

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO - UFPE
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS (CTG)
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

JÚLIA DE QUEIROZ PORTELA

**EFEITO DO DESIGN NOS PARA-CHOQUES DE POLIPROPILENO: ESTUDO DE
CASO EM OFICINAS MECÂNICAS LOCALIZADAS EM RECIFE - PE**

Recife
2022

JÚLIA DE QUEIROZ PORTELA

**EFEITO DO DESIGN NOS PARA-CHOQUES DE POLIPROPILENO: ESTUDO DE
CASO EM OFICINAS MECÂNICAS LOCALIZADAS EM RECIFE - PE**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Federal de
Pernambuco como requisito básico para a
obtenção do grau de Bacharela em
Engenharia de Materiais.

Orientadora: Prof^a. Ana Paula Lima Pacheco

Recife
2022

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

Portela, Júlia de Queiroz.

Efeito do design nos para-choques de polipropileno: estudo de caso em oficinas mecânicas localizadas em Recife - PE / Júlia de Queiroz Portela. - Recife, 2022.

75p. : il., tab.

Orientador(a): Ana Paula Lima Pacheco

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia de Materiais - Bacharelado, 2022.

1. Para-choques. 2. Polipropileno. 3. Processo de fabricação por injeção. 4. Automóveis. I. Pacheco, Ana Paula Lima. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

JÚLIA DE QUEIROZ PORTELA

EFEITO DO DESIGN NOS PARA-CHOQUES DE POLIPROPILENO: ESTUDO DE
CASO EM OFICINAS MECÂNICAS LOCALIZADAS EM RECIFE - PE

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Federal de
Pernambuco como requisito básico para a
obtenção do grau de Bacharela em
Engenharia de Materiais.

Aprovado em: 08/11/2022

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Ana Paula Lima Pacheco (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^a. Dayanne Diniz de Souza (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^a. Yêda Medeiros Bastos de Almeida (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

Aos meus pais,
Marcela e Geraldo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela minha vida e saúde, e por sempre me acompanhar, me dar forças em todas as etapas da minha vida e principalmente por me dar discernimento nos momentos mais difíceis ao longo dessa jornada.

Aos meus pais, Marcela Queiroz e Geraldo Portela, por todo amor incondicional, suporte, criação e exemplo. Agradeço imensamente pela educação, por terem condições de me proporcionarem um estudo de qualidade e me incentivarem tanto a ir em busca de conhecimento, me apoiando em todas as minhas decisões e fazendo que eu não desistisse.

A minha irmã, Camila, madrinha, Daniela, e minhas avós, Dilma Maria e Margarida Maria pelos conselhos, carinho, por estarem presentes em todos os momentos e por serem pilares essenciais em minha vida.

Ao meu namorado, Thiago Farias, por todo o companheirismo, compreensão, amor, por sempre me apoiar em minhas decisões e me dar forças para eu ir em busca dos meus sonhos.

A minha orientadora, Professora Ana Paula Lima Pacheco, que além de ajudar em cada passo desse trabalho, esteve presente na minha trajetória acadêmica sempre muito disposta a passar seus conhecimentos com muita paciência, me acolhendo e distribuindo conselhos.

Aos professores e técnicos do curso de graduação em Engenharia de Materiais da UFPE por transmitirem todos seus conhecimentos e contribuírem com a minha formação. Em especial a professora, Magda Rosângela Santos Vieira, por toda a dedicação com o curso e por sempre ser tão solícita e generosa com os alunos.

Aos amigos que fiz durante minha trajetória acadêmica, Bruna, Jessica, Catarina, Carine e Luiz Henrique, por toda a troca de ensinamentos, parceria, alegria e afago nos momentos ruins, vocês deixaram essa caminhada mais leve.

RESUMO

A indústria automotiva é um setor de grande relevância global e contribui significativamente para o desenvolvimento social e econômico de muitos países. Com o decorrer dos avanços tecnológicos, desde a sua implementação, os modelos passaram por diversas transformações e as montadoras investem cada vez mais em produzir automóveis com equipamentos com alta confiabilidade e qualidade, além da estética. Neste contexto, os para-choques automotivos deixaram de ser apenas uma parte decorativa e são constituintes do sistema de segurança, sendo projetados para absorver a energia de colisão, garantindo a segurança não apenas dos passageiros, mas também de pedestres, caso ocorra algum choque. Neste trabalho foi realizado um estudo teórico, com o objetivo de verificar a influência do design dos para-choques de polipropileno, e de maneira a contribuir com a revisão bibliográfica, um estudo de caso foi realizado em três oficinas mecânicas localizadas em Recife, Pernambuco. As falhas relatadas em duas das três oficinas convergiram para os mesmos pontos de fragilidade vistos em teoria, onde pontos de design como, áreas de vigas, furos de acoplagem e estruturas com diferentes espessuras apresentaram falhas devido ao processo de fabricação por injeção. No entanto é necessário avaliar outras propriedades mecânicas e influências, como garantia de que as falhas foram oriundas de defeitos do design e não de outras interferências.

Palavras-chaves: Para-choques. Polipropileno, processo de fabricação por injeção, automóveis.

ABSTRACT

The automotive industry is an area of great global relevance and contributes significantly to the social and economic development of many countries. Since its implementation, with the incoming technological advances, the vehicles have experienced several transformations and the automakers increasingly invest in producing cars with high reliability and quality equipment beyond aesthetics. Therefore the automotive bumpers are no longer just a decorative part and are components of the safety system also being designed to absorb collision energy, ensuring the safety of the passengers and also pedestrians in case of accident. The aim of this study was to verify the influence of the design in polypropylene bumpers. In order to contribute with the bibliographic review, a case study was carried out in three mechanical workshops located in Recife, Pernambuco. The failures reported in two of the three workshops converged to the same weak points seen in theory which the design points such as beam areas, coupling holes and structures with different thicknesses showed failures due to the injection manufacturing process. However, it is necessary to evaluate further mechanical properties and influences as a guarantee that the failures were caused by design problems and not by other interferences.

Keywords: Bumper; Polypropylene; injection manufacturing; Automobiles.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Produção de transformados plásticos no ano de 2010 à 2019.	20
Figura 2	Consumo aparente de transformados plásticos no ano de 2010 à 2019.....	20
Figura 3	Representação esquemática da estrutura da cadeia do polipropileno com sua unidade de repetição.....	21
Figura 4	Variação da resistência mecânica em função da massa molecular.....	23
Figura 5	Gráfico tensão versus deformação para polímeros.....	25
Figura 6	Representação de polímero semi-cristalino em temperatura ambiente.....	26
Figura 7	Representação da taticidade das cadeias de polipropileno.....	26
Figura 8	Ilustração de uma máquina que utiliza a moldagem por extrusão.....	28
Figura 9	Principais componentes de uma máquina injetora.....	29
Figura 10	Diagrama de uma seção transversal, comparando tensões com e sem carga.....	31
Figura 11	Tensões induzidas por fluxo durante a fase de enchimento: a) cadeias de polímeros esticadas e b) cadeias de polímeros relaxadas.....	32
Figura 12	Tensões induzidas por fluxo durante a fase de embalagem. Submetido a a) baixa pressão, b) alta pressão de embalagem e c) alta e baixa pressão de embalagem.....	32
Figura 13	Tensão residual induzida termicamente em produtos moldados.....	33
Figura 14	Processo básico de oxidação.....	37
Figura 15	Exemplos de reações que levam à cisão na cadeia principal do PP.....	38
Figura 16	Representação esquemática da etapa de iniciação da fotooxidação.....	38
Figura 17	Resina polimérica mais consumida no ano de 2019.....	40

Figura 18	Esquema da reação de polimerização para formação do polipropileno.....	40
Figura 19	Processo de produção do PP.....	41
Figura 20	Ensaio de tração mostrando o Efeito do tempo de exposição de radiação UV, na resistência do PP.....	43
Figura 21	Distribuição de fissuras em PP injetado após 24 semanas a) superfície oposta ao ponto de injeção b) superfície exposta contendo o ponto de injeção.....	44
Figura 22	Fissuração superficial na região do ponto de injeção de um corpo de prova injetado exposto por 15 semanas.....	44
Figura 23	Resistência a tração em função da densidade dos materiais...	46
Figura 24	Projeção do aumento de vidas salvas, pela diminuição do peso dos veículos.....	47
Figura 25	Evolução dos designs.....	50
Figura 26	Projeção de peças com e sem uniformidade na espessura das paredes.....	51
Figura 27	Transição das paredes de uma peça projetada.....	51
Figura 28	Projeção de uma viga.....	52
Figura 29	Projeção de furos de acoplagem.....	52
Figura 30	Para-choque e componentes dianteiros do Cadillac XTS 2015	53
Figura 31	Fluxograma do estudo de caso.....	55
Figura 32	Orçamento de um dos carros da oficina A.....	59
Figura 33	Para-choque dianteiro carro 1.....	61
Figura 34	Para-choque dianteiro carro 2.....	62
Figura 35	Adesivo de reparação de resina epóxi e dióxido de titânio.....	62
Figura 36	Para-choque do modelo Etios antes da recuperação: (a) traseiro e (b) dianteiro.....	63
Figura 37	Recuperação dos para-choques traseiro e dianteiro do Etios: (a) aplicação da massa e (b) com o primer aplicado.....	64
Figura 38	Para-choques recuperados, pós pintura.....	64

Figura 39	Encaixe do para-choque traseiro esquerdo com o para lama..	65
Figura 40	Encaixe para-choque traseiro: (a) esquerdo e (b) direito.....	66
Figura 41	Encaixe do para-choque traseiro esquerdo, Classic LS, Chevrolet.....	66
Figura 42.	Gráfico indicativo dos para-choques substituídos e recuperados do estudo de caso.....	67

LISTA DE QUADROS

Quadro 1	Variáveis do processo de moldagem por injeção e suas respectivas influências no produto final.....	34
Quadro 2	Classificação de degradação em materiais poliméricos.....	35
Quadro 3	Sensibilidade espectral dos polímeros.....	39
Quadro 4	Propriedades do polipropileno isotático.....	42
Quadro 5	Vantagens do uso de plásticos nos automóveis.....	45
Quadro 6	Evolução dos para-choques poliméricos. Tp: termoplástico, Tf: termofixo.....	49
Quadro 7	Perguntas para as oficinas.....	57
Quadro 8	Agrupamento das notas fiscais da Oficina A.....	60

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACC	American Chemistry Council
EPA	Environmental Protection Agency
EPDM	Etileno Propeno Dieno-metileno
EVA	Poli(acetato de vinila)
NHTSA	National Highway Traffic Safety Administration
PE	Polietileno
PP	Polipropileno
PVC	Poli(cloreto de vinila)
TD	Talco
UV	Ultravioleta

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 OBJETIVOS	17
2.1 OBJETIVO GERAL.....	17
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
3 JUSTIFICATIVA	18
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
4.1 INDÚSTRIA DE POLÍMEROS NO BRASIL.....	19
4.2 POLÍMEROS.....	21
4.2.1 Propriedades dos Polímeros	22
4.2.2 Cristalinidade dos polímeros	25
4.2.3 Taticidade dos polímeros	26
4.3 PROCESSAMENTO DOS POLÍMEROS.....	27
4.3.1 Moldagem por extrusão	27
4.3.2 Moldagem por injeção	28
4.3.2.1 Tensões Residuais.....	30
4.4 DEGRADAÇÃO DOS POLÍMEROS.....	34
4.4.1 Degradação térmica	36
4.4.2 Degradação mecânica	36
4.4.3 Degradação por Oxidação	36
4.5 POLIPROPILENO (PP).....	39
4.5.1 Processo de produção do polipropileno	40
4.5.2 Propriedades do polipropileno e aplicações	41
4.5.3 Degradação do polipropileno	42
4.6 A INDÚSTRIA AUTOMOTIVA E OS COMPONENTES POLIMÉRICOS.....	44
4.6.1 Para-choques	47
4.6.1.1 Design dos para-choques.....	48
5 MÉTODOS	55
5.1 OFICINAS.....	55
5.1.1 Oficinas selecionadas	56

5.2 DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE QUESTIONÁRIO.....	56
5.3 ANÁLISE DOS DEFEITOS.....	57
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	58
6.1 OFICINA A.....	58
6.2 Oficina B.....	61
6.3 Oficina C.....	65
6.4 Defeitos nos para-choques.....	67
7 CONCLUSÃO.....	68
8 PERSPECTIVAS FUTURAS.....	69
REFERÊNCIAS.....	70

1 INTRODUÇÃO

As crises do petróleo de 1973 e 1979 foram um marco para a indústria automobilística, elas serviram de conscientização em torno da escassez do combustível e a utilização demasiada de recursos naturais. Em contraponto, causas econômicas e tecnológicas, levaram à substituição dos materiais metálicos e cerâmicos, tradicionais, por poliméricos de maneira gradativa ao longo dos anos. No entanto, essa indústria sofreu um grande impacto e acelerou seu ritmo nas décadas de 1980 a 1990, quando se desenvolveram polímeros de alto desempenho (HEMAIS, 2003).

A indústria automotiva despertou a necessidade da produção de carros mais leves, para atenuar o consumo de combustível, e torná-los mais eficientes, seguros e confortáveis (PLASTICS EUROPE, 2017). Devido a essa demanda, juntamente aos avanços tecnológicos, observou-se a possibilidade dos polímeros serem utilizados como materiais alternativos, uma vez que possuem propriedades e características que garantem a mesma eficiência de materiais tradicionais, além de serem mais econômicos (MATTOS NETO *et al*, 2015).

O polímero é o segundo material mais utilizado nos carros, apenas sendo menos aplicado que os metais, e vem representando uma porcentagem cada vez maior nos veículos pelo seu alto desempenho mecânico. Anualmente, os fabricantes europeus, utilizavam mais de 1 milhão de toneladas de material polimérico em carros. Em análise feita em 2015, a montadora Renault mostrou que até o ano 2030, mais 25 kg de polímero estarão na estrutura dos carros, que já era consumido em média de 150 kg, totalizando 12% de peso do material nos carros (GALLONE, ZENI-GUIDO, 2016).

Um dos polímeros mais utilizados nos automóveis, em revestimentos internos, painéis e principalmente para-choques é o polipropileno (PP), devido à sua boa resistência ao impacto, ótimo custo-benefício e possibilidades de design que ele oferece. O para-choque é um item de segurança obrigatório e em sua grande maioria é composto quase exclusivamente de PP (GALLONE, ZENI-GUIDO, 2016). Uma das características importantes que justificam o uso desse polímero em para-choques é que o PP apresenta alta resistência a ruptura por flexão e fadiga, baixo custo e peso, boa estabilidade térmica e excelente resistência química (DE OLIVEIRA, 2006). Os para-choques exigem um material que combine alta resistência mecânica e tenha também uma boa elasticidade, para garantir os

critérios de segurança de amortecimento quando houver impacto, aliado a uma característica importante como o design frontal dos carros (KARGER-KOCSIS, 1999).

Desde que começou a ser introduzido na indústria automotiva, no ano de 1970, o PP vem conquistando números crescentes em suas aplicações. Esse material oferece soluções às especificações do mercado a um custo baixo, comparado a outros materiais, e atende a necessidade de aplicação em design que a indústria necessita (KARGER-KOCSIS, 1999).

O polipropileno é um polímero sintético e dispõe de várias etapas no seu ciclo de vida: ele é processado, armazenado, usado e descartado. Durante todas essas etapas de utilização, o PP está sujeito a algum tipo de degradação, sendo ocasionada por algumas condições adversas, tais como: altas temperaturas, radiação ultravioleta, atrito e diferença de pressão. A sensibilidade à degradação provém de fatores estruturais e físicos, como cristalinidade, geometria e tensões mecânicas (IRING, TUDOS, 1990).

Os para-choques utilizados nos automóveis são peças fabricadas pelo processo de moldagem por injeção, método mais utilizado para a fabricação de componentes automotivos (KNAUF INDUSTRIES AUTOMOTIVE, 2019). É um processo extremamente versátil, que resulta em peças de alto acabamento e complexidade com alta precisão. Porém, durante as etapas de manufatura desse produto, o polímero base, o PP, juntamente com aditivos, passa por deformações complexas, altas pressões e temperaturas, que afetam suas propriedades e geram tensões residuais (GUEVARA-MORALES e FIGUEROA LÓPEZ, 2014).

Montadoras exigem cada vez mais que as peças de PP apresentem melhores propriedades como uma maior resistência térmica para altos valores de impacto, maior resistência a radiação e preços competitivos (WORTBERG e SCHROER, 2004). Pelos motivos citados, são necessários estudos cada vez mais específicos dos fatores que podem influenciar o desempenho das estruturas dos para-choques, para que haja ajustes e avanços. O presente trabalho irá analisar em quais aspectos do design, dos para-choques de polipropileno, interferem nas propriedades físicas, como a resistência mecânica, que podem acabar afetando a segurança do automóvel. E através do estudo de caso, foram coletados dados de defeitos reais dos para-choques, em oficina mecânica localizada em Recife, para análise e comparação com a pesquisa teórica e relacionando-os a defeitos provenientes do design.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Estudar a influência do design na degradação de para-choques automotivos de polipropileno.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar os aspectos do design que influenciam nas alterações dimensionais e nas tensões residuais dos para-choques de PP moldados por injeção.

- Avaliar quais parâmetros do processo de moldagem por injeção que possuem maior influência na degradação física do PP.

- Analisar os defeitos encontrados nos para-choques, a partir de estudo de casos em oficinas mecânicas, e avaliar quais desses defeitos são oriundos do design.

- Consolidar os fundamentos e conceitos vistos pela discente no decorrer das disciplinas do curso de Engenharia de Materiais, especialmente na área de polímeros, propriedades e estruturas, visando inferir a relação e contribuição desses materiais na sociedade.

