

## ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO POLICARBONATO INJETADO SOB ATMOSFERA DE NITROGÊNIO

## ANALYSIS OF THE MECHANICAL BEHAVIOR OF POLYCARBONATE INJECTED UNDER NITROGEN ATMOSPHERE

Guilherme Henrique Andrade Martins <sup>1, i</sup>  
Thiago Augusto Cardoso Carreiro <sup>2, ii</sup>  
Aldo Roberto Pereira <sup>3, iii</sup>

### RESUMO

A alta demanda por inovação na indústria automotiva tem incentivado a adoção de materiais alternativos que ofereçam desempenho mecânico adequado aliado à redução de custos. Dentre os materiais poliméricos utilizados nesse setor, o policarbonato se destaca por sua elevada resistência ao impacto e boa translucidez. Contudo, durante o processo de moldagem por injeção, esse polímero está sujeito à oxidação térmica, causada pela combinação de altas temperaturas e presença de oxigênio, o que pode comprometer suas propriedades mecânicas e levar ao amarelamento do produto. Uma estratégia para mitigar esse efeito é a utilização de nitrogênio como gás inerte no funil da injetora, que reduz significativamente o amarelamento do policarbonato durante o processamento; entretanto, é fundamental investigar se a presença do nitrogênio interfere nas propriedades mecânicas do material. Este trabalho teve como objetivo analisar e comparar os efeitos da oxidação térmica no processamento do policarbonato injetado sob atmosfera de nitrogênio. A pesquisa foi conduzida por meio da produção de amostras sob duas condições experimentais: com e sem nitrogênio. Em seguida, os corpos de prova foram submetidos a ensaios de tração, impacto e dureza Shore D, visando avaliar possíveis alterações nas propriedades mecânicas do material. Os resultados indicaram que não houve diferenças significativas entre as amostras nos testes de tração, impacto e dureza, sugerindo que a atmosfera de nitrogênio no funil não alterou significativamente as propriedades mecânicas do policarbonato. Estes resultados poderão contribuir para o aprimoramento dos processos de injeção de polímeros sensíveis à oxidação e, conseqüentemente, para a melhoria da qualidade de componentes automotivos produzidos com policarbonato.

**Palavras-chave:** Injeção de Termoplástico. Policarbonato. Oxidação Térmica. Nitrogênio.

### ABSTRACT

The high demand for innovation in the automotive industry has encouraged the adoption of alternative materials that provide adequate mechanical performance while reducing costs. Among the polymeric materials used in this sector, polycarbonate stands out for its high impact resistance and good translucency. However, during the injection molding process, this polymer is subject to thermal oxidation, caused by the combination of high temperatures and the presence of oxygen, which can compromise its mechanical properties and lead to yellowing of the product. One strategy to mitigate this effect is the use of nitrogen as an inert gas in the injection barrel, which significantly

<sup>1</sup> Graduando em Tecnologia de Fabricação Mecânica na Faculdade de Tecnologia SENAI "Roberto Mange". E-mail: guilherme.h.am93@gmail.com

<sup>2</sup> Graduando em Tecnologia de Fabricação Mecânica na Faculdade de Tecnologia SENAI "Roberto Mange". E-mail: thiagoaugustocc@gmail.com

<sup>3</sup> Professor de Educação Superior na Faculdade de Tecnologia SENAI "Roberto Mange" E-mail: aldo.pereira@sp.senai.br

reduces the yellowing of polycarbonate during processing; however, it is essential to investigate whether the presence of nitrogen affects the material's mechanical properties. This study aimed to analyze and compare the effects of thermal oxidation on polycarbonate processed under a nitrogen atmosphere. The research was conducted by producing samples under two experimental conditions: with and without nitrogen. Subsequently, the specimens were subjected to tensile, impact, and Shore D hardness tests to evaluate possible changes in the material's mechanical properties. The results indicated that there were no significant differences between the samples in the tensile, impact, and hardness tests, suggesting that the nitrogen atmosphere in the injection barrel did not significantly alter the mechanical properties of polycarbonate. These results may contribute to the improvement of injection molding processes for oxidation-sensitive polymers and, consequently, to the enhancement of the quality of automotive components produced with polycarbonate.

