CADERNOS UniFOA 20 ANOS
Edição 56 | 2026
e-ISSN: 1982-1816
Data de submissão: 16/11/2025 Data de Aprovação: 18/05/2026

Avaliação do efeito de tratamentos térmicos sobre a resistência ao desgaste do polímero polipropileno

Evaluation of the influence of heat treatments on the wear resistance of polypropylene polymer

[1] Raphael Silva
[1] Neil de Medeiros

1 Universidade Federal Fluminense - Volta Redonda, Rio de Janeiro, Brasil

RESUMO

A cinética de cristalização de polímeros exerce influência direta sobre suas propriedades físicas. Em polímeros semicristalinos, como o polipropileno, variações no grau de cristalinidade podem modificar significativamente suas propriedades mecânicas, afetando diretamente a resistência ao desgaste. Essa relação pode ser observada quando o material é submetido a diferentes taxas de resfriamento, que promovem alterações na estrutura cristalina do polímero. O presente trabalho objetiva avaliar a influência de tratamentos térmicos no polímero polipropileno a diferentes taxas de resfriamento e a sua correlação com a resistência ao desgaste desse material. Por meio do ensaio de calorimetria diferencial de varredura (DSC) a taxas de resfriamento de 05, 10, 15, 20 e 25 °C/min, foi possível determinar o grau de cristalinidade da amostra como recebida e comparar com amostras tratadas termicamente com resfriamento ao ar (15,7 °C/min) e resfriamento ao gelo (49,2 °C/min). Ao submeter essas amostras tratadas termicamente ao DSC, observou-se um aumento do grau de cristalinidade da amostra resfriada ao gelo em 37,17%, quando comparado à amostra como recebido, possivelmente pela alteração da taxa de nucleação do material, quando exposta a um super-resfriamento. Pelos ensaios de dureza Vickers e de desgaste por abrasômetro tipo roda de borracha, observou-se também que a amostra resfriada ao gelo apresentou maior dureza e resistência ao desgaste, comparadas aos demais. Portanto, constatou-se que o tratamento térmico influencia diretamente a resistência ao desgaste dos polímeros, configurando-se como uma alternativa para aumentar a dureza desse material.

Palavras-chave:

Cinética de cristalização, cristalinidade, resistência ao desgaste, polipropileno.

ABSTRACT

The crystallization kinetics of polymers directly influences their physical properties. In semicrystalline polymers such as polypropylene, variations in the degree of crystallinity can significantly modify their mechanical properties, directly affecting wear resistance. This relationship can be observed when the material is subjected to different cooling rates, which promote changes in the crystalline structure of the polymer. The present study aims to evaluate the influence of thermal treatments on polypropylene at different cooling rates and their correlation with the wear resistance of this material. Differential Scanning Calorimetry (DSC) tests were performed at cooling rates of 5, 10, 15, 20, and 25 °C/min to determine the degree of crystallinity of the as-received sample and compare it with thermally treated samples cooled in air (15,7 °C/min) and in ice (49,2 °C/min). When these thermally treated samples were analyzed by DSC, an increase of 37,17% in the degree of crystallinity was observed for the ice-cooled sample compared with the as-received sample, possibly due to a change in the nucleation rate of the material when exposed to supercooling. Vickers hardness tests and rubber wheel abrasion tests also showed that the ice-cooled sample presented higher hardness and greater wear resistance compared with the other conditions. Therefore, it was verified that thermal treatment directly influences the wear resistance of polymers, representing an alternative approach to increase the hardness of this material.

Keywords:

Crystallization kinetics, crystallinity, wear resistance, polypropylene.

CC BY NC SA

1 INTRODUÇÃO

Dentre os polímeros, o polipropileno (PP), um termoplástico poliolefínico, se destaca devido à elevada resistência mecânica, dureza e rigidez, suportando temperaturas consideravelmente elevadas (Ota, 2004).

Ao analisar as alterações de propriedades termomecânicas propiciadas pela morfologia dos cristais, tratamentos térmicos impactam diretamente na organização estrutural e a transferência de calor durante a solidificação em processos de fabricação, utilizando-se de polímeros semicristalinos, influenciando o grau de cristalinidade e, por consequências, suas propriedades finais (Merabet; Rouabah; Fois, 2019).

A cristalização, por sua vez, é obtida pelo resfriamento para polímeros semicristalinos, que gera o desenvolvimento de uma fase cristalina responsável pela modificação das propriedades mecânicas (Bentalib *et al*., 2025).

Conceitualmente, fora evidenciado que existe uma correlação entre a cinética de cristalização e as propriedades físicas de um polímero, como o aumento do grau de cristalinidade, que pode proporcionar o aumento da resistência térmica do poliuretano com 5% de amido (Cruz *et al.*, 2022). Contudo, pela escassez de trabalhos experimentais que possam quantificar com amostras de maior escala essa correlação, o presente trabalho avaliou a influência de tratamentos térmicos sobre a resistência ao desgaste do polipropileno pela alteração do grau de cristalinidade. Para mensurar propriedades como temperatura de cristalização isotérmica, temperatura de fusão, entalpia de fusão, cristalinidade relativa e grau de cristalização, foram realizados ensaios de calorimetria diferencial de varredura (DSC) a diferentes taxas de resfriamento.