3 JUSTIFICATIVA

O processo de injeção é o segundo mais utilizado para moldagem de plásticos. As peças moldadas por injeção podem apresentar alterações estéticas e tensões residuais, que geram algum tipo de degradação física, como: mudança da coloração, empenamento e contrações, originárias do projeto, especificamente do design da peça.

Os para-choques automotivos são peças obrigatórias e de extrema importância na fabricação dos carros. Eles servem para absorção de impacto em casos de choques, para a segurança dos passageiros e também auxiliam na parte estética dos automóveis.

Visto que o polipropileno é um material muito utilizado na composição de várias peças automotivas, material este que são feitos os para-choques, identificou-se quais parâmetros do processo de moldagem por injeção possuem maior influência na degradação do PP, dado que a degradação pode gerar algumas consequências para esse item de segurança, tanto alterando suas propriedades reológicas como perdas em propriedades mecânicas e aspectos na superfície.

Esse trabalho utilizará de pesquisas bibliográficas e estudos de casos, com resultados reais de oficinas automotivas, para determinar se os dados obtidos de defeitos ocasionados pelo design de para-choques de polipropileno, processados por moldagem por injeção, ocasionados pelo design, convergem na teoria e na prática.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

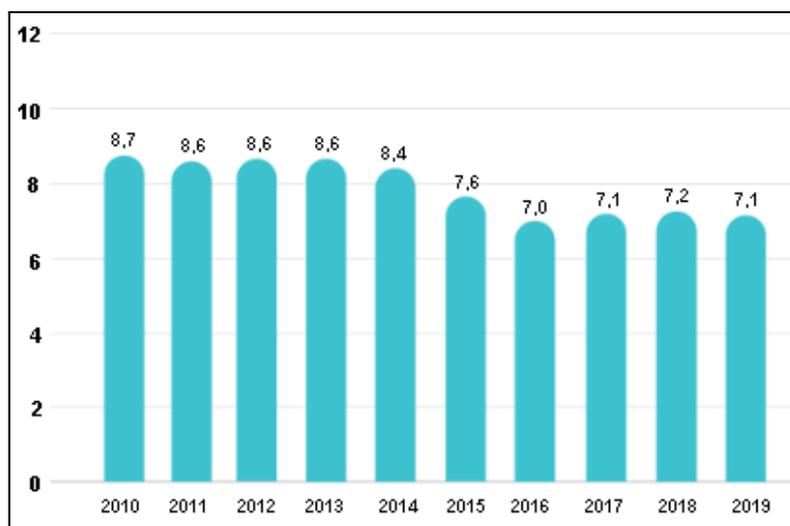
4.1 INDÚSTRIA DE POLÍMEROS NO BRASIL

Segundo Hemais (2003), a indústria brasileira de polímeros só ganhou notoriedade a partir da década de 70 quando houve a instalação de 3 polos petroquímicos no país. Pois só existiam unidades isoladas de indústrias de pouquíssimos tipos de polímeros que não representavam números expressivos no PIB nacional. Esses polos foram criados, para substituir o padrão que existia no país de importação, empresas tripartites, que pertencia: a Petroquisa, a empresa nacional de capital privado e uma empresa estrangeira, geralmente detentora da tecnologia.

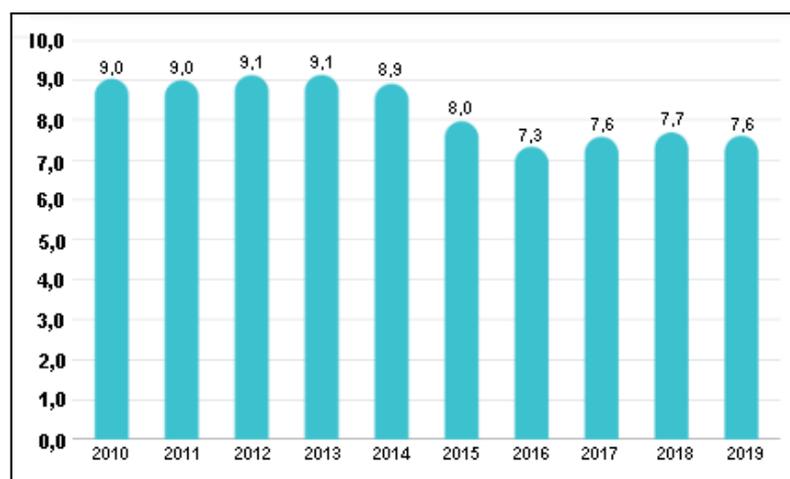
Na década de 90, as empresas começaram a ser privatizadas e o produto importado começou a ter uma queda em suas taxas, facilitando a importação e mudando completamente o perfil da indústria de polímeros no país. O ponto marcante dessa indústria, que teve no começo da década as empresas monoprodutoras sem economia de escopo, foi o fortalecimento e modificação através de grandes grupos em expansão, como no caso da Braskem (HEMAIS, 2003).

Já no começo dos anos 2000, a indústria exibia uma produção de aproximadamente 4 milhões de toneladas, e suas vendas correspondiam a 1,5% do PIB do país, empregando 200 mil pessoas e abastecendo o mercado brasileiro de *commodities* e alguns polímeros do tipo *quasi-commodity*, como PET, e polímeros de alto desempenho, estavam disponíveis no país através de importação de grandes produtores internacionais (HEMAIS, 2003).

Dados mais recentes da Abiplast (2020), mostram a produção e consumo aparente de transformados plásticos, em milhões de toneladas, dos anos de 2010 até 2019, mostrando os efeitos da crise de 2016 (Figuras 1 e 2). O consumo aparente é definido como o somatório da produção industrial interna, não exportada, mais as importações.

Figura 1 - Produção de transformados plásticos no ano de 2010 à 2019.

Fonte: Adaptado de Abiplast (2020).

Figura 2 – Consumo aparente de transformados plásticos no ano de 2010 à 2019.

Fonte: Adaptado de Abiplast (2020).

A empresa brasileira líder no setor de produção de resinas termoplásticas (PE+PP+PVC) nas Américas, é a Braskem, criada em agosto de 2002 pela integração das empresas Copene, OPP, Trikem, Proppet, Nitrocarbono e Polialden. A empresa possui 41 unidades industriais, sendo 29 no Brasil, 4 no México, 6 nos Estados Unidos e 2 na Europa, sendo a maior produtora de PP nos EUA e líder na produção de PE no México (BRASKEM, 2020).

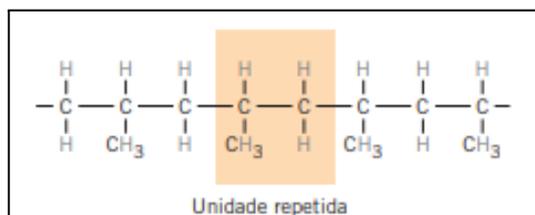
Na fabricação dos automóveis, os polímeros já têm seu lugar estruturado e vem ganhando cada vez mais espaço. Os materiais tradicionais dão lugar aos materiais poliméricos por todos os benefícios que agregam aos carros e ao processo de fabricação, de segurança, conforto, leveza e economia. A Braskem tem

em sua grade de produção produtos como: tanques de combustível em PE, painéis de PP, pneus de butadieno, matéria prima da borracha sintética, e resina de Unilene, resina hidrocarbônica utilizada na produção de compostos em borracha, além de tintas automotivas, lubrificantes, etc.

4.2 POLÍMEROS

A palavra polímero tem origem grega e foi criada por Berzelius, em 1832, e significa poli (muitos) meros (partes), ou seja, são macromoléculas formadas pela repetição de uma unidade química igual (DE PAOLI, 2003; MANO; MENDES, 2004). Suas unidades estruturais são conectadas, geralmente por ligações covalentes, que possuem grupos funcionais reativos, ligações duplas ou triplas, cujas reações são favoráveis às unidades de repetição, resultando à formação da macromolécula (KUMAR; GUPTA, 2003). Na Figura 3, a seguir, podemos ver o esquema da estrutura da cadeia com sua unidade de repetição de uma molécula de polipropileno.

Figura 3 – Representação esquemática da estrutura da cadeia do polipropileno com sua unidade de repetição



Fonte: Callister (2016).

Os materiais poliméricos contribuíram imensamente no desenvolvimento da indústria do século XX. Staudinger expôs um trabalho sobre a estrutura química da borracha e outros materiais de síntese, evidenciando que eram materiais constituídos de moléculas de cadeias longas, diferente de agregados coloidais de pequenas moléculas, que se acreditava na época. Mas apenas no ano de 1928 os cientistas reconheceram que os polímeros eram substâncias de elevado peso molecular (MANO; MENDES, 2004).

Os polímeros naturais, que são derivados de animais e plantas, como madeiras, couro, lã, borracha natural, algodão, seda, têm sido usados há séculos,

desde a antiguidade. Além desses naturais, outros como celulose, enzimas e proteínas são muito importantes nos processos físicos e biológicos dos animais e plantas. Devido à evolução de equipamentos e estudos científicos, foi e é possível conhecer as estruturas características desse grupo e desenvolver inúmeros polímeros sintéticos, que são oriundos de pequenas moléculas orgânicas, como plásticos, materiais fibrosos e borrachas. Estes polímeros sintéticos podem ser produzidos com um baixo custo e ser moldados até apresentarem propriedades iguais ou superiores aos polímeros naturais (CANEVAROLO, 2006; CALLISTER, 2016).

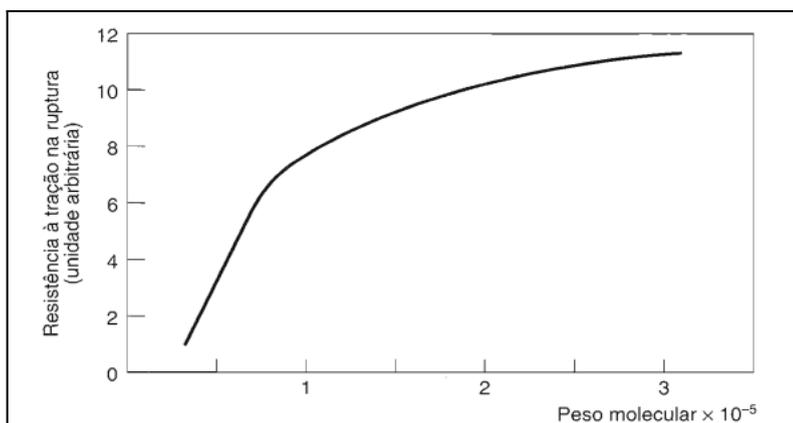
Os polímeros estão presentes em praticamente todos os lugares da sociedade, como em aeronaves, embalagens, eletrodomésticos, roupas, automóveis e tantos outros objetos, e tem sua aplicação tão diversificada por causa das suas propriedades.

O conhecimento acerca das propriedades diversas e muitas vezes únicas dos materiais poliméricos como alta resistência, temperatura de transição vítrea, alta viscosidade, torna o material extremamente útil para a sociedade, principalmente quando seu comportamento é diferente dos metais e outros materiais de baixo peso molecular (KUMAR; GUPTA, 2003).

4.2.1 Propriedades dos Polímeros

As propriedades particulares das moléculas poliméricas começam a aparecer a partir de 1000 a 1500 de massa molecular e vão se tornando mais aparentes a partir do aumento dessa massa, que pode até atingir a casa dos milhões. A grande maioria dos polímeros para aplicação industrial têm massas moleculares da ordem de dezenas ou centenas de milhar, o que evidencia bem suas características inerentes. Na Figura 4 podemos ver a influência da massa molecular na resistência à tração (MANO; MENDES, 2004).

Figura 4 - Variação da resistência mecânica em função da massa molecular



Fonte: Mano e Mendes (2004).

Para massas moleculares baixas, a resistência mecânica do material também apresenta baixos valores. A curva, entretanto, apresenta melhor resultado na resistência com o aumento da massa molar, até onde a massa atinge dezenas de milhares e a curva tende a um platô (MANO; MENDES, 2004).

O crescimento das cadeias poliméricas durante a polimerização não ocorre de maneira tão ordenada e nem todas as cadeias crescem com o mesmo comprimento. Desta forma, uma massa molar média é estabelecida e um mesmo material polimérico pode apresentar propriedades bem diferentes se não tiverem a mesma massa molecular média. Outras propriedades que são afetadas pela massa molecular, além da resistência, são o módulo de elasticidade e a temperatura de fusão (CALLISTER, 2016).

Algumas das propriedades mecânicas e térmicas, estão atribuídas através da capacidade das cadeias em sofrerem rotação devido a tensões e vibrações térmicas aplicadas, rotação essa que depende da estrutura da unidade química de repetição e sua formulação. Como por exemplo, cadeias poliméricas com ligações duplas (C=C), são rígidas para rotações, sendo assim mais resistentes a esse movimento (CALLISTER, 2016).

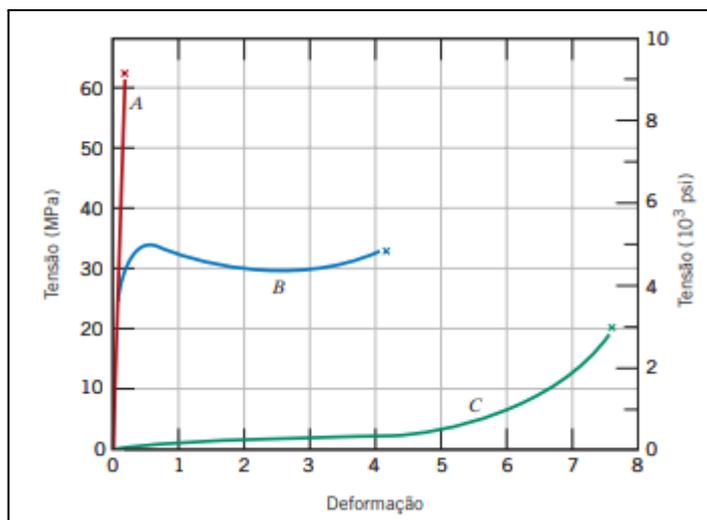
A classificação dos polímeros em relação a seu comportamento mecânico exposto a elevadas temperaturas está relacionada a sua estrutura molecular. Diante de suas respostas, os polímeros podem ser identificados como termorrígidos ou termoplásticos. Os termorrígidos não amolecem, quando aquecidos, devido às suas ligações em rede, que detém ligações cruzadas covalentes em sua cadeia, dificultando os movimentos de vibração e rotação a temperaturas elevadas. Quando aquecidos a temperaturas elevadas, perdem suas propriedades, pois há

rompimento das suas ligações cruzadas, ocorrendo a degradação deles. Estes últimos são geralmente mais rígidos e mais resistentes que os termoplásticos, e tem em sua lista as borrachas vulcanizadas, resinas epóxi, poliacetato de vinila (EVA), etc. (CANEVAROLO, 2006; CALLISTER, 2016).

Os polímeros termoplásticos amolecem quando aquecidos e quando resfriados endurecem, com um processo totalmente reversível que pode ser repetido, até uma temperatura limite. Caso essa temperatura seja ultrapassada, pode ocorrer uma degradação irreversível. Diferentemente dos termorrígidos, quando aquecidos, as forças de ligações secundárias vão diminuindo, por causa da movimentação das moléculas, facilitando o movimento relativo entre as cadeias quando uma tensão é aplicada. As peças com esses materiais são geralmente fabricadas com auxílio de calor e pressão, como por exemplo, peças de polietileno, poliestireno e o polipropileno (PP) (CALLISTER, 2016).

Outra classificação polimérica interessante é relacionada ao seu comportamento mecânico, em como o material se comporta ou deforma na presença de algum tipo de tensão. Os polímeros podem ser classificados em elastômeros (borrachas), frágeis (fibra) e os plásticos. Os elastômeros, descritos pela sua rigidez e seu longo comportamento elástico e praticamente ausente de comportamento plástico. As fibras apresentam comportamento diverso, com alta rigidez em amplitude longitudinal, entregando alta resistência à extensão. Já os materiais plásticos apresentam características intermediárias entre os outros dois citados anteriormente, mostrando uma rigidez menor que a das fibras, mas uma larga faixa plástica (SELKE, 2009).

Os materiais poliméricos em seu estado sólido ou fundidos apresentam características tanto de materiais viscosos, que dissipam todo o trabalho externo aplicado, e materiais elásticos, que armazenam todo o trabalho externo aplicando, o que caracteriza os materiais poliméricos como materiais viscoelásticos. Diante de uma medida carga, promovendo tensão, e observando a resposta do material, constrói-se a curva tensão-deformação, como se pode observar na Figura 5 o comportamento mecânico dos elastômeros, frágeis e plásticos, diante de um ensaio de tração (BRETAS; D'ÁVILA, 2005).

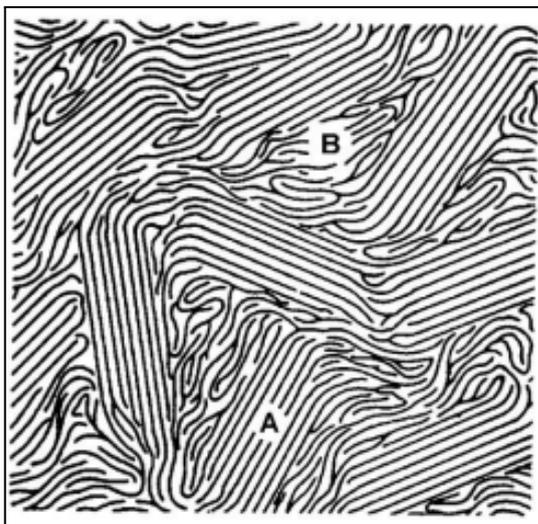
Figura 5 - Gráfico tensão versus deformação para polímeros.

Fonte: Callister (2016).

