



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
GRADUAÇÃO EM QUÍMICA INDUSTRIAL

Thalyta Rayanne Barbosa dos Santos

**PROCESSO PRODUTIVO DO POLIETILENO TEREF TALATO (PET) PARA
A PRODUÇÃO DE GARRAFAS E SEUS PARÂMETROS DE QUALIDADE**

Recife
2023.

Thalyta Rayanne Barbosa dos Santos

**PROCESSO PRODUTIVO DO POLIETILENO TEREF TALATO (PET) PARA
A PRODUÇÃO DE GARRAFAS E SEUS PARÂMETROS DE QUALIDADE**

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação
em Química Industrial do Centro de Tecnologia
e Geociências da Universidade Federal de
Pernambuco como requisito para a obtenção
do título de Bacharel em Química Industrial.

Orientadora: Prof.Dr. Fernanda Honorato

Recife
2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Santos, Thalyta Rayanne Barbosa dos.

Processo produtivo do Polietileno Tereftalto (PET) para a produção de garrafas e seus parâmetros de qualidade / Thalyta Rayanne Barbosa dos Santos. - Recife, 2023.

31

Orientador(a): Fernanda Araujo de Honorato

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, , 2023.

7,5.

1. Polietilento Tereftalato (PET). 2. parâmetros de qualidade. 3. bebidas carbonatadas. I. Honorato, Fernanda Araujo de . (Orientação). II. Título.

540 CDD (22.ed.)

Thalyta Rayanne Barbosa dos Santos

**PROCESSO PRODUTIVO DO POLIETILENO TEREFTALATO (PET) PARA
A PRODUÇÃO DE GARRAFAS E SEUS PARÂMETROS DE QUALIDADE**

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação
em Química Industrial do Centro de
Tecnologia e Geociências da Universidade
Federal de Pernambuco como requisito para
a obtenção do título de Bacharel em Química
Industrial.
Orientadora: Prof.Dr. Fernanda Honorato

Aprovado em:

Banca Examinadora

Profº Dra: Fernanda de Araujo Honorato (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco

Profº Dra: Ana Paula Lima Pacheco
Universidade Federal de Pernambuco

Profº Dra: Daniella Carla Napoleão
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus, por ter guiado meus caminhos, me dado sabedoria e por ter me dado muita luz até o presente momento.

À minha mãe, Maria Lucia, ao meu pai, José Manoel, pelos ensinamentos e incentivos desde criança com os estudos. Minha mãe me ajudou a aprender a ler e meu pai com seus ensinamentos em matemática me fizeram entender a importância dos estudos, são minha maior fonte de inspiração e exemplo.

À minha irmã, Ingrid Dayane, à minha sobrinha, Isabella Beatriz, que sempre me deram muito incentivo e apoio para concluir mais essa etapa educacional.

Ao meu marido, Daniel Júnior, por sempre me apoiar nos meus sonhos, por ser paciente comigo nas horas que precisei faltar para me dedicar ao curso, por me ajudar na minha vida acadêmica e me buscar todos os dias na parada tarde da noite mesmo com o cansaço do dia a dia.

Aos demais familiares, por terem auxiliado na minha vida educacional.

À minha orientadora Prof. Dr Fernanda Honorato, por toda paciência, contribuição, orientação e por me guiar da melhor forma possível para a construção do meu trabalho de conclusão de curso.

A todos os professores do departamento de Engenharia Química, curso de Química Industrial, por terem me ajudado a obter o conhecimento que possuo hoje.

Aos amigos que fiz durante a trajetória acadêmica, Julia, Jonathan e Dayved por compartilharem os momentos bons e difíceis, pelos trabalhos feitos juntos, pelos estudos para diversas provas,

Às minhas amigas da infância, Gabi, Val e Iris, pelas risadas, pelos conselhos de vida, por me apoiarem nos meus sonhos.

Aos meus amigos de trabalho Meire, Priscila, Gabriel e Gabriella pela compreensão no trabalho, quando eu preciso sair mais cedo para ir pra faculdade, pelas risadas durante o turno. Vocês deixam a jornada de trabalho de 12 horas mais leve e divertida.

Ao meu supervisor, Marcos Júnior por me liberar mais cedo e até durante as provas e por todo suporte e material disponibilizado para entender melhor o processo.

A todos meus sinceros agradecimentos!

RESUMO

Com o avanço da sociedade moderna foi necessário o surgimento de novos produtos para suprir o crescimento acelerado, um desses avanços foi o plástico que surgiu com diferentes aplicações, em especial na substituição das embalagens de vidro. Um dos principais produtos que foram substituídos no mercado foram as garrafas de refrigerantes de vidro pelo plástico advindo do petróleo—do tipo Polietileno tereftalato (PET). O PET como hoje é conhecido mundialmente se tornou um produto essencial nos dias atuais, já que a partir das suas características físicas e químicas como maleabilidade e resistência, é possível armazenar bebidas carbonatadas para posterior venda. Isso permitiu diminuir o consumo de garrafas de vidro, a qual para a sua produção é demandado mais recursos financeiros do que para a produção do polietileno tereftalato, além dos custos com sua destinação final. Tendo em vista essa alta demanda pelo PET é tido como objetivo deste estudo apresentar como se dá a sua produção através de metodologias tais como a medição do índice de viscosidade, da cor $L^* a^* b^*$, do índice de acetaldeído, os quais possuem faixa de especificação que validam a característica do chip PET para ser vendido como matéria prima da pré-forma da garrafa de plástico de suportar o gás carbônico engarrafado obedecendo seus parâmetros de qualidade, como resultados demonstrado a importância da fabricação em escala industrial do PET de como é tão utilizado atualmente, concluído que o chip produzido numa indústria petroquímica está de acordo com as normas estabelecidas para posterior venda.

Palavras-chave: bebidas carbonatadas; parâmetros de qualidade; Poli(etileno) Tereftalato (PET).

