

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE LORENA

CLISTIAN DE PAIVA IRINEU

**Influência de carga mineral talco na degradação térmica e
nas propriedades dos compósitos de polipropileno para
aplicação na indústria automotiva**

Lorena
2022

CLISTIAN DE PAIVA IRINEU

Influência de carga mineral talco na degradação térmica e nas propriedades dos compósitos de polipropileno para a aplicação na indústria automotiva

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais na área de concentração de Materiais Metálicos, Cerâmicos e Poliméricos.

Orientador: Prof. Dr. Clodoaldo Saron

Versão Corrigida

**Lorena
2022**

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Automatizado
da Escola de Engenharia de Lorena,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Irineu, Clistian de Paiva

Influência de carga mineral talco na degradação térmica e nas propriedades dos compósitos de polipropileno para a aplicação na indústria automotiva/ Clistian de Paiva Irineu;

orientador Clodoaldo Saron - Versão Corrigida. - Lorena, 2022.

68 p.

Dissertação (Mestrado em Ciências - Programa de Pós Graduação em Engenharia de Materiais na Área de Materiais Metálicos, Cerâmicos e Poliméricos) - Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo. 2022

Orientador: Clodoaldo Saron

1. Polipropileno. 2. Indústria automotiva. 3. Compósitos
4. Talco. 5. Envelhecimento térmico I.
Título. II. Saron, Clodoaldo, orient.

Dedicatória

À Deus, que nos deu o dom da vida e nos oferece todos os dias a chance de sermos pessoas melhores. Aos meus familiares, amigos, colegas de curso, doutores, mestres, professores e a todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para esta conquista.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus por me fazer compreender que inteligência não é sabedoria.

À Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo.

Agradeço à toda minha família, esposa, filhas, irmão e em especial aos meus pais, Maria das Graças e Luiz Antônio que me ensinaram que temos que ser gratos, humildes, discretos e respeitosos com todos em qualquer lugar que estejamos.

Agradeço aos amigos que conquistei no grupo de pesquisa GPRPol, EEL e PPGEM, mas quero salientar a cooperação imprescindível da Camila, Denis, Vinício, Antônio e Manuel e tantos outros amigos.

Agradeço a minha querida amiga Tavânia que me auxiliou com seu secretariado refinado em cada etapa do meu processo de mestrado, e também a todos os funcionários e professores da Universidade de São Paulo, pela competência do serviço que me foram prestados.

Ao Cláudio e a à empresa Lyondell Basell da cidade de Pindamonhangaba-SP pelo fornecimento da matéria prima para o desenvolvimento da pesquisa.

Desde já, agradeço à banca avaliadora pelas observações feitas que vieram a complementar e engrandecer o presente trabalho.

Ao Prof. Clodoaldo Saron, quero deixar um agradecimento para a toda a vida, em especial pela amizade, orientação, competência, profissionalismo e dedicação tão importantes para mim. Muito obrigado por acreditar em mim e por cada palavra de orientação e incentivo. Hoje tenho ciência de que não sou apenas um melhor engenheiro, mas também um melhor filho, pai, amigo, profissional, pois aprendi com você que quanto mais sabemos, mais humildes devemos ser e ajudar aos demais. Tenho certeza que não chegaria neste ponto sem o seu apoio. Você foi e está sendo muito mais que orientador, para mim será sempre mestre e amigo. Muito obrigado Clodoaldo Saron.

“Saber muito não lhe torna inteligente. A inteligência se traduz na forma que você recolhe, julga, maneja e, sobretudo, onde e como aplica esta informação”;

Carl Sagan

RESUMO

IRINEU, C. P. **Influência de carga mineral talco na degradação térmica e nas propriedades dos compósitos de polipropileno utilizados na indústria automotiva.** 2022. 68 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2022.

O polipropileno (PP) é o polímero mais empregado na indústria automotiva e encontra aplicações em componentes internos e externos dos veículos. Com o propósito de melhorar propriedades mecânicas do material, diminuir a contração de peças moldadas e reduzir custos de matéria-prima, cargas minerais são incorporadas ao polipropileno, gerando compósitos. O talco é um mineral largamente utilizado na forma de carga particulada em compósitos de PP para a indústria automotiva. Entretanto, apesar das vantagens dos compósitos PP/talco, o seu uso em determinados componentes de veículos ainda apresenta alguns desafios. Peças produzidas de PP/talco localizadas em regiões próximas a fontes de calor como no habitáculo motor e em suporte das lâmpadas do farol podem sofrer falhas prematuras por deformação plástica ou completo amolecimento durante o uso do veículo. Neste sentido, o presente estudo teve como propósito avaliar o efeito do teor de talco nas propriedades térmicas e mecânicas de compósitos PP/talco e na estabilidade do polímero frente à degradação térmica em longo prazo. Foram preparados 9 compósitos diferentes de PP/talco, variando o teor de talco de 0 a 40% em massa por meio de extrusão e moldagem por injeção para a preparação de corpos de prova que foram empregados para ensaios mecânicos de tração e impacto, análise dinâmico-mecânica, termogravimetria, determinação de índice de fluidez e realização de ensaios de envelhecimento térmico acelerado. O talco em teores de até 25% em massa no PP causa efeito de plastificação na matriz polimérica e somente teores acima de 30% podem melhorar a rigidez do material e sua estabilidade dimensional em temperaturas mais elevadas. Por outro lado, o PP não sofre efeitos significativos de degradação quando exposto a 100 °C por até 1 ano e a presença de talco, independente do teor, não afeta este comportamento. Eventuais falhas dos componentes produzidos a partir de PP/talco não devem ser resultantes de processos de degradação térmica do material, mas sim por condições de temperatura extrapolam os limites de aplicação do polímero.

Palavras-chave: Polipropileno. Indústria automotiva. Compósitos. Talco. Envelhecimento térmico.

ABSTRACT

IRINEU, C. P. **Influence of talc mineral filler on thermal degradation and properties of polypropylene composites used in automotive industry.** 2022. 68 p. Dissertation (Master of Science) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2022.

Polypropylene (PP) is the most used polymer in the automotive industry and finds applications in internal and external components of vehicles. In order to improve the mechanical properties of the material, decrease the shrinkage of molded parts and cost saving of raw material, mineral fillers are incorporated into polypropylene, generating composites. Talc is a mineral widely used in the form of particulate filler in PP composites for the automotive industry. However, despite the advantages of PP/talc composites, their use in certain vehicle components still presents some challenges. Parts produced from PP/talc located in regions close to heat sources such as in the engine compartment and in the headlamp holder (housing) may suffer premature failure due to plastic deformation or complete softening during the use of the vehicle. In this sense, this study aimed to evaluate the effect of talc content on the thermal and mechanical properties of PP/talc composites and on the stability of the polymer against long-term thermal degradation. Nine different PP/talc composites were prepared, varying the talc content from 0 to 40 wt% through extrusion and injection molding for the preparation of specimens that were used for tensile and impact mechanics tests, dynamic-mechanical analysis, thermogravimetry, determination of melt flow rate and accelerated thermal aging tests. Talc in contents of up to 25 wt% in PP causes a plasticizing effect in the polymer matrix and only contents above 30% can improve the material's rigidity and its dimensional stability at higher temperatures. On the other hand, PP does not have significant degradation effects when exposed to 100 °C for up to 1 year and the presence of talc, regardless of the content, does not affect this behavior. Any failures of components produced from PP/talc should not be the result of thermal degradation processes of the material, but rather by temperature conditions that exceed the limits of application of the polymer.

Keywords: Polypropylene. Automotive industry. Composites. Talc. Thermal aging.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Principais polímeros termoplásticos consumidos em 2017.....	18
Figura 2 - Processos de transformação dos polímeros consumidos em 2017.....	19
Figura 3 - Locais de utilização dos polímeros no exterior dos veículos.....	21
Figura 4 - Locais de utilização dos polímeros no interior dos veículos.....	21
Figura 5 - Taticidades do polipropileno.....	23
Figura 6 - Imagens do talco em sua forma mineral e após moagem.....	27
Figura 7 - Fotos da carcaça do farol dianteiro com derretimento do PP.....	30
Figura 8 - Injetora de termoplásticos utilizada para confecção de corpos de prova.....	33
Figura 9 - Equipamento utilizado para envelhecimento térmico.....	34
Figura 10 - Resistência à tração dos compósitos PP/talco.....	37
Figura 11 - Módulo de Young dos compósitos PP/talco.....	38
Figura 12 - Alongamento na ruptura dos compósitos PP/talco.....	39
Figura 13 - Resistência ao impacto dos compósitos PP/talco.....	40
Figura 14 - Módulo de armazenamento para os compósitos PP/talco.....	41
Figura 15 - Módulo de perda para os compósitos PP/talco.....	43
Figura 16 - Fator de perda para os compósitos PP/talco.....	44
Figura 17 - Índice de fluidez dos compósitos PP/talco.....	46
Figura 18 - Curvas de TGA dos compósitos PP/talco.....	47
Figura 19 - Curvas de TGA dos compósitos PP/talco da região de decomposição térmica.....	48
Figura 20 - Resistência à tração para os compósitos PP/talco em função do tempo de envelhecimento.....	50
Figura 21 - Alongamento na ruptura para os compósitos PP/talco em função do tempo de envelhecimento.....	51
Figura 22 - Módulo de Young para os compósitos PP/talco em função do tempo de envelhecimento.....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características físicas e químicas de minerais usados como carga em polímeros.....	25
Tabela 2 - Ficha técnica do talco utilizado no estudo.....	32
Tabela 3 - Temperaturas das relaxações dos compósitos obtidas a partir do fator de perda....	45

LISTA DE ABREVIACOES E SÍMBOLOS

ASTM	American Society for Testing and Materials
CETEM	Centro de Tecnologia Mineral
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
DSC	Calorimetria Exploratória Diferencial
DTG	Derivada Termogravimétrica
DTM	Departamento de Materiais e Tecnologia
EEL	Escola de Engenharia de Lorena
EMIC	Equipamentos Mecânicos para a indústria e Construção Civil
EPS	Poliestireno expandido
EVA	Etileno – vinil - Acetato
FEG	Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá
GCC	Carbonato de cálcio Natural
IPT	Instituto de Pesquisas Técnicas
ISO	International Organization for Standardization
PCC	Carbonato de Cálcio Precipitado
PE	Polietileno
PEAD	Polietileno de alta densidade
PEBD	Polietileno de baixa densidade
PEBDL	Polietileno de baixa densidade linear
PET	Poli (tereftalato de etileno)
PF	Perda ao fogo
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
PSD	Distribuição de Partícula
PVC	Policlo reto de polivinila
PVC	Policloreto de vinila
TGA	Termogravimetria
U.V	Ultravioleta
USGS	United States Geological Survey
USP	Universidade de São Paulo
J	Joule
kJ	QuiloJoule
kN	QuiloNewton
L	Comprimento
μ	micrmetro
mg	miligrama
min	minuto
ml	mililitro
Mpa	MegaPascal

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	Polipropileno	22
2.2	Compósitos Poliméricos	23
2.3	Talco como carga mineral para compósitos poliméricos	26
2.4	Compósitos de polipropileno com talco	28
3	OBJETIVOS	31
4	METODOLOGIA	32
4.1	Materiais	32
4.2	Processamento dos compósitos	33
4.3	Ensaio de envelhecimento térmico	34
4.4	Ensaio de tração	35
4.5	Ensaio de impacto	36
4.6	Análise dinâmico-mecânica (DMA)	36
4.7	Índice de fluidez	36
4.8	Análise termogravimétrica (TGA)	36
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	38
5.1	Ensaio de tração	38
5.2	Ensaio de impacto	41
5.3	Análise dinâmico-mecânica (DMA)	42
5.4	Índice de Fluidez	47
5.5	Análise termogravimétrica (TGA)	49
5.6	Envelhecimento térmico acelerado	50
6	CONCLUSÕES	55
	REFERÊNCIAS	57
	ANEXOS	62

1 INTRODUÇÃO

Está longe o tempo em que apenas carros de brinquedo eram feitos de materiais poliméricos. Para simplificar processos e consumir menos energia durante a fabricação, as montadoras estão substituindo o aço e o alumínio por polímeros. Isso resulta em carros mais leves, que gastam menos combustível por quilômetro rodado e reduzem as emissões de poluentes. Além disto, a utilização de componentes plásticos proporciona características bastante vantajosas à indústria automobilística, como versatilidade, facilidade de processamento, estética e menor densidade. Um grande diferencial dos materiais poliméricos é também proporcionar um design em que peças feitas de metal não possuem, além da alta resistência e durabilidade.

