



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA NATUREZA
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM QUÍMICA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**ANÁLISE DA VIABILIDADE DO USO DE RESINA PET
RECICLADA EM EMBALAGENS ALIMENTÍCIAS POR
MEIO DE PARÂMETROS ANALÍTICOS**

JOSÉ MARCOS BEZERRA DA SILVA JUNIOR

João Pessoa – PB – Brasil

Abril/2025

SAPIENTIA AEDIFICAT

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA NATUREZA
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM QUÍMICA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ANÁLISE DA VIABILIDADE DO USO DE RESINA PET RECICLADA EM EMBALAGENS ALIMENTÍCIAS POR MEIO DE PARÂMETROS ANALÍTICOS

José Marcos Bezerra da Silva Junior

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Química da Universidade Federal da Paraíba como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Química, área de concentração Química Analítica.

Orientadora: Prof^a. Dra. Renate Maria Ramos Wellen

**João Pessoa – PB – Brasil
Abril/2025**



ORIENTADORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM QUÍMICA
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA

Ata da Sessão Pública para avaliar o Trabalho de Dissertação de Mestrado do discente **José Marcos Bezerra da Silva Júnior**, submetido à obtenção do grau de Mestre em Química – **Área de Concentração em Química Analítica**, deste Programa de Pós-Graduação em Química, do CCEN/UFPB.

Aos vinte e cinco dias do mês de abril do ano de dois mil e vinte e cinco, às quinze horas, reuniram-se em cerimônia pública em modo de webconferência <https://meet.google.com/xqh-jvvo-uro> do Departamento de Química do Centro de Ciências Exatas e da Natureza da Universidade Federal da Paraíba, em João Pessoa-PB divulgado amplamente por e-mail e no SIGAA/UFPB, os membros da comissão constituída na forma e termos do Artigo 82º do Regulamento Geral dos Programas de Pós-Graduação *Stricto Sensu* da Universidade Federal da Paraíba, composta pelos professores: **Dra. Renate Maria Ramos Wellen**, Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências Exatas e da Natureza, do Departamento de Química, João Pessoa-PB, Orientadora e Presidente da Banca Examinadora; **Dr. Pankaj Agrawal**, Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, Departamento de Engenharia de Materiais, Campina Grande-PB, Examinador externo; **Dra. Nataly Albuquerque dos Santos**, da Universidade Federal da Paraíba, Centro de Tecnologia e Desenvolvimento Regional, do Departamento de Tecnologia de Alimentos, João Pessoa-PB, Examinadora interna, a fim de examinarem o discente **José Marcos Bezerra da Silva Júnior** ao grau de Mestre em Química, **área de concentração em Química Analítica**. Além dos examinadores e do examinado, compareceram também, representantes do corpo docente e do corpo discente. Iniciando a sessão, a **Profa. Dra. Renate Maria Ramos Wellen**, na qualidade de Presidente da referida banca, comunicou aos presentes qual o fim da reunião e os procedimentos de encaminhamentos da mesma. A seguir, concedeu a palavra ao discente para que fizesse oralmente a apresentação do seu trabalho de dissertação de mestrado, sob o título **“Análise da viabilidade do uso de resina PET reciclada em embalagens alimentícias por meio de parâmetros analíticos, considerando diferentes proporções (%) de PET reciclado em virgem nas formas amorfa e semicristalina”**. Concluída a apresentação, a senhora presidente solicitou que fosse feita a arguição por cada um dos examinadores. Após o que, foi concedida a palavra ao discente para que respondesse e esclarecesse as questões levantadas. Terminadas as arguições, a Banca Examinadora passou a proceder à avaliação e julgamento do discente. Em seguida, a senhora presidente declarou que a Banca Examinadora considerou, segundo o Artigo 83º do Regulamento Geral dos Programas de Pós-Graduação *Stricto Sensu*, da Universidade Federal da Paraíba, **Aprovada**, a dissertação apresentada e defendida pelo discente **José Marcos Bezerra da Silva Júnior**, concedendo-lhe, assim, o grau de **Mestre em Química, área de concentração em Química Analítica**. Logo após a avaliação da comissão julgadora, a orientadora preencherá um formulário juntamente com o Relatório Final de Dissertação de Mestrado, a fim de seja homologado pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Química. E, para constar a **Profa. Dra. Renate Maria Ramos Wellen**, lavrou a presente Ata, que assina junto com os membros da Banca Examinadora. João Pessoa, 25 de abril de 2025. E, segue com as assinaturas de:

Documento assinado digitalmente
gov.br RENATE MARIA RAMOS WELLEN
Data: 30/04/2025 08:24:33-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Profa. Dra. Renate Maria Ramos Wellen
Orientadora/Presidente

Documento assinado digitalmente
gov.br PANKAJ AGRAWAL
Data: 30/04/2025 09:39:04-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. Pankaj Agrawal
Examinador externo

Documento assinado digitalmente
gov.br NATALY ALBUQUERQUE DOS SANTOS
Data: 30/04/2025 10:07:27-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Profa. Dra. Nataly Albuquerque dos Santos
Examinadora interna

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

S586a Silva Junior, José Marcos Bezerra da.

Análise da viabilidade do uso de resina pet
reciclada em embalagens alimentícias por meio de
parâmetros analíticos / José Marcos Bezerra da Silva
Junior. - João Pessoa, 2025.

124 f. : il.

Orientação: Renate Maria Ramos Wellen.
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CCEN.

1. Plásticos - Reciclagem. 2. Reciclagem energética.
3. Resina PET - Viabilidade de produção. 4. Testes
Analíticos. 5. Limoneno. I. Wellen, Renate Maria Ramos.
II. Título.

UFPB/BC

CDU 678.5:502.174.1(043)

ANÁLISE DA VIABILIDADE DO USO DE RESINA PET RECICLADA EM EMBALAGENS ALIMENTÍCIAS POR MEIO DE PARÂMETROS ANALÍTICOS

JOSÉ MARCOS BEZERRA DA SILVA JUNIOR

Apresentado perante a Banca Examinadora composta pelos Professores:

Prof.^a Dra. Renate Maria Ramos Wellen - UFPB

Presidente orientador

Prof. Dra. Antônia Lúcia da Silva - UFPB

Membro Interno

Prof. Dr. Pankaj Agrawal - UFPB

Membro Externo

João Pessoa – PB – Brasil
Abril/2025

Dedico esta dissertação ao meu Deus, que pela sua graça e misericórdia me concedeu esse privilégio, aos meus pais, minha esposa e sogra, meus amigos próximos e do trabalho, sem vocês eu não teria conseguido concluir essa etapa da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Ao meu Deus, que me motivou ano após anos para finalizar esse mestrado e sem a sua Dele ajuda jamais conseguiria.

À meus Pais, por todo investimento, apoio de terem sonhado comigo até esse grande dia de conclusão deste mestrado.

À minha esposa e a minha sogra, vocês são um presente de Deus na minha vida e obrigado por ter me ajudado a chegar até esse momento.

Ao meu amigo de mestrado Helton Gouveia, pelo seu companheirismo e motivação nos percursos de ida e vinda para o mestrado, motivando um ao outro.

A instituição UFPB, a minha orientadora, Dr(a) Prof.(a) Renate Wellen, pela sua disponibilidade e ajuda na conclusão desse mestrado.

Aos meus mestres professores da UFPB.

Aos meus amigos da Empresa, John Green, Jonas Pelegrino, Lauro Araripe, Pedro Araripe, Aliana Fialho, Viviane Oliveira e Thais Mota por terem contribuído com informações, resultados analíticos e incentivo sem igual.

E a todos que ao longo dessa jornada que estiveram comigo nessa longa, porém finalizada caminhada.

“Deus nunca frustra aqueles que confiam nele”

Marcos Junior

ANÁLISE DA VIABILIDADE DO USO DE RESINA PET RECICLADA EM EMBALAGENS ALIMENTÍCIAS POR MEIO DE PARÂMETROS ANALÍTICOS, CONSIDERANDO DIFERENTES PROPORÇÕES (%) DE PET RECICLADO EM VIRGEM NAS FORMAS AMORFA E SEMICRISTALINA

RESUMO

A reciclagem de embalagens plásticas para alimentos representa um grande desafio, exigindo a adequação de processos de polimerização na fase fundida (CP) e sólida (SSP), legislações como as RDC N. 20/2008 e RDC N. 95/2001 e as técnicas de processos de reciclagem energética, química e mecânica para otimizar o uso de energia e matérias-primas na fabricação dessas embalagens. Além disso, alguns parâmetros analíticos, como a presença de acetaldeído e limoneno – contaminantes que podem migrar para o produto armazenado e gerar alterações de sabor na água mineral e bebidas carbonatadas – podem comprometer a viabilidade do processo. Este estudo teve como objetivo comparar diferentes proporções m/m% (0%, 5%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60% e 100%) de resinas PET Pós Consumo Reciclado (amorfo e semicristalino) em resinas PET virgem (amorfo e semicristalino) utilizando metodologias analíticas para avaliar a viabilidade dessas proporções. A resina PET virgem serviu como referência para comparação, e, à medida que foram adicionadas proporções m/m% de PET PCR, análises críticas experimentais foram realizadas para verificar a viabilidade do material, garantindo que as especificações de qualidade do produto não fossem comprometidas por meio de intervenções operacionais no processo produtivo. Constatou-se que as proporções em massa de 0%, 5% e 10% apresentaram desempenho altamente satisfatório, com praticamente 100% dos resultados situando-se dentro dos limites de especificação estabelecidos. As proporções de 20% a 30% demonstraram um desempenho intermediário, sendo necessários apenas ajustes pontuais nos parâmetros do processo para assegurar a conformidade. Por outro lado, as proporções entre 40% e 100% exigem intervenções mais substanciais nas variáveis do processo, com o intuito de atender integralmente aos critérios de especificação. Em suma, de acordo com os dados da ABIPET (2022), as proporções de 10% e 20% m/m de PET PCR, têm se destacado como pontos de referências relevantes, pois estão sendo as mais aceitas pelo mercado, fomentando a viabilidade de produção da resina PET PCR em mistura com resina PET virgem, embora que a proporção ideal – que pode chegar até 100% – dependerá além dos parâmetros de qualidade, de fatores como disponibilidade da matéria-prima e estratégias de mercado.

.

Palavras-chave: Reciclagem. Plásticos. Viabilidade. Testes Analíticos. Contaminantes. Limoneno.

ANALYSIS OF THE FEASIBILITY OF USING RECYCLED PET RESIN IN FOOD PACKAGING BY MEANS OF ANALYTICAL PARAMETERS, CONSIDERING DIFFERENT PROPORTIONS (%) OF RECYCLED PET TO VIRGIN IN AMORPHOUS AND SEMI-CRYSTALLINE FORMS

ABSTRACT

The recycling of plastic food packaging represents a major challenge, requiring the adaptation of polymerization processes in the melt phase (CP) and solid phase (SSP), legislation such as RDC N. 20/2008 and RDC N. 95/2001 and the techniques of energy, chemical and mechanical recycling processes to optimize the use of energy and raw materials in the manufacture of this packaging. In addition, some analytical parameters, such as the presence of acetaldehyde and limonene - contaminants that can migrate to the stored product and generate flavor changes in mineral water and carbonated drinks - can compromise the viability of the process. The aim of this study was to compare different m/m% ratios (0%, 5%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60% and 100%) of Recycled Post-Consumer PET resins (amorphous and semi-crystalline) with virgin PET resins (amorphous and semi-crystalline) using analytical methodologies to assess the viability of these ratios. Virgin PET resin served as a reference for comparison and, as m/m% proportions of PET PCR were added, critical experimental analyses were carried out to verify the viability of the material, ensuring that the product's quality specifications were not compromised by operational interventions in the production process. It can be seen that the mass proportions of 0%, 5% and 10% performed highly satisfactorily, with practically 100% of the results falling within the established specification limits. The proportions of 20% to 30% showed intermediate performance, requiring only occasional adjustments to the process parameters to ensure compliance. On the other hand, proportions between 40% and 100% require more substantial interventions in the process variables in order to fully meet the specification criteria. In short, according to data from ABIPET (2022), the proportions of 10% and 20% m/m of PET PCR have stood out as relevant reference points, as they are being the most accepted by the market, encouraging the feasibility of producing PET PCR resin in a mixture with virgin PET resin, although the ideal proportion - which can reach up to 100% - will depend not only on quality parameters, but also on factors such as raw material availability and market strategies.

Keywords: Recycling. Plastics. Viability. Analytical tests. Contaminants. Limonene.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura molecular do Polietileno Tereftalato (PET).....	23
Figura 2 - Reação de esterificação do ácido tereftálico (PTA) e monoetilenoglicol (MEG).	23
Figura 3 - Polímero do estado Fundido para Sólido.....	25
Figura 4 - Polimerização Contínua (CP). Base tecnológica do projeto.....	26
Figura 5 - Polimerização na fase sólida (SSP).	27
Figura 6 - 12º censo: evolução da reciclagem de PET no Brasil.	31
Figura 7 - População atendida pelo serviço de coleta seletiva nos municípios consultados.	32
Figura 8 - Aplicação do PET reciclado.	36
Figura 9 – Origem e venda da matéria prima.	36
Figura 10 - Fluxograma da Reciclagem do PET no Brasil.....	37
Figura 11 - Fluxograma do processo de reciclagem mecânica.....	38
Figura 12 – Principais processos internos e armazenamentos da Unidade de Reciclagem e Sistemas de Produto modelados por agrupamento de etapas do processo: a) da garrafa ao flake; b) de flakes a PET-PCR; c) do flakes a fibra reciclada do poliéster.	40
Figura 13 - Reação de degradação de grupos terminais hidroxietila durante a fusão e transformação de resinas de PET em embalagens.	42
Figura 14 - Modelo de coordenadas colorimétricas CIELab.....	43
Figura 15 - Termograma obtido em DSC dos principais intervalos de temperatura do PET.....	45
Figura 16 - Tela de leitura do Software do equipamento Sorter Optico.	47
Figura 17 - Estrutura molecular do limoneno com as duas formas isoméricas.	49
Figura 18 - Modelo esquemático de uma máquina injetora.	51
Figura 19 - Área de estudo.	53
Figura 20 – a) Misturas de PET amorfo Virgem x PET amorfo PCR e b) Misturas de PET semicristalino Virgem x PET semicristalino PCR.....	54
Figura 21 – a) Misturas moídas de PET amorfo Virgem x PET amorfo PCR e b) Misturas moídas de PET semicristalino Virgem x PET semicristalino PCR.	55
Figura 22 - Ponto de fusão e cristalinidade. Termogramas comparativos entre PET amorfo virgem e PET amorfo PCR.....	62
Figura 23 - Ponto de fusão e cristalinidade. Termogramas comparativos entre PET semicristalino virgem e PET semicristalino PCR.	63
Figura 24 - Gráfico dos resultados de Viscosidade PET amorfo Virgem x PET amorfo PCR.	70
Figura 25 - Gráfico dos resultados de Cor L* PET amorfo Virgem x PET amorfo PCR.	72
Figura 26 - Gráfico dos resultados de Cor a* PET amorfo Virgem x PET amorfo PCR.....	73
Figura 27 - Gráfico dos resultados de Cor b* PET amorfo Virgem x PET amorfo PCR.....	74
Figura 28 - Gráfico dos resultados de acetaldeído PET amorfo Virgem x PET amorfo PCR.	75

Figura 29 - Gráfico dos resultados de Ponto de Fusão de PET amorfo Virgem x PET amorfo PCR. ..	76
Figura 30 - Gráfico dos resultados de cristalinidade de PET amorfo Virgem x PET amorfo PCR.	79
Figura 31 - Gráfico dos resultados de Limoneno de PET amorfo Virgem x PET amorfo PCR.	80
Figura 32 - Gráfico dos resultados de Umidade PET amorfo Virgem x PET amorfo PCR.	81
Figura 33 - Gráfico dos resultados de Viscosidade PET semicristalino Virgem x PET semicristalino PCR.	84
Figura 34 - Gráfico dos resultados de Cor L* PET semicristalino Virgem x PET semicristalino PCR.	86
Figura 35 - Gráfico dos resultados de Cor a* PET semicristalino Virgem x PET semicristalino PCR.	87
Figura 36 - Gráfico dos resultados de Cor b* PET semicristalino Virgem x PET semicristalino PCR.	89
Figura 37 - Gráfico dos resultados de acetaldeído PET semicristalino Virgem x PET semicristalino PCR.	90
Figura 38 - Gráfico dos resultados de Ponto de Fusão de PET semicristalino Virgem x PET semicristalino PCR.	92
Figura 39 - Gráfico dos resultados de cristalinidade de PET semicristalino Virgem x PET semicristalino PCR.	93
Figura 40 - Gráfico dos resultados de limoneno de PET semicristalino Virgem x PET semicristalino PCR.	95
Figura 41 - Gráfico dos resultados de Umidade PET semicristalino Virgem x PET semicristalino PCR.	96
Figura 42 - Gráfico dos resultados de Minidisco Cor L* PET semicristalino Virgem x PET semicristalino PCR.	98
Figura 43 - Gráfico dos resultados de Minidisco Cor a* PET semicristalino Virgem x PET semicristalino PCR.	99
Figura 44 - Gráfico dos resultados de Minidisco Cor b* PET semicristalino Virgem x PET semicristalino PCR.	100
Figura 45 - Gráfico dos resultados de Minidisco Cor Haze PET semicristalino Virgem x PET semicristalino PCR.	101
Figura 46 - Minidisco de PET semicristalino Virgem x PET semicristalino PCR.	102
Figura 47 - Minidisco de PET semicristalino Virgem x PET semicristalino PCR com presença de ponto preto.	103
Figura 48 - Minidisco de PET semicristalino Virgem x PET semicristalino PCR visualizado no estéreo microscópio.	104
Figura 49 - Imagem dos chips PET semicristalino PCR no Sorter Optico.	104
Figura 50 - Fluxograma de liberação de produção de PET Virgem ou PCR para embalagens em Contato com Alimentos.	120

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Metodologias e equipamentos utilizados.....	56
Tabela 2 – Limite de Especificação de Viscosidade.....	58
Tabela 3 – Limite de Especificação de Cor L*a*b*	59
Tabela 4 – Limite de Especificação de Acetaldeído.	61
Tabela 5 – Limites de Especificações de Ponto de Fusão e Cristalinidade.....	62
Tabela 6 – Limite de Especificação de Limoneno.	64
Tabela 7 – Limite de Especificação de Umidade.	64
Tabela 8 – Limite de Especificação de Minidisco Cor L*a*b* Haze	65
Tabela 9 - Média das triplicatas dos resultados analíticos PET amorfo Virgem x PET amorfo PCR. .	69
Tabela 10 – Dados comparativos de ponto de fusão entre resinas de diferentes estudos.....	77
Tabela 11 – Dados comparativos de cristalinidade entre resinas de diferentes estudos.....	79
Tabela 12 - Média das triplicatas dos resultados analíticos PET semicristalino Virgem x PET semicristalino PCR.....	83
Tabela 13 – Parâmetros analíticos de ponto de fusão e cristalinidade entre PET amorfo virgem e PET amorfo PCR.....	110
Tabela 14 – Parâmetros analíticos de ponto de fusão e cristalinidade entre PET semicristalino virgem e PET semicristalino PCR.....	111
Tabela 15 – Resultados em triplicata com relação aos parâmetros analíticos da resina PET Amorfo Virgem e PCR.	112
Tabela 16 – Resultados em triplicata com relação aos parâmetros analíticos da resina PET Semicristalina Virgem e PCR.	113
Tabela 17 - Cronograma de atividade	114
Tabela 18 - Parâmetros analíticos e suas concentrações - PET amorfo Virgem X PET amorfo PCR.	115
Tabela 19 - Parâmetros analíticos e suas concentrações - PET semicristalino Virgem X PET semicristalino PCR.....	116
Tabela 20 - Massas utilizadas nas proporções PET amorfo Virgem X PET amorfo PCR.....	117
Tabela 21 - Massas utilizadas nas proporções PET semicristalino Virgem X PET semicristalino PCR	118
Tabela 22 - Cor e Haze de diferentes garrafas de tereftalato de polietileno (PET) feitas com diferentes graus reciclados pós-consumo (PCR).	119

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABRELPE – Associação Brasileira de Limpeza Pública e Resíduos Especiais.

ABIPET – Associação Brasileira da Indústria do PET.

ANVISA – Agência Nacional de Vigilância Sanitária.

BG – Grau Garrafa.

DGT - Dietileno Glicol Tereftalato

DHET – Dihidroxietileno Tereftalato.

DSC – Calorimetria Exploratória Diferencial.

EG – Etilenoglicol.

FDA – Food and Drug Administration.

MEG – Monoetilenoglicol.

PCR – Pós-Consumo Reciclado.

PET– Polietileno Tereftalato.

PVC – Policloreto de Vinila.

PTA – Ácido Tereftálico Puro

RSUs – Resíduos Sólidos Urbanos.

SNIS - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento.

UNEA – Assembléia das Nações Unidas para o Meio Ambiente.

WWF– Fundo Mundial para a Natureza (Traduzido).

LSE – Limite Superior de Especificação.

LIE – Limite Inferior de Especificação.

SUMÁRIO

Capítulo I : INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	17
1.1 CARACTERIZAÇÃO DA PROBLEMÁTICA.....	18
1.2 OBJETIVOS	21
1.2.1 Objetivo Geral	21
1.2.2 Objetivos Específicos	21
Capítulo II : FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
2.1. PET (POLIETILENO TEREF TALATO).	23
2.2. PROCESSO DE PRODUÇÃO DO POLIETILENO TEREF TALATO.....	25
2.2.1. Química do PET.....	25
2.2.2. Processo produtivo.....	26
2.2.2.1 Polimerização Contínua – CP.....	26
2.2.2.2 Polimerização na Fase Sólida – SSP	27
2.3. PET pós consumo (PET-PCR)	29
2.4. RESÍDUOS SÓLIDOS – DEFINIÇÃO, CLASSIFICAÇÃO e DESTINAÇÃO FINAL DOS RESÍDUOS	31
2.5. COLETA SELETIVA.....	32
2.6. RECICLAGEM – DEFINIÇÃO e BENEFÍCIOS.....	33
2.7. O processo de Reciclagem.....	36
2.8. TECNOLOGIAS NOS PROCESSOS INDUSTRIAIS.....	38
2.9. DEFINIÇÃO E PRINCIPAIS PARÂMETROS ANALÍTICOS CARACTERÍSTICOS DAS EMBALAGENS PARA ALIMENTOS.	41
2.9.1. Viscosidade Intrínseca.	41
2.9.2. Acetaldeído	41
2.9.3. cor $L^*a^*b^*$	42
2.9.4. Ponto de Fusão e Cristalinidade.....	43
2.9.5. Umidade.....	45
2.9.6. Minidisco Cor $L^*a^*b^*$ Haze	46
2.9.7. Sorter Optico.....	46
2.10. Contaminantes do PET e seus efeitos.	47

2.11. Limoneno: um dos principais contaminantes dos processos de pré-formas e envase.....	48
2.12. PROCESSOS DE PRÉ-FORMAS E ENVASE	49
Capítulo III : METODOLOGIA.....	52
3.1. Área de estudo	53
3.2. Coleta de dados.....	53
3.2.1. Coleta das Amostras de PET	54
3.2.2. Reagentes, Materiais e Procedimentos.	56
3.2.1.1. Viscosidade Intrínseca.	56
3.2.1.2. Cor $L^*a^*b^*$	58
3.2.1.3. Acetaldeído.....	59
3.2.1.4. Ponto de Fusão e Cristalinidade.....	61
3.2.1.5. Limoneno.....	63
3.2.1.6. Umidade.	64
3.2.1.7. Minidisco Cor $L^*a^*b^*$ Haze.	64
3.2.1.7.1. Mini injetora.	65
3.2.1.7.2. Cor $L^*a^*b^*$ Haze	66
3.2.1.8. Sorter Optico.	66
3.3. Análise de dados	67
Capítulo IV : RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	68
4.1. resultados PET AMORFO VIRGEM X PET AMORFO PCR.....	69
4.1.1. Análises dos parametros analíticos AMORFO VIRGEM X PET AMORFO PCR ..	69
4.1.1.1. Viscosidade Intrínseca.	69
4.1.1.2. Cor $L^*a^*b^*$	71
4.1.1.3. Acetaldeído.....	74
4.1.1.4. Ponto de Fusão.....	76
4.1.1.5. Cristalinidade.....	78
4.1.1.6. Limoneno.....	80
4.1.1.7. Umidade	81
4.2. resultados PET semiCRISTALINO VIRGEM X PET semiCRISTALINO PCR.....	83

4.2.1. Análises dos parametros ANÁLITICOS PET SEMICRISTALINO VIRGEM X PET SEMICRISTALINO PCR.	84
4.2.1.1. Viscosidade Intrínseca	84
4.2.1.2. Cor $L^*a^*b^*$	85
4.2.1.3. Acetaldeído.....	90
4.2.1.4. Ponto de Fusão.....	92
4.2.1.5. Cristalinidade.....	93
4.2.1.6. Limoneno	94
4.2.1.7. Umidade	96
4.2.1.8. Minidisco Cor $L^*a^*b^*$ Haze	97
4.2.1.9. Sorter Optico	104
Capítulo V : CONCLUSÃO	105
PERSPECTIVAS.....	108
APÊNDICE	110
ANEXOS	119
REFERÊNCIAS	121

CAPÍTULO I : INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

1.1 CARACTERIZAÇÃO DA PROBLEMÁTICA

É notório o crescimento do uso de embalagens plásticas no mundo, mais especificamente no Brasil, pois as pessoas desejam, a cada dia, embalagens mais confiáveis para armazenar alimentos, e essas embalagens possuem propriedades mecânicas e químicas que atendem a essa necessidade. Entretanto, o resíduo gerado por elas é alarmante, pois, segundo o Associação Brasileira de Resíduo e Meio Ambiente (ABREMA), em seu relatório “Manejo de resíduos no Brasil”, divulgado em 2023, o Brasil destinou inadequadamente impressionantes 33,3 milhões de toneladas de lixo, sendo que 27,9 milhões foram parar em lixões a céu aberto (ABREMA, et al., 2023) e os dados do último diagnóstico de Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos do Brasil realizado em 2022 (ABRASMA, 2024) revelam que o país gera mais de 80 milhões de toneladas de lixo todos os anos e recicla menos de 4%.

Os rejeitos produzidos causam impactos quando são eliminados de maneira inadequada ou na ausência da coleta seletiva, sendo encaminhados para aterros sanitários e apresentando um tempo de decomposição de aproximadamente 100 anos, variando conforme as condições do ambiente, o que resulta em sérios danos ao meio ambiente (ISWA, 2022).

Nesse sentido, é fundamental analisar a composição dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSUs), assim como sua geração e coleta, para compreender como esses resíduos estão distribuídos e identificar onde os plásticos — especialmente as embalagens — estão presentes. Segundo o estudo realizado pela Associação Brasileira de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), no panorama dos resíduos sólidos no Brasil em 2017, observou-se uma geração da ordem de 215 ton/dia e uma coleta de 196 ton/dia, implicando em 91% de resíduos coletados em relação aos gerados. Desses resíduos coletados, cerca de 20% são constituídos de plásticos em massa, e desses 20%, 32% correspondem a embalagens alimentícias (ISWA, 2022).

Tomando essa perspectiva, tem-se um mercado promissor devido ao grande percentual de embalagens alimentícias que poderão ser recicladas e fechar o ciclo de vida útil, agregando valor, pois as resinas enviadas para a indústria de alimentos têm maior valor agregado (PICPLAT, 2020).

No uso de embalagens plásticas para alimentos, destaca-se o PET — um polímero amplamente reconhecido e utilizado no setor, especialmente em embalagens de bebidas e alimentos. “O tereftalato de polietileno (PET) é considerado o plástico de embalagem de alimentos mais promissor para reciclagem e está sendo amplamente utilizado. Um dos motivos é sua capacidade de absorver contaminações pós-consumo em níveis mais baixos em

comparação com outros plásticos, como as poliolefinas, tornando-o mais adequado para o processo de reciclagem” (PINTER et al., 2021, p. 1). Embora sua reciclagem seja possível e tecnicamente aplicada, ainda são necessários estudos voltados ao desenvolvimento de novas tecnologias para tornar esse polímero ainda mais eficiente nesse processo. A reciclagem do PET teve um avanço significativo em 2008, quando a ANVISA (Agência Nacional de Vigilância Sanitária) emitiu uma resolução que estabeleceu o regulamento técnico para embalagens de PET reciclado pós-consumo, com grau alimentício, destinadas ao contato com alimentos (ANVISA, 2008). Essa medida representou uma grande abertura para o mercado de reciclagem de PET, que, desde então, tem apresentado uma tendência de crescimento contínuo. (YUAN et al., 2020).

O PET pós-consumo reciclado (PCR) surge como uma alternativa sustentável para o reaproveitamento de resíduos sólidos, por meio do processo de reciclagem. A incorporação de diferentes proporções de resinas PET PCR (nas formas amorfa e semicristalina) a resinas PET virgens (também amorfa e semicristalina), aliada à aplicação de metodologias analíticas voltadas à avaliação dos parâmetros de qualidade, permite a viabilização técnica desse processo. Um dos principais desafios relacionados à reciclagem de embalagens PET reside em demonstrar a eficácia e a segurança desse reaproveitamento, especialmente diante da presença de contaminantes originados durante o processamento, quando o material é destinado à indústria alimentícia. De acordo com Shen et al. (2025), entre esses contaminantes, destacam-se substâncias como o acetaldeído e o limoneno, que podem comprometer as características organolépticas dos alimentos, além de possibilitarem a migração de compostos indesejados para alimentos e bebidas. O acetaldeído, por exemplo, é gerado durante o processamento térmico de polímeros como o PET e está associado a efeitos tóxicos, incluindo irritações das vias respiratórias e potencial carcinogenicidade. O limoneno, por sua vez, frequentemente encontrado como resíduo de fragrâncias ou contaminante, pode provocar reações alérgicas e irritações, representando risco à saúde humana quando presente em concentrações elevadas, seja por ingestão ou inalação.

A presença desses compostos em materiais destinados ao contato com alimentos levanta questões relevantes acerca da segurança sanitária, tornando indispensável a implementação de medidas de controle rigorosas e regulamentações específicas, com o intuito de mitigar possíveis riscos à saúde pública. Entretanto, com o avanço de novas tecnologias voltadas à remoção de contaminantes, torna-se possível reduzir ou eliminar a presença dessas substâncias indesejáveis,

contribuindo para a segurança e a eficácia do uso do PET reciclado em aplicações de grau alimentício (YUAN et al., 2020).

Uma das principais contribuições deste trabalho reside na consolidação de uma ampla gama de parâmetros analíticos em um único estudo, permitindo uma abordagem comparativa sistemática e a identificação de tendências dentro de uma mesma amostra. Essa integração proporciona uma visão abrangente e coerente dos efeitos da incorporação progressiva de diferentes porcentagens de PET pós-consumo reciclado (PET PCR) em matriz de PET virgem. Além disso, destaca-se a inclusão de análises técnicas relevantes, mas ainda pouco exploradas na literatura acadêmica, como *Sorter óptico* e a avaliação de cor através de minidiscos realizados por uma mini injetora e uso da metodologia no sistema de coordenadas CIELAB ($L^*a^*b^*$). Nesse sentido, este estudo não apenas preenche lacunas existentes na pesquisa sobre materiais reciclados, como também oferece uma referência valiosa para futuros trabalhos na área de polímeros, sustentabilidade e engenharia de materiais.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Análise da viabilidade do uso de resina PET reciclada em embalagens alimentícias por meio de parâmetros analíticos, considerando diferentes proporções (%) de PET reciclado em virgem nas formas amorfa e semicristalina.

1.2.2 Objetivos Específicos

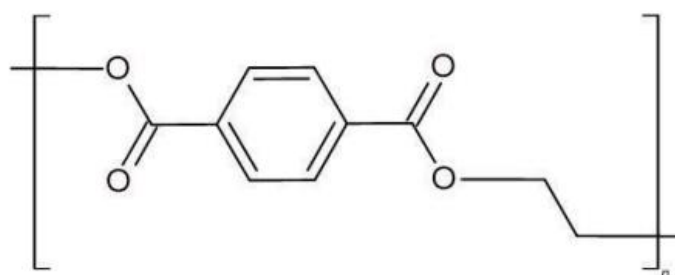
- Avaliar diferentes proporções percentuais de resina PET reciclada (nas formas amorfa e semicristalina) incorporadas ao PET virgem (também amorfo e semicristalino), identificando as combinações mais adequadas sob a ótica da qualidade final do produto.
- Investigar o comportamento dos parâmetros analíticos obtidos nas amostras, identificando tendências e propondo ajustes necessários para que os resultados atendam aos limites de especificação exigidos para embalagens alimentícias.
- Analisar as concentrações de contaminantes como limoneno e acetaldeído, nas diferentes proporções percentuais de resina PET reciclada (nas formas amorfa e semicristalina) incorporadas ao PET virgem (também amorfo e semicristalino), verificando seu impacto na viabilidade técnica e sanitária do uso de resina PET reciclada em embalagens para alimentos.

CAPÍTULO II : FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. PET (POLIETILENO TEREF TALATO).

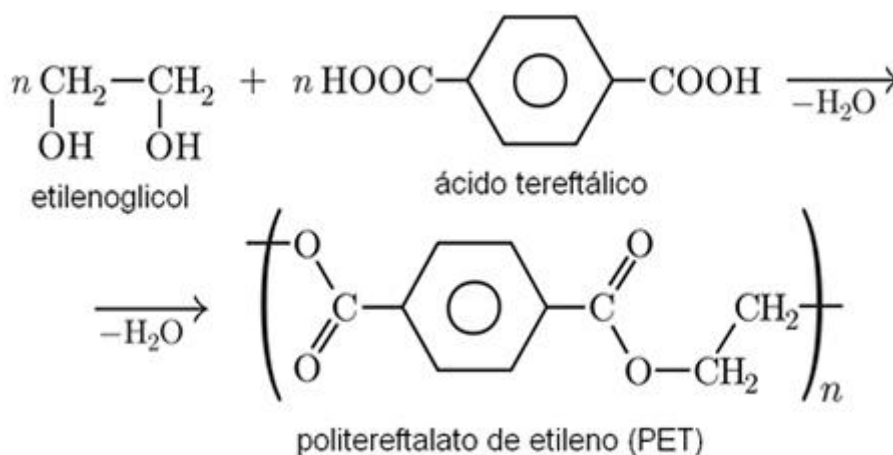
O Polietileno Tereftalato (PET), conforme ilustrado na Figura 1, é produzido a partir do ácido tereftálico (PTA) e do monoetilenoglicol (MEG) por meio da reação de esterificação, como mostrado na Figura 2. Esse processo gera o dietileno glicol tereftalato (DGT), que é um monômero fundamental para a formação do PET. A reação ocorre na presença de um catalisador e resulta na liberação de água (MARCELO; GOMES; MARANGONI JÚNIOR, 2025).

Figura 1 - Estrutura molecular do Polietileno Tereftalato (PET).



Fonte: WRIGHT, G. W. 1998.

Figura 2 - Reação de esterificação do ácido tereftálico (PTA) e monoetilenoglicol (MEG).



Fonte: WRIGHT, G. W. 1998.

O PET é um poliéster que se destaca por sua alta resistência mecânica e química, além de apresentar uma excelente barreira contra gases e odores. Por essas qualidades, a embalagem de PET tem se consolidado como a escolha ideal para a indústria de bebidas ao redor do mundo (PINTER et al., 2021).

O PET é uma embalagem de baixo custo, leve, resistente e reciclável, características que explicam sua ampla utilização pela indústria. Além disso, o PET é um termoplástico, o que significa que pode ser processado várias vezes. Ao ser aquecido, ele se funde e amolece, podendo ser novamente moldado conforme necessário (MACEDO et al., 2020).

O PET começou a ser utilizado na indústria têxtil globalmente, com seu uso no Brasil iniciado na década de 1960. A partir da década de 1970, passou a ser utilizado pela indústria de embalagens, e foi somente na década de 1990 que começou a ser adotado para a fabricação de embalagens para refrigerantes (MACEDO et al., 2020)

O PET pode se apresentar em dois estados físicos principais: amorfo e semicristalino, como ilustrado na Figura 3. Essa diferença depende das condições de processamento, como o resfriamento, e da estrutura interna das cadeias poliméricas do material (AFINKO, 2019).

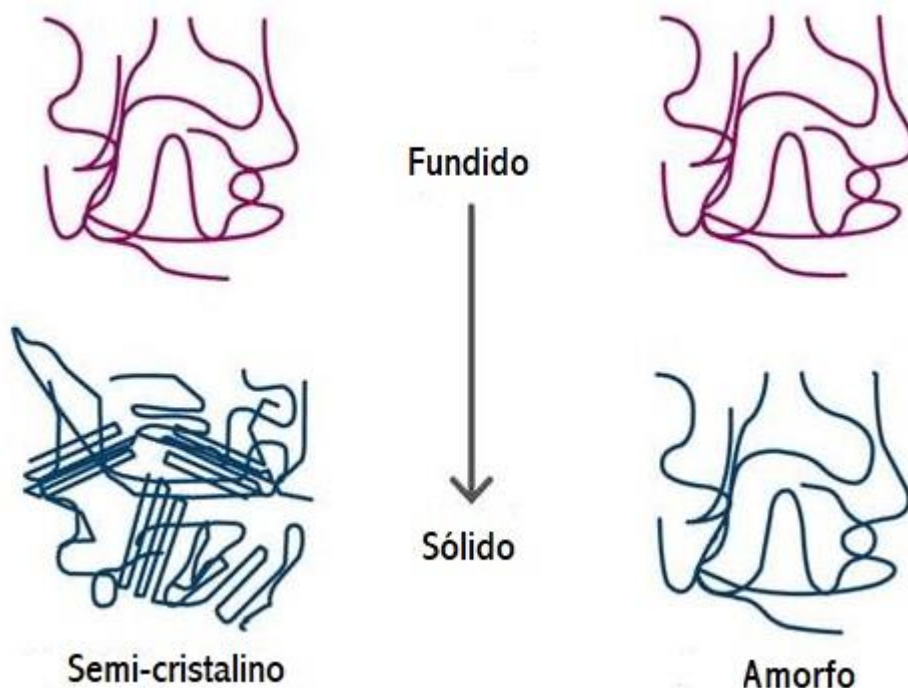
PET Amorfo

Estrutura: O material é composto por cadeias poliméricas desorganizadas, dispostas de forma aleatória, sem a presença de regiões cristalinas. Aparência: Apresenta-se transparente e com brilho. Propriedades: Possui menor rigidez e resistência térmica em comparação com outros materiais, sendo fácil de moldar e termoformar. No entanto, é mais suscetível a riscos e deformações (AFINKO, 2019).