**Keywords: Thermoplastic Injection. Polycarbonate. Thermal Oxidation. Nitrogen.**

## 1 INTRODUÇÃO

A busca por inovação e eficiência na indústria automotiva tem incentivado o uso de polímeros, que oferecem baixo peso, flexibilidade de design e viabilidade para produção em larga escala. Entre esses materiais, o policarbonato (PC) se destaca por sua elevada resistência ao impacto e boa translucidez, características valorizadas em aplicações automotivas que exigem desempenho mecânico aliado a qualidade estética.

Apesar dessas vantagens, o processamento por injeção do policarbonato apresenta desafios significativos, especialmente relacionados à oxidação térmica. Esse tipo de degradação ocorre quando o material é exposto a altas temperaturas na presença de oxigênio, resultando na quebra das cadeias poliméricas, perda de propriedades mecânicas, alteração da cor e comprometimento do desempenho do produto.

Diante desse problema, uma estratégia utilizada para mitigar a oxidação térmica é a aplicação de nitrogênio como gás inerte no funil da injetora, reduzindo a presença de oxigênio e, conseqüentemente, o amarelamento do material. No entanto, é importante verificar se a presença do nitrogênio durante o processamento influencia as propriedades mecânicas do policarbonato, pois alterações nesse aspecto poderiam comprometer o desempenho do componente final.

Portanto, o presente trabalho tem como objetivo analisar e comparar o comportamento mecânico do policarbonato injetado sob duas condições: com e sem a utilização de nitrogênio no funil da injetora. Para isso, os corpos de prova serão submetidos a ensaios de tração, impacto e dureza, permitindo avaliar possíveis alterações nas propriedades do material em função da aplicação do gás inerte. Este estudo pretende contribuir para a melhoria dos processos de injeção de polímeros sensíveis à oxidação e, conseqüentemente, para a produção de componentes automotivos com maior qualidade e durabilidade.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 INJEÇÃO DE TERMOPLÁSTICO

Segundo Groover (2015), a injeção plástica consiste na obtenção de uma peça com forma desejada a partir da injeção de plástico derretido em um molde. É um dos métodos mais utilizados na indústria atualmente. Trata-se de um processo de

moldagem no qual o material plástico fundido é injetado sob alta pressão em um molde com uma determinada geometria, adquirindo sua forma final após o resfriamento.

A eficiência desse processo se deve à sua capacidade de produzir peças com precisão dimensional e alta repetibilidade, mesmo em grande escala. Os termoplásticos, por sua vez, são polímeros que se tornam maleáveis quando aquecidos e podem ser moldados diversas vezes sem sofrer alterações químicas significativas (Callister, 2012).

## **2.2 POLICARBONATO (PC)**

O policarbonato é um material polimérico amplamente utilizado nas indústrias automobilística e aeroespacial, sendo empregado principalmente como substituto do vidro devido à sua elevada resistência ao impacto. Seu monômero apresenta estrutura molecular derivada da reação química entre o ácido carbônico e compostos di-hidroxilados aromáticos, o que o classifica como pertencente à família dos poliésteres (Mano, 1991).

Na sua grande maioria, o policarbonato possui estrutura amorfa e presença de anéis aromáticos em sua configuração molecular, características que lhe conferem propriedades ópticas relevantes, como alto índice de refração e elevado grau de transparência. Este material apresenta percentual de transmitância de aproximadamente 90% da luz visível (Mano, 1996). Além disso, devido à sua resistência mecânica e excelente desempenho óptico, o policarbonato é amplamente empregado na engenharia e em aplicações que exigem materiais duráveis e transparentes, mesmo quando expostos a condições ambientais adversas.

## **2.3 OXIDAÇÃO TÉRMICA**

A oxidação térmica é um processo de degradação que ocorre devido à reação do oxigênio com as cadeias poliméricas sob a influência de temperatura elevada. Esse fenômeno é particularmente crítico em processos industriais onde o material é submetido a tempos de residência prolongados ou à presença de oxigênio em condições de aquecimento, favorecendo reações de degradação termo-oxidativa (De Paoli, 2008).

Segundo De Paoli (2008), a molécula de oxigênio é uma espécie altamente reativa devido à presença de elétrons desemparelhados em orbitais de sua camada mais externa, o que a caracteriza como um dirradical. Essa configuração permite que o oxigênio reaja rapidamente com radicais livres presentes no meio, formando radicais peróxidos e iniciando a cadeia de reações oxidativas.

Portanto, compreender os mecanismos e as condições que favorecem a oxidação térmica é essencial para adotar estratégias que aumentem a durabilidade dos polímeros, como o controle de atmosfera durante o processamento.

