



LUIZA FREIRE OLIVEIRA

**EFEITO DA UTILIZAÇÃO DE MATERIAL
REPROCESSADO SOBRE OS PROCESSOS DE
EXTRUSÃO E TERMOFORMAGEM DO
POLIPROPILENO**

LAVRAS – MG

2021

LUIZA FREIRE OLIVEIRA

**EFEITO DA UTILIZAÇÃO DE MATERIAL REPROCESSADO SOBRE OS
PROCESSOS DE EXTRUSÃO E TERMOFORMAGEM DO POLIPROPILENO**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia de Materiais, para obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Rafael Farinassi Mendes
Orientador

LAVRAS-MG
2021

RESUMO

Copos e embalagens descartáveis são produzidos em grande escala nas indústrias, gerando empregos e movimentando a economia do país. A indústria brasileira de copos plásticos constitui-se de 25 empresas distribuídas em 9 estados, sendo a Copobras a empresa líder deste mercado. O Polipropileno, devido às suas propriedades, é um dos polímeros mais utilizados na produção de copos descartáveis. Para que estes copos possam ser produzidos existem basicamente duas etapas, a extrusão e a termoformagem. Na etapa de extrusão as matérias primas são fundidas e processadas para formar uma lâmina, a qual, posteriormente, passa pela termoformagem, obtendo-se o produto final. Durante esse processo de produção são gerados resíduos, chamados de aparas, que podem advir de sobras da extrusão e da termoformagem ou de produtos que se encontram fora da norma. Como uma solução econômica e ambiental, essa aparas é moída e utilizada novamente em um novo processo. Porém, por ser um material reprocessado, as suas propriedades não são específicas, e a sua utilização como matéria prima pode comprometer a qualidade da lâmina e do produto final. Por isso, o objetivo deste trabalho foi realizar o estudo dos efeitos da utilização deste material picado sobre o processo de produção de copos de Polipropileno. Para isso, foram feitas três formulações, as quais continham 0%, 20% e 40% de material picado na formulação. Os materiais obtidos foram extrudados e posteriormente passaram por processo de termoformagem para obtenção dos copos. As lâminas extrudadas e os copos obtidos foram avaliados quanto a resistência a tração, transparência, densidade e porosidade aparente. Observou-se que quando é utilizado material reprocessado na formulação há uma diminuição no valor do módulo de elasticidade da lâmina, porém não há variação desta propriedade nos copos. A resistência a tração, a transparência, a densidade e a porosidade das lâminas e dos copos não variaram com a adição de material picado a ponto de comprometer a qualidade dos produtos. Quando avaliada a variação da espessura em três pontos de uma mesma lâmina, observou-se que no meio da lâmina a espessura é maior, o que foi relacionado aos ajustes no processo, não tendo influência significativa da formulação. O estudo concluiu que é viável utilizar as quantidades de material reprocessado analisadas (20% e 40%) sem comprometer a qualidade final dos copos.

Palavras chaves: polímeros, processamento, reutilização, processos industriais.

ABSTRACT

Cups and disposable packagings are produced in large scale in industries, generating jobs and moving the country's economy. The Brazilian plastic cup industry is made up of 25 companies distributed in 9 states, in which Copobras is the leader in this market. Polypropylene, due to its properties, is one of the most used polymers in the production of disposable cups. To produce these cups there are basically two steps, extrusion and thermoforming. In extrusion, the raw materials are melted and processed to form a sheet, which, later, undergoes thermoforming, obtaining the final product. During this production process, there is the generation of residues, which can come from extrusion and thermoforming leftovers or from products that are out of the standard. As an economical and environmental solution, this residue is ground and used again in a new process. However, as it is a reprocessed material, its properties are not specific and its use as a raw material can compromise the quality of the blade and the final product. Therefore, the objective of this study was to carry out an analysis of the effects of using the chopped material in the production process of Polypropylene cups. So, three formulations were made with 0%, 20% of chopped material in the recipe, and, subsequently, tensile, transparency, density and apparent porosity tests were carried out, in order to evaluate the mechanical and optical properties and changes in the material structure. It was observed that when reprocessed material is used in the formulations, there is a decrease in the value of the modulus of elasticity of the blade, but there is no variation in this property in the cups, and the tensile strength, transparency, density and porosity of the specimens did not vary with the addition of shredded material to the point of compromising the quality of the products. However, when evaluating the variation in the thickness at three points on the same blade, it is observed that the value of the thickness is bigger in the middle of the sheet, which indicates that adjustments should be made in the machine. Therefore, the study concludes that it is feasible to use the quantities of reprocessed material analyzed (20% and 40%) without compromising the quality of the products.

Keywords: polymers, reprocessing, reuse, industrial processes.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	6
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	8
2.1 Mercado de descartáveis e o meio ambiente	8
2.2 Polipropileno.....	9
2.3. Extrusão de polímeros	11
2.4 Termoformagem de polímeros.....	13
2.5 Variações no processo	15
2.6 Padronização de processos.....	16
2.7 Reciclagem de polímeros.....	17
3. MATERIAIS E MÉTODOS	19
3.1 Materiais e processamento.....	19
3.2 Análise das variações no processo.....	21
3.3 Densidade e porosidade aparente.....	22
3.4 Ensaio de tração	24
3.5. Ensaio de transparência	25
3.6 Análise dos resultados	26
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
4.1 Variações no processo	27
4.2 Densidade e porosidade aparente.....	28
4.3 Ensaio de tração	32
4.4 Transparência.....	36
5. CONCLUSÃO	38
6. REFERENCIAS	39

1. INTRODUÇÃO

Copos e embalagens descartáveis são produzidos em grande escala nas indústrias, sendo a demanda por esses produtos influenciada, principalmente, por festas e eventos regionais. Estima-se que a produção nacional de descartáveis é de cerca de 96 mil toneladas por ano, gerando 10 mil empregos diretos e movimentando uma quantia de cerca de R\$600 milhões (LUZ; TORTORELLA, 2019). A Copobras S/A, fundada em 1991 no município de São Ludgero – SC, é atualmente uma empresa líder na produção e venda de descartáveis termoformados. Atualmente na indústria são produzidos inúmeros tipos de produtos que vão desde copos simples a pratos, potes e tampas mais complexos.

O Polipropileno (PP) é uma das matérias-primas básicas utilizadas pelas indústrias no processo de produção de copos plásticos descartáveis. Atualmente ele desponta como um dos polímeros com maior procura no mercado mundial devido ao fato de apresentar uma série de propriedades tais como fácil processabilidade, resistência química e baixo custo. Também por esse motivo suas aplicações são diversas com foco nas indústrias de bens de consumo (BARRIOS, 2019).

Em uma indústria de descartáveis, o processo produtivo é realizado em basicamente três etapas. Primeiramente as matérias primas passam pelo processo de extrusão, etapa na qual elas são misturadas, fundidas e extrudadas, formando uma bobina que, posteriormente, passa pelo setor de termoformagem. Nesse setor a bobina é aquecida a uma temperatura pré-determinada e passa pela termoformadora que, mediante a aplicação de pressão em um molde, forma o produto final. Uma vez formados, os produtos são embalados e prosseguem para o estoque ou expedição.

Todo esse processo de produção de descartáveis gera resíduos que não vão para a expedição ou para o estoque. Esses resíduos são as aparas, que são pedaços da bobina que sobram no processo de extrusão ou de termoformagem, ou até mesmo bobinas ou produtos que se encontram fora da norma e por isso não podem ir para o mercado. Portanto, como uma solução ambiental e econômica, muitas vezes esses resíduos são moídos e reutilizados como matéria prima para a produção de novas bobinas.

Porém, esse reaproveitamento de material deve ser avaliado, pois, como constatado por Saikrishnan et al. (2020) quando o polipropileno passa pelo processo de extrusão ele sofre degradação, levando à cisão da sua cadeia e a formação de moléculas menores, o que faz com que haja uma diminuição na sua viscosidade e um aumento no seu índice de

fluidez. Além disso, também foi constatado por Saikrishnan et al. (2020) que as propriedades mecânicas do polipropileno reprocessado diminuem devido à degradação termo-mecânica que ocorre durante o processo de extrusão.

De acordo com Reinert (2006), Hsien-Tang et al. (2018) e Aguirre et al. (2020), ao realizar o reprocessamento de materiais poliméricos, após alguns ciclos de reprocessamento a viscosidade destes materiais diminui. Por isso, quando ele é misturado com o material virgem há variações na viscosidade da mistura, o que, conseqüentemente, interfere na qualidade das bobinas e do produto final. Por isso, deve-se analisar a quantidade de material reciclado utilizado na mistura, de forma que seja possível ainda atender as especificações do produto final.

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito de diferentes porcentagens de reutilização de aparas de polipropileno, obtidos dos processos de extrusão e termoformagem, sobre as propriedades físicas, mecânicas e ópticas de copos, permitindo contribuir com aspectos ambientais e econômicos para a indústria.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Para o desenvolvimento de uma análise do impacto causado pela porcentagem de material picado no processamento do polipropileno será necessário abordar alguns assuntos, como o mercado de copos descartáveis, o polipropileno, extrusão e termoformagem de polímeros, variações no processo e, por fim, padronização do processo.

2.1 Mercado de descartáveis e o meio ambiente

A indústria brasileira de copos plásticos descartáveis constitui-se de 25 empresas distribuídas em 9 estados, sendo a Copobras a empresa líder nesse mercado. O segmento gera, no Brasil, aproximadamente 10 mil empregos diretos e movimenta cerca de R\$600 milhões (LUZ; TORTORELLA, 2019). Segundo a Univasf (2019), estima-se que atualmente a produção nacional de copos plásticos descartáveis gire em torno de 100 mil toneladas/ano, a qual é destinada, predominantemente, para o mercado interno.

Os persistentes aumentos no preço do petróleo e de seus derivados, associados à exigência da norma NBR-14865 (ABNT, 2021) para padronização dos copos descartáveis, implicaram em elevados aumentos nos custos de produção, tanto pela majoração de preços das matérias primas básicas, quanto pelo aumento nas quantidades de resinas no processamento dos copos, o que leva ao aumento no valor final dos produtos. Isso passa a ser um relevante problema na indústria de descartáveis, visto que por se tratar de um produto de baixo valor agregado, o padrão de competição é somente via preço, prazos de entrega e qualidade do serviço oferecido aos clientes.

Apesar do aumento no preço do produto, o uso de copos descartáveis se mostra crescente, principalmente devido à pandemia do Covid-19. Segundo a CNN (2020), em maio de 2020 o consumo de descartáveis aumentou em 28% em relação ao mesmo mês no ano anterior. Esse aumento se deve à necessidade de descarte de objetos individuais após o uso para evitar a contaminação, principalmente em ambientes como escritórios, fábricas, repartições públicas, estabelecimentos comerciais, restaurantes, bares, unidades de saúde, ou outros locais e ocasiões que envolvem concentração de pessoas.

De acordo com um estudo elaborado pela ACV Brasil e publicado pela eCycle em 2019, copos plásticos descartáveis apresentam melhor performance no uso de água e energia. O estudo fez a comparação entre os copos de cerâmica, vidro e plástico reutilizáveis e o copo descartável de polipropileno. Dentre as conclusões alcançadas na

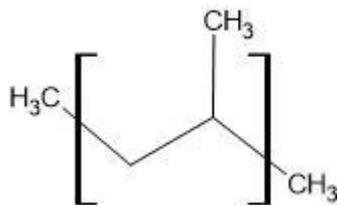
pesquisa, destacam-se o fato de que os copos descartáveis consomem menos água desde a sua produção até o seu descarte e reciclagem, e a energia utilizada na lavagem dos reutilizáveis é aproximadamente 2,4 vezes maior que a utilizada no ciclo de vida dos copos descartáveis, mostrando um maior impacto ambiental no uso de copos reutilizáveis.