PET Semicristalino

Estrutura: O PET apresenta uma combinação de regiões amorfas e cristalinas. As regiões cristalinas são altamente organizadas, enquanto as áreas amorfas permanecem desordenadas. Aparência: O material pode ter uma aparência opaca ou translúcida, dependendo do grau de cristalinidade alcançado. Propriedades: O PET é caracterizado por alta resistência mecânica, térmica e química. Além disso, oferece uma maior barreira contra gases e umidade, embora sua flexibilidade seja reduzida em comparação com outros materiais (AFINKO, 2019).

Figura 3 - Polímero do estado Fundido para Sólido.



Fonte: *PLASTICS TECHNOLOGY*, 2024

2.2.PROCESSO DE PRODUÇÃO DO POLIETILENO TEREFTALATO.

2.2.1. Química do PET

O Polietileno Tereftalato é formado da seguinte maneira:

1) Esterificação: Trata-se de uma reação química entre o ácido tereftálico (PTA) e o monoetileno glicol (EG), resultando na formação do monômero dietileno glicol tereftalato (DGT) e água como subproduto. Especificamente, 1 mol de PTA reage com 2 mols de EG, produzindo 1 mol de DGT e 2 mols de H_2O . Essa etapa é fundamental na síntese do PET, pois inicia a formação das cadeias poliméricas (MARTINBIANCO, 2022).

2) Policondensação: Esse processo ocorre por meio da reação entre compostos que possuem, no mínimo, dois grupos funcionais reativos — como carboxilas, aminas ou hidroxilas. Durante a polimerização, há a eliminação contínua de pequenas moléculas, como água, amônia, cloreto de hidrogênio ou etileno glicol, resultando na formação de macromoléculas lineares ou ramificadas. O produto gerado é denominado policondensado, podendo ser originado de dois ou mais monômeros diferentes, caracterizando uma copolimerização. A policondensação é amplamente utilizada na produção de termoplásticos, como poliésteres e poliamidas. No caso do PET, esse processo consiste na união sucessiva de unidades de DGT, promovendo o

crescimento da cadeia polimérica com liberação de etileno glicol como subproduto (MARTINBIANCO, 2022).

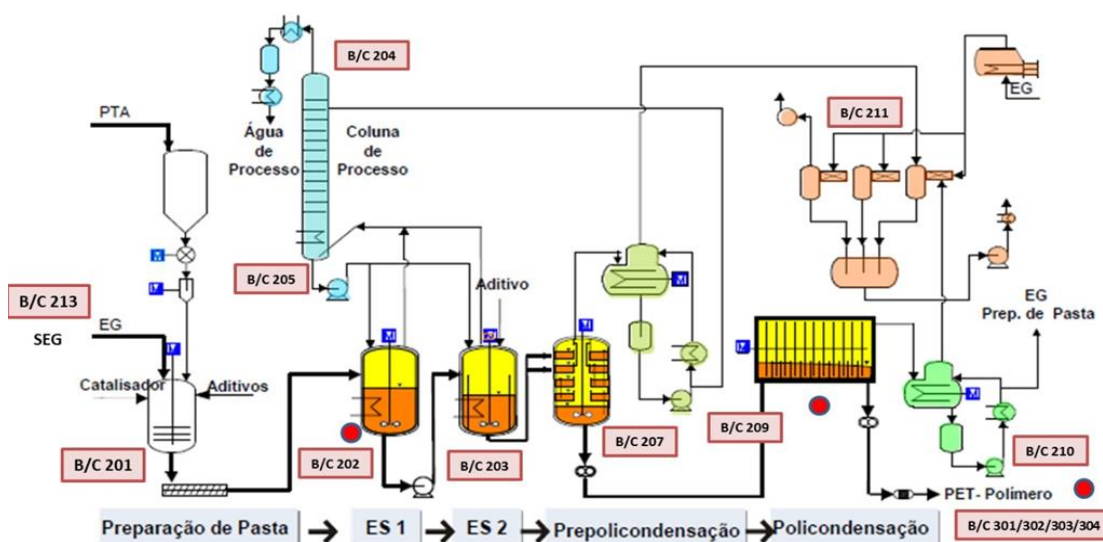
2.2.2. Processo produtivo

As plantas de produção de PET grau garrafa (BG) são geralmente divididas em duas etapas principais: fase líquida, conhecida como Polimerização Contínua (CP), e fase sólida, denominada Polimerização na Fase Sólida (SSP). A fase líquida (CP) é responsável pela produção do PET amorfo de baixo peso molecular, enquanto a fase sólida (SSP) visa aumentar a viscosidade intrínseca e a cristalinidade do material, atingindo as propriedades necessárias para a fabricação de garrafas PET de alta qualidade.

2.2.2.1 Polimerização Contínua – CP

A Figura 4 apresenta a base tecnológica do projeto referente ao processo de polimerização contínua (CP).

Figura 4 - Polimerização Contínua (CP). Base tecnológica do projeto.



Fonte: LURGI ZIMMER, 2001

A etapa inicial da formação do polietileno tereftalato (PET) ocorre em fase líquida, resultando na produção do PET amorfo — denominado assim por apresentar estrutura desorganizada e baixa cristalinidade. Nessa condição, o material possui características como alta transparência e brilho acentuado (BILLMEYER, F. W., 1984). O processo tem início na preparação da pasta, onde são dosadas as matérias-primas essenciais, como o ácido tereftálico purificado (PTA), o monoetileno glicol (MEG) e o isoftalato de dimetila (IPA), além de aditivos específicos. Essa etapa garante as composições químicas e as condições adequadas para a

obtenção de um PET com qualidade compatível com as exigências do mercado (LURGI ZIMMER, 2001).

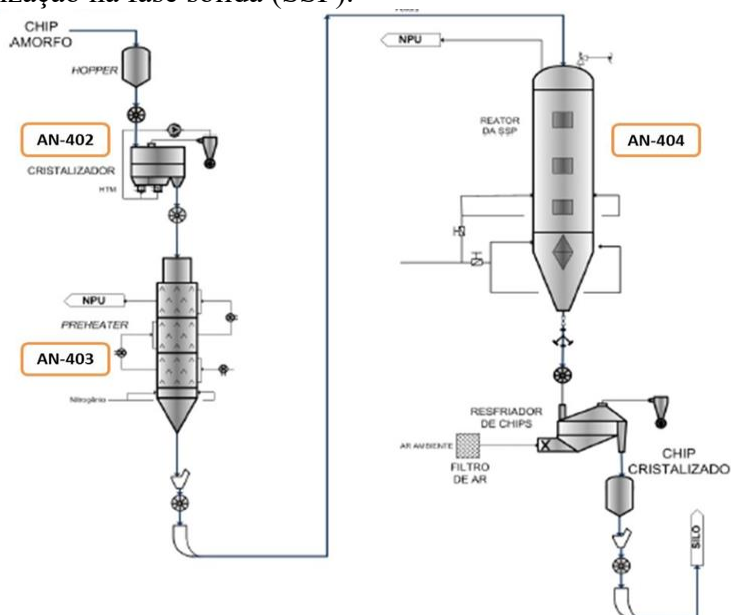
A reação de esterificação tem início no primeiro esterificador, onde o ácido tereftálico purificado (PTA) reage com o monoetileno glicol (MEG), formando diglicol tereftalato (DGT) e liberando moléculas de água. Essa etapa é responsável por aproximadamente 92% do grau total de conversão da reação. Em seguida, no segundo esterificador, ocorre a complementação do processo, promovendo a conversão adicional dos reagentes remanescentes em DGT e água. Ao final desta fase, a taxa de esterificação atinge cerca de 96,8% (LURGI ZIMMER, 2001).

A coluna de processo tem como função o tratamento da corrente gasosa proveniente dos esterificadores, contribuindo para a recuperação do monoetileno glicol (MEG), aspecto essencial para a eficiência operacional do sistema. Na etapa seguinte, inicia-se a pré-polymerização no reator específico, onde os diglicol tereftalatos (DGTs) são convertidos em PET de baixo peso molecular, também chamados de oligômeros, com a liberação de MEG. A reação de polimerização principal ocorre no reator de anel de disco (DRR), onde as cadeias poliméricas se desenvolvem até o estágio desejado. Por fim, a etapa de peletização visa transformar o polímero produzido em chips amorfos de PET, prontos para as etapas posteriores de processamento (LURGI ZIMMER, 2001).

2.2.2.2 Polimerização na Fase Sólida – SSP

Na Figura 5, é apresentada a base tecnológica do projeto referente ao processo de polimerização na fase sólida (SSP).

Figura 5 - Polimerização na fase sólida (SSP).



Fonte: LURGI ZIMMER, 2001.

A unidade de polimerização em fase sólida (SSP) tem como principal objetivo converter os chips amorfos oriundos da cadeia produtiva (CP) em material com especificações adequadas ao grau garrafa (PET BG), exigido pelo mercado. Esse processo promove, em média, uma redução de 98% no teor de acetaldeído e um aumento de aproximadamente 34% na viscosidade intrínseca dos chips. Os parâmetros operacionais fundamentais dessa etapa incluem o controle preciso da temperatura, o tempo de residência e a manutenção de uma atmosfera inerte com nitrogênio (N₂) (LURGI ZIMMER, 2001).

Na etapa de pré-aquecimento, busca-se elevar a cristalinidade dos chips provenientes do cristalizador de aproximadamente 40% para 50%, a fim de prepará-los adequadamente para a reação de policondensação no reator correspondente. Esse aumento de cristalinidade é essencial para garantir a estabilidade térmica necessária durante o processo subsequente. A temperatura é gradualmente elevada até atingir cerca de 220 °C, permitindo que os chips alcancem as condições ideais para a continuidade da polimerização em fase sólida (LURGI ZIMMER, 2001).

Na sequência, a resina amorfa é direcionada ao reator de polimerização em fase sólida (SSP), cuja função é promover a transição da resina para o grau garrafa. Nesse estágio, ocorre a policondensação no estado sólido, promovendo a reorganização molecular e a cristalização dos chips, que adquirem coloração esbranquiçada característica. Durante esse processo, as cadeias poliméricas são estendidas internamente sem que haja fusão do material. O tempo de residência no reator é criteriosamente controlado para assegurar que a viscosidade intrínseca (IV) atinja os valores exigidos para aplicações em embalagens de bebidas (LURGI ZIMMER, 2001).

Na etapa de resfriamento, o objetivo principal é dissipar a energia térmica dos pellets antes do armazenamento. Os chips, ao saírem do reator de SSP, apresentam temperatura inferior a 180 °C — limite necessário para evitar a degradação do material — e são resfriados até aproximadamente 60 °C. Esse processo ocorre em um trocador de calor de leito fluidizado, no qual o ar atmosférico é succionado pela parte inferior da câmara e colocado em contato direto com os chips aquecidos, promovendo a troca de calor. O ar aquecido é então conduzido para fora da câmara por um duto superior, passando por um separador tipo ciclone acoplado à sucção de um ventilador. Esse sistema realiza a exaustão da corrente gasosa e retém as partículas sólidas, direcionando o pó para um coletor específico e liberando o ar tratado de volta à

atmosfera. Após o resfriamento, os chips são transportados pneumaticamente até os silos de armazenamento (LURGI ZIMMER, 2001).

Na etapa de purificação do nitrogênio, a principal função da unidade é tratar e secar o gás proveniente do processo, permitindo sua reutilização. Inicialmente, o N_2 passa por um economizador, onde recebe energia térmica residual, sendo posteriormente aquecido por um trocador de calor. Em seguida, o gás é direcionado ao combustor catalítico, cuja finalidade é a oxidação dos compostos orgânicos presentes na corrente gasosa. Essa reação ocorre na presença de um catalisador de platina suportado em cerâmica, caracterizando-se como uma combustão catalítica. Para viabilizar a reação, realiza-se uma adição controlada de ar (O_2), que reage com os compostos orgânicos na corrente inerte aquecida. O processo resulta na formação dos subprodutos dióxido de carbono (CO_2) e vapor d'água (H_2O), além de gerar o nitrogênio purificado. Na etapa final, o N_2 passa por colunas de secagem com sílica e alumina, que removem a umidade remanescente, tornando o gás adequado para ser reintegrado ao sistema (LURGI ZIMMER, 2001).

2.3. PET PÓS CONSUMO (PET-PCR)

A reciclagem da resina PET pós-consumo, viabilizada por meio da logística reversa, representa uma alternativa viável e estratégica na promoção da sustentabilidade. No Brasil, a regulamentação desse processo foi formalizada com a publicação da Resolução RDC nº 20, de 26 de março de 2008 (BRASIL, 2008), que autoriza o uso da resina PET reciclada na fabricação de embalagens destinadas ao acondicionamento de bebidas carbonatadas.

De acordo com a referida norma, “PET pós-consumo é o material proveniente de embalagens ou artigos precursores usados, ambos de grau alimentício, obtido a partir de resíduos sólidos, para os efeitos de aplicação de tecnologias de descontaminação” (ANVISA, 2008).

O PET pós-consumo reciclado descontaminado de grau alimentício (PET-PCR) deve ser obtido por meio de tecnologias de reciclagem física e/ou química que apresentem elevada eficiência na remoção de contaminantes, sendo imprescindível sua validação por meio do *challenge test* ou metodologia equivalente (ANVISA, 2008).

O *challenge test* é um procedimento desenvolvido pela *Food and Drug Administration* (FDA), nos Estados Unidos, com o objetivo de avaliar a presença de contaminantes em PET reciclado. A metodologia consiste na contaminação intencional e controlada do polímero, que é exposto, por um período de duas semanas a 40 °C, a uma mistura padrão de contaminantes.

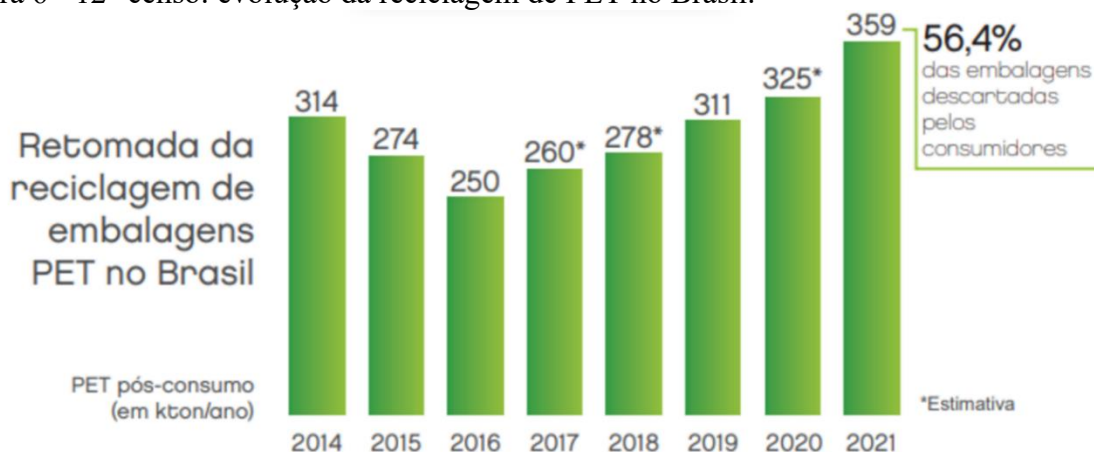
Após essa etapa, o material é submetido ao processo de reciclagem, sendo os níveis de contaminantes monitorados em cada fase para verificar sua redução até valores aceitáveis, conforme os limites estabelecidos pela própria agência (FDA, 2021).

Além da Resolução RDC nº 20/2008 (BRASIL, 2008), a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) também publicou a Resolução RDC nº 95/2001 (BRASIL, 2001), a qual autoriza o uso de resina PET pós-consumo reciclada na fabricação de embalagens destinadas ao acondicionamento de alimentos e bebidas, incluindo bebidas carbonatadas. Essa regulamentação define os critérios e exigências técnicas para o emprego de PET reciclado em contato com alimentos, assegurando que a utilização do material não represente riscos à saúde pública. As disposições da RDC nº 95/2001 integram o conjunto normativo voltado à segurança dos materiais em contato com alimentos, com ênfase na eficiência do processo de descontaminação e na validação de sua inocuidade (ANVISA, 2001).

Além das resoluções estabelecidas pela ANVISA, a ABIPET (Associação Brasileira da Indústria do PET) desenvolveu a Nota Técnica ABIPET 0920, publicada em 2020, com o objetivo de orientar o setor quanto ao uso de resina PET reciclada (PCR) e resina importada em embalagens destinadas ao contato com alimentos. O documento apresenta diretrizes e recomendações sobre os requisitos técnicos e regulatórios, além de descrever o fluxo necessário para a aprovação da resina — seja ela virgem ou reciclada — junto aos órgãos competentes, garantindo a segurança e a conformidade com as exigências sanitárias (NOTA TÉCNICA ABIPET 0920, 2020).

De acordo com o último censo divulgado pela ABIPET, a reciclagem do PET pós-consumo no Brasil apresentou importantes variações ao longo dos anos. Conforme ilustrado na Figura 6, em 2016 houve uma retração na atividade econômica, associada à queda da demanda e à drástica redução no preço do petróleo — fatores que comprometeram a rentabilidade da reciclagem, tornando-a menos atrativa. No entanto, com a recuperação gradual da economia (GAZETA DO POVO, 2025), observou-se, a partir de 2017, um crescimento progressivo na taxa de reciclagem, alcançando em 2021 seu pico, com um consumo de 359 kton/ano. Destaca-se que, desse total, 56,4% foram provenientes de embalagens recicladas descartadas pelos consumidores (ABIPET, 2022).

Figura 6 - 12º censo: evolução da reciclagem de PET no Brasil.



Fonte: ABIPET, 2022

2.4. RESÍDUOS SÓLIDOS – DEFINIÇÃO, CLASSIFICAÇÃO E DESTINAÇÃO FINAL DOS RESÍDUOS

Conforme a ABNT NBR 10004:2024, resíduos sólidos são definidos como materiais oriundos de atividades humanas — sejam domésticas, industriais, comerciais, de serviços, agrícolas ou outras — que, após seu uso, tornam-se inúteis, indesejáveis ou passíveis de descarte. Esses resíduos podem se apresentar em estado sólido ou semissólido, bem como na forma de gases ou líquidos que, devido às suas características, não possam ser lançados diretamente na rede pública de esgoto ou em corpos hídricos. A norma estabelece critérios técnicos para a classificação desses resíduos, com base nos riscos que representam ao meio ambiente e à saúde pública. Essa categorização é fundamental para orientar ações de manejo, tratamento e destinação final adequada (ABNT, 2024).

Classificação dos Resíduos Sólidos:

A versão atualizada da NBR 10004-1:2024 e NBR 10004-2:2024 agrupa os resíduos sólidos em duas categorias principais:

Classe 1 – Perigosos:

Resíduos que apresentam risco à saúde pública e ao meio ambiente devido à presença de substâncias inflamáveis, corrosivas, reativas, tóxicas, patogênicas ou poluentes orgânicos persistentes (POPs). Exemplos incluem resíduos industriais contaminados com solventes, metais pesados e pesticidas.

Classe 2 – Não Perigosos:

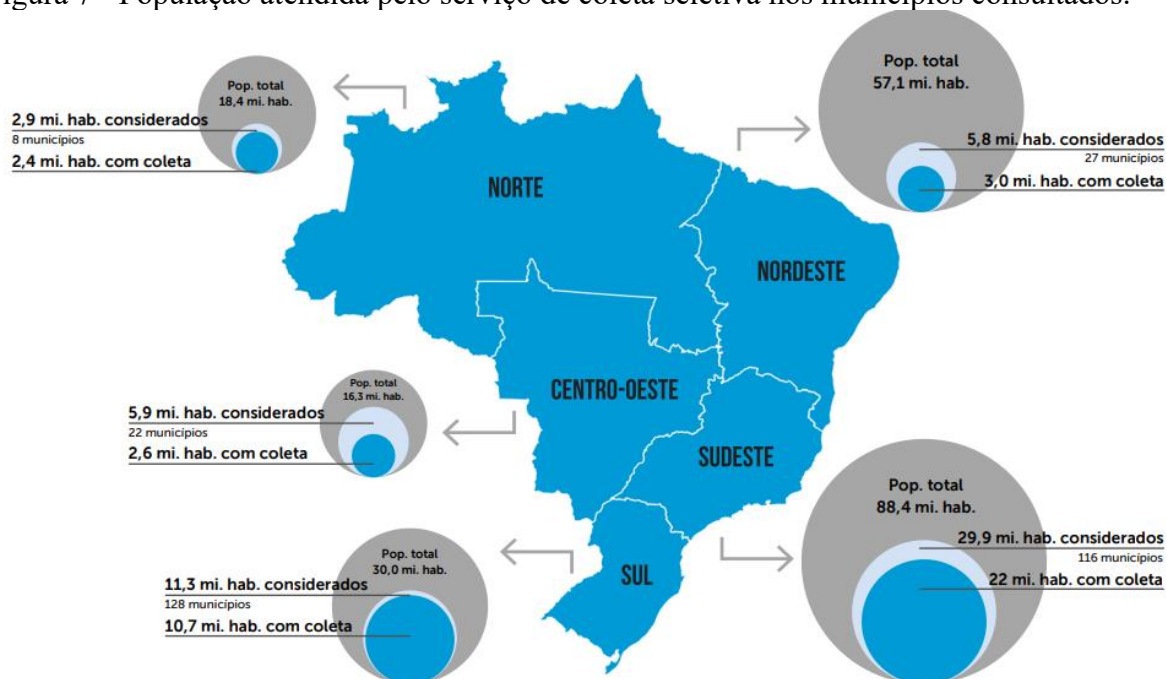
Resíduos que não apresentam periculosidade imediata. Essa classe não possui subdivisões, como na classificação anterior, onde existia a categoria de "inertes". Exemplos incluem resíduos orgânicos domésticos, papel, vidro e plásticos não contaminados.

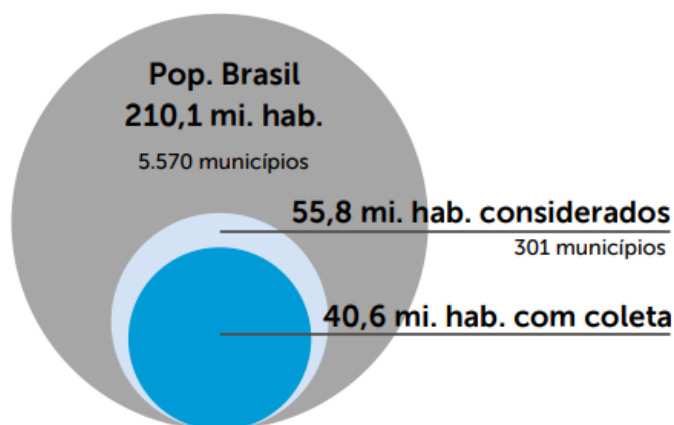
A destinação final dos resíduos deve seguir os princípios de segurança ambiental, saúde pública, reaproveitamento e sustentabilidade. As formas de destinação final previstas incluem aterros sanitários, aterros industriais Classe 1, coprocessamento, reciclagem, reutilização e tratamentos específicos (ABNT, 2024).

2.5. COLETA SELETIVA.

A coleta seletiva de lixo desempenha um papel fundamental na redução da quantidade de resíduos sólidos encaminhados aos aterros sanitários, ao incentivar a reutilização e a reciclagem de materiais. Essa prática traz benefícios tanto econômicos quanto ambientais. A correta separação dos resíduos aumenta a eficiência na recuperação de materiais recicláveis, como papel, plástico, metal e vidro, permitindo sua reinserção na cadeia produtiva. Com isso, reduz-se a dependência de matérias-primas virgens e os custos associados à produção. Adicionalmente, a comercialização dos recicláveis gera uma nova fonte de receita para cooperativas, empresas e administrações públicas, contribuindo para a rentabilidade do setor. A coleta seletiva também colabora para a diminuição dos gastos com transporte e disposição final, além de prolongar a vida útil dos aterros. Ao fomentar a geração de empregos verdes, fortalece-se a economia circular. Esse processo ainda favorece a viabilidade do uso da resina PET reciclada pós-consumo (PET-PCR), pois proporciona uma triagem mais eficiente, com menor risco de contaminação (ABIPET, 2022).

Figura 7 - População atendida pelo serviço de coleta seletiva nos municípios consultados.





Fonte: CEMPRE - PESQUISA CICLOSOFT, 2020.

A Figura 7 apresenta dados provenientes da pesquisa Ciclossoft, realizada pelo CEMPRE (Compromisso Empresarial para Reciclagem), a qual traça um panorama da coleta seletiva nos municípios brasileiros. De acordo com as informações obtidas, a população total atendida por esse serviço ultrapassou 40 milhões de pessoas, entre os 55,8 milhões de habitantes dos 301 municípios que participaram do levantamento. Com base nesses números, a taxa média de cobertura da coleta seletiva foi de 72,64%, resultado obtido a partir da razão entre a população atendida e a população total estimada desses municípios.

2.6. RECICLAGEM – DEFINIÇÃO E BENEFÍCIOS

A reciclagem de embalagens plásticas visa a adaptação de processos e técnicas para promover a reutilização eficiente de energia, matérias-primas e materiais empregados na fabricação dessas embalagens. O objetivo é preservar as propriedades essenciais das embalagens, principalmente quando destinadas à conservação de alimentos, ou possibilitar sua transformação em novos produtos. Esse ciclo está baseado em princípios econômicos, sociais, sanitários e ambientais adequados (NBR 10004, 2024).

Baseado nesse conceito de reciclagem, a utilização de materiais plásticos como embalagens de alimentos apresenta claras vantagens em comparação a outros tipos de produtos. Isso se deve ao fato de existirem diversas rotas econômicas disponíveis para a reciclagem de materiais plásticos. Dentre essas rotas, destacam-se a transformação mecânica em novos produtos, a recuperação de resinas, a degradação ambiental e os aspectos legais relacionados (ABIQUM, 2023).

Todas as rotas mencionadas anteriormente estão diretamente relacionadas a benefícios para as embalagens de alimentos, sendo o PET o principal plástico utilizado para esse fim. Isso

se deve à qualidade intrínseca da resina, ao grande volume de material utilizado e ao valor agregado das embalagens. Além disso, o PET se destaca pela baixa difusão de contaminantes e pela adequação da sua barreira funcional, que é uma camada íntegra na estrutura das embalagens. Dependendo da espessura dessa camada, ela impede fisicamente a difusão de migrantes para os alimentos. Sob o ponto de vista empresarial, o PET apresenta resultados satisfatórios para reciclagem (GOMES; SILVA, 2021).

A reciclagem mecânica de embalagens PET representa uma das rotas mais consolidadas para a valorização de resíduos plásticos no contexto da economia circular. Esse processo envolve a aplicação de técnicas físicas, como trituração, lavagem, secagem e regranulação, que remodelam o material sem alterar sua estrutura química. A eficácia desse método é particularmente notável em termoplásticos como o PET, amplamente utilizado em embalagens para alimentos e bebidas. O PET, devido à sua excelente estabilidade térmica e resistência à deformação, adapta-se bem à reciclagem mecânica, preservando as propriedades físicas, químicas e mecânicas do polímero original (SANTOS; COSTA, 2020). Além disso, essa forma de reaproveitamento contribui para a redução da demanda por matéria-prima virgem, minimiza os impactos ambientais e estimula a geração de renda em cadeias produtivas locais, como cooperativas de catadores e indústrias recicladoras. Dessa forma, a transformação mecânica do PET se estabelece como uma estratégia viável tanto do ponto de vista técnico quanto socioambiental.

Outra rota de benefícios é a recuperação de resina, que envolve a reutilização de embalagens plásticas para a fabricação de novas embalagens, incluindo aquelas destinadas ao contato com alimentos. No entanto, essa prática apresenta um risco potencial para o consumidor, pois pode ocorrer a migração de resíduos presentes nas embalagens recicladas para os produtos alimentícios. Apesar desse risco, a resina PET se destaca em relação a outros plásticos, pois possui uma baixa difusão de contaminantes e uma excelente barreira funcional, características que minimizam significativamente o risco de contaminação dos alimentos (GOMES; SILVA, 2021).

Além das rotas de benefícios mencionadas anteriormente, a reciclagem de embalagens PET também desempenha um papel crucial na diminuição da degradação ambiental. Isso ocorre porque as garrafas PET não recicladas possuem substratos inertes, o que resulta em baixos índices de decomposição, dependendo das condições ambientais, como luz, umidade, calor e microrganismos. Essa não degradabilidade evidencia ainda mais a importância do reuso pós-consumo do material. Com o passar dos anos, as campanhas ambientais têm reforçado essa

mensagem, destacando as vantagens e os avanços alcançados no desenvolvimento de embalagens sustentáveis para alimentos (OLIVEIRA; ALMEIDA, 2021).

É importante ressaltar que as empresas que adotam a técnica de reuso das embalagens PET e seguem os processos de reciclagem geralmente possuem aspectos legais centrados nas certificações ISO. A obtenção dessas certificações não apenas assegura incentivos fiscais do governo, mas também contribui para a construção de uma boa imagem perante a sociedade. Essa certificação atesta que as empresas estão cumprindo os requisitos de qualidade, sustentabilidade e conformidade com as regulamentações ambientais.

Apesar dos diversos benefícios da reciclagem de embalagens para alimentos, a caracterização e separação de contaminantes presentes no processo de reaproveitamento são etapas fundamentais. Um dos principais fatores de contaminação são os plásticos termofixos, que, ao serem amolecidos pelo calor, se tornam irreversivelmente duros, conferindo-lhes uma extrema rigidez. Resinas epóxi, além de materiais moldáveis à base de aldeído e fenol, usados na fabricação de tintas, vernizes, adesivos e sistemas rígidos, como tampas e sistemas de dosagem, são exemplos desses plásticos. Quando esses materiais se misturam às embalagens pós-consumo de alimentos, devido às suas características físico-químicas, comprometem a reciclabilidade do PET e tornam-se contaminantes no processo (SOUZA; LIMA, 2020).

A presença de materiais estranhos, como aço, alumínio, tintas, vernizes, vidro, papelão, entre outros, que são frequentemente utilizados no processo de laminação e conversão de materiais plásticos, também contribui para a geração de contaminantes. Esses materiais podem afetar a qualidade do PET reciclado e comprometer a eficiência do processo de reciclagem. Além disso, os resíduos de alimentos pós-consumo ou sujeiras aderidas às embalagens representam um desafio adicional para garantir a pureza do material reciclado, uma vez que podem resultar em contaminação durante a reciclagem.

Na Figura 8, pode-se observar as diversas aplicações do PET reciclado. Embora as garrafas e pré-formas representem uma parte significativa desse mercado, as bobinas e o processo de termoformagem também desempenham um papel importante. O setor têxtil e químico, por sua vez, também utiliza PET reciclado, ampliando ainda mais as possibilidades de reaproveitamento do material. Embora as aplicações em lâminas apresentem um percentual menor, esse segmento é considerado muito promissor devido ao alto grau de adaptação e flexibilidade que oferece, permitindo que o PET reciclado seja integrado a novos processos de produção.

Figura 8 - Aplicação do PET reciclado.



Fonte: SNIS, 2022

Na Figura 9, é possível observar a distribuição da origem e venda da matéria-prima para reciclagem, sendo que, na maioria das vezes, a origem é de sucateiros. O formato mais comum de venda é o *flakes*, embora também haja concorrência com o formato granulado.

Figura 9 – Origem e venda da matéria prima.



Fonte: SNIS, 2022

Como os materiais poliméricos têm a capacidade de absorver compostos químicos, após o uso das embalagens, elas podem conter substâncias incorporadas à sua matriz plástica. Esses contaminantes podem ser originados de alimentos armazenados nas embalagens, como a absorção de limoneno de sucos de frutas, além de adesivos e colas presentes nos rótulos, que foram processados junto com o plástico na reciclagem.

2.7. O PROCESSO DE RECICLAGEM

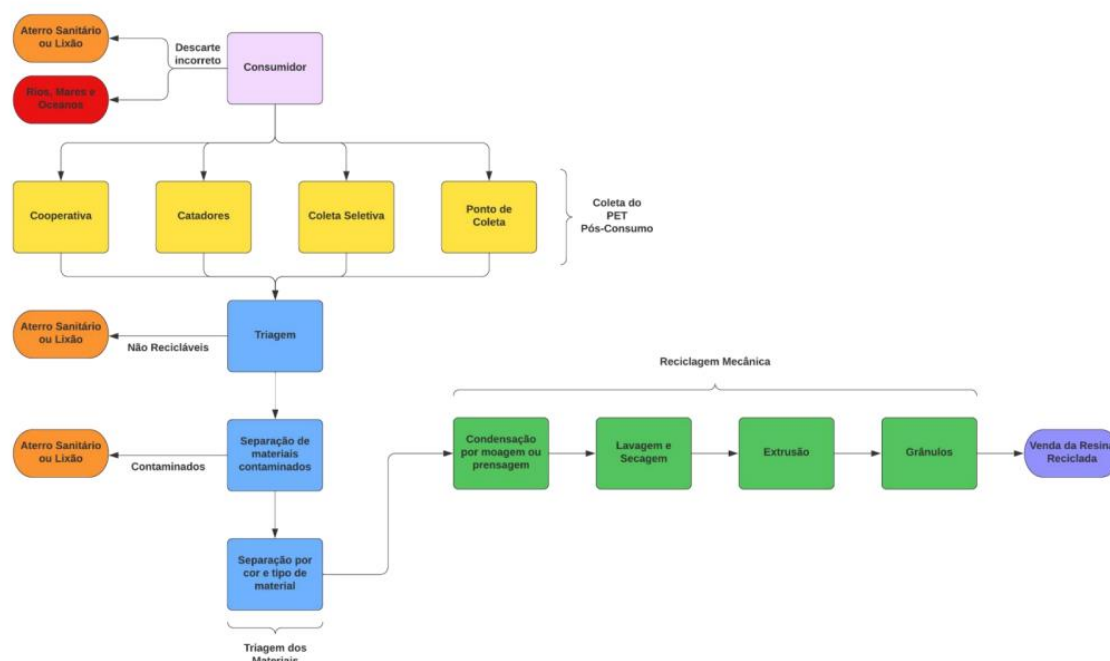
A reciclagem do PET pode ser realizada a partir de um processo mecânico, energético ou químico (ABIPET,2020). Segundo Velzen, Brouwer e Molenveld (2016), a qualidade do PET PCR está diretamente ligada à eficiência dos processos de coleta, separação e reciclagem.

Segundo o portal *eCycle*, a reciclagem energética é definida como a tecnologia de transformação de resíduos em energia térmica e/ou elétrica. Aqueles resíduos que já não podem ser reutilizados e reciclados física, biológica ou quimicamente são indispensáveis nesse tipo de reciclagem, pois promovem a combustão, substituindo o uso de combustíveis fósseis como o óleo diesel e o óleo combustível.

Na reciclagem química, o plástico se transforma em outro tipo de plástico através de reações químicas, como na produção de resina de poliéster, usada na fabricação de fibras para confecção de roupas (MARCELO; GOMES; MARANGONI JÚNIOR, 2025).

A Figura 10 apresenta um fluxograma do processo de reciclagem do PET no Brasil, evidenciando as principais etapas envolvidas desde o descarte pelo consumidor até o reaproveitamento do material. O fluxo inicial pode seguir dois caminhos distintos: o descarte inadequado, como o lançamento de resíduos em corpos d'água (rios, mares e oceanos), ou a destinação correta, por meio da coleta seletiva e encaminhamento às cooperativas de reciclagem. Em seguida, ocorre a triagem, com os respectivos processos de separação dos materiais, culminando no processo de reciclagem mecânica, que envolve diversas etapas para a transformação do PET em novos produtos.

Figura 10 - Fluxograma da Reciclagem do PET no Brasil.



Fonte: ABIPET, 2019; MAIA PIANOWSKI, 2017; “Mecânica, Energética ou Química: Como os tipos de reciclagem funcionam, 2019”.

Segundo MARCELO, GOMES e MARANGONI JÚNIOR (2025), no Brasil, o processo mais utilizado é a reciclagem mecânica (Figura 11), porque mantém uma boa qualidade do produto. Esse processo pode ser dividido, segundo dados da ABIBET (2022), em três etapas:

a) Recuperação: Nesta fase, as embalagens recuperadas serão separadas por cor e prensadas. A separação por cor é necessária para que os produtos que resultarão do processo tenham uniformidade de cor, facilitando assim, sua aplicação no mercado. A prensagem, por outro lado, é importante para viabilizar o transporte das embalagens.

b) Revalorização: As garrafas são moídas, ganhando valor no mercado. O produto que resulta desta fase é o flocos da garrafa. Pode ser produzido de maneiras diferentes e, os flocos mais refinados, podem ser utilizados diretamente como matéria-prima para a fabricação dos diversos produtos que o PET reciclado dá origem na etapa de transformação. No entanto, há possibilidade de valorizar ainda mais o produto, produzindo os grãos de PET reciclado. Desta forma o produto fica muito mais condensado, otimizando o transporte e o desempenho na transformação.

c) Transformação: Fase em que os flocos, ou o granulado, será transformado num novo produto, fechando o ciclo. Os transformadores utilizam PET reciclado para fabricação de diversos produtos, inclusive novas garrafas para produtos não alimentícios.

Figura 11 - Fluxograma do processo de reciclagem mecânica.



Fonte: Slideshare, 2024.

2.8.TECNOLOGIAS NOS PROCESSOS INDUSTRIAIS.

De acordo com o relatório técnico "*Technical quality of rPET*", elaborado por Velzen, Brouwer e Molenveld (2016), a qualidade do PET Pós Consumo Reciclado (PCR) pode variar substancialmente conforme a eficiência da tecnologia empregada no processo de reciclagem. A adequação do PET reciclado para o acondicionamento de alimentos e bebidas pode ser alcançada através da reciclagem mecânica, desde que o material atenda aos critérios de segurança estabelecidos pela *Food and Drug Administration* (FDA). Entre as tecnologias recomendadas para garantir a produção de PET reciclado de grau alimentício, destacam-se os processos *Superclean*, *Flake-to-Resin* e *Bottle-to-Bottle*, que são projetados para remover contaminantes e assegurar que o material reciclado seja seguro e de alta qualidade para aplicações em contato direto com alimentos.

O processo *Superclean* consiste em submeter o PET a uma etapa de lavagem intensiva, utilizando produtos químicos a temperaturas próximas de 260°C e sob pressão. Após essa fase,

o material é exposto ao vácuo por períodos pré-determinados, seguido de uma filtragem para remover quaisquer contaminantes remanescentes (PEREIRA, SANTOS, MATOS, 2020).