Aplicados no exterior dos carros, a exemplo das calotas, os polímeros vêm crescendo em partes dos veículos tradicionalmente constituídas de aço, como na “lataria” localizada sobre as rodas traseiras e na porta do porta-malas. Hoje, até mesmo espaços que eram considerados inadequados, por causa das altas temperaturas e da contaminação por produtos químicos, já podem ser feitos de polímeros, a exemplo do motor, cárter e galerias de combustível. Assim, os atuais 44 kg médios de polímeros nos veículos substituem cerca de 350 kg de aço. Na Europa esse número já chega a 100 kg de polímeros em automóveis. O percentual de polímeros nos carros deve subir de atuais 15% para 25% a 30% em 2030. Este é um crescimento significativo e tal matéria-prima ainda pode conquistar um espaço maior.

O polipropileno é o polímero mais utilizado na indústria automotiva, o qual recebe um teor significativo de aditivos e cargas minerais com o propósito de modificar propriedades do material e reduzir custos da matéria-prima. Entretanto, além das modificações diretas em suas propriedades, as cargas minerais podem também influenciar nos processos de degradação do polímero.

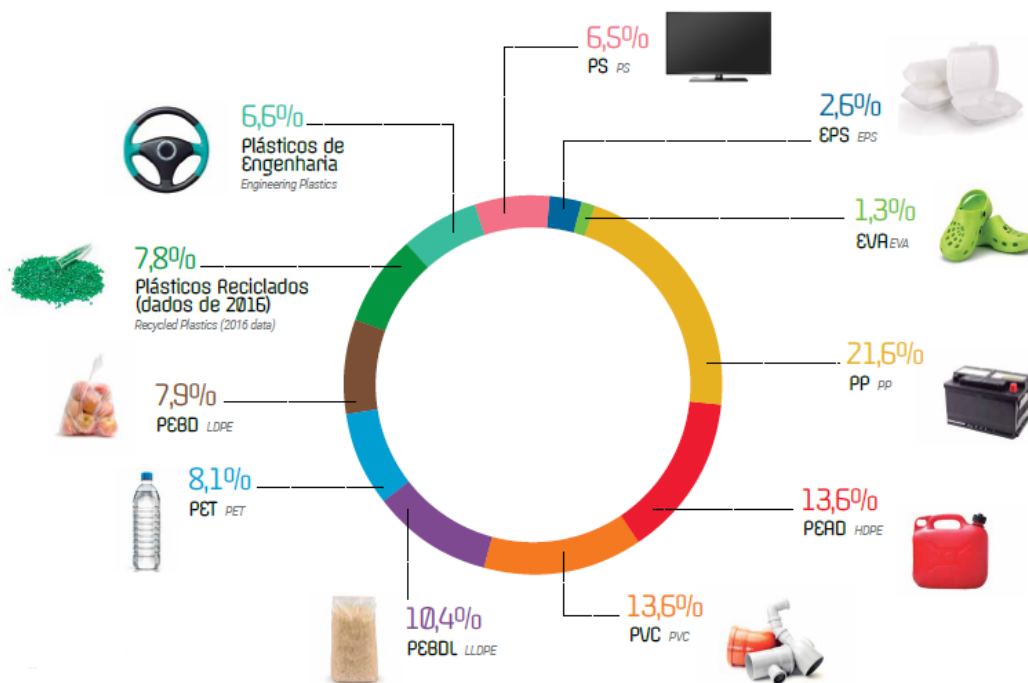
O presente trabalho teve como objetivo estudar a influência da carga mineral talco nas propriedades dos compósitos com matriz de polipropileno (PP) virgem para viabilizar aplicações automotivas no ambiente do motor dos veículos, agregando melhorias nas características mecânicas, físicas e químicas das peças fabricadas. Neste contexto, foram preparados compósitos PP/talco com proporções variadas de talco e

submetidos ao envelhecimento térmico. Suas propriedades foram avaliadas em função do teor de carga e do envelhecimento acelerado por meio de ensaios mecânicos, térmicos, químicos e de fluxo no estado fundido. O talco foi escolhido neste estudo por ser o mineral utilizado no desenho de produto da carcaça do farol que motivou este estudo. A escolha da variação de 0 a 40% de talco da composição é devido a preconização técnica utilizada na concepção de produtos plásticos na área automotiva praticada pelas montadoras. É considerado produtos com 40% de carga os produtos que têm maior solicitação à resistência mecânica ou a temperatura. Por exemplo, as peças plásticas conectadas diretamente ao motor do veículo terão 40% de carga, assim como o suporte de farol para veículos de média e baixa gama que trabalham com lâmpadas incandescentes.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Segundo a Associação Brasileira da Indústria do Plástico (ABIPLAST), que representa o setor no país desde 1967, em seu relatório são destacados os principais termoplásticos consumidos e processados no Brasil (ABIPLAST, 2017). A Figura 1 apresenta a distribuição do consumo entre os termoplásticos que houve no ano de 2017.

Figura 1-Principais polímeros termoplásticos consumidos em 2017.

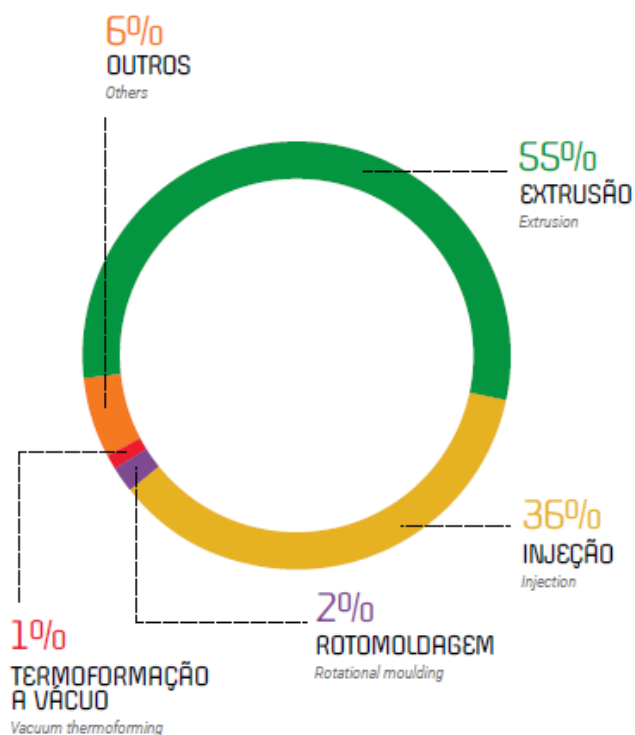


Fonte: ABIPLAST, 2017

Verifica-se basicamente onze polímeros com destaque em aplicação no mercado brasileiro, sendo o PP o mais consumido com 21,6% do total. Ressalta-se que a maior demanda do PP é para o setor automotivo. É importante salientar ainda que somadas as porcentagens de consumo de PP e PE, atinge-se mais de 50% das aplicações no mercado nacional, sendo os grandes consumidores após o segmento automotivo, a indústria civil e alimentícia.

A Figura 2 apresenta os principais processos de transformação de resinas poliméricas mais aplicadas no mercado brasileiro, em que 55% do processamento é feito via extrusão.

Figura 2 - Processos de transformação dos polímeros consumidos em 2017.



Fonte: ABIPLAST, 2017

É importante destacar que a extrusão normalmente é a base dos processos de transformação, pois é deste que se obtém produtos acabados como tubos, placas

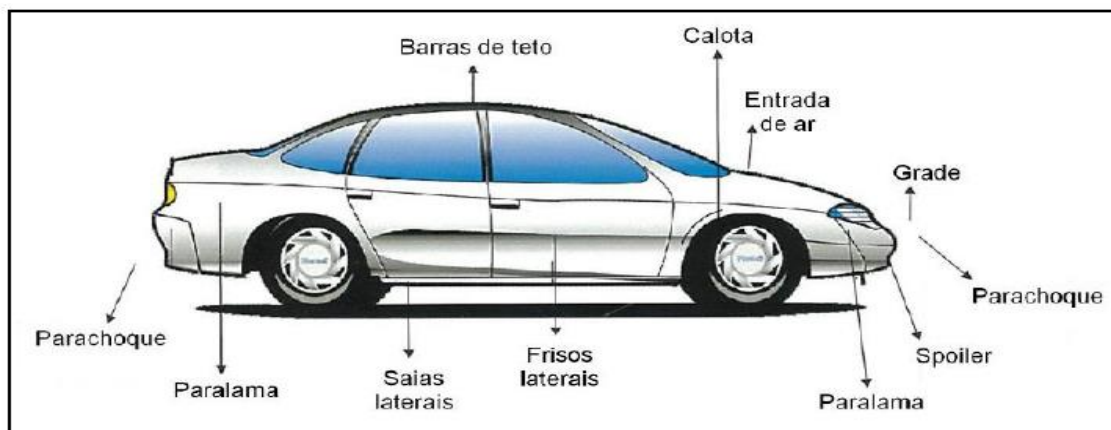
laminadas ou mesmo produtos semiacabados como os pellets que podem ser destinados para os processos de injeção e rotomoldagem de polímeros, por exemplo. A soma dos processos de moldagem por extrusão e injeção compreende aproximadamente 90% de todos os processos de transformação de polímeros existentes no mercado brasileiro (WIEBECK; HARADA, 2012).

Determinada aplicação, como também o processo de fabricação escolhido e custo dependem das propriedades físicas, químicas e mecânicas da matriz polimérica (MULINARI, 2009; BRANDÃO, 2015).

Com relação ao uso de polímeros na indústria automotiva, o Brasil se apresenta como um bem-sucedido fornecedor de polímeros para aplicações gerais e específicas, incluindo compostos e misturas poliméricas (HEMAIS, 2003). Os compósitos de polipropileno para uso automotivo surgiram como alternativa aos polímeros de engenharia como ABS (copolímero de acrilonitrila-butadieno-estireno) e poliamidas, que se apresentavam como superdimensionados em suas aplicações. Assim, o emprego dos compósitos de polipropileno propiciou redução de custo e peso para peças automotivas (LEVY; PARDINI, 2006).