4.2.2 Cristalinidade dos polímeros

A cristalinidade nos polímeros é representada pela compactação das cadeias moleculares, e está diretamente ligada à célula unitária e como essas células se ordenam. Devido à alta complexidade e ao tamanho das cadeias, a desordem e/ou o não alinhamento das cadeias se fazem presente, sucedendo regiões amorfas. Em consequência disto, a maioria dos polímeros são parcialmente cristalinos (semicristalinos), com fases cristalinas e fases amorfas. Esse grau de cristalinidade varia de um material totalmente amorfo, cristalinidade zero, a cristalino com cristalinidade em torno de 95% (CALLISTER, 2016). Na Figura 6, podemos ver as áreas cristalinas (A) cercadas por partes amorfas (B).

Figura 6 - Representação de polímero semicristalino em temperatura ambiente.

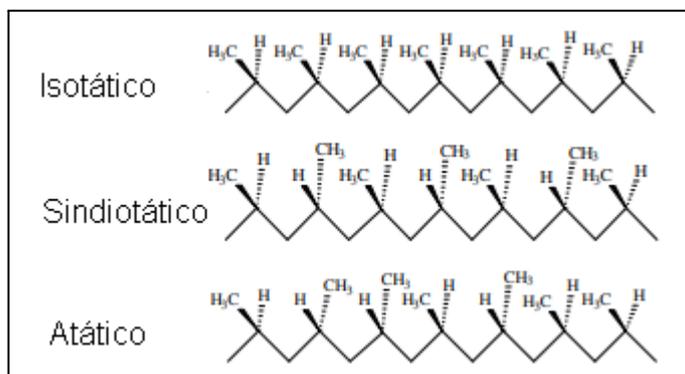


Fonte: Fischer (2003).

4.2.3 Taticidade dos polímeros

A taticidade é a organização dos grupos laterais e como eles se distribuem na cadeia polimérica periodicamente. Existem 3 arranjos táticos possíveis: isotático, sindiotático e o atático, como pode ser visto na Figura 7. Os polímeros isotáticos se configuram por possuírem os grupos laterais (R) direcionados todos ao mesmo lado. Nos sindiotáticos, os grupos funcionais estão posicionados de maneira alternada e os atáticos não possuem nenhuma regularidade de posicionamento em seus grupos (CANEVAROLO, 2006).

Figura 7 - Representação da taticidade das cadeias de polipropileno.



Fonte: Bacchi (2011).

A disposição dos grupos laterais e sua ordenação estão diretamente ligados ao grau de cristalinidade de um polímero, pois quanto maior a regularidade, tendem a apresentar uma maior cristalinidade e melhores propriedades físico-químicas. Sendo assim, polímeros atáticos são amorfos, por não apresentarem ordem de cristalinidade. (CANEVAROLO, 2006).

4.3 PROCESSAMENTO DOS POLÍMEROS

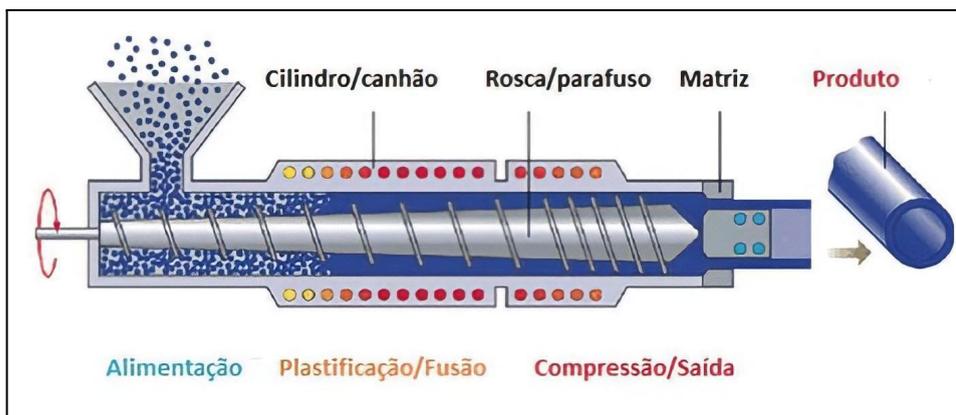
O ano de 1912, marcou a indústria automotiva pois foi onde os primeiros revestimentos poliméricos foram desenvolvidos e aplicados nesse setor. Nos dias atuais, como a evolução da tecnologia, esses materiais se fazem presente e são essenciais para a indústria automobilística, como também de várias outras indústrias como a construção civil, têxtil, alimentícia e outras (AFINKO SOLUÇÕES EM POLÍMEROS, 2018).

O abastecimento da indústria automotiva e tantas outras com peças e produtos poliméricos se resumem primeiramente com a fabricação desses através de processos que transformam a matéria prima em produto acabado. Dentre vários tipos de processos poliméricos existem dois que se destacam mais e são responsáveis por 92% dos transformados poliméricos, a extrusão (62%) e a moldagem por injeção (30%), ambos ocorrendo em altas temperaturas. Esses processamentos exigem alto conhecimento das condições inerentes de processo e propriedades do material (AFINKO SOLUÇÕES EM POLÍMEROS, 2018).

4.3.1 Moldagem por extrusão

O processo de moldagem por extrusão consiste na estimulação contínua, do polímero, através de um ou mais parafusos, sob alta pressão e temperatura. O material assume seu estado fundido, é compactado e impulsionado até a matriz, que dá forma, originando o formato final da peça. Podemos ver a seguir, na Figura 8, um esquema de uma máquina que utiliza a moldagem por extrusão. Esse processo inclui uma variedade enorme de produtos, que possuem um perfil contínuo como, mangueiras, tubulações, calhas, filmes e muitos outros (HARPER; PETRIE, 2003).

Figura 8 - Ilustração de uma máquina que utiliza a moldagem por extrusão



Fonte: Afinko soluções em polímeros (2018).

Segundo a Afinko Soluções em Polímeros (2018), existem três tipos de processamento por extrusão mais utilizados, são eles:

1. Perfil: Responsável por 32% da fabricação por extrusão, nesse tipo de processamento o material fundido é pressionado de encontro a uma matriz, que possui o desenho desejado. Logo após o produto é calibrado, resfriado, cortado ou enrolado. Essa técnica é usada na fabricação de canudos, mangueiras, etc.

2. Sopro: representando 12% da produção, é utilizado na fabricação de peças ocas, como garrafas, onde uma pré-forma é introduzida em um molde, no qual será injetado gás e o produto irá de encontro com as paredes do molde, passando a apresentar o seu formato final

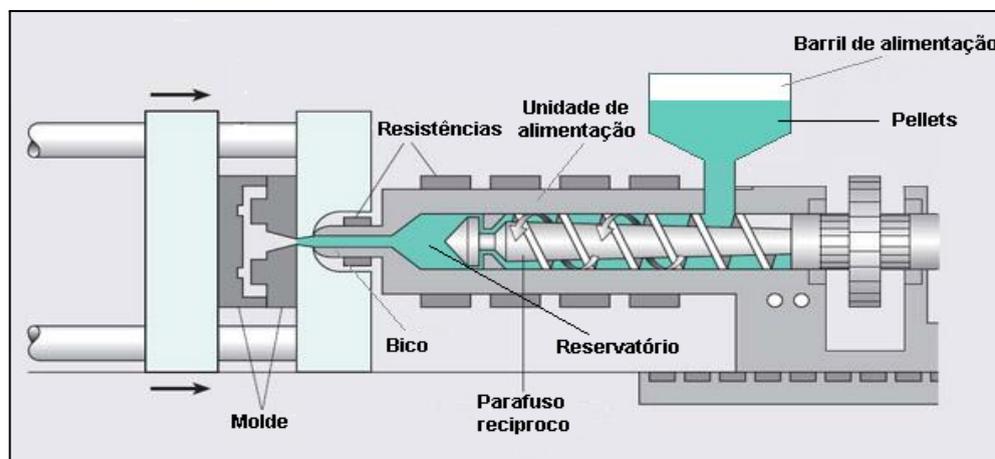
3. Filmes: a que concentra a maior produção, 34% deles, é responsável pela fabricação de produtos flexíveis como as sacolas plásticas.

4.3.2 Moldagem por injeção

O processo de moldagem por injeção de um polímero ocorre basicamente pelo preenchimento sob alta pressão de um molde, seguido de resfriamento para a solidificação e a formação do produto quase acabado. Esse processo implica em quatro principais etapas, que são a plastificação, preenchimento, empacotamento e resfriamento, resultando em produtos de microeletrônica, garrafas, carcaças de computadores, barcos, telefone, além, de peças automotivas como painéis de porta, grades, saídas de ar, para-lamas, para choques, etc. (BRETAS; D'ÁVILA, 2005). Na

Figura 9, podemos ver os principais componentes de uma máquina injetora.

Figura 9 - Principais componentes de uma máquina injetora



Autor: Adaptado de Tudo Sobre Plásticos (2011).

A fabricação de peças poliméricas pelo método de moldagem por injeção é muito comum no setor automotivo devido a precisão e o desenvolvimento sustentável, que a tecnologia do processo entrega. A moldagem por injeção permite um alto nível de produção, com peças bem-acabadas em grande série a baixo custo. Outra vantagem desse processo é o mínimo impacto ambiental, pois não há emissão de gases e resíduos líquidos, além de ser possível a reciclagem e reprocessamento das peças. Em consequência disso, a otimização do processo é alta já que o material será completamente utilizado (KNAUF INDUSTRIES AUTOMOTIVE, 2019).

Na primeira fase da moldagem por injeção, a plastificação, também chamada de fusão, existe uma unidade de alimentação aquecida, que opera com a rotação da engrenagem em rosca, fundindo e homogeneizando os pellets de polímero com os aditivos. Para que ocorra a formação de material frente ao parafuso, é necessário um recuo do mesmo, que resulta em um espaço que serve de reservatório do material que será injetado quando a válvula entre a ponta do reservatório e o molde se abre (BRETAS; D'ÁVILA, 2005; KAZMER, 2016).

No preenchimento, ou injeção, a rosca recíproca funciona como um pistão, empurrando o polímero fundido do reservatório para a cavidade do molde, que geralmente está a uma temperatura abaixo da temperatura de solidificação do polímero. Quando há injeção de polímeros cristalinos, os quais possuem cadeias

ordenadas, pode-se utilizar moldes aquecidos que ajudam no crescimento das regiões cristalinas, ou pode-se fazer um recozimento com intuito de aliviar tensões residuais (BRETAS; D'ÁVILA, 2005).

O polímero fundido passa por um sistema de alimentação de uma ou mais injeções ao longo do molde para a formação da peça moldada (KAZMER, 2016). Frequentemente essa etapa dispõe um alto índice de tensão mecânica e térmica do polímero fundido. Alguns dos principais parâmetros que afetam essas tensões são o bico de injeção, a geometria do canal de alimentação, espessura das paredes das peças moldadas, pressão de injeção, temperatura do fundido na hora da injeção e temperatura do molde (FISCHER, 2002).

A terceira etapa, a de empacotamento, auxilia a diminuir o encolhimento e enrugamento das peças, pela presença de uma elevada pressão. Depois que o polímero fundido preenche a peça, mais material é adicionado à cavidade, já que a medida que o polímero vai esfriando, há uma contração natural e uma diminuição no volume preenchido, assim esse material adicionado auxilia em um preenchimento a volume constante (BRETAS; D'ÁVILA, 2005).

A etapa que sucede o empacotamento é o resfriamento, e nela a alta pressão é mantida. Essa etapa controla o ciclo da moldagem por injeção, pois é a que tem maior duração e depende de alguns pontos como do material e sua condutividade térmica, da espessura da peça, do material que é feito o molde e que propriedades mecânicas são desejadas da peça acabada. Após o resfriamento o molde é aberto e a peça é extraída, geralmente por pinos de ejeção inseridos no molde (BRETAS; D'ÁVILA, 2005).

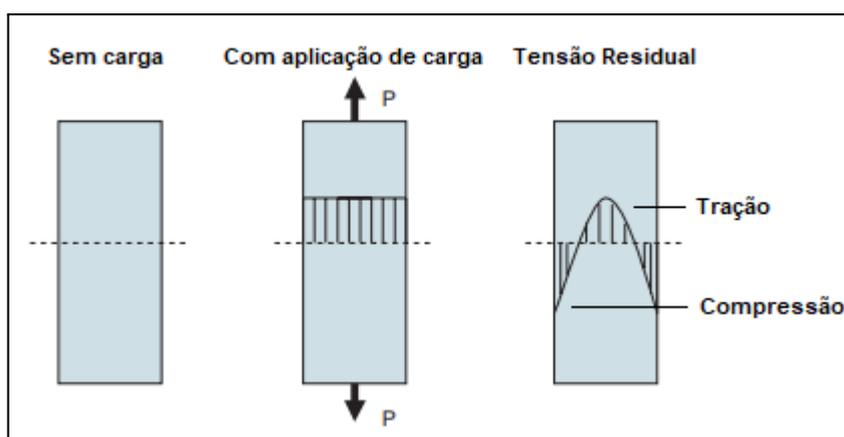
Segundo Spina et al. (2014) as peças moldadas por injeção possuem tensões residuais, ocasionadas por condições do processo e propriedades do material, que são afetadas por retração volumétrica, tensões de fluxo, cristalização e temperatura. As tensões residuais se não controladas durante as etapas de preenchimento, empacotamento e durante o seu resfriamento, pode ocasionar encolhimento e empenamento, gerando uma modificação e comprometendo a qualidade do produto.

4.3.2.1 Tensões Residuais

Tensões residuais estão presentes e são criadas em praticamente todos os

processos de fabricação principalmente em processos de fundição, soldagem e conformação. São tensões, de tração e compressão que se equilibram, presas às estruturas que independem da presença de cargas externas, que quando se somam criam força e momento zero dentro do volume como um todo do material. Como podemos ver na Figura 10, as tensões trativas no centro se equilibram com as tensões compressivas, sem existir carga externa (SCHAJER, 2013).

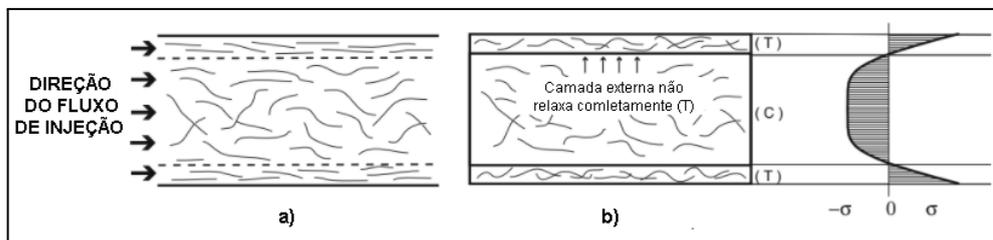
Figura 10 - Diagrama de uma seção transversal, comparando tensões com e sem carga.



Fonte: Adaptado de Schajer (2013).

A origem das tensões residuais do processo de moldagem por injeção se dá principalmente por dois efeitos. O primeiro, tensão de fluxo que pode se desenvolver na etapa de preenchimento quando as cadeias poliméricas são esticadas e orientadas em direção do fluxo, e durante o resfriamento essas cadeias relaxam, porém o relaxamento externo, da camada mais próxima aos moldes, é maior que o interno, promovendo uma tensão de fluxo de enchimento trativo na camada externa e compressivo na camada interna. Como podemos ver na Figura 11 (a) e (b) (GUEVARA-MORALES; FIGUEROA-LÓPEZ, 2013).

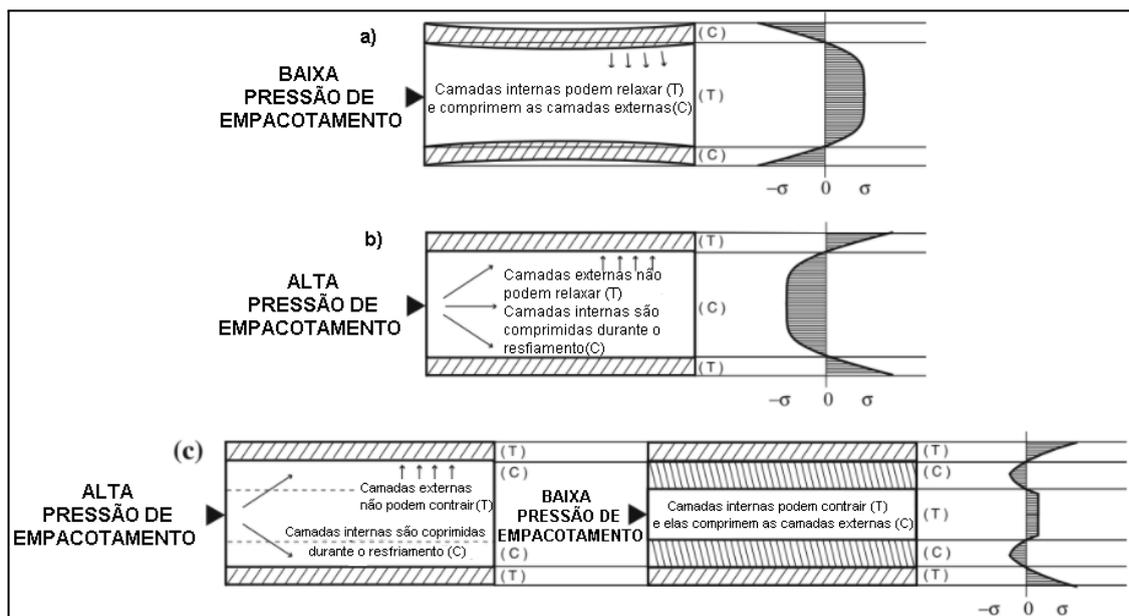
Figura 11 - Tensões induzidas por fluxo durante a fase de enchimento: a) cadeias de polímero esticadas e b) cadeias de polímero relaxada



Fonte: Adaptado de Guevara-Morales e Figueroa-López (2013).