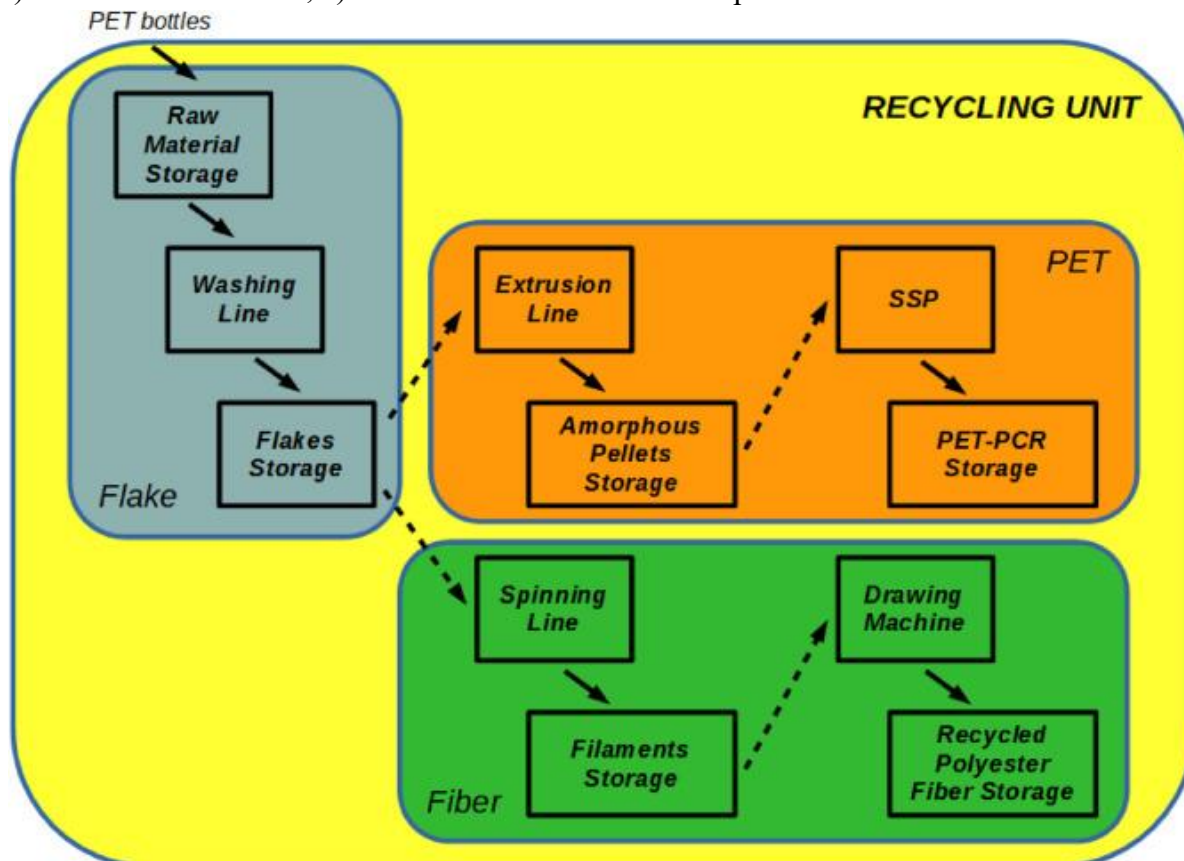
Flake-to-Resin (FTR) combina a produção de PET virgem e reciclado, descontaminado por meio do processo Superclean, em um único ciclo. O processo é constituído por um reator onde ocorre a esterificação e policondensação para produzir o pré-polímero virgem, que abastece a linha principal de produção. Em uma segunda linha, flakes de PET pós-consumo são parcialmente despolimerizados com etileno glicol até atingir um grau de polimerização similar ao do pré-polímero virgem. Na última etapa, as duas linhas de produção se unem, misturando o PET pós-consumo (parcialmente despolimerizado) com o pré-polímero virgem. Este processo permite o aumento da viscosidade intrínseca, além da remoção de contaminantes pós-consumo e subprodutos gerados pela polimerização, devido à combinação de alto vácuo (aproximadamente 100 Pa), temperatura elevada (acima de 270°C) e tempo de residência prolongado (acima de 60 minutos). Após a policondensação, a massa polimérica resultante é convertida em pellets, que são então utilizados diretamente para a fabricação de pré-formas (PEREIRA, SANTOS, MATOS, 2020).

Bottle-to-Bottle (BTB) é o processo de reciclagem das garrafas PET, reutilizando-as para a produção de novas embalagens. O BTB consiste em uma etapa adicional ao processo tradicional de reciclagem. O material pós-consumo é primeiramente separado e lavado eficientemente para remover resíduos e contaminantes, cortado (moído) e encaminhado para a extrusão. Após ser derretido, o PET reciclado é misturado com PET virgem. A etapa adicional ocorre em um reator de policondensação, onde a viscosidade do PET é aumentada. Durante a policondensação, a resina é submetida a uma temperatura de 270°C por mais de 15 horas em uma atmosfera inerte ou a vácuo. Esse processo assegura a eliminação de contaminantes e o aumento da massa molar do material. Após esse procedimento, o PET reciclado está pronto para ser utilizado na fabricação de novas embalagens (PEREIRA, SANTOS, MATOS, 2020).

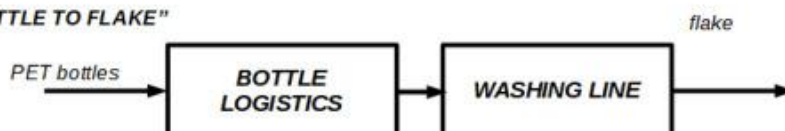
Na Figura 12 mostra os principais processos internos e armazenagens, para matéria-prima, intermediários e produtos finais: a) Classificação, limpeza e moagem de garrafas em

flakes; b) processamento dos *flakes* em resina PET-PCR (processo B2B) e c) processamento os *flakes* em fibra de poliéster reciclada (processo B2F).

Figura 12 – Principais processos internos e armazenamentos da Unidade de Reciclagem e Sistemas de Produto modelados por agrupamento de etapas do processo: a) da garrafa ao flake; b) de flakes a PET-PCR; c) do flakes a fibra reciclada do poliéster.



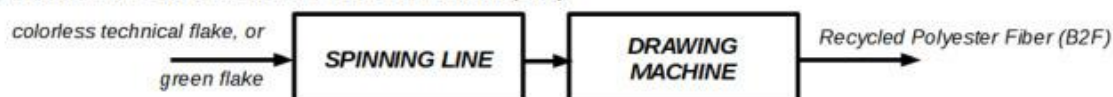
a) "FROM BOTTLE TO FLAKE"



b) "FROM FLAKE TO PET-PCR (B2B)"



c) "FROM FLAKE TO RECYCLED POLYESTER FIBER (B2F)"



Fonte: GILENO, TURCI, 2021.

No Brasil, dois fornecedores já oferecem o sistema de reciclagem *bottle-to-bottle* para a produção de PET grau alimentício: as empresas alemãs OHL *Engineering* e Krones. A Bahia

PET foi pioneira no desenvolvimento de reciclados para contato com alimentos, utilizando tecnologia alemã aprovada pela FDA. Após a autorização da ANVISA para essa empresa, outras recicladoras no Brasil também iniciaram pedidos de autorização. No entanto, devido à recente implementação da legislação e à resistência da sociedade quanto ao uso de reciclado em contato com alimentos, ainda há uma escassez significativa de dados e informações sobre esse mercado no país. Em Pernambuco, a empresa de reciclagem FROMPET adota o processo de hiperlavagem de maquinário para a fabricação de resinas e possui aprovação da FDA (Estados Unidos), do Instituto *Fraunhofer* (Alemanha) e da ANVISA (Mercosul) (PLÁSTICO EM REVISTA, 2024).

2.9. DEFINIÇÃO E PRINCIPAIS PARÂMETROS ANALÍTICOS CARACTERÍSTICOS DAS EMBALAGENS PARA ALIMENTOS.

Segundo Velzen, Brouwer e Molenveld (2016), a utilização do PET pós-consumo requer a análise de diversos parâmetros técnicos essenciais para garantir a segurança e a qualidade do material reciclado. Dentre esses parâmetros, destaca-se:

2.9.1. Viscosidade Intrínseca.

A medida mais usada para determinar a massa molar de um polímero é a viscosidade intrínseca. A viscosidade pode ser convertida em massa molar viscosimétrica ou até mesmo em massa molar média numérica por meio de equações adequadas (MANCINI; MATOS; ALMEIDA, 2004).

A massa molar de um polímero é um indicativo do número médio de unidades repetitivas do PET que se agrupam para formar uma corrente molecular única. A viscosidade intrínseca é, portanto, uma das principais formas de determinar o peso molecular de um polímero, permitindo uma estimativa precisa da sua estrutura e das suas propriedades macroscópicas, como a resistência e a fluidez (ABIPET, 2022).

2.9.2. Acetaldeído

O acetaldeído é um líquido incolor, volátil e de odor pungente. Segundo TAYLOR (1986), o acetaldeído é formado da oxidação do álcool etílico e está presente em vários alimentos acondicionados. Contudo, a presença dessa substância pode ser indicativa da degradação do polímero durante a fabricação da embalagem.

Segundo Barreto, Nascimento e Nunes (2020) a geração de acetaldeído (AA), um subproduto indesejado no processamento de PET, é uma preocupação recorrente, especialmente em aplicações voltadas para embalagens de bebidas, devido ao seu potencial de alterar o sabor

e odor dos líquidos acondicionados. Essa substância é formada principalmente durante a degradação térmica do polímero, ocorrendo com maior intensidade em etapas como a secagem e a extrusão, tanto na produção do PET virgem quanto do PET-PCR.

O acetaldeído é um dos principais indicadores utilizados para avaliar a qualidade do PET destinado ao uso em embalagens alimentícias. Durante o processo de fusão, representado na Figura 13, o PET pode sofrer degradação térmica, resultando na formação de acetaldeído. Esse composto tem a capacidade de migrar para o interior da bebida ao longo do tempo, podendo provocar alterações sensoriais, especialmente no sabor de águas minerais e bebidas carbonatadas.

Durante o processo de produção da resina PET, ocorre a formação de acetaldeído residual, que fica retido principalmente na estrutura polimérica amorfa. No entanto, o acetaldeído que causa alterações nos produtos acondicionados não é aquele originado nas etapas de polimerização em fases líquida e sólida, mas sim o que é gerado durante a fusão da resina para a fabricação de pré-formas ou embalagens finais. Por essa razão, torna-se essencial o controle rigoroso da temperatura e do tempo de exposição da resina durante o processo de injeção (ANJOS, 2007).

Figura 13 - Reação de degradação de grupos terminais hidroxietila durante a fusão e transformação de resinas de PET em embalagens.



Fonte: ANJOS, 2007

2.9.3. cor L*a*b*

A percepção da cor é subjetiva e pode variar significativamente entre indivíduos. Duas pessoas observando o mesmo objeto podem descrevê-lo com diferentes referências e termos, o que frequentemente gera confusão e falhas de comunicação entre setores de uma empresa ou entre produtores e fornecedores. Para evitar esse tipo de inconsistência, é fundamental que a cor seja expressa de forma objetiva, utilizando-se valores numéricos que garantam a conformidade do produto com as suas especificações (MORITZ, A. R., 2011).

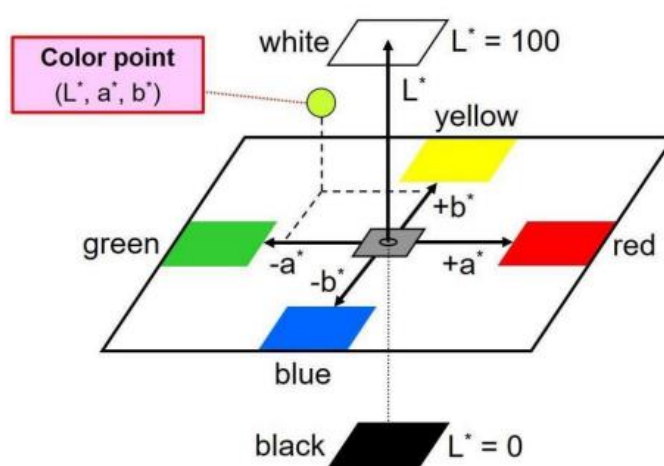
Quando as cores são organizadas de maneira sistemática, elas podem ser descritas com base em três atributos principais: tonalidade, luminosidade e saturação. A criação de escalas específicas para esses parâmetros permite uma descrição precisa das cores. O espaço de cor L*a*b* foi desenvolvido com base na teoria das cores opostas, a qual estabelece que

determinadas cores não podem coexistir simultaneamente, como verde e vermelho ou azul e amarelo (MORITZ, A. R., 2011).

Como mostrado na Figura 14 abaixo, o L^* indica a luminosidade e o a^* e b^* , são as coordenadas cromáticas.

- L^* = Luminosidade;
- a^* = coordenada vermelho/verde (+a indica vermelho e -a indica verde);
- b^* = coordenada amarelo / azul (+b indica amarelo e -b indica azul).

Figura 14 - Modelo de coordenadas colorimétricas CIELab.



Fonte: MORITZ, A. R., 2011

Mesmo quando duas cores aparentam ser idênticas ao olho humano, pequenas variações podem ser detectadas por instrumentos de medição de cor. Caso a coloração do produto não esteja de acordo com os padrões estabelecidos, há risco de comprometer a satisfação do cliente, além de aumentar os índices de retrabalho e os custos de produção. Por esse motivo, é fundamental identificar previamente as diferenças entre a amostra do produto e o padrão de referência, especialmente antes do início da produção em larga escala (MORITZ, A. R., 2011).

2.9.4. Ponto de Fusão e Cristalinidade.

A técnica utilizada é a Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC), que permite medir a diferença de fluxo de calor entre uma amostra e um material de referência, conforme um programa controlado de aquecimento ou resfriamento, sob atmosfera controlada. Essa técnica é amplamente aplicada para determinar parâmetros térmicos importantes, como a temperatura de fusão e cristalização, as entalpias de fusão e cristalização, além da temperatura de transição vítrea do material (BANNACH et al., 2011).

Temperatura de Fusão (T_m)

Definição: Temperatura em que o polímero passa do estado sólido para o líquido (no caso de polímeros semicristalinos).

Determinação via DSC: É o pico máximo do endotérmico (absorção de calor) durante o aquecimento da amostra.

Entalpia de Fusão (ΔH_f)

Definição: Energia absorvida para fundir a parte cristalina do polímero.

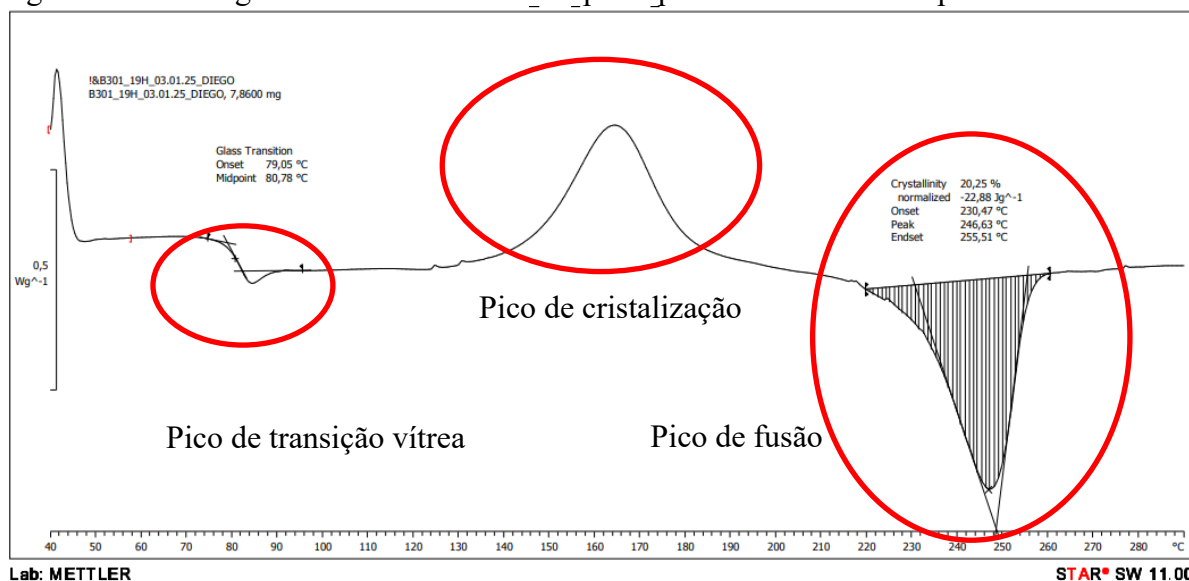
Cálculo: $\Delta H_f = A_f / m$ (Equação 1)

Onde:

A_f = área do pico de fusão (Joules)

m = massa da amostra (g)

Figura 15 - Termograma obtido em DSC dos principais intervalos de temperatura do PET.



Fonte: O autor, 2025.

Conforme ilustrado na Figura 15, por meio de um termograma, a fusão é classificada como uma transição de primeira ordem, típica de metais, materiais cristalinos e polímeros semicristalinos. Essa transição pode ocorrer em uma temperatura específica quando o material apresenta alto grau de cristalinidade (caracterizado por um pico estreito e de grande intensidade), ou em uma faixa de temperatura, devido à variação no tamanho das regiões cristalinas presentes nas cadeias macromoleculares. A temperatura em que toda a cristalinidade desaparece é conhecida como ponto de fusão do material, correspondendo aproximadamente ao valor máximo do pico de fusão na curva obtida por calorimetria diferencial de varredura (DSC). O calor de fusão, também chamado de entalpia de fusão, pode ser calculado conforme a equação 1, a partir da área sob o pico endotérmico, considerando a massa da amostra analisada. As normas técnicas que orientam a determinação da temperatura e entalpia de fusão são as ASTM E 794-06 e ASTM E 793-06 (BANNACH et al., 2011).

2.9.5. Umidade.

O controle da umidade nos chips de PET (polietileno tereftalato) é uma etapa crítica durante o processamento, especialmente na produção de pré-formas e garrafas. Isso ocorre porque o PET é um material higroscópico, ou seja, possui a capacidade de absorver umidade do ambiente. Caso esse teor de umidade não seja rigorosamente controlado, pode comprometer significativamente as propriedades físicas e mecânicas do material (RACANELLI, 2020).

Para garantir a qualidade do produto final, o teor de umidade do PET deve estar abaixo de 30 ppm antes do processamento térmico. A presença de água durante o aquecimento

promove reações de hidrólise no polímero, o que resulta na quebra das cadeias moleculares e, consequentemente, na redução do seu peso molecular. Esse processo impacta diretamente o índice de viscosidade (IV), diminuindo a rigidez, a integridade física e até a transparência do polímero, afetando também sua aparência final (LURGI ZIMMER, 2001).

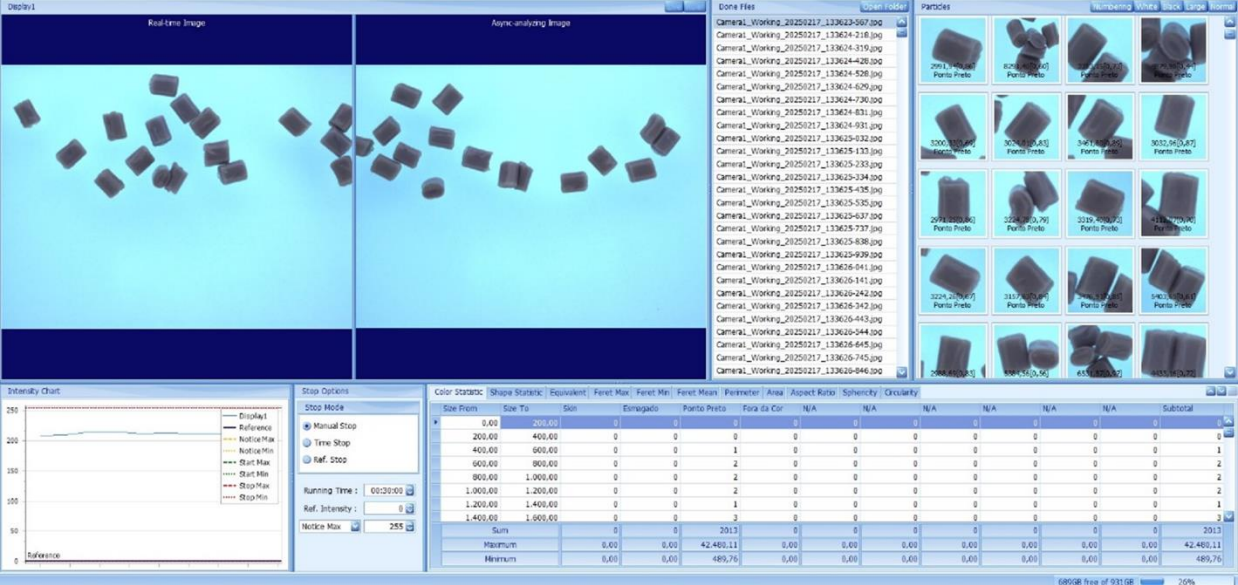
2.9.6. Minidisco Cor $L^*a^*b^*$ Haze

O conceito de cor $L^*a^*b^*$ aplicado a minidiscos segue os mesmos princípios utilizados na avaliação de cor em chips de PET, medindo os parâmetros de luminosidade (L^*), matiz no eixo verde-vermelho (a^*) e matiz no eixo azul-amarelo (b^*). No entanto, nos minidiscos, há também a adição da análise de "haze", um parâmetro que quantifica a dispersão da luz ao atravessar o material. O haze está diretamente relacionado à transparência do material: quanto maior o índice de haze, mais turva ou leitosa será a aparência do PET; por outro lado, um valor baixo de haze indica alta clareza e transparência. Essa característica é especialmente relevante em aplicações que exigem excelente qualidade óptica, como embalagens para alimentos e bebidas ou componentes técnicos com exigência visual elevada (BENYATHIAR et al., 2022).

2.9.7. Sorter Optico.

Classificadores ópticos são equipamentos que empregam sensores de alta precisão para detectar e separar materiais com base em características ópticas, como cor, forma, tamanho e transparência, conforme ilustrado na Figura 16. No ambiente de laboratórios químicos, esses dispositivos desempenham um papel fundamental na garantia da qualidade e pureza das amostras analisadas. Eles permitem a triagem eficiente de materiais, eliminando contaminantes visuais e otimizando a confiabilidade dos resultados analíticos e dos processos de pesquisa (FRANZ, 2004).

Figura 16 - Tela de leitura do Software do equipamento Sorter Optico.



Fonte: O autor, 2025.

2.10. CONTAMINANTES DO PET E SEUS EFEITOS.

O efeito dos contaminantes no PET reciclado é um dos principais fatores que impactam diretamente a viabilidade do uso da resina reciclada, especialmente em aplicações de grau alimentício, como garrafas de bebidas ou embalagens de alimentos. Esses contaminantes podem comprometer desde as propriedades físico-químicas do material até a segurança sanitária, sendo um grande desafio técnico e regulatório na cadeia de reciclagem. (PINTER et al., 2021)

A reciclagem de PET desempenha um papel crucial na redução do impacto ambiental dos resíduos plásticos. No entanto, o processo de reciclagem apresenta desafios significativos devido à presença de contaminantes que podem comprometer a qualidade do material reciclado (ABIPET,2024).

A FDA estabeleceu um nível de tolerância (*threshold of regulation*) para contaminantes presentes no PET reciclado, visando assegurar que esses contaminantes não induzam efeitos tóxicos aos consumidores. Pode haver migração de substâncias nocivas da embalagem para o alimento, representando um risco à saúde do consumidor. Alguns desses contaminantes podem gerar alteração no sabor da água mineral e de bebidas carbonatadas (BENYATHIAR et al., 2022).

2.11. LIMONENO: UM DOS PRINCIPAIS CONTAMINANTES DOS PROCESSOS DE PRÉ-FORMAS E ENVAZE.

De acordo com LEITÃO e MENEZES (2020), o limoneno, frequentemente encontrado no PET pós-consumo devido ao contato com refrigerantes ou sucos de frutas, é um composto volátil que pode ser precursor de compostos off-flavor em alimentos. Dessa forma, a determinação dessa substância no PET reciclado é essencial para garantir que o material pós-consumo esteja livre de contaminantes. Embora o limoneno seja amplamente utilizado por suas propriedades aromáticas e solventes, sua presença em embalagens pós-consumo representa um desafio significativo para a reciclagem eficiente do PET, especialmente quando se busca a produção de resina reciclada com qualidade de grau alimentício.

Conforme LEITÃO e MENEZES (2020), o limoneno, frequentemente encontrado em embalagens de sucos cítricos e produtos de limpeza, tende a aderir às superfícies internas do PET e difundir-se na matriz polimérica, tornando-se difícil de ser totalmente removido durante os processos convencionais de lavagem. Essa retenção residual compromete a pureza do material reciclado, resultando em alterações sensoriais (como odor e sabor), que são inaceitáveis em embalagens destinadas ao contato com alimentos.

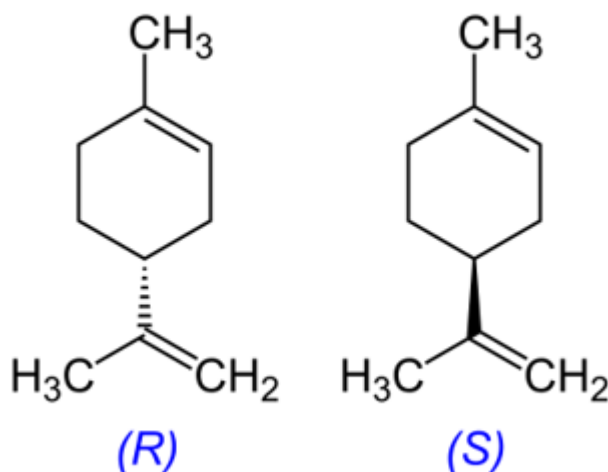
Além disso, o limoneno pode atuar como plastificante ou agente de degradação, interferindo nas propriedades térmicas e mecânicas da resina reciclada. Isso reduz sua estabilidade, dificultando o reprocessamento e prejudicando a conformidade com os padrões exigidos por órgãos reguladores, como a ANVISA e a FDA (PINTER et al., 2021).

Do ponto de vista industrial, a presença de contaminantes como o limoneno eleva os custos de reciclagem, exigindo etapas adicionais de purificação, como lavagens a quente intensificadas ou o uso de tecnologias mais avançadas como o processo *superclean* ou a destilação a vácuo. Essas exigências reduzem a viabilidade econômica do PET reciclado, especialmente em mercados emergentes que ainda enfrentam desafios estruturais na triagem e limpeza de resíduos (PINTER et al., 2021).

Dessa forma, o limoneno, embora natural, atua como um contaminante crítico que compromete a qualidade, a segurança e a viabilidade econômica da resina de PET reciclado, especialmente quando destinada a aplicações de maior valor agregado, como embalagens alimentícias. Esse desafio reforça a importância de melhorar os sistemas de coleta seletiva e triagem, bem como de educar o consumidor e o setor produtivo quanto à correta destinação de embalagens contendo substâncias aromáticas voláteis. (PINTER et al., 2021).

Conforme a Figura 17, observam-se as duas formas isoméricas do limoneno, composto encontrado principalmente em frutas cítricas. Dependendo da eficiência da limpeza das garrafas durante o processo de reciclagem, o limoneno pode transmitir gosto ao material envasado.

Figura 17 - Estrutura molecular do limoneno com as duas formas isoméricas.



Fonte: **SCIENCE IN SCHOOL**. Citrus science: limonene. Disponível em: <https://www.scienceinschool.org/pt-pt/article/2022/citrus-science-limonene/>. Acesso em: 18 jan. 2025.

2.12. PROCESSOS DE PRÉ-FORMAS E ENVASE

A viabilidade do uso de PET reciclado nos processos de fabricação de pré-formas e envase depende de uma cadeia de reciclagem bem estruturada, de tecnologias avançadas de purificação e de um rigoroso controle de qualidade. Quando adequadamente aplicado, o PET reciclado pode ser utilizado com segurança na produção de garrafas para alimentos, promovendo a economia circular. No entanto, seu uso exige conformidade com normas técnicas e exigências sanitárias (ABIPET, 2025).

A transformação da resina PET em garrafas, frascos ou potes ocorre por meio de etapas distintas: secagem, alimentação, plastificação, injeção, condicionamento, estiragem e sopro. As máquinas responsáveis por esse processo são as injetoras, conforme o modelo esquemático apresentado na Figura 18, e as sopradoras, que ocupam uma grande área nas fábricas e requerem confinamento para evitar interferências causadas por variações climáticas. A etapa de secagem é uma das mais importantes e críticas, pois o tempo de secagem está diretamente relacionado à viscosidade intrínseca da resina (MARCELO; GOMES; MARANGONI JÚNIOR, 2025).

A segunda etapa, alimentação, consiste na transição entre o silo e a entrada da resina PET na injetora. Quando necessário, aditivos — como protetores contra raios ultravioleta e

concentrados de cor — são dosados à resina por meio de equipamentos específicos para essa finalidade. Nessa fase, o material ainda está em estado sólido, seco e preferencialmente a uma temperatura acima de 100 °C (MARCELO; GOMES; MARANGONI JÚNIOR, 2025).

A terceira etapa, plastificação, é uma das mais importantes e delicadas. É nesse momento que a resina PET sofre mudança de estado físico para possibilitar sua injeção. Ela é aquecida e plastificada no interior do canhão da injetora, com o auxílio de um parafuso sem fim, cujo passo de rosca e zonas de pressão são bem definidos. As temperaturas de trabalho, geralmente controladas por resistências elétricas, variam conforme o equipamento, situando-se entre 265 e 305 °C (MARCELO; GOMES; MARANGONI JÚNIOR, 2025).

Na quarta etapa, injeção, a resina PET já plastificada é transferida para o molde de pré-formas por meio do processo de injeção (Figura 18). Esse molde se mantém a baixa temperatura graças à circulação interna de água gelada. O resfriamento rápido do PET dentro do molde é essencial para evitar que o material retorne parcialmente ao estado cristalizado, o que comprometeria algumas de suas propriedades. Ao final dessa etapa, a pré-forma está pronta — com o gargalo e corpo já definidos — e é acondicionada em gaiolas ou containers para transporte, via empilhadeiras ou paleteiras, até a máquina de estiramento e sopro (MARCELO; GOMES; MARANGONI JÚNIOR, 2025).

No condicionamento, a pré-forma recebe um tratamento térmico diferenciado, sendo aquecida de forma seletiva, conforme o design da embalagem, com o objetivo de otimizar o processo de sopro. Esse condicionamento pode ser realizado de duas maneiras, de acordo com o sistema adotado para o sopro das embalagens:

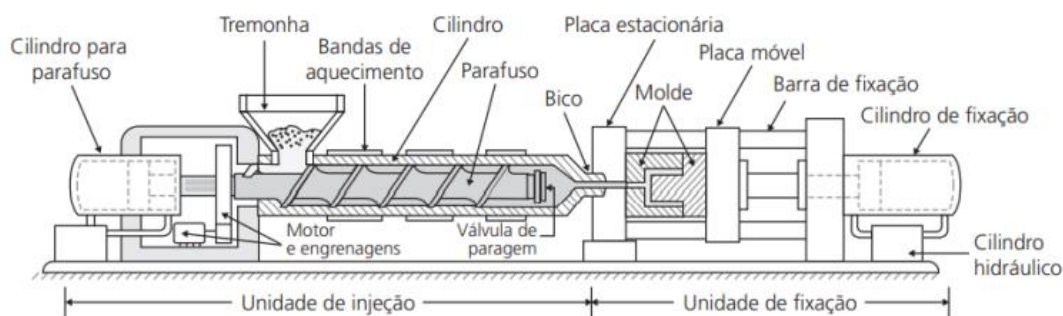
- a) Sistema de um estágio (também conhecido como integrado ou ciclo quente);
- b) Sistema de dois estágios (também conhecido como ciclo frio).

No sistema de um estágio (a), é possível variar mais a produção de formas e tamanhos de frascos e garrafas, embora a produtividade seja inferior. Nesse sistema, a pré-forma segue diretamente do molde de injeção para o condicionamento, mantendo-se a uma temperatura em torno de 100 °C. No sistema de dois estágios (b), a prioridade é a velocidade de produção. Assim, as pré-formas são injetadas (primeiro estágio) em grandes quantidades e estocadas, sendo posteriormente enviadas para o local onde ocorrerá o sopro (segundo estágio), conforme a necessidade. Nesse sistema, a pré-forma é injetada previamente e, para ser soprada, chega fria do estoque, entrando então no forno, onde a região a ser estirada passa pelo condicionamento térmico. Uma vez atingidas as temperaturas ideais, a pré-forma está preparada e otimizada para a etapa seguinte (MARCELO; GOMES; MARANGONI JÚNIOR, 2025).

No sopro, a pré-forma é colocada, geralmente com o auxílio de robôs, dentro do molde cuja cavidade possui a forma final da embalagem. Um pino penetra no gargalo da pré-forma para estirá-la, enquanto ar comprimido é soprado em seu interior. O corpo da pré-forma é inflado de forma controlada com o auxílio de uma haste de estiramento. Dessa maneira, a pré-forma é estirada, orientando as moléculas de PET nas direções radial e axial — ou seja, tornando-se biorientada — até encostar na cavidade do molde de sopro e adquirir sua forma final (MARCELO; GOMES; MARANGONI JÚNIOR, 2025).

Finalmente, a embalagem soprada é retirada ou ejetada da máquina, pronta para o envase. A produção de garrafas de PET é normalizada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas, por meio da NBR 15395:2006. O documento pode ser adquirido diretamente com a ABNT.

Figura 18 - Modelo esquemático de uma máquina injetora.



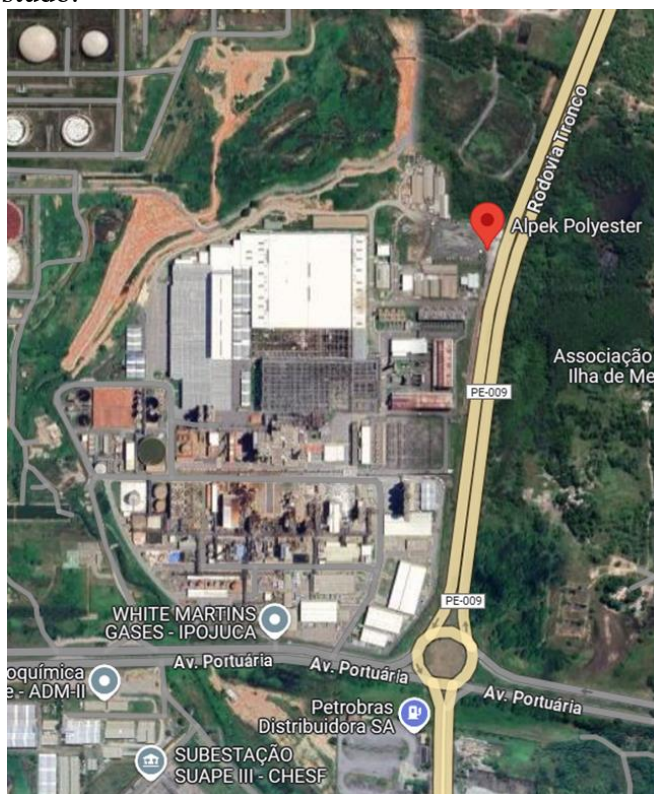
Fonte: Silva, 2022

CAPÍTULO III : METODOLOGIA

3.1. ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi realizado em uma empresa localizada no município de Ipojuca (Figura 19), situada na PE-60, KM 10, na zona industrial do bairro Suape, cuja capacidade de produção diária é de 1.320 toneladas de polímero PET por dia.

Figura 19 - Área de estudo.



Fonte: Google Maps, 2024

3.2. COLETA DE DADOS

A obtenção dos dados foi conduzida por meio da realização de ensaios analíticos, levantamento bibliográfico em artigos científicos, consulta a normas técnicas e pesquisa em plataformas acadêmicas. No que se refere aos ensaios laboratoriais, foram aplicadas metodologias específicas para a determinação de parâmetros como viscosidade, colorimetria, cromatografia gasosa via *Headspace*, calorimetria diferencial de varredura (DSC), análise gravimétrica de umidade e *sorter optico*. As análises foram executadas majoritariamente no laboratório físico-químico da empresa conforme a área de estudo, com exceção da cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (GC-MS), cuja execução foi realizada por uma fornecedora de resina PET PCR, especializada nesse tipo de caracterização. Entre os equipamentos empregados nos ensaios, destacam-se: viscosímetro, colorímetro, cromatógrafo gasoso com injeção por *Headspace*, *Differential Scanning Calorimeter* (DSC),

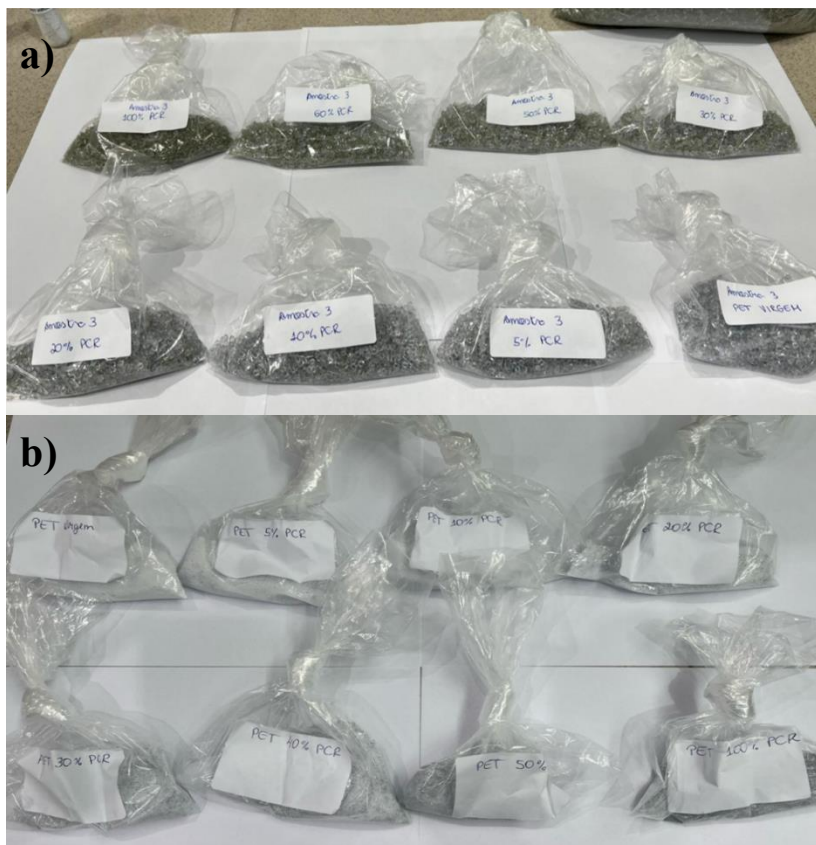
balança termogravimétrica, cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (GC-MS), mini injetora e *sorter optico*.