Porém, o aumento da utilização de descartáveis intensifica um problema que vem se acumulando há aproximadamente 70 anos, que é o seu descarte incorreto. Segundo León (2020), em uma pesquisa realizada pela ABRELPE, a associação brasileira de limpeza pública e resíduos especiais, houve um aumento de 25% a 30% na coleta de materiais recicláveis durante a pandemia, porém no Brasil se recicla apenas 1% dos 11 milhões de toneladas de plástico produzidas por ano, o que faz com que o aumento no consumo de copos descartáveis se torne um problema social e ambiental. Por isso, o reaproveitamento de materiais no processo de produção dos copos descartáveis se torna necessário para se obter soluções sustentáveis e reduzir a quantidade de lixo gerado.

2.2 Polipropileno

O Polipropileno (PP) é um polímero termoplástico da classe das poliolefinas, que foi descoberto em 1954. É considerado de fácil processamento, e apresenta custo relativamente baixo quando comparado com os outros polímeros (RODRIGUES et al., 2017). Na figura 1 temos a configuração da sua cadeia polimérica.

Figura 1: Estrutura molecular do PP



Fonte: autor

Ele é um polímero semicristalino de boa transparência, com temperatura de fusão de aproximadamente 165°C, que pode ser encontrado como um copolímero quando misturado com o monômero do polietileno, ou puro, sendo chamado de homopolímero. A segunda forma deste polímero é a que é utilizada na indústria de produção de descartáveis (REINERT, 2006).

Segundo Barrios (2019), as propriedades mecânicas mais importantes do PP são a sua alta rigidez, resistência à tração, resistência ao impacto, resistência química e baixo custo, o que faz com que ele seja um dos polímeros com maior procura no mercado mundial. Além disso, sua densidade é baixa ($0,905 \text{ g/cm}^3$), por isso os seus produtos são relativamente leves, facilitando a sua utilização na fabricação de descartáveis.

Na Tabela 1 estão apresentadas as principais propriedades físicas e mecânicas do polipropileno virgem.

Tabela 1: Propriedades gerais do Polipropileno virgem.

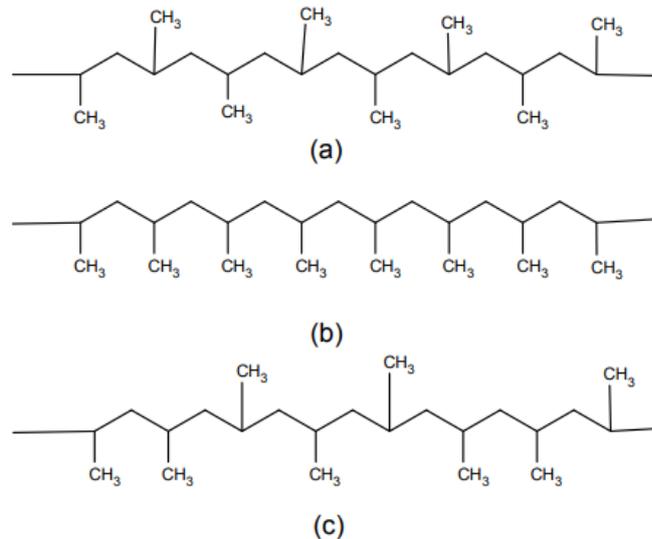
PROPRIEDADE	NORMA	VALOR
Peso específico	ASTM D792	$0,905 \text{ g/cm}^3$
Temperatura de trabalho	-	-10 até $100 \text{ }^\circ\text{C}$
Absorção de água	ASTM D570	0%
Tensão de escoamento	ASTM D638	$\sim 35 \text{ MPa}$
Tensão máxima na compressão	ASTM D695	$\sim 60 \text{ MPa}$
Tensão máxima na tração	ASTM D638	$\sim 50 \text{ MPa}$
Módulo de elasticidade	ASTM D695	$\sim 1030 \text{ MPa}$
Elongação na ruptura	ASTM D638	$\sim 600\%$
Coefficiente de expansão térmica	-	$150 \times 10^{-6} \text{ m/K}$

Fonte: FERNANDES (2021).

Existem três configurações possíveis para o polipropileno devido à disposição do carbono assimétrico na molécula do monômero, que podem ser visualizados na Figura 2 abaixo, na qual o PP (a) representa o sindiotático, onde os carbonos assimétricos estão organizados um para cada lado da cadeia, (b) isotático, pois os carbonos assimétricos estão

todos no mesmo lado da cadeia, e no (c) não existe organização, ou seja, atático (TZOUNIS et al., 2018).

Figura 2: Maneira como o grupo lateral CH_3 se distribui ao longo da cadeia polimérica



Fonte: CANEVAROLLO (2006)

De acordo com Fernandes (2021) devido às estas três configurações da cadeia polimérica, as propriedades mecânicas do polipropileno podem variar consideravelmente, tendo em vista sua ampla faixa de possíveis graus de cristalinidade. Com um ponto de fusão relativamente alto, a fase cristalina retém resistência mecânica a altas temperaturas e possibilita sua utilização em temperaturas de até 120°C . Porém, em baixas temperaturas, o PP é limitado pela sua fragilização na temperatura de transição vítrea (T_g) de aproximadamente -20°C , onde as regiões amorfas se tornam vítreas.

Segundo Spicker et al. (2019) e Rodrigues et al. (2017), devido às suas propriedades, o PP é um dos polímeros termoplásticos de maior uso industrial, podendo ser facilmente conformado através da extrusão e da termoformagem.

2.3. Extrusão de polímeros

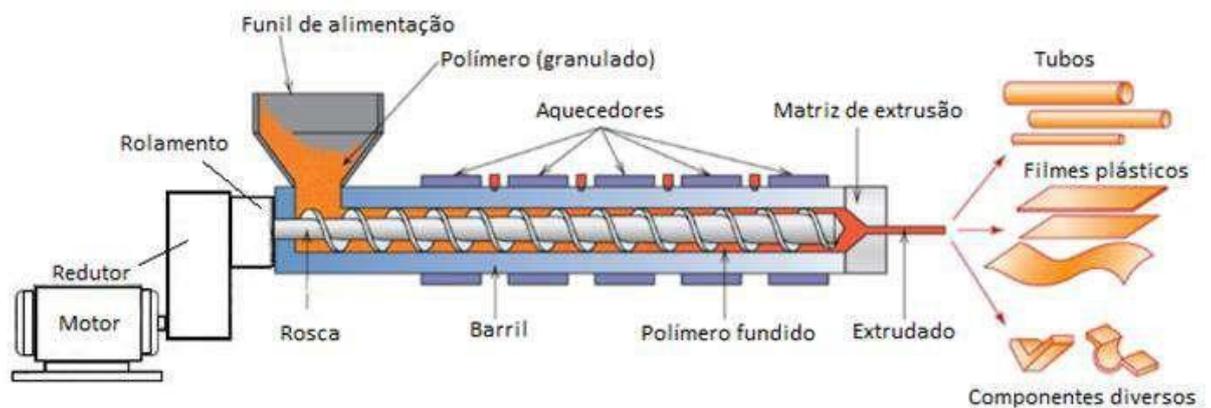
Na indústria de polímeros, a extrusão é um processo utilizado para a produção contínua de artefatos plásticos, tais como canos, tubos, filmes, chapas, entre outros. De

modo geral, os produtos poliméricos formados por extrusão apresentam seção transversal constante (VIGNOL, 2005).

Segundo Hyvärinen, Jabeen e Kärk (2020), geralmente, as extrusoras são classificadas em dois tipos: de parafuso único e de parafuso duplo. A extrusoras de parafuso único são as mais comuns, sendo amplamente aplicadas no processamento geral de polímeros, e as de parafuso duplo são utilizadas para promover misturas entre materiais diferentes, como fibras, cargas e misturas de polímeros antes da moldagem final, sendo divididas com base na direção de rotação dos parafusos, que podem ser co-rotativos (na mesma direção) ou contra-rotativos (em direções opostas).

A extrusora é um equipamento que tem a função de plastificar uma mistura de resinas e de aditivos e entregar à matriz um fluxo constante de material com propriedades homogêneas em termos de composição, temperatura, viscosidade e pressão (VIGNOL, 2005). Segundo Hyvärinen, Jabeen e Kärk (2020), o objetivo da matriz da extrusora é distribuir o polímero fundido no canal de fluxo para que o material saia com uma velocidade uniforme e queda de pressão mínima. Se o material que chegar na matriz não for uniforme, pode ocorrer fluxo desigual ao longo da mesma, o que resulta em variações nas dimensões do produto final extrudado. A Figura 3 ilustra as partes fundamentais de uma extrusora convencional.

Figura 3: Extrusora convencional.



Fonte: VIGNOL (2005)

Teoricamente, o processo de fluxo do material na extrusora pode ser dividido em quatro seções: (a) alimentação da extrusora, (b) transporte de massa através do barril, (c)

fluxo do material através da matriz, e (d) saída da matriz e subsequente finalização do processo. Durante o processamento do material, a massa é transformada e transportada principalmente pela força de cisalhamento, pressão, taxa de resfriamento e modelagem (HYVÄRINEN; JABEEN; KÄRK, 2020).

No barril da extrusora existem diferentes zonas, ilustradas na Figura 4, as quais apresentam funções específicas (REINERT, 2006). A zona de alimentação tem a função de pré-aquecer o polímero e transportá-lo para as seções seguintes do parafuso. Na zona de compressão coexistem polímero sólido e polímero fundido, nesta seção o objetivo é conferir densidade ao material, eliminando o ar entre as partículas à medida que são fundidas. Já na zona de dosagem o material já está fundido, e a função primordial é de homogeneização da massa. A estabilidade do processo e a qualidade do produto processado são dependentes das zonas da extrusora, pois elas têm o papel fundamental no transporte, aquecimento, fusão e mistura das matérias-primas utilizadas.

Figura 4: Zonas da extrusora



Fonte: VIGNOL (2005)

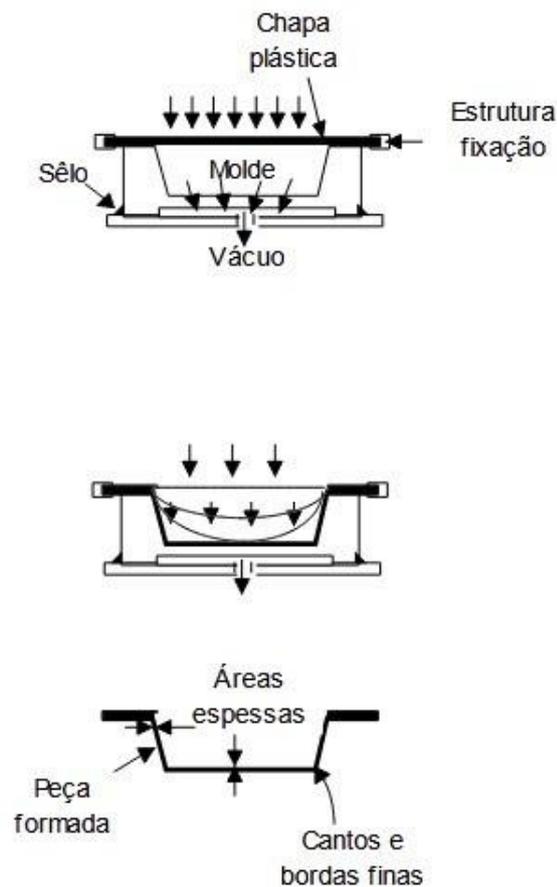
2.4 Termoformagem de polímeros

A termoformagem é uma forma de processamento de polímeros, e geralmente é utilizada para a produção de embalagens de formas simples (LISA-MARIA; KATHARINA; DIETMAR, 2020). Este método é principalmente usado para produzir embalagens descartáveis, como recipientes, copos e bandejas, bem como componentes estruturais de vários dispositivos, como paredes internas de geladeiras, invólucros e quadros de distribuição (SASIMOWSKI, 2018).