A partir desses resultados, buscou-se reproduzir o mesmo fenômeno da alteração do grau de cristalinidade pelo resfriamento a diferentes taxas, em amostras de maior proporção que pudessem ser expostas ao ensaio de abrasômetro tipo roda de borracha.

Objetivou-se estabelecer uma correlação entre o grau de cristalinidade modificado por diferentes taxas de resfriamento, a dureza e a resistência ao desgaste pelos tratamentos térmicos aplicados ao polipropileno, seguido do ensaio de dureza que corroboram com os resultados obtidos pelas alterações morfológicas decorrentes do processo de cristalização.

2 MATERIAL E METODOS

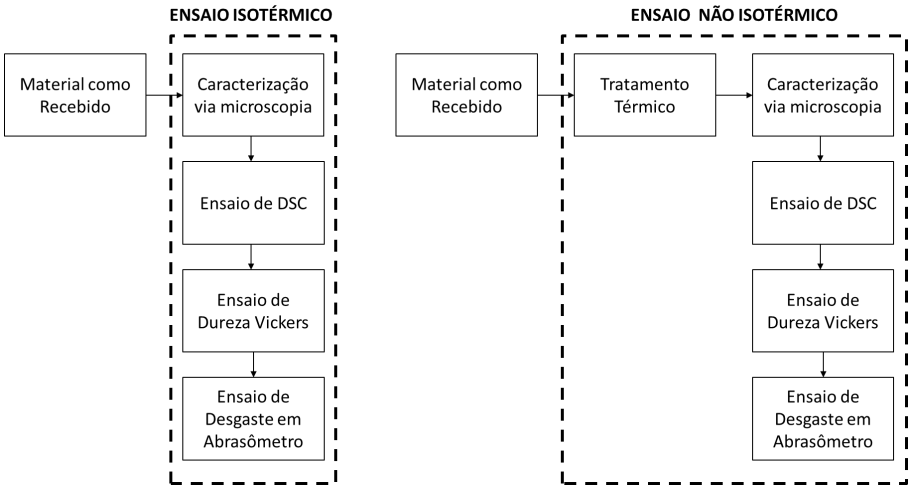
2.1 Material

O material utilizado foi o polímero polipropileno (PP), sendo que, para a realização do tratamento térmico, ensaio de dureza e ensaios de desgaste, foram preparadas amostras com seção retangular de 25 mm x 76 mm x 10 mm, conforme indicado pela norma ASTM G65, 2016.

2.2 Método

A Figura 1 demonstra, esquematicamente, as atividades que foram desenvolvidas no presente trabalho.

Figura 1 - Etapas metodológicas



Elaborada pelo autor, 2026

2.2.1 Ensaios de Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC) e Cinética de Cristalização

Através do ensaio de DSC realizado em calorímetro Calorímetro DSC 60 SHIMADZU, que opera entre 20 °C e 800 °C, foi possível determinar a temperatura de cristalização e de fusão do polipropileno, para, de posse desses, calcular a grau de cristalinidade do material.

Os valores de temperatura e entalpia de fusão e cristalização, bem como os ensaios em sua totalidade, foram conduzidos de acordo com as normas ASTM D 3417 – *Standard Test Method for Enthalpies of Fusion and Crystallization of Polymers by Differential Scanning Calorimetry (DSC)* (ASTM, 1999) e ASTM D 3418 – *Standard Test Method for Transition Temperatures and Enthalpies of Fusion and Crystallization of Polymers by Differential Scanning Calorimetry* (ASTM, 2015). Para tal, foram submetidos os ciclos, segundo descritivo das normas supracitadas, com amostras de massa 5,0 mg a 10,0 mg:

- Ensaios isotérmicos: a amostra foi aquecida em temperatura ambiente até 300 °C à taxa de aquecimento de 10,0 °C/min, então, mantida a essa temperatura por 05 min. Em seguida, a amostra foi resfriada até a temperatura de 40 °C com taxa de resfriamento de 10 °C/min e mantida nessa temperatura por 05 min. Por fim, a amostra foi aquecida a 40 °C a 300 °C a uma taxa de aquecimento de 10 °C/min;

- Cinética de cristalização não isotérmica: as amostras foram aquecidas em temperatura ambiente até 300 °C, com uma taxa de aquecimento de 10 °C/min, então, mantida a essa temperatura por 05 min. Em seguida, cada amostra testada foi resfriada até a temperatura de 40 °C a taxas de resfriamento de 05 °C/min, 10 °C/min, 15 °C/min, 20 °C/min e 25 °C/min, e mantidas a essa temperatura por 05 min. Por fim, cada amostra foi aquecida a 40 °C a 300 °C a uma taxa de aquecimento de 10 °C/min;

Através do ensaio isotérmico, foi possível calcular grau de cristalinidade Xc pela Equação 1:

$$X_c = \frac{\Delta H\mathrm{f}}{\Delta H_{100\%}} \quad (1)$$

Assim, $\Delta H_{100\%}$ é a entalpia de fusão para o PP 100% cristalino (195 J/g) e $\Delta H\mathrm{f}$ é a entalpia de fusão medida pelo DSC para cada amostra.