3.2.1. Coleta das Amostras de PET

Amostras de PET virgem amorfo e semicristalino foram coletadas em uma empresa de produção de PET virgem, localizada no município de Ipojuca, na PE-60, KM 10, na zona industrial do bairro Suape. A coleta foi realizada em campo e corresponde à produção do dia 25/09/2024. Em relação às amostras de PET amorfo e semicristalino PCR, estas foram coletadas em uma empresa de produção de PET PCR, localizada no estado da Paraíba. A coleta também foi realizada em campo e corresponde à produção do dia 19/09/2024.

Conforme as Figura 20 a) e b), as amostras foram divididas conforme as porcentagens m/m % de 5%,10%,20%,30% 40%,50%,60% de resina PET (amorfa e semicristalino) PCR em resina PET (amorfa e semicristalino) Virgem, além de 100% de resina PET (amorfa e semicristalino) virgem e 100% de resina PET (amorfa e semicristalino) PCR. As misturas foram realizadas no Laboratório Químico da empresa, localizada no município de Ipojuca, na PE-60, KM 10, na zona industrial do bairro Suape.

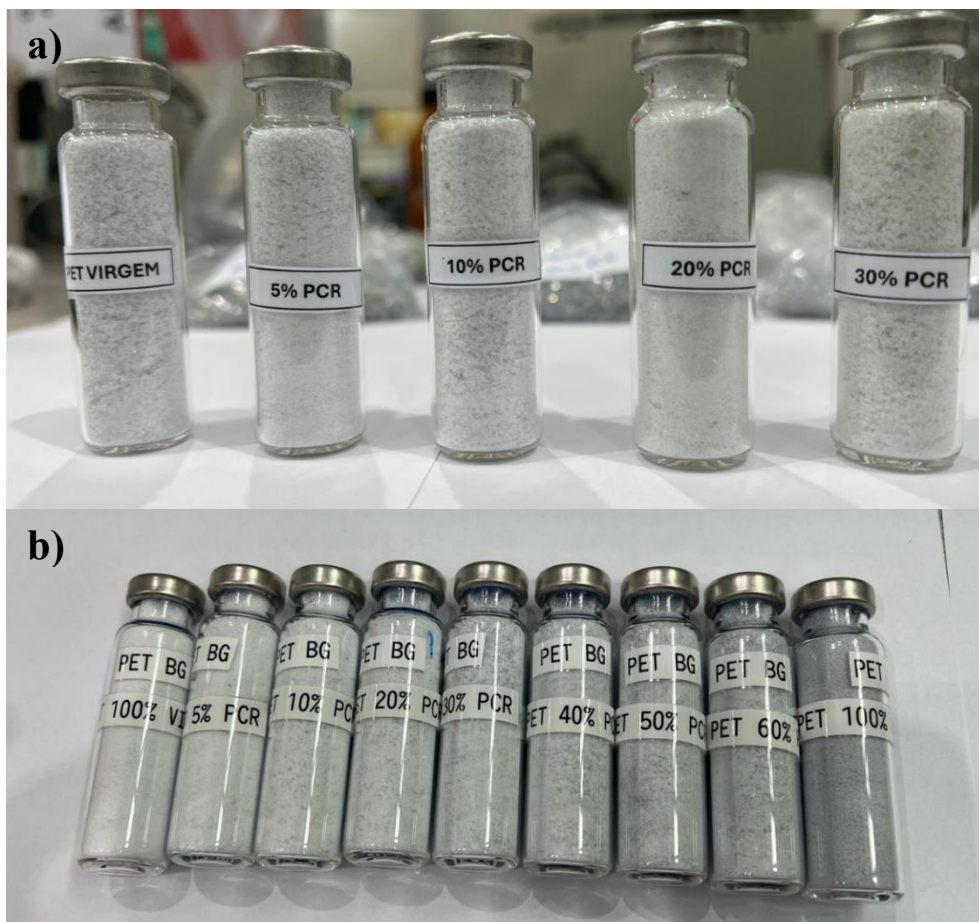
Figura 20 – a) Misturas de PET amorfo Virgem x PET amorfo PCR e b) Misturas de PET semicristalino Virgem x PET semicristalino PCR.



Fonte: O autor, 2024.

Figura 21 a) e b), são apresentadas as amostras moídas através de um moinho criogênico, que possui propriedades de impedir o aquecimento do material durante o processo de moagem, preservar as estruturas e propriedades físicas e a redução do atrito e da aglomeração, além de garantir certa homogeneidade. As amostras moídas foram colocadas em vials de vidro.

Figura 21 – a) Misturas moídas de PET amorfo Virgem x PET amorfo PCR e b) Misturas moídas de PET semicristalino Virgem x PET semicristalino PCR.



Fonte: O autor, 2024

3.2.2. Reagentes, Materiais e Procedimentos.

Na Tabela 1 podemos observar as metodologias e os equipamentos utilizados de acordo com o parâmetro analítico.

Tabela 1 – Metodologias e equipamentos utilizados.

Parâmetro analítico	Metodologia	Equipamento/ Modelo	Empresa	Origem
Viscosidade Intrínseca	ASTM D 4603-03	Viscosímetro/ <i>Lauda</i> PV 36	<i>Lauda</i>	Alemanha
Cor L*a*b*	<i>Lurgi Zimmer</i> – Método nº WN-B010-7136	Colorímetro/ <i>LabScan XE</i>	<i>Hunterlab</i>	Estados Unidos
Acetaldeído	<i>Lurgi Zimmer</i> – Método nº WN-B010-9013	Cromatógrafo Gasoso - <i>Head Space/ 7890A</i>	<i>Agilent Technologies</i>	Estados Unidos
Ponto de fusão	<i>Lurgi Zimmer</i> – Método nº WN-B010-7089	DSC/ <i>DSC 1 STAR System</i>	<i>Mettler Toledo</i>	Suíça
Cristalinidade	<i>Lurgi Zimmer</i> – Método nº WN-B010-7089	DSC/ <i>DSC 1 STAR System</i>	<i>Mettler Toledo</i>	Suíça
Limoneno	APPA COMÉRCIO E SERVIÇOS LTDA	Cromatógrafo Gasoso /8890 Detector de massa/ 5977C	<i>Agilent Technologies</i>	Estados Unidos
Umidade	AP-QAR-SOP-0013	Balança de umidade/ HR83-P	<i>Mettler Toledo</i>	Suíça
Minidisco	DAK-QAR-SOP-0028	Colorímetro/ <i>Ultrascan VIS</i>	<i>Hunterlab</i>	
Cor L*a*b* Haze	DAK-QAR-SOP-0029	Mini injetora de moldagem por injeção/ 55-1CALMH	EM - <i>Electro-matic integrated</i>	Estados Unidos
<i>Sorter optico</i>	DAK-TECH-SOP-5420	<i>Sorter Optico/ Calpas X</i>	<i>Calpas</i>	Coreia do Sul

Fonte: O autor, 2025.

3.2.1.1. Viscosidade Intrínseca.

A metodologia aplicada foi a ASTM D 4603-03 (Tabela 2 – Limites de Especificação de Viscosidade), este método é para determinação da viscosidade intrínseca do PET solubilizado a uma concentração de 0,50% em uma solução de Fenol/1,1,2,2-tetracloroetano

utilizando viscosímetro capilar e o equipamento utilizado foi o viscosímetro LAUDA (ASTM,2011).

Os reagentes utilizados foram Fenol (C_6H_5OH); 1,1,2,2-tetracloroetano ($C_2H_2Cl_4$); solução 60/40 de Fenol/1,1,2,2-tetracloroetano (m/m); acetona PA. (C_3H_6O) e cloreto de metileno (Diclorometano) PA (CH_2Cl_2).

Os materiais utilizados foram uma balança analítica com precisão de 0,0001 g; viscosímetro capilar *Ubbelohde*, tipo 1B; banho termostático com abertura para viscosímetro; sistema para medição automática de tempo de escoamento; termômetro 28,6 a 31,4 °C → ASTM 118C com certificado; bloco aquecedor/agitador com controle de temperatura; balão volumétrico de 50 mL calibrado, com tampa; moinho de facas com peneira de 20 *mesh*; aspirador de pó e *dispensette* de 50 mL, Brand ou similar.

O procedimento experimental foi conduzido utilizando balões volumétricos secos de 50 mL. Em cada balão, foram pesadas amostras em duplicata, com massas variando entre 0,2475 g e 0,2525 g, empregando uma balança analítica com precisão de $\pm 0,0002$ g. Posteriormente, adicionou-se uma barra de agitação magnética em cada balão e 25 mL da mistura solvente composta por fenol e 1,1,2,2-tetracloroetano na proporção 60/40 (v/v). Os balões, fabricados com vidro borossilicato (DURAN®), foram então posicionados sobre uma placa de aquecimento com agitação magnética, previamente ajustada para uma temperatura de 110 ± 10 °C. O sistema foi mantido sob aquecimento e agitação por 15 minutos, até a completa dissolução das amostras. Em seguida, os balões foram retirados da placa e deixados em repouso até atingirem aproximadamente a temperatura ambiente. Com o auxílio de um bastão magnético, as barras de agitação foram cuidadosamente removidas. Tanto as barras quanto o bastão foram lavados com o solvente puro, sendo o líquido de lavagem direcionado de volta aos respectivos balões. Após isso, foi adicionado solvente até cerca de 1 cm abaixo do menisco. Os balões foram então imersos em um banho térmico com temperatura estabilizada em $30 \pm 0,1$ °C, permanecendo por 10 minutos para garantir a homogeneização térmica da solução. Posteriormente, os balões foram tampados e invertidos cuidadosamente para permitir que as gotas aderidas ao interior do gargalo escorressem para a solução. O volume foi completado até o menisco com o solvente puro, seguido de homogeneização da solução.

A solução preparada foi transferida para um viscosímetro do tipo *Ubbelohde*, previamente limpo e seco, utilizando um funil acoplado ao tubo capilar mais largo. O enchimento foi realizado até atingir o nível entre as marcas localizadas no bulbo superior. Em seguida, o viscosímetro foi inserido em um banho térmico mantido a $30 \pm 0,1$ °C, onde permaneceu por no mínimo 15 minutos para que a solução atingisse o equilíbrio térmico. Após

esse período, foram registradas as medições dos tempos de escoamento, sendo realizadas em triplicata. Os resultados foram expressos com base na média aritmética dos tempos obtidos.

Conforme a equação 2, determinou a viscosidade intrínseca (η), utilizando a equação de *Billmeyer* como segue:

$$\eta = 0,25 (\eta_r - 1 + 3 \times \ln \eta_r) / C \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

η_r = viscosidade relativa = t / t_0 .

t = tempo médio de escoamento da solução com polímero (s).

t_0 = tempo médio de escoamento do solvente (s).

C = concentração do polímero na solução (g/dL).

Tabela 2 – Limites de Especificação de Viscosidade Intrínseca.

Resinas	Parâmetro/ Unidade	LIE ¹	LSE ²
Amorfo	Viscosidade /	0,555	0,635
Semicristalino	dl/g	0,830	0,860

¹Limite Inferior de Especificação; ² Limite Superior de Especificação.

3.2.1.2. Cor $L^*a^*b^*$

A metodologia aplicada *Lurgi Zimmer* – Método nº WN-B010-7136, a cor da amostra é medida a partir de chips, por uma medição de reflexão, usando um espectrofotômetro com uma geometria de medição 45°/0° (em iluminação 45°/observador 0°), com iluminação padrão D65/10°. Como resultado da medição, é obtido três coordenadas X, Y e Z de um espaço de cor tridimensional. A partir destes valores, a cor $L^*a^*b^*$ (CIELAB) ou outro valor de cor pode ser calculada e o equipamento utilizado foi o LabScan XE - Espectrocolorímetro de varredura. (CIE, 2004)

A metodologia CIELAB $L^*a^*b^*$ (Tabela 3 – Limites de Especificação de Cor $L^*a^*b^*$) é um sistema de cores desenvolvido pela Comissão Internacional de Iluminação (CIE - *Commission Internationale de l'Éclairage*) em 1976 (CIE, 1976), e é amplamente utilizado para a definição e a medição de cores. O CIELAB é um modelo de cor perceptual, ou seja, a distância entre cores no espaço de cor CIELAB corresponde de forma aproximada à percepção visual dessas cores pelo olho humano (CIE, 2004).

Os materiais empregados para a análise colorimétrica foram: placa padrão preta, placa padrão branca, *black cover* e copo de vidro para medição. O procedimento consistiu inicialmente no preenchimento do copo de medição, previamente limpo, com a amostra, procurando minimizar a presença de espaços vazios. A compactação da amostra foi realizada por meio de leves batidas do fundo do copo contra uma base de cortiça ou plástico, garantindo o correto assentamento do material. Em seguida, o copo contendo a amostra foi posicionado sobre o campo de leitura do colorímetro, dando início ao processo de medição. Os valores das coordenadas de cor $L^*a^*b^*$ foram obtidos utilizando iluminante padrão D65 e ângulo de observação de 10°. A amostra foi girada manualmente sobre o campo de medição e novas leituras foram realizadas, totalizando cinco medições por amostra, a fim de garantir maior representatividade e reprodutibilidade dos dados. Os valores médios das coordenadas $L^*a^*b^*$ foram calculados e analisados por meio de equações matemáticas específicas, conforme a metodologia estabelecida para a determinação da cor no sistema CIELAB.

Tabela 3 – Limites de Especificação de Cor $L^*a^*b^*$

Resinas	Parâmetro/ Unidade	LIE ¹	LSE ²
Amorfo	L*	49,0	59,0
	a*	Não possui	Não possui
	b*	0,0	-4,0
Semicristalino	L*	76,0	Não possui
	a*	Não possui	Não Possui
	b*	-5,0	-1,0

¹Limite Inferior de Especificação; ² Limite Superior de Especificação.

3.2.1.3. Acetaldeído.

A metodologia aplicada *Lurgi Zimmer* – Método nº WN-B010-9013 (Tabela 4 – Limites de Especificação de Acetaldeído.), o acetaldeído é determinado por cromatografia gasosa utilizando-se a técnica de injeção por *Headspace*. O Acetaldeído é extraído da amostra por aquecimento em um vaso fechado e um volume conhecido do gás é injetado no cromatógrafo para a determinação da concentração e o equipamento utilizado foi o Cromatógrafo Gasoso com *Headspace* (RACANELLI, 2020)

Os reagentes utilizados foram acetaldeído PA (H_3CCOH); Nitrogênio (N_2); Hidrogênio (H_2), água desmineralizada; nitrogênio líquido; ar sintético e hélio. Os materiais utilizados foram uma balança analítica para 0,0001 g; cromatógrafo gasoso para coluna capilar, FID, sistema de injeção por *Headspace* – *Combi Pal*; coluna capilar BP 20 (Polietileno Glicol) 25m * 0,53mm * 2 µm filme; triturador centrífuga com peneira 1 mm; frascos *Headspace* de

20 mL com lacre de alumínio imantado e septos de PTFE/borracha, lacrador e delacrador para frascos *Headspace* e materiais gerais para uso em laboratório.

Os seguintes parâmetros do *Headspace* e Cromatógrafo gasoso foram utilizados:

Parâmetros do Headspace:

Seringa	2,5 mL – HS
Ciclo	Macro HS-OL4-V2
Volume de injeção	500 µL
Temperatura de incubação	150 °C
Tempo de incubação	60 min. (10 min. para calibração)
Temperatura da seringa	100 °C
Velocidade do agitador	500 rpm
Injetor	GC Inj1
Velocidade de injeção	500 µL/s

Parâmetros do Cromatógrafo gasoso:

Coluna capilar	BP 20 - 25 m * 0.53 mm I.D. * 2 µm filme.
Gás de arraste	Hélio
Gás de chama	Hidrogênio e Ar Sintético.
Temperatura do forno	Inicial 50°C por 3 min.- 30°C/min. até 200°C por 2 min.
Temperatura do Injetor	200 °C.
Temperatura do Detector	250 °C.
Pressão da coluna	6,956 psi
Razão de <i>Split</i>	2:1

O procedimento consistiu em resfriar a amostra de PET com nitrogênio líquido e, sob esse resfriamento, realizar a moagem utilizando um moinho de facas. Imediatamente após a moagem, foram pesados $0,200 \pm 0,0020$ g da amostra em um frasco de 20 mL, previamente limpo e seco, destinado à análise por *Headspace*, e a massa foi registrada. Em seguida, o frasco foi lacrado e inserido no injetor automático do sistema *Headspace*.

Alternativamente o teor de acetaldeído pode ser calculado conforme a equação 3:

$$\text{Acetaldeído (ppm)} = \frac{C}{P} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

C = massa de Acetaldeído a partir da curva de calibração (μg).

P = massa de amostra (g).

Tabela 4 – Limites de Especificação de Acetaldeído.

Resinas	Parâmetro/ Unidade	LIE ¹	LSE ²
Amorfo	Acetaldeído /	Não possui	120
Semicristalino	ppm	Não possui	2

¹Limite Inferior de Especificação; ² Limite Superior de Especificação.

3.2.1.4. Ponto de Fusão e Cristalinidade.

A metodologia aplicada *Lurgi Zimmer* – Método nº WN-B010-7089, este método de teste descreve um procedimento geral para a operação do Calorímetro Diferencial de Varredura (DSC) para medir a temperatura de transição vítrea (T_g), temperatura de fusão (T_m), temperatura de cristalização (T_c) e entalpia de fusão (ΔH_m) e cristalização (ΔH_c); e, portanto, o percentual de cristalinidade dos materiais de polietileno tereftalato (PET) e o equipamento utilizado foi DSC (*Diferencial Scanning Calorimeter*) (BANNACH et al., 2011).

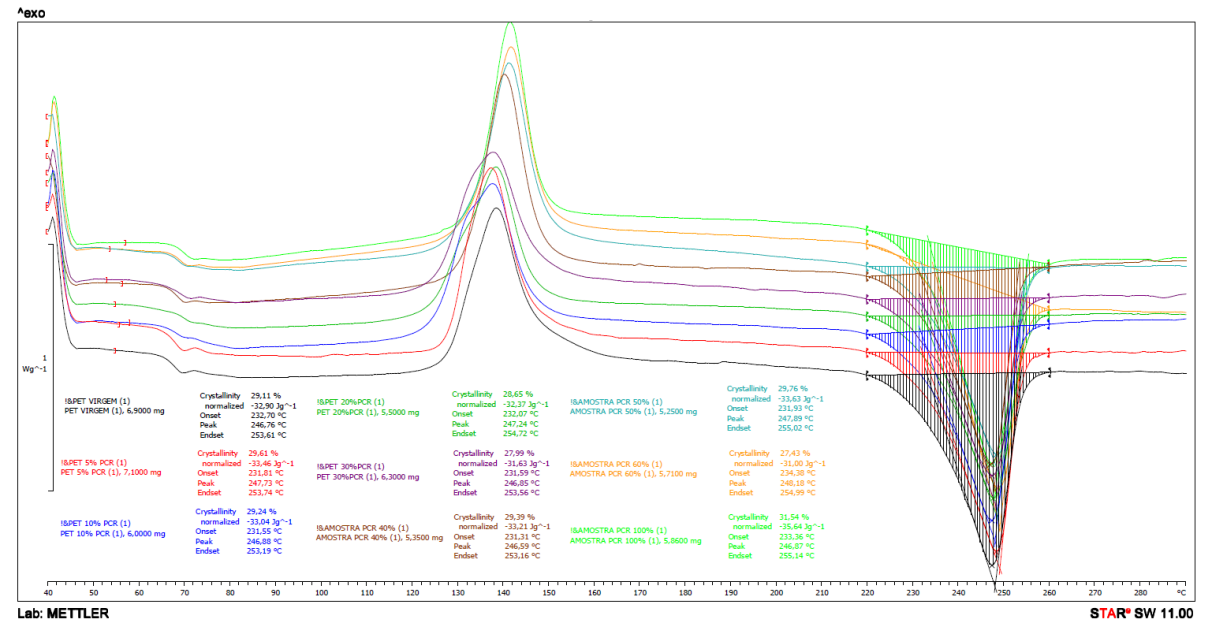
Os materiais utilizados foram uma balança analítica para 0,00001 g; prensa para fechamento dos cadinhos; cadinhos de alumínio com tampa e pino (padrão 40 μL) e pinça. O procedimento consistiu em pesar entre 5 e 8 mg da amostra, com aproximação de 0,1 mg, em um cadinho de alumínio (com limite máximo de 10 mg para esse tipo de cadinho). Em seguida, foi feito um pequeno orifício na tampa para permitir o contato da amostra com o gás de purga, e o cadinho foi fechado. Quando a temperatura inicial foi atingida, o cadinho contendo a amostra de PET foi inserido na célula e o forno foi fechado. Após a conclusão da medição, os resultados foram obtidos por meio do tratamento gráfico do termograma gerado."

Em relação as condições analíticas do calorímetro, um fluxo constante de nitrogênio de 50 mL/min foi ajustado para purgar a célula de medição. Durante a corrida, a amostra foi aquecida a uma temperatura entre 40 e 50 °C acima do ponto de fusão com a seguinte

programação: temperatura inicial de 40 °C, taxa de aquecimento de 20 °C/min e temperatura final de 290 °C/min.

As temperaturas de cristalização e fusão são calculadas a partir do pico máximo (Tabela 5 – Limites de Especificações de Ponto de Fusão e Cristalinidade.). Para cálculo do % de Cristalinidade, integrou o pico da temperatura de fusão. Para amostras de PET, integrou o intervalo de 220 °C a 260 °C. No menu do equipamento, selecionou ‘Crystallinity’. Utilizou o valor de entalpia 113 J/g para obter o resultado da cristalinidade em percentual. Nas Figura 22 e 23 estão os termogramas sobrepostos de cada concentração % PET PCR. Nas Tabela 20 e 21 do apêndice estão as massas utilizadas, temperaturas iniciais (*onset*), de picos (*peak*) e finais (*endset*) e as entalpias.

Figura 22 - Ponto de fusão e cristalinidade. Termogramas comparativos entre PET amorfo virgem e PET amorfo PCR.



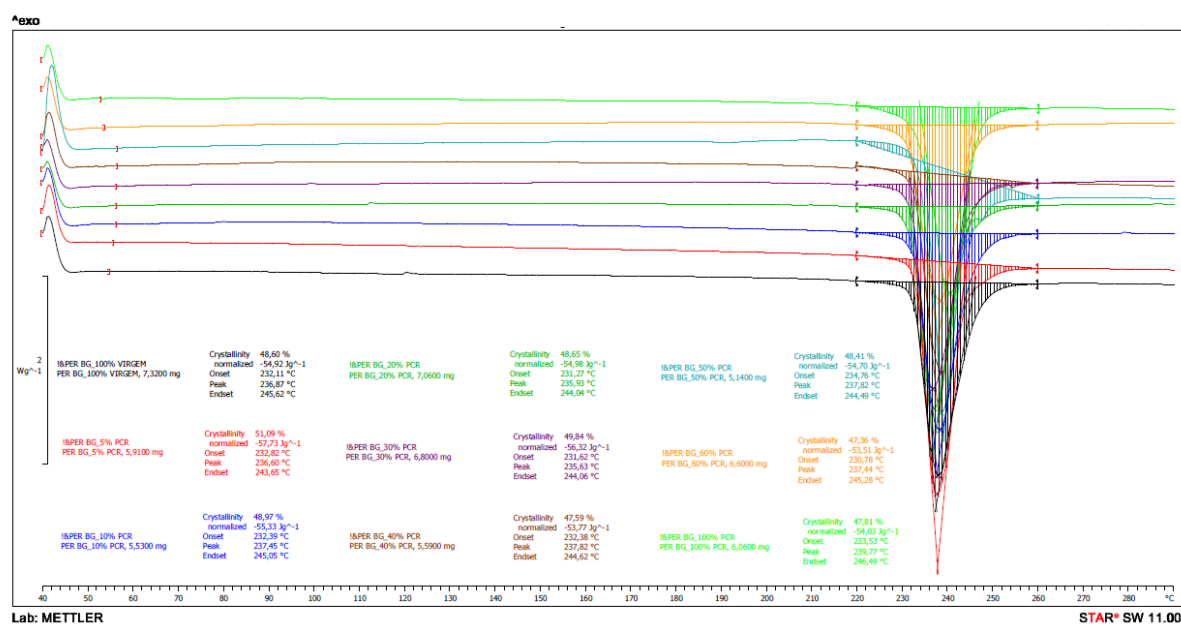
Fonte: O autor,2025

Tabela 5 – Limites de Especificações de Ponto de Fusão e Cristalinidade.

Resinas	Parâmetro/ Unidade	LIE ¹	LSE ²
Amorfo	Ponto de fusão e	Não possui	Não possui
Semicristalino	Cristalinidade / °C	Não possui	Não possui

¹Limite Inferior de Especificação; ² Limite Superior de Especificação.

Figura 23 - Ponto de fusão e cristalinidade. Termogramas comparativos entre PET semicristalino virgem e PET semicristalino PCR.



Fonte: O autor, 2025.

3.2.1.5. Limoneno.

A metodologia aplicada é o POP (Procedimento Operacional Padrão) 022, determinação de Acetaldeído, Limoneno e Benzeno residual em partículas de PET - APPA COMÉRCIO E SERVIÇOS LTDA – Revisão 20/04/2021. A análise do limoneno (Tabela 6 – Limites de Especificação de Limoneno.) por cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (CG-EM) é uma técnica amplamente utilizada para identificar e quantificar este composto em diversas matrizes, como óleos essenciais e materiais poliméricos e a sua preparação é realizada através de extração por solvente ou *Headspace*, dependendo da natureza da amostra. A sua detecção é através do acoplamento do espectrômetro de massas e a identificação é pela comparação dos espectros de massas obtidos com bibliotecas de espectros, como a NIST, e utilizando índices de retenção de *Kováts* para confirmação adicional da identidade do composto. (SILVA, 2017).

Os reagentes utilizados foram Nitrogênio Líquido; Hélio (He) e Nitrogênio (N₂). Os materiais utilizados foram vials de 20ml; septos de silicone PTFE 20x mm; lacres de alumínio de 20 mm; alicate para lacre; microseringa 10 µL; balança analítica, com resolução de 0,0001 g; moedor de amostras; espátula e refrigerador para armazenagem.

O procedimento foi iniciado com a imersão de aproximadamente 5 g da amostra em nitrogênio líquido, com o objetivo de facilitar sua trituração. Em seguida, a amostra foi triturada em um moinho criogênico. Após esse processo, 1 g da amostra triturada foi pesado e transferido

para um vial, que foi selado com um septo e lacrado. Por fim, o vial foi colocado no injetor automático do CG-MS

Tabela 6 – Limites de Especificação de Limoneno.

Resinas	Parâmetro/ Unidade	LIE¹	LSE²
Amorfo	Limoneno /	Não possui	Não possui
Semicristalino	ppm	Não possui	Não possui

¹Limite Inferior de Especificação; ² Limite Superior de Especificação.

3.2.1.6. Umidade.

Para a determinação da Umidade (Tabela 7 – Limites de Especificação de Umidade.) a metodologia AP-QAR-SOP-0013 - *Determination of Moisture in PET Resins* foi empregada. A amostra é colocada em uma cápsula de alumínio e secada em uma balança para determinação de umidade até peso constante e o equipamento utilizado foi um analisador de umidade HR83 (ABNT NBR 13442,1995).

Os materiais utilizados incluíram cápsulas de alumínio. O procedimento consistiu em pesar aproximadamente 5 gramas da amostra e ajustar o equipamento com uma temperatura de secagem de 105 °C e tempo de análise de 20 minutos.

Utilizando como cálculo:

$$\text{Umidade} = \frac{\text{massa da amostra (g)} - \text{massa da amostra seca (g)}}{\text{massa da amostra (g)}}$$

Tabela 7 – Limites de Especificação de Umidade.

Resinas	Parâmetro/ Unidade	LIE¹	LSE²
Amorfo	Umidade /	0,08	0,20
Semicristalino	%	0,08	0,20

¹Limite Inferior de Especificação; ² Limite Superior de Especificação.

3.2.1.7. Minidisco Cor L*a*b* Haze.

As metodologias aplicadas DAK-QAR-SOP-0028 - *Injection Molding of PET Discs with Mini-Jecto* e DAK-QAR-SOP-0029 - *Measurement and Monitoring of Color and Haze of Injection Molded PET Discs* e os equipamento utilizados para confecção e leitura dos

minidiscos foram uma mini injetora de moldagem por injeção, modelo 55-1CALMH e um colorímetro *UltraScan VIS* respectivamente.

A metodologia DAK-QAR-SOP-0028 descreve uma quantidade de resina PET é seca em estufa a 170 °C por 2 horas, em seguida, moldadas, por injeção, em discos com 40 mm de diâmetro, por aproximadamente 2,5 mm de espessura para teste de cor $L^*a^*b^*$ *Haze*, utilizando uma Mininjetora.

A metodologia DAK-QAR-SOP-0029 descreve o procedimento de medição da cor $L^*a^*b^*$ e *Haze* de discos PET moldados por injeção (Tabela 8 – Limites de Especificação de Minidisco Cor $L^*a^*b^*$ *Haze*), com um espectrofotômetro. Um disco de PET transparente, com 40 mm de diâmetro e 2,54 mm de espessura, é preparado por moldagem por injeção em uma Mininjetora. A cor $L^*a^*b^*$ e o *haze* do disco são avaliados com o espectrofotômetro *UltraScan VIS* no modo de transmitância total. A cor é calculada usando a escala de cores CIE 1976 L^* , a^* e b^* (CIELAB) para iluminante D65 e observador de 10 graus. O *Haze* é calculado para iluminante C e observador de 2 graus.

Tabela 8 – Limites de Especificação de Minidisco Cor $L^*a^*b^*$ *Haze*

Resinas	Parâmetro/ Unidade	LIE ¹	LSE ²
Amorfo	L^*	Não possui	Não possui
	a^*	Não possui	Não possui
	b^*	Não possui	Não possui
	<i>Haze</i>	Não possui	Não possui
Semicristalino	L^*	90,0	92,0
	a^*	-0,6	+0,2
	b^*	0,0	+1,6
	<i>Haze</i>	Não possui	+8,7

¹Limite Inferior de Especificação; ² Limite Superior de Especificação.

3.2.1.7.1. Mini injetora.

Os materiais utilizados foram um molde de cavidade dupla da *Electro-Matic Products*; discos de 40 mm de diâmetro por 2,5 mm de espessura e 40 mm de diâmetro por 3,8 mm de espessura; ferramenta de purga *Mini-Jector* da *Electro-Matic Products*; forno de convecção mecânica de ar forçado, ou à vácuo (taxa de troca de ar superior a 25 volumes por hora; *Binder* modelo M115 ou equivalente), micrômetro digital ou paquímetro (resolução de 0,01 mm, *Mitutoyo* Modelo 547-500 S ou equivalente) ; cronômetro (precisão para segundos); formas de

pão de forma (bandejas de pão de 1,5 lb) ou equivalente; espátula de cobre; trapo de algodão e alicate de corte anti-faísca.

O procedimento foi realizado secando 500 g de resina PET semicristalina em uma estufa de convecção mecânica de ar forçado a 170 °C por 2 horas. Conectando / verificando o plugue de alimentação principal, conexão de água e drenagem. Ligando o fluxo de água, energia e aquecedores e verificando as temperaturas traseira / frontal / do bico para 527/545/545 °F, respectivamente, verificando o temporizador de ciclo e o temporizador de injeção para 0:32 e 0:30, respectivamente, aguardando até que os aquecedores atinjam as temperaturas exigidas (~ 30 minutos). Ligando o sistema hidráulico e despejando aproximadamente 250g de chip na tremonha, imediatamente após a retirada da estufa. Realizada a purga do material no dispositivo de purga até que o nível de chip na tremonha alcance o topo da boca de alimentação.

Após isso, realizada a extrusão do polímero para o cilindro levantando o cilindro aproximadamente 2 polegadas. Aguardando 2 minutos e limpando qualquer polímero fluindo da ponta do bico com um pano de algodão e espátula. Inserindo o molde no espaço em V e Injetando o PET fundido no molde com modo automático, removendo o molde do espaço em V e abrindo o molde e removendo as peças moldadas. Inspeccionando os discos moldados quanto a defeitos, inserindo o dispositivo de purga no espaço em V, purgando para esvaziar o polímero restante. Após essas etapas, desligou o hidráulico e os aquecedores e foi deixado a água de resfriamento correr por mais 30 minutos, e depois foi desligada a água de resfriamento.

3.2.1.7.2. *Cor L*a*b* Haze*

Os materiais utilizados foram um medidor de espessura (paquímetro); placa PRETA; placa padrão BRANCA e Trap de luz. O procedimento realizado foi medindo a espessura do disco PET usando um paquímetro. Posicionando o disco PET contra a porta de transmitância de tal forma que o disco cubra inteiramente a porta de transmitância. Fechando a porta do compartimento de transmissão e posicionando a placa branca na porta de reflexão. Após isso inserir as informações com destaque para a espessura do disco. Obteve os valores cor L* a* b* (com iluminante D65 e observador 10°) e Haze (com iluminante C e observado 2°).

3.2.1.8. *Sorter Optico.*

A metodologia aplicada DAK-TECH-SOP-5420 *Black Spec Prevention in PET Manufacturing Best Practices – Global*. O procedimento consistiu na utilização de aproximadamente 1 kg de PET semicristalino 100% PCR no sorter óptico CALPAS X. Após a

inserção do material no equipamento, foi realizada a separação dos contaminantes com base na espessura, utilizando intervalos de 200 micrometro ou 0,2 milímetro.

3.3. ANÁLISE DE DADOS

O controle dos limites superior e inferior de especificação de um produto é uma prática essencial no controle de qualidade, especialmente em processos industriais e na fabricação de produtos. Esses limites definem os intervalos dentro dos quais as propriedades do produto devem ser mantidas para assegurar que ele atenda aos requisitos do cliente e às normas regulamentares (MONTGOMERY, D. C, 2012). Nos gráficos apresentados nos resultados e discussões do capítulo 4, as linhas vermelhas na parte superior e inferior correspondem, respectivamente, ao LSE (Limite Superior de Especificação) e LIE (Limite Inferior de Especificação). Esses limites foram adotados conforme o plano de controle operacional da empresa, de acordo com a área de estudo, e estão detalhados nas Tabelas 2, 3, 4, 7, 8, 9 e 10, conforme o parâmetro analítico (LURGI ZIMMER, 2001).

Foram incluídas as Tabela 15 e 16, contendo o nome das resinas, seus principais parâmetros analíticos e as médias das triplicatas dos respectivos resultados, com base nas Tabela 20 e 21 no apêndice, que apresentam todos os resultados obtidos durante os testes, permitindo uma comparação dos dados. Para a análise estatística dos resultados das triplicatas, foram utilizados o Teste ANOVA (Análise de Variância), que serve para comparar as médias de três ou mais grupos e verificar se existe diferença estatística significativa entre pelo menos um dos grupos. Caso o valor de p seja menor que 0,05, significa que há diferença significativa entre pelo menos dois grupos. Além disso, foi aplicado o Teste de Tukey, realizado após um ANOVA significativo, para comparar par a par os grupos e identificar onde exatamente estão as diferenças.

Foi elaborado um cronograma de execução, com a definição das atividades e os prazos estabelecidos, conforme apresentado na Tabela 18 no apêndice. Os testes de viscosidade, colorimetria, cromatografia gasosa por *Headspace*, calorimetria, gravimetria, sorter óptico e cromatografia gasosa acoplada a espectrometria de massa foram realizados durante a segunda quinzena de outubro de 2024 e a primeira quinzena de novembro de 2024, conforme as Tabelas 19 e 20 no apêndice, que apresentam as principais análises referentes ao PET amorfo virgem, PET amorfo PCR, PET semicristalino virgem e PET semicristalino PCR, respectivamente, e suas respectivas massas, que foram preparadas conforme as Tabelas 21 e 22 no apêndice.

CAPÍTULO IV : RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. RESULTADOS PET AMORFO VIRGEM X PET AMORFO PCR.

A Tabela 9 apresenta a média das triplicatas dos resultados analíticos PET amorfo Virgem x PET amorfo PCR, além das proporções m/m% estabelecidas, os parâmetros analíticos e suas concentrações.

Tabela 9 - Média das triplicatas dos resultados analíticos PET amorfo Virgem x PET amorfo PCR.

Amostras / Parâmetros	IV ¹ dl/g	Cor L*a*b*			AA ² ppm	PF ³ °C	CRIS ⁴ %	LIM ⁵ ppb	UM ⁶ %
		L*	a*	b*					
PET Virgem	0,60	52,78	-0,71	-3,18	63,33	247,12	29,46	1,67	0,17
PET 5% PCR	0,62	52,52	-0,93	-2,26	57,28	247,04	29,36	2,86	0,17
PET 10% PCR	0,61	51,79	-1,04	-1,33	49,41	247,41	29,34	2,64	0,19
PET 20% PCR	0,61	49,75	-1,57	1,16	41,23	246,92	28,55	5,29	0,23
PET 30% PCR	0,61	50,48	-1,42	1,37	36,49	246,52	29,36	8,91	0,21
PET 40% PCR	0,65	48,32	-1,76	3,14	36,79	247,52	29,43	9,17	0,25
PET 50% PCR	0,63	46,93	-1,88	4,29	31,27	247,55	29,56	10,52	0,29
PET 60% PCR	0,64	46,45	-2,00	5,15	25,03	246,89	30,07	13,38	0,28
PET 100% PCR	0,63	42,67	-2,50	8,42	2,59	247,83	28,87	13,88	0,40

¹-Viscosidade intrínseca; ²- Acetaldeído; ³- Ponto de Fusão; ⁴- Cristalinidade; ⁵- Limoneno; ⁶- Umidade

4.1.1. Análises dos parâmetros analíticos AMORFO VIRGEM X PET AMORFO PCR

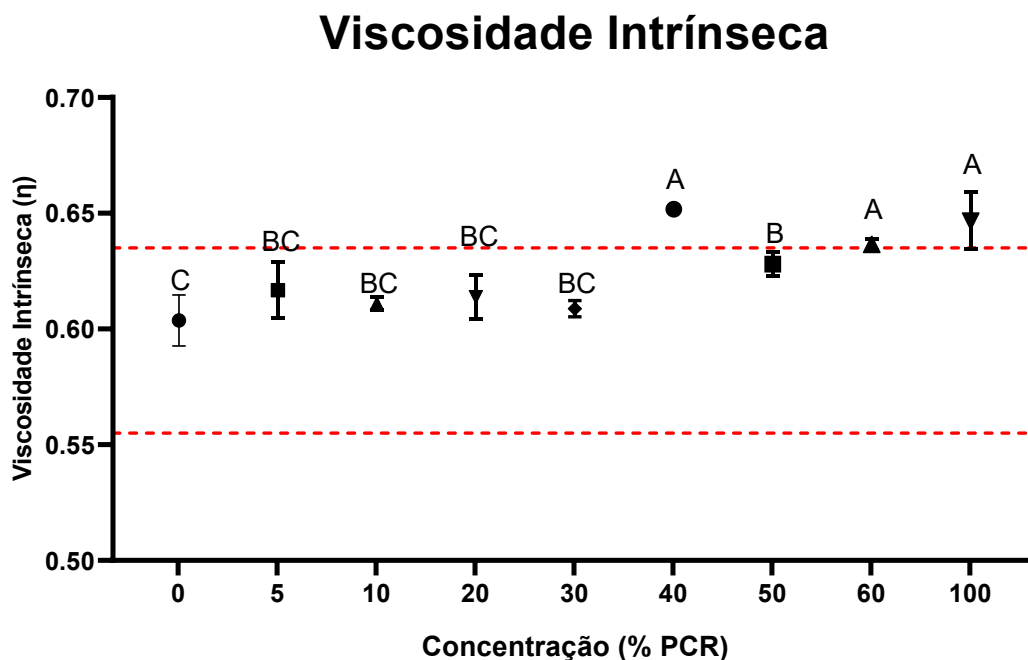
4.1.1.1. Viscosidade Intrínseca.