O processo de termoformação consiste no aquecimento e amolecimento de uma lâmina extrudada e, através da geração de tensões por vácuo ou baixa pressão, essa lâmina é conformada em um molde, se aderindo à sua cavidade e obtendo o formato desejado (SASIMOWSKI, 2018).

Segundo Patil et al. (2021) existem três tipos de técnicas de termoformagem, que são diferenciadas de acordo com a força que é aplicada na lâmina, sendo elas: formação por pressão, formação por vácuo e formação por contato. Dentre elas, aquela que é feita por pressão é a mais utilizada nas indústrias para a fabricação de descartáveis. Nesse tipo de termoformagem, um pedaço de chapa é fixado na estrutura da máquina, repuxada (pré-estirada) sobre um molde fêmea e forçada para dentro desse molde por sopro de ar aquecido através de uma placa porosa. Então a chapa é colocada em contato com as paredes do molde por vácuo, como ilustrado na Figura 5.

Figura 5: Processo de termoformagem por pressão sobre molde fêmea, com assistência de vácuo



Fonte: FERREIRA (2017)

Tipicamente 25 a 50% da chapa termoformada é refilada ou tem sobras cortadas que deverão retornar para reciclagem por razões de custo. O reaproveitamento misturado

com resinas virgens, a secagem e a extrusão repetidas fazem parte do custo operacional total (FERREIRA, 2017).

De acordo com Ferreira (2017), a temperatura para a termoformagem de materiais semi-cristalinos, como é o caso do polipropileno, é um pouco maior que a sua temperatura de cristalização (T_c). Entretanto, quando a peça é trabalhada a uma temperatura muito próxima à T_c , acontece a chamada memória elástica, ou seja, a deformação elástica causada na peça pela termoformagem é recuperada após o aquecimento, podendo causar deformações na peça. Portanto, no processo de termoformagem do polipropileno é importante trabalhar com temperaturas que não sejam muito próximas à temperatura de cristalização do material, que, segundo Fernandes (2021), é de aproximadamente 115°C.

Um polímero de fácil termoformagem deve possuir boa elongação a quente e deve ser estirado 500 a 600% sem se romper. Assim sendo, para uma boa performance na termoformagem o material deve ter a capacidade de ser estampado em um molde sem rasgar ou afinar excessivamente e ser mole quando aquecido, a ponto de moldar-se aos detalhes da cavidade sem chegar próximo à temperatura de fusão (LISA-MARIA; KATHARINA; DIETMAR, 2020).

2.5 Variações no processo

Para chapas que serão termoformadas, a uniformidade da lâmina é fundamental para obter uma espessura adequada na parede das peças moldadas. Segundo Hiesgen et al. (2016), a falta de uniformidade pode acontecer por diversos motivos, que podem estar relacionados ao equipamento, à matéria-prima e/ou ao processo. Essa variação pode ocorrer tanto ao longo da largura da chapa, no sentido transversal, como na direção da máquina, no sentido longitudinal.

Gregor, Kenny e Chris (2016) constataram motivos para a variação na espessura de lâminas termoformadas, sendo alguns deles: (a) design incorreto do canal de fluxo da matriz, o que pode desestabilizar o fluxo de fusão do material, causando ondas ao longo do comprimento da lâmina; (b) temperaturas incorretas no barril e na rosca da extrusora podem causar diferenças de temperaturas no fluido, que influenciam na viscosidade do material e no seu fluxo através do barril da máquina; (c) em alguns processos, pode acontecer de algumas partículas de polímeros não serem fundidas, o que pode causar variações na lâmina; (d) é possível que a força de atrito da massa contra a rosca da máquina seja maior do que a velocidade de fluidez do material, causando variação na velocidade de

fluxo e, por fim, (e) problemas nos parafusos de regulagem da máquina fazem com que a espessura da lâmina varie transversalmente, já que um parafuso mais apertado faz com que a massa seja comprimida e vá para a outra extremidade da lâmina, causando variações na espessura. Como o desgaste da máquina é inevitável, é necessário a sua manutenção periódica, a fim de evitar estas variações.

Outro fator que pode levar a variações no processo é a utilização de material reciclado durante a extrusão. Como foi constatado por Aguirre et al. (2020), os valores de viscosidade do polipropileno caem progressivamente com os ciclos de extrusão. Portanto, quanto mais vezes o material for reprocessado, menos viscoso ele será e, como já apontado por Gregor, Kenny e Chris (2016), mudanças na viscosidade dos materiais influenciam nas temperaturas de trabalho dos mesmos. Por isso é importante estabelecer uma quantidade ideal de material reciclado utilizado no processo e buscar a maior homogeneidade possível da mistura entre ele e o material virgem, de forma que a temperatura de trabalho possa ser ideal para os dois materiais e não cause variações no processo.

Apesar das formas de reduzir o problema, a variação na espessura da lâmina é um fator inerente ao processo. Por isso, é importante entender que uma uniformidade completa da espessura da chapa nunca será possível, mas é essencial realizar todos os procedimentos possíveis para que a variação seja mínima (AGUIERRE et al., 2020).

2.6 Padronização de processos

Depois de identificar as possíveis causas para os problemas recorrentes em ambientes empresariais e industriais, um passo importante para solucioná-los é a padronização. Jang e Lee (1998) definem padronização como “o degrau em que as regras de trabalho, políticas e procedimentos operacionais são formalizados e seguidos”.

Münstermann, Eckhardt e Weitzel (2010) afirmam que existe impacto significativo da padronização na performance do processo. Alguns dos benefícios associados à padronização são: melhor utilização dos recursos, maior produtividade, menor perda, menos acidentes e menos itens de não conformidade. Além disso, com a padronização é mais fácil controlar os processos, havendo uma redução das variações que podem ser geradas.

A padronização pode, portanto, beneficiar os fabricantes simplificando a produção, reduzindo os volumes de estoque e facilitando a complexidade da produção. Além disso,

ela estimula a semelhança, unidade, continuidade de comportamento e uso de documentação, que são fatores que Senk e Roblek (2018) argumentam que servem para impulsionar o desenvolvimento de ideias inovadoras.

Os mecanismos de padronização muitas vezes são fundamentais para uma empresa se manter competitiva no mercado, já que afeta os custos de produção, os prazos de entrega e a satisfação do cliente (SENK; ROBLEK, 2018). No setor de produção de descartáveis, a padronização de receitas é fundamental para a qualidade das bobinas extrudadas e, conseqüentemente, dos produtos finais. Essa padronização abrange desde a quantidade de matérias primas utilizadas nas receitas até os parâmetros das máquinas e os processos de inspeção.

2.7 Reciclagem de polímeros

Segundo Karuppalah, Vasiljevic e Chen (2021) a quantidade de polímeros sintéticos no mundo somam cerca de 400 milhões de toneladas anualmente, e é esperado que até 2030 essa soma seja de 700 milhões. Globalmente falando, quando descartados, cerca de 20% desses polímeros são reciclados, 25% incinerados, e o restante é depositado em aterros sanitários, causando diversas conseqüências ao meio ambiente.

Por isso hoje a reciclagem e reprocessamento de materiais poliméricos tornou-se essencial na proposta de proteção ambiental e utilização de recursos renováveis (HSIEN-TANG et al., 2018). Segundo Abdelhaleem, Megahed e Saber (2018), o processo de reciclagem de polímeros traz dois principais benefícios, o primeiro é a redução da quantidade de plásticos presentes em aterros sanitários e o segundo é a redução da extração de matéria prima. E, conseqüentemente essa prática também traz benefícios para a economia do país.

No entanto, o processo de reciclagem pode levar a mudanças nas propriedades mecânicas, químicas, físicas e ópticas dos materiais, podendo comprometer a sua funcionalidade após ciclos de reprocessamento (ABDELHALEEM; MEGAHED; SABER, 2018). Por isso, vários estudos são realizados com o objetivo de analisar quais são as conseqüências da reutilização de materiais em processos industriais.

Hsien-Tang et al. (2018) em um estudo sobre o reprocessamento de blendas de policarbonato (PC) e acrilonitrila butadieno estireno (ABS) no qual as amostras passaram por 20 ciclos de reprocesso em extrusão, foi observado uma redução suave na viscosidade dos materiais e uma constância nas propriedades de tração. Em adição às pesquisas sobre

o reprocessamento de materiais poliméricos, Bispo et al. (2021), em um estudo sobre ecocompósitos de polipropileno e fibras de curauá utilizados para a fabricação de peças automotivas, fizeram o estudo de 0 a 20 ciclos de extrusão em processo industrial, observando perda de peso das amostras, porém não houveram reduções significativas das propriedades, demonstrando a viabilidade da reutilização do material.

De Oliveira et al. (2021) em um estudo sobre o reprocessamento do polipropileno e de blendas poliméricas para a aplicação em materiais descartáveis realizaram 7 ciclos de extrusão nas amostras e observaram que aquelas que só continham o PP sofreram um aumento de 10% na cristalinidade após o quinto ciclo, o que pode afetar as suas propriedades. Por isso é de extrema importância um estudo sobre os efeitos que o reprocesso pode causar nos materiais, considerando o número de ciclos que eles passam.

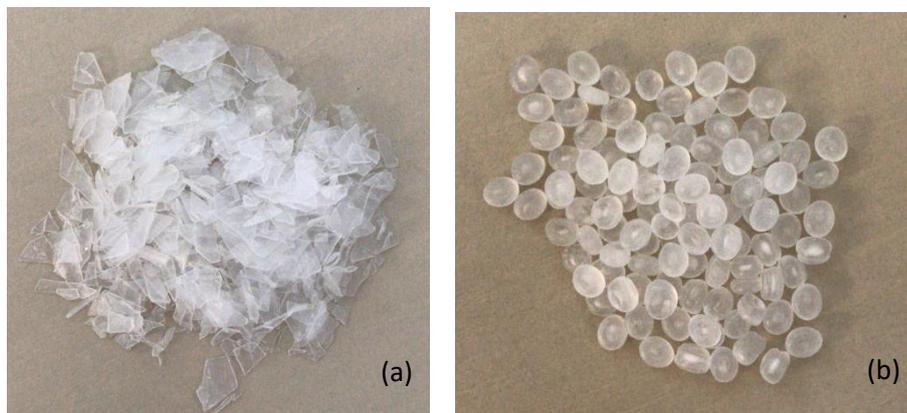
3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais e processamento

Para a realização desse estudo foram utilizadas as instalações da Copobras, unidade de Carmópolis – MG. Foram produzidas três bobinas de Polipropileno de 1000 kg, que posteriormente foram utilizadas para a produção de copos transparentes de 200 ml (PPT-200).