## **2.4 NITROGÊNIO (N<sub>2</sub>)**

Quatro quintos da atmosfera terrestre são constituídos por nitrogênio molecular (N<sub>2</sub>), em que esta é a forma mais abundante deste elemento. Apresenta-se comumente um gás diatômico (N<sub>2</sub>), sendo incolor, inodoro e insípido. Representa aproximadamente 78% do volume da atmosfera terrestre, dessa forma sendo o gás mais abundante que nós respiramos. (Krupa, 2003).

Segundo Brown *et al.* (2014), o gás nitrogênio é quimicamente estável devido à forte ligação tripla entre os dois átomos de nitrogênio na molécula N<sub>2</sub>. Essa ligação

confere alta energia de dissociação, o que significa que ele não reage facilmente com outras substâncias em temperatura ambiente.

Em operações como a rotomoldagem, os longos tempos de processamento podem favorecer o início da degradação termo oxidativa. Para mitigar esse efeito, recomenda-se, em peças de dimensões reduzidas, a purga do molde com nitrogênio, minimizando assim a disponibilidade de oxigênio para as reações oxidativas (De Paoli, 2008).

### 3 METODOLOGIA

Para a realização deste estudo, foram fabricados 35 conjuntos moldados, cada um contendo dois corpos de prova para ensaio de tração e dois para impacto. Os corpos de prova foram injetados em policarbonato HL 3503 N428R previamente desumidificado. Parte das amostras foram produzidas com aplicação de nitrogênio (N<sub>2</sub>) no funil da injetora, enquanto outra parte foi moldada sem o uso do gás.

Para a realização da pesquisa, foram utilizadas as seguintes máquinas:

- Máquina de ensaio universais Kratos (célula de carga 20.000 Kgf)
- Extensômetro de 50mm
- Máquina de teste de impacto com momento pendular (JB-W300A1/C)
- Durômetro Shore D portátil
- Gerador de nitrogênio NGP 11 da Atlas Copco
- Injetora WOJIN NT II 130

Os ensaios realizados seguiram normas técnicas específicas, garantindo a padronização dos resultados obtidos. O ensaio de dureza foi conduzido conforme a norma ASTM D2240, utilizando o método Shore D, o ensaio de impacto foi realizado segundo a norma ASTM D256, pelo método Izod e o ensaio de tração foi conduzido em conformidade com a norma ASTM D638

### 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

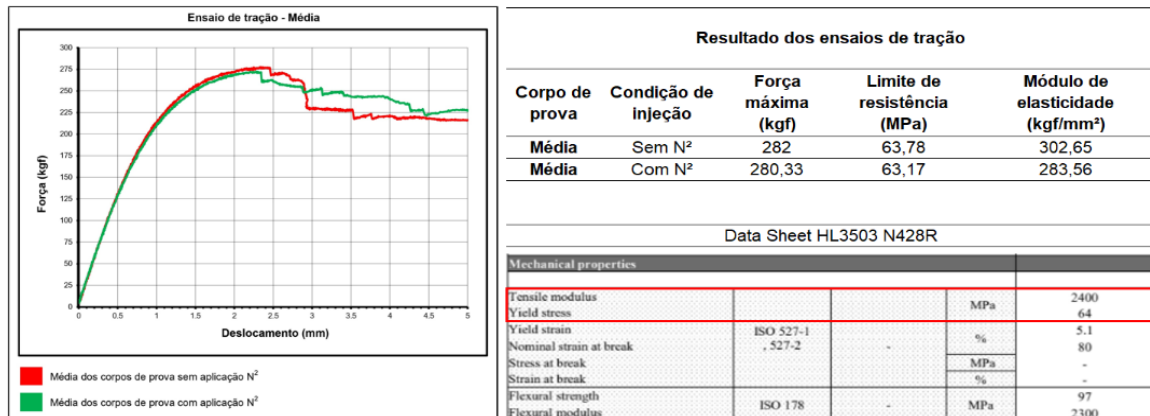
Este capítulo apresenta os resultados dos ensaios com amostras de policarbonato injetadas, com e sem aplicação de gás nitrogênio. Os dados, organizados em gráficos e tabelas, são comparados com o Data sheet do material que é representado na Figura 01.