ABSTRACT

With the advancement of modern society, it was necessary for the emergence of new products to meet the accelerated growth. One of these advances was plastic, which emerged with different applications, especially in replacing glass packaging. One of the main products that were replaced on the market were glass soft drink bottles with plastic made from Poly(ethylene terephthalate) (PET) material. PET, as it is known worldwide today, has become an essential product today, as its physical and chemical characteristics, such as malleability and resistance, make it possible to store carbonated drinks for later sale. This made it possible to reduce the consumption of glass bottles, which require more financial resources to produce than to produce polyethylene terephthalate, in addition to the costs of its final destination. In view of this high demand for PET, the objective of this study is to present how its production takes place through methodologies that validate PET's ability to withstand bottled carbon dioxide and its quality parameters for this.

Keywords: Polystyrene Terephthalate (PET); carbonated drinks; quality parameters.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	09
2.	ESTADO DA ARTE.....	12
2.1	Setor de embalagens plásticas.....	12
2.2	Polímeros.....	13
2.3	O processo produtivo do PET.....	15
2.4	A fabricação do polímero de polietileno tereftalato.....	18
2.5	O Poli(etileno tereftalato), características físicas e químicas.....	18
2.6	Aditivos que formam a resina PET.....	21
3	METODOLOGIA.....	23
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	25
5	CONCLUSÃO.....	27
	REFERÊNCIAS.....	28

Lista de Figuras

Figura 1 Estrutura Química do PTA.....	15
Figura 2: Reação de DMT mais EG.....	17
Figura 3: Unidade de repetição do mero.....	18
Figura 4: Chip PET branco.....	20
Figura 5: Chip PET com coloração amarelada.....	20
Figura 6: Índice de cor do chip PET.....	24

1.INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, com o aumento da popularização do consumo de bebidas carbonatadas, as indústrias deste segmento foram desenvolvendo recipientes cujo material disponham de barreiras para suportar o dióxido de carbono (CO_2), que é o principal ingrediente que realça o sabor para esse tipo de bebidas. Assim, desenvolveu-se um plástico, um polímero sintético, para compor o recipiente de contenção capaz de suportar o gás carbônico que faz toda diferença nesse tipo de bebida, conhecida como refrigerante. De acordo com Rabello (2008), as embalagens de poli(etileno) tereftalato (PET) injeção-sopro caracterizam-se por excelente processabilidade, atingindo-se patamares de milhares de garrafas por hora de produção. Além disso, as temperaturas envolvidas são bem inferiores às praticadas na fabricação de garrafas de vidro.

A produção dos plásticos sintéticos, tão utilizados atualmente, inicia nas refinarias de petróleo (petroquímicas) por meios de processos como a destilação dos derivados de petróleo, por meio de processos como a destilação dos derivados de petróleo. Dentro deste segmento industrial, há diferentes classificações para os plásticos obtidos de acordo com a necessidade atendida. Conforme Teixeira (2017), a indústria de transformação de plásticos constitui a terceira geração da cadeia petroquímica. Na primeira geração têm-se as resinas, resultado da transformação da nafta, e na segunda geração, os termoplásticos e os termofixos. Os termoplásticos podem ser moldados várias vezes por ação de temperatura e pressão, por isso são recicláveis, já os termofixos sofrem reações químicas em sua moldagem, o que impede uma nova fusão, portanto, não são recicláveis. Os tipos de plásticos mais utilizados atualmente são: polietileno (PE), polipropileno (PP), poliestireno (PS), e poli(etileno) tereftalato (PET), sendo chamados de *commodities* devido à grande produção e aplicação desses materiais.

Os polímeros modificados conhecidos como termoplásticos, termofixos ou termorrígidos, foram criados para diferentes funcionalidades, das quais uma delas é a capacidade de deter o dióxido de carbono na garrafa, juntamente com a tampa, chegando ao cliente final um produto conforme a suas perspectivas sensoriais. (Canevarolo, 2013). Paralelamente, tem-se avançado esses novos sistemas de barreiras de escapes de CO_2 , já que entre a fabricação do chip do PET, em seguida a produção da pré-forma através da extrusora que funciona à altas temperaturas e a

altas pressões até a transformação em garrafas de plásticos, tem-se vários processos industriais, os quais devem suportar altas pressões e temperaturas até a chegada da distribuição da bebida no comércio, como restaurantes e supermercados (Maxxi PET, 2022). Além da importância do plástico escolhido para desempenhar a função de suportar as bebidas carbonatadas, as com alto teor de CO_2 , também está relacionada ao volume e desenho da embalagem da garrafa

Diante do crescimento da produção e do consumo de bebidas gaseificadas, a garrafa de vidro que inicialmente era a única com esse objetivo, deu lugar às de plástico, a qual foi possível diante da criação de um polímero de boa resistência a deformação, com alta rigidez e dureza, com baixo coeficiente de atrito e baixa abrasão (Canevarolo, 2013). Assim, o polímero PET, que atende a esses requisitos foi utilizado, é produzido em forma de chips, que após fundido e moldado a altas temperaturas forma a garrafa de plástico.

De acordo com Bastos (2006), plásticos são grupos de materiais sólidos, de composição eminentemente de compostos orgânicos, usualmente tendo por base resinas sintéticas ou polímeros naturais modificados e que possuem, em geral, apreciável resistência mecânica. Pode-se considerar que os polímeros também são classificados conforme o tipo de ligação saturada ou insaturada. Os não saturados incluem as resinas para laminação e casting, e as resinas alquídicas. Os saturados são para fibras e filmes; plastificantes; e poliésteres/poliuretanos. Em determinado estágio de sua preparação ou manufatura, a maioria dos plásticos podem ser fundidos, moldados ou polimerizados diretamente na forma final. (MILES, 1975).

Os plásticos encontram na vida moderna uma série de aplicações, em especial nos diferentes setores industriais, como o setor da indústria têxtil, da construção civil com a fabricação de telhas (Fagundes, 2019). Além disso é de grande importância para a sociedade moderna, que faz uso do material plástico, entender melhor suas características físicas químicas, como quanto tempo leva para se degradar e dá o destino correto do resíduo que foi gerado. É importante descartar corretamente, pois muitas vezes esse resíduo vai parar em lixões a céu aberto, ou em esgotos, e até nos oceanos, causando poluição ambiental. Esses polímeros levam cerca de 100 anos para se decompor, mas através de reciclagem o PET pode ser transformado em fibras para a fabricação de cordas (multifilamento), fios de costura (monofilamento) e cerdas de vassouras e escovas, sendo que a outra parte é destinada à moldagem de autopeças lâminas para termoformadoras e

formadores à vácuo (manequins plásticos), garrafas de detergentes, garrafas de refrigerantes, mantas não-tecidas, carpetes e enchimentos de travesseiros (Cempre, 1997) , além de outros produtos, a fim de diminuir a poluição e contaminação do solo, gerar economia de água e energia, preservar o ambiente e até mesmo gerar novos empregos.