Outras maneiras da tensão de fluxo ocorrer são na etapa de empacotamento, por 3 modos como podemos ver na Figura 12. O primeiro demonstrado na figura 12 (a) o polímero fundido não é suficientemente pressionado e durante a fase de resfriamento a parte interna sofre tensões trativas e as externas compressivas. Já quando ocorre alta pressão de embalagem, ocorre o oposto, a pressão no núcleo é muito grande sofrendo tensões compressivas e a camada externa tensões trativas, visto na figura 12 (b). Um terceiro caso ocorre quando uma distribuição mais complexa na solidificação, uma junção dos casos (a) e (b), alternando tensões compressivas e trativas durante o resfriamento, figura 12 (c), e como a pressão no molde não é distribuída igualmente, os três casos podem ocorrer em uma mesma peça. (GUEVARA-MORALES; FIGUEROA LÓPEZ, 2013).

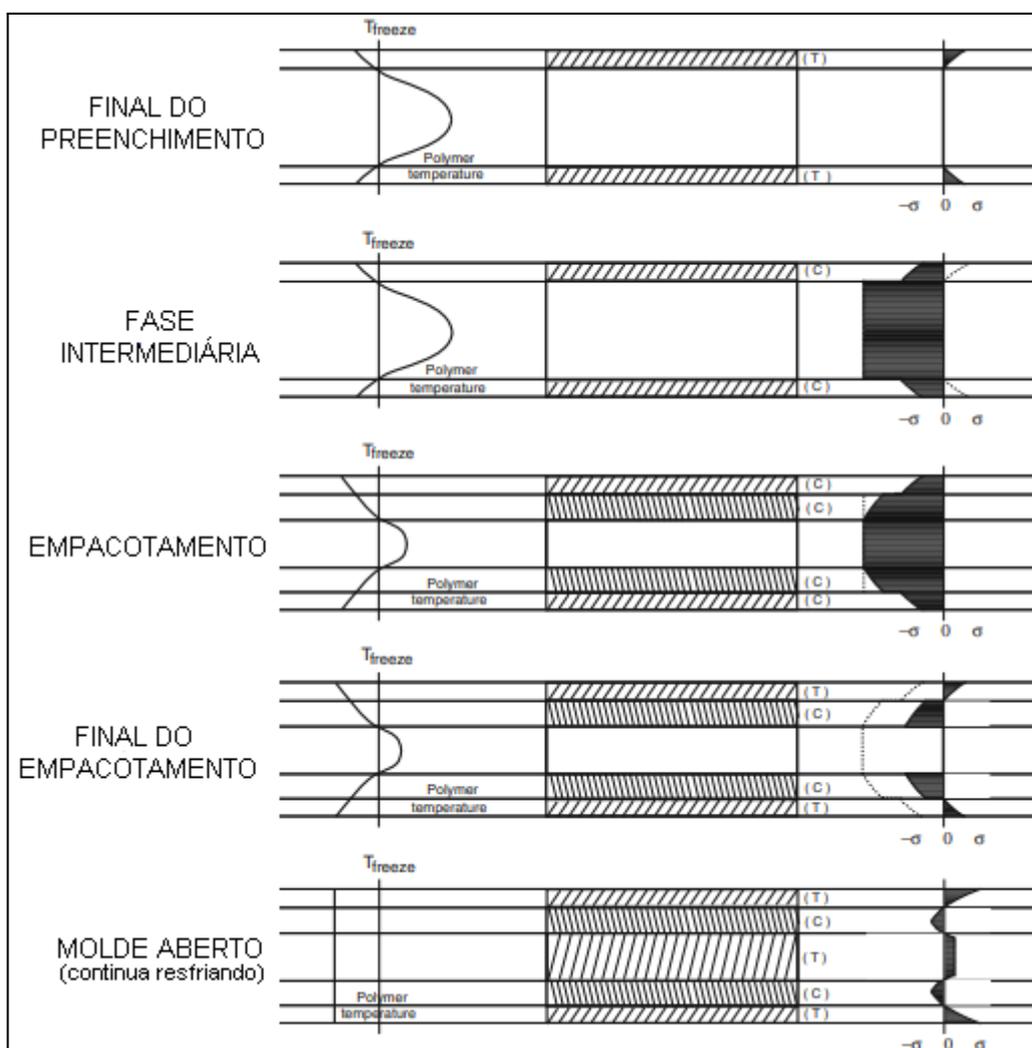
Figura 12 - Tensões induzidas por fluxo durante a fase de embalagem. Submetido a (a) uma baixa pressão, (b) alta pressão de embalagem e (c) alta e baixa pressão de embalagem



Fonte: Adaptado de Guevara-Morales e Figueroa-López (2013).

O segundo princípio das tensões residuais são as tensões induzidas termicamente que resultam da não uniformidade de um resfriamento. Durante a etapa de preenchimento, o polímero fundido, quando em contato com o molde frio, sua camada externa quase que instantaneamente resfria e se solidifica, ainda que o núcleo permaneça quente e durante o empacotamento mais material quente entra no molde. As mudanças de temperatura durante o resfriamento tanto na fase de preenchimento quanto de empacotamento e resfriamento geram tensões residuais complexas, como podemos ver na Figura 13 a evolução dessas tensões (GUEVARA MORALES; FIGUEROA-LÓPEZ, 2013).

Figura 13 - Tensão residual induzida termicamente em produtos moldados.



Fonte: Adaptado de Guevara-Morales e Figueroa-López (2013).

As distribuições das tensões residuais afetam diretamente a qualidade do produto e pode causar além de mudanças dimensionais, rompimento, fraturas e

deformidades, tornando-as até possivelmente inadequadas para o uso (ACEVEDO MORANTES; BRIEVA-SARMIENTO; REALPE-JIMÉNEZ, 2014). Scopel (2018) elaborou um quadro com as variáveis do processo de moldagem por injeção e quais são suas influências na peça final, com fonte de alguns autores, como podemos ver no Quadro 1.

Quadro 1 - Variáveis do processo de moldagem por injeção e suas respectivas influências no produto.

EFEITO DA VARIÁVEL DO PROCESSO	VARIÁVEL DO PROCESSO
Redução das tensões residuais	↑ Temperatura do molde
	↑ Velocidade de injeção
	↑ Temperatura do polímero fundido
Aumento das tensões residuais	↓ Temperatura do molde
	Resfriamento não uniforme
	Velocidade de injeção não uniforme
Redução do empenamento	↑ Velocidade de injeção
	↑ Tempo de recalque
	↑ Pressão de recalque
Aumento do empenamento	↑ Temperatura do polímero fundido
	Resfriamento não uniforme
	Velocidade de injeção não uniforme
Redução da contração	↑ Tempo de recalque
	↑ Pressão de recalque
Aumento da contração	Resfriamento não uniforme

Fonte: Adaptado de apud Scopel (2018).

4.4 DEGRADAÇÃO DOS POLÍMEROS

Segundo De Paoli (2008), degradação é toda reação química que altera características inerentes ao material polimérico ou composto polimérico, podendo ser elas reações intramoleculares ou intermoleculares, motivada por diferentes causas dependendo do material, seu processamento e uso. Como por exemplo, a degradação do aspecto visual, a resistência elétrica, a resistência mecânica, a dureza, etc.

De uma maneira mais abrangente, segundo Rabello (2000), outra definição

para degradação é qualquer mudança indesejável nas propriedades de um sistema polimérico, podendo até ser uma perda de um aditivo plastificante devido a uma migração. A degradação é um processo que geralmente, de maneira simultânea, ocorre por ação de mais de um mecanismo durante a manufatura, estocagem e durante o uso do produto já acabado. Conforme a causa, a degradação pode ser classificada como física e química, como podemos ver no Quadro 2.

Quadro 2 - Classificação de degradação em materiais poliméricos

Causas físicas	Causas químicas
Térmica	Oxidação
Mecânica	Hidrólise
Fotoquímica	Ozonólise
Radiação de alta energia	Acidólise, etc

Fonte: Adaptado de Rabello (2000).

Durante a manufatura de uma peça polimérica podem ocorrer várias formas de degradação, por ex. oxidativa, térmica e mecânica. Enquanto estão expostas naturalmente ocorrem fotooxidação, termooxidação, hidrólise e ozonólise. Em todos estes casos forma-se, devido à quebra das cadeias, macrorradicais que são muito reativos, dando origem a múltiplas reações que podem levar à formação de ramificações, reticulações, redução no peso molecular ou até mesmo a despolimerização. Por isso é tão necessário o conhecimento acerca da degradação sofrida pelo material polimérico (RABELLO, 2000).

Um material termoplástico, como o PP, por exemplo, durante seu processamento, não é realizado reações químicas significativas, que pode gerar algum tipo de degradação química, e sim algum tipo de degradação em suas propriedades físicas. Se o processo estiver nas condições apropriadas, ocorrerá pouca degradação, se não, havendo um procedimento fora dos parâmetros como: calor excessivo durante o processo, ausência de um material limpo etc. A tendência é aumentar as alterações no produto (FISCHER, 2002).

4.4.1 Degradação térmica

Degradação ocasionada pelo efeito da temperatura, devido a energia térmica inserida no sistema ser maior que a energia das ligações intramoleculares, resultando nas quebras das cadeias poliméricas. Sendo assim, a degradação térmica depende dos grupos químicos presentes nas ligações, pois são eles que determinam a energia de dissociação, quanto maior as forças de interação intramolecular, maiores serão as energias térmica/temperatura para a ruptura das ligações. Para o polipropileno, a energia de dissociação da ligação C-C é de 69 kcal/mol e uma temperatura de decomposição térmica (T_d) (RABELLO, 2000).

4.4.2 Degradação mecânica

A degradação por esforço mecânico se inicia quando o polímero é submetido a tensões de cisalhamento ou tensão mecânica, ocorrendo a cisão das cadeias. Durante um fluxo cisalhante, as cadeias mais longas de um polímero, são preferidas para serem quebradas. No processamento por injeção, a degradação pode se iniciar por dois fatores, por esforços cisalhantes gerados pela rosca e pelas taxas de compressão (CANEVAROLO, 2006).

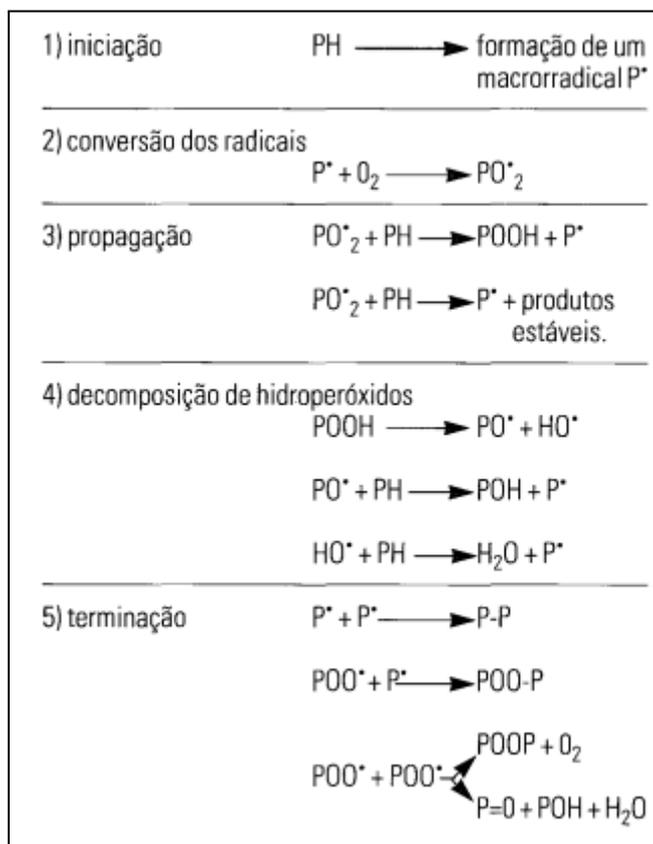
4.4.3 Degradação por Oxidação

A oxidação polimérica é a reação das moléculas do polímero com oxigênio. Em temperaturas mais baixas, como a temperatura ambiente de 25°C, ocorre de maneira lenta, mas quando a temperatura aumenta principalmente chegando a temperaturas de processamento, pode comprometer o material. Pode gerar compostos carbonizados, moléculas orgânicas com átomos de carbono e oxigênio com ligação dupla, que alteram a coloração dos produtos à base de polímero (CANEVAROLO, 2006).

A termo-oxidação é a degradação decorrente da ação da molécula de oxigênio, que ataca diretamente os pontos mais vulneráveis, ou na presença de algum outro agente oxidante, como no caso de peróxidos e hidroperóxidos formados durante o processo, em altas temperaturas. Geralmente a reação ocorre através de

radicais livres em polímeros que possuem ligações ou grupos com facilidade em oxidar, ocorrendo o processo de auto-oxidação. Na Figura 14, podemos ver a reação do processo da termo-oxidação (RABELLO, 2000; AGNELLI; CHINELATTO, 1992).

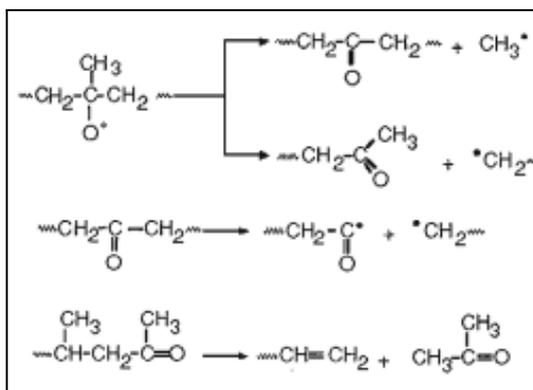
Figura 14 - Processo básico de oxidação.



Fonte: Agnelli e Chinelatto (1992).

Em sua estrutura, o PP possui um carbono terciário que é seu o ponto de maior fragilidade para o ataque do oxigênio onde a energia de ligação C-H desse carbono é mais baixa, formando radicais livres, como podemos ver na Figura 15. (DE PAOLI, 2008).

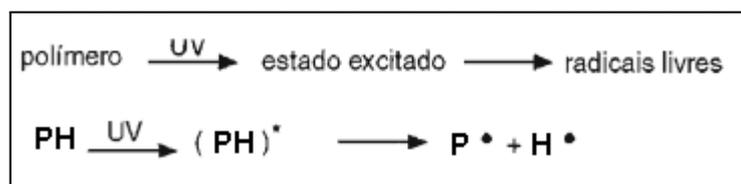
Figura 15 - Exemplos de reações que levam à cisão na cadeia principal do PP.



Fonte: Rabelo (2000).

A radiação ultravioleta, com comprimento de onda de 100 nm a 400 nm, é um dos principais agentes de degradação que ocorre nos polímeros. Quando esse tipo de radiação é absorvida por alguns grupos funcionais ocorre um aumento de excitação eletrônica que pode gerar ruptura nas cadeias. A foto-oxidação ocorre na presença de oxigênio e tem seu processo representado na Figura 16 (RABELLO, 2000).

Figura 16 - Representação esquemática da etapa de iniciação da fotooxidação.



Fonte: Adaptado de Rabelo (2000).

Como visto o processo da degradação por termo e foto-oxidação são bem parecidos e se diferenciam apenas na etapa de iniciação. Nessa etapa, cada material devido a sua estrutura química, possui uma sensibilidade diferente a radiação, ou seja, cada um absorve determinado comprimento de onda. No Quadro 3 podemos ver a sensibilidade espectral de alguns polímeros (RABELLO, 2000).

Quadro 3 - Sensibilidade espectral dos polímeros.

Polímero	Sensibilidades espectral (nm)
PET	< 315
PE	<250
PC	280-305; 330-360
PP	< 250
PA aromática	< 470
PPO	370

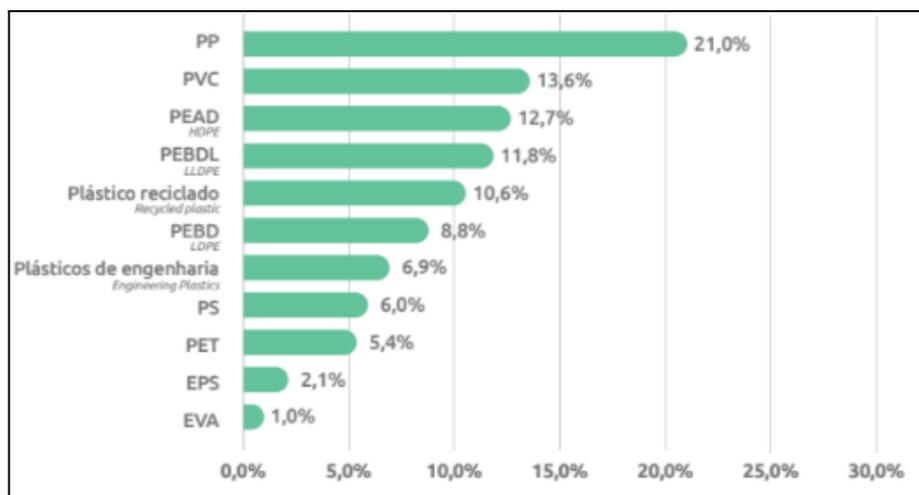
Fonte: Adaptada de Rabelo (2000).

O polipropileno e o polietileno, como pode ser observado na Quadro 3, absorvem radiação com comprimento de onda menores que 250 nm, que é inferior ao espectro limite de 290 nm que atinge a camada terrestre, devido a camada de ozônio filtrar radiação emitida pelo sol inferiores a esse número. No entanto, esses materiais ainda sofrem com a foto-oxidação devido a substâncias como peróxidos e carbonilas, presentes nas etapas de processamento e síntese, atuarem como iniciadores da degradação (RABELLO, 2000).