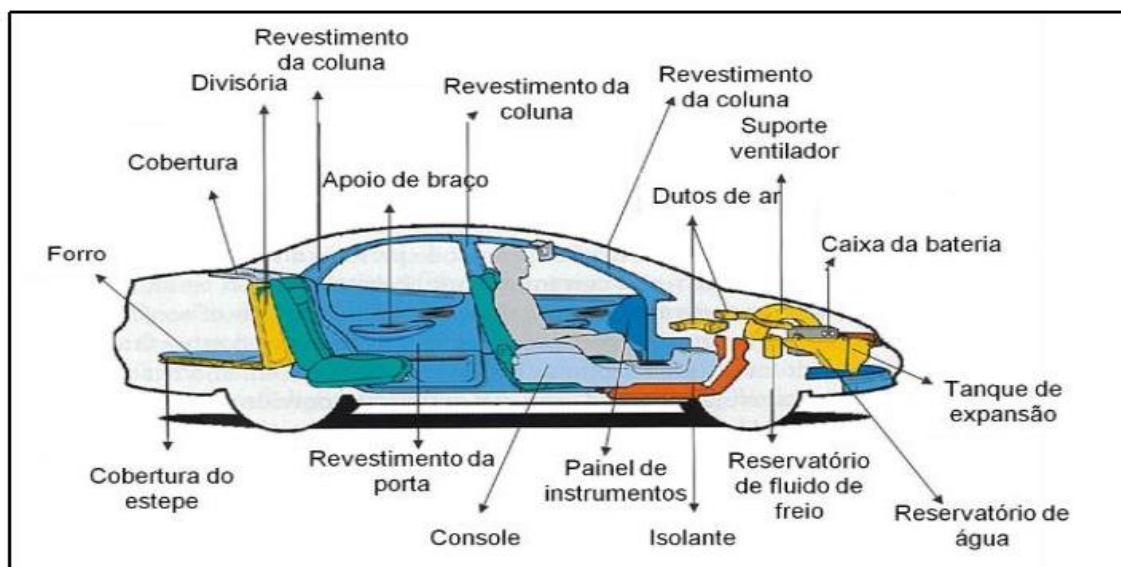
As Figura 3 e 4 apresentam os locais nos veículos em que são utilizados polímeros na composição das peças. Atualmente esse é o componente em maior concentração em um carro. Segundo o Conselho Americano de Química dos Estados Unidos, os polímeros compõem cerca de 50% da constituição dos veículos novos. Isso se deve à durabilidade, ao baixo custo de fabricação e à facilidade de moldá-lo em praticamente qualquer forma. Instrumentos, medidores, interruptores, saídas do ar condicionado, carpete, air-bags, entre outros componentes, são feitos de tipos diferentes de polímeros (PASQUINI; ADDEO, 2005).

Figura 3 – Locais de utilização dos polímeros no exterior dos veículos.



Fonte: PASQUINI; ADDEO, 2005

Figura 4 – Locais de utilização dos polímeros no interior dos veículos.



Fonte: PASQUINI; ADDEO, 2005

2.1 Polipropileno

O polipropileno é um polímero versátil usado em diversos processos de fabricação, injeção, extrusão, roto-moldagem ou mesmo processo por sopro.

Em 1954 se iniciaram as tentativas de polimerizar o polipropileno, tendo-se como resultado uma substância líquida oleosa ou sólida flexível, sem valor comercial. Em 1955, Natta na Itália, utilizando o sistema de catalisador estereoespecífico de Ziegler obteve o polipropileno com estrutura regular e cristalina com propriedades de interesse comercial (MOORE, 1996).

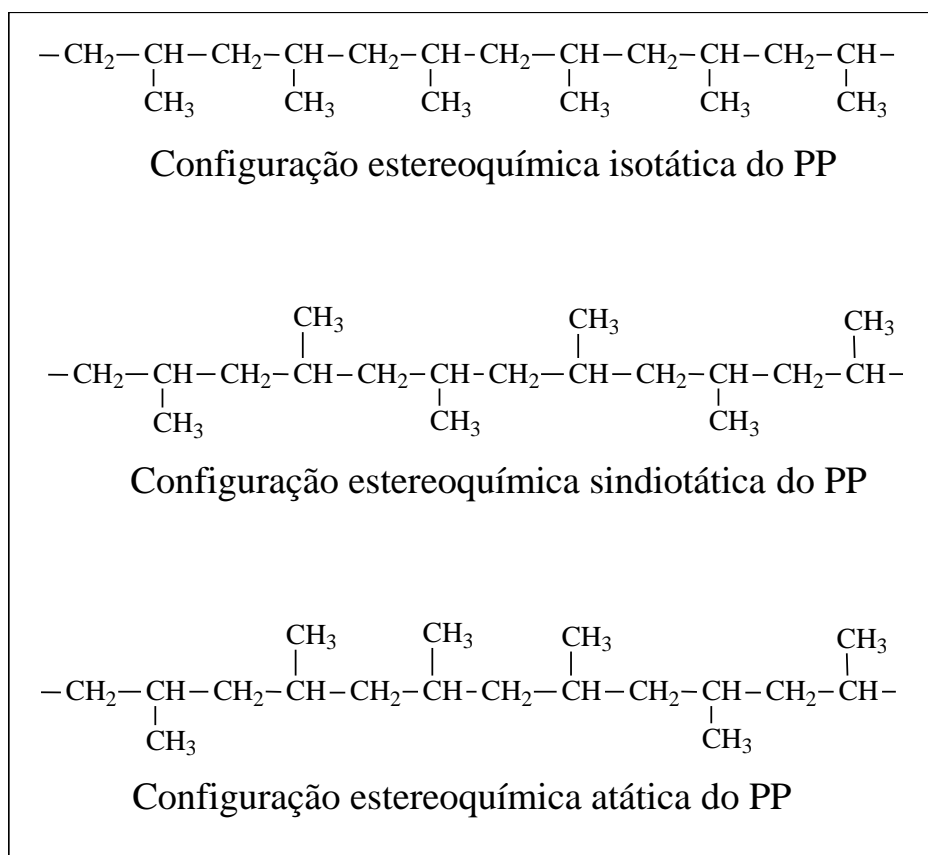
De acordo com Oliveira (2015), o polipropileno se tornou um dos mais importantes materiais, e continua em ascensão devido à sua versatilidade de processamento, ótimas propriedades mecânicas e baixo custo quando comparado aos outros polímeros de aplicação tecnológica.

Grande parte do polipropileno comercializado é do tipo "isotático", em que a maioria das unidades repetitivas monoméricas está com a "cabeça" unida à "cauda", formando uma cadeia com todos os grupos metila orientados para o mesmo lado.

A estrutura estereorregular favorece o surgimento de regiões cristalinas, que, dependendo das condições de processamento, permite obter uma cristalinidade entre 40 e 70% (SATO, 2008).

O termo estereoespecífico do catalisador se refere à característica de controlar a posição do grupo metila (CH_3) na cadeia polimérica do polipropileno (MAYER; CALAFUT, 1998). As propriedades do polipropileno são influenciadas pela taticidade ou regularidade espacial do grupo CH_3 na cadeia polimérica, como mostrado na Figura 5.

Figura 5 - Taticidades do polipropileno.



Fonte: Adaptado de SILVEIRA, 2008

2.2 Compósitos Poliméricos

Compósitos poliméricos têm uso diversificado, presente em quase todos os segmentos, como por exemplo culinária, medicina, mecânica, elétrica, vasos de pressão, componentes empregados em mísseis e aviões de combate (MARTINS, 2014).

Assim como os metais são combinados para formação de ligas metálicas aproveitando-se das propriedades de dois ou mais metais, os polímeros também são combinados para a formação de blendas e ainda podem ser reforçados com diversos tipos de fibras e cargas minerais, de forma a melhorar suas propriedades mecânicas (RODA,2013).

Normalmente a homogeneização e orientação do reforço no compósito afeta a isotropia do sistema. Quando o reforço está na forma de partículas, com todas as dimensões aproximadamente iguais, o compósito comporta-se como um material

isotrópico, cujas propriedades são independentes da direção (DALPIAZ, 2006; GARAY, 2010).

A escolha da matriz a ser empregada depende da aplicação final do compósito. Para aplicação do material em baixas temperaturas, até 200°C, pode-se contar geralmente com as resinas poliméricas, enquanto que as matrizes metálicas são recomendadas em aplicações que se requerem temperaturas de até 800°C. Compósitos de matriz cerâmica podem ser utilizados em temperaturas superiores a 1000°C (MARINUCCI, 2011).

Uma das vantagens de um compósito polimérico, segundo Marinucci (2011) é que, comparados aos metais, os componentes de materiais compósitos poliméricos normalmente são resistentes ao ataque químico e são não magnéticos, não condutores, apresentam uma excepcional relação resistência/peso e uma expressiva redução de peso.

Os compósitos podem ser formados com elementos de reforço particulados ou fibrosos. Os compósitos particulados podem ser esféricos, cúbicos, tetragonais ou de qualquer outra forma regular ou irregular, mas quase sempre equiaxiais (WYPYCH, 2016). Os particulados incluem, farinha de madeira (serragem fina), areia de sílica, vidro, argila, talco, etc. Os tamanhos de partícula variam na faixa de 10 nm até dimensões macroscópicas (CHONG; SHEIKHOLESLAMI, 2001). A vantagem das partículas nos compósitos é o aumento de rigidez, apesar de não proporcionar contribuição para o aumento de resistência à tração (CARVALHO; ALMEIDA, 1997).

Outra vantagem é a modificação das propriedades da matriz para atender necessidades como melhora das propriedades térmicas, elétricas e aumento da resistência à abrasão. No entanto, sua maior desvantagem é a baixa resistência térmica quando exposta a temperaturas em ambientes de aplicação que, para a maioria das matrizes polimérica é abaixo de 200°C (MARINUCCI, 2011). O polipropileno tem poucas desvantagens, porém podemos destacar a baixa resistência à variação brusca do clima, o que pode por exemplo causar manchas e perdas de propriedades quando expostas ao sol ou em ambientes de irradiação ou convecção térmica. A solução mais adequada para isso é a aditivação do polímero com antioxidante e estabilizante (PAOLI, 2009).

A Tabela 1 apresenta informações sobre os principais minerais utilizados como cargas em compósitos poliméricos.

Tabela 1- Características físicas e químicas de minerais usados como carga em polímeros.

	Talco	Pirofilita	Caulinita	Esmectita	Muscovita	Calcita	Dolomita	Quartzo	Wolastonita	Barita
Fórmula química	Mg ₆ (Si ₈ O ₂₀) (OH) ₄	(Si ₄ O ₁₀) Al ₂ (OH) ₂	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	(CaMg)O Al ₂ O ₃ Si ₅ O ₁₀ nH ₂ O	K Al ₂ Si ₃ AlO ₁₀ (OH, F) ₂	CaCO ₃	CaMg (CO ₃) ₂	SiO ₂	CaSiO ₃	BaSO ₄
Composição	31,88 MgO 63,37 SiO ₂ 4,75 H ₂ O	28,3% Al ₂ O ₃ , 66,7% SiO ₂ , 5,0% H ₂ O	39,5% Al ₂ O ₃ , 46,5% SiO ₂ , 14% H ₂ O	0,60 K ₂ O 2,37 Na ₂ O 2,15 CaO 39,01 Al ₂ O ₃ 45,97 SiO ₂ 9,19 H ₂ O	11,82% K ₂ O, 38,38% Al ₂ O ₃ , 45,23% SiO ₂ , 4,29% H ₂ O	53,0% CaO , 44,0% CO ₂	30,4% CaO, 21,7% MgO, 47,7% CO ₂	46,74% Si, 53,26% O	48,28 % CaO, 51,71 % SiO ₂	34,4% SO ₃ , 65,7% BaO
Sistema cristalino	pseudo-hexagonal	monoclinico	pseudo-hexagonal	monoclinico	pseudo-hexagonal	trigonal	trigonal	trigonal	triclínico	ortorrômbico
Propriedades ópticas	biaxial -	biaxial -	biaxial -	biaxial -	biaxial -	uniaxial -	uniaxial -	uniaxial +	biaxial -	biaxial +
Hábito	micáceo	prismático	micáceo	massas micro e criptocristalinas	Micáceo	prismático, escalenoédrico, romboédrico	romboédrico	granular, prismático, compacto	tabular ou maciço	tabular, prismático
Clivagem	Perfeita em (001)	perfeita (001)	perfeita em (001)	perfeita (001)	perfeita em (001)	perfeita (10-11)	perfeita (10-11)	imperfeita (1011) ou (0111)	perfeita em (100), boa em (001)	perfeita em (001), boa em (110), imperfeita em (010)
Dureza Mohs	1	1 a 2	2 a 2,5	1 a 2	2 a 2,5	3	3 a 4	7	5,5	3 a 3,5
Densidade	2,7	2,8	2,6	2 a 2,7	2,76 a 3,1	2,72	2,85	2,65	2,8 a 2,9	4,3 a 4,6
Brilho	perláceo	perláceo	terroso	lustroso	Perolado		vítreo a nacarado	vítreo	vítreo a nacarado	vítreo
Cor	verde pálido, amarelo	branco, verde, cinza	Branco em diferentes tons	branco, cinza	incolor, transparente	branco, cinza, vermelho	róseo, branco	incolor, preto, branco, leitoso	incolor a branco, cinzento	branco, amarelo, marrom

Fonte: DNPM, 2017

As principais características consideradas no desempenho de uma carga mineral para produção de um compósito são propriedades mineralógicas (composição química, estrutura cristalina, propriedades ópticas, hábito, clivagem e dureza, densidade, brilho, cor e propriedades físico-químicas de superfície), granulometria, área de superfície específica e relação de aspecto (LIMA, 2007; XIANG *et al.*, 2002).