Diante disso, faz-se necessário um estudo de caso para compreender a utilização, diferenças entre os diversos tipos de polímeros com ênfase para a importância e uso do poliestireno conforme a necessidade atendida.

Sendo assim, este trabalho tem como objetivo demonstrar os avanços tecnológicos da substituição do vidro para a do plástico como recipiente para bebidas carbonatadas, e entre esses plásticos qual o mais apropriado para essa finalidade, pois dentre os diferentes tipos de polímeros, tem os mais apropriados para o envase de água com gás, chás gelados, sucos, leite, achocolatados e refrigerantes.

Além de se tratar de um trabalho teórico que consiste em apresentar a importância da substituição de garrafas de vidros por garrafas plásticas advindas do polietileno tereftalato com ênfase na aplicação para suportar bebidas carbonatadas. Para tanto, pretende-se apresentar as propriedades do processo produtivo do polímero cristalino para a produção de garrafas de plásticos e parâmetros de qualidade; demonstrar o crescimento do setor de embalagens com ênfase na produção de garrafas plásticas.

2 ESTADO DA ARTE:

2.1 Setor de embalagens plásticas:

O setor de embalagens é conhecido por ser um setor global que apresenta uma alta dinâmica e atende a diferentes necessidades, sejam elas culturais, locais ou científicas, conforme a necessidade de cada setor. De acordo com a Associação Brasileira de Embalagem, no ano de 2022 o nível de emprego na indústria de embalagem atingiu 244.836 mil postos de trabalho neste ano, o que representou um crescimento de 2% em relação ao mesmo período em 2021. A indústria registou em 2022, 132.456 empregos formais, correspondendo a 54,1% do total de postos de trabalho do setor. Em seguida, vem papelão ondulado com 35.991 funcionários (14,7%), papel com 23.994 (9,8%), metálicas com 18.608 (7,6%), madeira com 16.404 (6,7%), cartolina e papel cartão com 10.038 (4,1%) e vidro com 7.345 (3,0%). Dentre essas porcentagens é possível confirmar que o setor de embalagens, principalmente a do tipo de fabricação de plásticos, só tendem a crescer e gerar mais empregos. (Associação Brasileira de Embalagem, 2022).

As embalagens, são imprescindíveis para os avanços da humanidade, já que são recipientes ou materiais que envolvem e armazenam produtos por um determinado período, protegendo e garantido a vida útil do produto e assim possibilitando a produção, distribuição, comercialização, manuseio e consumo do produto. (Instituto Brasileiro de Economia, 2022). As embalagens passam uma identidade visual do produto que se converte em uma linguagem direta para o consumidor, que ao ver a embalagem do produto, já associam a marca e são estimulados a comprar. Conforme o Instituto Brasileiro de Economia, unidade Fundação Getúlio Vargas (FGV) em seu estudo macroeconômico exclusivo da indústria brasileira de embalagem, demonstrou que o valor bruto da produção física de embalagens atingiu em 2022 o montante de R\$ 123,2 bilhões, um crescimento de 3,9% em relação ao ano de 2021. (Instituto Brasileiro de Economia, 2022).

A indústria brasileira, em relação a embalagens plásticas, mostra expressivo crescimento de consumo em todas as categorias com maior destaque para garrafas PET que tendem a continuar crescendo em 2023, dando continuidade à tendência dos últimos cinco anos. Neste período acumulou-se uma expansão da ordem de 22% em volume produzido. A expectativa é que o setor como um todo cresça em torno de 4% este ano, um pouco mais que os 3,3% de 2022, quando atingiu a

produção de 692 mil toneladas de resina virgem comercializadas no mercado brasileiro. (Plástico Industrial, 2023).

O consumo de plástico aumenta conforme aumenta a necessidade humana, e por isso tem-se uma grande demanda para a produção de garrafas PET, então “a enorme dependência das embalagens PET no mercado de refrigerantes (aproximadamente 60%) obrigou as indústrias desse tipo de material a buscar mais investimentos com o objetivo de tornar cada vez mais global a necessidade desse tipo de embalagem de grau alimentício. (Pack Trends Brasil, 2015).

Além de atender a essas novas necessidades perante a alta demanda de fabricação de bebidas carbonatadas, as embalagens de PET também oferecem outros benefícios para a indústria, setores de distribuição e meio ambiente. Segundo a Associação Brasileira da Indústria do PET, por ser extremamente leve e resistente, produzida com pouco material, a embalagem contribui para a redução nas emissões de CO₂ durante o transporte. Apenas 2% a 5% do peso de um caminhão carregado de garrafas PET envasadas, por exemplo, correspondem à embalagem. No caso do vidro, esse índice é próximo de 50%, ou seja, é possível transportar mais produto (e menos embalagem) em cada viagem. (Pack Trends Brasil, 2015).

A embalagem PET ainda possibilita considerável economia de água no envase de refrigerantes e outras bebidas, por dispensar a lavagem de embalagens vazias. Como ilustração, são necessários de 4 a 6 litros de água para cada litro de refrigerante produzido em sistema de embalagens retornáveis. Os sistemas que utilizam as garrafas recicláveis de PET por sua vez, precisam de apenas 2 litros (ABIPET, 2022). Com essa ilustração é possível verificar os benefícios desse tipo de embalagem no cotidiano. Por isso, o advento desse tipo de polímero fez com que este se tornasse um item indispensável na fabricação de bebidas presentes em todos os lares.

2.2 Polímeros

As características dos polímeros são definidas durante o seu processo de formação por isso os diversos fatores que podem influenciar no processo de polimerização, como a pureza dos reagentes, o tipo de concentração dos iniciadores, a temperatura e o tempo de reação, viscosidade e o pH do meio, são fundamentais na determinação das propriedades finais da macromolécula formada com longas cadeias poliméricas (Silva Filho, 2005).