4.5 POLIPROPILENO (PP)

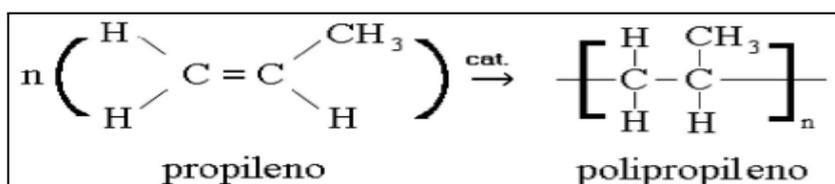
O polipropileno tem sua descoberta considerada controversa, tendo como responsável o italiano Giulio Natta no ano de 1954. Utilizando catalisadores desenvolvidos por Karl Ziegler, que anteriormente descobriu que polímeros de eteno poderiam ser desenvolvidos, Giulio partiu do mesmo princípio e sintetizou o polipropileno isotático e cristalino (PORRI, 2009).

Há aproximadamente 65 anos, em 1957, na Itália pela empresa Montecatini, os primeiros fragmentos de PP foram produzidos e desde então esse material vem sendo utilizado em grande escala. Em 2018, foi o segundo maior polímero produzido no mundo (KARGER-KOCSIS; BÁRÁNY, 2018). Já na América Latina, a primeira fabricação de polipropileno só aconteceu em 1978, pela empresa Polibrasil no Polo Petroquímico de Capuava - SP. Dados recentes (como podemos ver na Figura 17) o PP, foi a resina polimérica mais utilizada em 2019, sendo que no Brasil ou nos países em geral, o PP possui uma grande representação no mercado dos polímeros.

Figura 17 - Resinas poliméricas mais consumidas no ano de 2019.

Fonte: Abiplast (2020).

A síntese do polipropileno, ocorre na presença de catalisador e condições controladas de temperatura e pressão, devido a reação de polimerização do monômero propeno ou propileno, um hidrocarboneto insaturado que tem como fórmula $C_3 H_6$, obtido pelo craqueamento da nafta, um subproduto do petróleo, como podemos ver na Figura 18 (PETRY, 2011).

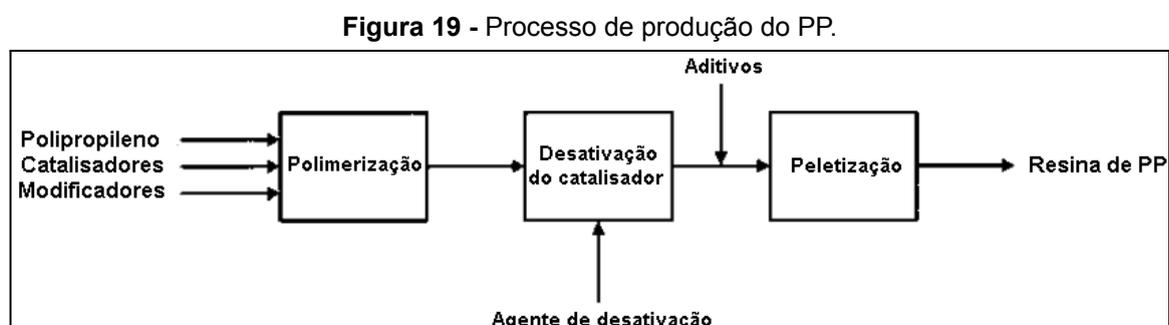
Figura 18 - Esquema da reação de polimerização para formação do polipropileno

Fonte: Trombetta (2010)

4.5.1 Processo de produção do polipropileno

O processo de fabricação de PP acompanhou os avanços tecnológicos evoluindo com a mudança de catalisadores, desenvolvendo um material com melhores desempenhos, em um processo mais simples, de menor custo, com melhor capacidade de processo, do que era obtido antes. Os processos mais antigos, tinham plantas que necessitavam de uma grande quantidade de equipamentos, a extração dos catalisadores era necessária e subprodutos descartados. Já os mais recentes, descartam essas características implementando uma fase gasosa que elimina a utilização de um solvente para dispersar reagente e

produto do reator, e exige apenas uma desativação de baixo nível dos resíduos do catalisador, reduzindo assim muitas etapas que antes eram essenciais, Na Figura 19, podemos ver o esquema do processo em fase gasosa. (KARIAN, 2003)



Fonte: Adaptado de Karian (2003)

O processo de transformação da resina de PP tornando-se um produto acabado pode ocorrer por diversas técnicas devido a facilidade de processabilidade do polipropileno. A resina de PP pode ser conformada por moldagem por compressão, moldagem por injeção, moldagem por extrusão, termoformação, entre outras técnicas (BRASKEM, 2019).

4.5.2 Propriedades do polipropileno e aplicações

As propriedades do polipropileno (PP), como características mecânicas, elétricas, ópticas e químicas, assim como todos os polímeros, são dependentes não só da sua estrutura química, mas também são muito dependentes da microestrutura e morfologia, como: massa molecular, taticidade e cristalinidade. Um exemplo seria a rigidez, que diante a cristalinidade maior, havendo mais regiões cristalinas do que amorfas, apresentará um material mais rígido e mais resistente à fluência (KARGER-KOCSIS E BÁRÁNY, 2018).

Materiais termoplásticos, como no caso do polipropileno, quando fundidos suas propriedades depende do tamanho das suas cadeias e da sua taticidade e quando sólidos, suas propriedades refletem a quantidade de regiões cristalinas e amorfas. O polímero mais usado por apresentar maior relevância comercial é o semicristalino, isotático e suas propriedades mecânicas, físicas e químicas se aplicam a boa parte das aplicações cotidianas. No Quadro 4 podemos ver propriedades típicas de um polipropileno isotático (KARIAN, 2003).

Quadro 4 - Propriedades do polipropileno isotático.

PROPRIEDADES	PP ISOTÁTICO
Cristalinidade	Semicristalino 40 a 60%
Densidade	0,905 g/cm ³
Rigidez	Superior a maioria dos plásticos comerciais
Resistência ao impacto	Boa a temperatura ambiente (25°) - 16(kJ·m ²)
Absorção de umidade	Baixíssima
Estabilidade térmica	Boa
Custo-benefício	Alto com baixo custo de produção
Atóxico e antiaderente	Sim
Contração volumétrica	1 a 2,5%
Temperatura de transição vítrea (Tg):	4 a 12 °C
Temperatura de fusão (Tm):	165 a 175 °C
Temperatura de processamento:	210 a 270 °C
Alongamento até a fratura	200 a 600 %
Módulo elástico	16,5 MPa

Fonte: Adaptado de Gedel Plasticos (2021); Plasticos Industriais (2020); Mano e Mendes (2004).

O polipropileno se apresenta de várias maneiras e possui diferentes propriedades diante dos seus arranjos e processos de fabricação, por isso sua aplicação cobre uma gama muito ampla na sociedade. No mercado têxtil, nos tecidos, suas propriedades como baixo peso, resistência química e resistência a manchas, se faz presente nessa indústria. Na área da saúde o polipropileno está presente nas seringas descartáveis e frascos com comprimidos por sua capacidade de esterilização. Na indústria automotiva, além dos para-choques, aparecem em caixas de bateria, painéis internos, dutos de ar condicionado, parte da porta, e muitos outros produtos como tampas de garrafas, filmes para embalagens e utensílios domésticos (KARIAN, 2003).

4.5.3 Degradação do polipropileno

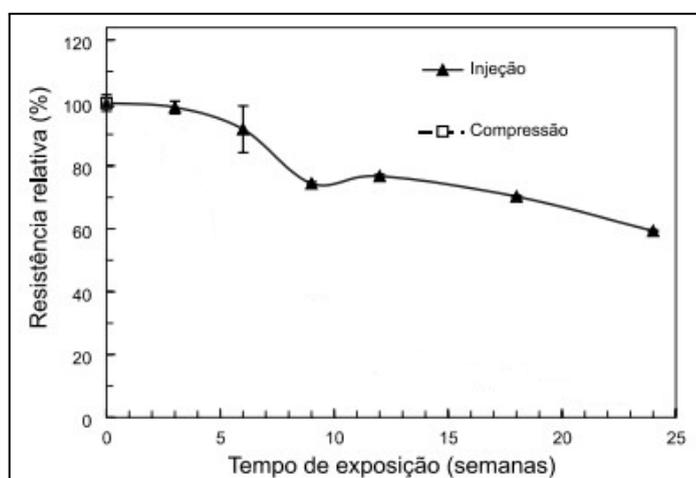
Segundo Agnelli e Chinelatto (1992) a degradação do PP ocorre por uma combinação de diferentes tipos, por degradação térmica, oxidativa e mecânica e podem ocorrer durante todo o ciclo de vida do material. As reações que causam essas modificações da estrutura do polímero são devido às condições do processo, altas temperaturas, tempo, presença de agentes químicos que contenham oxigênio, exposição a ação da radiação ultravioleta, a geometria das peças de processo, que

promovem uma perda irreversível de propriedades físicas e mecânicas ao material.

Durante o processamento, devido às condições de temperatura e cisalhamento, ocorrem reações químicas que podem gerar um efeito negativo enorme nas propriedades do material. A termo-oxidação que inclui iniciação, propagação, ramificação da cadeia e etapas de encerramento, o polipropileno sofre cisão da cadeia (HINSKEN, 1991). A temperatura de degradação térmica dependerá da energia das ligações químicas que constituem os polímeros, havendo quebra dessas ligações se a energia em forma de calor for maior que a energia das ligações. As interações inter e intra moleculares, a mobilidades das moléculas, cristalinidade, tempo de exposição a temperatura e velocidade de aquecimento também irão afetar a temperatura de ignição da degradação (DE PAOLI, 2008).

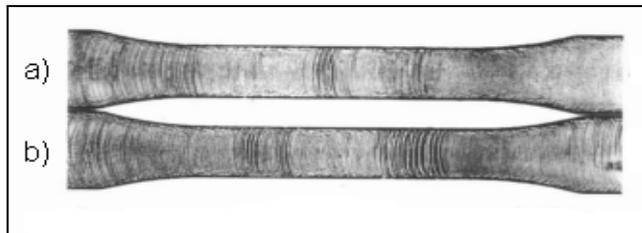
A fotodegradação ocorre basicamente pela absorção de radiação ultravioleta que geram reações oxidativas, ocasionando perda no peso molecular e alterações na estrutura química. Em um experimento feito por Rabello e White (1997), para analisar os efeitos da radiação ultravioleta em corpos de prova de PP moldados por injeção, foi observado o quanto esse tipo de degradação pode afetar as propriedades mecânicas da peça (Figura 20) e que o ponto de injeção, onde existe uma maior orientação molecular, resultou em um nível de degradação maior do que em regiões que possuem menor orientação molecular, que apresentaram baixa concentração de fissuras, como podemos ver na Figura 21 e 22.

Figura 20 - Ensaio de tração mostrando o Efeito do tempo de exposição de radiação UV, na resistência do PP.



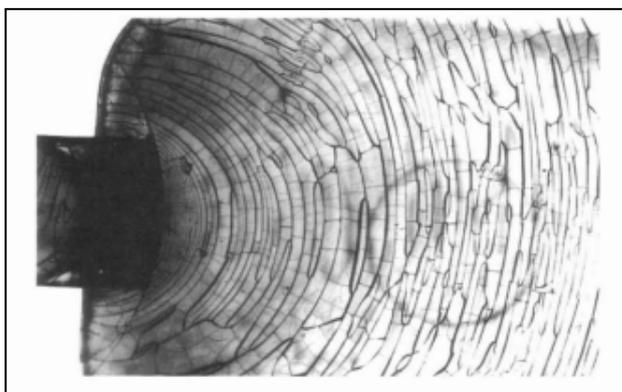
Fonte: Rabello e White (1997)

Figura 21 -Distribuição de fissuras em PP injetado após 24 semanas a) superfície exposta contendo o ponto de injeção.b) superfície oposta ao ponto de injeção



Fonte: Rabello e White (1997)

Figura 22 - Fissuração superficial na região do ponto de injeção de um corpo de prova injetado exposto por 15 semanas.



Fonte: Rabello e White (1997)

4.6 A INDÚSTRIA AUTOMOTIVA E OS COMPONENTES POLIMÉRICOS

As crises do petróleo de 1973 e 1979 podem ser consideradas determinantes para as condições de segurança, eficiência e um menor consumo de combustível, porém só após as quebras das limitações tecnológicas, quando polímeros de alto desempenho foram desenvolvidos, os materiais plásticos passaram a ser essenciais nos automóveis (HEMAIS, 2003).

Plásticos e compostos de polímero são elementos essenciais para o design, segurança e desempenho automotivo. O futuro dos carros está diretamente ligado a esses materiais, tanto para atender a expectativa dos consumidores, como também das montadoras diante de todos os benefícios que esses materiais entregam.

Os materiais poliméricos de engenharia utilizados nos automóveis, incorporam cada vez mais produtos com o equilíbrio perfeito entre desempenho,

conforto, segurança, preço, impacto ambiental e economia de combustível. Os componentes feitos com esse tipo de material plástico pesam em média 50% menos do que componentes semelhantes feitos de outros materiais, o que promove de 25% a 35% de economia de combustível e a cada 1 kg perdido no peso do carro de material, esse mesmo carro emitiria menos 20 kg de dióxido de carbono ao longo de sua vida útil. Em razão de dados como esses é que o percentual de plásticos nos automóveis só cresce (PLASTICS EUROPE, 2017).

A respeito de segurança, os polímeros proporcionam a fabricação de vários itens como os cintos de segurança que diminuem drasticamente números de óbitos e lesões graves em acidentes, *airbags* para a proteção de motorista e passageiros contra impacto e para-choques para a absorção de impacto. De modo em geral, pode se ver no Quadro 5 algumas das vantagens que o plástico pode gerar substituindo outros materiais em automóveis (HEMAIS, 2003).

Quadro 5 - Vantagens do uso de plásticos nos automóveis.

Vantagens
Redução de peso
Redução da emissão de CO2
Redução de custos
Redução do tempo de produção
Menores investimentos em manufatura
Aumento da resistência à corrosão
Possibilidade de designs mais modernos
Formatos mais complexos
Excelente processabilidade
Veículos mais silenciosos
Aumento de segurança

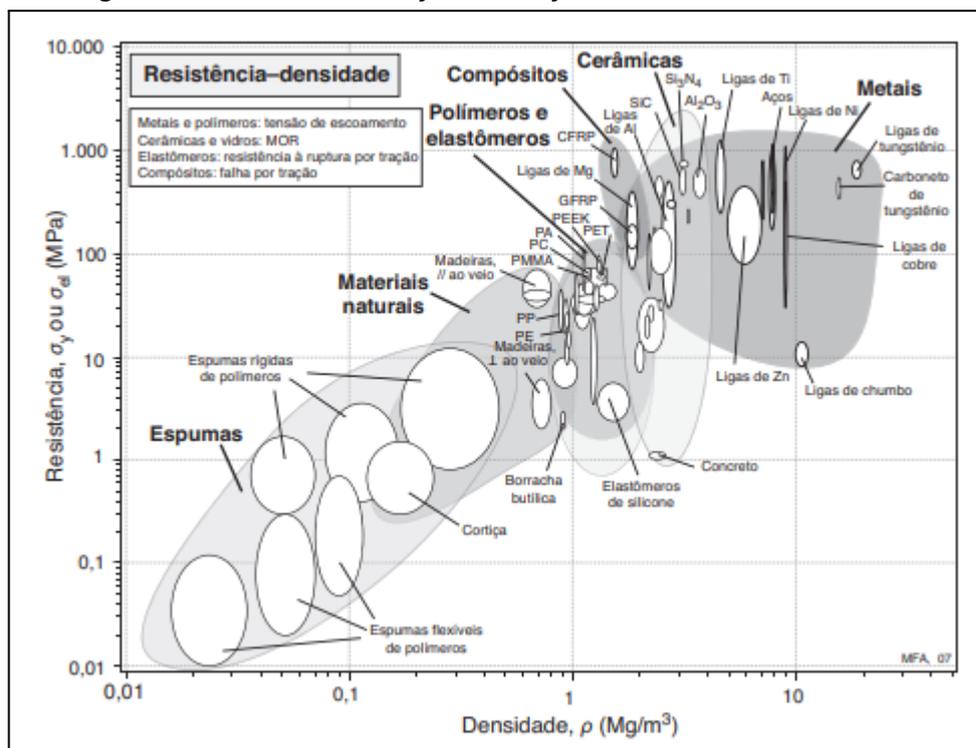
Fonte: Adaptado de Hemais, 2003.

Como visto no Quadro 5 as principais vantagens são ligadas a economia tanto de combustíveis como de produção, o aumento de segurança e sofisticação no design.

