodegradáveis, popularmente conhecidos como plásticos, são amplamente utilizados de diversas formas como: empacotamento de produtos, aplicações industriais no setor automotivo, preservação de alimentos, fabricação de utensílios descartáveis, dentre outros. Essa grande aplicabilidade se deve às propriedades que o plástico possui, algumas delas são: baixa densidade, resistência, facilidade para moldagem e longo tempo de vida (SIDDIQUE; KHATIB; KAUR, 2007). No entanto, algumas das propriedades como a resistência a corrosão, a água e a decomposição bacteriana, contribuem para o plástico se tornar um dos resíduos de maior tempo de vida e, conseqüentemente, se tornar em um problema ambiental. Dois exemplos desses polímeros são o polietileno e o polipropileno que são utilizados para a fabricação de sacolas plásticas, sendo que, no ambiente, o processo de decomposição desses polímeros pode levar até 500 anos (VALERO-VALDIVIESO; ORTEGÓN; USCATEGUI, 2013).

Nesse sentido, polímeros biodegradáveis como é o caso do polibutileno succinato (PBS), tem gerado interesse como potencial substituto para os plásticos convencionais na fabricação de alguns bens de uso geral como embalagens, canudos, utensílios e recipientes descartáveis. Segundo Gross et al. (2002) o consumo mundial de polímeros biodegradáveis aumentou de 14 milhões de quilos em 1996 para 68 milhões de quilos em 2001.

O amido é um polímero natural de baixo custo que pode ser encontrado em plantas como principal fonte de armazenamento de energética. Porém, esse polímero na sua forma natural apresenta baixa estabilidade térmica, o que limita seu uso. Para isso, para poder ser utilizado, o amido precisa ser submetido ao processo de plastificação para apresentar características termoplásticas, formando o amido termoplástico (TPS). Esse amido ainda pode sofrer modificação como o processo de reticulação, gerando o amido termoplástico modificado (TPSM). Contudo, esse polímero ainda apresenta hidrofiliabilidade elevada o que prejudica suas propriedades mecânicas (KIM; KIM; CHO, 2009; SCHWACH; AVÉROUS, 2004).

O PBS é um polímero biodegradável com boas características mecânicas e um potencial substituto para polímeros não biodegradáveis. Contudo, por ser um polímero de precursores de origem fóssil e apresentar elevado custo, faz com que a ampliação da sua aplicação seja dificultada. Com isso, blendas a base de amido modificado e PBS pode ser uma alternativa viável para a substituição dos plásticos convencionais. Assim, o presente trabalho tem o objetivo de analisar e caracterizar as propriedades de blendas biodegradáveis a base de amido modificado e polibutileno succinato. Essa caracterização aumenta a possibilidade de utilização dessas blendas para a produção

de objetos descartáveis de uso comercial como canudos, embalagens e talheres. Além disso, todo material utilizado é biodegradável e, conseqüentemente, menos agressivo ao meio ambiente.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Caracterizar as blendas A e B a base de amido modificado e poli(butileno succinato) por via de análises físico-químicas.

2.1 Objetivos Específicas

- Caracterizar as blendas A e B por análise termogravimétrica, espectroscopia na região do infravermelho com transformada de Fourier e análise mecânica;
- Comparar os dados obtidos das blendas entre si;
- Verificar se houve modificação na blenda após o processamento para construção do canudo pelas análises espectroscópicas e termogravimétrica;
- Verificar o comportamento nos ensaios de tração dos canudos.

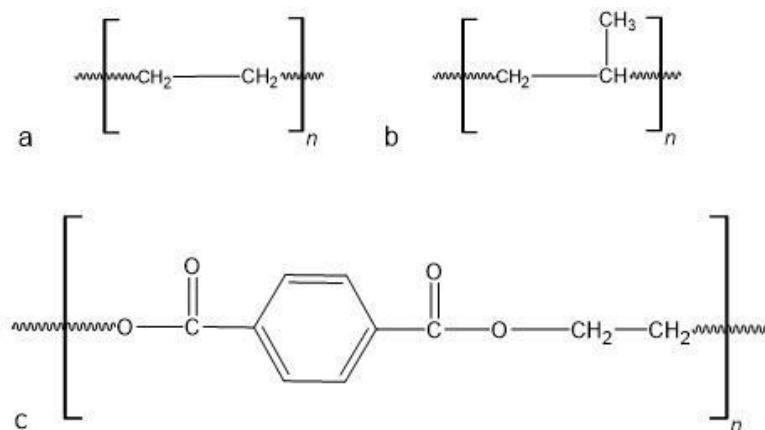
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O estudo de materiais biodegradáveis vem ganhando força nos últimos anos devido aos danos que os materiais de origem fóssil não biodegradáveis podem causar ao ambiente. Assim, produtos constituídos de polímeros de origem fóssil não biodegradáveis são de usados e descartados diariamente, para isso, o desenvolvimento de polímeros ou mistura deles que possam ser utilizados da mesma forma e que são degradados naturalmente é de grande interesse. Com isso, a utilização de materiais biodegradáveis como o caso do polibutileno succinato e o amido modificado para o desenvolvimento de blendas com boas propriedades é uma forma de encontrar materiais que possam substituir os polímeros não biodegradáveis.

3.1 Polímeros Biodegradáveis

Polímeros são macromoléculas constituídas de unidades repetidas ligadas ao longo da cadeia, denominadas meros, e se caracterizam por seu tamanho, estrutura química, interações intramoleculares e intermoleculares. Essas moléculas podem ser classificadas de acordo com seu peso molecular, tipos configuração moleculares, sua origem, distribuição dos meros, entre outros. Essas moléculas podem possuir massas moleculares que podem ser na ordem de centenas de milhares de unidades de massa atômica (MANO; MENDES, 2004). A representação de suas fórmulas estruturais é mostrada na Figura 1.

Figura 1 – Representação de polímeros: (a) polietileno; (b) polipropileno; (c) politereftalato de etileno.



Essas moléculas possuem diversas propriedades que contribuíram para sua aplicação como: maleabilidade, dureza, resistência e estabilidade química. Por conta disso e com o desenvolvimento de novas tecnologias que reduziram seu custo, no período de 1990 a 2000 houve um grande salto na produção desses materiais (LEJA; LEWANDOWICZ, 2010). No entanto, a

estabilidade química dessas moléculas se mostrou um problema devido aos longos períodos que essas moléculas levam para serem degradadas juntamente com a capacidade de formar microplástico durante sua degradação, o que segundo Vethaak e Legler (2021), possui impactos diretamente na saúde humana. Assim, para contornar esses problemas a degradabilidade desses materiais vem sendo estudada e com isso surgiu o termo polímero biodegradável. Dessa forma, polímeros biodegradáveis são aqueles nos quais o mecanismo de degradação primária ocorre por meio da ação de microrganismos (GAUTAM; BASSI; YANFUL, 2007).

3.1.1 Biodegradação

A biodegradação é um tipo de degradação que durante o processo envolve atividades biológicas e refere-se à degradação e assimilação dos polímeros por microrganismos. Esse processo, também, é responsável pela maior perda de massa polimérica para o meio ambiente e liberação de substâncias para o meio ambiente (GAUTAM; BASSI; YANFUL, 2007). A degradação desses materiais ocorre principalmente pela ação de microrganismos, como: fungos, bactérias e algas de ocorrência natural; tendo como resultado da decomposição moléculas de CO₂, CH₄, componentes celulares e outros produtos, segundo “American Standard for Testing and Methods” (ASTM-D-833 *apud* RAGHAVAN, 1995).

O processo de biodegradação pode ser dividido em dois tipos, biodegradação aeróbia (1) e a anaeróbia (2). Se a degradação ocorrer na presença de oxigênio ocorre a biodegradação aeróbica e o dióxido de carbono é produzido. Se não houver gás oxigênio no meio, a reação anaeróbica acontece e como produto, o gás metano e sulfeto são gerados (LEJA; LEWANDOWICZ, 2010).

Quadro 1 – Reações de biodegradação.

Nome	Reação
Biodegradação aeróbia	Polímero + O ₂ → CO ₂ + H ₂ O + biomassa microbiana (1)
Biodegradação anaeróbia	Polímero → CH ₄ + CO ₂ + H ₂ O + H ₂ S + H ₂ + biomassa microbiana (2)

Fonte: LEJA; LEWANDOWICZ, 2010.

Durante o processo de biodegradação ocorre a conversão do material biodegradável ou biomassa em componentes inorgânicos como dióxido de carbono, metano, componentes nitrogenados e biomassa residual, esse processo é chamado mineralização. O processo de

mineralização ocorre por completo quando toda biomassa é consumida ou todo carbono é transformado em dióxido de carbono (KYRIKOU; BRIASSOULIS, 2007).

3.1.2 Tipos de polímeros biodegradáveis

Há pouco tempo o consumo de plásticos e polímeros sintéticos de difícil degradação aumentava a cada ano. Isso resultou diretamente no aumento do volume de lixo em aterros sanitários. Para contornar esse problema vários tipos de polímeros biodegradáveis foram desenvolvidos. Assim, esses materiais podem ser classificados de algumas formas, como em relação a sua origem: polímeros biodegradáveis naturais e polímeros sintéticos. Os polímeros biodegradáveis sintéticos em sua maioria são poliésteres alifáticos que podem ser produzidos em laboratório por microrganismos ou reações químicas (KIM; YANG; KIM, 2005). Esses poliésteres são naturalmente degradados no meio ambiente por microrganismo como fungos ou bactérias (KIM; RHEE, 2003). Já os polímeros naturais são formados durante o crescimento de organismos vivos. A síntese desses materiais é realizada por processos metabólicos complexos que ocorrem dentro das células do ser vivo, envolvendo reações enzimáticas e reações de crescimento de cadeias a partir de monômeros ativados (FRANCHETTI; MARCONATO, 2006).

Outra forma de classificar esses materiais é em relação a sua composição, podendo ser separados em três tipos: misturas de polímeros sintéticos e substâncias que podem ser facilmente degradadas por microrganismos, como - polímeros naturais (amido e celulose) e polímeros naturais modificados (amido modificado); misturas de polímeros sintéticos com grupos que são suscetíveis a ataques hidrolíticos microbianos, como - policaprolactona e polibutileno succinato; biopoliésteres de fontes microbianas (LEJA; LEWANDOWICZ, 2010; FERREIRA et al., 2014).

3.2 Amido

O amido é um polímero que é encontrado amplamente em diversas espécies vegetais como reserva energética, sendo abundante em grãos cereais, raízes e tubérculos. Esse material amplamente utilizado, principalmente como fonte energética para animais, e é produzido facilmente por meio da agricultura. Sendo assim, é considerado um material de baixo custo e com alta disponibilidade no mercado. Dessa forma, é um material considerado de grande interesse como matéria prima para a produção de polímeros biodegradáveis.

3.2.1 Características Gerais

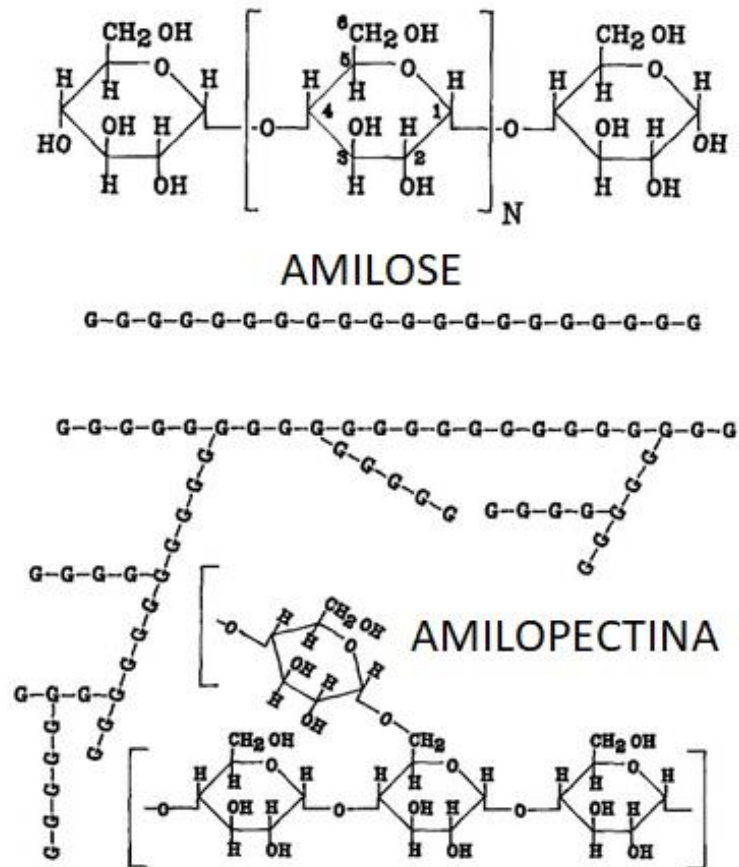
O amido é a fonte de carboidratos mais importante para a alimentação humana, representando de 80 a 90% de todos os polissacarídeos da dieta e é a matéria prima com propriedades

tecnológicas que caracterizam grande parte dos produtos processados (WALTER; SILVA; EMANUELLI, 2005). Com isso, enxertos de amido em copolímeros e em plásticos tem ajudado na capacidade de biodegradação e redução do volume de lixo produzido em aterros sanitários. Além disso, a degradação ou incineração do amido nos plásticos não impactaria na emissão de CO₂ e, conseqüentemente, no aquecimento global, já que o carbono do amido foi capturado na atmosfera pela planta durante sua síntese. Nas últimas décadas o amido tem ampliado seu nicho de aplicações, esse polímero natural pode ser utilizado para produção de polímeros biodegradáveis, compósitos e blendas poliméricas. Assim, existem diversos estudos que relacionam a influência da composição do amido no polímero e as variações na morfologia, propriedades físicas e biodegradabilidade, podendo assim possibilitar o uso de amido em plásticos visando alcançar aplicações específicas (LEJA; LEWANDOWICZ, 2010; SWANSON, C. L. et al., 1993).