A polimerização em cadeia ocorre com a poliadição, o tamanho final das cadeias poliméricas é atingido quase que imediatamente, logo após o início da

reação. Para que as moléculas reajam é necessário utilizar uma espécie ativa, onde o centro reativo pode ser um radical livre, um cátion ou um ânion. (Stuart, 2002).

Então a polimerização em etapas está associada à presença de grupos funcionais reativos existentes nos materiais iniciais com a eliminação de moléculas de baixa massa molar, como por exemplo, à água sendo gerada como subproduto. (AKCERULD 2007).

Assim têm-se a definição dos termos utilizados para os polímeros. Começando pelo polímero: material orgânico (ou inorgânico) de alta massa molar (acima de dez mil, podendo chegar a 10 milhões), cuja estrutura consiste na repetição de pequenas unidades (meros). Macromoléculas formadas pela união de moléculas simples ligadas por ligações covalentes. (Canevarolo, 2006); macromolécula: uma molécula de alta massa molar, mas que não tem necessariamente, em sua estrutura, uma unidade de repetição; monômero: molécula simples que dá origem ao polímero. Mero: unidade de repetição; grau de Polimerização (GP): número de unidades de repetição da cadeia polimérica, e costumeiramente o grau de polimerização está acima de 750. Polímeros naturais orgânicos: sintetizados pela natureza, tendo como exemplo as borrachas naturais e as celulosas; polimerização ou síntese de polímeros: conjunto de reações químicas que provocam a união de pequenas moléculas por ligação covalente com a formação de um polímero. Polímeros naturais orgânicos: polímeros sintetizados pela natureza. Exemplos: borrachas naturais, celulose, etc. Polímeros sintéticos: Polímeros sintetizados pelo homem. Exemplos: polietileno (PE), poliestireno (PS), policloreto de vinila (PVC), etc.

A cadeia petroquímica está dividida em três gerações, a primeira geração corresponde a petroquímicos básicos, segunda geração às resinas e intermediários, e por fim a de terceira geração que são os transformadores, através da exploração do petróleo e produção da nafta e gás natural, principalmente, tem-se como resultado as matérias primas necessárias para que ocorra a transformação das mesmas em bens de consumo industrial para diversas utilizações e finalidades. No Brasil, a nafta é a principal matéria prima utilizada, e o gás natural o segundo mais utilizado. (Miranda, 2016).

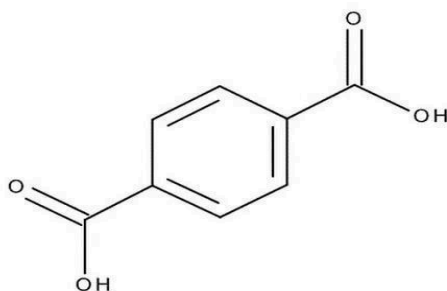
Assim, o setor petroquímico passou por muitas mudanças ao longo dos anos, passando de um setor cujas decisões eram centralizadas e possuía um

planejamento único, para um sistema independente e de disputa entre as empresas que controlam esse setor. Com a privatização do setor pulverizam-se os interesses no segmento. (Miranda, 2016).

2.3 O Processo produtivo do PET

No tanque de preparação da “pasta”, é adicionado o monoetileno glicol e o ácido tereftálico (PTA), onde através de agitação, ambos os produtos são misturados. Também neste tanque é adicionado o catalisador, que irá posteriormente acelerar a reação de policondensação (transformação do monômero em polímero). Neste tanque de preparação não ocorre reação química.

Figura 1: Estrutura química do do PTA



Fonte: Merck, 2023.

Após essa primeira etapa a “pasta” é transferida por meio de bomba, do tanque de preparação para o primeiro esterificador (EI-1), fornecendo temperatura através de serpentinas de aquecimento com fluido térmico. Neste reator ocorre a conversão de 90% da pasta de PTA + MEG em monômero (DGT- diglicol tereftalato). Durante a reação de esterificação, ocorre o arranjo de duas moléculas de MEG com uma de PTA, assim como resultado tem duas moléculas de água, a qual tem que ser destilada através de uma coluna. E esta água segue para o tratamento de efluentes.

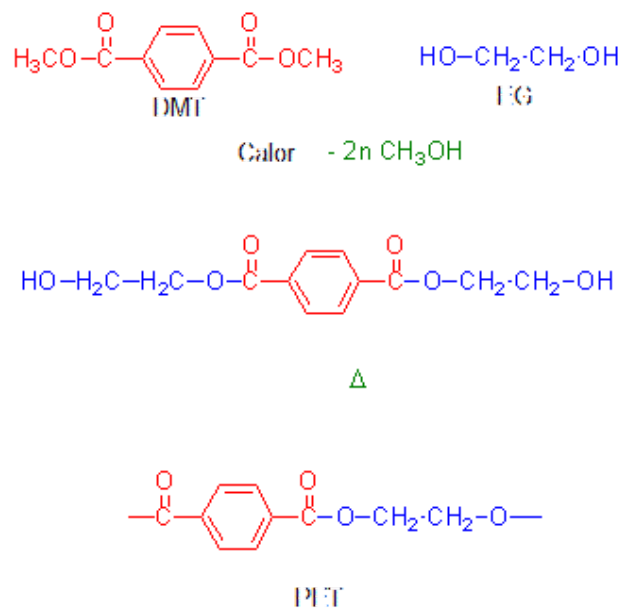
Utilizando uma bomba, parte da “pasta” já esterificada é transferida para o segundo esterificador (EI-2), onde se completa 96% do grau de esterificação. O restante da reação se completa nos reatores na pré-policondensação e policondensação. E no segundo esterificador é adicionado um produto químico em suspensão, para dar a maticidade (cor) ao polímero.

Na coluna de pré-policondensação, a destilação ocorre devido ao excesso do glicol da reação de esterificação, promove ainda o final da reação de esterificação com a porcentagem de 96% passando para 99%, assim com o início da cadeia do polímero (cadeia com aproximadamente 16 moléculas). Para obter a reação de encadeamento dos monômeros, é necessária a redução da pressão interna do reator, através de um ejetor de vácuo movido a vapor de glicol. O excesso de glicol destilado da coluna de pré-policondensação é recuperado.