Figura 01 – Data Sheet HL3503 N428R

Properties	Test Method	Terms	Units	HL-3503 N428R
<b>Mechanical properties</b>				
Tensile modulus			MPa	2400
Yield stress				64
Yield strain	ISO 527-1		%	5.1
Nominal strain at break	, 527-2	-		80
Stress at break			MPa	-
Strain at break			%	-
Flexural strength	ISO 178	-	MPa	97
Flexural modulus				2300
Charpy impact strength	ISO 179-1	23 degC	kJ/m <sup>2</sup>	NB
Charpy notched impact strength	, 179-2	23 degC	kJ/m <sup>2</sup>	50

Fonte: Mitsubishi Engineering (2024)

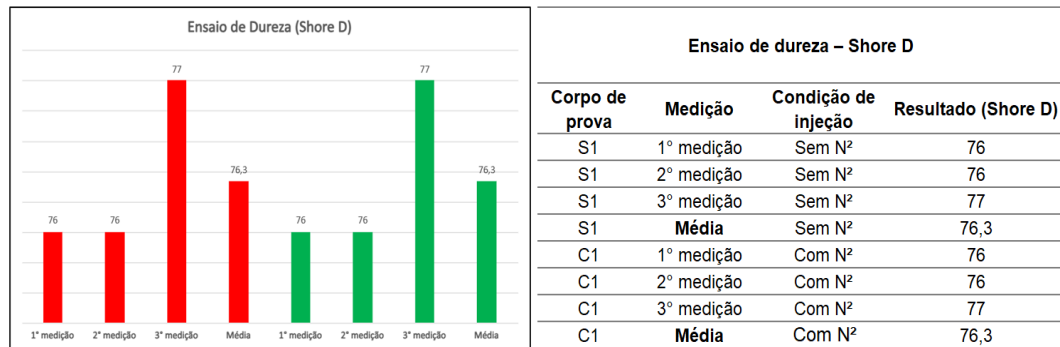
Figura 02 – Resultado do ensaio de tração



Fonte: Próprio autor

O ensaio de tração mostrou que as amostras de polycarbonato injetadas com e sem aplicação de nitrogênio no funil apresentaram comportamentos mecânicos semelhantes, com diferenças pequenas nos valores de módulo de elasticidade (aproximadamente 6,3%), força máxima e limite de resistência. As curvas de força versus deslocamento também indicam pouca variação entre as condições. Portanto, nas condições avaliadas, a aplicação de nitrogênio não causou alterações significativas nas propriedades mecânicas do material.

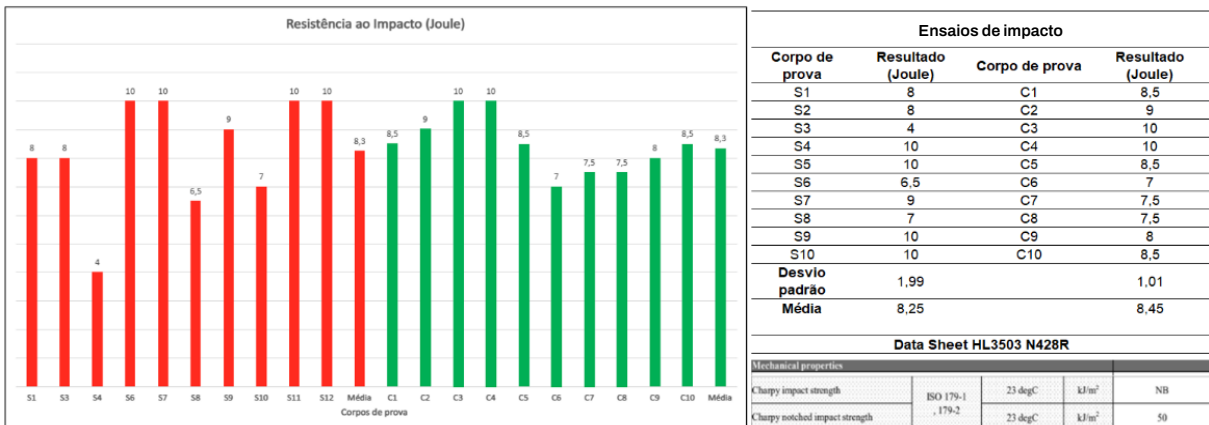
Figura 03 – Resultado do ensaio de Dureza Shore D



Fonte: Próprio autor

Os resultados do ensaio de dureza Shore D indicam que não houve diferença entre as amostras injetadas com e sem aplicação de nitrogênio no funil da injetora. Ambas as condições apresentaram média de 76,3, com variações mínimas entre as três medições (76 a 77). Isso demonstra que a presença de nitrogênio não influenciou a dureza superficial do polycarbonato nas condições analisadas.