3.2.2 Composição e estrutura

O amido é composto de uma mistura complexa de glucanos, unidades de 1,4- α -D-glucopiranosil, conectadas por ligações acetais e pode ser separada em dois polímeros que representam a maior parte da sua composição: amilopectina e amilose. A amilose é a estrutura que compõe cerca de 30% da massa seca do amido e, se encontra, principalmente, nas regiões amorfas do amido. Esse polímero linear possui uma massa molecular que pode variar entre 200.000u até 700.000u. A amilopectina é um polímero que possui massa molecular que pode variar de 100-200u milhões e apresenta ramificações por ligações α -(1,6)-glicosídica, sendo encontrado majoritariamente nas regiões cristalinas do amido. A Figura 2 representa a estrutura desses dois polímeros (SWANSON, C. L. et al., 1993).

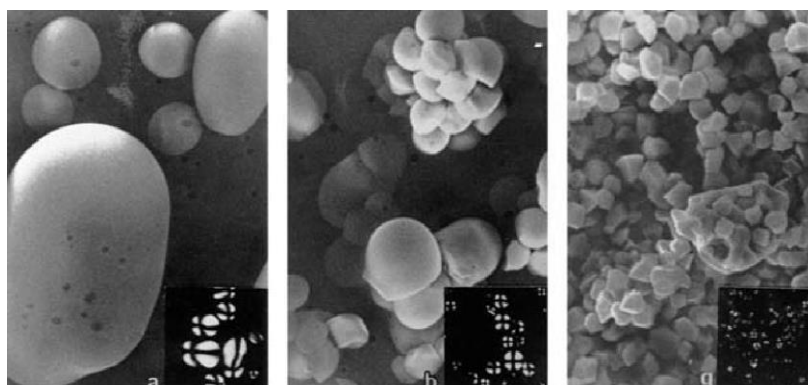
Figura 2 – Representação da estrutura da amilose e amilopectina.



Fonte: Adaptado de SWANSON, C. L. et al., 1993.

A amilopectina e a amilose são organizadas formando os grânulos, estruturas microscópicas em forma de grânulos, Figura 3, essas estruturas podem ocorrer em diferentes tamanhos, com dimensões que podem variar de 0.1 até 200 μ m, e formas, como: esferas, polígonos, elipsóides, tubos irregulares e formas similares às plaquetas, dependendo da origem vegetal (GALLANT; BOUCHET, et al., 1992). Observações sob luz polarizada indicam que esses grânulos apresentam estrutura cristalina extremamente pequena e que possuem múltiplas orientações, sendo que a cristalinidade do amido natural pode variar de 15 até 45%. Dependendo do grau de cristalinidade do amido, a sua maior parte se entra no grânulo em fase amorfa, em média cerca de 70% (OOSTERGETEL; BRUGGEN, 1993; GALLANT; BOUCHET, et al., 1992).

Figura 3 – Imagens de microscopia eletrônica de varredura de grânulos: (a) batata; (b) mandioca; e (g) arroz.



Fonte: Adaptado de GALLANT; BOUCHET, et al., 1992.

Os amiloplastos são termicamente estáveis em temperaturas abaixo de 250°C, acima desse valor o amido começa a se decompor. Além disso, esse material apresenta característica higroscópica, em um ambiente com umidade relativa (UR) de 0%, por exemplo, o amido apresenta umidade de aproximadamente 6% e em valores de UR de 80% no ambiente, o polímero natural apresenta umidade de 20%. Essas estruturas podem ser rompidas por aquecimento em água ou por soluções aquosas que desfazem as interações de hidrogênio, como em soluções ácidas, e nesse caso podendo haver até mesmo a despolimerização do material (SWANSON, C. L. et al., 1993).

3.2.3 Amido modificado

Existem diversos materiais biodegradáveis disponíveis comercialmente, como: materiais a base de amido, polímeros derivados da celulose, poliésteres produzidos por bactérias e variados tipos de polímeros sintéticos. No entanto, o principal problema associado a esses materiais é em relação a suas propriedades químicas, físicas e mecânicas (VAN DER ZEE, 1997 apud LEJA; LEWANDOWICZ, 2010). Dessa forma, alguns polímeros naturais, como o amido, que possuem capacidade de fácil modificação, podendo ser física, enzimática, química por conversão ou derivatização, permitindo alterações em suas propriedades. O quadro 2 apresenta os principais tipos de modificações, formas de tratamento e preparação para o amido.

Quadro 2 – Formas de modificação do amido, tipos e modos de preparação.

Modificação	Tipos	Modos de preparação
Física	Tratamento por calor e umidade	Aquecimento de amido a uma temperatura acima do seu ponto de gelatinização com umidade insuficiente para causar gelatinização.

		Aquecimento de uma pasta de amido granular a uma temperatura inferior ao seu ponto de gelatinização por prolongados períodos de tempo.
	Pré-gelatinização	Inchamento instantâneo em frio-água preparados por secagem em tambor, cozedura por pulverização, extrusão. Processamento baseado em solvente.
Enzimática (por conversão)	Hidrólise parcial enzimática	O tratamento numa solução aquosa a uma temperatura inferior ao ponto de gelatinização com um ou mais enzimas amilolíticas de grau alimentício.
Química (por conversão)	Hidrólise parcial ácida	Tratamento com ácido clorídrico, ácido ortofosfórico ou ácido sulfúrico.
	Tratamento alcalino	Tratamento com hidróxido de sódio ou hidróxido de potássio.
	Oxidação/branqueamento	Tratamento com ácido peracético e / ou peróxido de hidrogénio, ou hipoclorito de sódio ou clorito de sódio ou dióxido de enxofre, ou permanganato de potássio ou persulfato de amónio.
	Piroconversão (dextrinização)	Preparadas por cozimento a seco de amido acidificado.
Química (por derivatização)	Eterificação	Eterificação com óxido de propileno .
	Esterificação	Eterificação com óxido de propileno . esterificação com anidrido acético e anidrido adípico. esterificação por anidrido octenilsuccínico.
	Reticulação	Reticulação com ácido ortofosfórico ou ortofosfato de sódio ou potássio, ou tripolifosfato de sódio. Esterificação com trimetafosfato de sódio ou oxiclureto de fósforo.

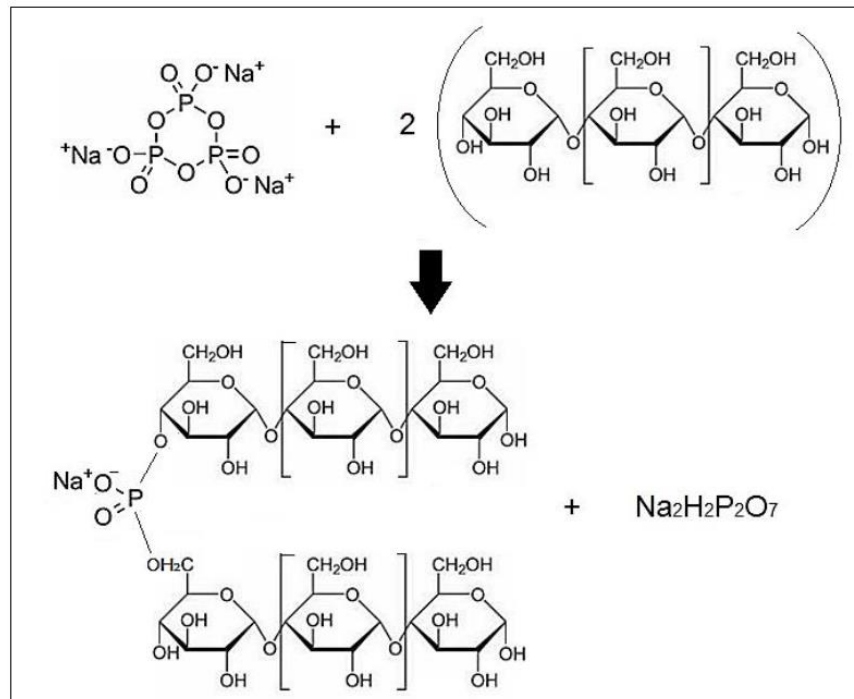
		Combinação de tratamentos para fosfato monoamido e diamido fosfato.
	Dupla modificação	Esterificação por trimetafosfato de sódio ou oxiclreto de fósforo combinado com esterificação por anidrido acético ou acetato de vinilo. Esterificação por trimetafosfato de sódio ou oxiclreto de fósforo combinado com eterificação por óxido de propileno.

Fonte: Adaptado de AMORIM. T. S., 2017.

Assim, a presença de hidroxilas disponíveis ao longo de sua cadeia principal formando sítios reativos que propiciam tais modificações. A maioria dos polímeros derivados do amido possuem baixo grau de substituição e são projetados para melhorar suas propriedades de solubilização e adesão (SWANSON, C. L. et al., 1993).

Um dos processos que envolve melhorias no amido é o processo de derivatização por reticulação (Figura 4). Esse procedimento consiste na reação dos grânulos do amido com solução como: tripolifosfato de sódio, orto-fosfato monossódico, cloreto de fosforila e trimetafosfato de sódio. Esse tipo de reação proporciona a formação de reações cruzadas, que reforçam a estrutura do amido e proporcionam melhorias como: redução do processo de retrogradação do amido; aumento da temperatura de gelatinização tornando os géis mais estáveis; resistência a temperaturas elevadas, cisalhamento e baixo pH. O resultado desse processo de reticulação do amido é um material com melhores propriedades do que o amido natural e é chamado de amido fosfatado. Segundo Cruz el Dash (1984) o procedimento para realização dessa derivatização é um método simples e de baixo custo. (DAMODARAN; PARKIN; FENNEMA, 2010; HIRSCH, KOKINI, 2002).

Figura 4 – Reação de reticulação do amido com Trimetafosfato de sódio.



Fonte: AMORIM, T. S., 2017.

3.2.4 Amido termoplástico modificado

A gelatinização é o processo mais comum de modificação do amido. Para realizar esse processo, primeiro é realizada a extração do amido que ocorre com a quebra das estruturas granulares, por meio da aplicação da tensão de cisalhamento e adição de um plastificante sob aquecimento entre 90 e 180°C. Alguns exemplos de plastificantes mais utilizados são: água, glicerol, sorbitol ou álcool. Nesse processo ocorre a lixiviação da amilose dos grânulos para o meio, resultando no aumento da viscosidade e podendo ser aplicado em equipamentos de injeção, extrusão ou moldagem por sopro. Um exemplo desse tipo de material é o amido termoplástico (TPS) que é quando o processo de gelatinização ocorre sobre o amido puro. Assim, alguns fatores durante o processo de produção podem influenciar nas características final do material, os principais fatores são: teor de plastificante, a temperatura de processamento, a velocidade com o que é aplicado a tensão de cisalhamento e a origem do amido (SWANSON, C. L. et al., 1993; LIU, H. et al., 2009). Caso o processo de gelatinização seja utilizado sobre um amido pré-modificado, como é o caso do amido fosfatado, o resultado é um material com propriedades melhores que o TPS convencional e pode ser denominado de amido termoplástico modificado (TPSM).