A Tabela 9 apresenta os resultados em relação a viscosidade intrínseca realizado com Resina PET amorfo Virgem x PET amorfo PCR. A viscosidade intrínseca (η) apresentou aumento progressivo com a elevação da concentração de PCR, conforme ilustrado na Figura 24. As formulações com 40%, 60% e 100% de PCR apresentaram os maiores valores médios de η , estatisticamente superiores ($p < 0,05$) ao controle (0%), que exibiu o menor valor observado. Essas três concentrações não diferiram significativamente entre si e apresentaram valores fora do intervalo considerado adequado.

A amostra com 30% de PCR apresentou valor intermediário, significativamente inferior às concentrações mais elevadas, mas superior ao controle, permanecendo dentro da faixa adequada. As formulações com 5%, 10% e 20% não diferiram significativamente entre si, mas apresentaram valores superiores ao controle e inferiores às concentrações mais altas,

também dentro do intervalo aceitável. A formulação com 50% de PCR, apesar de não estar entre os maiores valores de η , permaneceu dentro da faixa considerada adequada.

Figura 24 - Gráfico dos resultados de Viscosidade PET amorfo Virgem x PET amorfo PCR.



Fonte: O autor, 2024

De acordo com Marcelo, Gomes e Marangoni Júnior (2025), em um estudo conduzido nos Estados Unidos com filmes de PET contendo diferentes proporções de PET reciclado pós-consumo (PET-PCR) demonstrou que o aumento na fração de resina reciclada está associado à redução da viscosidade intrínseca (IV). Esse comportamento é atribuído à presença de contaminantes que geram componentes ácidos, os quais catalisam reações de clivagem hidrolítica, resultando na formação de grupos terminais de ácido carboxílico e éster-hidroxila. Esses grupos promovem o encurtamento das cadeias poliméricas, o que justifica a diminuição da IV observada. Entretanto, conforme demonstrado na Figura 24, observa-se um comportamento inverso: a viscosidade intrínseca aumenta com o acréscimo da proporção de resina PET-PCR. Esse fenômeno pode ser explicado pelas características específicas da resina reciclada utilizada no estudo, especialmente considerando que materiais provenientes de garrafas carbonatadas geralmente apresentam viscosidades mais elevadas (WEISSMANN, 2023).

A viscosidade intrínseca pode ser controlada por meio de ajustes operacionais no processo produtivo, como, por exemplo, a redução do vácuo no reator de polimerização,

permitindo que o valor se mantenha dentro dos limites especificados (LURGI ZIMMER, 2001). Dentre os parâmetros operacionais com forte correlação direta ou inversa com a viscosidade, destaca-se a rotação do agitador do reator. A redução dessa rotação influencia diretamente a temperatura da reação, uma vez que a agitação está associada à transferência de energia cinética entre as moléculas. Quanto menor a energia no sistema, menor será o grau de agitação molecular. Essa diminuição na movimentação reduz tanto a frequência quanto a energia das colisões entre as moléculas, o que, por sua vez, diminui a fração de partículas com energia suficiente para superar a barreira de ativação da reação, resultando em uma menor velocidade reacional (ATKINS, 2016).

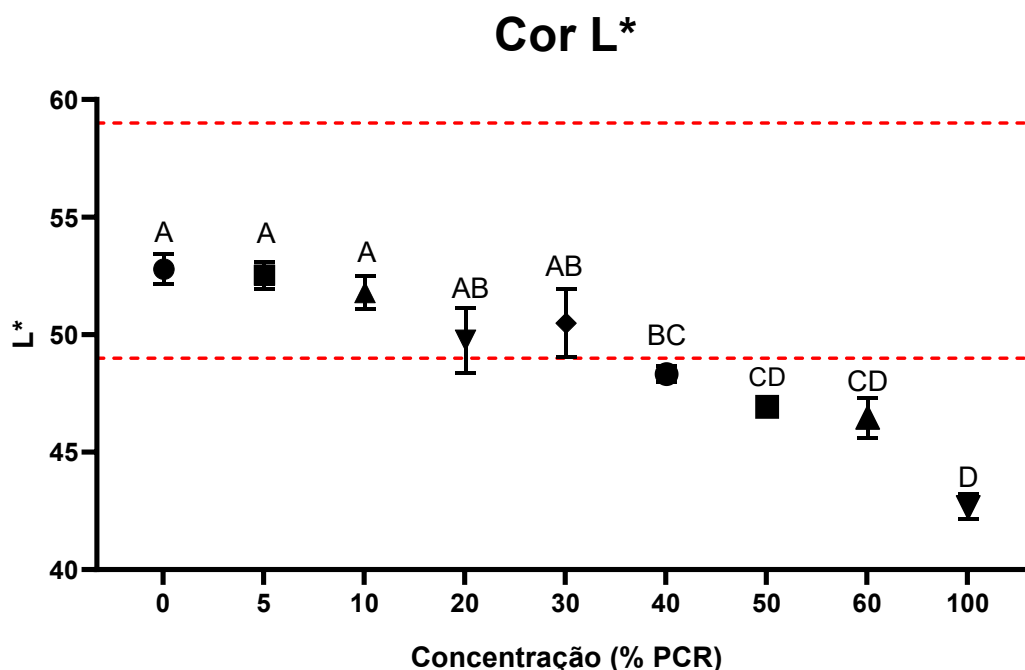
Os catalisadores utilizados na reação de polimerização, como o antimônio (Sb), desempenham um papel fundamental no controle da viscosidade do polímero, uma vez que influenciam diretamente a velocidade da reação. A atuação dos catalisadores sobre a taxa das reações químicas é um dos temas centrais da cinética química. Essas substâncias promovem alterações na velocidade da reação sem serem consumidas no processo, atuando ao oferecer um caminho alternativo com menor energia de ativação. Dessa forma, aceleram a taxa reacional, tornando o processo mais eficiente e controlável (SILVA; PEREIRA, 2021).

*4.1.1.2. Cor $L^*a^*b^*$*

A Tabela 9 apresenta os resultados em relação a cor $L^*a^*b^*$ realizado com resina PET amorfo Virgem x PET amorfo PCR. As Figura 25, 26 e 27 estão os resultados respectivamente. Os valores de cor L^* apresentaram tendência de redução com o aumento da concentração de PCR, conforme demonstrado na Figura 25. As amostras com 0%, 5% e 10% de PCR exibiram os maiores valores de cor L^* , sem diferença estatística significativa entre si ($p < 0,05$). As concentrações de 20% e 30% apresentaram valores intermediários, também sem diferenças significativas em relação às formulações com até 10%, sendo que todas essas concentrações (0% a 30%) apresentaram valores dentro do intervalo considerado adequado.

A partir de 40%, observou-se queda mais acentuada nos valores de cor L^* . A amostra com 40% apresentou luminosidade significativamente inferior às concentrações mais baixas, mas estatisticamente similar às de 20% e 30%. As formulações com 50% e 60% de PCR apresentaram valores significativamente inferiores às concentrações até 30%, enquanto a de 100% resultou no menor valor de cor L^* , diferindo significativamente de todas as demais. As concentrações acima de 30% ficaram fora do intervalo desejado para esse parâmetro.

Figura 25 - Gráfico dos resultados de Cor L* PET amorfo Virgem x PET amorfo PCR.

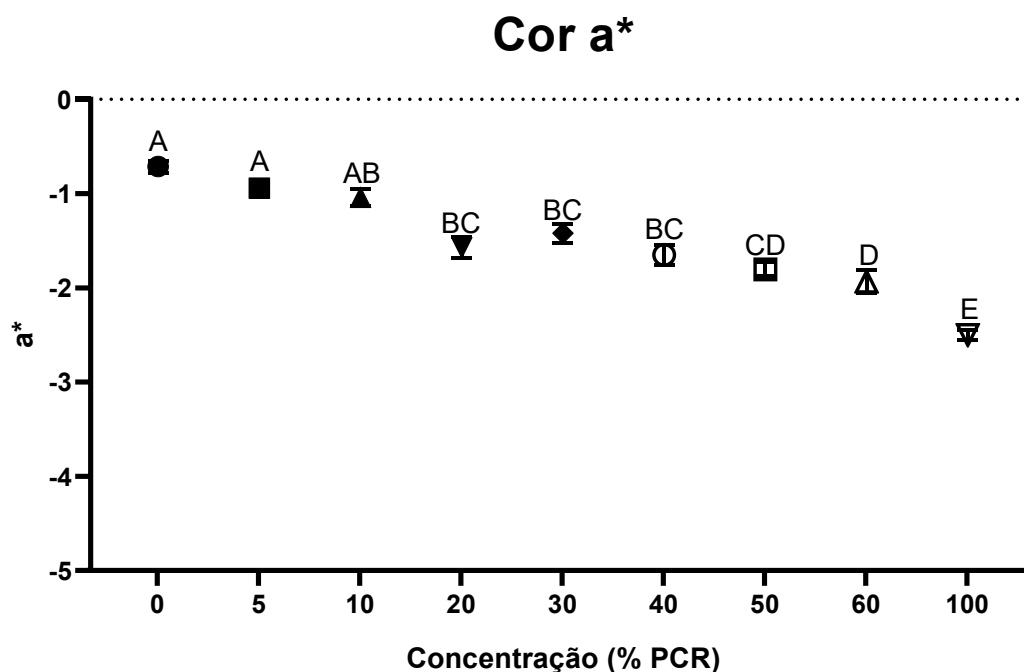


Fonte: O autor, 2024

É factível através de ajustes operacionais no processo, como por exemplo a redução do uso do aditivo *Reheat*, a cor L* ser controlada para dentro do parâmetro de especificação (LURGI ZIMMER, 2001). Um dos parâmetros operacionais mais importantes para o controle da cor L* é a dosagem do aditivo *Reheat* (é incorporado ao PET para melhorar a eficiência do processo de reaquecimento durante a injeção de moldagem por sopro) (MARTINS, 2019), pois o aumento ou a diminuição da vazão desse aditivo no processo controla a cor L*, essa dosagem é feita através de bombas de dosagem (LURGI ZIMMER, 2001).

Os valores de cor a* apresentaram tendência de redução com o aumento da concentração de PCR, conforme ilustrado na Figura 26. As amostras com 0% e 5% de PCR apresentaram os maiores valores de cor a*, sem diferença estatística significativa entre si ($p < 0,05$). A concentração de 10% resultou em valor intermediário, não diferindo significativamente das formulações com até 40% de PCR. As amostras com 20%, 30% e 40% apresentaram valores inferiores aos das concentrações iniciais, mas não diferiram estatisticamente entre si. As amostras com 50% e 60% de PCR exibiram valores significativamente reduzidos em comparação às formulações com até 10% de PCR. Há uma maior tendência do aumento da coloração esverdeada conforme observada na concentração de 100%, que diferiu significativamente de todas as demais concentrações testadas.

Figura 26 - Gráfico dos resultados de Cor a* PET amorfo Virgem x PET amorfo PCR.

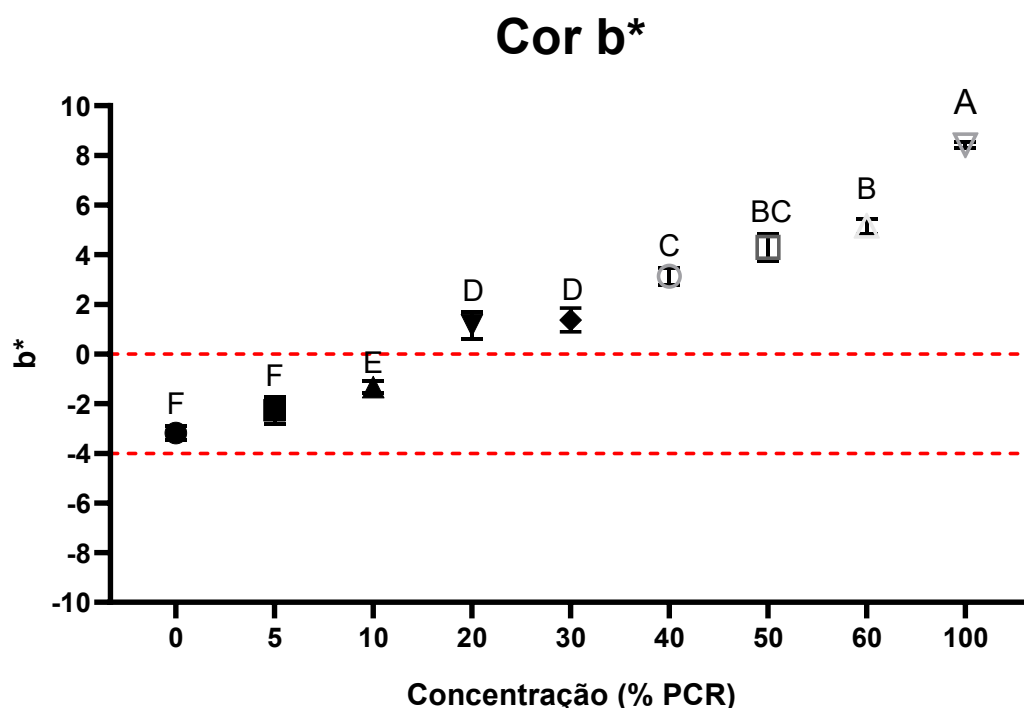


Fonte: O autor, 2024

É viável através de ajustes operacionais no processo, como por exemplo o aumento de corante de coloração vermelha a cor a* ser controlada. Esse parâmetro não possui LSE e LIE, pois não faz parte do laudo de especificação do produto enviado para clientes (LURGI ZIMMER, 2001). Um dos parâmetros operacionais mais importantes para o controle da cor a* é a dosagem do aditivo de corante de cor vermelha (MARTINS, 2019), pois o aumento ou a diminuição da vazão desse aditivo no processo controla a cor a*, essa dosagem é feita através de bombas de dosagem (LURGI ZIMMER, 2001).

De acordo com os resultados de cor b* apresentados na Figura 27, observou-se uma tendência crescente nos valores médios com o aumento da concentração do tratamento. As concentrações de 0%, 5% e 10% apresentaram os menores valores, permanecendo dentro do intervalo considerado adequado. A partir de 20%, os valores aumentaram progressivamente e passaram a diferir significativamente das concentrações mais baixas.

Figura 27 - Gráfico dos resultados de Cor b* PET amorfo Virgem x PET amorfo PCR.



Fonte: O autor, 2024

Através de ajustes operacionais no processo, como por exemplo o aumento de corante de coloração azul a cor b* ser controlada (LURGI ZIMMER, 2001). Um dos parâmetros operacionais mais importantes para o controle da cor b* é a dosagem do aditivo de corante de cor azul (MARTINS, 2019), pois o aumento ou a diminuição da vazão desse aditivo no processo controla a cor b*, essa dosagem é feita através de bombas de dosagem (LURGI ZIMMER, 2001).

Um outro aditivo para minimizar os efeitos da cor b* no processo, é o ácido fosforo, que tem como função garantir a estabilidade térmica do polímero, pois a alteração da cor b*, além da falta ou aumento de dosagem do corante azul, pode ser influenciada pela entrada de oxigênio no processo, ocorrendo assim a degradação térmica do PET, que afeta diretamente a cor b* tornando a cor do chip mais amarelada, assim o ácido fosforo ajuda na redução de reação de oxidação (LURGI ZIMMER, 2001).

4.1.1.3. Acetaldeído

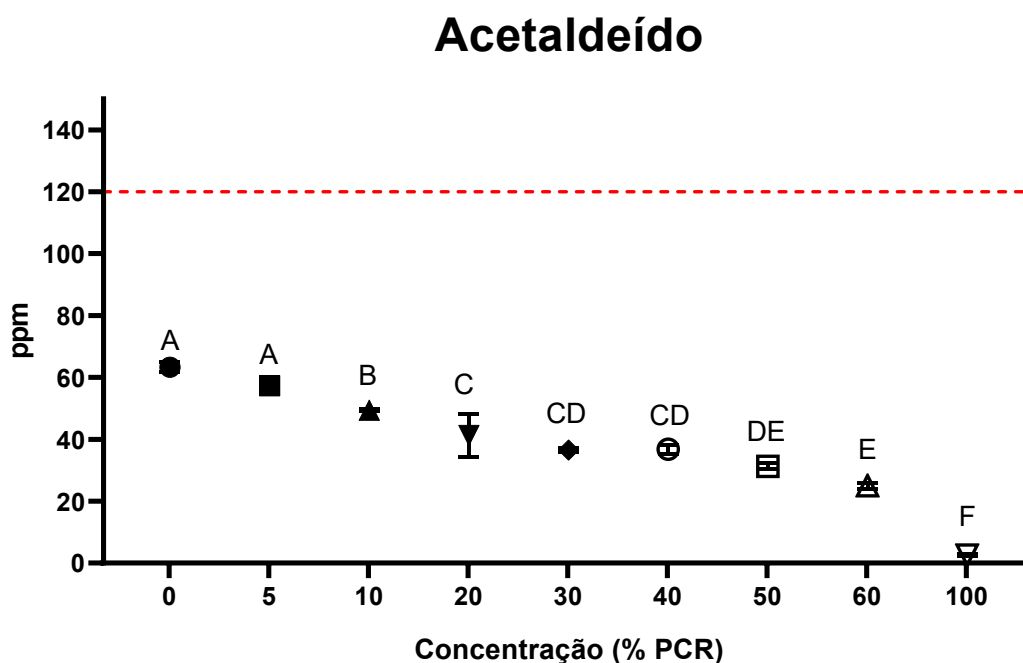
A Tabela 9 mostra os resultados em relação a acetaldeído realizado com resina PET amorfo Virgem x PET amorfo PCR. A concentração de acetaldeído diminuiu progressivamente com o aumento da proporção de PCR, conforme ilustrado na Figura 28. As formulações com

0% e 5% de PCR apresentaram os maiores teores, sem diferença significativa entre si ($p < 0,05$). A partir de 10%, observou-se uma redução significativa em relação às concentrações iniciais.

Com 20% de PCR, os valores continuaram a cair, mantendo diferença significativa em relação às formulações com menores proporções. As concentrações de 30% e 40% apresentaram teores similares, significativamente inferiores às concentrações mais baixas e superiores às subseqüentes.

As amostras com 50% e 60% mostraram novos decréscimos, sendo significativamente inferiores à maioria das formulações anteriores. A menor concentração de acetaldeído foi registrada na formulação com 100% de PCR, diferindo significativamente de todas as demais.

Figura 28 - Gráfico dos resultados de acetaldeído PET amorfo Virgem x PET amorfo PCR.



Fonte: O autor, 2024

Segundo Torres et al. (1999), as resinas de PET recicladas apresentam maior suscetibilidade à degradação hidrolítica, possivelmente devido à presença de contaminantes que geram compostos ácidos. Esses compostos atuam como catalisadores na clivagem das ligações éster presentes na estrutura do PET, promovendo reações que resultam na formação de subprodutos, como o acetaldeído. Esse fenômeno compromete a integridade das cadeias poliméricas, levando à redução da viscosidade intrínseca do material.

Entretanto, conforme ilustrado na Figura 28, observa-se um comportamento inverso: a concentração de acetaldeído diminui com o aumento da proporção de resina PET reciclada pós-

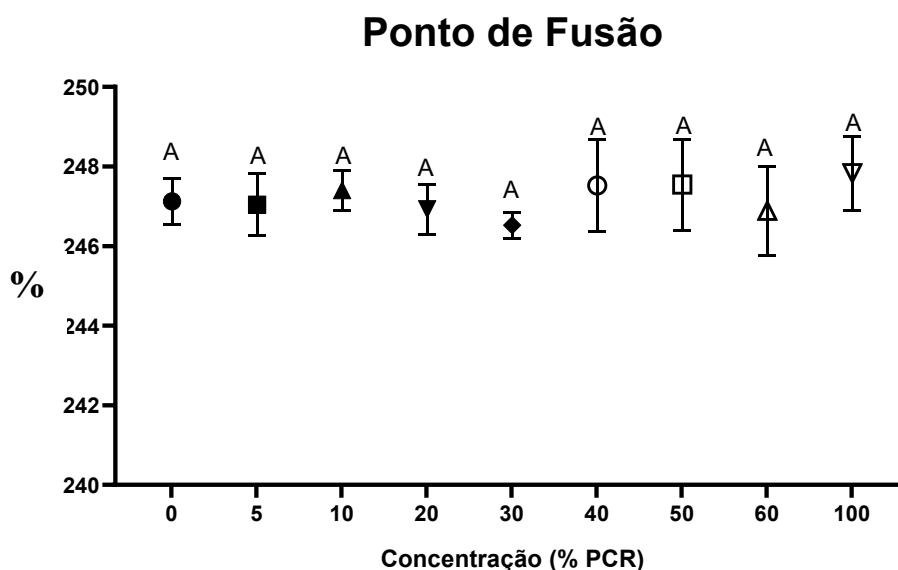
consumo (PET-PCR). Esse resultado pode ser atribuído à eficiência do processo de reciclagem mecânica na remoção de substâncias voláteis como o acetaldeído, especialmente durante as etapas de purificação térmica e desgasificação. Dessa forma, apesar da maior susceptibilidade à degradação, o material reciclado pode apresentar menor teor residual desse composto volátil. (MARCELO; GOMES; MARANGONI JÚNIOR, 2025).

Embora o teor de acetaldeído esteja dentro dos limites especificados, existem ações operacionais implementadas no processo com o objetivo de controlar esse parâmetro, especialmente em situações em que há tendência de aproximação dos limites máximos permitidos. Dentre essas ações, destaca-se o controle da dosagem do aditivo ácido fosfórico. Esse aditivo atua como agente estabilizante, contribuindo para a proteção contra a degradação térmica do PET, uma vez que pode formar complexos com grupos funcionais que iniciam reações de oxidação. (LURGI ZIMMER, 2001).

4.1.1.4. Ponto de Fusão

A Tabela 9 mostra os resultados em relação a ponto de fusão realizado com resina PET amorfo Virgem x PET amorfo PCR. Conforme observado na Figura 29, o ponto de fusão não apresentou variações estatisticamente significativas entre as diferentes concentrações de PCR, mantendo-se constante ao longo de todas as formulações analisadas ($p > 0,05$). Esses resultados indicam que a substituição progressiva por PCR não interferiu nas propriedades térmicas do material com relação à sua temperatura de fusão.

Figura 29 - Gráfico dos resultados de Ponto de Fusão de PET amorfo Virgem x PET amorfo PCR.



Fonte: O autor, 2024

Šudomová et al. (2023) propõem o uso da calorimetria exploratória diferencial (DSC) como uma abordagem eficaz para avaliar a qualidade de resíduos de PET destinados à reciclagem física. Nesse estudo foi avaliado a qualidade de resíduos de polietileno tereftalato (PET) destinados à reciclagem, através das propriedades termofísicas obtidas por DSC classificou as amostras de PET reciclado quanto à sua origem, grau de degradação e adequação para reciclagem. As condições do equipamento foram similares a deste trabalho, pois Šudomová et al. (2023) utilizou o TA Instruments DSC 2500 equipado com um módulo RCS90 e pesou – se Aproximadamente 10 mg de amostra foram pesados em um recipiente aberto (Tzero Aluminium) e transferidos para o instrumento DSC. A medição foi realizada sob um fluxo de nitrogênio de 50 mL min⁻¹ (grau 5,0). O seguinte programa de temperatura foi utilizado: Aquecimento a 5 K min⁻¹ a 320 °C, resfriamento a 0 °C a 5 K min⁻¹, aquecimento a 5 K min⁻¹ a 320 °C e resfriamento novamente a 0 °C a 5 K min⁻¹. Conforme a Tabela 10, a amostra 0% PET PCR corresponde à apresentada na Figura 29. A amostra PET VT representa o PET virgem utilizado no estudo, enquanto a amostra PET VT25 refere-se ao material submetido à degradação controlada a 200 °C por 25 horas em forno de laboratório.

Tabela 10 – Dados comparativos de ponto de fusão entre resinas de diferentes estudos.

DSC (<i>Differential Scanning Calorimeter</i>)					
Identificação	Massa mg	Inicial ° C	Pico ° C	Final ° C	Entalpia J/g
0% PET PCR	6,10	231,89	247,81	253,14	-33,31
PET VT	10,00	238,98	250,84	-	-33,36
PET VT25	10,00	230,98	247,48	-	-29,41

Šudomová et al. (2023) demonstram que, à medida que o tempo de degradação aumenta, ocorre uma alteração no ponto de fusão (temperatura de pico) do PET. Os dados obtidos no estudo mostraram comportamento semelhante ao da amostra com 0% de PET PCR. No entanto, ao se adicionar PET PCR ao PET virgem, mantendo-se as mesmas condições de temperatura — conforme realizado nos experimentos deste trabalho — observou-se uma relativa estabilidade nos resultados, conforme apresentado na Figura 29. Esse comportamento indica que a proporção de PET PCR não exerce influência significativa sobre as propriedades termofísicas do material.

Esse parâmetro não possui um intervalo de especificação definido, porém sua estabilidade ao longo do processo é de extrema importância, especialmente devido à sua relação

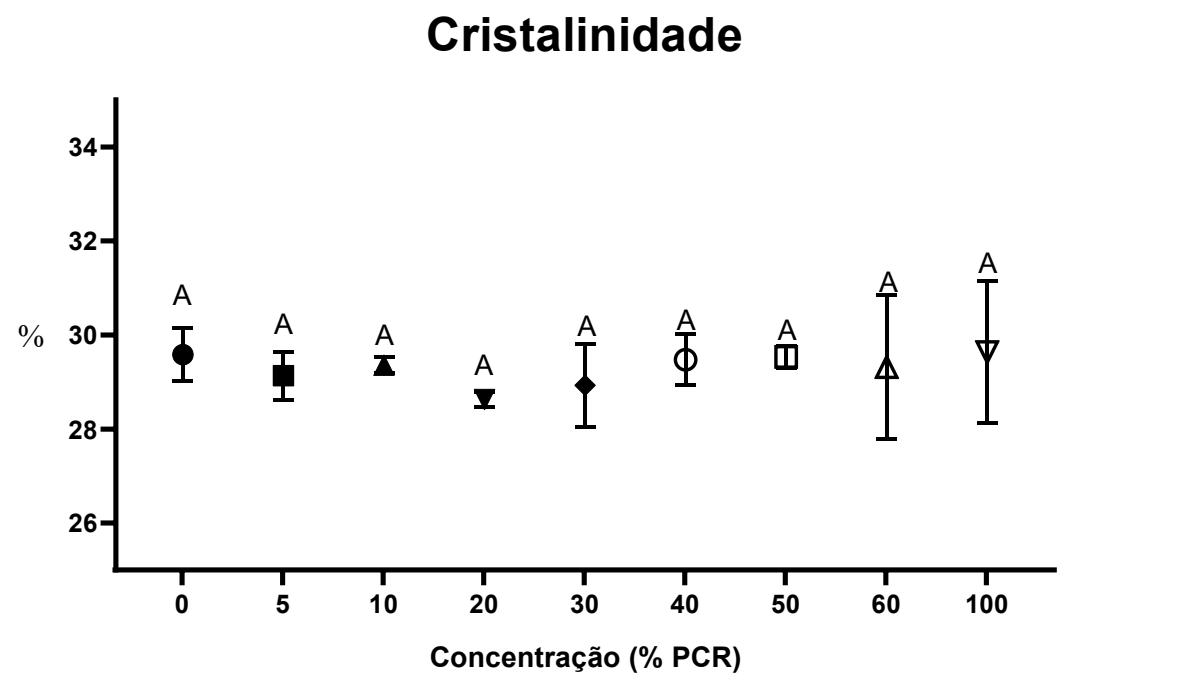
direta com o consumo energético do cliente. O ponto de fusão real do PET pode variar em função de fatores como cristalinidade, presença de impurezas ou aditivos. A estabilização desse ponto garante que o material atinja a temperatura ideal para o processo de fusão, evitando tanto o superaquecimento quanto a fusão incompleta. Um ponto de fusão controlado e estável, conforme evidenciado pelos dados apresentados, assegura que o PET fundido seja homogêneo e com fluidez adequada para preenchimento eficiente dos moldes. Tal controle é fundamental em processos como a injeção e o sopro, nos quais é imprescindível que o material apresente fluidez suficiente para formar peças precisas e isentas de falhas, como garrafas, filmes e outros produtos moldados (MACHADO; OLIVEIRA, 2018).

A interferência de comonômeros como o dietileno glicol (DEG) e o ácido isoftálico (IPA) é um fator relevante que pode impactar significativamente o ponto de fusão do PET. A variação nas concentrações desses elementos resulta em alterações na temperatura de fusão do polímero, sendo, portanto, essencial manter a estabilidade desses comonômeros ao longo do processo produtivo. O teor de DEG e IPA afeta diretamente a cristalinidade do material: concentrações mais elevadas desses comonômeros tendem a tornar o PET mais amorfo, o que reduz seu ponto de fusão. Isso ocorre porque DEG e IPA desorganizam a estrutura das cadeias poliméricas, dificultando a formação de regiões cristalinas bem definidas. Em contrapartida, amostras com menor teor de comonômeros ou maior concentração de unidades de tereftalato de etileno apresentam maior cristalinidade e, conseqüentemente, um ponto de fusão mais elevado, devido à maior organização estrutural das cadeias poliméricas (RODRIGUES; OLIVEIRA, 2019).

4.1.1.5. Cristalinidade

A Tabela 11 apresenta os resultados em relação a cristalinidade realizado com resina PET amorfo Virgem x PET amorfo PCR. De acordo com a Figura 30, os valores de cristalinidade não apresentaram variações estatisticamente significativas entre as formulações com diferentes concentrações de PCR ($p > 0,05$). Isso sugere que a incorporação do PCR não alterou substancialmente a organização estrutural das cadeias poliméricas na matriz do material.

Figura 30 - Gráfico dos resultados de cristalinidade de PET amorfo Virgem x PET amorfo PCR.



Fonte: O autor, 2024

Tabela 11 – Dados comparativos de cristalinidade entre resinas de diferentes estudos (Šudomová et al, 2023).

DSC (Diferencial Scanning Calorimeter)			
Identificação	Massa	Entalpia	Cristalinidade
	mg	J/g	%
0% PET PCR	7,32	-33,31	29,48
100 % PET PCR	6,06	-35,67	31,56
PET VT	10,00	-33,00	29,20
PET RT	10,00	-34,57	30,59

Šudomová et al. (2023), ao proporem o uso da calorimetria exploratória diferencial (DSC) como uma abordagem eficaz para avaliar a qualidade de resíduos de PET destinados à reciclagem física, também analisaram o comportamento da cristalinidade. Conforme a Tabela 11, as amostras 0% PET PCR e 100% PET PCR correspondem aos resultados apresentados na Figura 30. As amostras PET VT representam o PET virgem, enquanto a amostra PET RT refere-se a um PET PCR granulado utilizado no estudo.

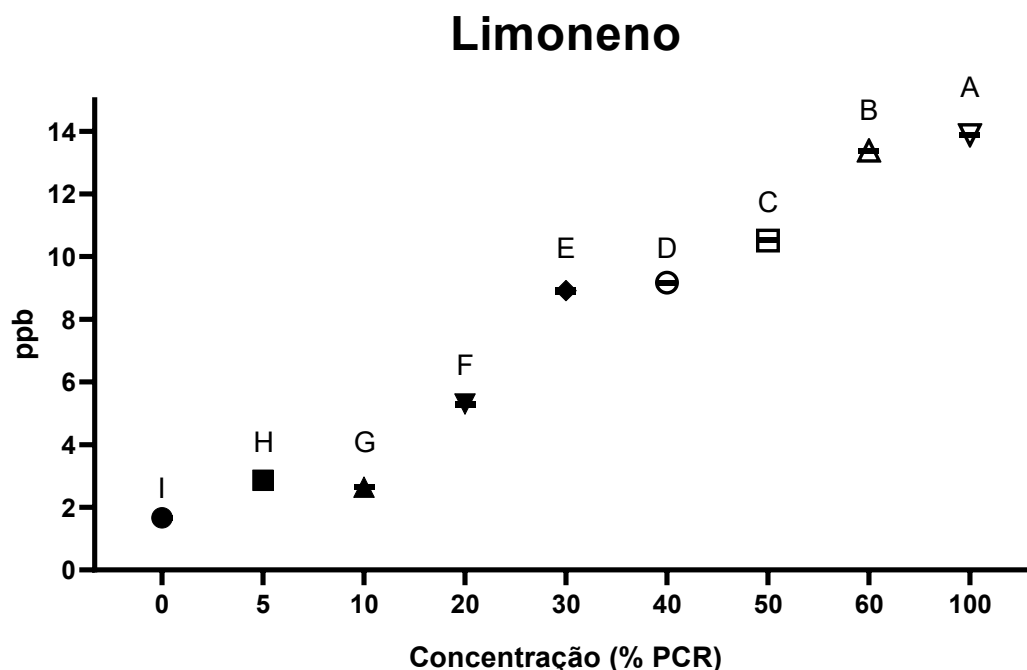
Conforme os dados da Tabela 11 referente as amostras do estudo de Šudomová et al. (2023), a cristalinidade permanece constante independentemente do tipo de resina utilizada, resultado muito similar ao apresentado na Figura 30, correspondente aos experimentos realizados neste trabalho.

Esse parâmetro não possui um intervalo de especificação definido, porém sua estabilidade ao longo do processo é de extrema importância, uma vez que está diretamente relacionada à reorganização das cadeias poliméricas, facilitando o incremento da viscosidade na etapa de polimerização no estado sólido. Conforme os resultados obtidos, observou-se uma certa estabilidade mesmo com a variação da porcentagem de PET PCR incorporado ao PET virgem (LURGI ZIMMER, 2001).

4.1.1.6. Limoneno

A Tabela 9 mostra os resultados em relação a limoneno realizado com resina PET amorfo Virgem x PET amorfo PCR. Conforme observado na Figura 31, os teores de limoneno apresentaram diferenças estatísticas significativas entre todas as formulações, conforme indicado pelas letras distintas ($p < 0,05$). Isso demonstra que a variação na concentração de PCR influenciou diretamente a quantidade de limoneno, com reduções progressivas à medida que a concentração diminuiu.

Figura 31 - Gráfico dos resultados de Limoneno de PET amorfo Virgem x PET amorfo PCR.



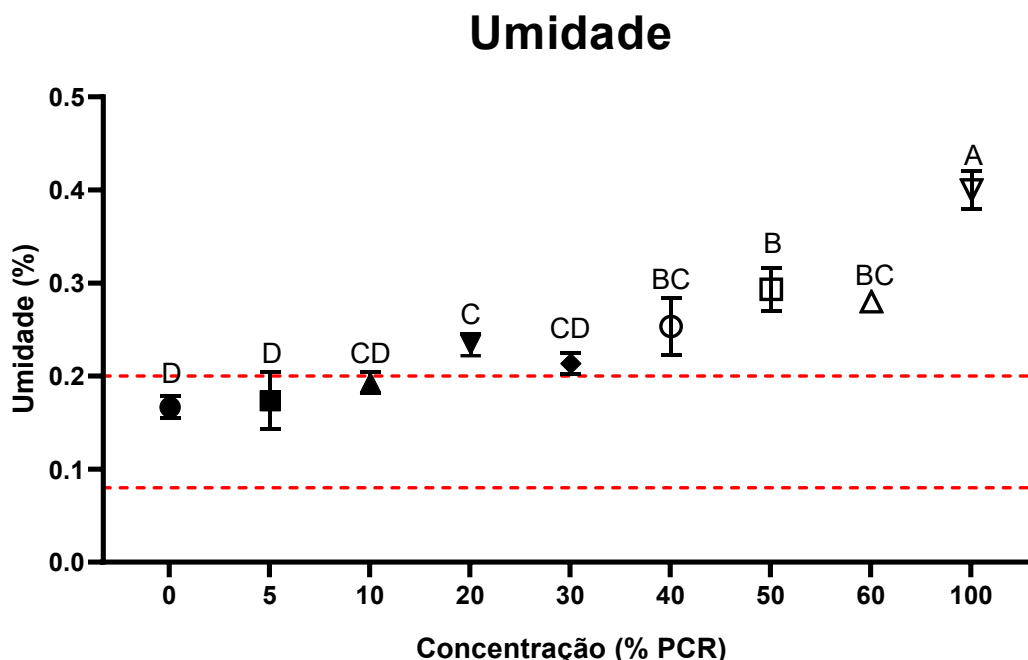
Fonte: O autor, 2024

Segundo Pinter et al. (2021), certos contaminantes, como o limoneno, podem se originar de reações colaterais ou da presença de resíduos durante o processo, acumulando-se ao longo dos ciclos de reciclagem. Embora esse parâmetro não possua um intervalo específico de especificação, por não ser comumente analisado na resina PET amorfa, sua detecção nessa fase do processo é fundamental. A identificação do limoneno na resina amorfa permite a implementação de ajustes operacionais direcionados, que são essenciais para o controle desse contaminante no produto final, especialmente na resina PET cristalina. Dessa forma, o monitoramento prévio contribui para a estabilidade do processo e a garantia da qualidade do material reciclado.

4.1.1.7. Umidade

A Tabela 11 mostra os resultados em relação a umidade realizado com resina PET amorfo Virgem x PET amorfo PCR. De acordo com a Figura 32, as concentrações de 0%, 5% e 10% de PCR apresentaram valores de umidade dentro do intervalo considerado adequado. A partir de 20%, os valores aumentaram progressivamente e diferiram significativamente das concentrações mais baixas. A maior umidade foi observada em 100% de PCR, indicando que teores mais elevados comprometem o controle da umidade no material.

Figura 32 - Gráfico dos resultados de Umidade PET amorfo Virgem x PET amorfo PCR.