Quanto menor for o tamanho de partícula maior será a área superficial da carga e consequentemente, a interface polímero/carga também é aumentada (DALPIAZ, 2006). Segundo Lima (2007), os principais minerais utilizados como carga em polímero são

talco, pirofilita, calcita, dolomita, caulinita, esmectita, muscovita, quartzo, wollastonita e barita.

2.3 Talco como carga mineral para compósitos poliméricos

A indústria moderna utiliza o talco como matéria-prima mineral em larga escala. Áreas como de cosméticos, tintas, papéis, borrachas, inseticidas, fertilizantes, entre outras, empregam o talco devido à sua ampla variedade de propriedades tecnológicas, definidas pela estrutura química e cristalina deste mineral (NOGUEIRA, 2017).

O talco é um filossilicato de magnésio hidratado com fórmula química $Mg_3(Si_4O_{10})(OH)_2$ e arranjo estrutural sanduíche do tipo “t-o-t” com duas folhas tetraédricas (t) de átomos de silício e oxigênio que envolvem uma folha octaédrica (o) de hidróxido de magnésio. Tal estrutura “t-o-t” é mantida por interações fracas do tipo van der Waals (ABBAS *et al.*, 2019; PONTES; ALMEIDA, 2005). Desta forma, apresenta estrutura placóide ou lamelar, podendo ser também fibroso ou granular.

Sua origem é de natureza secundária, gerado a partir de modificações de silicatos de magnésio como a forsterita, sendo encontrado tanto em rochas ígneas como metamórficas (PONTES; ALMEIDA, 2005).

A Figura 6 apresenta imagens do silicato de magnésio hidratado, o talco.

Figura 6- Imagens do talco em sua forma mineral e após moagem.



Fonte: HORIBA, 2021

Como propriedades que definem a versatilidade de aplicações do talco estão a inércia química, suavidade e untuosidade ao tato, alta área de superfície, boa retenção como carga, dureza baixa, brilho nacarado a gorduroso, densidade de 2,7 a 2,8, resistência ao choque mecânico, leveza, hidrofobicidade natural, etc. (OLIVEIRA, 2009).

A origem das jazidas minerais define a qualidade do talco, uma vez que a presença de contaminantes e a granulometria afetarão diretamente as suas propriedades. O Brasil é um dos principais produtores mundiais de talco que se destina em grande parte para a produção de materiais cerâmicos. Dentre os estados produtores de talco destacam-se o Paraná, São Paulo, Rio Grande do Sul, e Minas Gerais (NOGUEIRA, 2017).

Pelo fato do talco ser um mineral de origem secundária, é natural a sua ocorrência em granulometria bastante fina. Por outro lado, o talco pode ocorrer também na forma de rochas compactas e maciças. Técnicas variadas e sofisticadas de beneficiamento do talco como a separação magnética, catação fotoelétrica automatizada e flotação podem ser utilizadas para purificação e melhoria das suas propriedades (SHARMA, 2012; NOGUEIRA, 2017).

2.4 Compósitos de polipropileno com talco

O PP é considerado um termoplástico do tipo *commodity* e um dos motivos de seu grande uso é a sua fácil processabilidade e possibilidade de obtenção de uma grande gama de propriedades, através do uso como matriz em compósitos particulados. Compósitos de PP reforçados com partículas minerais são de interesse tecnológico, pois se pode obter produtos de baixo custo, de excelentes propriedades mecânicas e térmicas adequadas para diversas aplicações. Dentro deste contexto, o compósito de PP com carga mineral vem sendo utilizado na indústria automotiva nas peças adjacentes do motor à combustão, dentre outras (HENRIQUES, 2015).

Os materiais à base de polipropileno (PP) são amplamente utilizados devido ao seu baixo custo, boa processabilidade e bom equilíbrio de propriedades, mas sua baixa rigidez dificulta muito uma utilização ainda mais ampla. A fim de superar isso, o PP é reforçado com diferentes cargas. Nos compósitos, a interação interfacial entre o material de enchimento (carga) e matriz são muito importantes (DESHMUKH *et al.*, 2018).

As propriedades dos compósitos são fortemente influenciadas pela concentração e tamanho das partículas. Em geral, a adição de diferentes quantidades de talco em matrizes poliméricas aumenta o módulo de flexão e a temperatura de deflexão térmica dos compósitos, atribuídos ao efeito de reforço das partículas de talco. Em um estudo realizado por GHANBARI *et al.* (2019) verificou-se que a incorporação de talco ao polipropileno, especialmente em altas concentrações, levou a um aumento fragilidade da matriz. Por outro lado, a adição de talco no PP matriz melhora a rigidez e reduz a ductilidade. A utilização deste modelo para o micro-composto PP/talco é aceitável quando a proporção de talco é próxima a do PP (BOUIADJRA *et al.*, 2018).

A adição de partículas de talco a um polímero termoplástico como o PP aumenta a resistência à tração e à flexão do polímero, mas reduz sua resistência ao impacto. Globalmente, a presença de partículas de talco aumenta o módulo de Young e ao mesmo tempo diminui a plasticidade do polímero. O aumento da temperatura tem um efeito negativo em todas as propriedades mecânicas do PP. Contudo, a adição de partículas de talco na matriz termoplástica PP reduz significativamente os efeitos causados pelo aumento da temperatura. O aumento do conteúdo de talco no PP simultaneamente, aumenta a rigidez e plasticidade do polímero causada pelo aumento da temperatura. A presença de talco pode aumentar a temperatura de operação dos polímeros termoplásticos (BOUAKKAZ *et al.*, 2018).

Linhares *et al.* (2019) realizaram um estudo com compósitos de PP/talco submetendo o material ao envelhecimento natural com exposição à radiação ultravioleta e verificaram que a incorporação de talco na matriz PP induziu uma maior extensão de degradação em comparação com o PP puro, este comportamento foi acentuado com o aumento da concentração de talco e teor de ferro. Talco com maior teor de ferro tem uma forte influência na degradação do PP em todos os cenários. Um resultado é uma redução na resistência à tração manifestada por uma fissura longitudinal do polímero.

Outro efeito importante da ação do talco é sua influência sobre as propriedades de superfície que acarretam em mudanças de propriedades mecânicas do material. Desta forma, compósitos poliméricos devem ser preparados preferencialmente por processos termomecânicos como a moldagem por injeção ou extrusão. O processo de usinagem mecânica, quando utilizado, influencia na resposta de compósitos de polipropileno com carga mineral. A rugosidade da superfície exerce considerável influência sobre a tensão de falha do material. Em um estudo realizado por Codolini *et al.* (2017) foi verificado que o método de preparação de corpos de prova afeta as propriedades de tração dos compósitos de PP/talco, em que defeitos na superfície das amostras podem promover a formação e extensão de fissuras macroscópicas. As variações do teor de carga mineral e seus efeitos sobre a degradação térmica do material foram parâmetros centrais de avaliação no estudo. Com a incorporação da carga mineral ao polipropileno virgem por meio de extrusão pretendeu-se assegurar a homogeneidade dos compósitos para posterior confecção de corpos de prova e realização de ensaios para avaliar a influência da carga mineral em compósitos ou peças que trabalham em ambiente com temperaturas consideradas médias e altas para aplicações do polipropileno. As diferenças nas propriedades dos materiais produzidos foram avaliadas por meio de análise térmica, mecânica, química e reológica. O PP é considerado um termoplástico do tipo *commodity* e um dos motivos de seu grande uso é a sua fácil processabilidade e possibilidade de obtenção de uma grande gama de propriedades, através do uso como matriz em compósitos particulados. Compósitos de PP reforçados com partículas minerais são de interesse tecnológico, pois se pode obter produtos de baixo custo, de excelentes propriedades mecânicas e térmicas adequadas para diversas aplicações. Dentro deste contexto, o compósito de PP com carga mineral vem sendo utilizado na indústria automotiva nas peças adjacentes do motor à combustão, dentre outras.

As peças que apresentaram essa não conformidade foram submetidas a investigações de qualidade e a hipótese mais provável é o teor inadequado de carga mineral talco no compósito, evidenciando que a redução no teor de carga influencia na propriedade de temperatura de deflexão térmica (HDT), ou seja, o material se deforma em temperatura inferior à necessária ou especificada quando a taxa mínima de carga mineral não for respeitada. Por outro lado, é importante compreender também se a variação no teor de carga de talco leva a alterações na estabilidade do material frente à degradação térmica em longo prazo. A Figura 7 mostra uma peça “carcaça do farol” que comumente apresenta problemas de qualidade no veículo.

Figura 7 – Fotos da carcaça do farol dianteiro com derretimento do PP.



Fonte: Própria do autor

3 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho foi estudar a influência da carga mineral talco nas propriedades dos compósitos com matriz de polipropileno e seu efeito na degradação térmica do material, buscando avaliar o desempenho dos compósitos na aplicação em peças no fronte do habitáculo motor dos veículos automotores (baixo capot), que sofre a influência do calor gerado pelo motor, componentes adjacentes e lâmpada incandescente. Para isto, o estudo foi baseado no material utilizado para a confecção da peça denominada “caixa do farol”, que é constituído por compósitos de polipropileno com até 40% em massa da carga mineral.

Esse estudo visou obter uma compreensão sobre um problema que leva a uma recorrente reclamação dos proprietários de veículos automotores sobre as peças do suporte do farol, também chamadas da carcaça do farol ou ainda em inglês *housing*, produzidas com PP “TD Copo” na cor preta e contendo 40% em massa de carga mineral.

Esse produto “Carcaça do Farol” apresenta falhas por deformação plástica ou completo amolecimento quando o motor permanece em funcionamento por longos períodos e com as lâmpadas incandescentes acesas, provocando o desalinhamento óptico do farol ou até mesmo o desprendimento da lâmpada. A realização de ensaios mecânicos, térmicos e de envelhecimento acelerado teve como propósito a compreensão do problema e os fenômenos envolvidos neste tipo de falha.