Os materiais utilizados para a produção das bobinas foram o material picado proveniente dos processos de produção da indústria (Figura 6a) e dois tipos de Polipropileno em forma de pellets (Figura 6b). Estes dois tipos de Polipropileno são fisicamente semelhantes, mas diferem em relação ao range de variação das suas propriedades. Esses dois tipos de Polipropileno foram fornecidos para a Copobras pela Braskem S. A..

Figura 6: Matérias primas utilizadas no processo de extrusão. (a) material picado; (b) resinas de PP off grade e PP H502HC



Fonte: autor

Para a produção das bobinas, foram feitas três tipos de misturas com 1000kg de matérias primas, cada uma com diferentes quantidades de cada material, conforme descrito na Tabela 2. Os materiais de cada tratamento foram colocados em um misturador industrial vertical com uma única hélice helicoidal, e homogeneizados por 30 minutos.

Tabela 2: Quantidade de matérias primas utilizadas em cada mistura.

Mistura	% Material reprocessado	% PP off	% PP H502HC
1	0	45	55
2	20	45	35
3	40	45	15

Fonte: autor

Após isso, cada mistura passou pela extrusora, conforme temperaturas indicadas na Tabela 3 em uma escala de 100 unidades de medida, para preservar os dados de processo. A velocidade da rosca foi mantida padrão para os três tipos de mistura. As bobinas produzidas (Figura 7a) foram então levadas para o processo de termoformagem a vácuo (Figura 7b). Os parâmetros de processos foram aqueles comumente utilizados pela indústria.

Tabela 3: Temperaturas em cada zona na extrusão.

Canhão 1	
Zona	Temperatura(°C)
1	100
2	105
3	115
4	115
5	115
6	120
7	125
8	125
Canhão 2	
Zona	Temperatura (°C)
1	100
2	95
3	95

Fonte: autor

Figura 7: Produção das bobinas e termoformagem dos copos. (a) bobina extrudada; (b) bobina no processo de termoformagem.

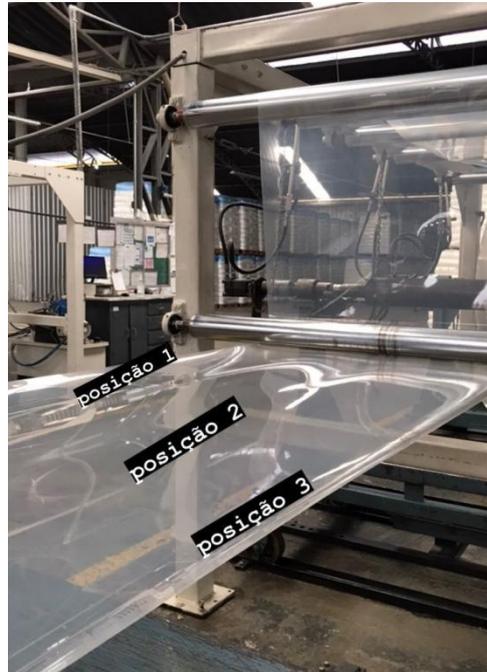


Fonte: autor

3.2 Análise das variações no processo

A fim de avaliar as variações no processo, foi feito um acompanhamento de toda a etapa de extrusão das bobinas, dando ênfase às variações na espessura das lâminas. Para isso, no processo de extrusão, a cada 20 minutos a espessura da bobina foi analisada com o auxílio de um micrometro, obtendo-se 4 amostras de cada extremidade e do meio da lâmina, indicados como posições 1, 2 e 3, como ilustrado na Figura 8, com o objetivo de avaliar qual foi a variação em todo o tempo do processo.

Figura 8: Lâmina no processo de extrusão com a indicação de cada posição nas quais foram analisadas as espessuras



Fonte: autor

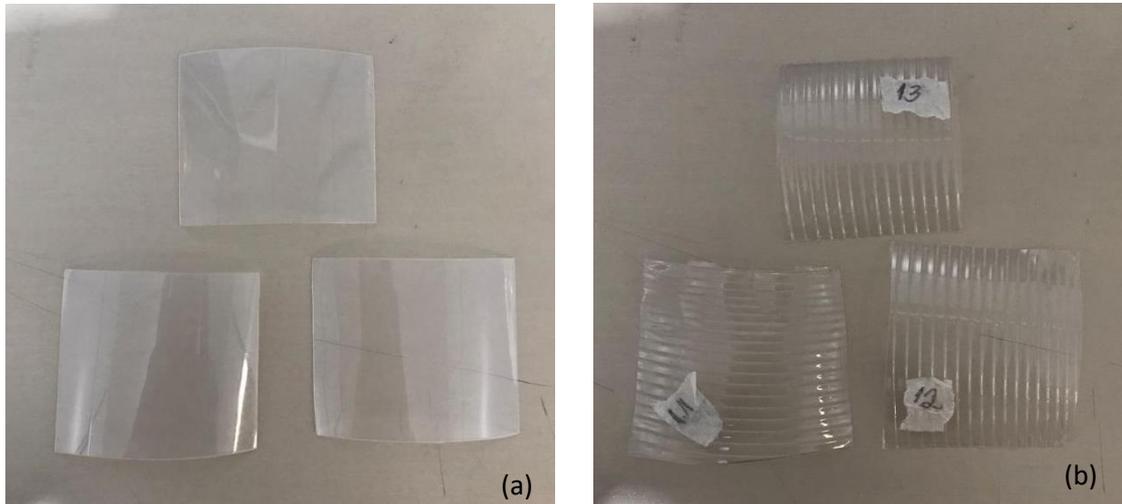
3.3 Densidade e porosidade aparente

A densidade aparente das amostras de lâminas e copos de polipropileno (Figura 9a e 9b) foram determinadas de acordo com a norma ASTM D1895-96 (ASTM, 2010). Foram utilizados 3 corpos de prova de cada tratamento com dimensões de 6x5 cm. Para as lâminas foram consideradas a sua posições de obtenção das amostras. A densidade foi calculada de acordo com a Equação (1), sendo expressa como o valor médio dos resultados das três amostras.

$$\text{Densidade aparente (g/cm}^3\text{)} = m_o/V \quad (\text{Eq. 1})$$

Em que m_o é a massa das amostras, em gramas, (obtida com a utilização de uma balança digital de alta precisão) e V é o volume, em cm^3 das amostras.

Figura 9: Corpos de prova utilizados no ensaio de densidade aparente; (a) corpos de prova das lâminas; (b) corpos de prova dos copos.



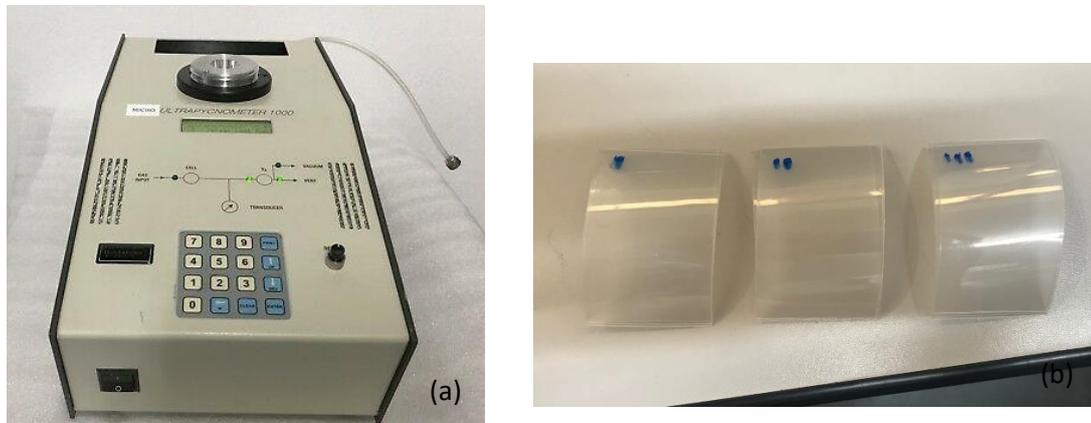
Fonte: autor

Para calcular a porosidade aparente das lâminas e dos copos foi utilizado um ultrapicnômetro 1000 da Acil Weber, onde foram retiradas 3 amostras das lâminas e 3 dos copos. As amostras utilizadas apresentaram dimensões de 7 x 4,5 cm (Comprimento x largura). As amostras foram retiradas das três posições da lâmina, a fim de analisar o efeito da formulação e das posições. Elas foram então colocadas no equipamento onde foi obtido o seu volume real. Por fim, a porcentagem de porosidade de cada amostra foi calculada de acordo com a Equação (2) e expressas em função da média das 3 amostras. As Figuras 10a e 10b mostram o equipamento e as amostras das lâminas, respectivamente.

$$\% \text{ porosidade} = ((V_a - V_r) / V_a) * 100 \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde V_a é o volume da amostra e V_r é o volume real obtido no equipamento.

Figura 10: Equipamento utilizado para calcular a porosidade aparente. (a) Ultrapicnômetro; (b) Amostas.



Fonte: autor

3.4 Ensaio de tração

O ensaio de tração foi realizado nas amostras das lâminas extrudadas e dos copos termoformados (Figura 11), com o objetivo de avaliar a resistência das diferentes formulações e das posições na lâmina, permitindo um melhor entendimento sobre o uso de diferentes porcentagens de polímero reciclado. O ensaio foi realizado na máquina universal de ensaios Instron no Departamento de Engenharia (DEG) da Universidade Federal de Lavras (UFLA) segundo a norma ASTM D882-10 (ASTM, 2009) a uma velocidade de 25 mm/min. Para a obtenção dos corpos de prova foi necessário uma adaptação da norma, portanto as lâminas foram cortadas nas dimensões de 10x1 cm (Comprimento x largura) e os copos nas dimensões de 10x2 cm (Comprimento x largura). Nas amostras dos copos foi mantida a relação 5:1 como descrita na norma, porém no caso das lâminas não foi possível, visto que as amostras eram muito lisas e deslizavam nas garras do equipamento. Os corpos de prova utilizados estão indicados na Figura 10.