Da pré-policondensação é realizado a transferência do produto através de uma bomba para o reator principal da policondensação (reator de anéis de disco-DRR). Neste reator há a transformação dos monômeros (99,7%) dos DGT em polímero, onde para que haja a reação é necessário a presença de um catalisador, temperatura controlada, tempo de residência e sob pressão à vácuo. A pressão do vácuo é de aproximadamente 1 bar, e dentro do reator a massa do polímero é destruída como uma película dos anéis de disco reator. Uma renovação superficial rápida e contínua neste reator, promove a destilação do restante do monoetileno glicol.

Para a produção do PET, com o intuito de grau alimentício, para estar adequado ao suporte do refrigerante com CO₂, ocorre a reação entre o ácido tereftálico purificado (PTA) mais o etileno glicol (EG) formando o dietileno glicol tereftalato (DGT) e após, ocorre a policondensação do DGT para PET e EG (Plásticos, 2023). Como mostra a figura 2:

Figura 2: Reação de DMT mais EG



Fonte: Plásticos, 2023

Conforme a Alpek Polyester, “o ácido tereftálico purificado (PTA) tem sua origem a partir da oxidação do p-xileno. Principal insumo consumido na fabricação de poliéster, é considerado a principal matéria prima para a produção da resina PET (polietileno tereftalato) nas aplicações como embalagens e produção de fibras de poliéster. Possui uma ampla aplicação na indústria têxtil, no mercado de embalagens plásticas, filmes (audiovisuais) e em diversos segmentos dos setores elétrico e automotivo, além da indústria do petróleo em produtos como pneus, cintos de segurança, cabos para amarração de plataformas, entre outros. Outras aplicações conhecidas para o PTA são as tintas e filmes plásticos (para proteção de alimentos). (POP, manual interno da Alpek Polyester Brasil, 2016.)

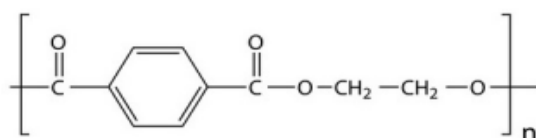
Dentro das especificações do PTA, para chegar a um bom PET é preciso que a granulometria do pó (tamanho das partículas) esteja dentro dos parâmetros de qualidade na faixa estabelecida (mediana entre 95 e 135 micrômetros), pois o tamanho da partícula do PTA é o parâmetro chave para o controle de qualidade do PET pelas seguintes razões: solubilidade do ácido tereftálico e etilenoglicol, taxa de reação, carga da planta e PTA não dissolvido, porém não existe exigências quanto ao tamanho de partícula ideal para a fabricação do PET. As plantas industriais de produção dos polímeros são muito sensíveis à mudança de tamanho das partículas e, por essa razão, exigem um produto específico consistente, em vez de um tamanho específico. (POP, documento interno da Alpek Polyester Brasil, 2016.)

2.4 A fabricação do polímero de polietileno tereftalato

A fabricação do polímero polietileno tereftalato é obtido através de duas rotas químicas: 1) Esterificação direta do ácido tereftálico purificado e 2) Transesterificação do dimetil tereftalato (DMT) com etileno glicol (EG). (Barros, 2004).

Após o término dessas fases tem-se a obtenção do polietileno tereftalato. A sua repetida estrutura molecular possui uma fórmula química com carbono, hidrogênio e oxigênio em sua composição ($C_{10}H_8O_4$) como a maior parte dos plásticos que são industrializados. Como mostra a Figura 3:

Figura 3: Unidade de repetição do mero



Fonte: Feitor, 2015

O PET, quando está no seu estágio natural, é transparente, flexível e semi cristalino. No entanto, de acordo com alguns tipos de processamento que envolvem altas temperaturas, causando entre as moléculas por ligações de Van der Waals. Desta maneira, o polímero irá se transformar em um líquido viscoso e como é um termoplástico pode ser moldado de várias formas para diferentes objetivos. Isso vai acontecer a uma taxa de temperatura vítrea, (definida como a faixa de temperatura de transição onde os polímeros mudam de um estado duro e rígido para um estado mais flexível), e a temperatura da fusão do material, que corresponde a uma faixa de 75°C a 260 °C (Girija, B., 2005). Conforme essa especificação, o PET apresentado no presente estudo possui ponto de fusão, em torno de 240°C, para se tornar garrafa de plástico para grau alimentício.

2.5 O Poli(etileno tereftalato), características físicas e químicas:

Os plásticos (polímeros) apresentam dois tipos de arranjos, o amorfo, em que as cadeias moleculares estão todas desordenadas e a do tipo cristalino, que apresentam em sua estrutura uma cadeia altamente ordenada. (Lokensgard, 2013). Assim, de acordo com Rabello e Wellen (2008), o PET pode existir tanto como um

material amorfo quanto com um material semicristalino, dependendo das condições de resfriamento do material e ambas.

O PET tem propriedades tais como alta resistência mecânica e química, impermeabilidade a gases e é bem mais leve que as embalagens tradicionais feitas de vidro ou alumínio.

Assim, o número de meros, ou mais precisamente o número conhecido de repetições do mero em uma grande cadeia de polímero é identificado como grau de polimerização (DP). O termo polímero implica em uma molécula geralmente de tamanho molecular grande (macromolécula). E consequentemente produtos de baixo peso molecular com baixo DP devem ser considerados oligômeros (oligo=poucos) para distinguir. (Chanda, 2018).

Para conseguir fazer a polimerização, os peletes de PET precisam ser inicialmente submetidos a um aquecimento a 160-170 °C para promover a cristalização parcial e a secagem. Em seguida esses paletes são submetidos a um aquecimento por 16h a cerca de um aquecimento a 215 °C, em um reator com atmosfera inerte (com nitrogênio). Neste processo aumenta-se o peso molecular do polímero até ser atingido o peso molecular pré-entendido (Garcia, E. C Eloísa, Boletim de Tecnologias de Desenvolvimento de Embalagens).

Como o PET utilizado é do tipo cristalino e por isso tem suas propriedades dependentes de acordo com o grau de cristalinidade que atinge após a transformação, assim quanto maior o grau de cristalinidade, maior será a rigidez do produto formado (menor resistência ao impacto), maior a resistência térmica e menor a transparência (Garcia, E. C Eloísa, Boletim de Tecnologias de Desenvolvimento de Embalagens).