2.2.2 Tratamento Térmico

O ensaio foi realizado em um Forno Tubular Jung LT31073, buscando promover alterações microestruturais através do processo de cristalização do polímero, gerando modificações nas propriedades físicas do material, a serem mensuradas através dos ensaios de DSC para comparativo ao corpo-de-prova como recebido. Em função do tamanho da amostra necessária ao ensaio do abrasômetro, o resfriamento fora realizado ao ar e ao banho de gelo pela indisponibilidade de equipamento com atmosfera controlada que comportasse as dimensões da amostra. Ainda que não realizado em atmosfera controlada, o tratamento térmico consegue cumprir o objetivo de proporcionar a alteração na cristalinidade do polipropileno. Assim, o ensaio seguiu conforme os ciclos abaixo:

- Ensaio 1: Aquecimento do corpo-de-prova à temperatura de 300 °C, seguido de resfriamento ao ar, com ventilador, até a temperatura ambiente;

- Ensaio 2: Aquecimento do corpo-de-prova à temperatura de 300 °C, seguido de resfriamento em banho de gelo, até a temperatura ambiente.

Os corpos-de-prova foram previamente enclausurados em uma capsula de alumínio de 2 mm de espessura, para que não ocorresse o vazamento e consequente perda de material, quando atingisse a temperatura de fusão.

2.2.3 Ensaios de Dureza Vickers

Para o ensaio de dureza Vickers, a amostra foi seccionada, de forma a realizar leituras em regiões distintas, para minimizar erros provocados por efeitos de borda ou afins. Como referencial, o ensaio foi feito em acordo com a norma ABNT NBR ISO 6507-1, 2019.

Os parâmetros do ensaio utilizados foram de 25 gf durante 10 min por região amostrada e os resultados apresentados na grandeza Vickers (HV).

2.2.4 Ensaios de Desgaste

Os ensaios de desgaste foram realizados nas condições como recebido e após tratamentos térmicos. Para tanto, foi utilizado o abrasômetro tipo roda de borracha construído a partir de um aço estrutural A36. O procedimento adotado nesses ensaios seguiu a norma ASTM G65 16, com tempo total de ensaio de 10 min a 200 rpm para o disco do abrasômetro e força de 130 N exercida pelo contrapeso do equipamento.

De acordo com a norma ASTM G65, os resultados do teste são expressos por volume perdido (VL) em milímetros cúbicos. Esses valores são obtidos pelo cálculo da massa perdida em função da densidade específica do material em teste, expresso pela Equação 2 (ASTM G65, 2016).

$$Volume\ Perdido\ (mm^3) = \frac{massa\ perdida\ (g)}{densidade\ (g/cm^3)} x1.000 \quad (2)$$

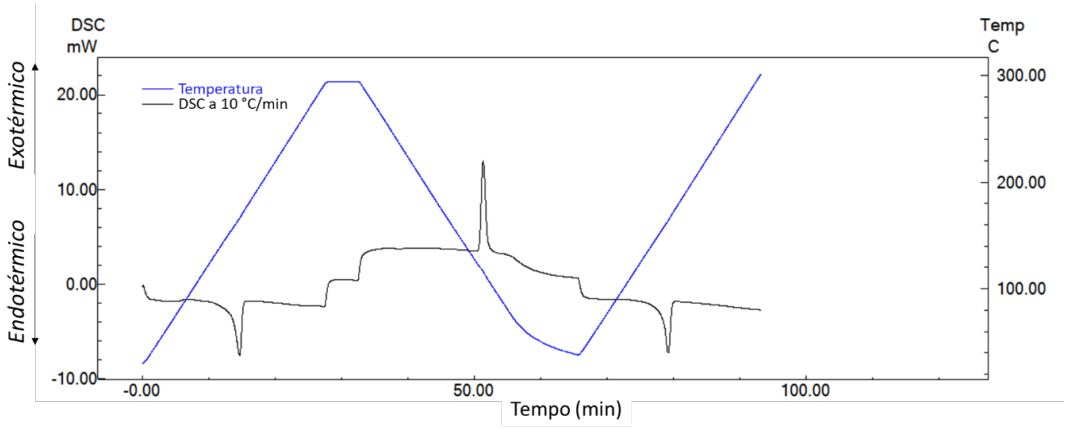
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise DSC

3.1.1 Análise Isotérmica

A Figura 2 traça o ciclo realizado a 10 °C/min, demonstrando os períodos de aquecimento e resfriamento comuns aos ensaios isotérmico e não isotérmico.

Figura 2 - Ensaio Isotérmico a 10 °C/min



Elaborada pelo autor, 2026

Conforme apresentado pela Tabela 1, através do ensaio isotérmico a 10 °C/min, foi possível obter a temperatura de cristalização isotérmica (Tc), temperatura de fusão (Tm), entalpia de fusão (ΔHf) e calcular o grau de cristalinidade do PP.