Após feito o ensaio, foram calculados o módulo de elasticidade (MOE) e a resistência a tração dos corpos de prova, mediante a utilização das equações 3 e 4, respectivamente.

$$\text{MOE (MPa)} = \Delta\sigma / \Delta\epsilon \quad (\text{Eq. 3})$$

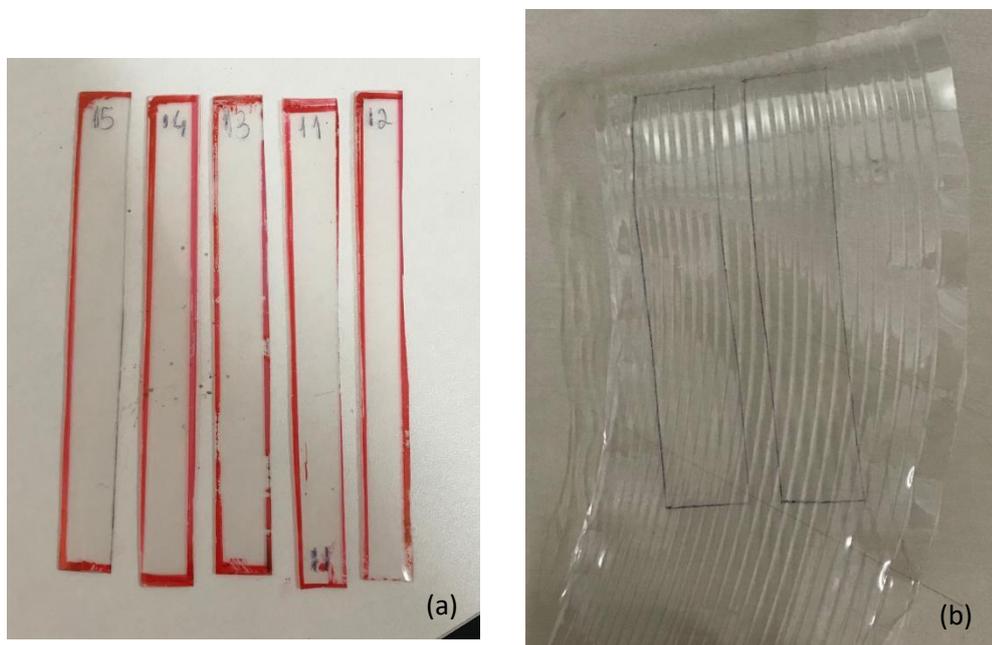
Onde σ é a tensão e ϵ é a deformação na amostra.

$$\text{Resistência a tração} = f_{\text{máx}} / A \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde $f_{\text{máx}}$ é a força máxima aplicada na amostra, e A é a área na qual ocorreu a deformação.

Deixar mais claro mudança nas prop em relaca ao pp virgem

Figura 11: Corpos de prova utilizados nos ensaios de tração. (a) Corpos de prova das lâminas; (b) demonstração do corte dos copos para o ensaio de tração.



Fonte: autor

3.5. Ensaio de transparência

Para a análise da transparência das amostras das lâminas e dos copos utilizou-se o espectrofotômetro Konica Minolta CM 5 no Departamento de Ciência dos Alimentos (DCA) da Universidade Federal de Lavras (UFLA). O ensaio foi realizado com comprimento de onda de 600nm, retirando-se a medida da porcentagem de transmitância (%T) segundo a norma ASTM D1746-03 (ASTM, 2003). Os corpos de prova para esse ensaio foram os mesmos utilizados para medir a densidade (Figura 8). Eles foram fixados no equipamento de forma a permitir que o feixe os atravessasse sem nenhum obstáculo. A transparência (T) foi calculada de acordo com a Equação (5).

$$T_{600} = (\text{Log}\% T)/\delta \quad (\text{Eq. 5})$$

Em que δ é a espessura da lâmina em milímetros.

3.6 Análise dos resultados

Após a realização de todas as análises, os resultados obtidos passaram por análise estatística utilizando o software Sisvar (FERREIRA,2020).

Para a análise das propriedades das lâminas foi adotado um esquema fatorial 3 x 3 (3 formulações e 3 posições) a fim de avaliar se havia interação entre os dois fatores para cada uma das propriedades analisadas. A análise de variância e o teste de média de Tukey foram realizados a 5% de significância.

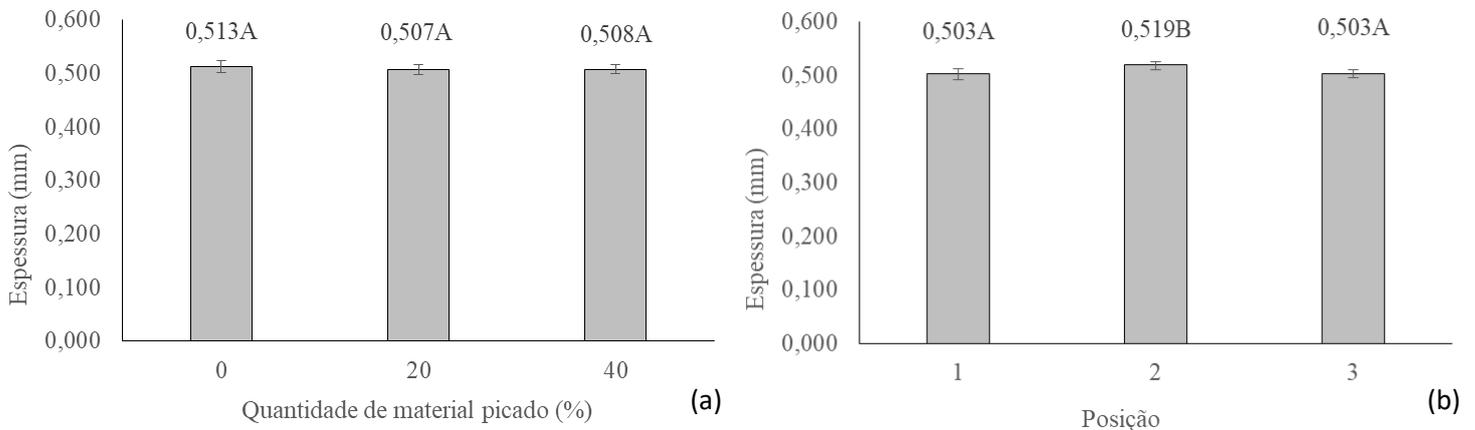
Para os resultados obtidos para os copos foi avaliado apenas o efeito das formulações, sendo realizada análise de variância e teste de média de Tukey, ambos a 5% de significância.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Variações no processo

As Figuras 12a e 12b mostram o valor médio da espessura encontrada para cada mistura e para cada posição na lâmina, respectivamente. Não houve interação estatística entre o tipo de mistura e as posições nas lâminas para a espessura do material obtido.

Figura 12: Valores médios obtidos para a espessura. (a) Em função da formulação; (b) Em função da posição na lâmina



Médias seguidas de mesma letra, não diferenciam-se estatisticamente pelo teste de média Tukey a 5% de significância.

Fonte: autor

Não houve variação na espessura das lâminas quando avaliadas as formulações. Contudo, quando analisadas as posições da lâmina, observou-se que no centro o valor médio de espessura é maior, diferenciado-se estatisticamente dos valores de espessura obtidos para as extremidades.

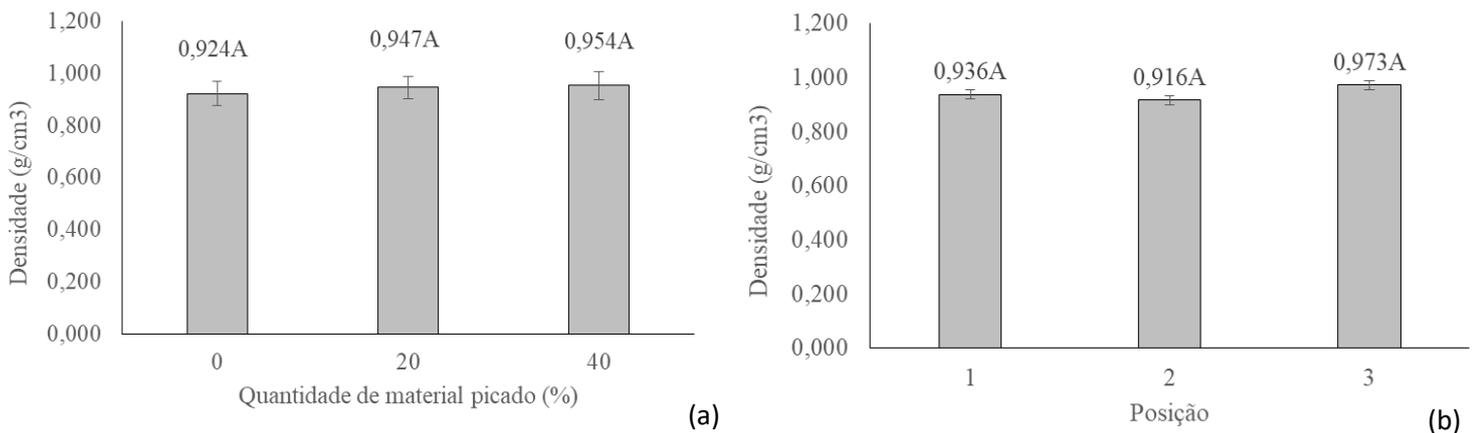
Como foi comprovado que o tipo de formulação não influenciou nas diferenças dos valores da espessura das lâminas (Figura 12a), ou seja, a quantidade de material reprocessado não altera a espessura, esta variação no centro em relação às extremidades estão associados aos fatores operacionais da própria máquina que foi utilizada para a extrusão das bobinas. De acordo com Gregor, Kenny e Chris (2016), a variação na espessura das lâminas pode ocorrer por problemas nos parafusos de regulagem da máquina, portanto neste caso alguns dos parafusos das extremidades podem estar mais pressionados, fazendo com que a massa seja comprimida nas extremidades e vá para a parte central da lâmina, causando variação na espessura.

Sasimowski (2018) realizou estudo sobre o efeito dos ciclos de reprocessamento nas propriedades reológicas e comportamento de fluxo de blendas de Polipropileno e Polietileno de baixa densidade (PEBD) com 0% a 10% em peso de PEBD. Os resultados obtidos mostraram que após 5 ciclos de reprocessamento as amostras de PP puro sofreram uma redução progressiva no valor da sua viscosidade devido à diminuição do seu peso molar como resultado da exposição ao cisalhamento e a altas temperaturas durante a reciclagem. Esta conclusão mostra que podem haver diferenças nos valores de viscosidade dos polipropilenos reprocessado e virgem, o que faz com que haja uma diferença no fluxo do material no canhão da extrusora, fazendo com que tenha mais material em alguma parte da lâmina, causando variação na sua espessura no sentido transversal.

4.2 Densidade e porosidade aparente

As Figuras 13a e 13b mostram o valor médio da densidade encontrada para cada mistura e para cada posição na lâmina, respectivamente, e a Figura 14 mostra a densidade encontrada para os copos. Não houve interação estatística entre o tipo de mistura e as posições nas lâminas para a densidade do material obtido.

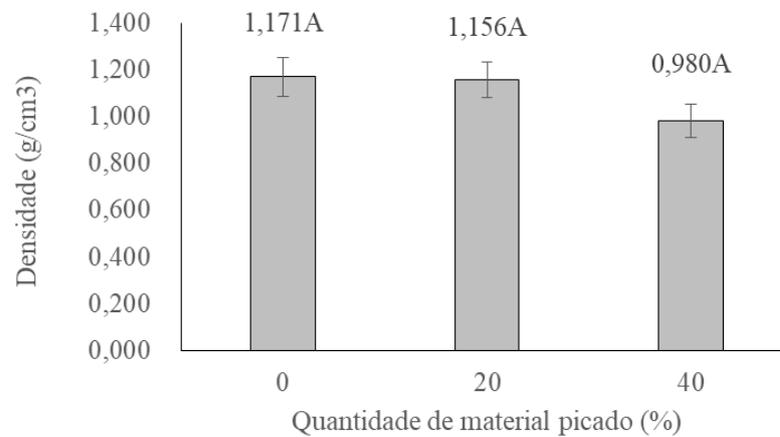
Figura 13: Valores médios obtidos para a densidade das lâminas. (a) Em função da formulação; (b) Em função da posição na lâmina



Médias seguidas de mesma letra, não diferenciam-se estatisticamente pelo teste de média Tukey a 5% de significância.