O PET produzido estar suscetível à degradação térmica e do ar (oxigênio) por esse fato um produto comum que se forma com a degradação térmica do PET é o acetaldeído, o qual se estiver acima de 2 g/ml de partes por milhão (ppm) acaba por transferir um sabor amargo à bebida após a mesma se engarrafada em uma garrafa de poli(estireno tereftalato). A presença do oxigênio acaba por induzir a um processo de degradação oxidativa, e a degradação térmica na presença de umidade provoca a queda das cadeias já formadas, assim consequentemente reduz o peso molecular do polímero (GARCIA, E. C ELOÍSA, Boletim de Tecnologias de Desenvolvimento de Embalagens).

Outro parâmetro de qualidade para a fabricação do chip PET é a sua cor, a qual têm que está dentro dos parâmetros de qualidade e o chip cristalino vendido tem que apresentar uma coloração esbranquiçada como mostra a figura 4.

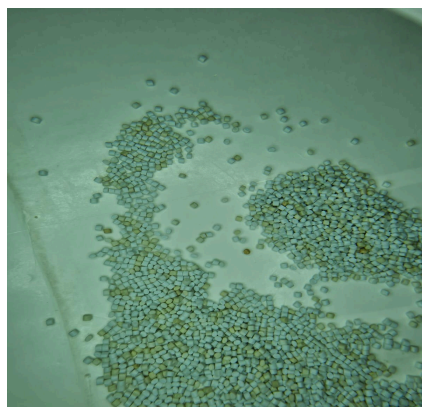
Figura 4: Chip PET branco



Fonte: O autor, 2023

O mesmo se estiver na coloração amarelada como mostra a Figura 5, não pode ser vendido para as empresas de garrafas plásticas.

Figura 5: Chip PET com coloração amarelada.



Fonte: O autor, 2023

Essa coloração indica que o poli(estireno tereftalato) está degradado, entrando no silo (bag onde fica armazenado os chips) como categoria off, só podendo ser vendido com um preço abaixo do mercado. Por isso esse parâmetro de qualidade é importante para indicar como anda a produção dos chips se está havendo qualidade ou não na hora da produção, com os parâmetros dentro das especificações exigidas.

2.6 Aditivos que atuam nas propriedades intrínsecas do PET

Como para o desenvolvimento de novas tecnologias relacionadas aos polímeros foram necessárias modificações em suas propriedades físicas e químicas para atender as necessidades impostas com o avanço das sociedades, assim foram criados aditivos para atender essas novas mudanças, com estruturas química diferenciada a partir de novos monômeros e pela formação de copolímeros. Os aditivos mais comuns para os polímeros são: plastificantes, estabilizantes térmicos, anti UV e anti-oxidantes.

Assim, segundo Rabello (2013) a preparação de copolímeros, combinado de diferentes maneiras e concentrações os monômeros já conhecidos, foi uma estratégia interessante, pois se poderia abreviar bastante as etapas de desenvolvimento, já que as propriedades finais poderiam ser razoavelmente previstas. Tem-se como exemplo, o polietileno tereftalato, que recebe diferentes comonômeros quando é destinado a indústria têxtil ou a indústria de embalagens para bebidas carbonatadas.

Por conseguinte, atualmente a melhor forma de adequar os polímeros existentes no mercado a uma nova aplicação é pelo uso de aditivos. Com a utilização dos aditivos pode-se ajustar as propriedades de um determinado material polimérico a uma aplicação específica, assim conseguindo uma diversidade de produtos dentro do segmento industrial. (RABELLO, 2013).

Para a produção dos chips para a produção do PET utilizado na produção da garrafa que suportem as bebidas carbonatadas, aditivos como o RE-HEAT é usado para reprocessamento térmico, além de também esse aditivo (aditivo com sua composição como segredo de fábrica) é utilizado na absorção no processo de policondensação da resina grau garrafa. O perfil de temperatura com o aditivo RE-HEAT, condiciona uma temperatura significativamente mais baixa do que sem o aditivo. (POP interno Alpek Polyester, 2016). Este componente é responsável por permitir que a resina do PET classificada como B90A suporte bebidas com CO₂) de absorção nas empresas de transformação durante a produção de garrafas e melhora a distribuição de energia na pré-forma. Assim, o consumo de energia é reduzido durante o sopro da pré-forma, melhorando a eficiência e aumentando a produção de garrafas. Além disso, o aditivo RE-HEAT também influencia a cor L* a* b* (que é o índice de anil ou vermelho do chip PET) no produto final.

Outros aditivos podem ser utilizados, tais como o fósforo a partir do H_3PO_4 . O fósforo age como um estabilizador de calor ou como os chamados inibidores. As reações adversas que são catalisadas por íons metálicos como cobalto têm uma influência negativa sobre a cor do produto. O fósforo reage com o cobalto em uma reação de precipitação e desativa a propriedade catalítica do íon metálico. O ácido fosfórico é dosado na fase esterificação 2. Para melhorar a dosagem do estabilizador de calor, o ácido fosfórico é diluído em EG antes que seja continuamente adicionado ao processo.

3 Metodologia

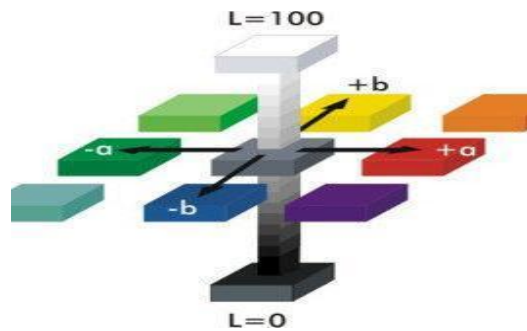
Para o desenvolvimento deste trabalho foi realizada uma pesquisa bibliográfica sobre polímeros, em especial o poli(etileno tereftalato) (PET) para a produção de garrafas de plástico para bebidas carbonatadas. Foram descritas as etapas do processo produtivo do PET, adotado em uma indústria, além de descrever e apresentar os principais parâmetros físico químicos, como as análises de viscosidade intrínseca do PET.