Os considerados polímeros leves são essenciais na estruturação dos veículos pois economizam no consumo de combustível, assim reduzindo a emissão de gases de efeito estufa, segundo a American Chemistry Council (2020). Por saber dessas condições há uma busca contínua e estética dos designers de automóveis, de encontrar materiais que forneçam resistência e segurança equivalente a metais

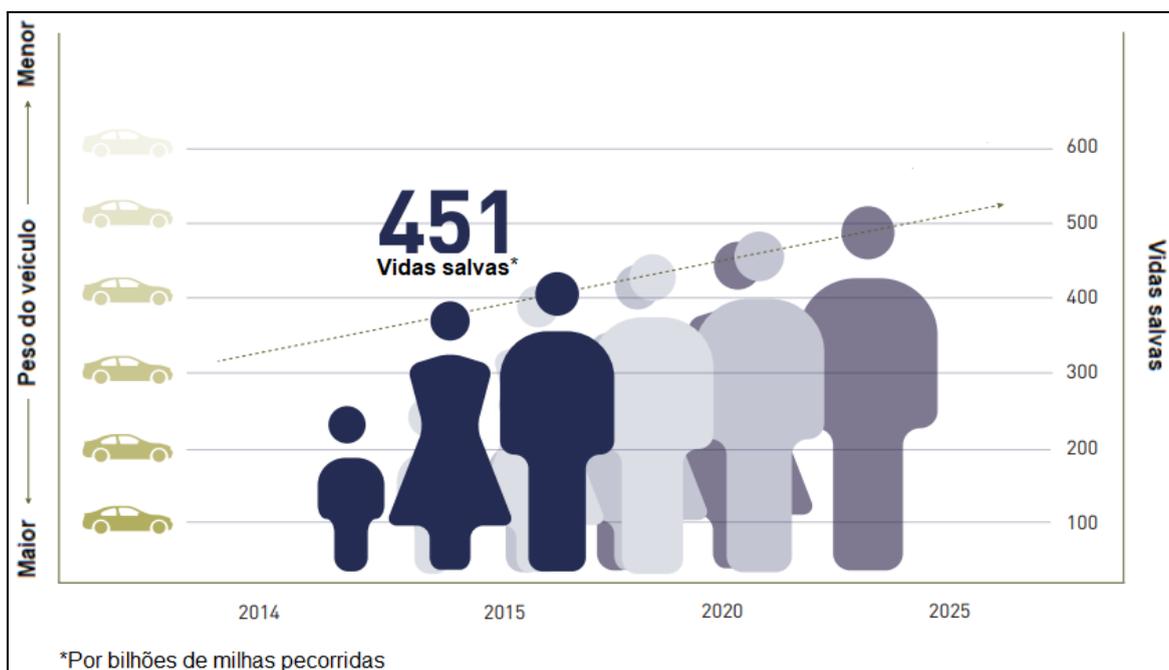
tradicionais que são pesados. Os polímeros e compósitos poliméricos estão mudando cada vez mais os automóveis e possuem a composição perfeita para muitas funções, como podemos ver na Figura 23 onde a resistência a tração de materiais poliméricos e metálicos (AUTOMOTIVE PLASTICS, 2014).

Figura 23 - Resistência a tração em função da densidade dos materiais



A redução do peso nos automóveis também acarreta outros benefícios, como a manutenção da segurança. Em uma pesquisa desenvolvida (como podemos ver na Figura 24) pela EPA, agência de proteção ambiental dos Estados Unidos, juntamente com a NHTSA, a Administração americana de segurança de tráfego rodoviário, a redução do peso nos carros pode resultar em uma redução de mortes por quilômetro percorrido pelo veículo, salvando aproximadamente 451 vidas por bilhão de milhas percorridas. Estima-se que no futuro, com a necessidade de mais materiais poliméricos nos veículos esse peso diminuirá, salvando mais vidas. Isso se deve parcialmente pela propriedade de materiais menos rígidos e também com maior capacidade de absorção de impacto, que previnem lesões e salvam vidas (AMERICAN CHEMISTRY COUNCIL, 2019).

Figura 24 - Projeção do aumento de vidas salvas, pela diminuição do peso dos veículos.



Fonte: Adaptado de American Chemistry Council, 2019.

Em uma perspectiva de futuro, de acordo com o American Chemistry Council (2020), os polímeros e compósitos poliméricos oferecem uma combinação singular de propriedades para soluções de mobilidade nos automóveis, como por exemplo a flexibilização entre sensores, equipamentos eletrônicos e baterias, permitindo que sejam integrados com perfeição e segurança, sem adição de peso extra. “O futuro da mobilidade pessoal não é possível sem plásticos e compósitos poliméricos” OLIVER, 2020), diretora sênior da equipe automotiva da ACC, que desenvolveu um roteiro guia, para garantir que os fabricantes de automóveis possam criar inovações revolucionárias necessárias para alcançar soluções de mobilidade modernas e seguras.

4.6.1 Para-choques

Os para-choques são estruturas de segurança, acopladas tanto na dianteira como na traseira dos automóveis, para absorver a força de impacto em colisão, diminuindo as consequências de ferimentos e até fatalidade aos passageiros e custos de reparos para o carro. Originalmente eram feitos de barras metálicas, pois se acreditava que a rigidez era uma propriedade fundamental. Hoje em dia,

polímeros puros ou reforçados substituem as antigas barras metálicas e são muito utilizados para essa função. (ALI *et al.*, 2017)

De acordo com Morello *et al.* (2011), as principais funções dos para-choques são:

- Estética;
- Proteção total do veículo em impacto para o veículo estacionado ou até uma velocidade de 4 km/h¹;
- Absorção de energia e transferência de tensão controlada, para o automóvel quando houver impacto a 15 km/h (teste de impacto de seguro).
- Aerodinâmica do automóvel;
- Quando em contato com pedestre minimizar os ferimentos e lesões em caso de impacto;
- Possuir suporte de guinchos ou ganchos de reboque para veículos;

Por convenção, a maioria das montadoras de carro do mundo utiliza-se de reforços para obter peças de para-choques mais eficientes com melhores propriedades mecânicas e térmicas de processamento. Como por exemplo, montadoras européias que utilizam polipropileno reforçado com talco (PP-TD) e ainda outra que utiliza como reforço a borracha, resultando em uma peça (PP-EPDM). Esses aditivos não só aumentam as propriedades mecânicas dos polímeros injetados, mas ainda podem gerar alterações em algumas condições, como maiores temperaturas e pressão do processo que podem aumentar as tensões residuais internas. (ALI *et al.*, 2017; ACEVEDO MORANTES, BRIEVA-SARMIENTO E REALPE-JIMÉNEZ, 2014)

4.6.1.1 Design do para-choque

O método de moldagem por injeção para produção de transformados plásticos é muitas vezes o mais preferido pela sua capacidade de produzir peças complexas a baixo custo. Mas antes de qualquer peça ser produzida, é necessária a projeção e fabricação de um molde que irá dar forma à peça e determinar diretamente a qualidade da mesma (KAZMER, 2016). O design do molde que será

¹ Normas podem mudar de país para país.

injetado deverá ser muito bem projetado, pois um bom projeto de molde irá determinar diretamente a qualidade da peça moldada, visto que o design do produto e do molde são interdependentes (MORELLO, 2011).

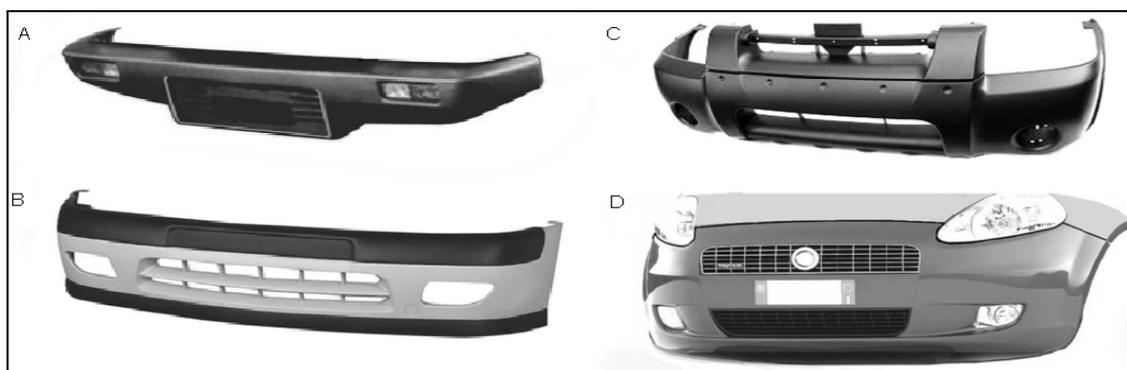
A falta de análise, geralmente, resulta em falhas que exigem um retrabalho e estima-se que em torno de 49 moldes de 50 produzidos, necessitam de alguma modificação durante seu design inicial. Esse molde é um sistema complexo que passa por alguns ciclos de temperatura e pressão, o que faz com que engenheiros se empenhem para projetar moldes adequados para finalidades específicas (KAZMER, 2016).

Os modelos de para-choques que antecedem os anos 70, geralmente eram de folhas de aço inoxidável, chapeada ou laminada, cromadas, para ter um enriquecimento estético e proteger a carroceria de pequenos impactos, levando em consideração conceitos básicos, que extremidades dianteiras e traseiras devem absorver energia. Os para-choques de aços tradicionais entrarem em colapso na flexão com baixos níveis de energia absorvidos e outros pontos estudados. Não só o material dos para-choques foi mudando, mas também seu design, como podemos ver a evolução do uso de polímeros nos automóveis, a proporção do material de fabricação sendo polímeros termoplásticos e termorrígidos na composição das peças, no Quadro 6 e posteriormente a evolução do design na Figura 25 (MORELLO, 2011).

Quadro 6 - Evolução dos pára-choques poliméricos. Tp: termoplástico, Tf: termofixo.

MODELO	ANOS	CLASSE DE POLÍMEROS	ABSORÇÃO DE ENERGIA	COR	FIGURA 26
1	70	Tp/Tf	Sem absorção	Específica	A
2	80-90	Tp>Tf	Sem absorção	Cinza	B
3	90-2000	Tp>>Tf	Sem absorção	Mesma cor do corpo	C
4	>2000	Tp	Com absorção	Mesma cor do corpo	D

Fonte: Adaptado de Morello (2011).

Figura 25- Evolução dos designs

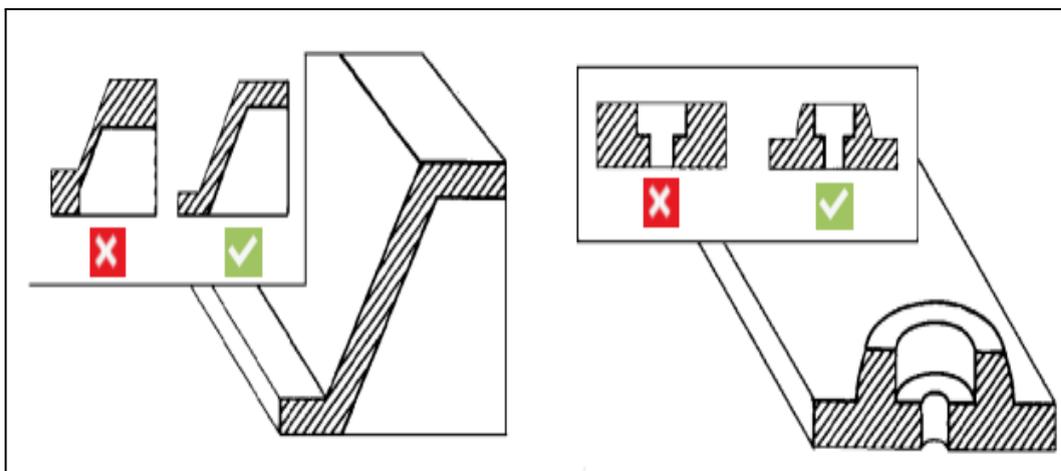
Fonte: Morello (2011).

De acordo com Fischer (2003), o design é essencial para que a peça tenha uma boa estabilidade, e alguns parâmetros mal projetados podem resultar em alguma variação na estrutura, causando empenamento e encolhimento. A espessura da parede da peça, arestas e furos de acoplamento são os principais elementos responsáveis pelas peças com o design inadequado.

O resfriamento da parede de uma peça está diretamente ligado a espessura da mesma, ou seja, quanto maior a espessura, maior será o tempo de resfriamento, gerando um maior relaxamento. Para materiais semicristalinos, um maior relaxamento gera a formação de cristais maiores, que desencadeiam o encolhimento. Se houver a projeção de paredes com tamanhos diferentes, a de maior espessura passa por um maior encolhimento, levando a deformação, a não uniformidade das paredes também resulta no empenamento, já que paredes mais grossas tendem a reter maior o calor e irão resfriar mais lentamente. Como já vimos anteriormente, as tensões residuais estão inseridas nesse processo. (FISCHER, 2003)

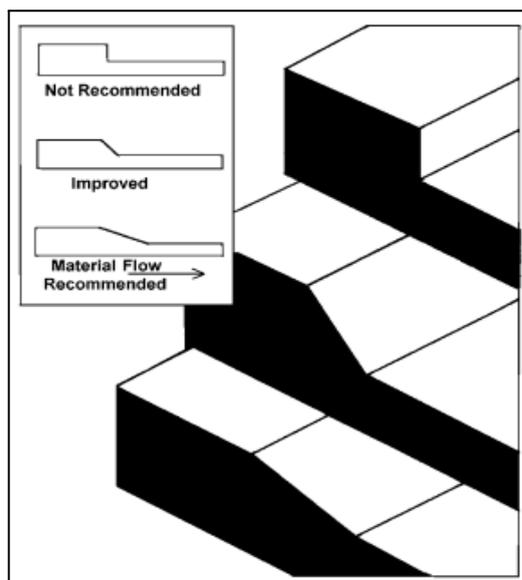
Na Figura 26, podemos ver e comparar as projeções de peças, uma com diferença nas dimensões da parede e outra com paredes de mesma espessura, com uniformidade. Uma espessura de parede uniforme irá minimizar os efeitos estruturais e caso uma peça necessite de diferentes espessuras, pois o design da peça exige uma diferença, é necessária a incorporação de uma transição suave entre as paredes das peças, como podemos ver na Figura 27.

Figura 26 - Projeção de peças com e sem uniformidade na espessura das paredes.



Fonte: Adaptado de Fischer (2003).

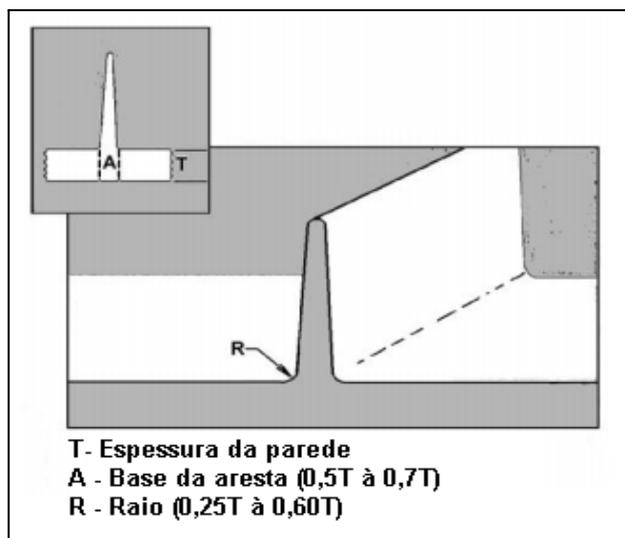
Figura 27 - Transição das paredes de uma peça projetada



Fonte: Fischer (2003).

As vigas inseridas em um projeto de peça moldada por injeção podem causar alguns problemas no preenchimento do molde por dois motivos, um deles é o contorno das arestas, que mudam repentinamente e interrompem o fluxo padrão, o segundo que as arestas podem criar variações nas espessuras da peça. O arredondamento das arestas pode ser uma opção, mas é necessário o cálculo para manter a espessura da base da aresta em 50 a 70%, pois raios muito grandes ocasionam encolhimento. Na Figura 28, podemos ver um design de viga recomendado (FISCHER, 2003).

Figura 28 - Projeção de uma viga.



Fonte: Fischer (2003).

Os furos de acoplamento servem para auxiliar a montagem de peças moldadas, a parte externa dessa estrutura que muitas vezes tem espessura maior ou igual a parede a qual está fixada, esse aumento de massa nessa área, gera aumento de tensões moldadas. Na Figura 29, podemos ver um projeto de furo de acoplamento não recomendado, pois é uma modelagem que resultaria em defeitos e um projeto recomendado onde o furo se conecta com a parede com a ajuda de vigas. (FISCHER, 2003).

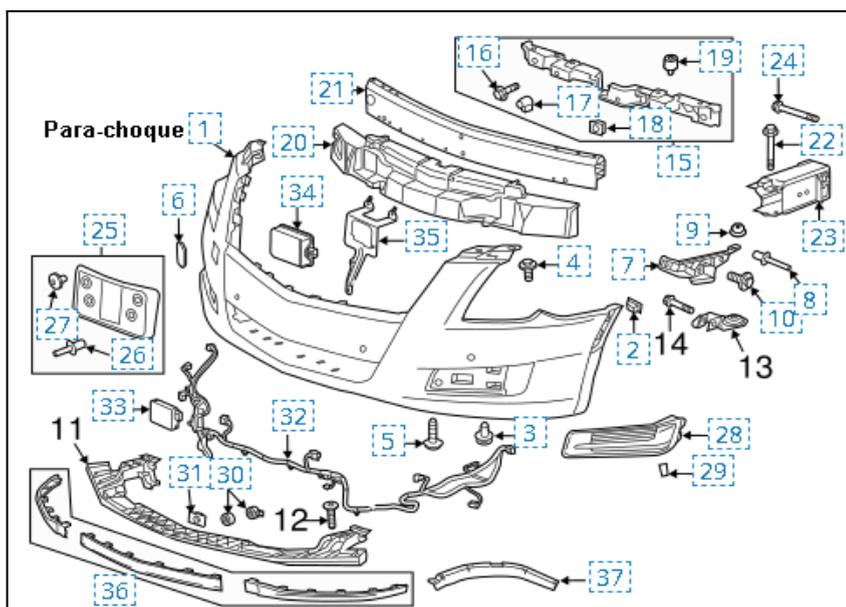
Figura 29 - Projeção de furos de acoplagem.



Fonte: Adaptado de Fischer (2003).

O design do para-choques dianteiro, como podemos ver esquematizado na Figura 30, junto a outras peças que se acopla, mesmo mudando de modelo para modelo, no geral apresenta muitas espessuras de paredes diferentes. Também pelas vigas, furos de acoplamento para muitas outras peças a que se junta, deve apresentar muitos pontos de tensão que podem gerar algum defeito devido a essas conjunturas do design Fischer (2003).

Figura 30 - Para-choque e componentes dianteiros do Cadillac XTS 2015.



Fonte: GM (2015).