Tabela 1 - Resultados da análise isotérmica pelo DSC

	Resfriamento	Ensaio Isotérmico		
PP (10 °C/min)	Tc (°C)	Tm (°C)	ΔHf (J/g)	Xc (%)
	116,21	163,67	53,8	27,6

Elaborada pelo autor, 2026

O PP em estudo apresentou o grau de cristalinidade de 27,6%, que, comparado a outros trabalhos realizados com esse polímero, pode-se encontrar valores próximos de 38,91% e 32,03%, apresentados por Ramos *et al.* (p.26-31, 1993) e Spadetti *et al.* (p. 84–90, 2017), respectivamente, distando-se apenas em função de suas características produtivas, como, por exemplo, a taxa de resfriamento.

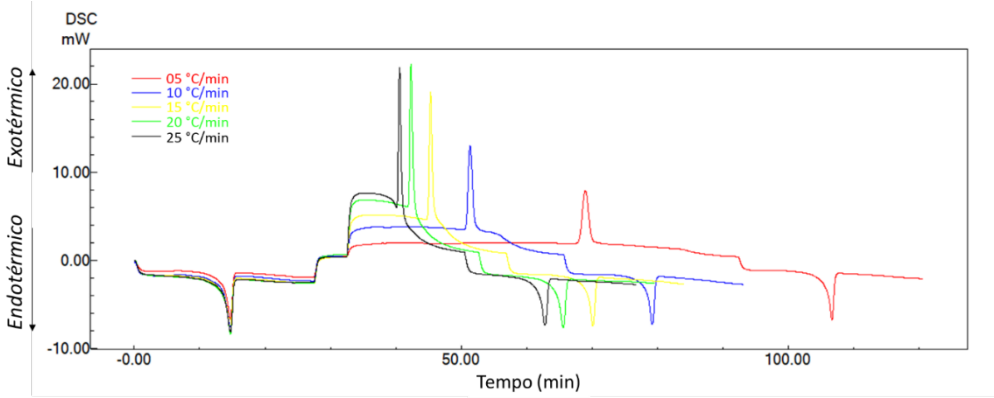
3.1.2 Análise não isotérmica

A Figura 3, por sua vez, mostra um comparativo dos ensaios realizados a diferentes taxas de resfriamento. Como observado, no início do ensaio, ocorre o aquecimento até a temperatura de 300 °C/min, no qual todas as curvas se sobrepõem, caracterizado pelo primeiro vale apresentado no gráfico em, aproximadamente, 15 min de ensaio. Porém, durante o processo de resfriamento, verifica-se um deslocamento das curvas para esquerda, à medida que aumentam as taxas de resfriamento.

Outro fator característico são os picos mais acentuados que caracterizam uma maior liberação de energia em menor tempo. Quando comparado o resfriamento a 05 °C/min com o resfriamento a 25 °C/min, é possível perceber que o pico da curva do primeiro é menor, porém mais espaçado, caracterizando maior tempo para o resfriamento e fenômeno exotérmico. Da mesma maneira, nota-se que o pico do resfriamento a 25 °C/min é mais acentuado e estreito, caracterizando menor tempo para o resfriamento e fenômeno exotérmico.

A partir dessa etapa de resfriamento, percebe-se um comportamento semelhante para todas as curvas durante o novo aquecimento (segundo vale), porém em posições distintas, em função da taxa de resfriamento realizada anteriormente.

Figura 3 - Curvas do DSC ensaio da Cinética de cristalização não isotérmica

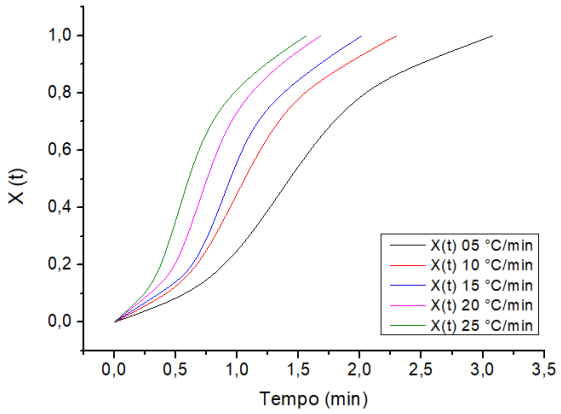


Elaborada pelo autor, 2026

Foi possível também traçar as curvas de cristalinidade relativa do PP em função de suas taxas de resfriamento, demonstradas na Figura 4. Os perfis das curvas foram sigmoidais típicos dos processos de nucleação e crescimento.

Observa-se que, à medida que aumenta a taxa de resfriamento do polímero, a curva se desloca para esquerda, sinalizando que quão maior é taxa de resfriamento, maiores são os níveis de cristalinidade relativa atingidos e em um menor espaço de tempo. Segundo Wang *et al.* (2004), esse é um indicativo de que mecanismo de nucleação e cristalização são semelhantes para a cristalização primária e secundária em qualquer das taxas de resfriamento.