Fonte: autor

Figura 14: Valores médios da densidade obtidos para os copos em função da formulação.



Médias seguidas de mesma letra, não diferenciam-se estatisticamente pelo teste de média Tukey a 5% de significância.

Fonte: autor

É possível observar que não houve variação na densidade das amostras, tanto em relação à formulação quanto em relação à posição na lâmina, mostrando que a utilização de material picado não influencia nesta propriedade dos produtos. Além disso, os valores das densidades das lâminas é próximo do valor da densidade do material utilizado, como constatado no laudo fornecido pela Braskem (0,905 g/cm³), indicando que o processo de extrusão não altera a densidade dos materiais.

Quando avaliada a densidade dos copos, observou-se que também não foi obtido efeito significativo da utilização de material picado sobre a densidade dos produtos, mantendo a mesma relação obtida para as lâminas.

Martin-Alfonso e Franco (2015) realizaram um estudo sobre a influência dos ciclos de reprocessamento nas propriedades do polipropileno, no qual o material passou por 10 ciclos de extrusão e reciclagem e, posteriormente, foi caracterizado, a fim de avaliar as alterações de propriedades induzidas pelo reprocesso. Foi possível observar uma queda progressiva na massa das amostras após cada ciclo. Isso ocorreu porque o processo de reciclagem do material envolve altas temperaturas, o que faz com que a sua massa diminua devido a quebras na sua cadeia molecular. Como no caso deste trabalho a reciclagem do material envolve somente a sua passagem por um moinho, ele é exposto a altas temperaturas somente quando passa novamente pelo processo de extrusão, por isso não

sofre degradação a ponto de diminuir sua massa de forma considerável e afetar o valor da densidade dos produtos.

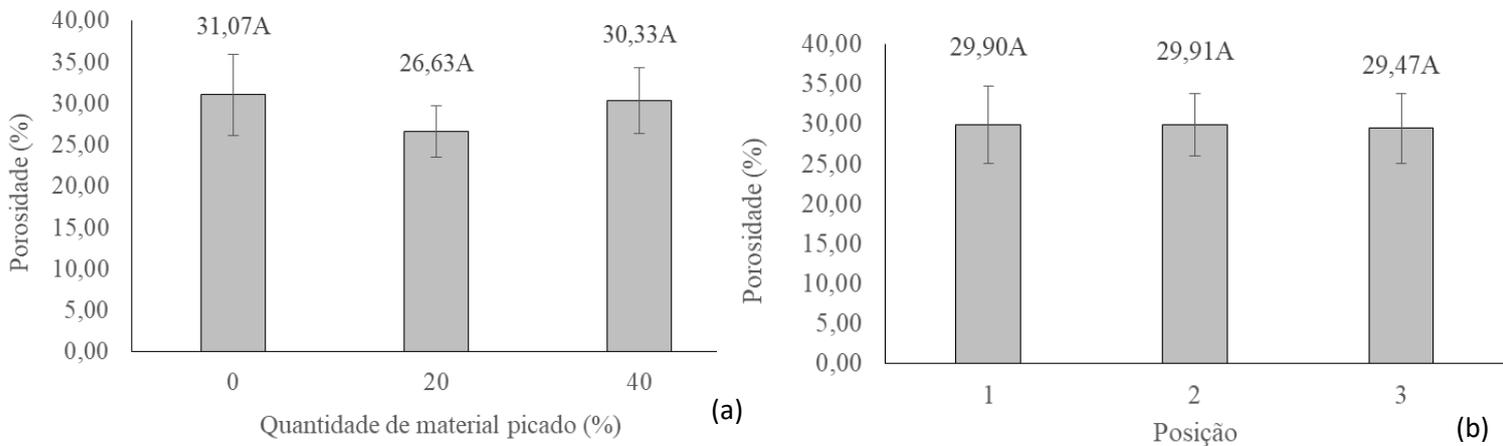
Além disso, como foi constatado anteriormente que não há variação na espessura da lâmina com a adição de material picado (Figura 12a), o volume das amostras também se manteve constante. Como a densidade é dependente do volume e da massa do material, ela conseqüentemente também se mantém constante.

Poduska et al. (2014) em um estudo sobre a distribuição de tensão residual em tubos de polipropileno extrudado avaliaram a densidade das amostras extrudadas com diferentes espessuras. Nas amostras com espessura entre 0,5 e 0,6 mm, próxima à espessura obtida para as amostras deste estudo, a densidade variou entre 0,896 e 0,907 mm. Sendo, portanto, um pouco inferior ao resultado obtido nesta pesquisa.

Analisando a porosidade dos materiais estudados, observa-se que ela não variou com a adição de material reprocessado, tanto para as lâminas (Figura 15a) quanto para os copos (Figura 16), o que está associado com a constância no valor da densidade observada anteriormente. Segundo Santos et al. (2015) os poros em um material são regiões preenchidas por ar, e não pelo material em si como no restante da sua estrutura. Como o ar possui um estado de agregação muito diferente do sólido, já que as partículas de ar ficam mais distantes uma da outra, a presença de poros influencia no volume total ocupado pelo material. Por isso uma constância na porosidade do material faz com que o volume ocupado por ele também seja constante e, conseqüentemente, não haja variação na sua densidade.

Os valores da porosidade e da densidade da lâmina não mudaram em função da sua posição (Figuras 12b e 13b), indicando que a variação na espessura não foi influenciada por mudanças da porosidade do material, e sim por fatores relacionados à máquina e à produção, conforme discutido anteriormente.

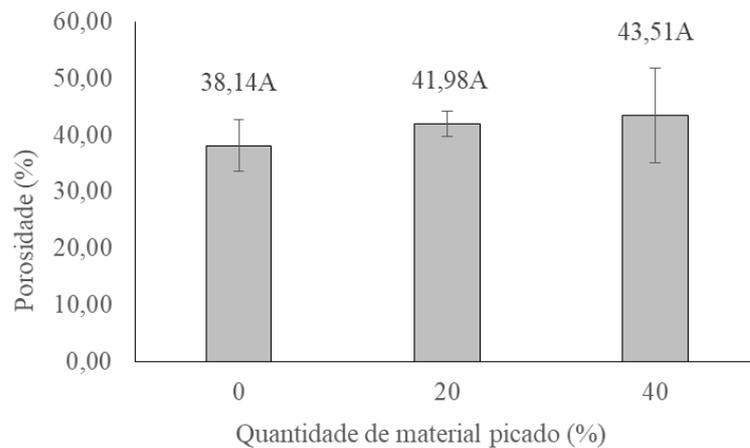
Figura 15: Valores médios da porosidade obtidos para as lâminas. (a) Em função da formulação; (b) em função da posição na lâmina



Médias seguidas de mesma letra, não diferenciam-se estatisticamente pelo teste de média Tukey a 5% de significância.

Fonte: autor

Figura 16: Valores médios da porosidade obtidos para os copos em função da formulação.



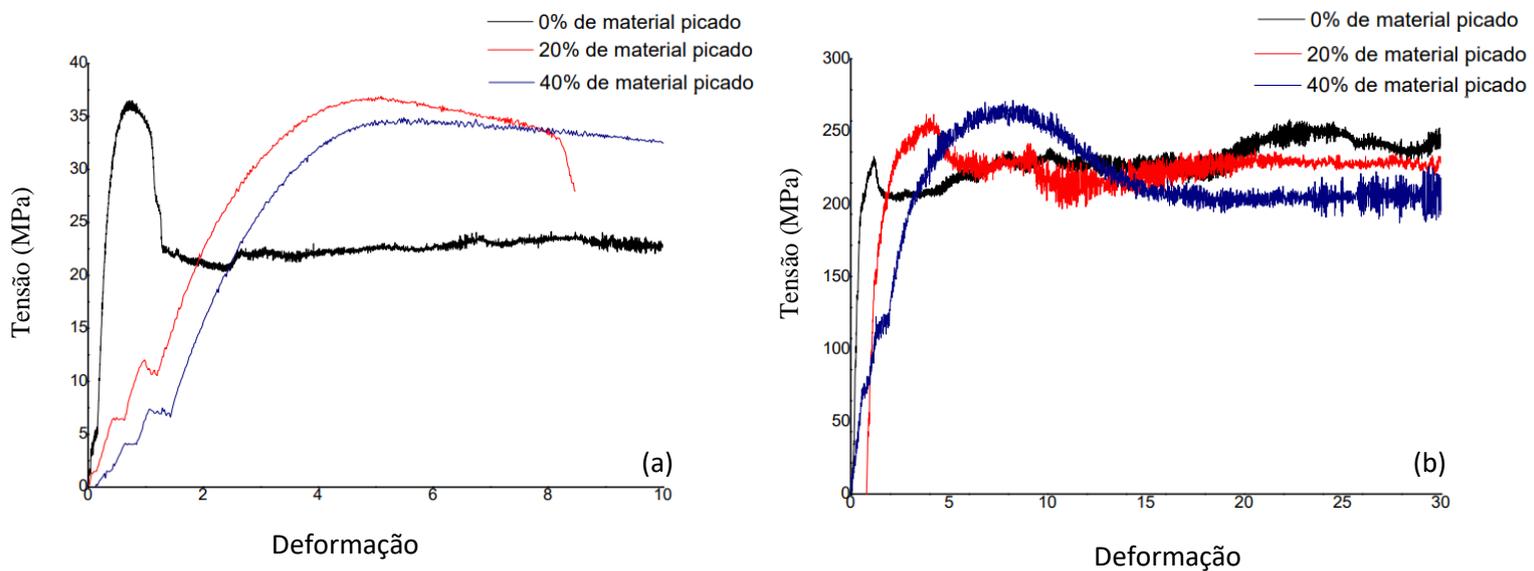
Médias seguidas de mesma letra, não diferenciam-se estatisticamente pelo teste de média Tukey a 5% de significância.

Fonte: autor

4.3 Ensaio de tração

As figuras 17a e 17b ilustram as curvas de tensão x deformação para as lâminas e os copos, respectivamente.

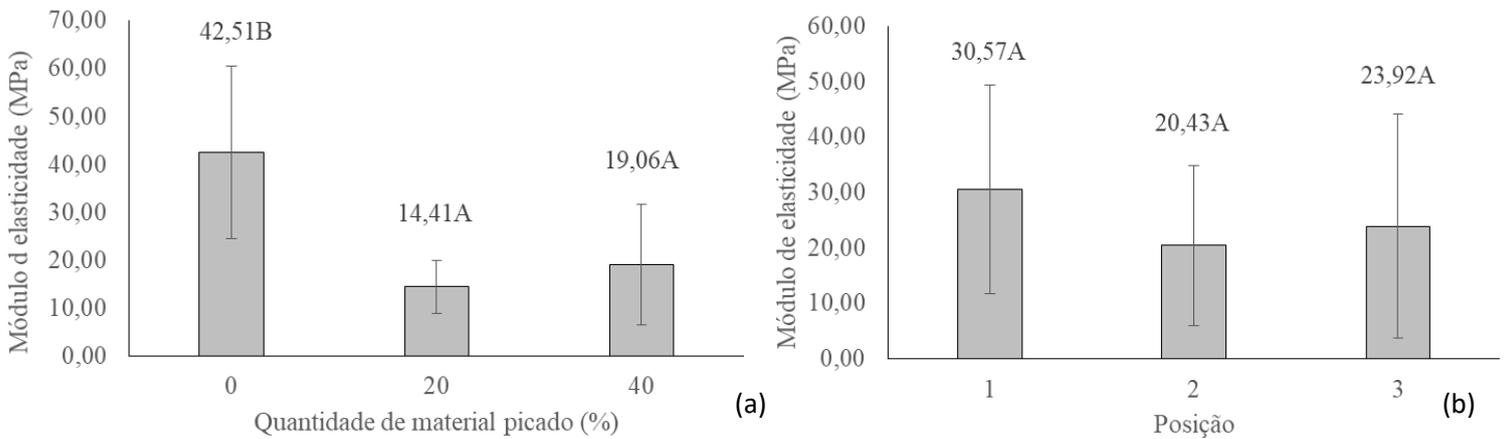
Figura 17: Valores de tensão x deformação. (a) Para as lâminas; (b) para os copos.