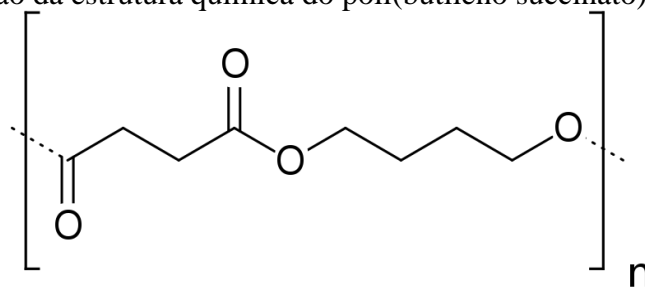
Em relação a decomposição desses materiais, a atividade de água é um dos principais fatores que influenciam na velocidade de degradação do amido modificado. Assim, para contornar esse problema, a utilização de plastificantes e modificações estruturais permitem redução na

atividade de água no amido modificado e, conseqüentemente, dificulta o crescimento de microrganismos. Além disso, conforme o material absorve umidade pelo mecanismo de sorção, suas propriedades podem ser alteradas reduzindo o ponto de quebra por alongamento e aumento da rigidez. Para dificultar a permeabilidade da água no amido fosfatado, pode se realizar a incorporação de outros polímeros como: biodegradáveis, renováveis ou biopolímeros sintéticos, como é o caso do polibutileno succinato (CEREDA, M.P.; VILPOUX, O. F., 2003).

3.3 Polibutileno succinato

O poli(butileno succinato) (PBS) é um poliéster termoplástico alifático com várias características desejáveis como: biodegradabilidade, processabilidade por fusão, resistência química e térmica, Figura 5. O PBS pode ser produzido por meio de policondensação de glicóis do 1,4-butanodiol com o ácido succínico. Estes reagentes podem ser obtidos por duas fontes: não renováveis, através de derivados do petróleo ou por fontes renováveis, como produto de fermentação bacteriana (KIM; YANG; KIM, 2005; ALIOTTA et al., 2022).

Figura 5 – Representação da estrutura química do poli(butileno succinato).



O PBS apresenta características como: densidade de 1,25 g/cm³, temperatura de fusão entre 90-120 °C e temperatura de transição vítrea (T_g) de -45°C até -10°C. Contudo, as características que mais se destacam desse material é a presença de boas propriedades mecânicas com: processabilidade em filamentos, injeção em moldes, extrusoras e produtos moldados por sopro (ALIOTTA et al., 2022).

Com relação a biodegradabilidade, Kim e Rhee (2003) mostra que a biodegradabilidade de polímeros alifáticos sintéticos constituídos por unidades de ácido carboxílico, como é o caso do PBS, pode ser realizada por microrganismo como: *Aspergillus flavus*, *A. niger*, *A. versicolor*, *Aureobasidium pullulans*, *P. funiculosum* e *Chaetomium globosum*. Esses microrganismos possuem enzimas capazes não só de hidrolisar poliésteres como também outros polímeros sintéticos, podendo agir sobre outros substratos como: óleos de plantas, triglicérides, metil ésteres e ácidos graxos.

Devido sua versatilidade de produção via base petroquímica ou renovável e suas características físicas, o PBS tem sido amplamente investigado e utilizado em copolimerização com outros polímeros biodegradáveis, fazendo com que suas propriedades sejam exploradas com várias combinações de polímeros.

3.4 Blendas poliméricas

O processo de blenda é uma técnica amplamente usada quando se deseja modificar as propriedades de um polímero não de forma drástica, mas sim maximizando sua performance, utilizando as tecnologias convencionais e com baixo custo. Essa técnica se baseia em uma mistura física entre polímeros sem ocorrer reação química intencionalmente. Além disso, conforme for o nível de interação entre os materiais como a miscibilidade, morfologia e compatibilidade, pode-se resultar em uma mistura com características melhores do que os polímeros puros (YU, L.; DEAN, K.; LI, L., 2006; AKCELRUD, 2007).

A miscibilidade está relacionada com a interação química entre os polímeros na mistura. Assim, polímeros com temperatura de transição vítrea (T_g) próximas possuem maior miscibilidade entre si. Além disso, a morfologia também é um fator que influencia nas características do material, por exemplo, materiais que apresentam maior miscibilidade possuem morfologia homogênea e, conseqüentemente, polímeros imiscíveis são heterogêneos. Contudo, a maioria das blendas poliméricas são imiscíveis ou possuem baixa miscibilidade, para melhorar isso existe o método de compactação que consiste em adicionar uma substância miscível nos dois polímeros que favorece o aumento da interação entre os polímeros.

Dessa forma, Gross e Kalra (2002) relatam algumas blendas produzidas utilizando amido modificado e polímeros sintéticos a fim de melhorar as características hidrofílicas e reduzir o custo de fabricação. Outros autores, como Schwach e Avérous (2004), realizam a análise morfológica e das propriedades de interface visando encontrar as blendas que apresentam maior compatibilidade. Esse estudo foi realizado com blendas de amido de trigo modificado com polímeros sintéticos biodegradáveis, como: poliésteres, poliesterimida, policaprolactona, poliácido láctico, polibutileno succinato adipato e polibutileno tereftalato adipato.

Dessa maneira, MARTINS, C. H. (2020) produz e caracteriza blendas baseadas em amido reticulado com ácido cítrico (TPSR) e PBS e blendas baseadas em TPS e PBS utilizando três métodos de preparação diferentes. Desse estudo a autora relata que as blendas apresentam algumas melhorias quanto a hidrofobicidade quando comparado com o PBS puro e conclui que as blendas apresentam características químicas, física, térmicas e mecânicas superiores que seus materiais

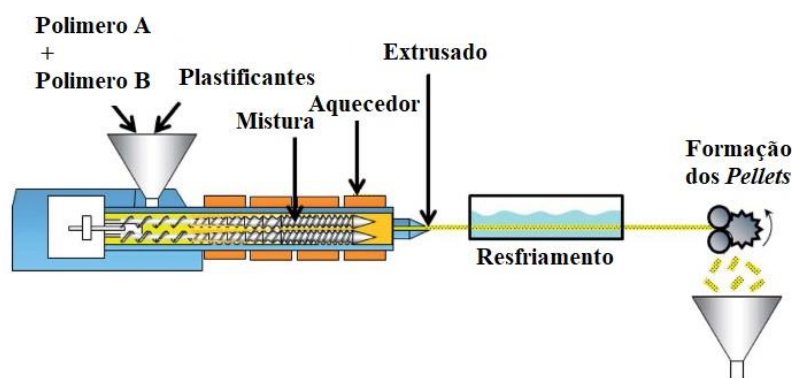
formadores. Dentre os dados obtidos pela autora a blenda que apresentou melhor propriedade física foi a com composição de 30% de PBS e 70%.

Com relação a biodegradabilidade, a cristalinidade e hidrofiliicidade afetam diretamente na velocidade de degradação de uma blenda. Assim, a velocidade de degradação de uma mistura de polímeros é determinada pelo polímero que se degrada mais rapidamente na blenda (YU; DEAN; LI, 2007; JAYASEKARA et al., 2005). Dessa forma, Urayama et al. (2002) em seus estudos realiza a caracterização das propriedades de blendas de poliacetais com diferentes proporções de unidades de lactato e relata que a biodegradabilidade da blenda aumenta conforme a proporção de lactato.

3.4.1 Produção das blendas

As blendas são uma mistura física de polímeros que é formada devido a processos reológicos e térmicos. A produção de uma blenda pode ser dividida em duas etapas: A primeira consiste em realizar a composição da blenda, realizando a mistura de dois polímeros A e B (Figura 6), em seguida é realizado a mistura sob aquecimento, o fluxo do processo depende principalmente da viscosidade e da elasticidade dos dois polímeros, dando continuidade para o processo de extrusão; A segunda etapa é o processo de moldagem, no caso a extrusão, que possui temperaturas específicas para o processamento com pequenas taxas de deformação e tempo residência. Assim o extrusado passa por um resfriamento e em seguida é cortado em fragmentos menores chamados *pellets* (YOUSFI, M. et al., 2018).

Figura 6 – Processo de produção de blenda extrusada.



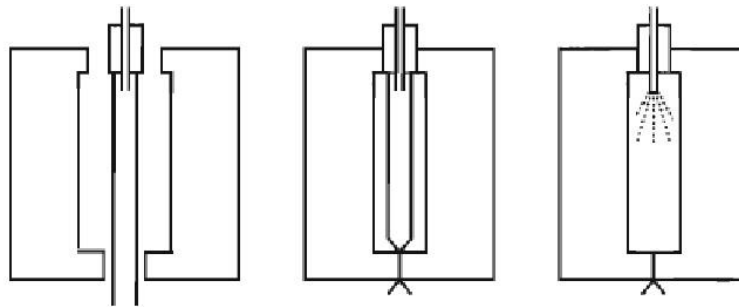
Fonte: Adaptado de YOUSFI, M. et al., 2018.

3.4.2 Processamento da blenda

O processo de moldagem consiste na transformação de um material em um formato de interesse. Para polímeros, ou mistura deles, é necessário que o processo seja realizado no estado

fluido. Existem diversas formas de realizar a moldagem de um polímero, dentre eles podem ser: os processos de moldagem com aquecimento e sem pressão, como o caso vazamento (*casting*) e fiação por fusão (*melt spinning*) e aqueles processos com aquecimento e com pressão, com maior importância industrial, como a compressão (*compression molding*) e a injeção (*injection molding*) que permite a obtenção direta do artefato. Existe também aqueles que permitem a preparação de peças contínuas sendo calandragem (*calendering*) e extrusão (*extrusion*), como o caso de caudos, e por fim processo que permitem a obtenção de peças que tem como matéria de partida peças semi-manufaturadas como o sopro (*blow molding*) e termoformação (*thermoforming*) (MANO; MENDES, 2004). A Figura 7 exemplifica o processo de moldagem por sopro.

Figura 7 – Representação de moldagem de canudo por meio de sopro.



Fonte: Adaptado de MANO; MENDES, 2004.

O processo de moldagem por sopro é um processo descontínuo, ideal para peças ocas com uma pré-forma que serve como molde. O processo por sopro é um processo descontínuo e utiliza a pressão de ar comprimido para formar o material a se fixar nas paredes do molde.

O processo de extrusão pode ser utilizado de diversas formas, alterando o local onde o extrusado é obtido (Figura 6). Dessa forma, pode se utilizar a injeção de ar comprimido ou com um adaptador que possibilite a obtenção de peças ocas, como é o caso dos canudos.

3.5 Caracterização física

As propriedades físicas de um material são de grande importância por conta dos requisitos que devem ser atendidos para o produto final alcance a aplicabilidade desejada. Algumas propriedades tais como: resistência à tensão, módulo de elasticidade, também conhecido como módulo de *Young*, ponto de escoamento, alongação, são exemplos de propriedades analisadas e que descrevem as aplicações de materiais. De forma prática a análise mecânica de um material é uma das considerações essenciais que devem ser realizadas no processo de seleção para um projeto de

peça ou produto. Alguns exemplos de ensaios realizados para determinação desses valores são ensaios mecânicos sob tração, flexão e compressão. Assim, os dados desses ensaios podem ser obtidos por meio das curvas de tensão *versus* deformação (CANEVAROLO Jr, S. V., 2004).

Os ensaios são realizados com uma amostra do material com dimensões determinadas e sob condições controladas e padronizadas. Existem algumas normas que definem condições e métodos para a realização de ensaios em objetos com formatos específicos, essas normas são conhecidas como ASTM.

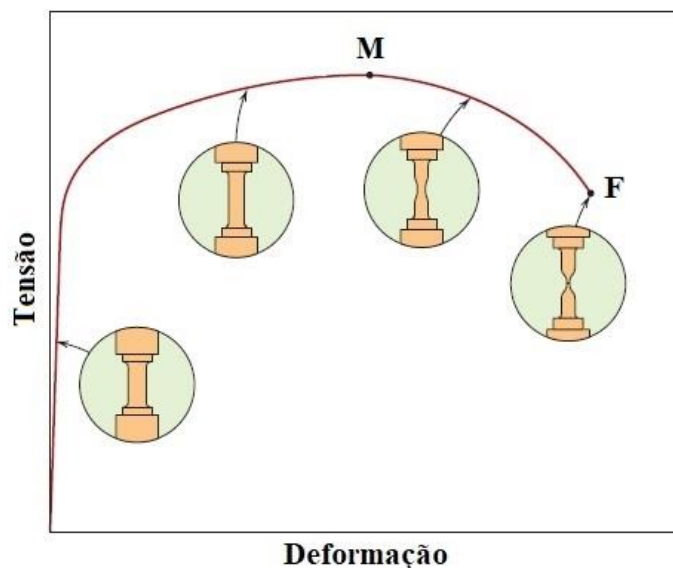
Dentre os dados obtidos dos ensaios mecânicos, o módulo de *Young*, dado pela como E , é uma relação que segue a relação da lei de Hook e é dado com unidades de Pascal (Pa) ou Libra-força (psi). Com isso, materiais em que o processo de deformação em relação a tensão ocorre de forma linear é chamado de deformação elástica. Em um gráfico de tensão (ordenada) em função da deformação (abscissa) que resulta em uma relação linear, a inclinação dessa reta ou o coeficiente de variação corresponde ao módulo de *Young*. A equação 1 descreve a relação do módulo de *Young*.

$$\sigma = E\epsilon \quad (1)$$

Sendo σ a tenção a tração, E o módulo de *Young* e ϵ a deformação do material.