Figura 4 - Curvas de Cristalinidade Relativa a diferentes taxas (Autor)



Elaborada pelo autor, 2026

Pelo equacionamento da teoria de Jeziorny, foi possível obter os resultados apresentados na Tabela 2. Observa-se a redução na temperatura do pico de cristalização (Tc) à medida que a taxa de resfriamento é aumentada. Outro fator importante da variação da taxa de resfriamento é avaliado pelo tempo decorrido desde o início do processo de cristalização até a conclusão de 50%, que também diminui, corroborando com o indicado pela análise dos gráficos das Figuras 3 e 4.

Os valores encontrados para o expoente de Avrami variaram entre 1 e 2, o que dispões uma nucleação heterogênea com crescimento em formato de bastão.

Por fim, o parâmetro cinético de Jeziorny (Zc) demonstra a relação da nucleação em função da taxa de resfriamento, aumentando à medida que essa última é elevada.

Tabela 2 - Parâmetros cinéticos obtidos a partir da teoria de Jeziorny

β (°C /min)	Tc (°C)	n	t1/2 (min)	Zc
5	120,21	1,68	1,34	0,84
10	116,21	1,65	1	0,96
15	115,02	1,65	0,89	0,99
20	113,16	1,64	0,72	1,01
25	114,14	1,63	0,6	1,02

Elaborada pelo autor, 2026

Com os resultados obtidos pela teoria de Avrami, calculou-se parâmetros cinéticos da teoria de Mo para cada taxa de resfriamento, sendo o valor da taxa de resfriamento para certo grau de cristalinidade pelo parâmetro cinético k [F(T)] e a razão entre o expoente de Avrami e o expoente de Ozawa (a). Assim, foi possível correlacionar efeito da cristalinidade relativa com a taxa de resfriamento para certo grau de cristalinidade [F(T)].

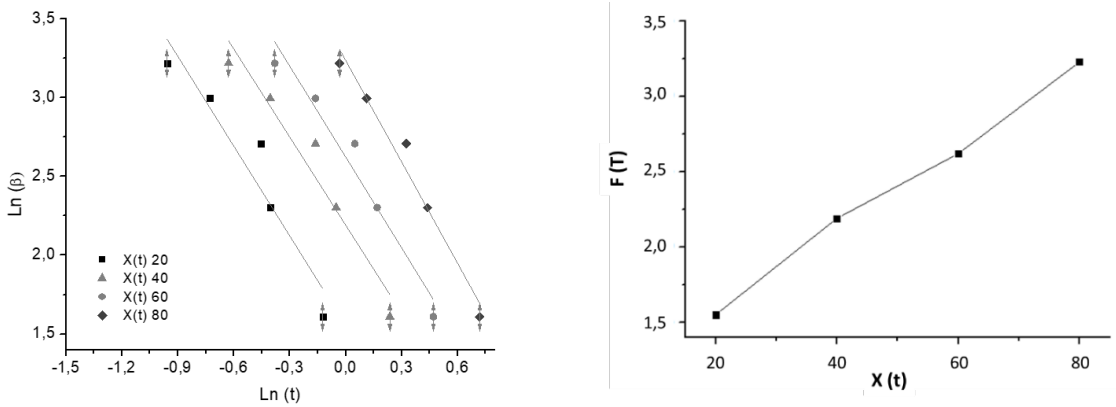
A partir da interseção com o eixo Y e da inclinação do ajuste linear do gráfico ln(β) vs ln (t), respectivamente, foi possível obter os valores de $F(T)$ e a, considerando diferentes cristalinidades relativas (Jiang *et al.*, 2013), como demonstrado na Figura 5a e descritos na Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros cinéticos obtidos a partir da teoria de Mo

Parâmetros	Cristalinidade Relativa (%)			
	20	**40**	**60**	**80**
F (T)	1,55	2,19	2,62	3,23
a	1,90	1,86	1,92	2,15

Elaborada pelo autor, 2026

Figura 5 - (a) Gráfico de Mo para diferentes taxas de resfriamento para o PP; (b) Efeito da cristalinidade relativa na taxa de cristalização não isotérmica



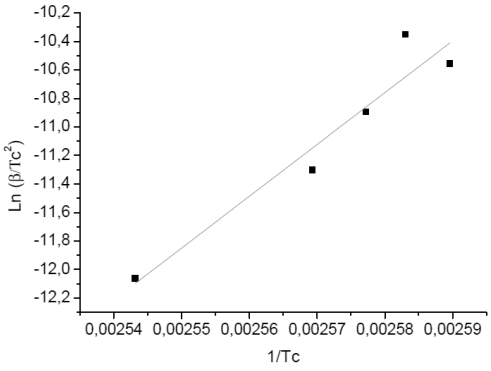
(a) (b)

Elaborada pelo autor, 2026

Ao analisar a Figura 5b, verificou-se que, à medida que a taxa de resfriamento aumenta – descrita por *F(T)* –, tem-se também o aumento da cristalinidade relativa e, por tal, o indicativo de que quão maior a taxa trabalhada, mais rápida cristalinidade alcançada com o polímero.