4 METODOLOGIA

4.1 Materiais

O polipropileno PP “TD Copo” na cor preta e contendo 40% em massa de mineral talco utilizados no presente trabalho foram doados gentilmente pela empresa Lyondell Basell da cidade de Pindamonhangaba-SP. O polímero polipropileno na forma de grânulos é virgem e compatível com as propriedades atuais em uso na indústria automobilística, enquanto as características e propriedades do talco são apresentadas de acordo com a sua ficha técnica na Tabela 2.

Tabela 2- Ficha técnica do talco utilizado no estudo.

Marca	TALMAG-GM-5L		
Código da Marca	8406 CAS TALC (14807-96-6).		
Descrição do produto	Mineral natural em pó, branco, inodoro e insípido. Sem químicos, insolúvel e inerte. A fórmula estrutural do mineral é $Mg_3(Si_2O_5)_2(OH)_2$ ou $3MgO.4SiO_2.H_2O$, correspondente à composição estrutural química teórica de $MgO = 31,7\%$, $SiO_2 = 63,5\%$ e $H_2O = 4,8\%$		
Aplicações principais	Talco industrial para uso em plástico e tinta		
Composição químicas (%)			
SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
63,0	30,5	0,81	0,31
≥55,0	≥ 29,0	≤ 1,5	≤ 0,5
Propriedade Físicas			
	Especificação	Unidade	
Brancura FMY	≥ 94,0	%	
Densidade aparente solta	≤ 0,13	g/cm ³	
Peso por volume	0,50/0,70	g/cm ³	
Umidade	≤ 0,5	%	
Perda ao fogo	4,75/8,00	%	
Sedigraph D98	≤ 0,5	Mm	
Sedigraph D75	≤ 2,1	Mm	
Sedigraph D50	≤ 1,2	Mm	
Sedigraph D25	≤ 0,7	Mm	
Sedigraph D10	≤ 0,5	Mm	
Propriedades específicas			
	Descrição		
Índice de refração	1,588		
Análise mineralógica qualitativa DRX	Talco, Quartzo, Magnesita, Clorita		
Asbestos	Ausentes		
Área superficial BET	≤ 1,1		
Fe solúvel em H ₂ O	Ausente		

Fonte: BIOVITAL, 2021

4.2 Processamento dos compósitos

Na primeira etapa do estudo foram preparados os compósitos PP/talco por meio de extrusão em um equipamento extrusora rosca dupla COPERION ZSK-NT instalado nas dependências da empresa Lyondell Basell da cidade de Pindamonhangaba-SP. Foram preparados compósitos com teores de talco em 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 e 40 % em massa. Uma amostra do polipropileno virgem também foi processada nas mesmas condições para efeito de comparação contendo todos aditivos presentes nas demais composições que incluem antioxidantes, estabilizante absorvedor de luz UV, auxiliar de fluxo, pigmentos e negro de fumo em baixas proporções, conforme preconização do fornecedor.

Os compósitos obtidos por extrusão na forma de grânulos foram então submetidos ao processo de moldagem por injeção para a preparação de corpos de prova de tração e impacto de acordo com as normas técnicas ASTM D-638 e ASTM D-256 em uma injetora SPAZIO modelo Diplomat DW-130, instalada no Departamento de Engenharia de Materiais da EEL/USP, sob pressão de injeção e de recalque de 100 e 90 Bar, respectivamente. As temperaturas utilizadas foram ajustadas para 170, 190, 210 e 220 °C da alimentação para o bico de injeção. A Figura 8 apresenta uma imagem do equipamento utilizado.

Figura 8- Injetora de termoplásticos utilizada para confecção de corpos de prova.

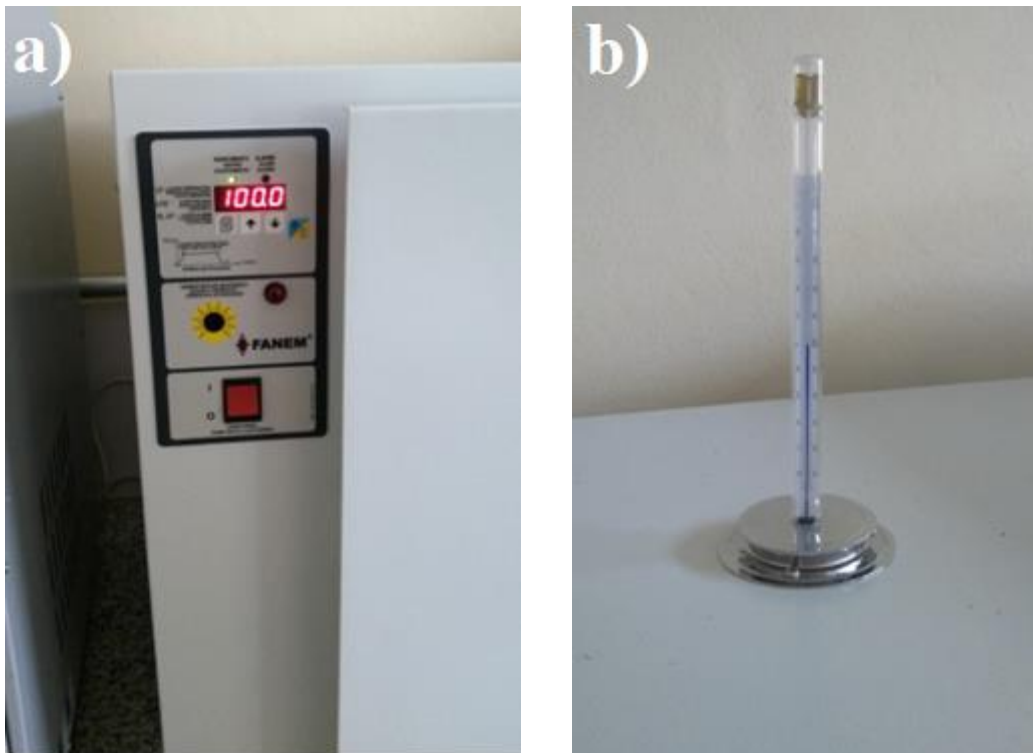


Fonte: Própria do autor

4.3 Ensaio de envelhecimento térmico

Os ensaios de envelhecimento térmico foram conduzidos em uma estufa com circulação forçada de ar da marca Fanem, modelo 520/2-C, instalada no Departamento de Engenharia de Materiais da EEL/USP e exclusiva para este tipo de ensaio de envelhecimento acelerado, seguindo recomendações da norma técnica ASTM E2550. Neste ensaio os corpos de prova de tração foram submetidos a uma temperatura constante de 100 °C e conjuntos de amostras foram coletados em tempos distintos de envelhecimento para o acompanhamento de suas propriedades. Imagens do equipamento em funcionamento são apresentadas na Figura 9.

Figura 9- Equipamento utilizado para envelhecimento térmico: a) painel de controle e b) termômetro de bulbo instalado no topo do equipamento.



Fonte: Própria do autor

4.4 Ensaio de tração

Os ensaios de tração dos materiais foram conduzidos no Departamento de Engenharia de Materiais da EEL/USP em uma máquina universal de análises da marca EMIC, modelo DL-3000 com célula de carga de 5 kN, empregando a norma ASTM D-638 para padronização das condições de ensaio. A velocidade do ensaio foi estipulada em 20 mm/min para todas as amostras. Neste ensaio, 6 amostras foram submetidas a tração.

4.5 Ensaio de impacto

Os ensaios mecânicos de impacto foram realizados no Departamento de Engenharia de Materiais da EEL/USP em um equipamento XJU-22 Beam Impact Tester, seguindo as recomendações da norma técnica ASTM D256 em temperatura ambiente pelo método Izod com o uso de um martelo de 2,75 Joules. Para os ensaios, os corpos de prova foram entalhados, empregando um dispositivo (entalhadeira) acessório ao equipamento.

4.6 Análise dinâmico-mecânica (DMA)

As análises de DMA foram realizadas no Departamento de Engenharia de Materiais da EEL/USP em um equipamento da marca NETZSCH, modelo DMA 242 E Ertemis. Os ensaios foram realizados empregando o acessório dual cantilever bending com corpos de prova com dimensões de 50 x 10 x 3,2 mm recortados e usinados a partir de corpos de prova de flexão preparados por moldagem por injeção. As condições de análises empregadas foram de aquecimento de -150 a 200 °C com taxa de aquecimento de 2 °C/min, sob deformação oscilatória de 10 µm, em frequência de 1 Hz e força de 4 kN.

4.7 Índice de fluidez

As medidas de índice de fluidez foram realizadas no Departamento de Engenharia de Materiais da EEL/USP em um plastômetro de extrusão da marca CEAST modelo 702100, utilizando carga de 2,16 kg e temperatura de 230 °C, seguindo os procedimentos estipulados pela norma técnica ASTM D1238. Para a realização dos ensaios o material foi previamente triturado e seco. O índice de fluidez foi obtido a partir da média aritmética de 15 corpos de prova para cada amostra.

4.8 Análise termogravimétrica (TGA)

As análises de TGA foram realizadas no Departamento de Engenharia de Materiais da EEL/USP em um equipamento marca NETZSCH modelo STA 449 F3 Júpiter, em uma faixa de temperatura de 30 a 900 °C com taxa de aquecimento de

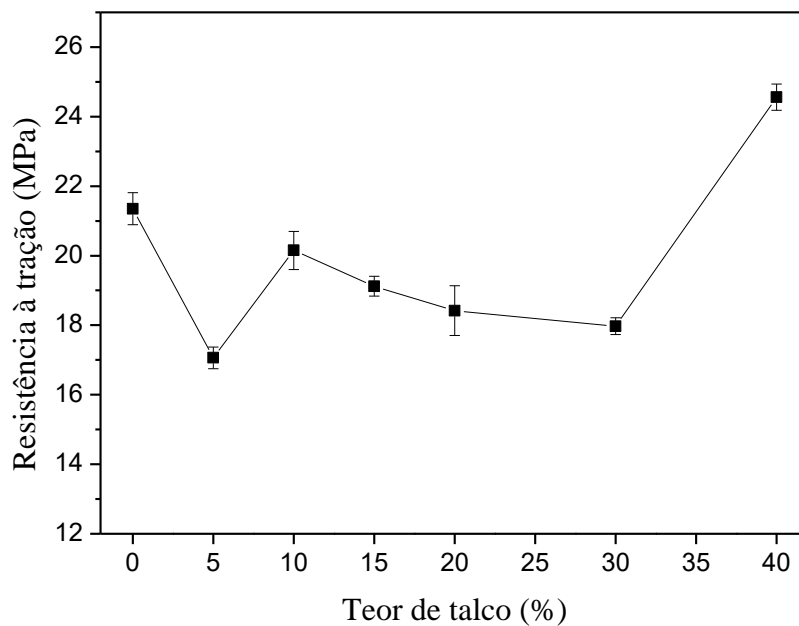
10°C/min em atmosfera inerte de nitrogênio com fluxo de 100 mL/min. Os pellets extrudados foram cortados de forma a terem geometria e massas similares, empregando de 12 a 13 mg de amostra.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Ensaio de tração

Dentre as propriedades mecânicas que podem ser obtidas a partir dos ensaios de tração, a resistência à tração, o módulo de Young e o alongamento são de interesse particular tanto para caracterizar o efeito do teor de talco no polímero como a ação do envelhecimento sobre o material ao longo do tempo. As curvas tensão x deformação dos corpos de prova para cada composição PP/talco são apresentadas na seção Anexos. A Figura 10 apresenta o comportamento da resistência à tração para os compósitos PP/talco em função do teor em massa de talco no material.

Figura 10- Resistência à tração dos compósitos PP/talco.