Dessa forma, para canudos constituídos de materiais que apresentam comportamento plástico observa-se esse comportamento de relação linear. A Figura 8 mostra o comportamento de um canudo qualquer que apresenta esse fenômeno.

Figura 8 – Tensão *versus* deformação de um canudo hipotético.



Na Figura 8 é observado que a região inicial do gráfico apresenta um comportamento linear e ao se aproximar do ponto M, conhecido como ponto de escoamento, essa relação de linearidade é perdida. Isso ocorre devido ao ponto de escoamento ser o limite no qual o material se comportará de forma elástica, ou seja, a deformação que o corpo de prova sofre é reversível, podendo voltar ao seu estado original. Após esse ponto o canudo apresenta comportamento não reversível, formando um pescoço no canudo, como é observado na Figura 8, esse comportamento persiste até o ponto F, conhecido como ponto de fratura do material. Nesse ponto ocorre o rompimento do material, no caso do canudo, a fratura ocorre no pescoço formado. Outra observação importante é que na figura o ponto M se coincide com o ponto de resistência a tensão máxima suportada pelo material, nesse caso esse ponto recebe também o nome de limite de resistência máxima à tração ou ponto de resistência máxima (CALISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G., 2016).

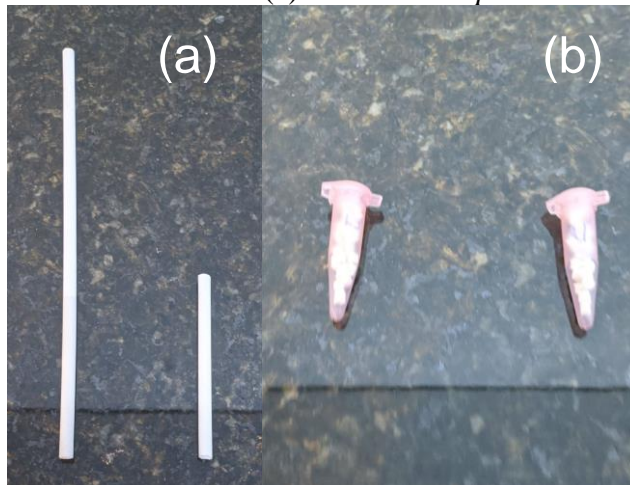
4 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais foram fornecidos pelo Intechlab – Laboratório de Tecnologias Integradas. Os materiais adquiridos foram produzidos em trabalhos anteriores, no qual foi realizado um estudo para a produção de diversas misturas polímeros e verificação da blenda que apresentou melhor capacidade de moldagem em canudo.

4.1 Materiais

Para a realização das análises, amostras das blendas A e B foram fornecidas no formato de canudos, nomeados como CA e CB (Figura 9a), e em formato de pellet, nomeados de PA e PB (Figura 9b). Amostra do amido fosfatado utilizado na confecção dos canudos também foi fornecido pelo Laboratório Intechlab. Foi fornecido também informações em relação à composição das blendas. A blenda A possui: 40% PBS, 45% amido fosfatado, 13% glicerina/0,71% sorbitol e 1 % ácido cítrico. Já a blenda B possui: 40% PBS, 45% amido, 12,9% glicerina/0,5% sorbitol e 0,9 % ácido cítrico. Além das blendas, a empresa também forneceu o Amido fosfatado e o poli(butileno succinato) utilizado para a produção das blendas na forma de pó.

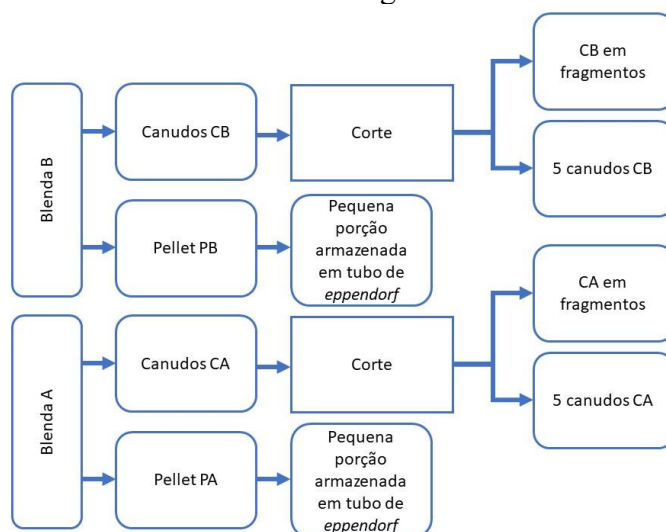
Figura 9 – Amostra de canudo inteiro e cortado (a) e amostra de *pellet* em tubos de *ependorf* (b).



4.2 Métodos

Para realização das análises, uma pequena porção de *pellets* de cada material foi separada e armazenada em dois tubos de *ependorf*. Três canudos foram cortados, gerando cinco canudos de cada material, com comprimentos próximos entre si. A parte restante desses canudos foi cortada em fragmentos pequenos e armazenados dentro de outros dois tubos de *ependorf*, um para cada tipo de material. A Figura 10 esquematiza a metodologia para o preparo das amostras.

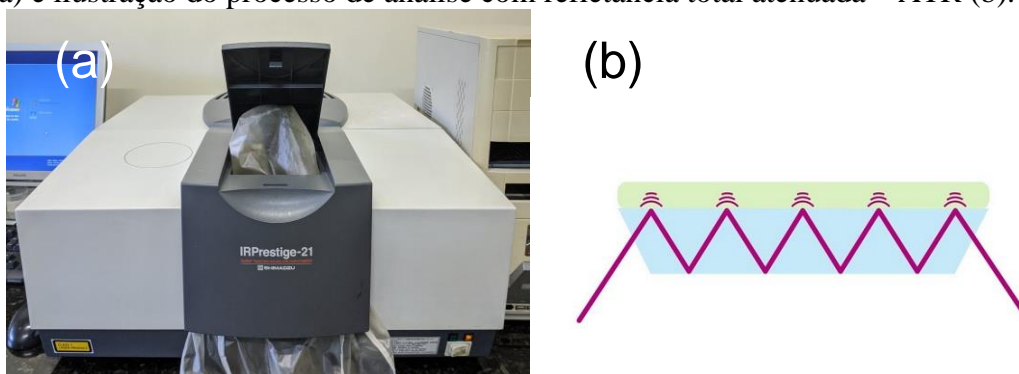
Figura 10 – Esquema ilustrado resumo da metodologia desenvolvida.



4.2.1 Caracterização por espectroscopia na região do infravermelho

A caracterização estrutural das amostras foi feita a partir da espectroscopia de absorção na região do infravermelho por Transformada de Fourier – FTIR. A análise foi realizada no equipamento do laboratório Intechlab da marca SHIMADZU (Figura 11a), modelo IRPrestige-21, com o método de refletância total atenuada – ATR (Figura 11b), na faixa de 4000 cm^{-1} a 500 cm^{-1} . O método ATR é uma forma de melhorar a capacidade de sensibilidade da técnica permitindo uma análise em uma maior. Os materiais utilizados nas análises foram fragmentos de canudos, de pellets do material polimérico, amido fosfatado e poli(butileno succinato).

Figura 11 – Espectrofotômetro Infravermelho por transformada de Fourier do Laboratório Intechlab (a) e ilustração do processo de análise com refletância total atenuada – ATR (b).



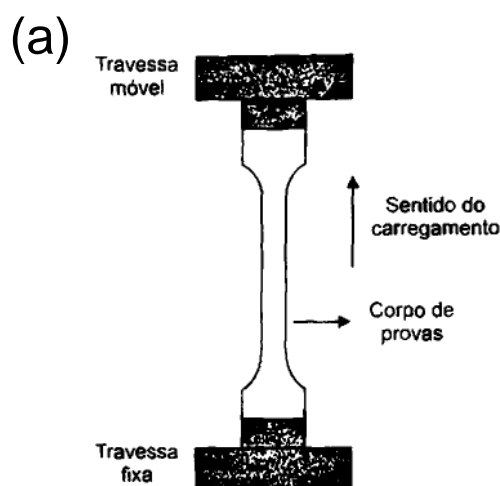
Fonte: MT BRAND, 2023 (b).

4.2.2 Caracterização mecânica por ensaio de tração

Com a realização dos ensaios de tração utilizando um método da ASTM D638 adaptado para canudos, foi possível avaliar as propriedades mecânicas dos materiais analisados. A Figura 12a demonstra um esquema de como ocorre a deformação causada em um canudo durante o ensaio. Com essas informações foram geradas curvas de tensão versus deformação, que fornecem parâmetros importantes do material, como o módulo de *Young*. Os ensaios foram realizados na máquina de ensaio universal do laboratório Intechlab da marca INSTRON, modelo EMIC 23-20 (Figura 12b), à temperatura ambiente. A velocidade do ensaio foi de 50 mm/min; as amostras foram testadas na forma de canudos. Foram ensaiados cinco canudos para cada material. O comprimento, diâmetro interno e externo de cada canudo foram medidos antes de se proceder o teste. O comprimento considerado foi relativo à região que ficava entre as garras da máquina, com valor de no mínimo 55 mm. Já o diâmetro interno e externo obtido foi resultado da média aritmética de duas medições realizadas nas extremidades de cada canudo. As medidas foram feitas com um paquímetro, com resolução de 0,05 mm, e informadas no software do equipamento para gerar os dados.

Com os dados dos ensaios mecânicos obtidos, foi selecionado a curva de cada blenda que apresentou melhor representatividade, tendo como base o valor médio do ponto de escoamento e tensão máxima no rompimento de cada corpo de prova analisado. Com a curva selecionada realizou a divisão dos dados do eixo das abscissas por 100, a fim de obter os dados em forma de fração. Com isso, realizou-se a linearização com o software OriginLab®, os dados da reta obtida foram utilizados para a determinação do módulo de *Young*.

Figura 12 – Esquema de ensaio de tração realizado em um canudo (a) e máquina universal de ensaios mecânicos do laboratório Intechlab (b).

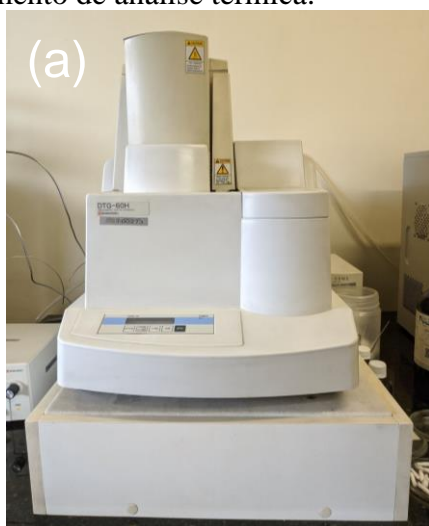


Fonte: CANEVAROLO JR, S.V., 2006 (a).

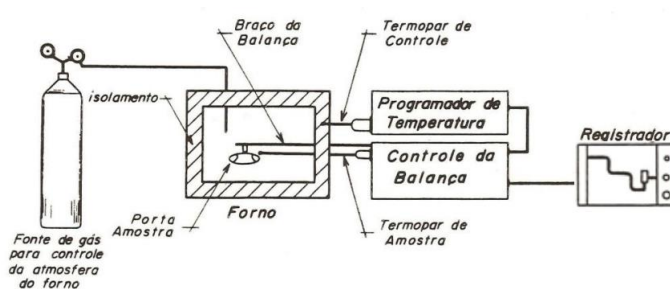
4.2.3 Caracterização por termogravimetria

Para a caracterização térmica, realizou-se a termogravimetria – TG, utilizando os materiais na forma pellets e fragmentos dos canudos. As análises foram realizadas no equipamento do laboratório Intechlab da marca SHIMADZU (Figura 13a), modelo DTG-60H. O diagrama do analisador pode ser observado na Figura 13b, no qual é observado o funcionamento da técnica que consiste em um forno alimentado um cilindro que configura a atmosfera durante a análise, um controlador de temperatura e uma balança que capta as variações de massa da amostra e as registra. Para caracterizar os materiais, primeiramente foram submetidos a aquecimento, iniciando-se na temperatura ambiente até 800°C, a uma taxa de 15°C/min, sob atmosfera de ar.

Figura 13 – Analisador Térmico DTG-60 Shimadzu do Laboratório Intechlab (a) e diagrama do equipamento de análise térmica.