Fonte: autor

Mediante cálculos e análises dos gráficos, obteve-se os valores do módulo de elasticidade (MOE) e da resistência à tração das amostras. As Figuras 18a e 18b mostram os valores obtidos para o módulo de elasticidade (MOE) à tração em função da formulação e da posição na lâmina, respectivamente. Enquanto as Figuras 19a e 19b ilustram os valores encontrados para a resistência à tração para cada formulação e para cada posição na lâmina, respectivamente. Não foi observada interação estatística entre o tipo de mistura e as posições nas lâminas para o MOE e para a resistência à tração do material.

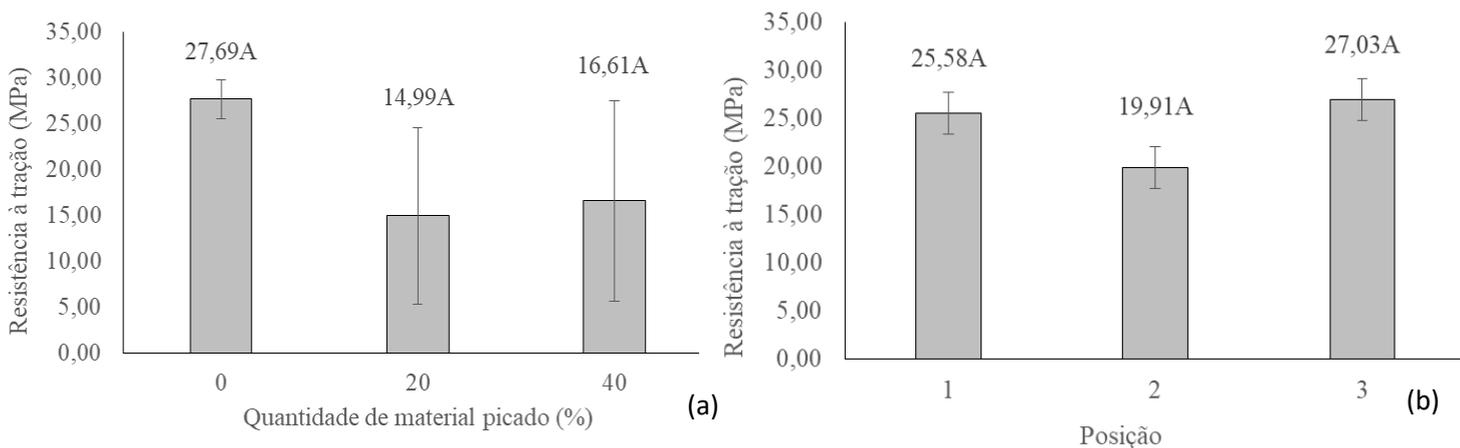
Figura 18: Valores médios da porosidade obtidos para o módulo de elasticidade. (a) Em função da formulação; (b) em função da posição na lâmina



Médias seguidas de mesma letra, não diferenciam-se estatisticamente pelo teste de média Tukey a 5% de significância.

Fonte: autor

Figura 19: Valores médios da resistência à tração obtidos para a resistência à tração. (a) Em função da formulação; (b) em função da posição na lâmina



Médias seguidas de mesma letra, não diferenciam-se estatisticamente pelo teste de média Tukey a 5% de significância.

Fonte: autor

A Figura 18a mostra que a lâmina produzida sem material reprocessado apresentou um módulo de elasticidade maior do que os valores obtidos para as outras duas formulações, diferenciando-se estatisticamente das demais misturas. Portanto, as lâminas desta mistura se mostraram mais rígidas quando comparadas com as misturas 2 e 3, que se tornaram mais flexíveis com a adição de material reprocessado.

Hyie et al. (2020) realizaram um estudo sobre as mudanças nas propriedades mecânicas do polipropileno com 10 a 14 ciclos de reprocessamento e constataram que o valor do módulo de elasticidade das amostras após o reprocesso não se mostrou tão alto quanto o do polipropileno virgem devido a quebras nas cadeias das amostras, que fizeram com que elas não se tornassem tão resistentes às forças externas. Esse fato justifica os valores encontrados neste estudo, já que essa redução no módulo de elasticidade do polipropileno reprocessado pode fazer com que, ao misturá-lo com o material virgem, esta propriedade da lâmina decresça.

Contudo, apesar da diferença estatística do MOE observada para as lâminas, o material ao passar pela termoformagem manteve constante o módulo de elasticidade dos copos, já que não foi observado diferença estatística entre as três formulações (Tabela 3).

No processo de termoformação, a lâmina extrudada é aquecida e, posteriormente, deformada através da aplicação de força mecânica e/ou pressão, o que, segundo Buntinx et al. (2014), impacta diretamente as propriedades da lâmina. Em um estudo sobre os efeitos nas propriedades de lâminas poliméricas antes e depois da termoformação, Buntinx et al. (2014) constatou aumento na cristalinidade dos polímeros após o processo de termoformagem. Em materiais cristalinos as partículas são distribuídas de forma uniforme, criando uma organização da cadeia molecular. Isso faz com que o material se torne mais resistente e mais difícil de se deformar plasticamente com a aplicação de tensão. Por isso, após a termoformagem, o copo se tornou mais flexível e o valor do seu módulo de elasticidade não varia em relação à quantidade de material na mistura.

Tabela 3: Valores médios do módulo de elasticidade (MOE) e da resistência à tração obtidos para os copos de cada mistura.

Copos		
Tratamento	MOE (MPa)	Resistência à tração (MPa)
1	274,43 (\pm 120,63) A	33,48 (\pm 2,45) A
2	146,45 (\pm 95,46) A	49,30 (\pm 3,48) A
3	110,97 (\pm 65,19) A	47,17 (\pm 1,13) A

Médias seguidas de mesma letra na coluna, não diferenciam-se estatisticamente pelo teste de média Tukey a 5% de significância.

Fonte: autor

Analisando as Figuras 18b e 19b, nota-se que não há variação no módulo de elasticidade e na resistência à tração quando comparada as três posições da lâmina, indicando que mesmo havendo uma diferença na espessura, essa alteração não influenciou significativamente nas propriedades mecânicas do material. Ainda em relação a resistência a tração, não foi observada diferença significativa quanto a resistência a tração quando comparada as três formulações e seus efeitos nas lâminas (Figura 18a) e nos copos (Tabela 3).

Bispo et al. (2021) em um estudo no qual compósitos de polipropileno e polipropileno puro foram submetidos a 1, 3 e 5 ciclos de reprocessamento constataram que a resistência a tração do PP puro permaneceu inalterado com os ciclos. O mesmo fato foi observado no presente estudo, já que com a adição de material reprocessado na formulação não houveram alterações no valor da resistência a tração tanto para os copos quanto para as lâminas. Porém, no estudo de Lopez et al. (2012) sobre a reciclagem de materiais poliméricos foi constatado que após o décimo ciclo de reprocessamento, a resistência à tração do material começa a decrescer devido à alta degradação.

Jancar et al. (2020) em um estudo sobre o efeito da porosidade nas propriedades mecânicas de polímeros constatou que os valores destas propriedades diminuíram com o aumento da porosidade dos materiais devido aos espaços que apareciam com o aumento da porosidade. Como neste estudo a porosidade das amostras se manteve constante, isso justifica a constância nas propriedades mecânicas. Chand e Sharma (2012) em uma outra pesquisa sobre a influencia da porosidade do polipropileno na sua resistividade constatou valores da porosidade deste material variando de 23 a 40%, estando próxima à porosidade encontrado para o mesmo material neste estudo.

Analisando as propriedades do polipropileno virgem, observa-se que o valor do MOE deste material é 1030 MPa e da resistência à tração é de 50 MPa, de acordo com as normas ASTM D695 (ASTM, 2010) e ASTM D638 (ASTM, 2014), respectivamente. Porém, é possível observar que, neste estudo, apesar de os valores destas propriedades se manterem constantes com a adição de material picado, eles são consideravelmente inferiores aos valores do PP virgem, indicando que o processo de extrusão e termoformação deste material causam um decréscimo nestas duas propriedades mecânicas.

4.4 Transparência

A Tabela 4 mostra os valores de transparência encontrados para as amostras das lâminas e dos copos. Não houve variação na transparência das lâminas e dos copos quando avaliado o efeito da utilização de diferentes porcentagens de material reprocessado na formulação.

Segundo Lin et al. (2007), a perda de transparência pode acontecer devido à dispersão de luz, que pode se originar tanto do interior do filme quanto da sua superfície. Como neste caso não houve diminuição considerável da transparência das lâminas e dos copos com o reprocessamento de materiais, é possível concluir que a utilização de material picado não influenciou na passagem de luz através das amostras.

Tabela 4: Valores médios da transparência encontrados para os copos e para as lâminas de cada formulação.

% de material picado	Transparência	
	Lâminas	Copos
0	3,73 ($\pm 0,06$) A	30,00 ($\pm 2,35$) A
20	3,53 ($\pm 0,08$) A	27,20 ($\pm 1,11$) A
40	3,60 ($\pm 0,16$) A	25,91 ($\pm 2,07$) A

Médias seguidas de mesma letra na coluna, não diferenciam-se estatisticamente pelo teste de média Tukey a 5% de significância.

Fonte: autor

Shibayama et al. (1991) realizou um estudo sobre a transparência de filmes de polipropileno reciclados, no qual relacionaram o valor da transparência do filme com a sua espessura e a quantidade de vezes que ele foi reciclado. Foi concluído que quando a espessura dos filmes era inferior a 0,6 mm a sua transparência se mantinha constante, e ela

diminuía à medida que o número de ciclos de reprocessamento do material aumentava, devido à mudanças na sua estrutura. Portanto, a constância na transparência das amostras neste estudo pode ser explicado pelo fato da espessura ser inferior a 0,6 mm e a sua reciclagem não envolver processos com altas temperaturas e tensões, somente a passagem por um moinho e pela extrusão novamente, não havendo degradação considerável do material de forma que possa comprometer sua estrutura.

Além disso, a constância nos valores de espessura, densidade e porosidade de cada formulação influencia nos valores de transparência das amostras, já que se não há mudanças nos valores destas propriedades, o caminho para a transmitância da luz não irá mudar, mantendo a transparência das amostras constante.

Por fim, é possível observar que o processo de termoformagem deixa o copo de 8 a 10 vezes mais transparente quando comparado com as lâminas. Essa diferença na transparência pode ser observado visualmente quando se compara estes dois materiais.

5. CONCLUSÃO

Como a utilização de material picado como matéria prima é bastante comum em processos de produção industrial, o presente trabalho abordou o efeito da utilização deste material reprocessado sobre a extrusão e termoformagem do Polipropileno para obtenção de copos, a fim de contribuir com aspectos ambientais e econômicos para a indústria.