Ao avaliar os fatores que influenciam o grau de cristalinidade dos polímeros, o fator estático é descrito com a barreira de energia livre para a nucleação (RUBAB *et al.*, 2014). Através do modelo de Kissinger, como abordado anteriormente, pode-se calcular energias de ativação, traçando-se o gráfico $ln(\beta/T_c^2)$ em função de $(1/T_c)$, conforme a Figura 6. Quanto menor for a energia de ativação (ΔE), mais facilmente o polímero se cristaliza (WELLEN; CANEDO, 2014). Portanto, quando observado que o grau de cristalinidade apresentado pelo PP foi menor que 30%, são esperados altos valores de energia de ativação, verificado pelo ΔE de 301,92 kJmol^{-1}.

Figura 6 - Energia de ativação de Kissinger



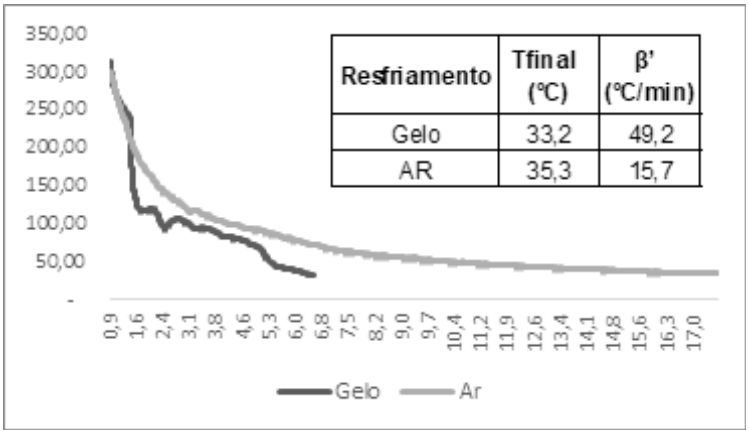
Elaborada pelo autor, 2026

3.2 Tratamentos Térmicos

A Figura 7 retrata o ensaio de tratamento térmico realizado, considerando as duas formas de resfriamento abordadas: resfriamento ao ar e resfriamento ao gelo. Foi possível traçar as curvas de resfriamento médio, bem como a taxa de resfriamento médio (β') de cada ensaio avaliado.

Nota-se que a curva de resfriamento ao gelo sofre maiores variações, porém atinge a temperatura ambiente de maneira abrupta, próximo a 7 min. Por outro lado, o resfriamento ao ar é mais constante, porém mais lento, levando pouco mais que 17 min para atingir a temperatura ambiente. Essa distinção afeta diretamente os parâmetros de nucleação do PP, facilitando ou dificultando a formação dos esferulitos, como elucidado anteriormente.

Figura 7 - Gráfico de tratamento térmico



Resfriamento	Tfinal (°C)	β' (°C/min)
Gelo	33,2	49,2
AR	35,3	15,7

Elaborada pelo autor, 2026

3.3 Grau de Cristalinidade

Pode-se observar, pela Tabela 4, que o grau de cristalinidade medido pelo DSC para o ensaio isotérmico demonstra uma considerável variação, quando comparado o corpo-de-prova como recebido *versus* os corpos-de-prova tratados termicamente com resfriamento ao ar e resfriamento ao gelo. O que se verifica é o indicativo de que o corpo-de-prova resfriado ao ar apresentou uma taxa de resfriamento levemente superior a do processo de fabricação do corpo-de-prova como recebido e, por tal, apresenta um grau de cristalinidade menor, visto que uma menor taxa de resfriamento tende a maior grau de cristalinidade no equilíbrio (Fan *et al.*, 2015). Por outro lado, verifica-se que o corpo-de-prova que sofreu o resfriamento ao gelo apresentou um grau de cristalinidade muito superior aos demais corpos-de-prova, o que segundo Xu, Reiter e Alamo (2021), pode ser explicado por um fenômeno conhecido como super-resfriamento, que levaria a uma concentração de núcleos menor em comparação com sua concentração de equilíbrio, resultando em uma taxa de nucleação maior. Esse fenômeno ocorre quando um material fundido é resfriado abaixo de sua temperatura de fusão sem que a cristalização ocorra imediatamente, nesse caso, a uma taxa de resfriamento superior a 47,46 °C/min (diferença entre T_m e T_c para o polipropileno).

Tabela 4 - Comparativo do grau de cristalinidade Xc (%).

Comparativo do grau de cristalinidade Xc (%)	
Como Recebido	27,60
Resfriamento ao Ar	24,26

Resfriamento ao Gelo	37,86

Elaborada pelo autor, 2026

3.4 Ensaio de Dureza Vickers

Por meio do ensaio de dureza Vickers, foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 5, que mostram a tendência de variação da dureza do material analisado e apresenta o que pode se esperar, quando avaliado via ensaio de desgaste.

Nota-se que o corpo-de-prova resfriado ao ar apresentou a menor dureza Vickers da amostragem, ao passo que houve um aumento considerável na dureza do corpo-de-prova resfriado ao banho de gelo, sendo este o maior resultado de dureza obtido pelos ensaios, o que leva a percepção de que o ensaio de resistência ao desgaste tende a apresentar o corpo-de-prova resfriado ao banho de gelo com maior resistência.