(b)



Fonte: DENARI, G. B., 2013 (b).

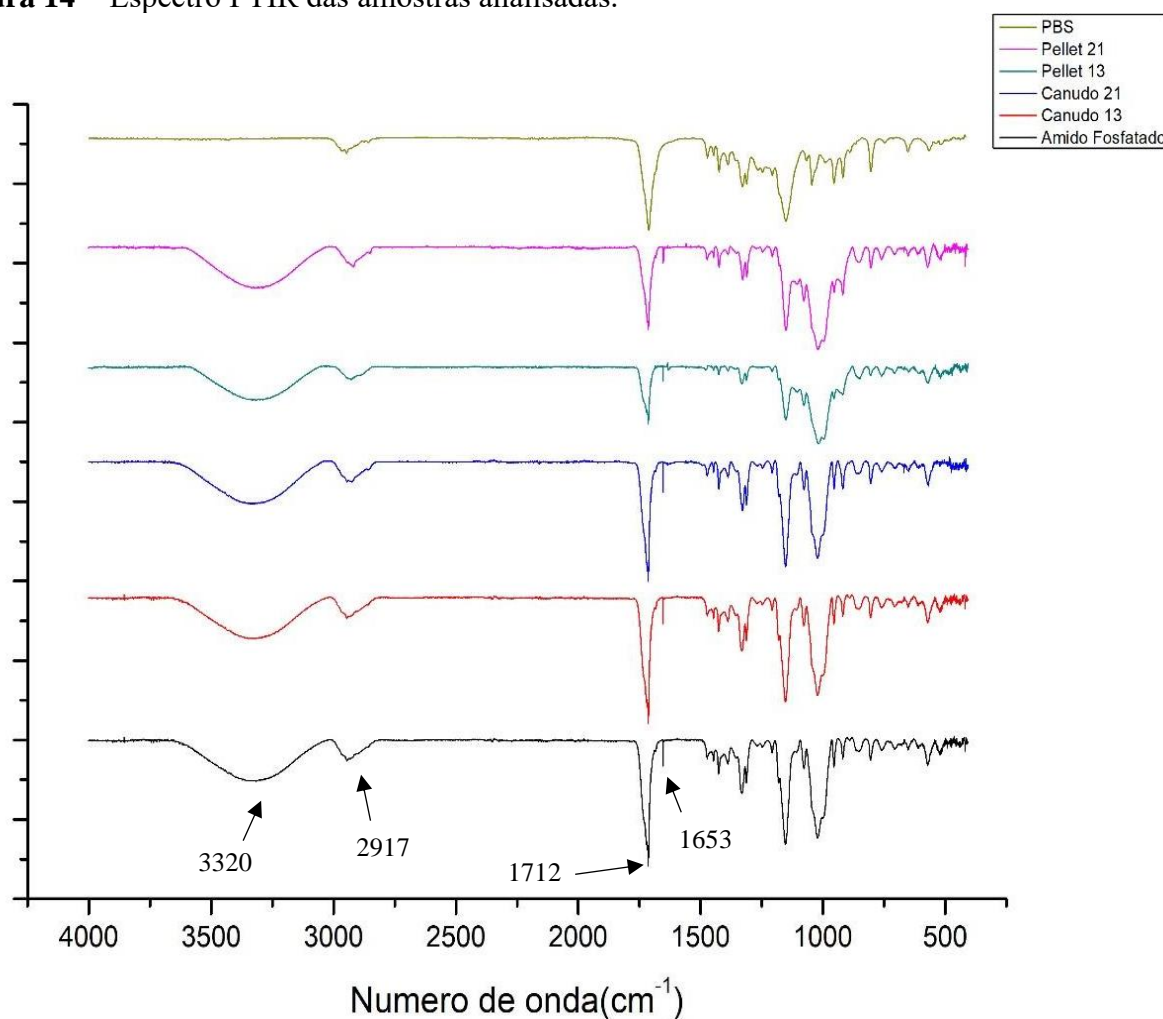
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As análises de FTIR e análise térmica foram analisadas no período de uma semana, conforme a disponibilidade do equipamento no laboratório. As análises mecânicas nos canudos foram realizadas em sequência no mesmo dia, visando garantir que as condições nos quais os corpos de provas foram submetidos sejam as mais próximas entre si.

5.1 Espectroscopia de Absorção do Infravermelho – FTIR

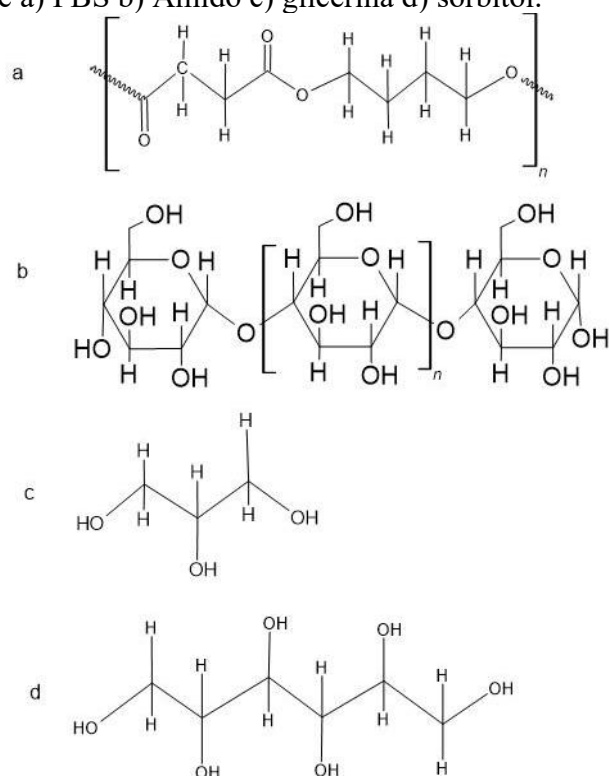
A análise espectroscópica na região do infravermelho foi realizada para identificar bandas características dos materiais constituintes da blenda. Por isso, é necessário conhecer as bandas características dos principais materiais que constituem o material, como é o caso do amido fosfatado, PBS, glicerina e sorbitol. Dessa forma, a análise permite identificar se houve algum tipo de interação química entre os materiais base da blenda ou se houve alguma perda durante o processo de moldagem. As amostras de pellet e canudos das blendas A e B e o amido fosfatado, foram analisadas e realizadas as caracterizações das bandas. Uma amostra de PBS pura foi analisada para efeito de comparação com as blendas estudadas. A Figura 14 mostra os resultados da análise da espectroscopia na região do infravermelho. A região do espectro de 2000 cm^{-1} a 500 cm^{-1} foi ampliada e analisada posteriormente na Figura 16, para melhor atribuição das bandas.

Figura 14 – Espectro FTIR das amostras analisadas.



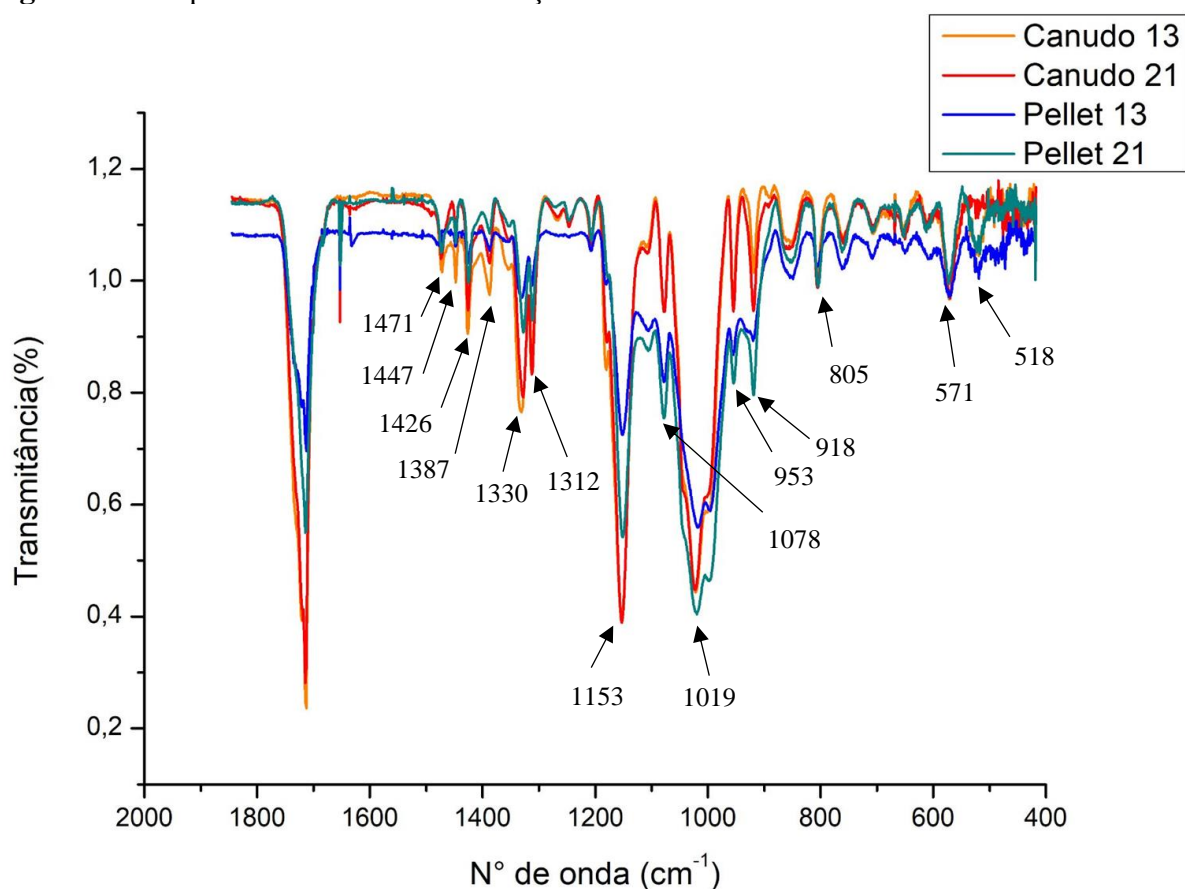
De acordo com o espectro da Figura 14, observa-se bandas de estiramento O-H proveniente dos grupos presentes no amido, na glicerina e no sorbitol e que ocorrem na faixa entre 3500-3200 cm^{-1} e estão presentes nas blendas e no amido fosfatado. As bandas que ocorrem em 2917 cm^{-1} são associadas ao estiramento assimétrico C-H presente nas no PBS, glicerina, sorbitol e amido (Figura 15). Em todos os espectros das blendas é observável a banda referente ao estiramento C=O de éster do PBS ($\nu\text{C}=\text{O}$), ocorre em 1712 cm^{-1} e, também, está presente no amido, por ser modificado e apresentar esterificação. Já a pequena banda presente nas blendas em 1653 cm^{-1} , e que não ocorre no PBS está relacionada a água absorvida pelo material e é correspondente à deformação angular da água ($\delta\text{H-O-H}$), o autor FLOREZ et al. (2019) também relaciona essas bandas como a deformação angular da água.

Figura 15 – Moléculas de a) PBS b) Amido c) glicerina d) sorbitol.



Para visualizar melhor a região do espectro das blendas realizou-se a normalização dos espectros em relação a banda estiramento assimétrico C-H que ocorre em 2900 cm^{-1} e está presente em todos os materiais analisados e ampliou-se o espectro na região de 2000 cm^{-1} a 500 cm^{-1} gerando o espectro da Figura 16.

Figura 16 – Espectro FTIR com normalização na banda CH.



Na Figura 16 é possível observar bandas com mais detalhes, como a banda de estiramento C=O de éster do PBS ($\nu_{\text{C=O}}$) e a banda de deformação angular da água ($\delta_{\text{H-O-H}}$). Além disso, também é possível observar bandas que, segundo o autor FLOREZ et al. (2019), são referentes a deformação angular simétrica do grupo CH₂ ($\delta_{\text{C-H}_2}$) e ($\delta_{\text{C-H}}$) e que ocorrem em 1471, 1447, 1426 e 1387 cm⁻¹. Já as bandas em 1330 e 1312 cm⁻¹ podem estar relacionadas às vibrações de deformação angular de ácido carboxílico C-O-H ($\delta_{\text{C-O-H}}$). A banda em e 1153 cm⁻¹ e a banda em 1019 cm⁻¹ estão relacionadas aos estiramentos das ligações de O-C-O ($\nu_{\text{C-O}}$), a banda em 1019 cm⁻¹ é uma banda característica do amido e não se encontra no PBS, já a banda em 1153 cm⁻¹ está presente em ambos materiais, elas correspondentes a ligações de ésteres insaturados presente no PBS e ésteres aromáticos presentes nas cadeias do amido (AKRAMI, M. et al., 2016; FLOREZ, J. P. et al., 2019). Além disso, de acordo com Ferreira et al. a bandas em 1078 cm⁻¹ pode estar relacionada as vibrações de estiramento O-C-C de carbonila no PBS e as bandas em 953, 918 e 805 cm⁻¹ que podem estar relacionadas a deformação angular fora do plano e presença de grupos terminais vinil atribuídos a reação de cisão da cadeia do PBS e também no amido. As bandas com números de onda menores em 571 e 518 cm⁻¹ podem estar associadas as vibrações estiramento das ligações O-P-O ($\nu_{\text{P-O-P}}$)

presentes no amido do fosfatado (LUCZKIEWICZ, G.; MARQUES, P. T.; LIMA, V. A., 2017). As informações referentes a análise dos espectros FTIR dos materiais estão reunidos na Tabela 1.