Fonte: O autor, 2024

Conforme apontado por Torres et al. (1999), as resinas de PET recicladas apresentam maior suscetibilidade à degradação hidrolítica, sendo a umidade residual um dos principais

fatores que contribuem para esse processo. A presença de umidade retida nos chips de PET pós-consumo (PET-PCR) pode resultar na quebra das cadeias poliméricas, ocasionando a redução da viscosidade intrínseca (IV) e do peso molecular da resina. Entretanto, por meio de ajustes operacionais específicos, como o controle rigoroso da etapa de secagem durante o processo, é possível mitigar esse efeito indesejado. O controle da umidade é especialmente crítico no secador do processo, sendo este responsável por garantir que os chips apresentem umidade inferior ao limite especificado — geralmente abaixo de 0,20%. Caso os níveis estejam acima desse valor, os chips devem ser direcionados a sistemas de secagem adequados, como desumidificadores de ar ou secadores rotativos, a fim de garantir a remoção eficiente da umidade residual.

Além disso, o tempo de residência na etapa de resfriamento dos “macarrões” — forma inicial dos chips antes do corte — deve ser cuidadosamente monitorado para evitar a absorção excessiva de umidade, o que comprometeria a eficácia da secagem subsequente. Um dos principais riscos associados ao chip com alta umidade é a formação de vapor durante os processos de extrusão ou fusão, o qual pode catalisar a hidrólise do PET. Esse processo de degradação resulta na quebra das cadeias poliméricas, reduzindo significativamente a viscosidade da resina e comprometendo suas propriedades mecânicas. Consequentemente, o material torna-se mais frágil, de difícil processamento e inadequado para aplicações de maior exigência técnica (BARRETO; NASCIMENTO; NUNES, 2020).

4.2. RESULTADOS PET SEMICRISTALINO VIRGEM X PET SEMICRISTALINO PCR.

A Tabela 12 apresenta a média das triplicatas dos resultados analíticos Resina PET semicristalino Virgem x PET semicristalino PCR, além das proporções m/m% estabelecidas, os parâmetros analíticos e suas concentrações.

Tabela 12 - Média das triplicatas dos resultados analíticos PET semicristalino Virgem x PET semicristalino PCR.

Amostras / Parâmetros	IV ¹ dl/g	Cor L*a*b*			AA ² ppm	PF ³ °C	CRIS ⁴ %	LIM ⁵ ppb	UM ⁶ %	Minidisco Cor L*a*b* Haze			
		L*	a*	b*						L*	a*	b*	Haze
PET Virgem	0,83	79,52	-1,55	-3,88	0,23	236,87	48,57	2,37	0,14	90,59	-0,37	0,49	7,05
PET 5% PCR	0,83	77,85	-1,58	-3,87	0,23	236,60	51,10	2,02	0,12	88,95	-0,60	0,99	7,71
PET 10% PCR	0,83	75,55	-1,68	-3,75	0,25	237,45	48,94	2,04	0,16	87,54	-0,82	1,48	8,40
PET 20% PCR	0,83	74,37	-1,67	-3,69	0,49	235,93	48,67	2,70	0,14	84,71	-1,17	1,98	10,13
PET 30% PCR	0,84	71,95	-1,84	-3,74	0,35	237,63	49,80	3,45	0,16	80,33	-1,68	3,03	12,68
PET 40% PCR	0,85	68,57	-2,03	-3,64	0,34	237,82	47,58	2,76	0,20	77,65	-1,88	3,47	13,86
PET 50% PCR	0,84	65,77	-2,25	-3,36	0,37	237,82	48,30	3,60	0,22	73,43	-2,27	4,55	16,05
PET 60% PCR	0,83	65,53	-2,20	-3,64	0,39	237,44	47,37	6,51	0,18	70,37	-2,45	5,18	17,45
PET 100% PCR	0,86	57,70	-2,76	-3,29	0,51	239,77	47,80	6,08	0,28	59,88	-2,84	5,33	24,03

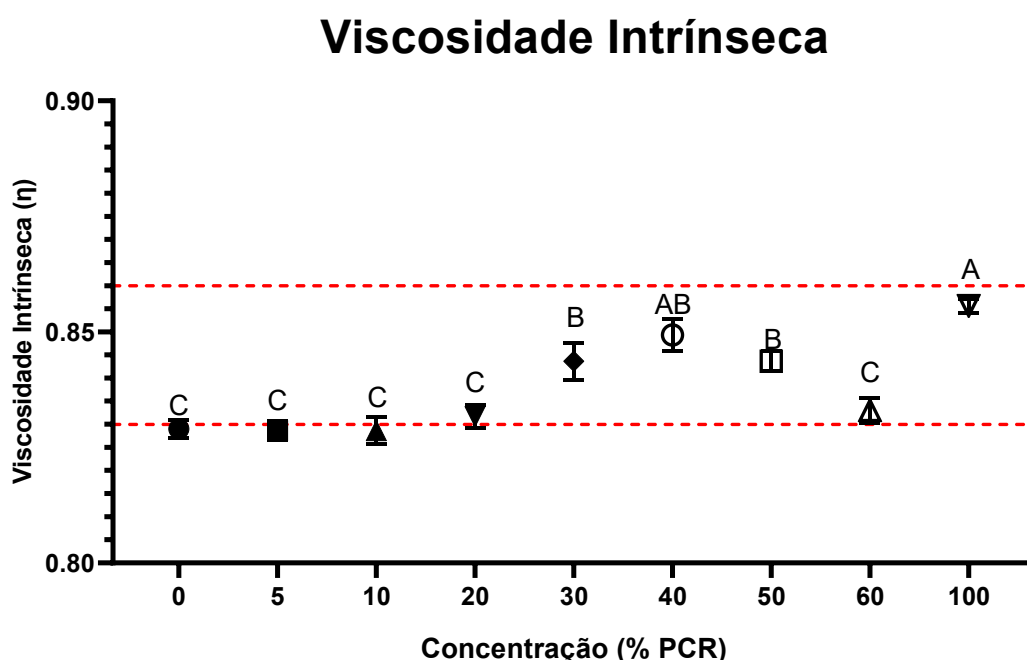
¹Viscosidade intrínseca; ² Acetaldeído; ³ Ponto de Fusão; ⁴ Cristalinidade; ⁵ Limoneno; ⁶ Umidade

4.2.1. Análises dos parâmetros ANÁLITICOS PET SEMICRISTALINO VIRGEM X PET SEMICRISTALINO PCR.

4.2.1.1. Viscosidade Intrínseca

A Tabela 12 mostra os resultados em relação a viscosidade intrínseca realizado com Resina PET semicristalino Virgem x PET semicristalino PCR. A Figura 33 mostra a variação da viscosidade intrínseca em diferentes concentrações de PCR. Concentrações a partir de 30% apresentaram valores significativamente superior ao da amostra controle (0%), indicando um aumento da viscosidade com o teor de PCR, exceto 60 % que não diferiu significativamente.

Figura 33 - Gráfico dos resultados de Viscosidade PET semicristalino Virgem x PET semicristalino PCR.



Fonte: O autor, 2024

Segundo Weissmann (2023), nas aplicações voltadas para embalagens, a viscosidade intrínseca (IV) desejada geralmente varia entre 0,70 e 1,04 dL/g. Pinter et al. (2021) destacam a importância de manter o IV em valores superiores a 0,80 dL/g, pois esse nível é essencial para assegurar que o comprimento das cadeias poliméricas seja adequado à produção de garrafas, conferindo-lhes as propriedades mecânicas e estruturais necessárias.

De acordo com a Figura 33, observa-se um comportamento semelhante ao do PET amorfo a partir da proporção de 30% de PET reciclado pós-consumo (PCR), indicando certa variabilidade nos resultados. Essa variação pode estar relacionada à dificuldade de se obter uma homogeneidade ideal nas misturas realizadas em laboratório, mesmo após o material ser moído

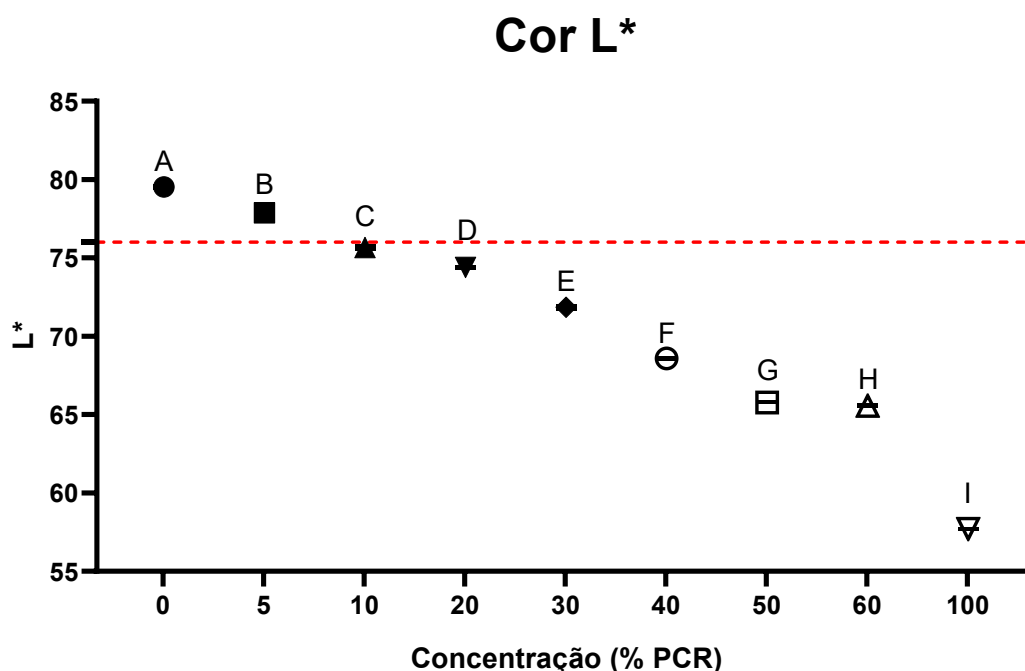
e combinado em proporções controladas. No entanto, essa homogeneidade tende a ser mais bem alcançada em escala industrial, devido à presença de agitadores mais eficientes, reatores adequados e tempos de residência mais longos, que favorecem a fusão completa do material. Caso esse comportamento observado em laboratório seja replicado em ambiente industrial, é possível realizar ajustes operacionais para garantir o controle da viscosidade, especialmente no PET amorfo. Nesse contexto, é importante destacar que a viscosidade no PET amorfo apresenta relação direta com o aumento da viscosidade no processo de polimerização em estado sólido. Outro aspecto relevante é o teor de catalisador presente no material, uma vez que sua concentração pode afetar diretamente o grau de polimerização. A variação na quantidade de catalisador influencia o comprimento das cadeias poliméricas, impactando, assim, a viscosidade final do produto (LURGI ZIMMER, 2001).

Um dos ajustes operacionais mais utilizados e com forte correlação direta ou inversa no processo de polimerização em estado sólido é o controle do peso do reator. Esse parâmetro está diretamente relacionado ao tempo de residência dos chips de PET no interior do reator. Um aumento no peso do reator implica em maior tempo de residência, o que favorece o incremento da viscosidade, uma vez que os chips permanecem por mais tempo em reação. Por outro lado, a redução do peso diminui o tempo de residência, resultando em menor viscosidade, devido à menor exposição dos chips ao ambiente reacional. Essas manobras operacionais são fundamentais para promover a estabilidade do processo e garantir que o produto final atenda aos limites estabelecidos de especificação (LURGI ZIMMER, 2001).

4.2.1.2. Cor $L^*a^*b^*$

A Tabela 12 mostra os resultados em relação a cor $L^*a^*b^*$ realizado com resina PET semicristalino Virgem x PET semicristalino PCR. As Figuras 34, 35 e 36 estão os resultados respectivamente. Os valores de cor L^* apresentaram tendência de redução com o aumento da concentração de PCR, conforme demonstrado na Figura 34. As amostras com 0%, 5% de PCR exibiram os maiores valores de cor L^* . As concentrações acima de 10% ficaram fora do intervalo desejado para esse parâmetro.

Figura 34 - Gráfico dos resultados de Cor L* PET semicristalino Virgem x PET semicristalino PCR.



Fonte: O autor, 2024

Pinter et al. (2021) realizaram um estudo sobre a circularidade na reciclagem garrafa a garrafa de PET, destacando os desafios e benefícios do processo, especialmente no contexto da sustentabilidade e da economia circular. Nesse estudo, foram avaliados os impactos da reciclagem repetida de garrafas PET, utilizando uma proporção de 75% de PET reciclado (rPET) e 25% de PET virgem, ao longo de onze ciclos de reciclagem, simulando processos industriais reais. Um dos parâmetros analisados foi a cor L*, que representa a luminosidade do material, sendo um indicador crítico para a aceitação estética do PET reciclado, sobretudo em aplicações para embalagens transparentes. Os principais resultados obtidos foram: O valor de L* apresentou leve diminuição com o aumento do número de ciclos de reciclagem; A redução da luminosidade indica um escurecimento gradual do material, possivelmente decorrente da degradação térmica e de contaminações acumuladas, mesmo que em níveis baixos; Apesar da alteração sutil, os valores de L* permaneceram dentro dos limites aceitáveis para uso comercial, não comprometendo a qualidade visual do rPET para aplicações em embalagens transparentes.

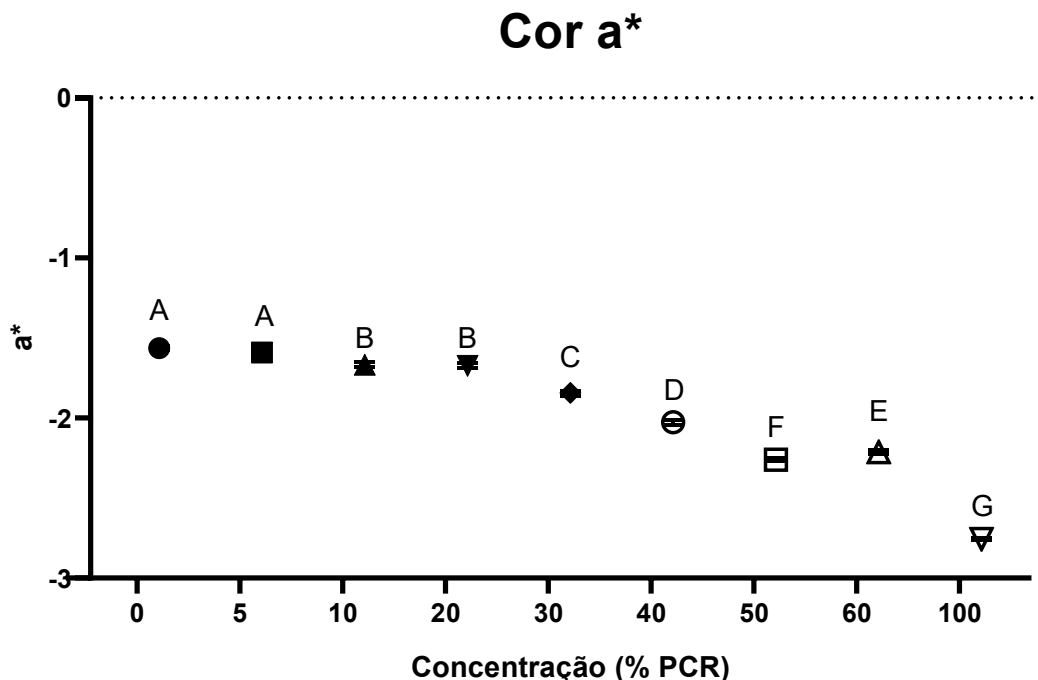
Com base nos dados apresentados na Figura 34 deste trabalho, que retrata os resultados obtidos para diferentes proporções de PET PCR incorporadas ao PET virgem, observa-se uma correlação com os resultados apresentados por Pinter et al. (2021). O aumento da proporção de PET PCR está associado à redução dos valores de L*, o que pode ser atribuído à presença de

contaminantes como resíduos de corantes, pigmentos, metais, aditivos, produtos de degradação térmica e outros polímeros com ponto de fusão distinto, os quais contribuem para o escurecimento gradual da resina.

É possível, por meio de ajustes operacionais no processo, controlar a cor L^* do PET amorfo, elevando seus valores e, assim, mantendo-os dentro dos parâmetros de especificação exigidos. Esse controle é fundamental, uma vez que a cor L^* do PET amorfo exerce influência direta sobre a cor L^* do PET semicristalino. De acordo com Lurgi Zimmer (2001), os ajustes na cor do material amorfo são considerados um dos fatores mais importantes para garantir a estabilidade e a qualidade visual do PET semicristalino.

Conforme a Figura 35, os valores de cor a^* apresentaram tendência de redução com o aumento da concentração de PCR, conforme ilustrado na Figura 35. As amostras com 0% e 5% de PCR apresentaram os maiores valores de cor a^* , sem diferença estatística significativa entre si ($p < 0,05$). As amostras apresentaram valores menores à medida que a concentração aumentou. Há uma maior tendência do aumento da coloração esverdeada na concentração de 100%, que diferiu significativamente de todas as demais concentrações testadas.

Figura 35 - Gráfico dos resultados de Cor a^* PET semicristalino Virgem x PET semicristalino PCR.



Fonte: O autor, 2024

É possível através de ajustes operacionais no processo, como por exemplo um aumento da cor a^* no PET amorfo. Esse parâmetro não possui LSE e LIE, pois não faz parte

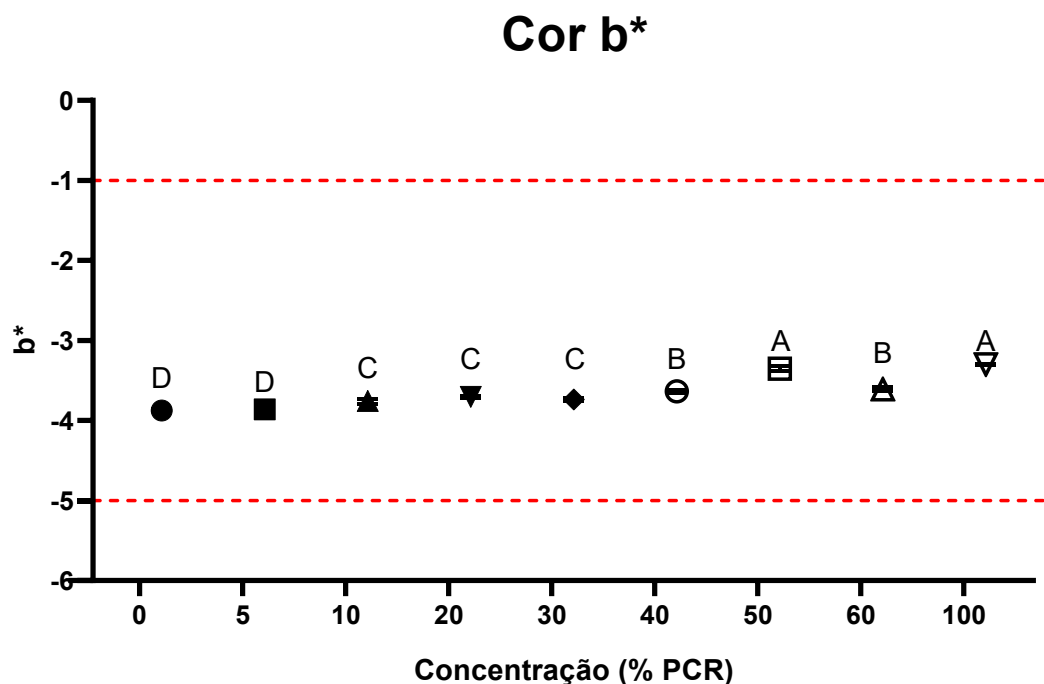
do laudo de especificação do produto enviado para clientes. Os ajustes na cor a^* do amorfo é um dos parâmetros mais importantes para o controle da cor a^* do PET semicristalino (LURGI ZIMMER, 2001).

Dando continuidade ao estudo realizado por Pinter et al. (2021), os autores analisaram o índice de cor a^* com o objetivo de compreender os efeitos da reciclagem contínua na aparência visual do PET. Os resultados indicaram que, com o aumento do número de ciclos de reciclagem, houve uma ligeira diminuição nos valores de cor a^* , indicando uma tendência à tonalidade esverdeada do material. Esse comportamento pode estar relacionado à acumulação de contaminantes orgânicos, resíduos de corantes, degradação térmica e reações de oxidação que ocorrem ao longo do processamento repetido do PET. Apesar dessa variação, os valores de cor a^* permaneceram dentro dos limites aceitáveis para uso comercial, o que indica que a leve alteração de tonalidade não compromete a aplicação do rPET em embalagens transparentes ou recicláveis. Ainda assim, os autores ressaltam a importância de um rigoroso controle de qualidade e da eficiente remoção de impurezas durante o processo, a fim de manter a estabilidade visual do material reciclado.

Esse mesmo comportamento foi observado nos resultados apresentados na Figura 35, na qual se verifica que, à medida que aumenta a proporção de PET PCR, os valores de cor a^* se tornam mais negativos, indicando uma tendência crescente à tonalidade esverdeada do material.

De acordo com os resultados dos valores de cor b^* apresentados na Figura 36, observou-se uma tendência crescente nos valores médios com o aumento da concentração do tratamento. Todas as amostras permaneceram dentro do intervalo considerado adequado.

Figura 36 - Gráfico dos resultados de Cor b^* PET semicristalino Virgem x PET semicristalino PCR.



Fonte: O autor, 2024

No estudo conduzido por Pinter et al. (2021) sobre a circularidade na reciclagem garrafa a garrafa de PET, um dos parâmetros analisados foi o índice de cor b^* , que representa a tonalidade amarelada do material. Os autores observaram que, com o aumento do número de ciclos de reciclagem, houve um aumento progressivo nos valores de cor b^* , indicando uma tendência ao amarelamento do PET PCR ao longo do tempo. Esse comportamento foi atribuído à degradação térmica, reações de oxidação e à acumulação de impurezas e aditivos residuais durante os sucessivos ciclos de processamento. Apesar do aumento na tonalidade amarela, os valores de cor b^* permaneceram dentro de faixas aceitáveis para aplicações comerciais, especialmente em produtos onde uma leve alteração visual não compromete a funcionalidade. No entanto, os autores destacam que a seleção criteriosa da matéria-prima, a qualidade do PET PCR e a eficiência dos processos de descontaminação são fundamentais para evitar alterações acentuadas na coloração que possam impactar a aceitação do material, especialmente para aplicações que exigem alta transparência estética.

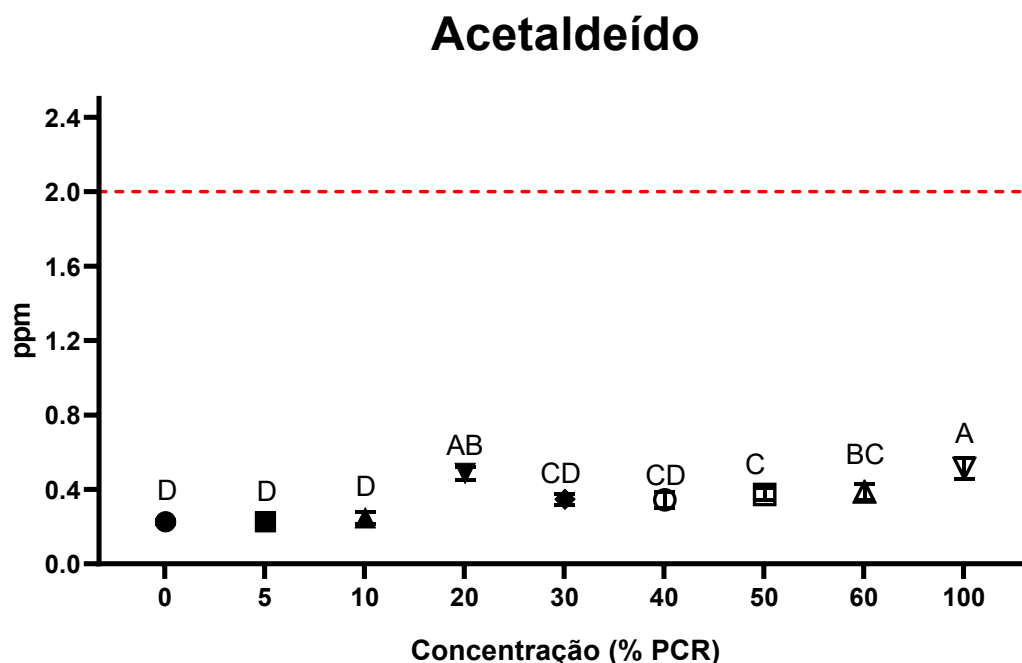
Observou-se um comportamento semelhante ao representado na Figura 36, onde o aumento da proporção de PET PCR resulta em valores de cor b^* progressivamente menos negativos, evidenciando uma tendência crescente de tonalidade amarelada no material.

Caso os valores de cor b estejam fora ou próximos dos parâmetros de especificação, é possível realizar ajustes operacionais no processo para corrigi-los, como por exemplo, o ajuste da cor b do PET amorfo. Outro fator relevante que pode impactar os resultados é a entrada de oxigênio no processo devido a uma parada na planta, o que pode elevar a cor b* devido à degradação da cadeia polimérica, resultando em um amarelamento da resina. O controle da vazão de oxigênio na unidade de purificação de nitrogênio (NPU) é crucial, uma vez que o oxigênio presente na unidade purificadora de nitrogênio, responsável pela queima dos compostos orgânicos, pode afetar a resina. Se houver um descontrole na vazão de oxigênio, o nitrogênio que transporta os compostos orgânicos, como o acetaldeído, pode entrar em contato com o chip, ocasionando a degradação da cadeia polimérica e, consequentemente, o aumento da cor b* (LURGI ZIMMER, 2001).

4.2.1.3. Acetaldeído.

A Tabela 12 mostra os resultados em relação a acetaldeído realizado com Resina PET semicristalino Virgem x PET semicristalino PCR. A Figura 37 apresenta os valores de acetaldeído em função da concentração de PCR. Observa-se que todas as amostras estão abaixo do valor máximo estabelecido para esse parâmetro.

Figura 37 - Gráfico dos resultados de acetaldeído PET semicristalino Virgem x PET semicristalino PCR.



Fonte: O autor, 2024

De acordo com Pinter et al. (2021), o teor de acetaldeído tende a aumentar à medida que se eleva a proporção de PET reciclado pós-consumo (%PCR) adicionado à resina virgem.

Esse comportamento pode ser explicado pela maior suscetibilidade das resinas recicladas à degradação hidrolítica, conforme apontado por Torres et al. (1999). Embora os níveis de acetaldeído geralmente permaneçam dentro dos limites estabelecidos pelas especificações técnicas, há medidas de controle implementadas no processo produtivo para mitigar possíveis desvios. Dentre essas ações, destaca-se o monitoramento do teor de grupos carboxílicos na resina de PET amorfo, que serve como um indicativo indireto da formação de acetaldeído, uma vez que grupos vinila podem ser gerados como subprodutos da degradação da cadeia polimérica (LURGI ZIMMER, 2001).

Segundo Barreto, Nascimento e Nunes (2020), o controle eficaz da geração de acetaldeído é possível por meio de ajustes precisos nas etapas do processo produtivo, especialmente na polimerização em estado sólido (SSP), onde aditivos específicos podem ser incorporados para minimizar a formação dessa substância. No estudo realizado pelos autores, foi analisado o comportamento do acetaldeído em garrafas produzidas com PET Virgem e em misturas com 20% de PET PCR. Os resultados demonstraram que, mesmo com a incorporação do PCR, os níveis de acetaldeído se mantiveram dentro dos limites de qualidade estabelecidos pela empresa (5 ppb), sem diferenças estatisticamente relevantes entre os dois grupos. Os valores de desvio padrão também confirmam a consistência dos resultados: 0,64 para o PET Virgem e 0,55 para a mistura com PCR, além de índices de capacidade de processo (CPU) igualmente satisfatórios (2,83 e 2,45, respectivamente). Isso evidencia que, com controle adequado dos parâmetros de secagem, extrusão e aditivação na etapa de SSP, é possível integrar PET PCR ao processo produtivo sem comprometer a qualidade final do material no que diz respeito ao acetaldeído.

O monitoramento dos teores de oxigênio e monóxido de carbono na NPU (Unidade de Purificação de Nitrogênio) é essencial, uma vez que esses parâmetros funcionam como indicadores da eficiência da queima de compostos orgânicos. Um descontrole na vazão de nitrogênio pode comprometer essa queima, resultando em um aumento da concentração de acetaldeído no PET cristalino. A eficiência da fluidização no cristalizador também exerce papel fundamental nesse contexto, pois uma boa fluidização favorece o arraste do acetaldeído pela corrente de nitrogênio, contribuindo para sua remoção e posterior combustão na NPU, reduzindo assim seu teor residual na resina (LURGI ZIMMER, 2001).

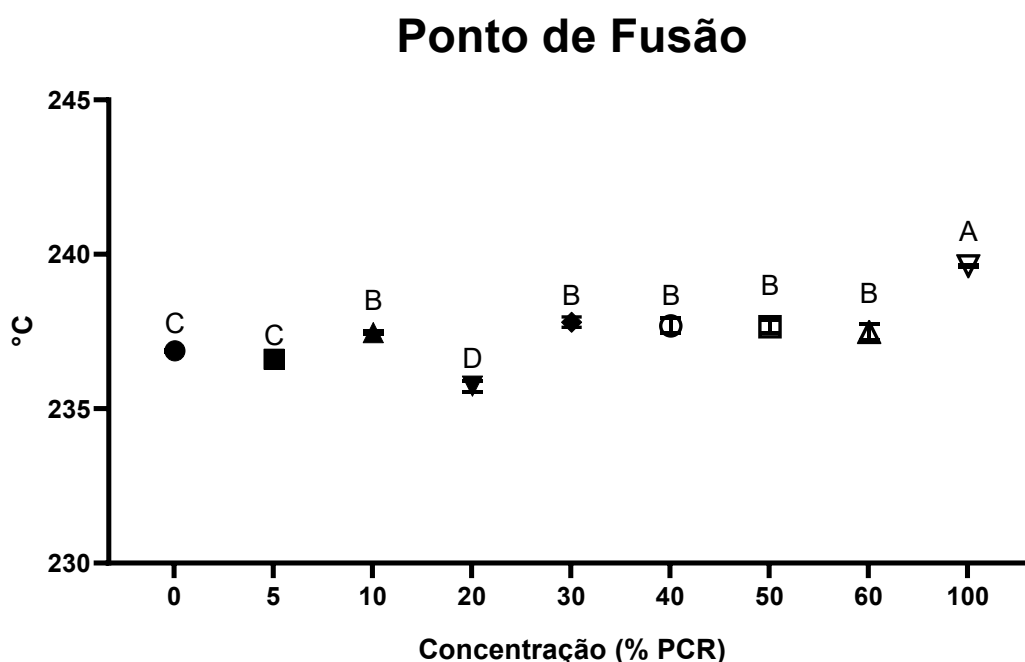
Adicionalmente, o controle da vazão de nitrogênio na base do reator da polimerização em estado sólido (SSP) é outro parâmetro crítico. O aumento dessa vazão favorece a transferência de massa por difusão, promovendo a migração do acetaldeído da fase sólida para

a corrente gasosa, o que também contribui para a redução do teor desse contaminante na resina final (LURGI ZIMMER, 2001).

4.2.1.4. Ponto de Fusão

A Tabela 12 mostra os resultados em relação a ponto de fusão realizado com Resina PET semicristalino Virgem x PET semicristalino PCR. Como ilustrado na Figura 38, o ponto de fusão aumentou à medida que as concentrações aumentaram, com a concentração de 100% apresentando o maior ponto de fusão.

Figura 38 - Gráfico dos resultados de Ponto de Fusão de PET semicristalino Virgem x PET semicristalino PCR.



Fonte: O autor, 2024

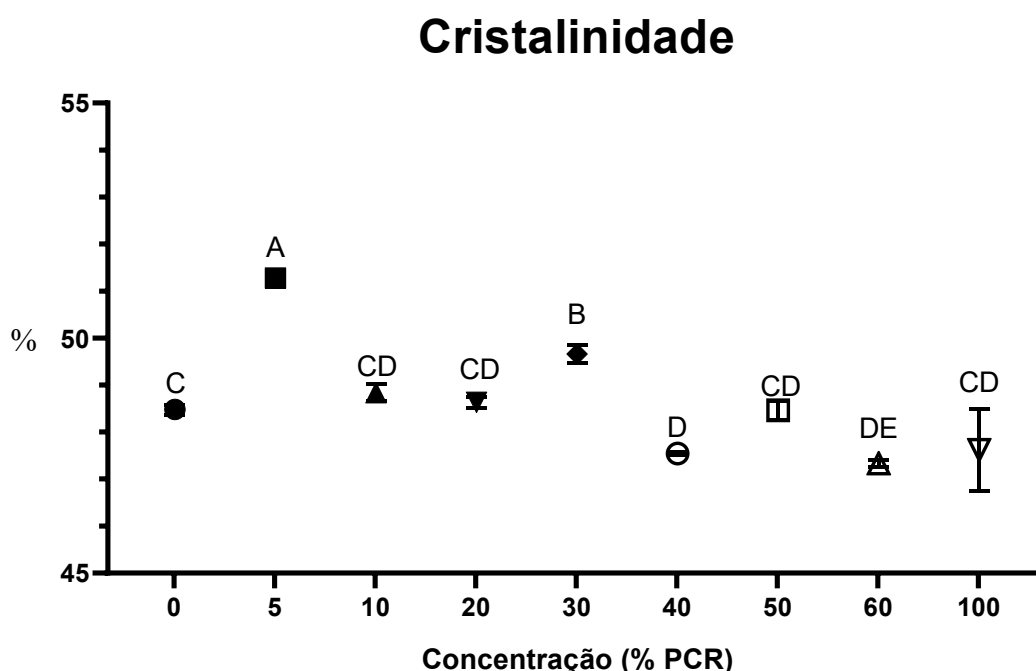
Esse parâmetro não possui um intervalo de especificação definido, contudo, sua estabilidade ao longo do processo é de extrema importância, especialmente por estar diretamente relacionada ao consumo energético do cliente final. Conforme os dados analisados, observou-se uma relativa estabilidade nos resultados; entretanto, a amostra de PET semicristalino PCR apresentou um valor acima da média, o que pode ser atribuído à presença de impurezas ou aditivos. Isso se justifica pelo fato de que o ponto de fusão real do PET pode variar em função desses componentes. É possível promover ajustes operacionais no ponto de fusão do PET amorfo, como, por exemplo, o controle da concentração dos comonômeros DEG (dietileno glicol) e IPA (ácido isoftálico), visando à estabilização do ponto de fusão no PET semicristalino. Dessa forma, o controle do ponto de fusão na fase amorfa torna-se um dos

parâmetros mais relevantes para garantir a estabilidade térmica do PET semicristalino (MACHADO; OLIVEIRA, 2018).

4.2.1.5. Cristalinidade

A Tabela 12 mostra os resultados em relação a cristalinidade realizado com Resina PET semicristalino Virgem x PET semicristalino PCR. A Figura 39 apresenta os valores de cristalinidade em função da concentração de PCR. Observa-se que a amostra com 5% de PCR apresentou o maior valor de cristalinidade, sendo significativamente diferente das demais concentrações (letra A). Esses resultados indicam que a concentração de 5% de PCR favoreceu um maior grau de cristalinidade no material, enquanto concentrações superiores não promoveram alterações expressivas nesse parâmetro.

Figura 39 - Gráfico dos resultados de cristalinidade de PET semicristalino Virgem x PET semicristalino PCR.



Fonte: O autor, 2024.

Barreto, Nascimento e Nunes (2020) analisaram a influência do uso de PET virgem e PET pós-consumo reciclado na qualidade das embalagens para bebidas, destacando, entre os fatores avaliados, a influência da umidade na cristalinidade. Para isso, foi realizada uma comparação entre PET virgem e PET PCR por meio do método termogravimétrico, considerando a grande influência desse parâmetro no processo de secagem e, consequentemente, na estabilidade da viscosidade intrínseca (IV). Como resultado, obteve-se um teor de cristalinidade de 52,7% no PET PCR e 55% no PET virgem, demonstrando que o PET PCR absorve umidade mais rapidamente do que o PET virgem. Esse resultado está de

acordo com a Figura 39, uma vez que o percentual de umidade observado no PET PCR foi mais elevado, enquanto sua cristalinidade apresentou o menor valor entre as amostras analisadas.

Esse parâmetro não possui um range de especificação definido, porém sua estabilidade é de extrema importância durante o processo, uma vez que está diretamente relacionada à reorganização das cadeias poliméricas. O controle e a estabilização desse parâmetro no PET semicristalino garantem, durante a produção de pré-formas, a manutenção das propriedades mecânicas, térmicas e de processabilidade do material (ITAL, 2020).

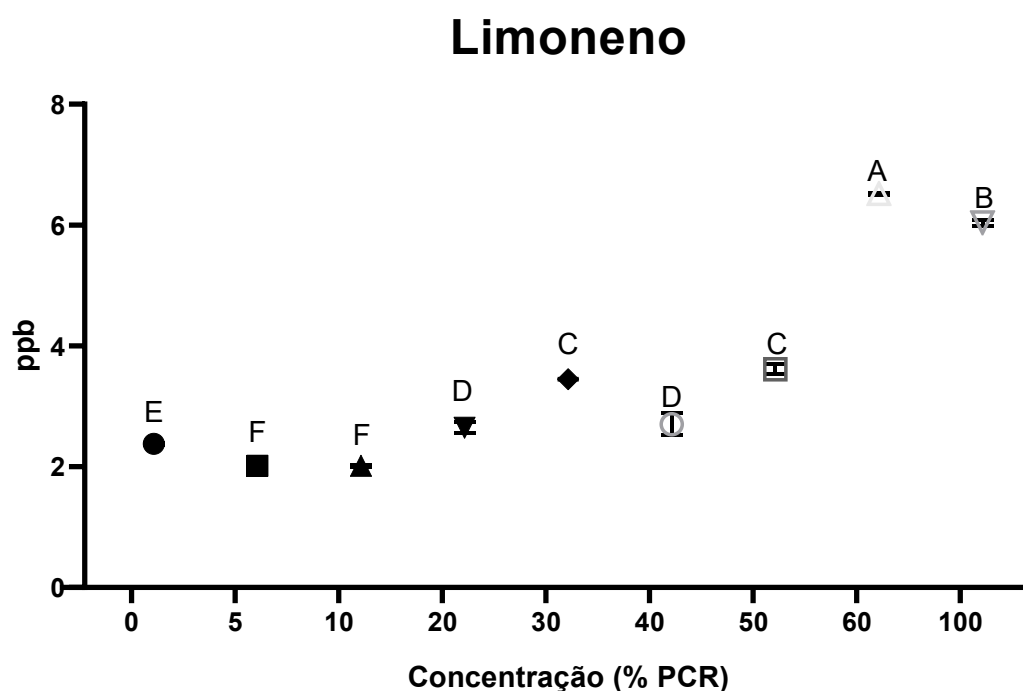
A cristalinidade no PET semicristalino afeta diretamente a viscosidade do material. PET com baixa cristalinidade tende a apresentar maior fluidez, o que facilita o processamento na injeção de pré-formas (DIÁRIO DO ENVASE, 2020). Em contrapartida, quando o PET semicristalino possui alta cristalinidade, a fusão torna-se mais difícil, exigindo temperaturas mais altas para garantir um bom processamento. Além disso, os chips com maior cristalinidade absorvem menos umidade em comparação com os chips amorfos, o que facilita o processo de secagem e reduz os efeitos da degradação hidrolítica (ITAL, 2020).