Tabela 5 - Comparativo da média da Dureza Vickers.

Comparativo da média da Dureza Vickers	
Como Recebido	11,50
Resfriamento ao Ar	9,80
Resfriamento ao Gelo	13,30

Elaborada pelo autor, 2026

3.5 Ensaio de Desgaste

As Tabelas 6 a 8 mostram os resultados e as médias de volume perdido para cada corpo-de-prova seguindo as diretrizes dispostas na norma ASTM G65 16, em que é possível verificar maior perda de volume no corpo-de-prova de resfriamento ao ar, quando comparado aos demais, e menor perda de volume do corpo-de-prova de resfriamento ao banho de gelo. As variações mais abruptas percebidas no volume perdido das amostras como recebido e resfriada ao ar estão atreladas à baixa dureza, o que tende a ser atenuado pelo aumento na amostra resfriada ao gelo.

De acordo com Speranza, Salomone e Pantani (2023), o tamanho dos esferulitos tende a diminuir com o aumento da taxa de resfriamento. Huan *et al.* (2013) afirmam que o desempenho mecânico do polipropileno isotático está relacionado ao tamanho dos esferulitos, sendo que materiais com esferulitos grandes sempre apresentam propriedades inferiores. Essas afirmações explicam os valores de maior resistência obtidos com corpo-de-prova resfriado ao banho de gelo.

Tabela 6 - Resultados do Ensaio de Desgaste na amostra como recebido.

Como Recebido				
Corpo-de -prova (CP)	**Massa Antes (g)**	**Massa Depois (g)**	**Massa Perdida (g)**	**Volume perdido (mm^3)**
CP 1	17,1468	15,1739	1,9729	2.192.11
CP 2	17,1902	14,3085	2,8817	3.201.89
CP 3	17,0496	12,9127	4,1369	4.596.56
Média	17,1289	14,1317	2.9972	3.330.19
Desv. Pad	0.0588	0.9316	0.8872	985.79

Elaborada pelo autor, 2026

Tabela 7 - Resultados do Ensaio de Desgaste na amostra resfriamento ao ar.

Resfriamento ao Ar				
Corpo-de- prova (CP)	**Massa Antes (g)**	**Massa Depois (g)**	**Massa Perdida (g)**	**Volume perdido (mm³)**
CP 1	16,4426	14,2103	2,2323	2.480,33
CP 2	16,9556	13,1615	3,7941	4.215,67
CP 3	16,4111	12,7126	3,6985	4.109,44
Média	16,6031	13,36147	3,2416	**3.601,81**
Desv. Pad	0,2496	0,6276	0,7148	794,19

Elaborada pelo autor, 2026

Tabela 8 - Resultados do Ensaio de Desgaste amostra resfriamento ao gelo.

Resfriamento ao Gelo				
Corpo-de- prova (CP)	**Massa Antes (g)**	**Massa Depois (g)**	**Massa Perdida (g)**	**Volume perdido (mm³)**
CP 1	16,1172	13,7379	2,3793	2.643,67
CP 2	16,9289	14,6506	2,2783	2.531,44
CP 3	16,7674	14,5538	2,2136	2.459,56
Média	16,6045	14,3141	2,2904	**2.544,89**
Desv. Pad	0,3508	0,4093	0,0682	75,76

Elaborada pelo autor, 2026

4 CONCLUSÃO

Por meio dos ensaios de DSC, Tratamento Térmico, Dureza Vickers e Desgaste em Abrasômetro por Areia Seca/Roda de Borracha foi possível comprovar que a taxa de resfriamento dos polímeros aquecidos acima de suas temperaturas de cristalização influencia diretamente na sua dureza.

Quando comparados, os corpos-de-prova ensaiados apresentaram consideráveis em variações em seu grau de cristalinidade (X_c), tendo o corpo-de-prova resfriado ao gelo apresentado um grau de cristalinidade de 37,86%, superior em 37,17% ao corpo-de-prova como recebido. Observou-se que esse aumento pode ter sido provocado pelo fenômeno do super-resfriamento, que associado ao aumento da taxa de nucleação, provocou a formação de menores esferulitos, impactando diretamente na dureza do material.

Nos ensaios de dureza Vickers, notou-se que o corpo-de-prova resfriado ao banho de gelo, com maior grau de cristalinidade, apresentou maior dureza, corroborando com a teoria de que o tratamento térmico modificou a propriedade física do polímero.

Quando ensaiados no abrasômetro os resultados se mostraram semelhantes ao previamente visto no ensaio de dureza Vickers. O corpo-de-prova resfriado ao gelo apresentou maior resistência ao desgaste e menor perda de volume. Já o corpo-de- prova resfriado ao ar apresentou a menor resistência ao desgaste e, dessa maneira, maior perda de volume.