Fonte: Própria do autor

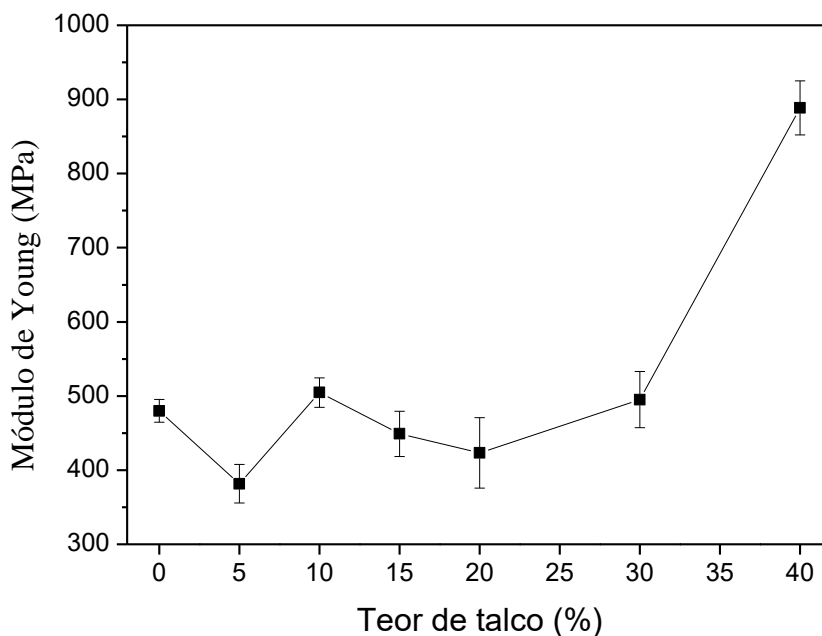
O PP sem a presença de talco apresentou resistência à tração de 21 MPa. Entretanto, com a adição de 5% de talco ocorreu uma variação considerável nos valores de resistência à tração nos corpos de prova entre 8 a 22 MPa, afetando diretamente o desvio padrão da medida. Esta variação pode ser devido a falta de homogeneidade do material. Para os compósitos com conteúdo de talco acima de 10% em massa, a redução de resistência à tração aconteceu progressivamente até o teor de 30%, de 20 MPa até 18,5 MPa. Entretanto, com a incorporação de 40 % em massa de talco a resistência à

tração aumentou significativamente até 25 MPa, mostrando que não houve tendência definida entre o teor de talco no compósito com a resistência à tração do material.

A Figura 11 apresenta o comportamento do módulo de Young para os compósitos PP/talco em função do teor em massa de talco no material. Observa-se que o módulo de Young, que representa a rigidez do material, sofre influência do teor de talco no material. Assim como foi identificado na propriedade de resistência à tração, também no módulo de Young com 5% de talco verifica-se um comportamento de queda. Por outro lado, ocorre flutuações pouco significativas de propriedade para os compósitos com até 30% em massa de talco, permanecendo em torno de 500 Mpa. Para o PP de 10% até 30% de talco, a é redução progressiva de 20 MPa até 18,5 MPa. E para o PP com 40 % há um aumento até 25 MPa, mostrando que não há tendência definida.

Novamente a mudança mais significativa ocorre com a incorporação de 40% em massa de talco no PP, promovendo um aumento no módulo de Young que atinge 900 MPa, o que representa 48% de aumento com relação ao PP isolado.

Figura 11- Módulo de Young dos compósitos PP/talco.

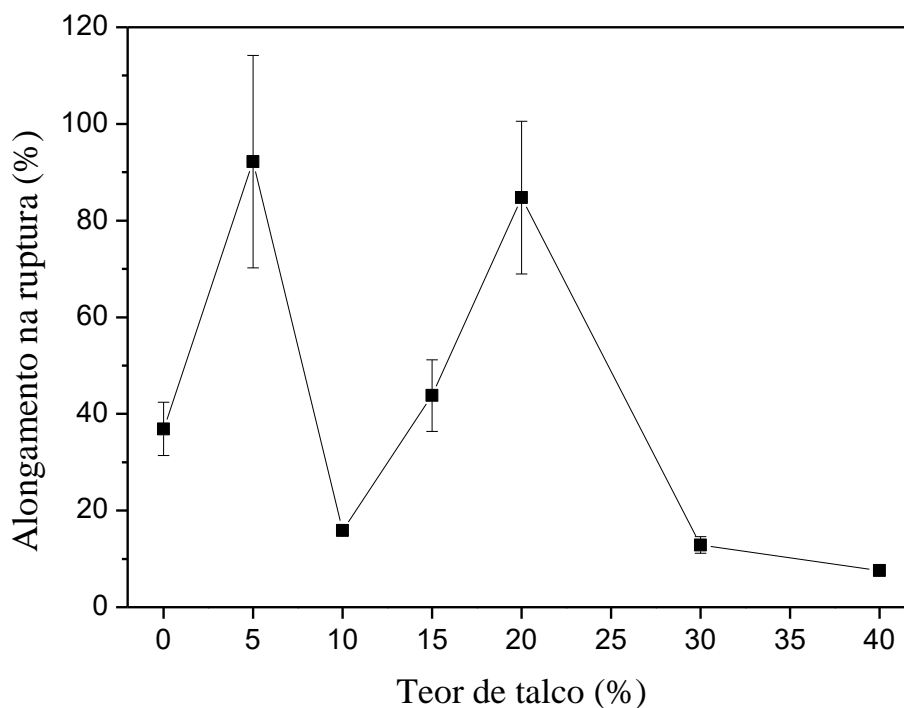


Fonte: Própria do autor

As flutuações nos valores de resistência à tração e módulo de Young nos compósitos em função do teor de talco no material podem denotar a existência de efeitos competitivos na matriz polimérica provocados pela carga. O talco é conhecido por provocar efeitos de plastificação na matriz polimérica devido a sua estrutura “t-o-t” (WAH *et al.*, 2000). Por outro lado, o aumento de rigidez característico de polímeros com a incorporação de cargas minerais também deve ser considerado (MTTLA, *et al.*, 2019).

A Figura 12 apresenta o comportamento do alongamento na ruptura para os compósitos PP/talco em função do teor em massa de talco no material.

Figura 12- Alongamento na ruptura dos compósitos PP/talco.



Fonte: Própria do autor

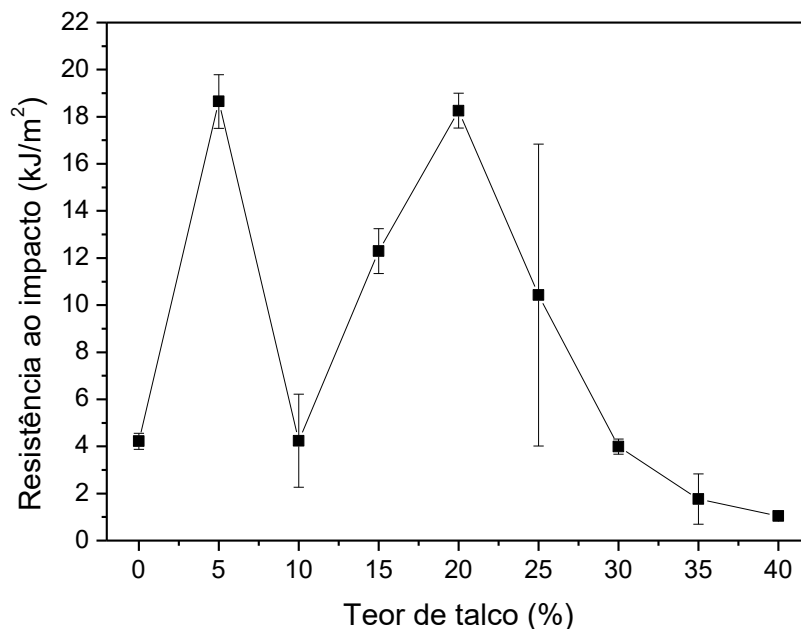
Nota-se que o alongamento na ruptura, ou seja, o quanto o material se deforma em função da força de tração imposta sobre o material até o ponto de sua ruptura apresenta um comportamento bastante peculiar. O alongamento na ruptura do PP isolado é em torno de 40% e este valor flutua entre 20 e 80% para composições com até

20% de talco. Somente com teores de 30 e 40% de talco o alongamento reduz de forma definitiva até atingir valores próximos a 10%, ou seja, redução de aproximadamente de 30% quando comparado com o PP puro. O aumento do teor de carga nos compósitos naturalmente deveria reduzir a tenacidade do material e conseqüentemente seu alongamento na ruptura, como verificado para altos teores de talco no PP. Entretanto, o aumento do alongamento para algumas composições com teores de talco em até 20 % em massa sugere que esta carga também pode ter uma ação como plastificante no material (WAH *et al.*, 2000).

5.2 Ensaio de Impacto

A resistência ao impacto é outra propriedade de grande importância para a aplicação dos polímeros na indústria automotiva, uma vez o material deve suportar impactos durante a movimentação do veículo ou durante operações de manutenção sem haver a fratura nas peças. A Figura 13 apresenta o comportamento de resistência ao impacto dos compósitos PP/talco em função do teor em massa de talco no material.

Figura 13- Resistência ao impacto dos compósitos PP/talco.



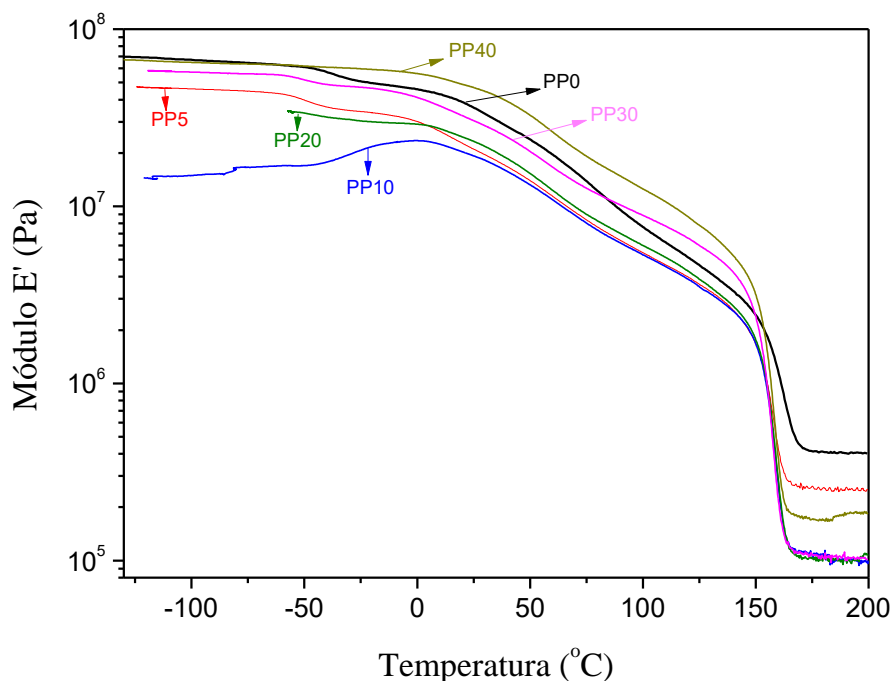
Fonte: Própria do autor

Nota-se que para o PP sem a presença de talco, os valores de resistência ao impacto encontram-se em torno de 4 kJ/m^2 . Entretanto, nos compósitos com teor de talco acima 30% a resistência ao impacto diminui progressivamente. Portanto, a incorporação de talco em teores elevados no PP conduz à depreciação desta propriedade. Nos compósitos com teores de talco entre 5 e 25 ocorre uma variação significativa dos resultados, assumindo um comportamento muito parecido ao observado na propriedade de alongamento na ruptura (Figura 12), de modo que o compósito com 10 % em massa de talco apresenta resistência ao impacto similar ao do PP sem carga, enquanto os compósitos com 5, 15, 20 e 25% de talco mostraram valores de resistência ao impacto superiores ao do PP isolado. Compósitos contendo 5 e 20% de talco atingiram valores aproximadamente 5 vezes maiores ao do PP isolado. A correlação entre os resultados de alongamento na ruptura e resistência ao impacto denota que as modificações na capacidade de deformação plástica do material são acompanhadas também por um aumento na capacidade do material de absorver impactos.