A transparência das pré-formas também é afetada pela cristalinidade. Uma cristalinidade alta resulta em pré-formas opacas ou esbranquiçadas, o que não é desejável, já que as garrafas PET, em sua maioria, são transparentes. Além disso, PET semicristalino com baixa cristalinidade pode ser mais frágil, enquanto o PET excessivamente cristalino pode ser mais difícil de moldar (ITAL, 2020).

4.2.1.6. Limoneno

A Tabela 12 mostra os resultados em relação a limoneno realizado com resina PET semicristalino Virgem x PET semicristalino PCR. A Figura 40 apresenta os valores de concentração de limoneno em função da porcentagem de PCR. Observa-se um aumento progressivo na concentração de limoneno com o incremento de PCR, especialmente nas concentrações de 60% e 100%, que apresentaram os maiores valores, sendo estatisticamente diferentes das demais, conforme indicado pelas letras A e B, respectivamente. As amostras com até 50% de PCR exibiram concentrações inferiores, com destaque para as concentrações de 5% e 10%, que foram estatisticamente semelhantes entre si (letra F) e inferiores às demais. Esses resultados sugerem que concentrações mais elevadas de PCR favorecem a liberação ou retenção de limoneno no material, possivelmente devido a alterações na estrutura da matriz ou na interação com compostos voláteis.

Figura 40 - Gráfico dos resultados de limoneno de PET semicristalino Virgem x PET semicristalino PCR.



Fonte: O autor, 2024.

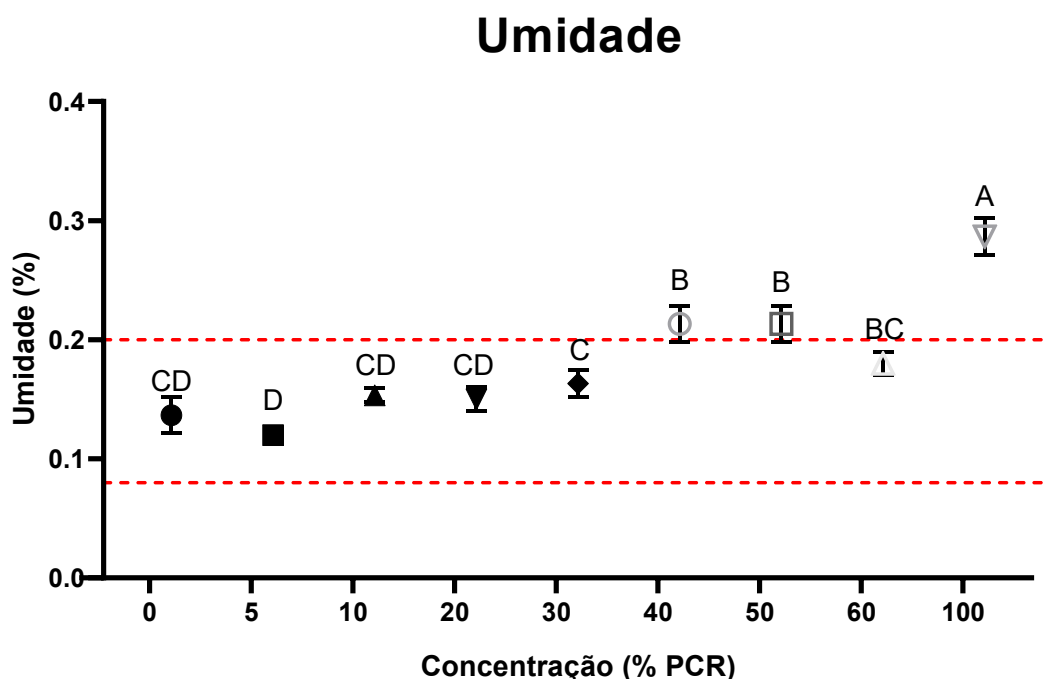
Segundo Pinter et al. (2021), o estudo sobre a circularidade na reciclagem de garrafas PET, foi realizada a análise de limoneno em uma resina composta por 100% de PET reciclado pós-consumo (PET-PCR), sendo identificado um valor de 3,2 ppb. Já no primeiro ciclo de reciclagem da resina, o valor encontrado foi inferior a 0,03 ppb. Embora o limoneno seja classificado como um contaminante, sua natureza volátil permite que ele seja eliminado durante o processamento térmico. Além disso, o controle rigoroso das temperaturas ao longo das etapas do processo contribui significativamente para a evaporação de substâncias voláteis, evitando também a formação de novos contaminantes por meio de reações de degradação térmica.

Estudos indicam que as concentrações de limoneno em resinas de PET reciclado podem apresentar ampla variação. Em determinadas análises, foram encontrados níveis entre 20 e 66 $\mu\text{g/kg}$ de PET (equivalente a 20 a 66 ppb), enquanto outro estudo relatou uma concentração média de 2,9 $\mu\text{g/kg}$, com um valor máximo de 20 $\mu\text{g/kg}$ (20 ppb). Apesar de ainda não haver um consenso internacional sobre o limite específico de limoneno em resinas de PET reciclado, é essencial que os níveis detectados não comprometam as características sensoriais dos produtos embalados. Nesse contexto, recomenda-se que fabricantes e recicladores realizem o monitoramento regular das concentrações de limoneno e de outros compostos voláteis, de modo a garantir que permaneçam dentro de limites considerados aceitáveis para as aplicações previstas (BRANDÃO, 2019).

4.2.1.7. Umidade

A Tabela 12 mostra os resultados em relação a umidade realizado com Resina PET semicristalino Virgem x PET semicristalino PCR. A Figura 41 apresenta os teores de umidade das amostras em função das concentrações de PCR. Observa-se que a umidade aumentou gradualmente com o acréscimo de PCR, atingindo seu valor máximo na concentração de 100%, que foi significativamente diferente das demais (letra A). As concentrações de 40% e 50% também apresentaram valores elevados de umidade, estatisticamente semelhantes entre si (letra B), mas inferiores ao observado em 100%. Em contrapartida, as menores concentrações (0% a 20%) apresentaram os menores teores de umidade, com destaque para a concentração de 5%, que foi significativamente inferior às demais (letra D). As linhas tracejadas em vermelho indicam os limites inferior e superior de umidade recomendados para o material em questão. Observa-se que amostras com PCR acima de 30% ultrapassam o limite superior, o que pode comprometer a estabilidade e a conservação do produto.

Figura 41 - Gráfico dos resultados de Umidade PET semicristalino Virgem x PET semicristalino PCR.



Fonte: O autor, 2024

Barreto, Nascimento e Nunes (2020) analisaram a influência do uso de PET virgem e PET pós-consumo reciclado na qualidade das embalagens para bebidas, destacando impactos significativos nos parâmetros técnicos do produto final, entre eles a umidade. Embora esse parâmetro não possua um intervalo de especificação definido, sua estabilidade ao longo do

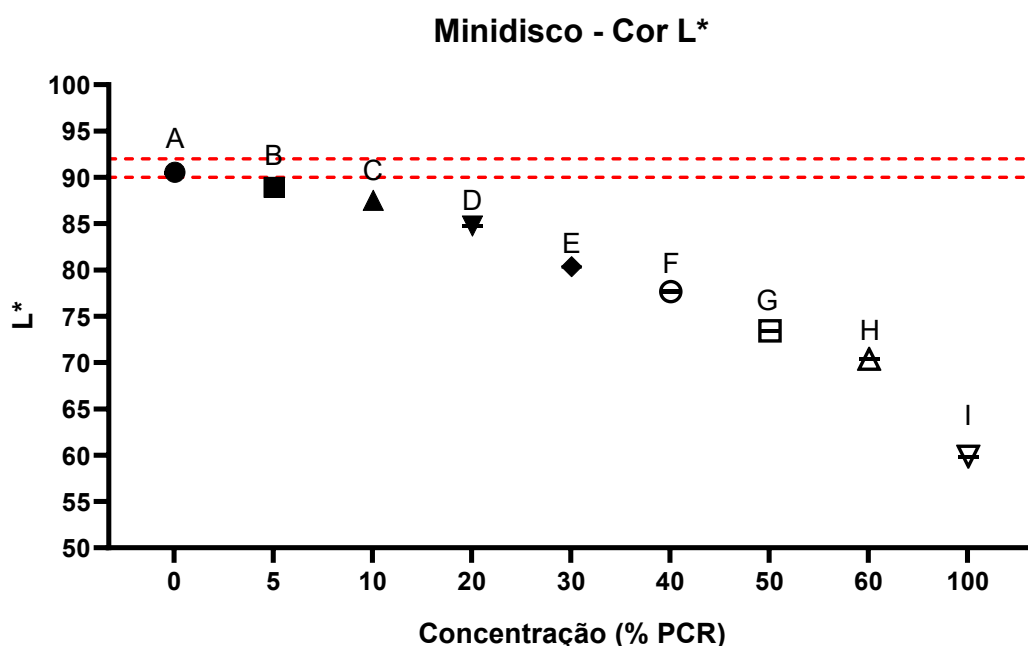
processo é essencial, uma vez que resinas com elevado teor de umidade podem intensificar a degradação hidrolítica durante a produção de pré-formas.

Segundo Barreto, Nascimento e Nunes (2020), essa degradação compromete a integridade das cadeias poliméricas, afetando diretamente a qualidade do produto final. Observou-se que, nos ensaios com resinas de PET semicristalino reciclado (PCR), os níveis de umidade ficaram acima da média. Além disso, identificou-se uma tendência de aumento gradual da umidade à medida que se eleva a proporção de PET-PCR na mistura com resina virgem. Apesar desse comportamento, é possível mitigar tais efeitos por meio de ajustes operacionais específicos no processo de produção de pré-formas. Um dos principais pontos de controle é o sistema de secagem anterior à etapa de fundição e moldagem. A adoção de parâmetros adequados de secagem contribui significativamente para a redução da umidade, mantendo-a dentro dos limites de processabilidade, sem que haja comprometimento das propriedades do material decorrente da degradação hidrolítica.

*4.2.1.8. Minidisco Cor $L^*a^*b^*$ Haze*

Na Tabela 12 e nas Figura 42, 43, 44 e 45 abaixo mostram os resultados em relação a minidisco de cor $L^*a^*b^*$ Haze realizado com Resina PET semicristalino Virgem x PET semicristalino PCR. A Figura 42 apresenta os valores do parâmetro de cor L^* das amostras de minidisco em diferentes concentrações de PCR. Verifica-se uma tendência de redução significativa à medida que a concentração de PCR aumenta. A amostra controle (0% PCR) apresentou o valor de cor L^* dentro da faixa de aceitação. Conforme o teor de PCR aumenta, observa-se uma diminuição gradativa dos valores de cor L^* , com a concentração de 100% apresentando o menor valor, significativamente diferente de todas as outras (letra I). As linhas vermelhas pontilhadas indicam a faixa de cor L^* considerada ideal para o produto. A partir de 5% de PCR, os valores começam a se situar fora dessa faixa, o que pode comprometer a aceitação visual do material final.

Figura 42 - Gráfico dos resultados de Minidisco Cor L* PET semicristalino Virgem x PET semicristalino PCR.



Fonte: O autor, 2024.

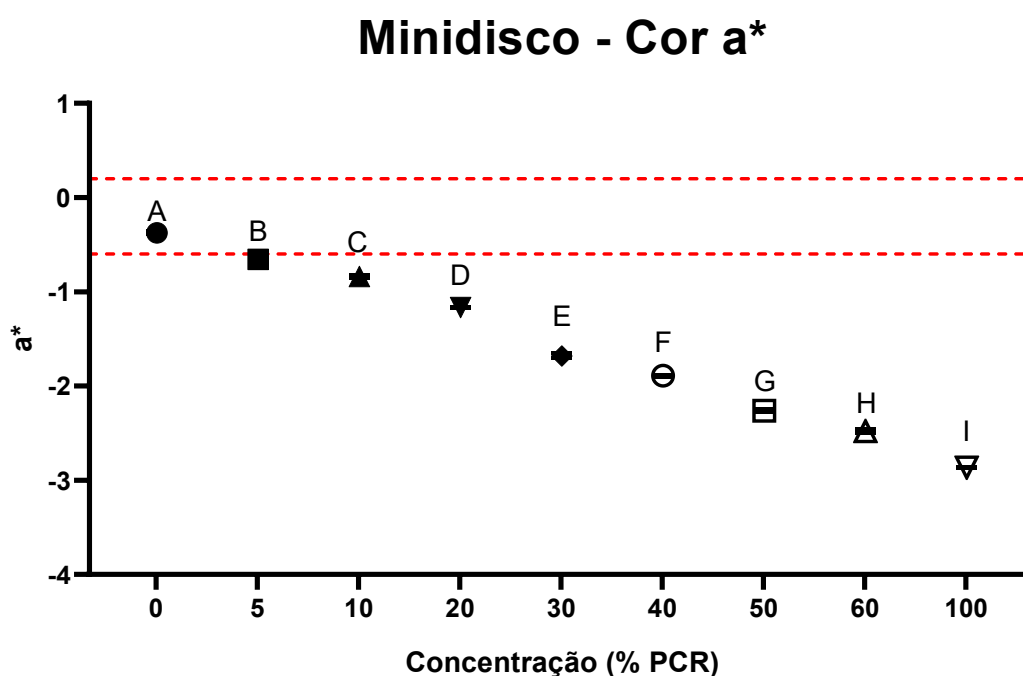
Conforme o estudo realizado por Benyathiar et al. (2022), sobre a reciclagem de garrafas de polietileno tereftalato (PET) para a indústria de bebidas, abordando os avanços tecnológicos, desafios e perspectivas futuras na utilização de PET PCR. De acordo com a Tabela 22 (em anexo), as amostras de PET PCR classificadas como PCR Grau A, B, C e D referem-se a diferentes lotes de PET PCR utilizados na fabricação de garrafas, cada um apresentando variações nas propriedades ópticas, como cor L*a*b* e Haze.

Segundo Benyathiar et al. (2022), o comportamento da cor L*, conforme a Tabela 15 (em anexo), revelou que, embora os valores se mantenham relativamente constantes entre os diferentes graus de PET PCR, há leves variações que indicam alterações na transparência e na claridade do material com o aumento do teor de PCR. De forma semelhante, conforme observado na Figura 42, verifica-se um comportamento análogo de variação da cor L* à medida que se incrementa a porcentagem de PCR, embora com uma variação mais acentuada, o que pode estar associado a diferenças nos processos de reciclagem ou nas condições dos materiais analisados.

É possível, por meio de ajustes operacionais no processo, como o aumento da cor L no PET amorfo, controlar esse parâmetro de forma a mantê-lo dentro das especificações exigidas. Segundo Lurgi Zimmer (2001), a cor L do PET amorfo é um dos principais fatores de influência no controle da cor L* do minidisco semicristalino, sendo, portanto, um parâmetro operacional essencial para garantir a qualidade visual do produto final.

De acordo com a Figura 43, o comportamento da cor a^* é semelhante ao observado para a cor L , com resultados dentro da faixa de especificação apenas para a amostra com 0% de PET PCR, enquanto todas as demais concentrações ficaram fora do intervalo especificado. Esse comportamento indica uma tendência de aumento da tonalidade esverdeada com o incremento da fração reciclada. Apesar dessa tendência, é possível realizar ajustes operacionais no processo, como, por exemplo, o controle da cor a^* no PET amorfo. Segundo Lurgi Zimmer (2001), os ajustes na cor a^* do PET amorfo são fundamentais para o controle da cor a^* no PET semicristalino, sendo, portanto, um parâmetro crítico para a manutenção da qualidade do produto final.

Figura 43 - Gráfico dos resultados de Minidisco Cor a^* PET semicristalino Virgem x PET semicristalino PCR.

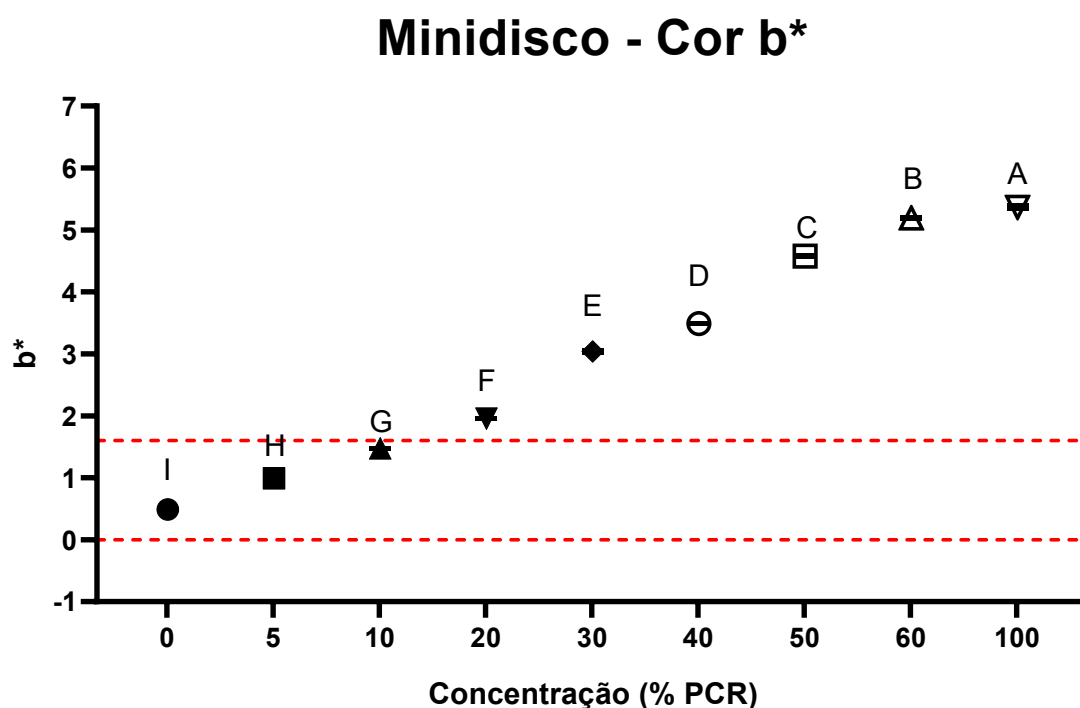


Fonte: O autor, 2024.

Segundo Benyathiar et al. (2022), o comportamento da cor a^* , conforme apresentado na Tabela 22 (em anexo), demonstra que, à medida que aumenta a proporção de PET PCR, há uma leve tendência de deslocamento dos valores de a^* para o lado negativo, indicando o surgimento de uma tonalidade levemente mais esverdeada. De forma semelhante, conforme observado na Figura 43, verifica-se um comportamento análogo de variação da cor a^* com o aumento da porcentagem de PCR, embora com amplitude mais acentuada, porém com variações mais acentuadas, possivelmente devido ao valor significativamente negativo da cor a^* observado na amostra com 100% de PCR.

A Figura 44 apresenta os valores do parâmetro b^* das amostras de minidisco em função da concentração de PCR. Observa-se um aumento significativo dos valores de Cor b^* com o incremento da concentração de PCR, indicando uma tendência crescente de tonalidade amarelada. As amostras com maiores teores de PCR (80% e 100%) apresentaram os maiores valores de Cor b^* , estatisticamente diferentes das demais (letras A e B). Por outro lado, as amostras com 0% e 5% de PCR apresentaram os menores valores, com destaque para a concentração de 0%, estatisticamente diferente das demais (letra I), com coloração mais neutra (próxima do zero). As linhas vermelhas tracejadas indicam os limites de Cor b^* considerados aceitáveis para o produto. Concentrações superiores a 20% já ultrapassam o limite superior, o que pode indicar alteração indesejável na coloração final do material. Esse aumento da coloração amarelada pode estar relacionado à presença de impurezas ou degradação térmica do PCR durante o processamento. Isso é uma possível tendência que a pré-forma no cliente irá tender a amarelar,

Figura 44 - Gráfico dos resultados de Minidisco Cor b^* PET semicristalino Virgem x PET semicristalino PCR.



Fonte: O autor, 2024.

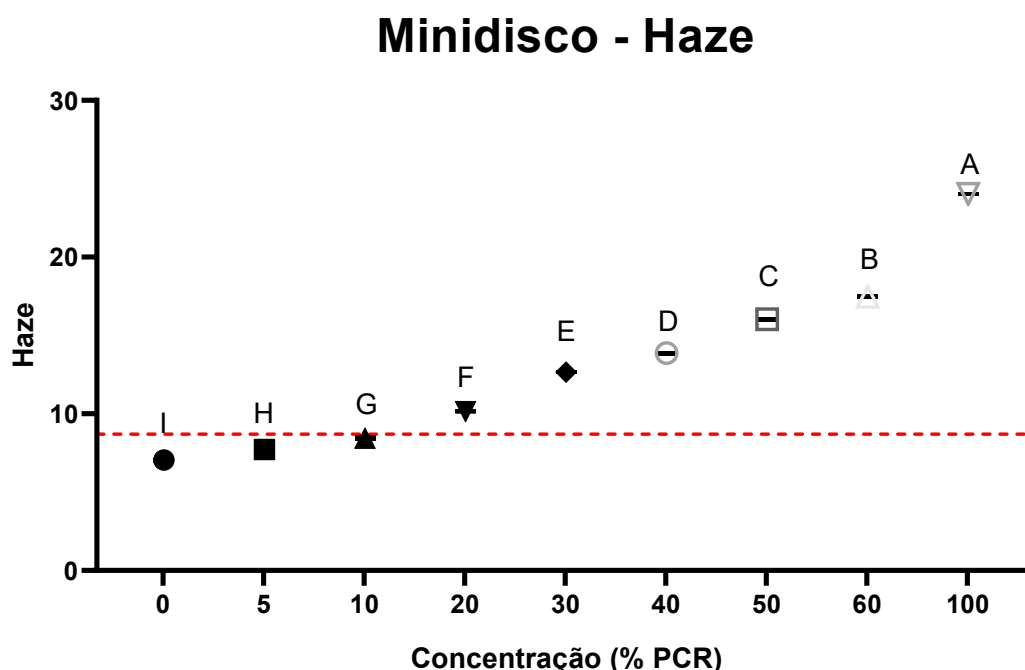
De acordo com Benyathiar et al. (2022), a variação da cor b^* , conforme apresentada na Tabela 22 (em anexo), demonstra que o aumento da proporção de PET PCR resulta em uma elevação dos valores dessa componente, indicando um leve deslocamento para tonalidades mais amareladas. De maneira semelhante, a Figura 44 também evidencia esse comportamento,

apresentando uma tendência de aumento da cor b^* com o incremento do teor de PCR, porém com variações mais intensas, possivelmente a uma relevante cor b^* negativa da 100% PCR.

É possível realizar ajustes operacionais no processo visando o controle da cor b^* , como, por exemplo, a modificação dos valores de cor b^* no PET amorfo. Além disso, medidas como o controle da entrada de oxigênio durante eventuais paradas da planta e a regulação da vazão de oxigênio na NPU também são estratégias eficazes. Segundo Lurgi Zimmer (2001), esses fatores têm influência direta na estabilidade da coloração e são fundamentais para garantir a qualidade do PET semicristalino.

Conforme a Figura 45, observa-se que o parâmetro de *haze* apresenta um aumento significativo com a elevação da concentração de PCR. A partir de 20% de PCR, os valores ultrapassam os limites especificados para o produto, indicando que a transparência do material é comprometida. Este comportamento pode ser atribuído à presença de impurezas, degradação térmica e alterações morfológicas no polímero reciclado, que promovem maior dispersão da luz e, conseqüentemente, aumento da turbidez. Tais alterações impactam diretamente na estética e na funcionalidade do produto final, especialmente em aplicações que exigem alta transparência.

Figura 45 - Gráfico dos resultados de Minidisco Cor Haze PET semicristalino Virgem x PET semicristalino PCR.



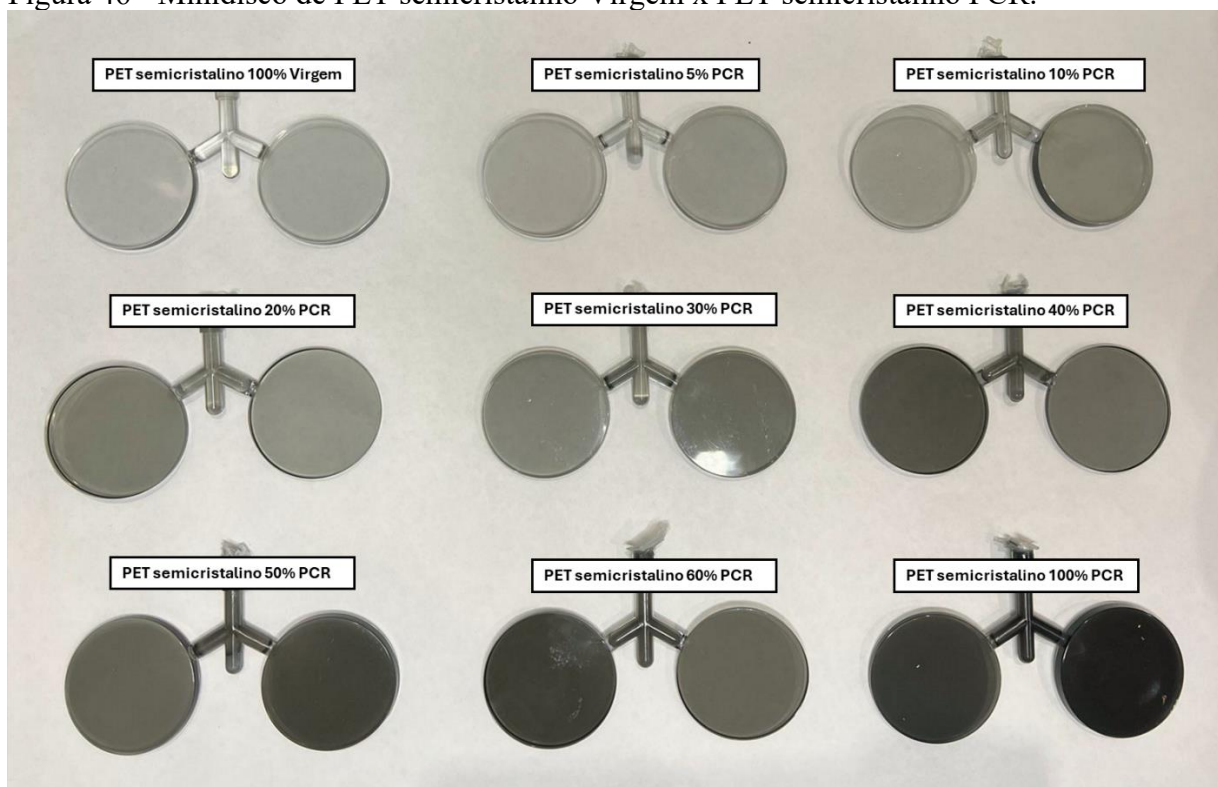
Fonte: O autor, 2024.

Conforme observado por Benyathiar et al. (2022), a propriedade óptica haze, apresentada na Tabela 22 (em anexo), mostra uma tendência de aumento à medida que cresce a proporção de PET PCR nas amostras. Esse comportamento reflete uma redução na

transparência do material, possivelmente decorrente de resíduos, partículas finas ou defeitos estruturais introduzidos durante o processo de reciclagem. Tais alterações comprometem a qualidade visual do PET PCR, especialmente em aplicações que demandam alta nitidez, como garrafas para bebidas. De modo análogo, a Figura 45 confirma essa tendência, evidenciando um incremento nos níveis de turbidez proporcional ao conteúdo de material reciclado.

Conforme a Figura 46, observamos os minidiscos formados com as resinas do PET semicristalino Virgem com suas proporções de PET semicristalino PCR. A medida do aumento da proporção, há um aumento do escurecimento do minidisco e isso é causado devido a algumas impurezas presente no PET semicristalino PCR, como por exemplo, outros polímeros presentes, metais, catalisadores, corantes, pigmentos e resíduos orgânicos. (BARRETO; NASCIMENTO; NUNES, 2020).

Figura 46 - Minidisco de PET semicristalino Virgem x PET semicristalino PCR.



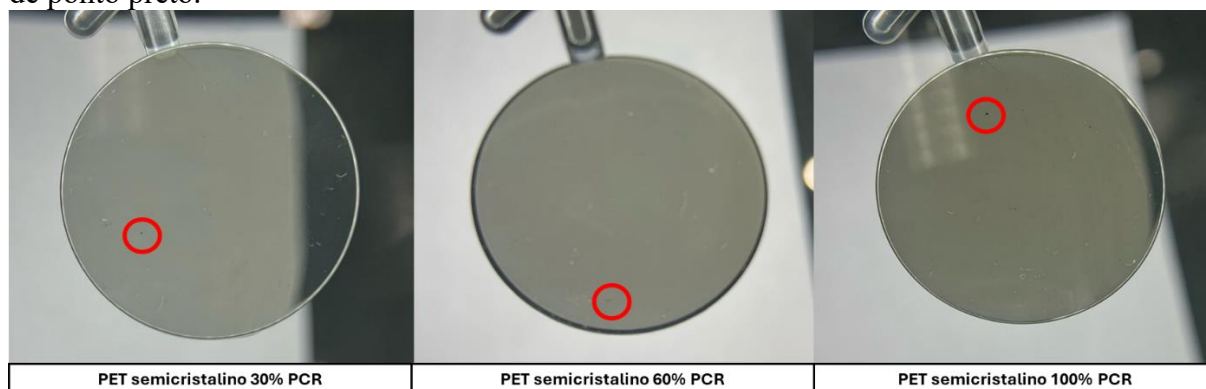
Fonte: O autor, 2024

Barreto, Nascimento e Nunes (2020) realizaram um experimento para acompanhar a ocorrência de *black specks* (pontos pretos) em amostras de PET virgem (0% PCR) e PET 100% PCR. Não foram observadas evidências de pontos pretos com dimensões iguais ou superiores a 3 mm. A presença de *black specks* foi registrada apenas em faixas de tamanho entre 0,5 mm e 1 mm, e menores que 0,5 mm. Na maioria das amostras analisadas, não houve ocorrência

desses defeitos, sendo que o maior número detectado foi de seis peças com pontos pretos, distribuídas em três amostras.

Conforme a Figura 47 ilustra a visualização de pontos pretos nas amostras, evidenciando as proporções de PET semicristalino PCR incorporadas ao PET semicristalino virgem. À medida que a proporção de PET semicristalino PCR aumenta, observa-se um acréscimo tanto na quantidade quanto no tamanho desses pontos. No entanto, não foram observados pontos pretos nas proporções de 0% a 20% de PET semicristalino PCR. Esse fenômeno pode estar relacionado à presença de impurezas oriundas de polímeros com ponto de fusão distinto do PET semicristalino, além de possíveis contaminantes como metais, pigmentos e corantes. Segundo Barreto, Nascimento e Nunes (2020) a ocorrência de pontos pretos constitui um fator crítico, pois esse tipo de defeito pode comprometer tanto a qualidade estética quanto a funcionalidade do material, impactando negativamente sua aplicação em embalagens para alimentos.

Figura 47 - Minidisco de PET semicristalino Virgem x PET semicristalino PCR com presença de ponto preto.

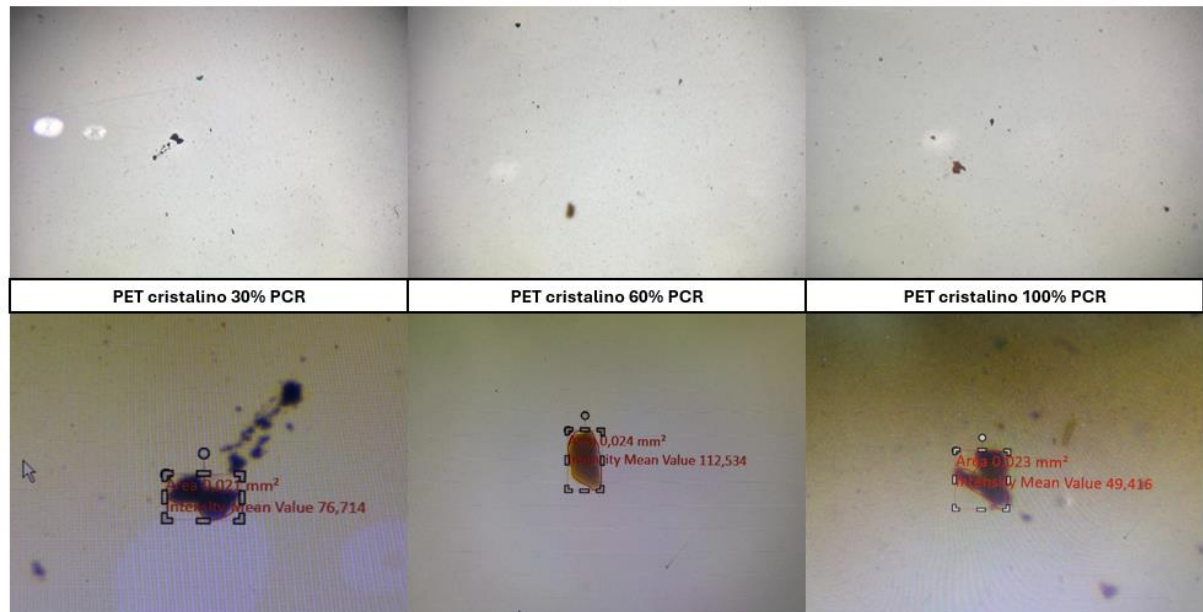


Fonte: O autor, 2024

A Figura 48, obtida por meio de um estereomicroscópio, permite visualizar não apenas o formato das contaminações, mas também sua área. Nas proporções de 30% a 100%, foram encontrados pontos pretos (*black speck*) com áreas aproximadas de 0,025 mm², o que pode indicar um comprimento de cerca de 0,16 mm. Segundo Barreto, Nascimento e Nunes (2020, p. 2198), “As pré-formas com *black speck* < 0,5 mm foram sopradas e as garrafas submetidas à análise visual, o resultado foi satisfatório, pois o *black speck* expandido foi atenuado e a visualização a olho nu foi imperceptível.” Esse resultado indica que os pontos pretos encontrados no estudo não causam impactos visuais nem técnicos significativos nas pré-formas. Ainda conforme os autores, “quanto maior o número de pontos pretos e maior sua área, maior será o comprometimento da qualidade da embalagem”, podendo esses pontos “afetarem a estética e até mesmo a funcionalidade da embalagem, tornando-a inadequada para uso em produtos alimentícios, por exemplo” (BARRETO; NASCIMENTO; NUNES,

2020). Dessa forma, a análise dessas contaminações é fundamental para garantir a integridade do produto final.

Figura 48 - Minidisco de PET semicristalino Virgem x PET semicristalino PCR visualizado no estéreo microscópio.

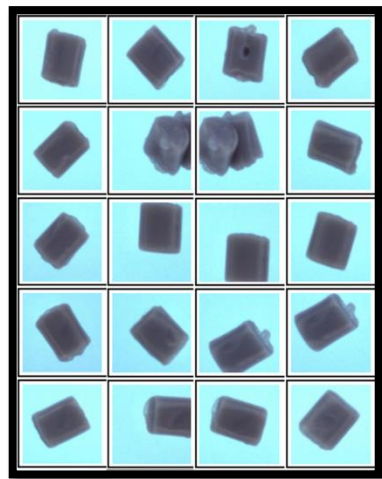


Fonte: O autor, 2024.

4.2.1.9. Sorter Optico

A Figura 49, apresentada abaixo, mostra uma fotografia amostral dos chips, na qual não foi identificada nenhuma anomalia superficial, como pontos pretos ou qualquer outro tipo de contaminação. Após a análise de aproximadamente 8.000 chips, não foram encontrados pontos pretos visíveis na superfície, o que indica que, nessa amostra, os chips estão livres de contaminações visíveis que possam comprometer a qualidade estética ou funcional do material. (BARRETO; NASCIMENTO; NUNES, 2020).

Figura 49 - Imagem dos chips PET semicristalino PCR no Sorter Optico.



Fonte: O autor, 2024

CAPÍTULO V : CONCLUSÃO

A reciclagem de garrafas PET exerce um papel fundamental na mitigação dos impactos ambientais associados ao uso de polímeros. Ao reinserir o PET na cadeia produtiva, é possível não apenas reduzir a geração de resíduos sólidos, especialmente em aterros sanitários, como também diminuir os custos relacionados à matéria-prima e ao consumo de energia. Esse processo contribui de forma significativa para a preservação ambiental, ao promover a economia de recursos naturais e a redução da poluição, além de incentivar a consolidação de uma economia circular mais sustentável. A conscientização e o engajamento da sociedade nesse processo são essenciais para avançarmos rumo a um futuro mais sustentável e menos dependente de recursos não renováveis.

Através da presente dissertação foi possível observar que praticamente 100% dos resultados das proporções m/m de 0%, 5% e 10% encontram-se dentro dos limites de especificação. As proporções entre 20% e 30% apresentam desempenho intermediário, exigindo apenas pequenos ajustes para atender plenamente aos critérios estabelecidos. Já as proporções de 40% a 100% demandam intervenções mais significativas nas variáveis do processo, a fim de garantir conformidade com as especificações. Embora esse panorama, Não foi determinada uma melhor proporção, visto que isso depende de alguns fatores, como por exemplo as perspectivas do mercado nacional e global, exigências de clientes e disponibilidade da matéria prima, porém foi apresentado a viabilidade, seja ela, via processo ou legislativa, para produção do PET PCR misturado ao PET virgem para embalagem de alimentos, visto que as legislações estão cada vez mais rigorosas, conforme a figura 50 em anexo, e os processos com tecnologias mais robustas visando trazer produtos com especificações dentro dos parâmetros adequados para atender o consumidor final.

Apesar de não ter sido possível realizar testes em plantas industriais devido à falta de oportunidade produtiva, relacionada ao baixo número de empresas que utilizam de 5% a 60% de PET PCR em PET virgem, as misturas foram realizadas em laboratório. De modo geral, os resultados obtidos foram satisfatórios. Conforme apresentado na seção de resultados e discussões, foi possível comparar os dados com outros estudos relacionados aos mesmos parâmetros analíticos, e as tendências observadas foram semelhantes. No entanto, alguns *outliers* foram identificados, possivelmente em razão da falta de homogeneidade nas amostras de laboratório, que diferem dos chips produzidos industrialmente com as devidas proporções. Isso ocorre porque, em um processo industrial, a mistura entre PET PCR e PET virgem tende a ser mais homogênea, o que favorece uma fusão mais eficiente entre os materiais.