Tabela 1 – Atribuição das principais bandas de absorção e a presença no componente.

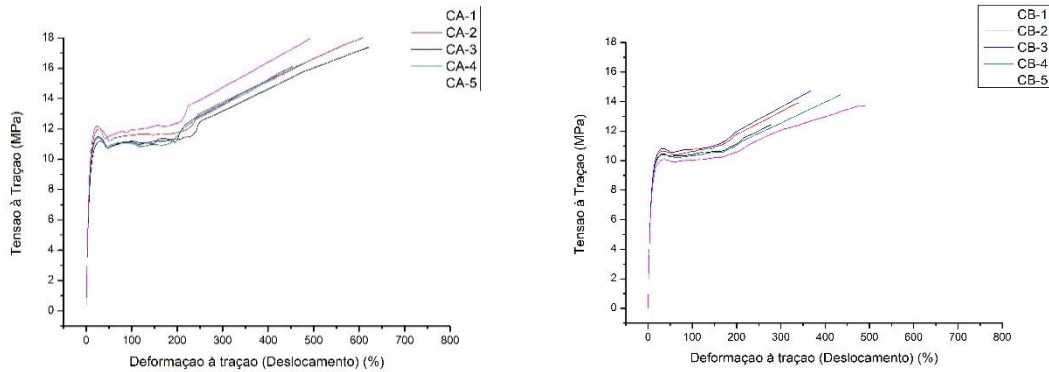
Número de onda (cm ⁻¹)	Atribuição	Componente
3500-3200	Estiramento O-H	Amido Fosfatado
2917	Estiramento assimétrico C-H	Amido Fosfatado; PBS
1712	Estiramento C=O	Amido Fosfatado; PBS
1653	Deformação angular H ₂ O	Amido Fosfatado
1480 - 1380	Deformação angular simétrica CH ₂	Amido Fosfatado; PBS
1330 - 1310	Deformação angular de ác. carboxílico C-O-H	Amido Fosfatado; PBS
1153; 1019	Estiramento O-C-O	Amido Fosfatado; PBS
1078	Estiramento C-C-O	Amido Fosfatado; PBS
953; 918; 805	Deformação angular CH=CH ₂ (vinil)	Amido Fosfatado; PBS
571; 518	Estiramento O-P-O	Amido Fosfatado

Assim, como as blendas apresentam em sua composição as mesmas substancias mudando apenas as a proporção de plastificantes, as blendas A e B apresentam a mesmas bandas. Além disso, com a técnica FTIR foi possível observar também que não houve modificação quanto a composição do material após o processamento e de moldagem já que as bandas foram observadas tanto nas blendas na forma de canudo quanto na forma de *pellets*. Com isso, foi possível realizar a identificação das bandas e dos tipos de ligações presentes nas blendas.

5.2 Ensaio de Tração

Os ensaios mecânicos foram realizados com o propósito de avaliar as propriedades mecânicas das blendas e se existe variação da propriedade entre as blendas. Assim, na Figura 17 estão representadas as curvas de Tensão à Tração versus Deformação à Tração das blendas CB e CA.

Figura 17 – Curvas de tensão à tração versus deformação à tração das amostras CA e CB.



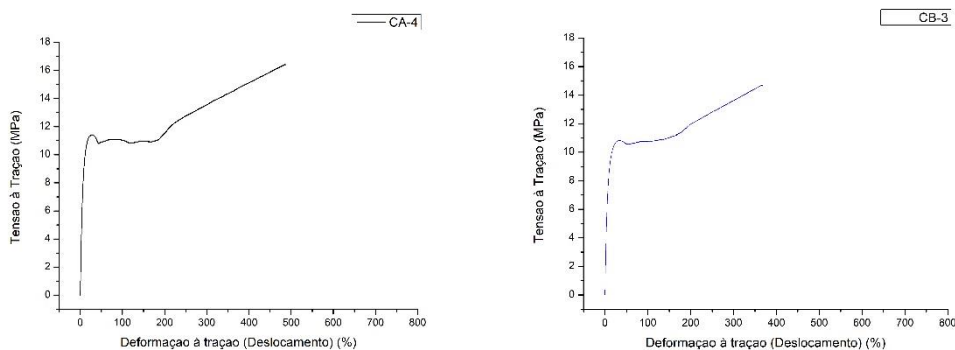
a) Curva das amostras CA

b) Curva das amostras CB

Na Figura 17 as curvas das amostras CA e CB fornece informações sobre os materiais, como é possível observar as blendas apresentaram comportamento dúctil apresentando comportamento plástico elevado. Isso se deve a composição dessa blenda ser majoritariamente de polímeros que apresentam comportamento plástico como o PBS e o amido modificado. Assim, o material analisado é uma blenda, uma mistura física, pode-se dizer que o material apresenta certa heterogeneidade que afeta diretamente o comportamento mecânico do material, pois materiais heterogêneos possuem comportamento mecânico mais variável (Figura 17a e Figura 17b). Isso explica as diferentes tensões máximas obtidas e tensão de escoamento para a canudos constituídos do mesmo material.

Além disso, com essas curvas foi possível obter informações quanto à resistência à tração do material até a fratura, tensão de escoamento e módulo de *Young*. Para determinar essas informações selecionou-se uma curva das amostras CA e CB que apresentava comportamento médio entre cada material. Assim, dentre as amostras analisadas da blenda A selecionou-se a curva CA-4 (Figura 18a) e entre as amostras da blenda B selecionou-se a curva CB-3 (Figura 18b).

Figura 18 – Curva/s de tensão à tração versus deformação à tração representativa das de tração das amostras CA e CB.



a) Curva da amostra CA-4

b) Curva da amostra CB-3

Das curvas apresentadas, foi possível obter os valores de tensão máxima, módulo de *Young* e tensão de escoamento. Os valores da regressão linear utilizada para obter os dados de módulo de *Young* estão descritos no Apêndice A. Esses dados estão expostos na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores de tensão máxima, módulo de Young e tensão de escoamento das amostras CA e CB.

	Módulo de <i>Young</i> (MPa)	Tensão de escoamento (MPa)	Tensão máxima (MPa)
CA-4	171,01	11,41	16,40
CB-3	159,20	10,82	14,70

Analisando os resultados obtidos na Tabela 2 pode-se afirmar que o canudo feito a partir da blenda A apresentou maior módulo de *Young*, tensão de escoamento e tensão máxima suportada pelo material até seu rompimento quando comparado com o canudo feito da blenda B, demonstrando que uma pequena mudança na composição de plastificantes pode influenciar diretamente nas características físicas do material.

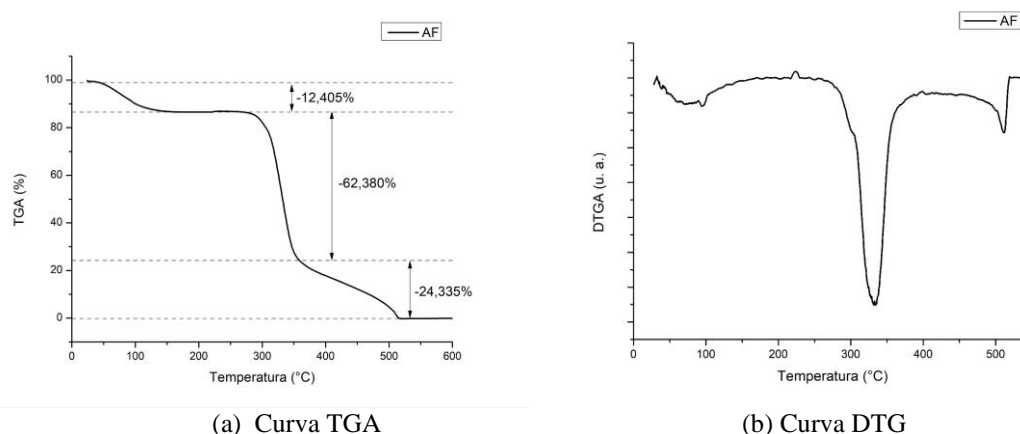
Na tese de Carolina Helena Martins (2020) é descrito que os valores de módulo de *Young* para o TPS puro é de $(1,73 \pm 0,49)$ Mpa e o TPS reticulado com ácido cítrico no trabalho da autora apresentou valores de $(12,94 \pm 2,91)$ MPa. Já o PBS é relatado com módulo de *Young* de $(288,91 \pm 29,14)$ MPa. Assim, pode-se dizer que a blenda apresentou certa interação entre os polímeros, apresentando propriedades mecânicas intermediárias entre os polímeros misturados, já que as propriedades mecânicas estão diretamente relacionadas com os tipos de interações que ocorrem nas cadeias poliméricas (MARTINS, C. H., 2020).

Assim, realizando uma comparação entre os polímeros convencionais que são empregados na confecção de canudos descartáveis como é o caso do polipropileno, que em sua forma pura possui tensão de escoamento que varia entre 31,0 e 41,4 MPa e possui módulo de *Young* em temperatura ambiente (25°C) com valor na faixa de 1140-1550 MPa. Percebe-se que as blendas biodegradáveis estudadas a base de amido fosfatado e PBS apresentam certa diferença das características de um polímero convencional, com módulo de *Young* aproximadamente 10 vezes menor (CALISTER; RETHWISCH, 2012, p. 533).

5.3 Análise termogravimétrica

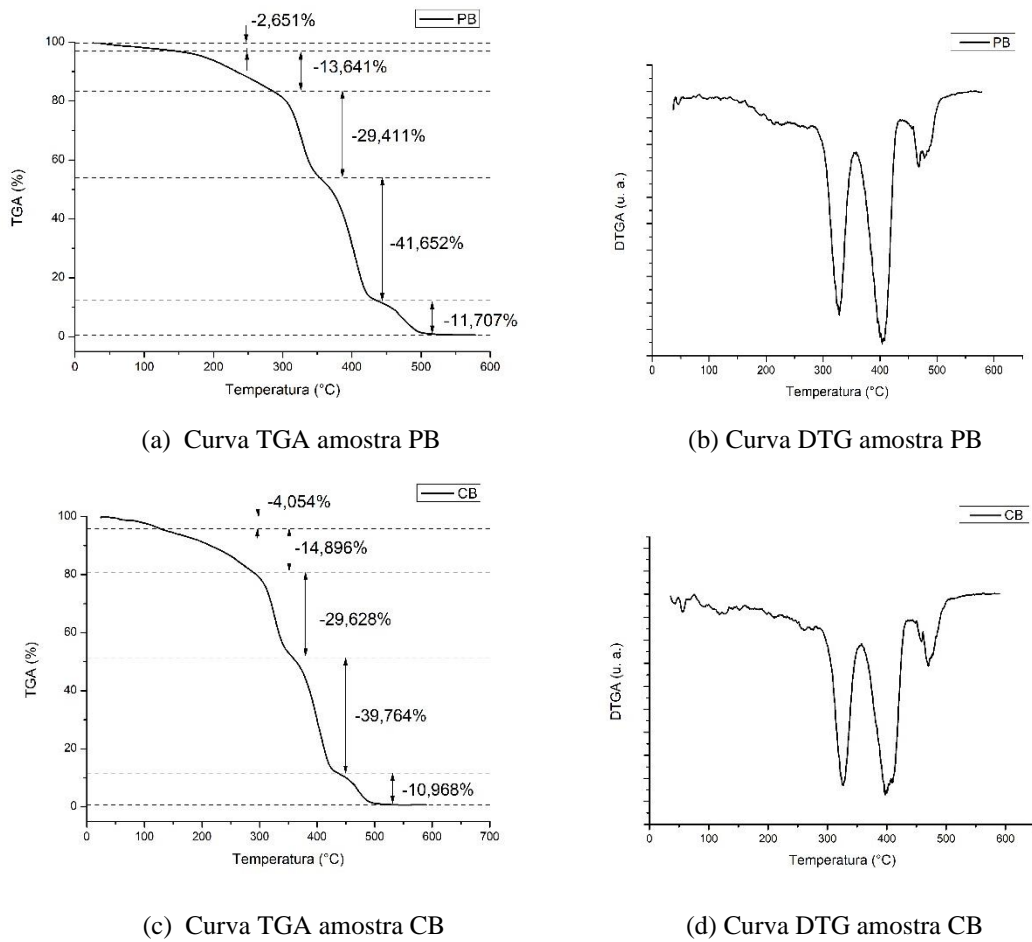
As análises de termogravimétricas foram realizadas com o objetivo de adquirir informações quanto à degradação térmica e estabilidade em relação a temperatura das blendas e do amido fosfatado puro. Realizou-se a análises de TG e DTG das blendas e do amido fosfato e obteve-se os dados apresentados nas Figuras 19, 20 e 21.