A determinação da viscosidade seguiu da seguinte forma: foi pesado o chip PET numa balança de precisão analítica de quatro casas, com a massa entre 0,2475 a 0,2525 g num balão volumétrico de 50 ml, após adicionado na metade desse balão o reagente químico fenol 1,1,2,2 tetracloroetano, da marca Harrel Industries, Inc. posto para dissolver numa chapa aquecida a temperatura de 100°C por cerca de 25 min. Passado esse tempo é colocado o balão volumétrico para esfriar a temperatura ambiente, em seguida adicionou-se mais fenol 1,1,2,2 tetracloroetano até um pouco antes do menisco do balão (cerca de um centímetro), e colocado em um equipamento com bastante água a temperatura de 30°C por cerca de 10 min. Passado esse tempo o balão foi completamente avolumado com fenol 1,1,2,2 tetracloroetano até a completa aferição do balão volumétrico, homogeneizado, e colocado o líquido em um capilar de vidro com um bulbo para posterior leitura no equipamento onde se obtém o resultado do índice de viscosidade do chip PET. Este deve estar na faixa de 0,82 a 0,86 dl/g para ser classificado como uma resina conhecida como B90A, na qual é possível suportar bebidas carbonatadas. (POP Interno da Alpek Polyester, PE-PTA-LAB-2-028, 2006). E o qual é feita sua leitura no equipamento chamado Lauda através dos viscosímetros.

Análises de cor também foram feitas no chip PET para os parâmetros L^* a^* b^* , cuja leitura é realizada no Espectrofotômetro, onde se colocou cerca de 10 gramas de chips em uma cubeta de quartzo e feito cinco leituras para identificar o valor dessas cores. Mediu-se o valor do tom anil e vermelho dos chips de PET, além de chips manchados no visual e na câmera ultravioleta, que mostram se o chip está dentro dos parâmetros de qualidade, estando com a cor uniformemente não poderá ser vendido sem as correções necessárias para a venda. (POP Interno da Alpek, PE-PTA-LAB-2-003, 2016), e obedece um índice de cor, através de uma determinada

escala como mostra a Figura 6 que marca o índice das cores do corante e qual resultado irá dar, que pode passar do positivo para o negativo conforme ajustes de corantes vermelho e azul.

Figura 6: Índice de cor no chip PET



Fonte: Guiné, 2019

4 Resultados e Discussões

Para classificar a resina PET para posterior venda é necessário está na faixa de 0,82 a 0,84 dl/g (decilitro por grama) a resina classificada como B90A obteve o resultado de 0,84 dl/g, mostrando assim que está dentro dos parâmetros de qualidade para seguir para a venda.

O espectrofotômetro conhecido como Hunter lab qual marca a adição de corante vermelho e azul no chip PET e o índice de branqueamento do mesmo, pois a cor *L maior ou igual a 76,59 marca que o índice de branqueamento está dentro do parâmetro estabelecido, e a cor b com valor maior ou igual a -3,6 está dentro da faixa estabelecida, já a cor *a como não apresenta muita variação, pois a dosagem do corante vermelho não se altera, para esse parâmetro não há valor estabelecido, o qual o resultado fica em torno de -2. A adição dos corantes é feita para ajustar a cor desses importantes parâmetros. Onde essa diferença de cor é definida pela comparação entre um padrão estabelecido e amostra analisada, a partir dos valores x, y e z.

Além dessas análises também é feito a do gás acetaldeído presente no chip, o qual é levado em um recipiente metálico para ser inserido em nitrogênio líquido a -100°C por 10 minutos, após é moído esse chip resfriado em um equipamento cortante com um moinho de facas, após pesado cerca de 0,20 gramas desse chip em forma de pó em um frasco de 20 ml para equipamento head space, sendo o mesmo lacrado e levado para análise por Cromatografia Gasosa (CG), com resultado de 2 g/ml de acetaldeído na amostra para posterior venda em partes por milhão (PPM) (POP Interno da Alpek, PE-PTA-LAB-2-005,2016). Como mostra as Figuras 7 e 8:

Os resultados dessas análises dos parâmetros de qualidade permitem classificar se o chip atende às especificações para ser utilizado em bebidas carbonatadas ou para outros tipos de bebidas, como a água, por exemplo

Assim e como resultado para a aplicação do PET para embalagens sopradas (garrafas) requer um polímero com peso molecular acima de 30.000 (Índice de Viscosidade (IV) superior a 0,74 dl/g, que é o caso da empresa Alpek Polyester Brasil, com IV acima disso, com a faixa de especificação de 0,82 a 0,86 dl/g), o que não é possível se obter apenas com o processo de policondensação. Logo, para adequar o PET a essas aplicações uma etapa adicional a polimerização foi

introduzida conhecida como polimerização em estado sólido ou pós condensação (Boletim de Tecnologias de Desenvolvimento de Embalagens). A influência das massas molares grandes para o Poli(etileno tereftalato) é muito alta e quanto maior a massa molar do polímero, maior a resistência ao “stress cracking”, maior a resistência ao impacto, maior a resistência à abrasão, maior a resistência a dificuldade de processabilidade, maior a resistência à resistência do fundido, maior a viscosidade do fundido, maior a resistência à tração.

5. CONCLUSÃO:

Após as análises dos parâmetros de qualidade de índice de viscosidade, cor e do gás acetaldeído foi demonstrado que o poli(estireno tereftalato) produzido na indústria está de fato apto para receber bebidas carbonatadas com eficiência.

E os chips cristalinos que não fazem parte dos limites estabelecidos não devem ser vendidos ou serão vendidos a preços mais baixos como produtos off, já que não atendem aos parâmetros de qualidade, podendo com isso gerar um maior gasto para a empresa que irá comprar o PET para posterior transformação em garrafa plástica.

Assim, devido a forma que é produzido, o PET fabricado nas indústrias confere ao consumidor um produto mais acessível e higiênico para todo tipo de classe econômica, com o produto moderno e de qualidade, dentro dos parâmetros de qualidade estabelecidos conforme a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (Anvisa,2022) que vai desde os chips PET produzido até a garrafa plástica finalizada e pronta para receber o gás carbônico.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMBALAGEM. **Estudo macroeconomico da Embalagem e Cadeia de Consumo.** Disponível em: <https://www.abre.org.br/dados-do-setor/2022-2>. Acesso em: 01 de julho de 2023.