Um ponto crucial foi a determinação dos principais contaminantes que podem impactar a variabilidade analítica do produto, especialmente os teores de acetaldeído e limoneno. Os resultados obtidos, assim como as tendências observadas, permaneceram dentro dos limites de controle operacional. Além disso, foram identificados fatores operacionais favoráveis à redução desses contaminantes, possibilitando melhorias nos processos de descontaminação com o objetivo de minimizar ainda mais seus níveis.

PERSPECTIVAS

Perspectivas econômicas, regulatórios e de mercado.

PINTER *et al.* (2021, p. 5) afirmam que:

Várias iniciativas da indústria e empresas do setor privado se comprometeram a aumentar as taxas de reciclagem e o conteúdo reciclado em seus produtos. Lá, eles visam a reciclagem e reutilização de 65% do material de embalagem PET até 2030, dos quais 30% são destinados ao circuito fechado e 25% do conteúdo de reciclagem pós-consumo é a meta para plásticos em geral até 2025. Grandes marcas como Coca-Cola, PepsiCo, Danone e Nestlé assinaram compromissos globais estabelecidos por Ellen McArthur, com a Danone e a Nestlé excedendo essas metas em 50% e 30%, respectivamente. Enquanto algumas marcas já estão alcançando um conteúdo 100% reciclado em garrafas PET, essas garrafas, ao entrar nos fluxos de coleta e triagem, se misturam com outras garrafas que podem ter um conteúdo reciclado muito menor. Portanto, os níveis de conteúdo de rPET são um pouco diluídos

As perspectivas para o PET reciclado e a PET virgem nos próximos anos apresentam tendências distintas, influenciadas por fatores econômicos, regulatórios e de mercado.

PET Reciclado:

O mercado de PET reciclado tem mostrado crescimento, impulsionado por iniciativas de sustentabilidade e aumento da demanda por materiais reciclados. No Brasil, a capacidade de reciclagem de PET está em expansão, com empresas planejando atingir 9.000 toneladas por mês de capacidade de reciclagem até 2025. Além disso, a União Europeia implementou regulamentações que exigem que todas as garrafas de plástico fabricadas com PET contenham pelo menos 25% de plástico reciclado a partir de janeiro de 2025, com a meta de 30% até 2030. (AS.COM, 2023).

Resina Virgem:

A resina virgem de PET enfrenta desafios devido à volatilidade dos preços e à concorrência com o PET reciclado. Em 2023, o mercado de resinas plásticas apresentou sinais

de recuperação, com projeções de crescimento de 3% para a resina PET destinada a embalagens. (PLÁSTICO.COM.BR, 2023)

No entanto, a queda nos preços das resinas virgens tem impactado negativamente o mercado de PET reciclado, tornando-o menos competitivo em relação ao material virgem. (PLÁSTICO.COM.BR, 2023)

Perspectivas Futuras:

Espera-se que o mercado de PET reciclado continue a crescer, impulsionado por regulamentações ambientais mais rigorosas e pela crescente conscientização sobre sustentabilidade. Por outro lado, a resina virgem de PET pode enfrentar desafios devido à concorrência com materiais reciclados e à necessidade de adaptação às novas demandas do mercado.

Em resumo, o PET reciclado tende a se beneficiar de tendências ambientais e regulatórias favoráveis, enquanto a resina virgem de PET pode precisar se adaptar a um mercado mais competitivo e orientado para a sustentabilidade.

Perspectivas Analíticas:

Além dos parâmetros analíticos abordados neste estudo, existe uma ampla gama de outros ensaios que podem ser explorados. Entre eles, destaca-se a determinação do teor de grupos carboxílicos, um dos principais indicadores do grau de degradação do PET, bem como a quantificação de IPA (ácido isoftálico) e DEG (dietilenoglicol), que estão diretamente relacionados ao ponto de fusão e às propriedades mecânicas do polímero. Também é relevante a realização de estudos sobre migração de contaminantes, por meio de laudos específicos. Este trabalho pode ser expandido para incluir a análise de pré-formas com diferentes proporções de PET PCR, incorporando ainda avaliações físicas, como medições dimensionais das partes críticas, análise da espessura da distribuição de material na garrafa, resistência ao *stress cracking*, capacidade volumétrica, testes de queda livre, *burst test* e o teste de expansão dimensional submetido à temperatura (EDT)

APÊNDICE

Tabela 13 – Parâmetros analíticos de ponto de fusão e cristalinidade entre PET amorfo virgem e PET amorfo PCR.

DSC (<i>Diferencial Scanning Calorimeter</i>)						
Concentração (% PET PCR)	Massa mg	Inicial ° C	Pico ° C	Final ° C	Entalpia J/g	Cristalinidade %
0	6,10	231,89	247,81	253,14	-33,31	29,48
5	5,90	230,98	247,19	254,35	-33,32	29,48
10	6,20	230,65	247,87	254,62	-33,17	29,35
20	5,50	232,07	247,24	254,72	-32,37	28,64
30	6,30	231,60	246,85	253,56	-31,55	27,92
40	5,35	231,33	246,59	253,16	-33,14	29,32
50	5,25	231,95	247,89	255,01	-33,56	29,70
60	5,71	234,38	248,18	254,97	-30,89	27,34
100	5,86	233,36	246,87	255,15	-35,67	31,56

Fonte: O Autor, 2025

Tabela 14 – Parâmetros analíticos de ponto de fusão e cristalinidade entre PET semicristalino virgem e PET semicristalino PCR.

DSC (<i>Diferencial Scanning Calorimeter</i>)						
Concentração (% PET PCR)	Massa mg	Inicial ° C	Pico ° C	Final ° C	Entalpia J/g	Cristalinidade %
0	7,32	232,11	236,87	245,62	-54,90	48,59
5	5,91	232,82	236,60	243,65	-57,66	51,02
10	5,53	232,40	237,45	245,05	-55,23	48,88
20	7,06	231,27	235,93	244,04	-54,93	48,61
30	6,80	231,62	235,63	244,06	-56,27	49,80
40	5,59	232,38	237,82	244,62	-53,82	47,63
50	5,14	234,76	237,82	244,48	-54,35	48,10
60	6,60	230,78	237,44	245,28	-53,48	47,33
100	6,06	233,54	239,77	246,49	-53,92	47,72

Fonte: O Autor, 2025

Tabela 15 – Resultados em triplicata com relação aos parâmetros analíticos da resina PET Amorfo Virgem e PCR.

Concentração (% PCR)	Repetição	VISCOSIDADE INTRÍNSECA	Cor L*a*b*			Acetaldeído	Ponto de Fusão	Cristalinidade	Limoneno	Umidade
			l*	a*	b*					
0	1	0,609	52,23	-0,66	-3,34	61,53	246,76	29,10	1,64	0,18
0	2	0,611	53,46	-0,70	-3,33	63,99	247,80	30,19	1,70	0,16
0	3	0,591	52,66	-0,78	-2,87	64,47	246,81	29,46	1,66	0,16
5	1	0,628	52,17	-0,89	-2,89	55,01	247,73	29,50	2,85	0,14
5	2	0,618	53,18	-0,96	-1,98	58,90	246,20	28,54	2,83	0,20
5	3	0,604	52,22	-0,93	-1,91	57,94	247,19	29,36	2,90	0,18
10	1	0,610	51,64	-1,12	-1,08	49,20	246,88	29,21	2,67	0,20
10	2	0,614	52,55	-0,94	-1,34	49,72	247,87	29,34	2,65	0,18
10	3	0,609	51,17	-1,06	-1,56	49,30	247,47	29,53	2,61	0,20
20	1	0,624	51,16	-1,50	0,66	45,94	247,24	28,55	5,28	0,24
20	2	0,605	48,41	-1,70	1,74	44,65	247,33	28,81	5,25	0,22
20	3	0,612	49,69	-1,52	1,08	33,11	246,20	28,52	5,35	0,24
30	1	0,605	52,06	-1,34	0,88	36,38	246,85	27,92	8,96	0,22
30	2	0,612	50,19	-1,39	1,40	37,07	246,52	29,50	8,84	0,22
30	3	0,609	49,20	-1,53	1,83	36,01	246,20	29,36	8,94	0,20
40	1	0,652	48,72	-1,72	3,41	35,47	247,16	28,95	9,14	0,26
40	2	0,651	48,04	-1,86	3,24	38,40	248,81	30,04	9,20	0,28
40	3	0,652	48,21	-1,70	2,76	36,50	246,59	29,43	9,18	0,22
50	1	0,630	46,72	-2,02	4,93	32,10	247,89	29,76	10,48	0,28
50	2	0,632	47,11	-1,79	3,89	30,10	246,27	29,28	10,54	0,32
50	3	0,622	46,95	-1,83	4,06	31,60	248,48	29,56	10,53	0,28
60	1	0,639	47,35	-1,99	5,39	25,50	248,18	27,56	13,34	0,28
60	2	0,635	45,67	-2,07	5,26	23,98	246,23	30,32	13,40	0,28
60	3	0,635	46,33	-1,95	4,80	25,60	246,25	30,07	13,39	0,28
100	1	0,657	43,27	-2,56	8,42	2,76	246,87	31,38	13,90	0,42
100	2	0,650	42,30	-2,47	8,53	2,20	247,90	28,87	13,89	0,40
100	3	0,633	42,44	-2,47	8,31	2,80	248,73	28,67	13,85	0,38

Fonte: O Autor, 2024

Tabela 16 – Resultados em triplicata com relação aos parâmetros analíticos da resina PET Semicristalina Virgem e PCR.

Concentração (% PCR)	Repetição	VISCOSIDADE INTRÍNSECA	Cor L*a*b*			Acetaldeído	Ponto de Fusão	Cristalinidade	Limoneno	Umidade	Minidisco Cor L*a*b* Haze			
			l*	a*	b*						l*	a*	b*	Haze
0	1	0,831	79,52	-1,55	-3,88	0,22	236,88	48,56	2,36	0,12	90,52	-0,37	0,49	7,02
0	2	0,829	79,48	-1,56	-3,88	0,22	236,84	48,52	2,38	0,15	90,54	-0,36	0,48	7,06
0	3	0,827	79,57	-1,58	-3,86	0,24	236,90	48,36	2,39	0,14	90,55	-0,39	0,49	7,05
5	1	0,827	77,85	-1,58	-3,87	0,24	236,55	51,23	2,03	0,12	88,93	-0,65	0,98	7,71
5	2	0,828	77,89	-1,59	-3,86	0,22	236,62	51,24	2,00	0,12	88,93	-0,65	0,99	7,71
5	3	0,831	77,87	-1,60	-3,85	0,22	236,63	51,36	2,01	0,12	88,92	-0,67	1,00	7,72
10	1	0,827	75,55	-1,68	-3,75	0,28	237,40	48,63	2,03	0,15	87,52	-0,82	1,47	8,40
10	2	0,827	75,76	-1,65	-3,73	0,24	237,52	48,95	2,00	0,15	87,52	-0,85	1,48	8,50
10	3	0,832	75,70	-1,67	-3,79	0,22	237,48	48,93	2,01	0,16	87,53	-0,84	1,47	8,46
20	1	0,834	74,37	-1,67	-3,69	0,49	235,93	48,52	2,69	0,14	84,72	-1,17	1,95	10,16
20	2	0,832	74,35	-1,66	-3,70	0,52	235,60	48,63	2,55	0,16	84,73	-1,17	1,96	10,12
20	3	0,829	74,45	-1,69	-3,72	0,45	235,65	48,75	2,70	0,15	84,75	-1,16	1,96	10,14
30	1	0,846	71,95	-1,84	-3,74	0,38	237,82	49,50	3,45	0,17	80,36	-1,69	3,02	12,63
30	2	0,846	71,78	-1,83	-3,75	0,32	237,96	49,63	3,46	0,17	80,32	-1,70	3,04	12,68
30	3	0,839	71,8/	-1,86	-3,72	0,34	237,63	49,86	3,44	0,15	80,34	-1,65	3,06	12,69
40	1	0,846	68,57	-2,03	-3,64	0,39	237,,56	47,53	2,76	0,21	77,69	-1,89	3,48	13,85
40	2	0,849	68,60	-2,01	-3,65	0,30	237,96	47,58	2,85	0,23	77,64	-1,88	3,49	13,86
40	3	0,853	68,56	-2,04	-3,62	0,34	237,52	47,52	2,50	0,20	77,65	-1,90	3,50	13,89
50	1	0,843	65,77	-2,25	-3,36	0,35	237,89	48,63	3,53	0,20	73,42	-2,25	4,56	16,05
50	2	0,846	65,78	-2,26	-3,32	0,36	237,60	48,52	3,70	0,23	73,43	-2,26	4,58	16,06
50	3	0,842	65,79	-2,27	-3,38	0,41	237,48	48,24	3,61	0,21	73,45	-2,28	4,59	16,02
60	1	0,836	65,53	-2,20	-3,64	0,43	237,18	47,39	6,50	0,17	70,36	-2,46	5,18	17,49
60	2	0,832	65,56	-2,21	-3,60	0,34	237,56	47,36	6,51	0,18	70,35	-2,48	5,19	17,49
60	3	0,831	65,59	-2,23	-3,59	0,39	237,69	47,25	6,54	0,19	70,39	-2,50	5,20	17,44
100	1	0,856	57,70	-2,76	-3,29	0,55	239,66	47,23	6,00	0,29	59,89	-2,86	5,39	24,03
100	2	0,854	57,71	-2,76	-3,30	0,54	239,63	47,00	6,02	0,30	59,86	-2,86	5,38	24,03
100	3	0,857	57,74	-2,75	-3,30	0,45	239,58	48,63	6,10	0,27	59,86	-2,87	5,33	24,06

Fonte: O Autor, 2024

Tabela 17 - Cronograma de atividade

Atividades	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	JAN
	2024								2025
Separação das amostras			¹						
Homogeneização das amostras									
Realização das amostras PET amorfo									
Realização das amostras PET semicristalino									
Avaliação crítica									
Finalização									

Fonte: O Autor, 2024

¹ Concluído

Tabela 18 - Parâmetros analíticos e suas concentrações - PET amorfo Virgem X PET amorfo PCR.

Amostras /	IV¹	Cor L*a*b*			AA²	PF³	CRIS⁴	LIM⁵	UM⁶
Parâmetros	dl/g	L*	a*	b*	ppm	°C	°C	ppb	%

¹-Viscosidade intrínseca; ²- Acetaldeído; ³- Ponto de Fusão; ⁴- Cristalinidade; ⁵- Limoneno; ⁶- Umidade

Fonte: O Autor, 2024

Tabela 19 - Parâmetros analíticos e suas concentrações - PET semicristalino Virgem X PET semicristalino PCR.

Amostras /	IV¹	Cor L*a*b*			AA²	PF³	CRIS⁴	LIM⁵	UM⁶	Minidisco Cor L*a*b*			
Parâmetros	DI/g	L*	a*	b*	ppm	°C	°C	ppb	%	L*	a*	b*	Haze

¹-Viscosidade intrínseca; ²- Acetaldeído; ³- Ponto de Fusão; ⁴- Cristalinidade; ⁵- Limoneno; ⁶- Umidade

Fonte: O Autor, 2024

Tabela 20 - Massas utilizadas nas proporções PET amorfo Virgem X PET amorfo PCR.

Análises	Unidade	Total	Virgem ²	5% PCR	10% PCR	20% PCR	30% PCR	40% PCR	50% PCR	60% PCR	100% PCR ³
Total	1 Amostra	3 amostras									
Cor L*a*b* Chip	50 gramas	150 gramas	3 X 50 g V	3X 2,5 g PET PCR +47,5g PET Virgem	3X 5 g PET PCR +45,0g PET Virgem	3X 10 g PET PCR +40,0g PET Virgem	3X 15 g PET PCR +35,0g PET Virgem	3X 20 g PET PCR +30,0g PET Virgem	3X 25 g PET PCR +25,0g PET Virgem	3X 30 g PET PCR +20,0g PET Virgem	3 X 50 g PET PCR
UM ⁶	5 gramas	15 gramas	3X 5g V	3X 0,25 g PET PCR +4,75 g PET Virgem	3X 0,5 g PET PCR +4,5 g PET Virgem	3X 1,0 g PET PCR +4,0 g PET Virgem	3X 1,5 g PET PCR +3,5 g PET Virgem	3X 2,0 g PET PCR +3,0 g PET Virgem	3X 2,5 g PET PCR +2,5 g PET Virgem	3X 3,0 g PET PCR +2,0 g PET Virgem	3X 5g PET PCR
IV ¹ , AA ² , PF ³ , CRIS ⁴ , LIM ⁵ (Moído)	15 gramas	50 gramas	1X 50 g V	1X 50 g MIX COR	1X 50 g MIX COR	1X 50 g MIX COR	1X 50 g MIX COR	1X 50 g MIX COR	1X 50 g MIX COR	1X 50 g MIX COR	1X 50 g PET PCR

¹Viscosidade intrínseca; ². Acetaldeído; ³. Ponto de Fusão; ⁴. Cristalinidade; ⁵. Limoneno; ⁶. Umidade

² Total de PET amorfo Virgem: 877,5 gramas + 87,75 gramas = 965,25 gramas

³Total de PET amorfo PCR : 472,5 gramas + 47,25 gramas = 519,75 gramas

Fonte: O Autor, 2024

Tabela 21 - Massas utilizadas nas proporções PET semicristalino Virgem X PET semicristalino PCR

Análises	Unidade	Total	Virgem ⁴	5% PCR	10% PCR	20% PCR	30% PCR	40% PCR	50% PCR	60% PCR	100% PCR ⁵
Total	1 Amostra	3 amostras									
Cor L*a*b* Chip	50 gramas	150 gramas	3 X 50 g V	3X	3X	3X	3X	3X	3X	3X	3 X 50 g PET PCR
				2,5 g PET	5 g PET	10 g PET	15 g PET	20 g PET	25 g PET	30 g PET	
				PCR	PCR	PCR	PCR	PCR	PCR	PCR	
				+47,5g	+45,0g	+40,0g	+35,0g	+30,0g	+25,0g	+20,0g	
				PET	PET	PET	PET	PET	PET	PET	
UM ⁶	5 gramas	15 gramas	3X 5g V	Virgem	Virgem	Virgem	Virgem	Virgem	Virgem	Virgem	3X 5g PET PCR
				3X	3X	3X	3X	3X	3X	3X	
				0,25 g PET	0,5 g PET	1,0 g PET	1,5 g PET	2,0 g PET	2,5 g PET	3,0 g PET	
				PCR	PCR	PCR	PCR	PCR	PCR	PCR	
				+4,75 g	+4,5 g	+4,0 g	+3,5 g	+3,0 g	+2,5 g	+2,0 g	
IV ¹ ,AA ² ,PF ³ ,CRIS ⁴ ,LIM ⁵ (Moído)	15 gramas	50 gramas	1X 50 g V	PET	PET	PET	PET	PET	PET	PET	1X 50 g PET PCR
				Virgem	Virgem	Virgem	Virgem	Virgem	Virgem	Virgem	
				1X 50 g	1X 50 g	1X 50 g	1X 50 g	1X 50 g	1X 50 g	1X 50 g	
				MIX COR	MIX COR	MIX COR	MIX COR	MIX COR	MIX COR	MIX COR	
Mini Disco Cor L*a*b*Haze	250 gramas	-	1 X 250 g V	1X	1X	1X	1X	1X	1X	1X	1X 250 g PET PCR
				12,5 g PET	25 g PET	50 g PET	75 g PET	100 g PET	125 g PET	150 g PET	
				PCR +	PCR	PCR	PCR	PCR	PCR	PCR	
				237,5g	+225,0g	+200,0g	+175,0g	+150,0g	+125,0g	+100,0g	
				PET	PET	PET	PET	PET	PET	PET	
Sorter Otico	200 gramas	-	1 X 200 g V	Virgem	Virgem	Virgem	Virgem	Virgem	Virgem	Virgem	1X 200 g PET PCR
				1X	1X	1X	1X	1X	1X	1X	
				10,0 g PET	20 g PET	40 g PET	60g PET	80 g PET	100 g PET	120 g PET	
				PCR +	PCR	PCR	PCR	PCR	PCR	PCR	
				190,0g	+180,0g	+160,0g	+140,0g	+120,0g	+100,0g	+80,0g	
				PET	PET	PET	PET	PET	PET	PET	
				Virgem	Virgem	Virgem	Virgem	Virgem	Virgem	Virgem	

¹Viscosidade intrínseca; ²- Acetaldeído; ³- Ponto de Fusão; ⁴- Cristalinidade; ⁵- Limoneno; ⁶- Umidade

⁴Total de PET semicristalino Virgem: 877,5 gramas + 87,75 gramas + 2632,5 gramas = 3597,75 gramas

⁵Total de PET semicristalino PCR: 472,5 gramas + 47,25 gramas + 1417,5 = 1937,25 gramas

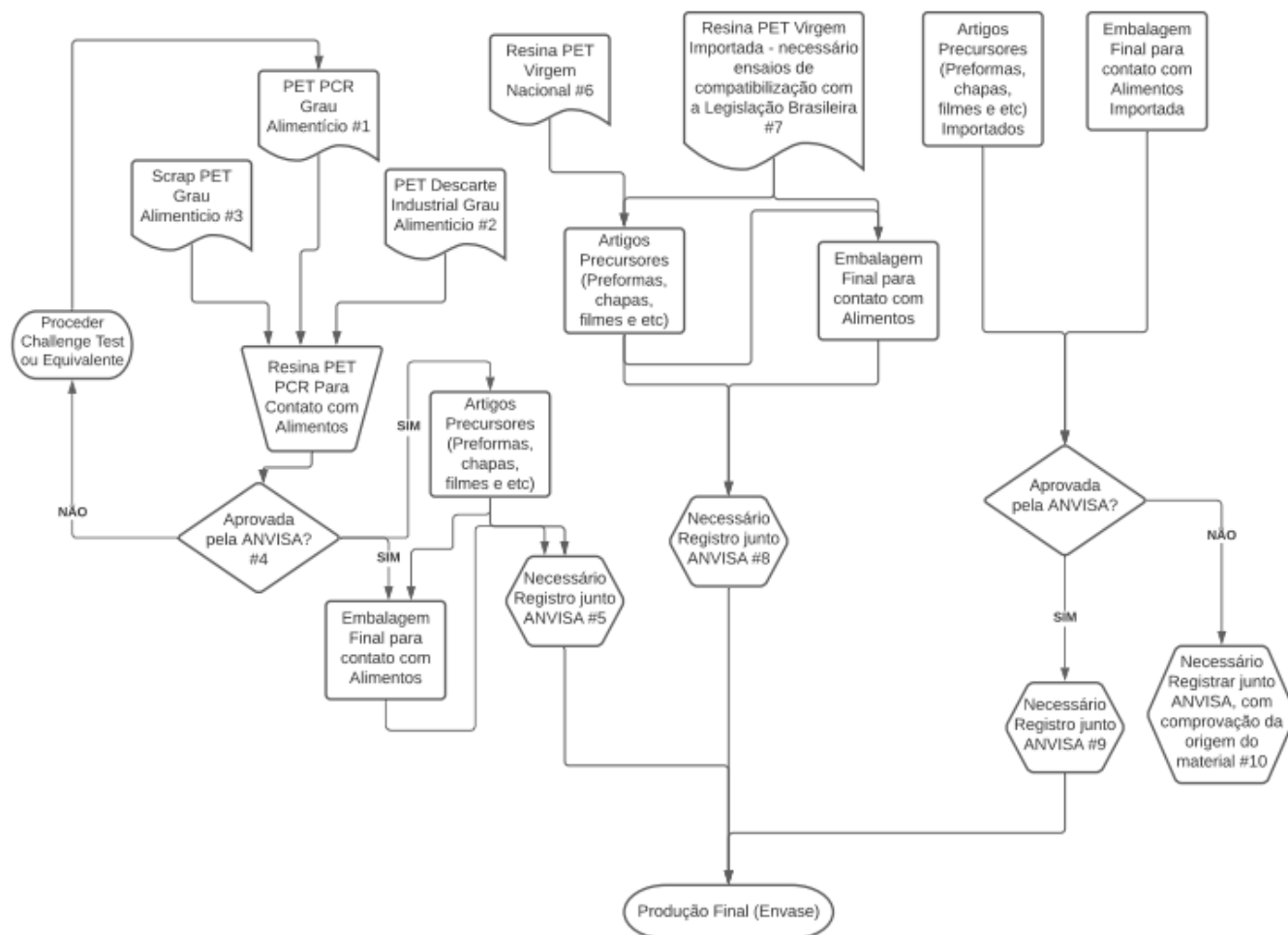
ANEXOS

Tabela 22 - Cor e Haze de diferentes garrafas de tereftalato de polietileno (PET) feitas com diferentes graus reciclados pós-consumo (PCR).

Tipo de PET	L*	a*	b*	Haze
	94,61	– 0,04	0,60	0,74
PCR GRAU A	94,83	– 0,10	0,77	2,34
PCR GRAU B	94,88	– 0,14	1,32	1,92
PCR GRAU C	93,19	– 0,17	2,64	6,20
PCR GRAU D	94,65	– 0,14	0,82	2,59

Fonte: BENYATHIAR et al., 2022

Figura 50 - Fluxograma de liberação de produção de PET Virgem ou PCR para embalagens em Contato com Alimentos.



Fonte: Nota Técnica ABIPET 0920

REFERÊNCIAS

ABIPET - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PET. Embalagem PET. Disponível em: <https://abipet.org.br/embalagem/>. Acesso em: 12 jan. 2025.

ABIPET - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PET. Infográfico: 12º Censo da Reciclagem no Brasil - novembro 2022. São Paulo, 2022. Disponível em: https://abipet.org.br/wp-content/uploads/2022/12/Infografico_12_Censo_da_Reciclagem_no_Brasil-Novembro_2022.pdf. Acesso em: 2 jan. 2025.

ABIPET - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PET. Nota Técnica ABIPET 0920. São Paulo, 2020.

ABIPET - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PET. Reciclagem de PET mantém crescimento, mesmo com os desafios da coleta seletiva. 2 dez. 2022. Disponível em: <https://abipet.org.br/2022/12/02/reciclagem-de-pet-mantem-crescimento-mesmo-com-os-desafios-da-coleta-seletiva/>. Acesso em: 11 jan. 2025.

ABIQUIM. ABIQUIM reforça a importância da química para a sustentabilidade. 5 jan. 2023. Disponível em: <https://abiquim.org.br/comunicacao/noticia/11641>. Acesso em: 11 jan. 2025.

ABREMA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. Brasil enfrenta desafio crítico com descarte inadequado de lixo em 2023. 24 jul. 2024. Disponível em: <https://www.abrema.org.br/2024/07/24/brasil-enfrenta-desafio-critico-com-descarte-inadequado-de-lixo-em-2023/>. Acesso em: 1 abr. 2025.

ABRELPE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2017. Disponível em: https://belasites.com.br/clientes/abrelpe/site/wp-content/uploads/2018/09/SITE_grappa_panoramaAbrelpe_ago_v4.pdf. Acesso em: abr. 2020.

ABRASMA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE SANEAMENTO E MEIO AMBIENTE. A situação atual da reciclagem no Brasil. 18 dez. 2024. Disponível em: <https://abrasma.org.br/2024/12/18/a-situacao-atual-da-reciclagem-no-brasil/>. Acesso em: 18 abr. 2025.

AFINKO. Polímero (Semi) Cristalino: O que é? – Saiba agora! 30 maio 2019. Disponível em: <https://afinkopolimeros.com.br/polimero-cristalino-o-que-e-saiba-ja/>. Acesso em: 10 abr. 2024.

ANJOS, C. A. R. Influência do processo de transformação na geração de acetaldeído e níveis residuais em embalagens de poli (etileno tereftalato) (PET) e em bebidas. 2007. Disponível em: <http://seer.tupa.unesp.br/index.php/BIOENG/article/view/34>. Acesso em: nov. 2020.

AS.COM. El cambio de la Unión Europea que afecta a todas las botellas de plástico a partir de 2025. 2023. Disponível em: <https://as.com/actualidad/sociedad/el-cambio-de-la-union-europea-que-afecta-a-todas-las-botellas-de-plastico-a-partir-de-2025->

[n/?utm_source=chatgpt.com](#). Acesso em: 12 jan. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15395:2006 – Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Termos e definições. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004-1:2024 – Resíduos sólidos — Classificação — Parte 1: Requisitos de classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004-2:2024 – Resíduos sólidos — Classificação — Parte 2: Sistema geral de classificação de resíduos (SGCR). Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. Standard Test Method for Determining Inherent Viscosity of Poly (Ethylene Terephthalate) (PET) by Glass Capillary Viscometer, D4603-03, 2011.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. Standard Test Method for Determining the Melting Temperature and Enthalpy of Fusion by Differential Scanning Calorimetry, E793-06, 2011.

ATKINS, P. W.; JONES, L. Princípios de química: uma abordagem molecular. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

BANNACH, G. et al. Efeitos da história térmica nas propriedades do polímero PET: um experimento para ensino de análise térmica. *Química Nova*, v. 34, n. 10, p. 1825–1829, 2011. DOI: 10.1590/S0100-40422011001000003.

BARRETO, F. H. C. et al. A influência do uso de polietileno tereftálico virgem (PET-V) e pós-consumo reciclado (PET-PCR) nos parâmetros de qualidade na produção de embalagens destinadas a bebidas. *Brazilian Journal of Development*, Curitiba, v. 6, n. 1, p. 2189–2208, 2020. DOI: 10.34117/bjdv6n1-159.

BENYATHIAR, P. et al. Polyethylene Terephthalate (PET) Bottle-to-Bottle Recycling for the Beverage Industry: A Review. *Polymers*, v. 14, n. 12, p. 2366, 2022. DOI: 10.3390/polym14122366.

BILLMEYER, F. W. *Textbook of Polymer Science*. 3. ed. New York: Wiley-Interscience, 1984.

BRANDÃO, F. V. *Evaluation of commercially available post-consumer recycled PET to produce bottles for mineral water*. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Católica Portuguesa, Porto, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ucp.pt/bitstream/10400.14/32994/1/Tese.pdf>. Acesso em: 15 fev. 2025.

BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução RDC nº 20, de 26 de março de 2008. Dispõe sobre o uso de resinas recicladas pós-consumo para a fabricação de embalagens para alimentos e bebidas. *Diário Oficial da União*, Brasília, 26 mar. 2008. Seção 1, p. 56.

BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução RDC nº 95, de 16 de março de 2001. Dispõe sobre os critérios para a utilização de resinas recicladas para embalagens de alimentos. *Diário Oficial da União*, Brasília, 16 mar. 2001. Seção 1, p. 48.

CIE – COMISSÃO INTERNACIONAL DE ILUMINAÇÃO. *Colorimetria*. 4. ed. Viena: CIE, 2004. (Publicação CIE nº 15:2004).

CIE – COMISSÃO INTERNACIONAL DE ILUMINAÇÃO. *Recomendações sobre espaços uniformes de cor, equações de diferença de cor e termos métricos de cor*. Viena: CIE, 1976. (Publicação CIE nº 15 (E-1.3.1)).

DIÁRIO DO ENVASE. Injeção de pré-formas PET. 2009. Disponível em: <http://superenvase.blogspot.com/2009/08/injecao-de-pre-formas-pet.html>. Acesso em: out. 2020.

FDA – FOOD AND DRUG ADMINISTRATION. *Guidance for Industry: Use of Recycled Plastics in Food Packaging (Chemistry Considerations)*. Silver Spring: FDA, 2021. Disponível em: <https://www.fda.gov>. Acesso em: jan. 2020.

FRANZ, R. et al. Study on the migration of organic compounds from post-consumer PET into food simulants. *Food Additives and Contaminants*, v. 21, n. 3, p. 265-286, 2004. DOI: 10.1080/02652030310001655449.

GAZETA DO POVO. PIB do Brasil. 2025. Disponível em: <https://infograficos.gazetadopovo.com.br/economia/pib-do-brasil/>. Acesso em: 11 jan. 2025.

GILENO, L. A.; TURCI, L. F. R. Life cycle assessment for PET-bottle recycling in Brazil: B2B and B2F routes. *Cleaner Environmental Systems*, v. 2, p. 100049, 2021. DOI: 10.1016/j.cesys.2021.100049.

GOMES, C. E.; SILVA, M. C. Características do PET para reciclagem e suas implicações ambientais. *Revista Brasileira de Tecnologia e Sustentabilidade*, v. 12, n. 2, p. 98-105, 2021. DOI: 10.1234/rbts.2021.06789.

INTERNATIONAL SOLID WASTE ASSOCIATION (ISWA). *O futuro do setor de gestão de resíduos: tendências, oportunidades e desafios para a década (2021-2030)*. 2022. Disponível em: <https://abrema.org.br/wp-content/uploads/2022/08/O-futuro-do-setor-de-gestao-de-residuos-ISWA-2022.pdf>. Acesso em: 3 mar. 2025.

ITAL – INSTITUTO DE TECNOLOGIA DE ALIMENTOS. Você conhece o lado químico do PET? *Informativo CETEA*, v. 9, n. 4, p. 1-4, 2020.

LEITÃO, A.; MENEZES, T. *Isolamento e Purificação do (+)-Limoneno*. 2020. Relatório de Laboratório. Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2020. Disponível em: <https://www.studocu.com/pt/document/instituto-superior-tecnico/laboratorios-de-quimica-iii/isolamento-e-purificacao-do-limoneno/10413415>. Acesso em: 21 abr. 2025.

LURGI ZIMMER. *Process Description / Module Description*. Alemanha: Lurgi Zimmer, 2001. (Documento 69813-####-#-##-B281-2001, Rev. 0).

MACEDO, I. M. E. et al. Reciclagem do polietileno tereftalato (PET) no fomento da economia circular. *Brazilian Journal of Development*, v. 6, n. 8, p. 57704–57723, 2020. DOI: 10.34117/bjdv6n8-246.

MANCINI, S. D.; MATOS, I. G.; ALMEIDA, R. F. Determinação da Variação da Viscosidade Intrínseca do Poli (Tereftalato de Etileno) de Embalagens. *Polímeros*, v. 14, n. 2, p. 98-103, 2004. DOI: 10.1590/S0104-14282004000200008.

MARCELO, C. S. et al. Post-Consumer Recycled PET: A Comprehensive Review of Food and Beverage Packaging Safety in Brazil. *Polymers*, v. 17, n. 5, p. 594, 2025. DOI: 10.3390/polym17050594.

MARTINBIANCO, B. *Reciclagem química do PET: avaliação das principais rotas de despolimerização*. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

MARTINS, C. *Tecnologia de polímeros e aditivos em plásticos*. 2. ed. São Paulo: Editora Plásticos, 2019.

MONTGOMERY, D. C. *Statistical Quality Control: A Modern Introduction*. 7. ed. Hoboken: Wiley, 2012.

MORITZ, A. R. *Existe cor em nossas vidas: A colorimetria aplicada em nossos dias*. São Paulo: Braseq, 2011.

OLIVEIRA, M. C.; ALMEIDA, J. P. Reciclagem do PET e a diminuição da degradação ambiental: benefícios e desafios. *Revista Brasileira de Sustentabilidade e Meio Ambiente*, v. 13, n. 2, p. 98-112, 2021. DOI: 10.2345/rbsa.2021.23456.

PINTER, E. et al. Circularity study on PET bottle-to-bottle recycling. *Sustainability*, v. 13, n. 13, p. 7370, 2021. DOI: 10.3390/su13137370.

PLÁSTICO.COM.BR. Resinas virgens têm queda de preços. 2023. Disponível em: <https://www.plastico.com.br/resinas-virgens-tem-queda-de-precos/>. Acesso em: 13 jan. 2025.

PLASTICS TECHNOLOGY. *Best Practices for Plastic Processors*. Disponível em: <https://www.ptonline.com/>. Acesso em: 3 dez. 2024.

RACANELLI, L. et al. A influência do uso de Polietileno Tereftálico Virgem (PET-V) e Pós-Consumo Reciclado (PET-PCR) nos parâmetros de qualidade na produção de embalagens destinadas a bebidas. *Brazilian Journal of Development*, v. 6, n. 2, p. 7520–7532, 2020. DOI: 10.34117/bjdv6n2-314.

SANTOS, L. M.; COSTA, H. J. Rota mecânica de reciclagem do PET: processos e desafios. *Revista Brasileira de Engenharia Ambiental*, v. 18, n. 4, p. 112-123, 2020. DOI: 10.2345/rbea.2020.03128.

SCIENCE IN SCHOOL. *Citrus science: limonene*. Disponível em: <https://www.scienceinschool.org/pt-pt/article/2022/citrus-science-limonene/>. Acesso em: 18 jan. 2025.

SHEN, X. et al. Investigating Polyethylene Terephthalate Beverage Packaging: Impact of Recycled Content on Acetaldehyde, Benzene, and Other Contaminants. *Journal of Polymers and the Environment*, 2025. DOI: 10.1007/s10924-025-03544-1.

SILVA, A. L.; PEREIRA, R. A. Estudo sobre a ação de catalisadores na cinética de reações orgânicas. *Revista Brasileira de Química*, v. 22, n. 4, p. 478-489, 2021. DOI: 10.5935/0100-4042.20210045.

SILVA, M. S. *Análise do óleo essencial de folhas e frutos de Citrus sp. por cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas*. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química) – Universidade Federal do Norte do Tocantins, Araguaína, 2021.

SOUZA, T. R.; LIMA, C. R. Principais contaminantes do PET reciclado e seus impactos no processo de reciclagem. *Revista Brasileira de Engenharia e Meio Ambiente*, v. 14, n. 3, p. 112-125, 2020. DOI: 10.2345/rbema.2020.09876.

ŠUDOMOVÁ, L. et al. A differential scanning calorimetry (DSC) approach for assessing the quality of polyethylene terephthalate (PET) waste for physical recycling: a proof-of-concept study. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v. 148, p. 10843–10855, 2023. DOI: 10.1007/s10973-023-12430-8.

TORRES, N. et al. Study of thermal and mechanical properties of virgin and recycled poly(ethylene terephthalate) before and after injection molding. *European Polymer Journal*, v. 36, p. 2075–2080, 1999. DOI: 10.1016/S0014-3057(99)00259-5.

VELZEN, U. T. van; BROUWER, M.; MOLENVELD, K. *Technical quality of rPET: technical quality of rPET that can be obtained from Dutch PET bottles that have been collected, sorted and mechanically recycled in different manners*. Wageningen: Wageningen Food & Biobased Research, 2016. (Report 1661).

WEISSMANN, D. PET use in blow molded rigid packaging. In: KROSCWITZ, J. I. (Ed.). *Applied plastics engineering handbook: processing, sustainability, materials, and applications*. 2. ed. Amsterdam: Elsevier, 2023. p. 809–835. ISBN 9780323886673.

WRIGHT, G. W. *Polymer Chemistry: An Introduction*. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 1998.

YUAN, X. et al. Upcycling of waste polyethylene terephthalate plastic bottles into porous carbon for CF₄ adsorption. *Environmental Pollution*, v. 265, p. 114868, 2020. DOI: 10.1016/j.envpol.2020.114868.