Conclui-se, então, que o grau de cristalinidade do polímero PP é uma característica influenciada pela taxa de resfriamento e que gera alteração direta na propriedade física do material, assim comprovando efeito de tratamentos térmicos como um meio viável de modificar a resistência ao desgaste do polímero polipropileno.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, D 3417–99. Standard test method for enthalpies of fusion and crystallization of polymers by differential scanning calorimetry (DSC). Annual Book of ASTM Standards: Conshohocken, PA, 1999.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, D 3418: Standard Test Method for Transition Temperatures and Enthalpies of Fusion and Crystallization of Polymers by Differential Scanning Calorimetry. Annual Book of ASTM Standards: Conshohocken, PA, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, G65: Standard test method for measuring abrasion using the dry sand/rubber wheel apparatus. Annual Book of ASTM Standards: Conshohocken, PA, 2016.

BENTALIB, Sabrine et al. Isothermal and non-isothermal crystallization kinetics modelling of neat and composite PA410. Polymer, v. 328, p. 128432, 2025. https://doi.org/10.1016/j.polymer.2025.128432. Acesso em: 12 de janeiro de 2026.

CRUZ, Carolina Konzen et al. Avaliação da influência da adição de amido nas propriedades do poliuretano. Research, Society and Development, v. 11, n. 6, p. e26211629128-e26211629128, 2022. https://doi.org/10.33448/rsd-v11i6.29128. Acesso em: 05 de maio de 2026.

FAN, Qingchun et al. Non-isothermal crystallization kinetics of polypropylene and hyperbranched polyester blends. Chinese Journal of Chemical Engineering, v. 23, n. 2, p. 441-445, 2015. https://doi.org/10.1016/j.cjche.2014.11.016. Acesso em: 17 de outubro de 2025.

HUAN, Qian et al. Markedly improving mechanical properties for isotactic polypropylene with large-size spherulites by pressure-induced flow processing. Polymer, v. 54, n. 3, p. 1177-1183, 2013. https://doi.org/10.1016/j.polymer.2012.12.055. Acesso em: 10 de janeiro de 2026.

JIANG Z., LIU S., ZHAO J., CHEN X. Flame-retarded mechanism of SEBS/PPO composites modified with mica and resorcinol bis(diphenyl phosphate). Polymer Degradation and Stability. 2013; 98:2765-2773. https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2013.10.013. Acesso em: 25 de outubro de 2025.

MERABET, S.; ROUABAH, F.; FOIS, M. Heat treatment of isotactic polypropylene: the effect of free quenching from the melt state. International Journal of Polymer Analysis and Characterization, v. 24, n. 4, p. 313-325, 2019. https://doi.org/10.1080/1023666X.2019.1594619. Acesso em: 11 de janeiro de 2026.

OTA, W. N. Análise de compósitos de polipropileno e fibras de vidro utilizados pela indústria automotiva nacional. Dissertação de Mestrado em Engenharia. Curitiba, 2004.

RAMOS, S. M. L. S. et al.. Efeitos da estabilização do Polipropileno nas propriedades térmicas, mecânicas e termo-mecânicas de compósitos de Polipropileno/Atapulgita. Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol.3, n4, p.26-31, 1993. https://revistapolimeros.org.br/journal/polimeros/article/588371357f8c9d0a0c8b47a8. Acesso em: 25 de outubro de 2025.

RUBAB, Z.; AFZAL, A.; SIDDIQI, H.M.; SAEED, S. Preparation, Characterization, and Enhanced Thermal and Mechanical Properties of Epoxy-Titania Composites. Sci. World J. 2014, 2014, 515739. https://doi.org/10.1155/2014/515739. Acesso em: 13 de outubro de 2025.

SPADETTI, C. et al. Propriedades térmicas e mecânicas dos compósitos de Polipropileno pós-consumo reforçados com fibras de celulose. Polímeros, v. 27, n. spe, p. 84–90, 2017. https://doi.org/10.1590/0104-1428.2320. Acesso em 04 de novembro de 2026.

SPERANZA, Vito; SALOMONE, Rita; PANTANI, Roberto. Effects of pressure and cooling rates on crystallization behavior and morphology of isotactic polypropylene. Crystals, v. 13, n. 6, p. 922, 2023. https://doi.org/10.3390/cryst13060922. Acesso em 11 de janeiro de 2026.

WANG Y., SHEN C., LI H., LI Q., CHEN J. Nonisothermal Melt Crystallization Kinetics of Poly(Ethylene Terephthalate)/Clay Nanocomposites. Journal of Applied Polymer Science. 2004; 91: 308–314. https://doi.org/10.1002/app.13297. Acesso em 04 de novembro de 2025.

WELLEN, Renate MR; CANEDO, Eduardo L. On the Kissinger equation and the estimate of activation energies for non-isothermal cold crystallization of PET. Polymer Testing, v. 40, p. 33-38, 2014. https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2014.08.008. Acesso em 25 de outubro de 2025.

XU, Jun; REITER, Günter; ALAMO, Rufina G. Concepts of nucleation in polymer crystallization. Crystals, v. 11, n. 3, p. 304, 2021. https://doi.org/10.3390/cryst11030304. Acesso em 10 de janeiro de 2026