5.3 Análise dinâmico-mecânica (DMA)

Na análise de DMA o material polimérico é submetido a uma deformação oscilatória sob amplitude, força e frequência controladas em um intervalo de temperatura estabelecido. Desta forma, é possível avaliar relaxações térmicas e o comportamento viscoelástico do polímero a partir de propriedades com o módulo de armazenamento (E'), módulo de perda (E'') e fator de perda ($\tan\delta$) em função do aquecimento do material. A Figura 14 apresenta o comportamento do módulo de armazenamento dos compósitos PP/talco contendo diferentes teores de carga.

Figura 14- Módulo de armazenamento para os compósitos PP/talco.



Fonte: Própria do autor

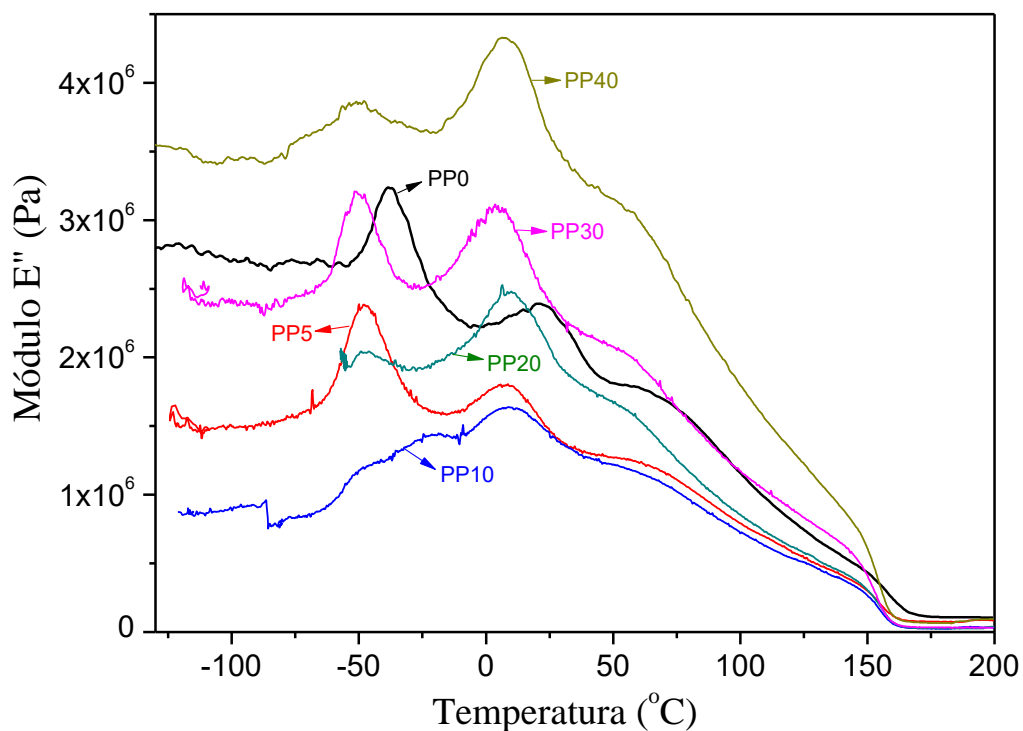
O polipropileno sem a presença de talco (PP0), representado pela curva em preto na Figura 14, possui módulo E' será próximo de 10^8 MPa em baixas temperaturas. Nota-se que em torno de -35 °C ocorre uma inflexão nesta curva para valores menores de E' , que é atribuída à relaxação referente à transição vítrea do polímero. O aquecimento a partir desta temperatura conduz a uma progressiva redução do módulo E' . Entretanto, após 150 °C verifica-se uma diminuição abrupta do módulo E' , que se refere à fusão do polímero.

No compósito com 5% em massa de talco (PP5) nota-se uma redução nos valores do módulo E' desde baixas temperaturas até a fusão do polímero. Este efeito é ainda mais significativo para o compósito com 10% em massa de talco (PP10), que apresenta módulo E' em baixas temperaturas próximos a 10^7 MPa. A redução do módulo E' denota uma ação de plastificação do talco sobre o polipropileno. Coincidentemente, as mudanças no módulo E' verificadas de forma mais significativa no compósito PP10 correspondem a valores das propriedades mecânicas de tração e impacto observadas também para este material (Figuras 10 a 14).

Com o aumento do teor de talco nos compósitos a partir de 10% em massa, os valores de módulo E' também progressivamente aumentam até assumirem valores superiores ao do polipropileno sem carga (PP0) quando o teor de talco no compósito atinge 40% em massa (PP40). Novamente nota-se uma correspondência deste resultado com as propriedades mecânicas de tração e impacto, uma vez que o compósito PP40 apresentou os valores mais expressivos de resistência à tração (Figura 10) e módulo de Young (Figura 11), bem como os menores valores para alongamento na ruptura (Figura 12) e resistência ao impacto (Figura 13). Assim, verifica-se a existência de uma correlação direta do comportamento viscoelástico dos materiais com suas propriedades mecânicas.

Na Figura 15 são apresentadas as curvas de módulo de perda (E'') para os compósitos PP/talco contendo diferentes teores de carga.

Figura 15- Módulo de perda para os compósitos PP/talco.



Fonte: Própria do autor

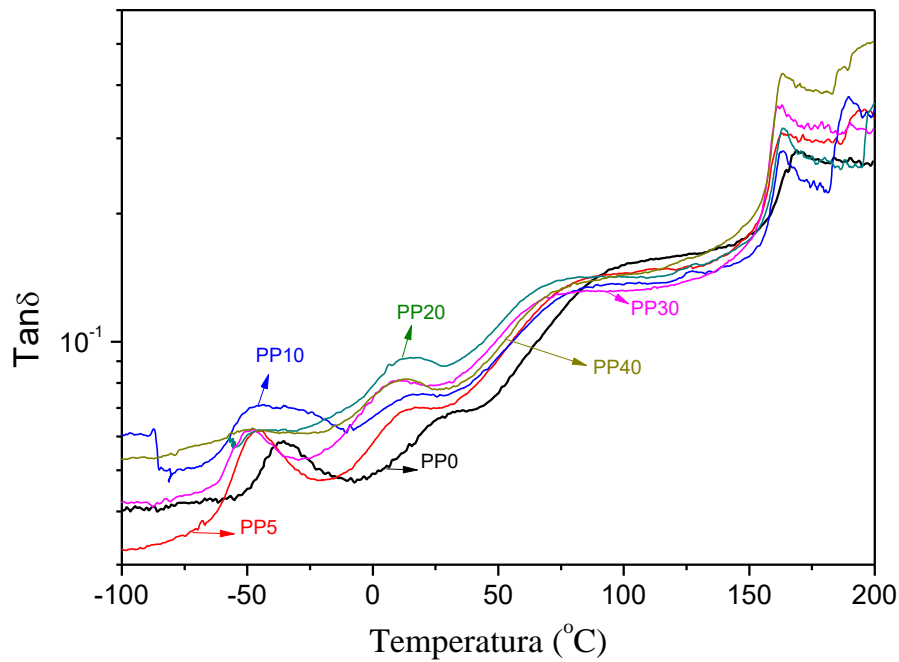
Nota-se que para o PP sem a presença de talco são observadas duas relaxações evidentes em temperaturas em torno de -37 $^{\circ}\text{C}$ e 25 $^{\circ}\text{C}$. Tais relaxações são atribuídas a transições α_a primária e β_a secundária da fase amorfa que correspondem à transição vítrea (T_g) e à movimentação do grupo metila lateral à cadeia do polipropileno,

respectivamente (MENARD, 1999). Com a presença de talco em 5% em massa no polímero (PP5), ambas relaxações se deslocam para temperaturas mais baixas, enquanto que a incorporação de 10% em massa de talco no polímero leva a um alargamento da faixa de temperatura em que tais relaxações ocorrem, de modo que os respectivos sinais se tornam convoluídos. A diminuição da temperatura de transição vítrea do polímero é devido ao aumento de grau de liberdade das cadeias poliméricas no estado amorfo por mudança de interação intermolecular e reforça a afirmação sobre a ação plastificante do talco no PP.

Nos compósitos com teores de talco acima de 10% em massa, verifica-se um aumento relativo do sinal da relaxação do grupo metila em comparação ao referente à transição vítrea, tornando-se significativamente no compósito com 40% em massa de talco. Este efeito pode ser estar intimamente ligado às mudanças de propriedades mecânicas verificadas para os compósitos com teores mais elevados de talco.

Na Figura 16 são apresentadas as curvas de fator de perda ($\tan\delta$) para os compósitos PP/talco contendo diferentes teores de carga. O $\tan\delta$ é uma razão direta entre os módulos E'' e E' e permite analisar com maior precisão as diferentes relaxações que ocorrem no material.

Figura 16- Fator de perda para os compósitos PP/talco.



Fonte: Própria do autor

Verifica-se que além das relaxações atribuídas à fase amorfa em torno de $-37\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, também são verificadas duas outras relaxações em temperaturas em torno de $95\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $160\text{ }^{\circ}\text{C}$, as quais podem ser atribuídas a relaxações α'_c secundária e α_c primária da fase cristalina e correspondem à movimentos de cadeias dos cristais que constituem fases metaestáveis e fusão do polímero, respectivamente (DALPIAZ, 2006). Os valores de temperaturas referentes às diferentes transições dos compósitos são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3- Temperaturas das relaxações dos compósitos obtidas a partir do fator de perda.

Material	Relaxação α_a ($^{\circ}\text{C}$)	Relaxação β_a ($^{\circ}\text{C}$)	Relaxação α'_c ($^{\circ}\text{C}$)	Relaxação α_c ($^{\circ}\text{C}$)
PP0	-37	25	95	164
PP5	-46	13	87	164
PP10	-40	15	78	163
PP20	-50	15	71	164
PP30	-48	10	74	163
PP40	-50	12	78	163

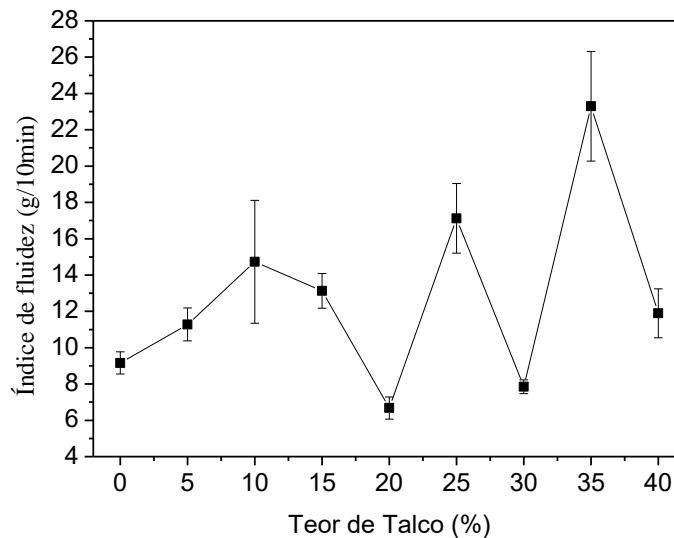
Fonte: Própria do autor

Na análise de DMA, a amostra é submetida a uma tensão periódica em um dos vários modos diferentes de deformação. O módulo, como uma função de tempo ou de temperatura, é medido e fornece informações sobre as transições de fase. A partir dos valores de temperatura das relaxações, nota-se que a presença de talco como carga no PP leva à diminuição das temperaturas relativas às transições vítrea (α), do grupo lateral metila (β a) e de fases cristalinas metaestáveis (α' c). Entretanto, não é verificada uma relação entre a intensidade de redução das temperaturas com o teor de talco nos compósitos. Por outro lado, a presença de talco no PP não afeta a temperatura de fusão do polímero que corresponde à transição α c.