AKCELRUD, Leni. **Fundamentos da ciência dos polímeros.** [S.l.]: Editora Manole Ltda, 2007.

BASTOS, Heliane Bettune. **Avaliação de Sistemas de Fechamento para Embalagens de Polietileno Terfetalato (PET) na Retenção de CO₂.** 2006. Disponível em:

< file:///C:/Users/trayanne/Downloads/bastos_helianeбетune_m.pdf >.

Acesso em: 2 de julho de 2023.

BRASIL PACK TRENDS 2020. **As Tendências de Embalagens.** Disponível em: < <https://ital.agricultura.sp.gov.br/brasilpacktrends/br/70/> >. Acesso em: 01 de julho de 2023.

BARROS, Adriana de Fátima. **Preparação, caracterização físico-química e avaliação do comportamento térmico mecânico de blendas de poli(tereftalato de etileno) (pet) e poli(éterimida) (PEI), PET/PEI,** 2004.

BENEFÍCIOS DA EMBALAGEM PET. **Os benefícios das garrafas, frascos e outras embalagens de PET.** Disponível em: <https://abipet.org.br/beneficios-da-embalagem-pet/> .Acesso em: 01 de julho de 2023.

CANEVAROLO, Sebastião Junior. **Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros.** São Paulo: Artliber Editora,2013.

CEMPRE – **Compromisso Empresarial para a Reciclagem.** Ficha Técnica 3. CEMPRE, São Paulo, 1997a.

CHANDA,MANAS. **Plastics technology handbook.**Fifth edition. Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis,2018.

POP Interno sobre a fabricação do PET da empresa Alpeck Políester Brasil, PE-PTA-LAB-2-003.Determinação de Cor L* a* b* em Poliestireno Tereftalato,2016

POP Interno sobre a fabricação do PET da empresa Alpeck Políester Brasil, PE-PTA-LAB-2-005, Determinação de Acetaldeído em Cromatografia Gasosa, 2016.

POP Interno sobre a fabricação do PET da empresa Alpeck Políester Brasil, PE-PTA-LAB-2-020, Determinação do Índice de Viscosidade Intrínseca no chip PET no Lauda, 2016

POP Interno sobre a fabricação do PET da empresa Alpeck Políester Brasil, Fundamentos da Garrafa PET em 4 estágios, 2016.

FEITOR, M.; JUNIOR, C.; BEZERRA, C.; SOUSA, R.; COSTA, T. **Evaluation of aging in air of poly (ethylene terephthalat) in oxygen plasma**. Mat. Res. v.18, no.5. São Carlos, Brasil. Outubro, 2015

GARCIA, ELOÍSA E C. **Você conhece o lado químico do PET?** Boletim de Tecnologia e Desenvolvimento de Embalagens, Instituto de Tecnologia de Alimentos (ITAL). Julho/Agosto de 1997.

ISOLDY, ANA BEATRIZ GOLDOY. **Estudo do efeito da dose de radioesterilização sobre as propriedades do Poli(Tereftalato de Etileno)-PET reciclado**, São Paulo, 2003.

LOKENS GARD, ERICK. **Plásticos Industriais Teoria e Aplicações**. 5a edição. ed. [S.l.]: São Paulo - Cengage Learning, 2013.

MEDEIROS, IGOR LEAL DE. **Análise das propriedades mecânicas, caracterização e reciclagem de polietileno tereftalato (PET) provenientes de garrafas de refrigerante e água pós-consumo**. João Pessoa, 2019.

PLÁSTICO INDUSTRIAL; **Industria do PET segue em crescimento**; Disponível em:

<<https://www.arandanet.com.br/revista/pi/noticia/5974-Industria-do-PET-segue-em-crescimento>>. Acesso em: 02 de julho de 2023.

POLI(TERFETALATO DE ETILENO) PET, **Uma revisão sobre os processos de síntese, mecanismos de degradação e sua reciclagem**. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/po/a/M977rShFktsW4DpHbqk6KYN/?format=pdf&lang=pt>>. Acesso em: 01 de setembro de 2023.

RABELLO, MARCELO SILVEIRA. **Aditivação de termoplásticos**. São Paulo: Altliber Editora, 2013.

RABELLO, M.; WELLEN, R. **Estudo da cristalização a frio do poli (tereftalato de etileno)(PET) para produção de embalagens**. Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v. 3, n. 2, p. 01-09, 2008.

Silva Filho, Jorge Ferreira da. **Estudo de parâmetros de síntese do gel termossensível Poli(N-isopropilacrilamida)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) — Universidade Federal de Minas Gerais, 2005.

MILES, D.C. **Tecnologia dos polímeros**. São Paulo: Polígono S.A, 1975. Disponível em:

Poli (Tereftalato de Etileno) (PET): <<https://www.tudosobreplasticos.com/materiais/pet.asp>>. Acesso em: 04 de outubro de 2023.

PRIMOTÉCNICA, MECÂNICA E ELETRICIDADE LTDA.: **Extrusora de plástico**. Disponível em: <<https://primotecnica.com.br/info/extrusora-plastico.php>>. Acesso em: 01 de setembro de 2023.

REVISTA. **Produção industrial & serviços**. Disponível em: <<file:///C:/Users/thaly/Downloads/52431-Texto%20do%20artigo-751375191136-2-10-20200221.pdf>>. Acesso em: 04 de julho de 2023.

SMITH, CLEBERSON. **Estudo da Cadeia Produtiva do PET- Polietileno Tereftalato com ênfase no estado de Pernambuco**. Disponível em: <<https://clebson-smith.webnode.page/news/cadeia-produtiva-do-pet-polietileno-tereftalato-no-estado-de-pernambuco/>>. Acesso em: 01 de setembro de 2023.

TEIXEIRA, M.; CIRINO, C.; LINO, D. **A indústria de transformados plásticos**. 1ª edição ed. São Paulo: Sindicato dos Químicos de São Paulo, 2017. v. 2

WELLEN, R.; RABELLO, M. **Redução da velocidade de cristalização a frio do PET na presença de poliestireno**. Polímeros, v. 17, p. 113-122, 2007.

PTA , Disponível em:<<https://alpekpolyester.com.br/produtos/pta/>>. Acesso em: 28 de agosto de 2023.