Sendo as peças da Figura 30: 1- painel dianteiro, 2- clipe, 3- presilha, 4- parafuso, 5- parafuso, 6- tampa do gancho de reboque, 7- suporte, 8- rebite, 9- porca, 10- presilha, 11- suporte, 12- parafuso, 13- suporte, 14- parafuso, 15- suporte central, 16- parafuso, 17- porca do suporte central, 18- porca, 19- suporte, 20- absorvedor de energia, 21- barra de impacto, 22- parafuso, 23- absorvedor de energia, 24- parafuso, 25- kit de fixação de suporte, 26- rebite, 27- parafuso, 28- grade, 29- presilha da grade, 30- sensor de alarme, 31- suporte do sensor, 32- chicote de fiação do sensor de alarme, 33- sensor de alarme, 34- sensor, 35- suporte, 36- acessório do painel, 37- refletor de ar.

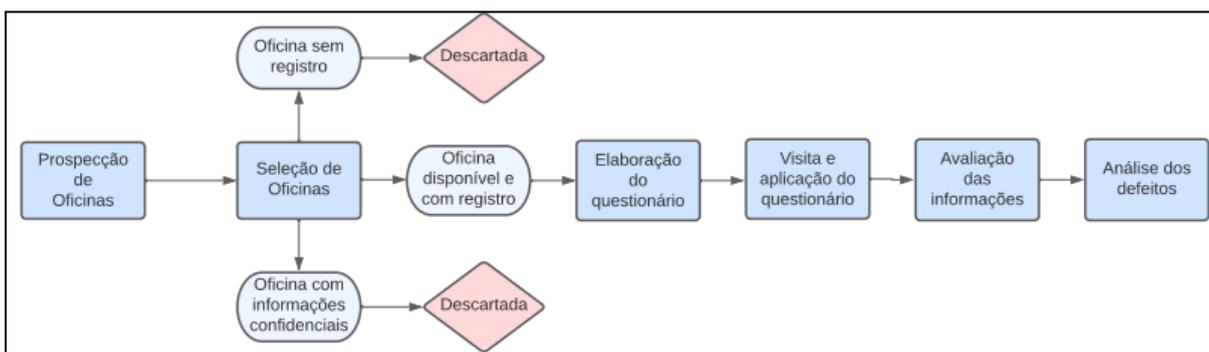
O design dos para-choques traseiros e dianteiros apresenta complexidade, por suas formas, contornos, arranjos e diante disso, podem apresentar muitos pontos suscetíveis às falhas ocasionadas pelo seu design.

5. MÉTODOS

Diante da revisão bibliográfica desenvolvida, visando conhecer mais sobre o tema abordado e para uma pesquisa descritiva (CAIADO *et al.*, 2016) e exploratória, foi desenvolvido um estudo de caso sobre defeitos de painéis de carros de polipropileno processados por moldagem por injeção.

O estudo de caso em questão se baseia na coleta de defeitos em para-choques em oficinas localizadas em Recife, capital do estado de Pernambuco, para compreensão e análise dos defeitos oriundos do design. No fluxograma da Figura 31, pode ser visualizado o processo para a realização das atividades do estudo.

Figura 31 - Fluxograma do estudo de caso.



5.1 OFICINAS

No total 14 oficinas, com especialidade em funilaria ou que exercem essa função, foram contactadas, mas apenas 3 se solidarizaram e tinham os instrumentos necessários para contribuir com o presente trabalho.

Os primeiros contatos foram realizados em 5 oficinas autorizadas para se obter um padrão nos resultados, por marca e veículo. Inicialmente as empresas em questão se colocaram à disposição para fornecer todas as informações necessárias para o estudo de caso. Mas durante o andamento foi-se encontrando certa resistência seguindo a uma objeção da parte das autorizadas em não querer expor qualquer tipo de defeito nos para-choques dos seus veículos.

Por consequência da dificuldade de captação de informações acerca de defeitos em para-choques, com as autorizadas, e com um trabalho teórico já

estruturado, o estudo de caso foi sendo conduzido a ser realizado em oficinas não autorizadas e que não possuem restrição e sim uma diversificação de veículos.

Por fim, 9 oficinas não autorizadas foram contactadas, mas apenas 3 delas se colocaram à disposição em auxiliar o estudo. As outras 6 oficinas não possuíam os aparatos necessários, como qualquer tipo de registro das atividades realizadas, orçamentos ou notas fiscais, ou não possuíam tempo para o envio de dados ou para receber alguma visita.

5.1.1 Oficinas selecionadas

Fortecar Funilaria Express (Oficina A), empresa localizada em Setúbal, bairro da zona sul do Recife, é especializada em funilaria e pintura de veículos de pequeno e médio porte. Oficina de médio porte com um espaço total de 1000m³ e capacidade para 90 veículos, tem como missão “Restaurar veículos amassados e riscados, ocasionados por pequenas e grandes colisões”. Trabalham apenas com peças fabricadas pelas montadoras, chamadas peças genuínas, descartando as peças que chamam de paralelos, com má qualidade, em carros particulares e de seguradoras.

Pontual Reparo Automotivo (Oficina B) está localizada na Ilha do Retiro, bairro localizado na Zona Oeste do Recife, com mais de 17 anos de mercado. A oficina atua no ramo automotivo fornecendo seu serviço em reparo e troca de peças de quaisquer modelos de automóveis, sem restrição, com serviço particular e atendimento a seguradoras específicas.

Oficina C, preferiu que seu nome não fosse divulgado, está localizada no bairro de Dois Irmãos, Zona Norte do Recife. É especializada em reparos mecânicos, mas também realiza trabalhos em funilaria. A empresa é considerada de pequeno porte com administração familiar.

5.2 DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE QUESTIONÁRIO

Como forma de análise foi desenvolvido um questionário para a coleta de dados quantitativos e qualitativos e possíveis defeitos encontrados em para-choque de polipropileno, como podemos ver no Quadro 7.

Quadro 7 - Perguntas para as oficinas.

Perguntas
Qual o modelo e marca do veículo?
Qual o ano de fabricação do automóvel?
Houve alguma troca das peças do painel do para-choque?
A avaria ocorreu por batida?
As peças estavam mal encaixadas?
Possui aspecto estético não desejado? Mancha por exposição, trinca, perfuração...
Alguma recuperação prévia

A aplicação do questionário e entrevista foi direcionada aos mecânicos e/ou engenheiros responsáveis pelo setor de revisão das oficinas, através visita ao local de estudo na oficina A e de forma virtual nas oficinas B e C. Com os dados obtidos inicia-se o processo de compreensão e interpretação dos defeitos.

5.3 ANÁLISE DOS DEFEITOS

Primeiramente as peças foram analisadas pelos mecânicos presentes na oficina, que fizeram a inspeção, averiguam os defeitos e relataram os serviços necessários a serem feitos. No total 20 veículos foram avaliados, 15 na Oficina A, 3 na Oficina B e 2 na Oficina C.

Posteriormente cada oficina desenvolveu seu processo de recuperação ou troca dos para-choques e disponibilizaram de diferentes formas os resultados e acompanhamento dos processos, para assim ser feito uma análise.

A análise visa comparar as falhas relatadas pelas oficinas com as causas de falhas desenvolvidas pelo design das peças visto na revisão bibliográfica anteriormente.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Devido à dificuldade de adquirir informações em épocas pandêmicas, onde o acesso de forma presencial estava restrito, por falta de disponibilidade de tempo das empresas no qual precisavam parar suas atividades e se disponibilizar ao estudo e por ferramentas que não convergem. Os resultados fornecidos diante dos encontros e diálogos com as 3 oficinas serão apresentados de formas individuais, pois os mesmos foram fornecidos de formas distintas e posteriormente serão discutidos.

Apenas foram considerados e discutidos resultados levando em consideração os fatores influenciados pelo design, e não tantos outros fatores como os parâmetros do processo de moldagem por injeção, modelo específico, tipo de produto, entre outros, que podem ocasionar vários outros defeitos nos para-choques.

6.1 OFICINA A

A Oficina A forneceu seus trabalhos através de 15 notas de serviços, orçamentos, realizados entre os meses de janeiro e fevereiro de 2022 em veículos que necessitaram de algum reparo em seus para-choques, sem especificação se os defeitos reparados foram oriundos de colisão, desgaste ou imprevistos durante o uso comum, como podemos ver um exemplo na Figura 32.

Figura 32 - Orçamento de um dos carros da Oficina A.

Atendente Corretor :							
HB20		Ano: 2016/2016		Placa: PDT-5286			
Chassi:		Cor:	KM:				
Ar-Cond. :	NÃO TEM	Vidro Elétrico:;	NÃO TEM	Trava Elétrica:;	NÃO TEM		
				Direção Hidr. :	NÃO TEM		
				Dire			
Observações gerais:							
Serviços:							
PEÇAS							
Referência	Código	Descrição	Qtde	Vlr Unit	Desc(%)	Desc(R\$)	Sub Total
22041	100170328	CALOTA RODA 14	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
16116	2S65/13006	BE/FAROL-LE	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
26142	51836952	LATERAL EXTERNA	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25411	41399 62022	AZ60H PARACHOQUE DIANTEIRO	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1520	5382098001	-PARALAMA LE	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
16851	2S65/ A24631	A/D/ PORTA TRAS-LE	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17729	100170195	SUPORTE	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SERVIÇOS							
Descrição	Qtde. Horas	Vlr Unit	Desc(%)	Desc(R\$)	Sub Total		
DESMONTAGEM MONTAGEM	1,00	150,78	0,00	0,00	150,78		
RECUPERAR E PINTAR PARA LAMA DIR	1,00	239,00	0,00	0,00	239,00		
RECUPERAR E PINTAR PORTA DIANT ESQ	6,00	70,00	0,00	0,00	420,00		
SUBSTITUIR LATERAL TRAS. L.I.E.	6,00	70,00	0,00	0,00	420,00		
SUBSTITUIR PARACHOQUE DIANT.	5,00	70,00	0,00	0,00	350,00		
SUBSTITUIR PARALAMA LE	5,00	70,00	0,00	0,00	350,00		
SUBSTITUIR PORTA TRAS. LE	6,00	70,00	0,00	0,00	420,00		

Fonte: Fortecar Funilaria Express, 2022.

Na Figura 32, pode ser observado o modelo do veículo, seu ano de fabricação, os códigos das peças que foram analisadas e os serviços que devem ser realizados. Assim como os outros 14 demais orçamentos, onde tais informações, relacionadas a o para-choque do veículo, pertinentes ao estudo foram descritas no Quadro 8.

Quadro 8 – Agrupamento dos dados dos orçamentos da Oficina A.

	Modelo	Ano de fabricação	Peças	Serviços
1	Prisma	2016	- Absorvedor	- Recuperação e pintura do painel traseiro e dianteiro. - Recuperação e pintura do para-choque traseiro e dianteiro
2	Onix	2020		- Recuperar e pintar para-choque dianteiro - Recuperar painel dianteiro
3	Ford Ka Hatch	2021		- Retocar para-choque dianteiro
4	Classic	2014	- Para-choque traseiro	- Substituição do para-choque traseiro
5	HB20	2016	- Para-choque dianteiro	- Substituição para-choque dianteiro
6	KA	2017		- Recuperação e pintura do para-choque traseiro
7	HB20 X	2015	- Grade dianteira - Suporte de grade	- Recuperação e pintura do para-choque dianteiro
8	Prisma	2011		- Retoque para-choque dianteiro
9	Focus	2012		- Recuperação e pintura do para-choque traseiro
10	Sandeiro	2017	- Para-choque traseiro	- Pintura de para-choque traseiro - Recuperação e pintura do painel traseiro
11	Golf	2014		- Recuperação e pintura do para-choque dianteiro
12	Corolla	2013	- Para-choque dianteiro - Guia do para-choque dianteiro	- Pintura de para-choque dianteiro - Recuperação e pintura painel dianteiro
13	New Fiesta	2014	- Para-choque dianteiro	- Pintura do para-choque dianteiro
14	Voyage Antigo	2015		- Recuperação de para-choque traseiro - Recuperação do painel traseiro
15	HB20	2020	- Para-choque dianteiro - Guia do para-choque dianteiro - Alma do para-choque dianteiro - Travessa superior do painel dianteiro	- Pintura do para-choque dianteiro - Recuperação e pintura do para-choque traseiro

Com base nos dados da oficina A, que trata dos serviços realizados em 15 automóveis, com serviços em para-choques em comum, não foi possível identificar nenhum padrão referente a localização dos defeitos e quebras, já que nos orçamentos não estavam definidos onde ocorreram nem de onde foi originado esses defeitos.

Todos os automóveis, exceto os 4 e 5, onde os trabalhos de recuperação, pintura e retoque foram realizados, sem a troca do para-choque, e não sendo os defeitos ocasionados por arranhões resultantes de ações mecânicas variadas. Os

possíveis danos referentes aos processos de produção por injeção e pelo design, por gerarem uma distribuição de tensão residual, seriam: pequenas fissuras, leves deformidades (GUEVARA MORALES; FIGUEROA-LÓPEZ, 2013; ACEVEDO-MORANTES; BRIEVA-SARMIENTO; REALPE-JIMÉNEZ, 2014).

Para os automóveis 4 e 5, que necessitaram da troca do para-choque, considerando que nesses casos não tenham ocorrido nenhum tipo de impacto com outros carros ou superfície, é sugerível a troca acontecer pois os defeitos foram por algum tipo fratura, danos ou perda de alguns elementos de suporte, ruptura em curvas (ACEVEDO-MORANTES; BRIEVA-SARMIENTO; REALPE-JIMÉNEZ, 2014).

No entanto, fica inviável presumir se as causas foram devido ao design das peças, pelo processo de fabricação por injeção ou inúmeras outras causas, visto que não foram disponibilizadas informações mais específicas pela oficina A.

6.2 OFICINA B

A oficina B apresentou três trabalhos realizados em para-choques no mês de março de 2022, que sofreram intervenções devido a sinistros e acidentes. Nas Figuras 33 e 34, a seguir, podemos ver o processo de recuperação de dois para-choques que previamente foram aquecidos, nos lugares com falha, para que o material retornasse a sua forma, lixados e posteriormente foi aplicado um adesivo de reparação de peças plásticas.

Figura 33 - Para-choque dianteiro carro 1.



Figura 34 - Para-choque dianteiro carro 2.



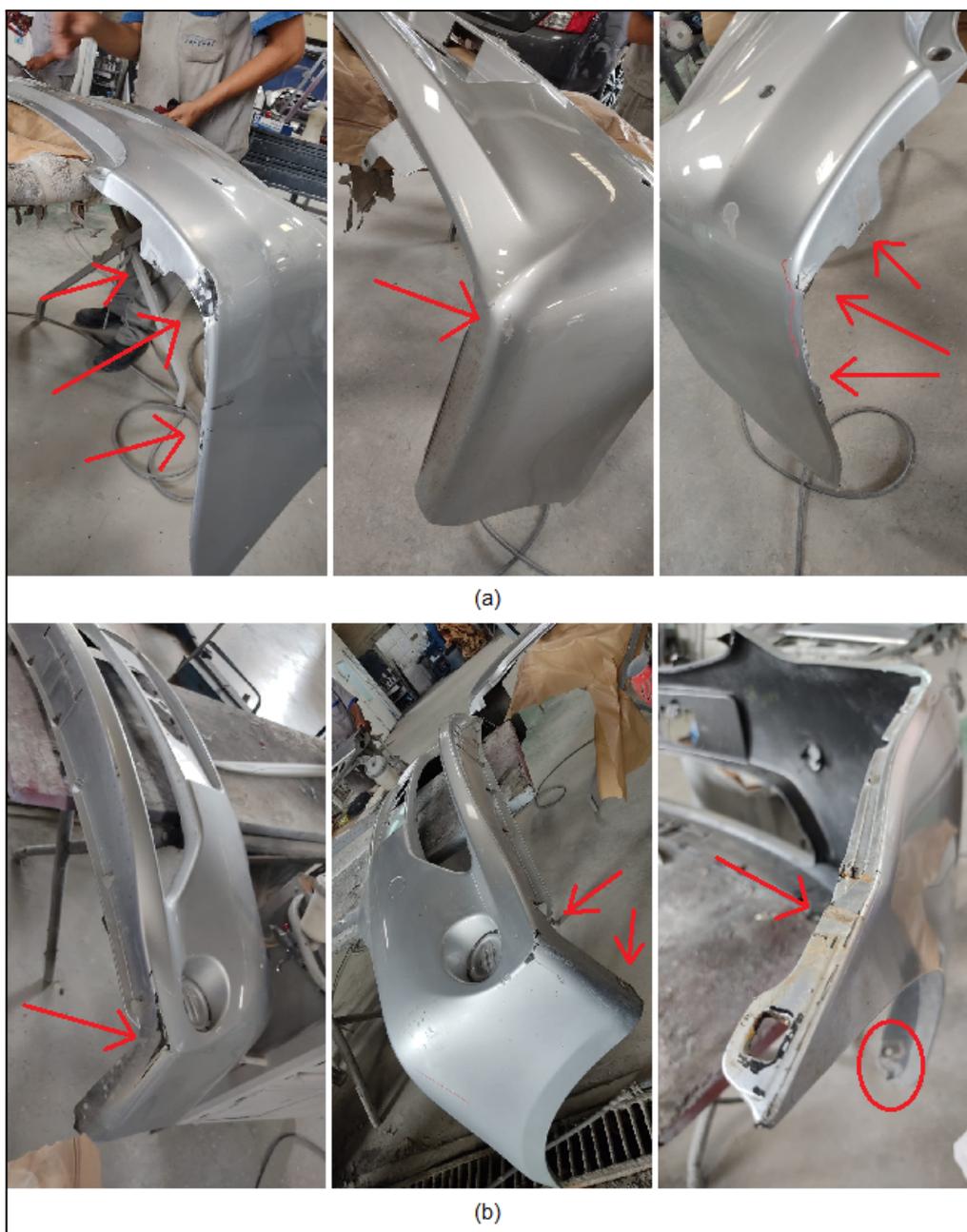
A massa aplicada para recuperação dos para-choques é do tipo adesiva para peças plásticas e serve para preencher espaços da peça que foram danificados e recuperação estrutural de reforço, feita de plástico reforçado com fibra de vidro, apresentada na Figura 35.