Figura 19 – Análise termogravimétrica da amostra AF.



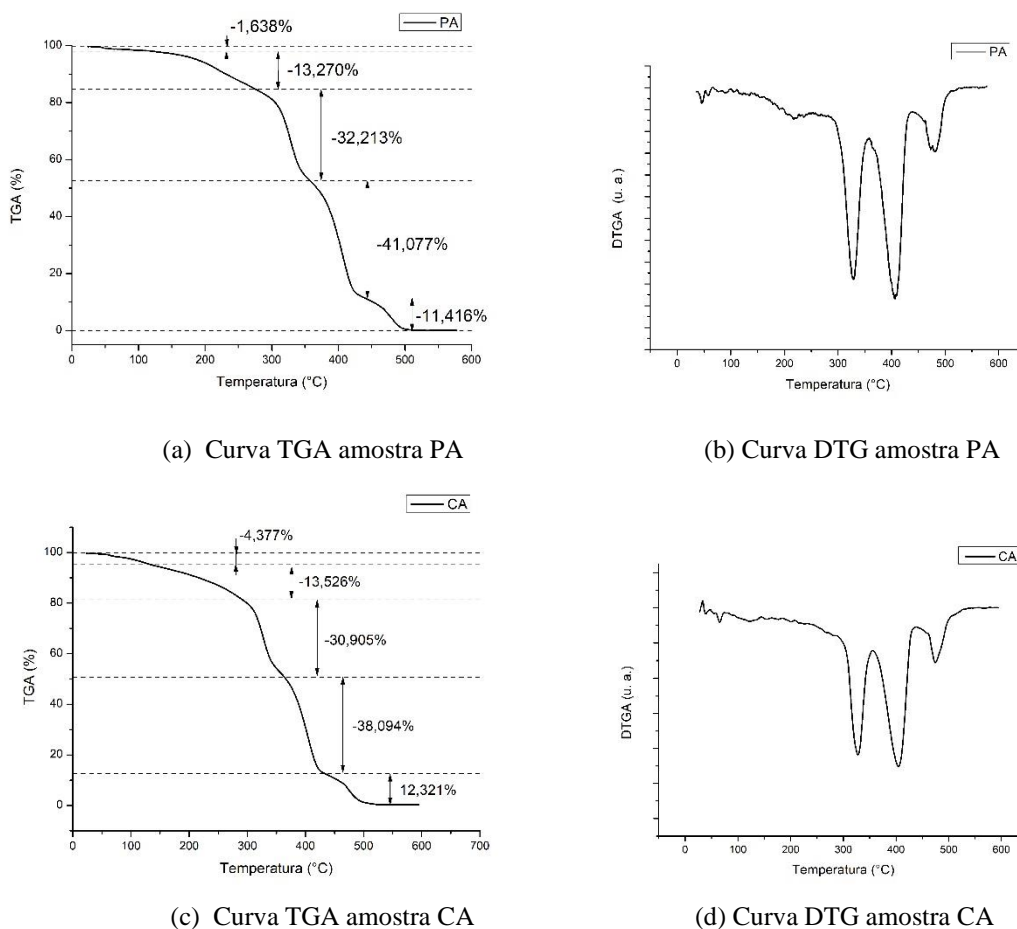
Na curva termogravimétrica do amido fosfatado (Figura 19a) é representado pelo pico em 335°C, já a segunda ocorre entre 375-520°C e possui pico máximo 512°C. Esses picos estão evidenciados na curva de DTG (Figura 19b). A primeira etapa de degradação tem uma perda de massa de 62,360% e é evidenciada no gráfico de DTG pelo maior pico. Já a segunda perda é evidenciada pelo pico mais abaulado e possui uma perda de massa de 24,335%.

Figura 20 – Análise termogravimétrica da blenda B.



A blenda 21 apresentou uma TGA com várias perdas tanto na forma de canudo (CB) quanto na de pellet (PB). Na curva de TGA da amostra B (Figura 20a e Figura 20c), as reações ocorrem em sequência não havendo uma faixa de temperatura em que a massa ficou constante entre as etapas de degradação. A primeira perda do material de 2,651% e 4,054%, observada nas Figura 20a e Figura 20c, são relativas à umidade do material e ocorre na faixa entre 50-150°C. As quatro perdas estão relacionadas às reações de degradação. Os picos na curva DTG em 328°C, 403°C e 468°C na Figura 20b e os picos 326°C, 397°C e 469°C na Figura 20d evidenciam as principais reações de degradação que ocorrem no material.

Figura 21 – Análise termogravimétrica da blenda A.



A blenda A também apresentou comportamento de degradação térmica semelhante para as amostras antes e depois do processo de moldagem, demonstrando que as características de estabilidade do material não foram alteradas durante o processo. As primeiras perdas que ocorrem na faixa entre 60 e 130°C nas curvas de TGA das amostras CA e PA são relacionadas à umidade do material (Figura 21a e Figura 21c). As perdas seguintes estão relacionadas à degradação do material. Os picos na DTGA em 329°C, 406°C e 482°C (Figura 21b) e 328°C, 403°C e 474°C (Figura 21c) evidenciam as principais perdas no processo de degradação.

Ao observar as curvas de TGA e DTG das blendas A e B é perceptível a presença da perda de umidade e de quatro reações de degradação, não havendo grandes variações entre as blendas. Dessa forma, a Tabela 3 resume os eventos térmicos que ocorrem nas Figuras anteriores (Figura 20a, Figura 20c, Figura 21a e Figura 21c), sendo determinado o T_{onset} e T_{endset} para cada etapa de degradação.

Tabela 3 – Eventos térmicos e seus dados.

		Etapas e degradação			
		Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3	Etapa 4
PB	$T_{onset}(^{\circ}C)$	175	309	375	454
	$T_{endset}(^{\circ}C)$	308	342	419	496
CB	$T_{onset}(^{\circ}C)$	148	305	374	452
	$T_{endset}(^{\circ}C)$	307	340	420	487
PA	$T_{onset}(^{\circ}C)$	169	303	375	453
	$T_{endset}(^{\circ}C)$	311	342	421	495
CA	$T_{onset}(^{\circ}C)$	152	304	374	452
	$T_{endset}(^{\circ}C)$	312	339	419	492

De acordo com os dados da Tabela 3 as blendas apresentaram pouca variação na T_{onset} das etapas 2, 3 e 4. Na etapa 1 houve maior variação da T_{onset} principalmente entre as amostras do mesmo material, *pellet* e canudo. Isso se deve a interferência da umidade no início das etapas de degradação do material e pelo fato da blenda em forma de canudo absorver mais umidade do que na forma de *pellet*. A primeira etapa sofreu pouca variação entre as blendas no mesmo formato, mostrando novamente que o processo de moldagem não alterou as características de estabilidade térmica do material.

Ao analisar a curva de DTGA do amido fosfatado observou-se que a degradação do amido ocorre entre 300-350°C, da mesma maneira é observado na curva das blendas CA e CB que ocorre perdas de massa na mesma faixa, etapa 2 na Tabela 3, podendo assim presumir que a reação de degradação nessa etapa é referente a presença do amido fosfatado na blenda. Da mesma forma, Ferreira et al. mostra que o PBS puro possui a reação de degradação com maior perda de massa na faixa entre 250 e 450°C, coincidindo com a etapa 3 de degradação das blendas. Assim, como as blendas possuem em composição grande parte de PBS, pode supor que essas reações de degradação sejam provenientes desse polímero.

Outro ponto importante é em relação as porcentagens de perda de massa de cada etapa. A etapa 2 apresenta perda de massa entre 29% e 32% já a etapa 3 apresenta perda de massa entre 38% e 43%. Esses valores são comparáveis a composição das blendas, sendo 45% amido fosfatado e 40%

PBS, além disso, a redução da porcentagem de massa das etapas 2 e 3 em relação a composição das blendas pode ser justificada pela absorção de umidade do material. Assim, essa comparação é mais um indicativo das etapas 2 e 3 serem correspondentes aos polímeros amido fosfatado e poli(butileno succinato), respectivamente.

Ademais, a etapa 4 de degradação pode ser relacionada com a degradação dos grupos mais estáveis presentes nas das cadeias poliméricas do amido e do PBS já que como é possível observar tanto na DTGA do amido fosfatado (Figura 20b) a última etapa de degradação ocorre na mesma faixa que etapa 4. Além disso, nas blendas é possível observar a ocorrência de dois picos na DTGA, indicando que há ocorrência de duas reações de degradação nessa etapa, podendo se inferir que a reação de degradação do amido ocorre em paralelo com a de degradação do PBS ou dos grupos fosfatos ligados ao amido. Outro ponto importante a se observar é que, tanto no amido quando nas blendas, após o processo de degradação a massa residual é menor que 1%, demonstrando que a reação de degradação foi praticamente completa para os materiais presentes na blenda.

No trabalho de Al-mosawy (2020), o autor relata que a blenda de PBS/amido possui duas etapas de degradação, uma relacionada ao amido e outra relacionada ao PBS. Em seu trabalho o autor também descreve que a T_{onset} da primeira etapa de degradação da blenda é de 265°C e que a banda estudada possui 80% de PBS e 20% de amido. Essa diferença com os resultados pode estar relacionada com o fato das blendas A e B estudadas possuírem alto teor de plastificante, 15% em ambas. Além disso, pode-se supor que a primeira etapa de degradação é a do plastificante utilizado, glicerina/sorbitol e ácido cítrico.

6 CONCLUSÃO

Por meio das análises dos espectros dos materiais biodegradáveis foi possível observar as bandas características dos polímeros presentes nas blendas, PBS e amido fosfatado, verificando a composição dos materiais. Dessa forma, pode-se afirmar que não houve modificação ou perda de interação entre os polímeros constituintes da blenda. Mostrando que ambas as blendas são resistentes ao processo de moldagem realizado para a formação dos canudos, no caso a moldagem por sopro.

As curvas das análises mecânicas dos materiais estudados mostraram que os canudos das amostras são dúcteis e possuem certa facilidade na moldagem. Além disso, as blendas apresentaram propriedades físicas intermediárias, sendo que a blenda A foi a que apresentou melhores propriedades físicas. No entanto, nos ensaios de tração houveram canudos em que o rompimento ocorreu próximo as garras, indicando que o material apresentou microtrincas no local devido a imperfeições no processo de moldagem da blenda. Além disso, as blendas analisadas quando comparadas com propriedades físicas de polímeros já utilizados como é o caso do polipropileno, ainda apresenta certa diferença o que não impede de se utilizar a blenda para a fabricação de canudos.

A análise das curvas termogravimétricas mostrou a presença dos materiais constituintes da blenda, como o PBS e o amido fosfatado, comprovando que a blenda apresentou certa estabilidade após o processo de moldagem.

Com isso, foi possível alcançar os objetivos de realizar a caracterização da blenda, obtendo resultados relacionados a sua estabilidade. Essas blendas apresentam características físicas pouco parecidas com os polímeros mais utilizados atualmente. Assim, alcançar as propriedades de polímeros convencionais como o polipropileno, que é utilizado na confecção de canudos não biodegradáveis ainda é um desafio.

Uma possível forma para melhorar as propriedades da blenda seria a utilização de outros plastificantes ou com o aumento da homogeneidade utilizando o método de compactação, sendo realizado com a adição de substâncias que favoreçam a miscibilidade entre esses polímeros. Por exemplo, a adição de polímeros compatibilizantes, aditivos surfactante ou agentes químicos de ligação.

Como recomendação para trabalhos seguintes, a avaliação das propriedades físicas de canudos já comercializados e comparação com a blenda estudada, assim como, as blendas que possam ser obtidas com melhorias na miscibilidade dos polímeros, seria algo de grande relevância.