Figura 04 – Resultado do ensaio de impacto



Fonte: Próprio autor

Durante o ensaio de impacto foram observadas variações significativas entre os corpos de prova, com resultados mínimos e máximos bem distintos; entretanto, ao se calcular o desvio padrão (1,99 J para a série S e 1,01 J para a série C), verificou-se que a dispersão em torno das médias (8,25 J e 8,45 J, respectivamente) é baixa, permitindo concluir que essas variações não são estatisticamente significativas e que o material apresenta comportamento consistente no impacto.

## CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo analisar o comportamento mecânico do policarbonato injetado sob duas condições: com e sem a aplicação de nitrogênio no funil da injetora. A partir dos ensaios de tração, impacto e dureza, verificou-se que não houve alterações significativas nas propriedades mecânicas entre as amostras produzidas nas duas condições, demonstrando que a utilização do nitrogênio não compromete o desempenho estrutural do material. Esses resultados indicam que a injeção sob atmosfera inerte constitui uma alternativa viável para minimizar os efeitos da oxidação térmica sem prejudicar a integridade mecânica do polímero.

Como limitação deste estudo, destaca-se o foco exclusivo nas propriedades mecânicas imediatas, não sendo avaliado o desempenho do material a longo prazo, que poderia ser investigado por meio de ensaios de envelhecimento acelerado.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a análise do amarelamento do policarbonato, considerando que a utilização do nitrogênio pode contribuir para reduzir esse fenômeno, bem como a avaliação das propriedades mecânicas após ensaios de envelhecimento acelerado, a fim de verificar a durabilidade do material em condições simuladas de uso prolongado. Tais análises complementares poderão evidenciar benefícios adicionais do uso do nitrogênio na injeção de policarbonato, especialmente em aplicações automotivas.

## REFERÊNCIAS

- GROOVER, M. P. **Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems**. 5. ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2015.
- CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- MANO, Eloisa Biasotto. **Polímeros como materiais de engenharia**. São Paulo: Edgard Blücher, 1991.
- MANO, Eloisa Biasotto. **Introdução a Polímeros**. 1. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1996.
- PAOLI, Marco Aurelio De. **Degradação e estabilização de polímeros**. São Paulo: Chemkeys, 2008.
- KRUPA, S. V. Effects of atmospheric ammonia (NH<sub>3</sub>) on terrestrial vegetation: a review. **Environmental Pollution**, v. 124, p. 179-221, 2003.
- BROWN, Theodore L *et al.* **Química: a ciência central**. 14. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2014.
- MITSUBISHI ENGINEERING-PLASTICS CORPORATION. **Lupilon – Technical Data Sheet: HL-3503 N428R Polycarbonate**. [S.l.], Catálogo técnico, 2024.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D2240-15: Standard Test Method for Rubber Property—Durometer Hardness**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2015.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D256-10: Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2010.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D638-14: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2014.

## **SOBRE OS AUTORES**

### **i Guilherme Henrique Andrade Martins**



Graduando do curso de Tecnologia em Fabricação Mecânica pela Faculdade de Tecnologia SENAI “Roberto Mange”. Atua profissionalmente na empresa BOSAL do Brasil LTDA, no setor de ferramentaria, exercendo a função de Analista de Ferramentaria. Possui experiência prática com projetos, confecção e manutenção de moldes e estampas CDR.

### **ii Thiago Augusto Cardoso Carreiro**



Graduando do curso de Tecnologia em Fabricação Mecânica pela Faculdade de Tecnologia SENAI “Roberto Mange”. Atualmente é funcionário da Mahle Metal Leve S.A, atuando no centro tecnológico de pesquisa e desenvolvimento, como técnico de testes. Tem experiência na área de Engenharia de Desenvolvimento de Produto e Laboratório de Pesquisa e Desenvolvimento.

### **iii Aldo Roberto Pereira**



Mestrando em Engenharia Mecânica na área de Processamento de materiais em estado semi-sólido. Graduado em Engenharia de Produção pela Universidade Anhanguera Educacional (2010). Pós-graduação Lato Sensu em Metodologia de Ensino na Educação Superior pela Uninter. Atualmente é Professor Especialista - Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial, SP. Tem experiência na área de Engenharia Mecânica, com ênfase em Processos de Fabricação.