Figura 35 – Adesivo de reparação de resina epóxi e dióxido de titânio.



A terceira recuperação ocorreu nos para-choques traseiro e dianteiro do modelo Etios, sem ano de fabricação relatado. Após a retirada da peça do carro, foram reparados alguns defeitos como se pode ver na Figura 36.

Figura 36 - Para-choque do modelo Etios antes da recuperação: (a) traseiro e (b) dianteiro.



Após a identificação dos defeitos foi iniciado o processo de recuperação pelo polimento, passando pela aplicação de massa adesiva reparadora e primer, para deixar a peça apta para pintura, como podemos ver na Figura 37 do para-choque dianteiro e traseiro do Etios.

Figura 37 - Recuperação dos para-choques traseiro e dianteiro do Etios: (a) aplicação da massa e (b) com o primer aplicado.



(a)



(b)

Depois das etapas de aplicação de massa e primer a peça entra na cabine de pintura para o jateamento da tinta e sai completamente recuperada, Figura 38, para uso.

Figura 38 – Para-choques recuperados, pós pintura.



Nos três para-choques da oficina B, observa-se que os defeitos, derivados dos acidentes, apresentam-se em pontos de fragilidade e tensão. Esses pontos são equivalentes a pontos derivados de defeitos de design por instabilidades dimensional, como áreas com curvatura, furos de acoplamento, vigas e abas de conexão, espessuras finas de parede, onde cargas de tensão extremamente altas podem se desenvolver (FISCHER, 2003).

6.3 OFICINA C

Na oficina C foi relatado o reparo não finalizado do para-choque traseiro do modelo Honda Civic (2015), que após batida na traseira apresentou rompimento nas presilhas, fazendo com que a peça não encaixe corretamente no painel traseiro esquerdo, conforme apresentado na Figura 39.

Figura 39 - Encaixe do para-choque traseiro esquerdo com o para lama, no Honda Civic.



Na Figura 39, podemos ver uma folga no encaixe do para-choque com o para lama devido à quebra das presilhas de encaixe. Comparando o encaixe do para-choque com o painel traseiro esquerdo e direito podemos ver a diferença de encaixe, na Figura 40, de como deveria ser e como ficou após uma batida de suave proporção.

Figura 40 - Encaixe para-choque traseiro, Honda Civic: (a) esquerdo e (b) direito



O design do para-choque do Honda Civic favorece a quebra nesses pontos de tensão com alta fragilidade nas presilhas de fixação. Além disso, as presilhas não foram trocadas e o para-choque não recomposto devido a dificuldade para encontrar a peça no comércio local, sendo disponibilizada apenas em outro Estado com um custo alto. Peças similares com custo mais baixo podem ser uma opção, porém com o tempo de entrega é mais demorado e sem a garantia da qualidade desejada. Por esses motivos, o reparo ainda não foi realizado.

Problema similar ao observado no Honda Civic, pode ser observado no Classic LS, Figura 41. Defeitos no encaixe das presilhas apresentam o desalinhamento entre as partes de conexões entre o para-choques e o para-lamas e esse tipo de problema causa o desalinhamento de toda traseira do carro.

Figura 41 - Encaixe do para-choque traseiro esquerdo, Classic LS, Chevrolet.



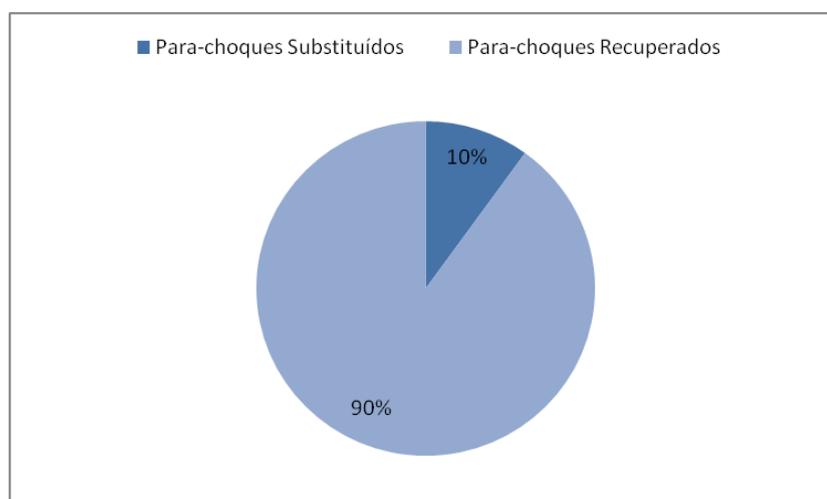
O alinhamento das estruturas de um automóvel tem grande responsabilidade, ele irá garantir que as estruturas cumpram o papel conforme foram planejadas. Exemplificando, em colisões de baixa velocidade, sem fatalidade, o alinhamento do para-choque, que tem como função absorver a energia do impacto, precisa estar compatível com o automóvel, para minimizar os danos das partes mais vulneráveis do veículo. (AVERY;WEEKES, 2005).

6.4 Defeitos nos para-choques

Sendo o para-choque o principal componente de segurança no automóvel para suportar cargas e absorver energia em impactos de baixa velocidade, seu máximo desempenho é fundamental. O projeto estrutural, quanto suas dimensões e espessuras, juntos ao processo de produção podem gerar defeitos provenientes do design, tanto pré ou pós uso dos veículos, gerando problemas quanto as suas funcionalidades.

Dos 20 veículos do estudo de caso, 2 precisaram da troca completa do para-choque, como podemos ver na Figura 42 representando um total de 10 %, os outros 18 precisaram de algum tipo de reparo dos para-choques. Além do custo financeiro necessário para esses serviços, as peças podem apresentar algum risco maior para o veículo e passageiros por não desempenharem sua melhor performance.

Figura 42 : Gráfico indicativo dos para-choques substituídos e recuperados do estudo de caso.



7. CONCLUSÃO

Diante da apresentação visual em fotos disponibilizadas pelas oficinas B e C, foram presenciados locais nos para-choques com possíveis pontos de fragilidade devido à contribuição do design da peça, independente de tais defeitos que possam ser ocasionados por colisões. Visto que, alguns dos pontos avaliados apresentam sua localidade e características, visto em teoria como os pontos de defeitos oriundos de design.

Os resultados não consideraram outros fatores influenciadores tais como: localização de entradas do molde de injeção, parâmetros de injeção, tipo de produto, região de impacto e etc.

Em tempos de pandemia, a profunda preocupação com a saúde e exposição, tornou as pessoas mais reservadas e indisponíveis. Simultaneamente a alta demanda de trabalho nas oficinas dificultou o acesso a informações mais precisas para o trabalho de estudo de caso.

8. PERSPECTIVAS FUTURAS

Considerando que este trabalho de certa forma utilizou de maneira introdutória e inovadora sobre a análise científica dos defeitos nos para-choques automotivos dos carros oriundos, como já comentado anteriormente, se faz interessante alguns outros passos a serem desenvolvidos com o intuito de contribuir com o setor realizando melhorias e sobretudo compreendendo melhor sobre tais defeitos.

- Deve ser realizado o levantamento de forma mais efetiva dos casos recorrentes através de ferramentas, sistemas ou aplicativos, sendo aplicado em oficinas, com o intuito de mapear os locais de falhas e desenvolver uma ligação entre fabricantes e oficinas, com os relatos vistos nos registros levantados.
- Projetos com a aplicação de simulação numérica baseada no método de elementos finitos, para simular e prever prováveis locais de falhas, tensões residuais e a fragilidade dos materiais utilizados, devem ser trabalhados por novos estudantes de graduação.
- Faz-se necessário realizar ensaios mecânicos de fadiga, impacto, vibração e ruptura para análises estruturais.

REFERÊNCIAS

ABIPLAST - Associação brasileira da indústria do plástico. Perfil 2019. São Paulo, SP, p.53, 2020.

ACEVEDO-MORANTES, M. T.; BRIEVA-SARMIENTO, M. e REALPE-JIMÉNEZ, A. Effect of the molding temperature and cooling time on the residual stresses of crystal polystyrene. **Universidad Nacional de Colombia, DYNA**, p. 73-80, 2014.

AFINKO SOLUÇÕES EM POLÍMEROS. Processamento de polímeros: extrusão e injeção 21 mai. 2018. Disponível em: <<https://afinkopolimeros.com.br/processamento-de-polimeros/>>. Acesso em: 07, junho, 2021.

AGNELLI, J. A. M.; CHINELATTO M. A. Degradação de polipropileno: aspectos teóricos e recentes avanços em sua estabilização. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, p. 27-31, 1992.

ALI, M. A. M.; ABDULLAH, A.; DAHAMAN, S; AMIN, A E MANSOR, S. Review the mechanical properties of reinforcing agents in polypropylene matrix of car bumper. **ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences**, v. 12, n. 14, 2017.

AMERICAN CHEMISTRY COUNCIL. New automotive roadmap further aligns industry on steps to develop mobility solutions, 3 mar. 2020. Disponível em: <<https://www.americanchemistry.com/Media/PressReleasesTranscripts/ACC-news-releases/New-Automotive-Roadmap-Further-Aligns-Industry-on-Steps-to-Develop-Mobility-Solutions.html>>. Acesso em: 06, agosto, 2021.

AMERICAN CHEMISTRY COUNCIL. The strength & safety of lightweight vehicles, 2019. Disponível em: <<https://blog.americanchemistry.com/2019/02/the-strength-safety-of-lightweight-vehicles/>>. Acesso em: 07, agosto, 2021.

ASHBY, M.; SHERCLIFF, H; CEBON, D. Materiais : engenharia, ciência, processamento e projeto. 2 ed., Rio de Janeiro, RJ, **Elsevier Editora Ltda**, p. 647, 2012.

AUTOMOTIVE PLASTICS. Lightweighting in cars: one weird chart that should convince auto makers, 2014. Disponível em <<https://www.automotiveplastics.com/blog/lightweighting-chart-plastic-car-parts/>>.

Acesso em: 07, agosto, 2021.

AVERY, M; WEEKES, A. M. The development of a new low-speed impact test to improve bumper performance and compatibility. **Woodhead Publishing Ltd**, v. 11, n. 6 p. 573–581, 2005.

BACCHI, R. V. Análise das imagens de ruptura de corpos de prova de polipropileno em ensaio de tração obtidas através de câmera de alta velocidade. Campinas, 2011.

BRASKEM. Perfil e histórico, 2020. Disponível em: <<https://www.braskem.com.br/RI/perfil-e-historico>>. Acesso em: 13, agosto, 2021.

BRASKEM. Poliolefinas - tabelas de propriedades, 2019, Disponível em: <<https://www.braskem.com.br/portal/Principal/arquivos/docs/pt-BR/Propriedades.pdf>>. Acesso em: 09, agosto, 2021.

BRETAS, R. E. S.; D'ÁVILA, M. A. Reologia de polímeros fundidos. 2. ed., São Carlos, SP, Editora Edufscar. p. 257, 2005.

CAIADO, R; QUELAS, O. L. G.; RANGEL, L. A. D.; NASCIMENTO, D. Metodologia de revisão sistemática da literatura com aplicação do método de apoio multicritério à decisão smarter. **Conferene Paper**, 2016.

CALLISTER, JR. W. D.; RETHWISCH, D. G. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. 9.ed., Rio de Janeiro, Editora LTC, p. 868, 2016.

CALLISTER, JR. W. D.; RETHWISCH, D. G.. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. 8.ed., Rio de Janeiro, Editora LTC, 2010.

CANEVAROLO, JR. S. V.. Ciência dos Polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros. 2.ed. revisada e ampliada, São Paulo, Editora Artiiber Ltda, 2006.

DE OLIVEIRA, A. J. D. Caracterização Mecânica e Reológica de Polipropileno Reciclado para a Indústria Automotiva, tese de mestrado, Curitiba, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, 2006.

DE PAOLI, M. A. Degradação e estabilização de polímeros. 2. versão on-line revisada, p. 228, 2008.

FISCHER, J. M. Handbook of molded part shrinkage and warpage. Plastics Design Library, p. 252, 2003.

GALLONE, T.; ZENI-GUIDO, A. Closed-loop polypropylene, an opportunity for the automotive sector. **The journal of field actions**, Special Issue 19, 2019.

GM. Para-choque e componentes - frente para Cadillac XTS 2015, 2015. Disponível em:

<https://www.gmpartsonline.net/v-2015-cadillac-xts--premium--3-6l-v6-gas/body--bumper-and-components-front>>. Acesso em: 15, agosto, 2021.

GUEVARA-MORALES, A.; FIGUEROA-LÓPEZ, U. Residual stresses in injection molded products. **Journal of Materials Science**, v. 49, n. 13, p. 4399-4415, 2014.

HARPER, C. A.; PETRIE, E. M. Plastics materials and processes a concise encyclopedi. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, p, 974, 2003.

HEMAIS, C. A. Polímeros e a Indústria Automobilística. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 13, n. 2, p. 107-114, 2003.

HINSKEN, H.; MOSS, S; PAUQUET, J. R; ZWEIFELA, H. Degradation of Polyolefins during Melt Processing. **Polymer Degradation and Stability**, n. 34, p.279-293, 1991.

IRING, M.; TUDOS, F. Thermal oxidation of polyethylene and polypropylene: Effects of chemical structure and reaction conditions on the oxidation process. **Progress in Polymer Science**, v. 15, p. 217–262, 1990.

KARGER-KOCSIS, J. Just. Polypropylene: An A-Z Reference. Editora Springer Science + Business Media, B. V., v. 1, p. 965, 1999.

KARGER-KOCSIS, J; BÁRÁNY, T. Polypropylene Handbook Morphology, Blends and Composites. Editora, Springer, Switzerland, p. 541, 2018.

KARIAN, H. G. Handbook of polypropylene and polypropylene composites. 2ed. Marcel Dekker, INC, New York, p. 740, 2003.

KAZMER, D. O. Injection Mold Design Engineering. 2 ed., Munich, Hanser Publishers, p. 529, 2016.

KNAUF INDUSTRIES AUTOMOTIVE. Moldagem por injeção - o método mais comumente usado para fabricar componentes de automóveis, 2019. Disponível em<<https://knaufautomotive.com/pt-br/moldagem-por-injecao-o-metodo-mais-comumente-usado-para-fabricar-componentes-de-automoveis/>>. Acesso em: 01, junho, 2021.

KUMAR, A.; GUPTA, R. K. Fundamentals of polymer engineering. 2. ed, Nova York, Editora Marcel Dekker, Inc., p. 712, 2003.

MANO, E. B.; MENDES, L. C. Introdução a polímeros. 2. ed revisada e ampliada, Editora Edgard Blücher LTDA, p. 208, 2004.

MATTOS NETO, C.; MELO, J. C. S.; ROCHA, P. M.; BARREIROS, A. DE M. L. S.; VERNECK, L. A. A utilização dos polímeros na indústria automobilística. IX EEPA, de encontro de engenharia de produção agroindustrial, 2015.

MORELLO, L.; ROSSINI, L. R.; PIA, G.; TONOLI, A.. The automotive body – componentes design. Ed. Spring Science, v. 1, 2011.

PETRY, A.. Mercado brasileiro de polipropileno com ênfase no setor automobilístico. Trabalho de conclusão de curso, p. 35, 2011.

PLASTICS EUROPE. Plastics in mobility and transport, 2017. Disponível em: <<https://www.plasticseurope.org/en/about-plastics/transportation>>. Acesso em: 18, março, 2021.

PORRI, L. Os Anos 1954-1963 no Politécnico de Milão, Lembranças e Reflexões Sobre um Período que Revolucionou a Química Macromolecular. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 19, n. 3, 2009.

RABELLO, M. Aditivação de polímeros. Primeira edição. São Paulo, SP: Editora Artliber. LTDA, p. 242, 2000.

RABELLO, M. S.; WHITE, J. R. Fotodegradação do Polipropileno. Um Processo Essencialmente Heterogêneo. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, 1997.

RJEB, A.; LETARTE, S.; TAJOUNTE, L.; EL IDRISSE, M. C.; ADNOT, A.; ROY, D.; CLAIRE, Y.; KALOUSTIAN, J. Polypropylene natural aging studied by X-ray photoelectron spectroscopy. **Journal of Spectroscopy and Related Phenomena**, v. 107, p. 221-230, 2000.

SCHAJER, Gary S.. Practical residual stress measurement methods. Vancouver, Canada, Editora John Wiley & Sons, p. 320, 2013.

SCOPEL, T. Avaliação dos parâmetros que influenciam nas alterações dimensionais e nas tensões residuais do polipropileno moldado por injeção. Dissertação, Caxias do Sul, 2018.

SELKE, A. E. Modelo constitutivo variacional de viscoplasticidade em regime de grandes deformações para um problema adiabático termomecanicamente acoplado. Dissertação de Mestrado, Florianópolis, p. 137, 2009.

SPINA, R.; SPEKOWIUS M.; DAHLMANN, R.; HOPMANN, C. .Analysis of Polymer Crystallization and Residual Stresses in Injection Molded Parts. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing**, v. 15, n. 1, p. 89-96, 2014.

TROMBETTA, E. Utilização de fibra natural de pinus (serragem) como reforço em componentes automotivos compostos de polipropileno. Dissertação, Curitiba, p. 104, 2010.

WORTBERG, J.; SCHROER, T. Alimentação, dosagem e mistura podem determinar a eficiência do processo de transformação. **Revista Plástico Industrial**, Ano VII, 75: 52-63, nov., 2004.