REFERÊNCIAS

- AKCELRUD, L. **Fundamentos da Ciência dos Polímeros**. 1º ed. Barueri: MANOLE, 2007. p. 288.
- AKRAMI, M.; GHASEMI, I.; AZIZI, H.; KARRABI, M.; SEYEDABADI, M. A new approach in compatibilization of the poly(lactic acid)/thermoplastic starch (PLA/TPS) blends. **Carbohydrate Polymers**, v. 144, p. 254-262, fev. 2016.
- ALIOTTA, L.; SEGGIANI, M.; LAZZERI, A.; GIGANTE, V.; CINELLI, P. A Brief Review of Poly (Butylene Succinate) (PBS) and Its Main Copolymers: Synthesis, Blends, Composites, Biodegradability, and Applications. **Polymers**, v. 14, n. 4, p. 844, fev. 2022.
- AL-MOSAWY, Manar G. A. A. New Biopolymer Nanocomposite Based Poly Polybutylene Succinate (PBS)/Corn Starch Modified Clay. **Nanoscience & Nanotechnology-Asia**, v. 10, p. 1-6, dec. 2020.
- AMORIM, Thaís Souza. **Extração, reticulação e caracterização físico-química, térmica e funcional do amido de fruta-pão (Artocarpus altilis)**. Tese (Mestrado em Ciência de Alimentos) - Universidade Federal da Bahia, Faculdade de Farmácia, Programa de Pós-Graduação em Ciência de Alimentos, Salvador, Bahia, 2017. Disponível em: http://www.pgalimentos.far.ufba.br/sites/pgalimentos.far.ufba.br/files/thais_souza_amorim.pdf. Acesso em: 22 maio 2023.
- CALISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciências e Engenharias de Materiais: Uma Introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. p. 159-197; 533.
- CANEVAROLO JR, Sebastião Vicente. **Ciência dos Polímeros – Um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. 2. ed. São Paulo: Artliber, 2006. p. 341-360.
- CANEVAROLO Jr, Sebastião Vicente. **Técnica de caracterização de Polímeros**. São Paulo: Artliber, 2004. p 329-360.
- CEREDA, M. P.; VILPOUX, O. F. **Latin American Starchy Tubers: Technology, use and potentialities of Latin American starchy tubers**. São Paulo: Fundação Cargill, 2003. v. 3. p. 521-553.
- CRUZ, R.; EL DASH, A. A. M. Amido de chuchu (*Seichium edule*, Swartz). Efeito da fosfatação em sua viscosidade. **Boletim da Sociedade Brasileira de Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.18, n. 4, p. 371-378, 1984.
- DAMODARAN, S; PARKIN, K.L.; FENNEMA, O. R. **Química de Alimentos de Fennema**. Porto Alegre: Artmed, 4 ed., 2010.

- DENARI, Gabriela Bueno. **Estudo da degradação térmica de blendas de amido termoplástico/PLA com aditivos**. Material de Apoio. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/75/75135/tde-04042013-151955/publico/GabrielaBuenoDenari_Revisado_Anexo.pdf. Acesso em: 20 jun. 2023.
- FERREIRA, L. P., MOREIRA, A. N., SOUZA Jr., F. G. de; PINTO, J. C. C. da S.. Preparo de Nanocompósitos de Poli(Succinato de Butileno) (PBS) e Argila Montmorilonita Organofílica via Polimerização In Situ. **Polímeros**, v. 24, n. 5, p. 604 – 611, 2014.
- FLOREZ, J. P.; FAZELI, M.; SIMÃO, R. S. Preparation and characterization of thermoplastic starch composite reinforced by plasma-treated poly (hydroxybutyrate) PHB. **Biological macromolecules**, v.123, p. 609-621, fev. 2019.
- FRANCHETTI, S. M. M.; MARCONATO, J. C. Polímeros Biodegradáveis – Uma Solução Parcial Para Diminuir a Quantidade Dos Resíduos Plásticos. **Química Nova**, v. 29, n. 4, p. 811-816, mar. 2006.
- GALLANT, D. J.; BOUCHET, B.; BULÉON, A.; PÉREZ, S. Physical characteristics of starch granules and susceptibility to enzymatic degradation. **European Journal of Clinical Nutrition**, v. 46, p. 3-165, 1992.
- GAUTAM, R.; BASSI, A. S.; YANFUL, E. K. A Review of Biodegradation of Synthetic Plastic and Foams. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, v. 141, n. 1, p. 85-108, 2007.
- GROSS, R. A.; KALRA, B. Biodegradable Polymers for the Environment. **Science New York**, v. 297, n. 5582, p. 803-807, ago. 2002.
- HIRSCH, J. B.; KOKINI, J. L. Understanding the Mechanism of Cross-Linking Agents (POCl₃, STMP, and EPI) Through Swelling Behavior and Pasting Properties of Cross-Linked Waxy Maize Starches. **Cereal Chemistry** v. 79, n., p. 102–107, 2002.
- JAYASEKARA R., HARDING I., BOWATER I., LONERGAN G. Biodegradability of Selected Range of Polymers and Polymer Blends and Standard Methods for Assessment of Biodegradation. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 13, n. 3, p. 13-231, jul. 2005.
- KIM, C.H.; KIM, D. W.; CHO, K. Y. The influence of PEG molecular weight on the structural changes of corn starch in a starch/PEG blend. **Polymer Bulletin**, v. 63, p. 91–99, mar. 2009.
- KIM, D. Y.; RHEE, Y. H. Biodegradation of microbial and synthetic polyesters by fungi. **Microbiol Biotechnol**, v. 61, p. 300-308, jan. 2003.
- KIM, H. S.; YANG, H. S.; KIM, H. J. Biodegradability and Mechanical Properties of Agro-Flour-Filled Polybutylene Succinate Biocomposites. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 97, n. 4, p. 1513-1521, mai. 2005.

- KYRIKOU, I.; BRIASSOULIS, D. Biodegradation of Agricultural Plastic Films: A Critical Review. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 15, p. 125-150, jul. 2007.
- LEJA, K.; LEWANDOWICZ, G. Polymers Biodegradation and Biodegradable Polymers – a Review. **Polish Journal of Environmental Studies**, v. 19, n. 2, p. 255-266, jan. 2010.
- LIU, H. et al. Thermal processing of starch-based polymers. **Progress in Polymer Science**, v. 34, n. 12, p. 1348–1368, jul. 2009.
- LURCKEVICZ, G.; MARQUES, P. T.; LIMA, V. A. Análise Química e Quimiométrica de Matrizes de Amido Modificado por Trimetafosfato de Sódio. **Revista Virtual de Química**, v. 9, n. 4, p. 1462-1480, ago. 2017.
- MANO, E. B.; MENDES, L. C. **Introdução a Polímeros**. 2. ed. São Paulo: BLÜCHER, 2004. Cap. 1, p. 1-12.
- MARTINS, C. H. **Desenvolvimento e caracterização de blendas baseadas em amido termoplástico/modificado e poli(butileno succinato)**. Orientador: Prof^ª Dra. Patrícia Santiago de Oliveira Patrício. p.1-95 Dissertação (Mestrado) – Programa De Pós-Graduação Em Química De Minas Gerais, Área De Concentração: Polímeros, Centro Federal De Educação Tecnológica De Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.
- MT BRAND. Attenuated Total Reflectance (ATR). Disponível em: https://www.mt.com/us/en/home/applications/L1_AutoChem_Applications/ftir-spectroscopy/attenuated-total-reflectance-atr.html. Acesso em: 19 jun. 2023.
- OOSTERGETEL, G. T.; BRUGGEN, E. F. J. V. The crystalline domains in potato starch granules are arranged in a helical fashion. **Carbohydrate Polymers**, Groningen, v. 21, n. 1, p. 7-12, out. 1993.
- RAGHAVAN, D. Characterization of Biodegradable Plastics. **Polymer-Olastics Technology and Engineering**, Washington, v. 34, n. 1, p. 41-63, 1995.
- SCHWACH, E.; AVÉROUS, L. Starch-based biodegradable blends: morphology and interface properties. **Polymer International**, Strasbourg, v. 53, n. 12, p. 2115-2124, out. 2004.
- SIDDIQUE, R.; KHATIB, J.; KAUR, I. Use of recycled plastic in concrete: A review. **ScienceDirect**, Patiala, v. 28, n. 10, p. 1835-1852, 2008.
- SWANSON, C. L.; SHOGREN, R. L.; FANTA, G. F.; IMAM, S. H. Starch-Plastic Materials–Preparation, Physical Properties, and Biodegradability (A Review of Recent USDA Research). **Journal of Environmental Polymer Degradation**, v. 1, n. 2, p. 155 – 166, abr. 1993.

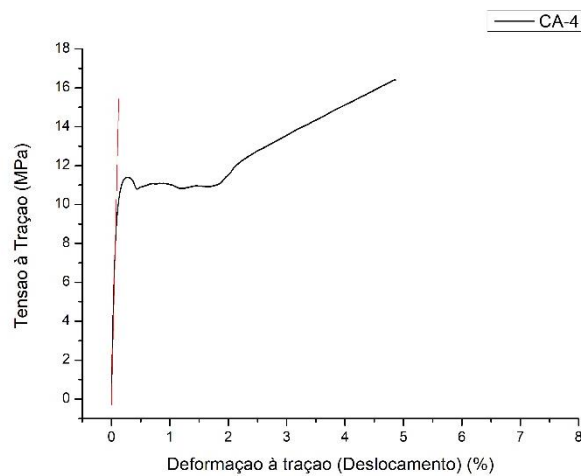
- URAYAMA, H.; KANAMORI, T.; KIMURA, Y. Properties and Biodegradability of Polymer Blends of Poly(l-lactide)s with Different Optical Purity of the Lactate Units. **Macromolecular Materials and Engineering**, v. 287, p.116-121, fev. 2002.
- VALERO-VALDIVIESO, M. F.; ORTEGÓN, Y.; USCATEGUI, Y. BIOPOLYMERS: PROGRESS AND PROSPECTS. **DYNA**, Medellín, v. 80, n. 181, p. 171-180, out. 2013.
- VETHAAK, A. D.; LEGLER, J. Microplastics and human health. **Science**, New York, v. 371, n. 6530, p. 672-674, fev. 2021.
- WALTER, M.; SILVA, L. P. D.; EMANUELLI, T. Amido resistente: características físico-químicas, propriedades fisiológicas e metodologias de quantificação. **Ciência Rural**, v. 35, n. 4, p. 974-980, ago. 2005.
- YOUSFI, M.; DADOUCHE, T.; CHOMAT, D.; SAMUEL, C.; SOULESTIN, J.; LACRAMPE, M. F.; KRAWCZAK, P. Development of nanofibrillar morphologies in poly(L-lactide)/poly(amide) blends: role of the matrix elasticity and identification of the critical shear rate for the nodular/fibrillar transition. *J. Appl. Polym. Sci.*, v. 39, n. 8, p. 22023-22041, 2018.
- YU, L.; DEAN, K.; LI, L. Polymer blends and composites from renewable resources. **Progress in Polymer Science**, v. 31, n. 6, p. 576-602, mar. 2006.

APÊNDICE

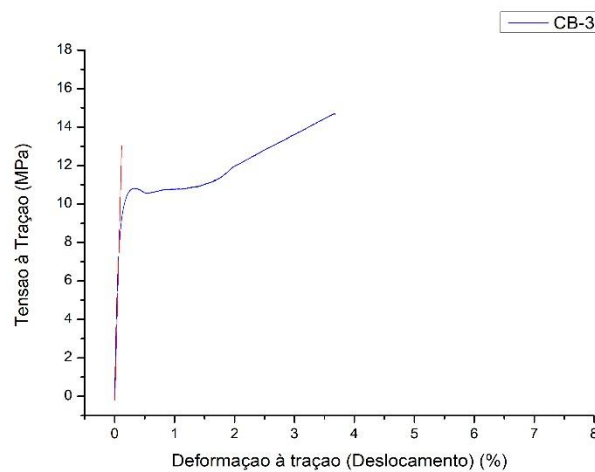
APÊNDICE A – Curva de tensão à tração versus deformação à tração com regressão linear.

A Figura A.1 e A.2 apresentam as curvas tensão à tração versus deformação à tração com a regressão linear dos pontos na região com regime elástico dos materiais. A tabela no Apêndice A.3 apresenta os dados da curva da regressão linear realizada para obtenção do módulo de *Young* dos materiais.

A.1 – Curva de tensão à tração versus deformação à tração da amostra CA-4 com regressão linear.



A.2 – Curva de tensão à tração versus deformação à tração da amostra CB-3 com regressão linear.



A.3 – Tabela com os dados da regressão linear das amostras CA-4 e CB-3.

Nome da amostra	Equação	Valor de A	Valor de B	valor de R^2
CA-4	$F(x) = A \cdot x + B$	$171,01 \pm 0,01$	$0,90 \pm 0,01$	0,999
CB-3	$F(x) = A \cdot x + B$	$159,20 \pm 0,01$	$0,83 \pm 0,01$	0,999