Não foi observado variação na espessura das lâminas para as amostras de cada formulação. Porém, em uma mesma lâmina, houve diferença de espessura no meio em relação aos extremos, o que mostra que o que causa a variação não é a mistura, e sim ajustes operacionais. Contudo, como o desgaste da máquina é inevitável, é necessário a sua manutenção periódica, a fim de evitar variações nos parâmetros.

Em relação às propriedades mecânicas, foi possível observar que o módulo de elasticidade das lâminas diminuiu com a adição de material reprocessado, fazendo com que as amostras se tornassem mais flexíveis. Porém, quando as lâminas passam pelo processo de termoformagem essa propriedade não mostrou mais diferenças significativas para os três tipos de formulação.

Foi possível concluir que a resistência a tração, a transparência, a densidade e a porosidade das amostras se mantiveram constantes com a adição de material reprocessado.

Todos os resultados obtidos, permitem concluir que a a diferença de cada amostra em todas as propriedades analisadas não é relevante a ponto de fazer com que o uso de material picado influencie na qualidade do produto final. Portanto, este estudo concluiu que as quantidades de material picado analisadas (20% e 40%) podem ser utilizadas sem que haja problemas, o que pode gerar melhorias econômicas e ambientais para a indústria.

6. REFERENCIAS

- ABDELHALEEM, A. M.; MEGAHED, M.; SABER, D. Fatigue behavior of pure polypropylene and recycled polypropylene reinforced with short glass fiber. **Journal of composite materials** , [s. l.], v. 52, ed. 12, p. 1633-1640, maio 2018.
- AGUIRRE, J. et al. The Effects of Reprocessing and Fiber Treatments on the Properties of Polypropylene-Sugarcane Bagasse Biocomposites. **Polymers**, [s. l.], 27 jun. 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR – 14865. Copos plásticos descartáveis. Rio de Janeiro, 2012.
- ASTM International. ASTM D1895-96 - Standard Test Methods for Apparent Density, Bulk Factor, and Pourability of Plastic Materials. Annual Book of ASTM Standards. 2010
- ASTM International. ASTM D882-10 - Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting. Annual Book of ASTM Standards. 2010
- ASTM International. ASTM D1746-03 - Standard Test Method for Transparency of Plastic Sheeting. Annual Book of ASTM Standards. 2003
- ASTM International. ASTM D695 - Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics. Annual Book of ASTM Standards. 2010
- ASTM International. ASTM D638 - Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. Annual Book of ASTM Standards. 2014
- BARRIOS, C. Utilização de resíduos da indústria calçadista em blendas de polietileno e polipropileno reciclados provenientes de equipamentos eletroeletrônicos (REEE). **Universidade Federal de São Carlos** , [s. l.], 6 jan. 2019.
- BISPO, S. et al. Recycling of polypropylene and curaua fiber-based ecomposites: Effect of reprocessing on mechanical properties. **Journal of strain analysis**, [s. l.], 2021.
- BREDA, A. Avaliação do reprocessamento de copolímero SAN através de moldagem por injeção. **Semantic scholar**, São Carlos, 2011.
- BUNTINX, M. et al. Evaluation of the Thickness and Oxygen Transmission Rate before and after Thermoforming Mono- and Multi-layer Sheets into Trays with Variable Depth. **Polymers**, [s.l.], v. 6, ed. 12, p. 3019-3043, dez 2014.
- CANEVAROLLO JR., S.V., Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros. 2ª ed, Editora. Artliber. São Carlos, SP, 2006.
- CHAND, N.; SHARMA, J. Influence of porosity on resistivity of polypropylene foams. **Journal of cellular plastics** , [s. l.], v. 48, ed. 1, p. 43-52, jan 2012.
- CNN. **Aumenta o consumo de descartáveis por causa da pandemia, diz associação.** [S. l.], 29 jul. 2020. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/business/aumenta-o-consumo-de-descartaveis-por-causa-da-pandemia-diz-abrelpe/>. Acesso em: 13 out. 2021.

DE OLIVEIRA, R.R. et al. Effect of reprocessing cycles on the morphology and mechanical properties of a Poly(Propylene)/Poly(Hydroxybutyrate) blend and its nanocomposite. **Materials research - Ibero american journal of materials** , [s. l.], v. 24, n. e20200372, ed. 4, 2021.

FERNANDES, L. S. **Adição de CaCO₃ em Polipropileno para a fabricação de talheres descartáveis**. 2021. 66 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Materiais, Departamento de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021.

FERREIRA, D. F.. SISVAR: A COMPUTER ANALYSIS SYSTEM TO FIXED EFFECTS SPLIT PLOT TYPE DESIGNS. REVISTA BRASILEIRA DE BIOMETRIA, [S.l.], v. 37, n. 4, p. 529-535, dec. 2019. ISSN 1983-0823. Available at: <<http://www.biometria.ufla.br/index.php/BBJ/article/view/450>>. Date accessed: 10 feb. 2020. doi: <https://doi.org/10.28951/rbb.v37i4.450>.

FERREIRA, R. Moldagem por termoformagem. *In*: PROCESSOS especiais de transformação termoformagem. Rio Grande do Sul: [s. n.], 2017. cap. 4, p. 1-16.

FISHER, W. T. Fix Thickness Variations in Extruded Sheet. *PlasticsTechnology*, ago. 2005.

GREGOR, H.; KENNY, S.; CHRIS, R. Temperature Induced Dimensional Variation in Extrusion. **American Institute of Physics**, [s. l.], v. 1779, n. 030005, 31 out. 2016.

HOU, C;. et al. The development of an abnormal isotactic polypropylene spherulite: Morphology and kinetics. **Polymer Crystallization** , [s. l.], v. 3, ed. 5, out 2020.

HSIEN-TANG, C. et al. Characterisation of PC/ABS blend during 20 reprocessing cycles and subsequent functionality recovery by virgin additives. **Journal of polymer research**, [s. l.], v. 25, n. 124, ed. 5, 25 out. 2018.

HYIE, K. M. et al. Durability of Repetitive Polypropylene Recycling: Challenge on Securing The Mechanical Properties. **Materials science and engineering** , [s. l.], v. 1003, n. 012127, 2020.

HYVÄRINEN, M.; JABEEN, R.; KÄRK, T. The Modelling of Extrusion Processes for Polymers—A Review. **Polymers**, [s. l.], v. 12, ed. 6, Jun 2020.

JANCAR, J. et al. Effect of Porosity Gradient on Mechanical Properties of Cellular Nano-Composites. **Polymers**, [s. l.], v. 12, n. 681, ed. 3, 19 mar. 2020.

SENK, K. M.; ROBLEK, M. The impact of the standardization of the NPD process on its efficiency. **Journal of Business Economics and Management**, [s. l.], v. 20, p. 149-167, 10 dez. 2018.

KARUPPALAH, C.; VASILJEVIC, N.; CHEN, Z. Circular economy of polymers - electrochemical recycling and upcycling. **The electrochemical society interface**, [s. l.], v. 30, n. 3, ed. 55, 2021.

LIN, Y. J.; DIAS, P.; HILTNER, A.; BAER, E. Surface roughness and light transmission of biaxially oriented polypropylene films. **Polymer engineering and science** , [s. l.], v. 47, ed. 10, p. 1658-1665, 12 jul. 2007.

LISA-MARIA, W.; KATHARINA, K.; DIETMAR, D. Elongation behaviour of filled semi-crystalline polymers in thermoforming. **Advances in Materials and Processing Technologies** , [s. l.], v. 6, ed. 3, p. 647-660, 4 mar. 2020.

LOPEZ, J.P.; GIRONES, J.; MENDEZ J.A. Recycling ability of biodegradable matrices and their cellulose-reinforced composites in a plastic recycling stream. **J Polym Environ**, [s.l.], 2012.

LUZ, G. Módulo de Elasticidade ou Módulo de Young (Resumo e Exemplos). Blog Materiais,[s.l],2017 .Disponível em: <https://www.materiais.gelsonluz.com/2017/12/modulo-de-elasticidade-ou-modulo-de-young.html>. Acesso em: 04 de outubro de 2021.

LUZ, G. P.; TORTORELLA, G. L. Controle estatístico do processo no setor de termoformagem de uma indústria de copos plásticos descartáveis. **Revista de engenharia de produção** , [s. l.], v. 1, 2019.

MENDES, J. F. et al. Effects of short fibers and processing additives on HDPE composites properties reinforced with Pinus and Eucalyptus fibers. **Journal of applied polymer science** , [s. l.], v. 138, n. e50178, ed. 15, 13 out. 2020.

PATIL, J. P et al. Transient thermal analysis of close pressure thermoforming process. **Journal of Manufacturing Processes**, [s. l.], v. 62, p. 513-522, fev 2021.

PODUSKA, J. et al. Residual stress distribution in extruded polypropylene pipes. **Polymer testing** , [s. l.], v. 40, p. 88-98, dez 2014.

REINERT, F. A. Características do Polipropileno. *In: EXTRUSÃO de chapas termoplásticas*. [S. l.: s. n.], 2006. p. 16-20.

RODRIGUES, A. C. et al. Vias de reciclagem dos polímeros polipropileno (PP) e poliestireno (PS): um estudo bibliográfico. **Iberoam. Polímeros y Materiales Polímeros**, [s. l.], v. 18, Abril 2017.

SAIKRISHNAN, S. et al. Thermo-mechanical degradation of polypropylene (PP) and low-density polyethylene (LDPE) blends exposed to simulated recycling. **Polymer Degradation and Stability** , [s. l.], v. 182, 6 out. 2020

SANTOS, A. V. et al. Características, propriedades e aplicações de materiais porosos. **Química e sociedade** , [s. l.], 10 jan. 2015.

SASIMOWSKI, E. The use of utility function for optimization of thermoforming. **Polymer** , [s. l.], v. 63, 13 jan. 2018.

SHIBAYAMA, M. et al. Structure of High Transparent Polypropylene Film. **Polymer Journal**, [s. l.], p. 837-846, 1 jul. 1991.

SMITH, W. F.; HASHEMI, J. The tensile test and the engineering stress-strain diagram. *In*: FOUNDATIONS of materials science and engineering. [S. l.: s. n.], 2006.

SPICKER, C et al. The use of rheological behavior to monitor the processing and service life properties of recycled polypropylene. **Food Packing and Shelf Life** , [s. l.], v. 19, p. 174-183, mar. 2019.

TEIXEIRA, P. et al. Padronização e melhoria de processos produtivos em empresas de panificação: estudo de múltiplos casos. **Production**, [s. l.], v. 24, p. 311-321, 1 jun. 2014.

UNIFASV. **Copos descartáveis: impactos e alternativas**. [S. l.], 15 fev. 2019. Disponível em: <https://portais.univasf.edu.br/sustentabilidade/noticias-sustentaveis/copo-descartavel-impactos-e-alternativas>. Acesso em: 13 out. 2021.

Vantagens de se utilizar Descartáveis - Ajudar ao Meio Ambiente. Disponível em: <https://goldenplast.ind.br/vantagens-de-utilizar-descartaveis/>>. Acesso em: 2 set. 2021.

VIGNOL, L. A. Desenvolvimento de Modelos Simplificados para o Estudo da Extrusão de Polímeros. **Lume, repositório digital** , Porto Alegre, 2005.