5.4 Índice de Fluidiez

O índice de fluidez é uma medida do fluxo do material no estado fundido e fornece um parâmetro de referência para ajustes das condições de processamento termomecânico dos polímeros em operações como moldagem por extrusão e injeção durante a confecção de peças na linha de produção. O índice de fluidez é também uma medida importante que permite compreender os efeitos de alterações na estrutura polimérica ou da ação de cargas e aditivos sobre as propriedades reológicas do polímero (MORENO; SARON, 2019). Normalmente espera-se que com o aumento do teor de carga mineral no material, como o talco, haja uma redução do índice de fluidez e consequentemente uma maior dificuldade para o processamento termomecânico do material que pode levar à necessidade de ajuste em condições de operação dos equipamentos como aumento de temperatura de moldagem e de pressões de injeção e recalque (ROCHA *et al.*, 1994). A Figura 17 apresenta o comportamento do índice dos compósitos PP/talco em função de teor de talco nas composições.

Figura 17- Índice de fluidez dos compósitos PP/talco.



Fonte: Própria do autor

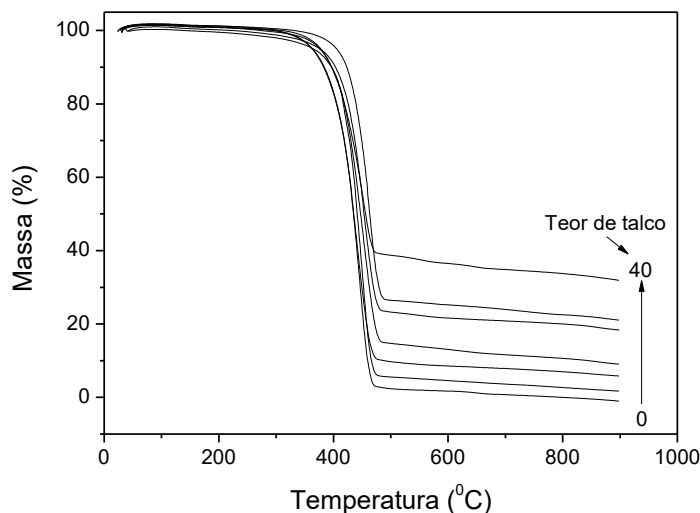
Observa-se que o polipropileno sem a presença de talco (PP0) apresenta inicialmente um índice de fluidez de 9 g/10min. e a incorporação de talco em até 15% em massa no material causa um aumento no índice de fluidez que atinge valores em torno de 15 g/10min. Este comportamento denota um efeito de plastificação do talco sobre a matriz de PP, conforme apontado pelos resultados dos ensaios mecânicos de tração e de análise dinâmico-mecânica. Em termos de processamento do material, este efeito representa vantagens, uma vez que o aumento da capacidade de fluxo deve-se traduzir em maior facilidade de processamento do material, bem como em economia de energia devido ao uso de condições mais brandas de processamento.

Com 20% em massa de talco no PP, o índice de fluidez diminui para um valor próximo a 6 g/10min e mostra um comportamento oscilatório com ao aumento do teor de talco nos compósitos entre valores que atingem um máximo de 24 g/10min. para o compósito contendo talco em 35% em massa. Este comportamento mostra uma possível concorrência entre efeitos provocados pelo talco no material como a plastificação e a restrição de volume livre característica de cargas particuladas.

5.5 Análise termogravimétrica (TGA)

A Figura 18 apresenta as curvas de TGA para os compósitos PP/talco em função do teor em massa de talco no material.

Figura 18- Curvas de TGA dos compósitos PP/talco.



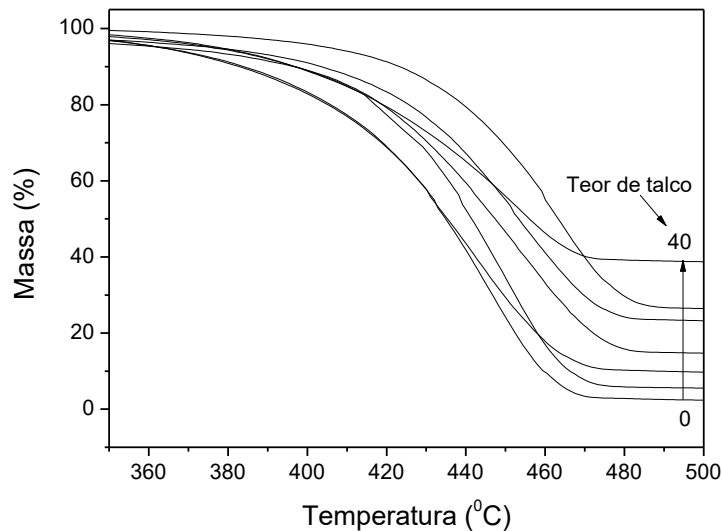
Fonte: Própria do autor

A partir da análise termogravimétrica é possível avaliar a decomposição térmica dos materiais em função do conteúdo de talco presente em sua composição. Observa-se que conforme aumenta-se o teor de talco, tem-se uma quantidade maior de resíduo ao final do ensaio. Isto se deve ao fato de que a carga mineral não se decompõe na escala de temperatura utilizada para o ensaio, de modo que a perda de massa se deve somente à decomposição da matriz polimérica. Para cada amostra, a massa residual é coerente com o teor de talco utilizado em sua composição. Assim, conclui-se que a preparação das amostras foi criteriosa em termos de dosagem da carga nos compósitos e também da distribuição desta na matriz polimérica, uma vez que para a análise de TGA somente uma pequena porção de amostra é utilizada.

Nota-se ainda que há deslocamentos nas curvas de TGA dos materiais na região em que ocorre a única etapa de perda de massa relativa à decomposição térmica da matriz de PP. Este efeito pode ser visualizado com maiores detalhes na Figura 19 que

apresenta as curvas de TGA para os compósitos PP/talco em função do teor em massa de talco no material com detalhes da região de decomposição térmica dos materiais.

Figura 19- Curvas de TGA dos compósitos PP/talco da região de decomposição térmica.



Fonte: Própria do autor

De modo geral, o aumento do teor de talco nos compósitos leva a um deslocamento da curva de decomposição para temperaturas mais altas, aumentando a estabilidade térmica do material. Isto pode ser uma consequência da própria absorção de calor pela carga que acaba por competir com a energia necessária para a decomposição do polímero. Por outro lado, esta tendência não se consolida para o compósito com 40% em massa de talco. Neste caso, a decomposição relativa à matriz de PP ocorre em um perfil de temperatura intermediário às das demais composições. Deste modo, pode-se sugerir que a presença de talco no PP também influencia no comportamento de degradação térmica do material conforme faixa de temperatura demonstrado na tabela 3 do ensaio de DMA.

5.6 Envelhecimento térmico acelerado

A avaliação do comportamento das propriedades do material durante o envelhecimento acelerado é a forma mais adequada para prever o desempenho dos polímeros em condições reais de aplicação, uma vez que condições específicas que

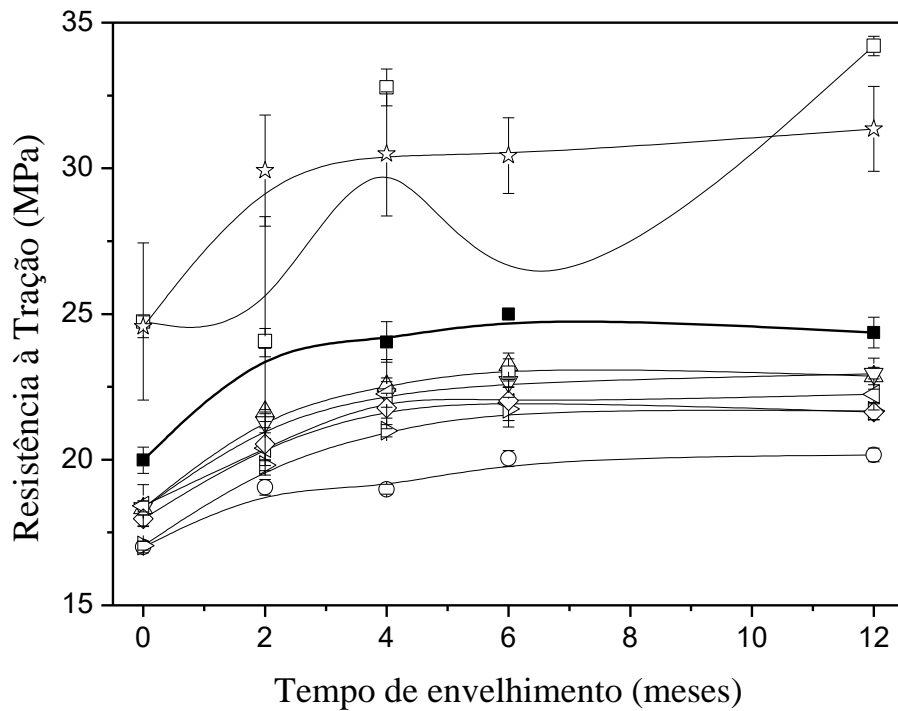
levam à degradação dos polímeros podem ser oferecidas ao material em maior intensidade em tempos suficientes para a análise. No caso específico do presente estudo, o propósito foi avaliar os efeitos do teor de talco na degradação do PP quando aplicado em compartimentos de veículos automotores que em condições de uso encontram-se em temperaturas acima da ambiente. Assim, os compósitos foram submetidos ao envelhecimento térmico a 100 °C, sendo esta temperatura acima das condições normais de aplicação e suficientemente abaixo da temperatura de fusão do polímero (160 °C), de modo a evitar deformações físicas nos corpos de prova das amostras em função de efeitos de escoamento viscoso.

A Figura 20 apresenta o comportamento da propriedade de resistência à tração dos compósitos PP/talco com diferentes teores de talco em função do tempo de envelhecimento térmico acelerado.

Nota-se que o PP sem a presença de carga possui resistência à tração antes do envelhecimento em torno de 20 MPa e os compósitos com até 30% em massa de talco apresentam resistência à tração abaixo deste valor. Somente os compósitos com 35% e 40 % em massa de talco apresentam resistência à tração superior em torno de 25 MPa.

O comportamento da resistência à tração é similar para todos os compósitos em função do tempo de envelhecimento, ocorrendo um ligeiro aumento com até 2 meses de envelhecimento e mantendo valores praticamente constantes até o término do ensaio em 12 meses de envelhecimento. Alguma variação no perfil da curva de envelhecimento somente pode ser verificada para o compósito contendo 35% em massa de PP (PP35). O aumento de resistência à tração na fase inicial de envelhecimento pode ser atribuído à relaxação de tensões acumuladas no material devido às condições de moldagem por injeção a que foi submetido para a confecção dos corpos de prova (SARON et al., 2007). Por outro lado, a manutenção dos valores de resistência à tração dos compósitos em tempos elevados de envelhecimentos, independentemente do teor de talco, mostra que o polipropileno é bastante estável às condições térmicas em que foi submetido e que o talco não causa influência na estabilidade do polímero frente à degradação térmica.

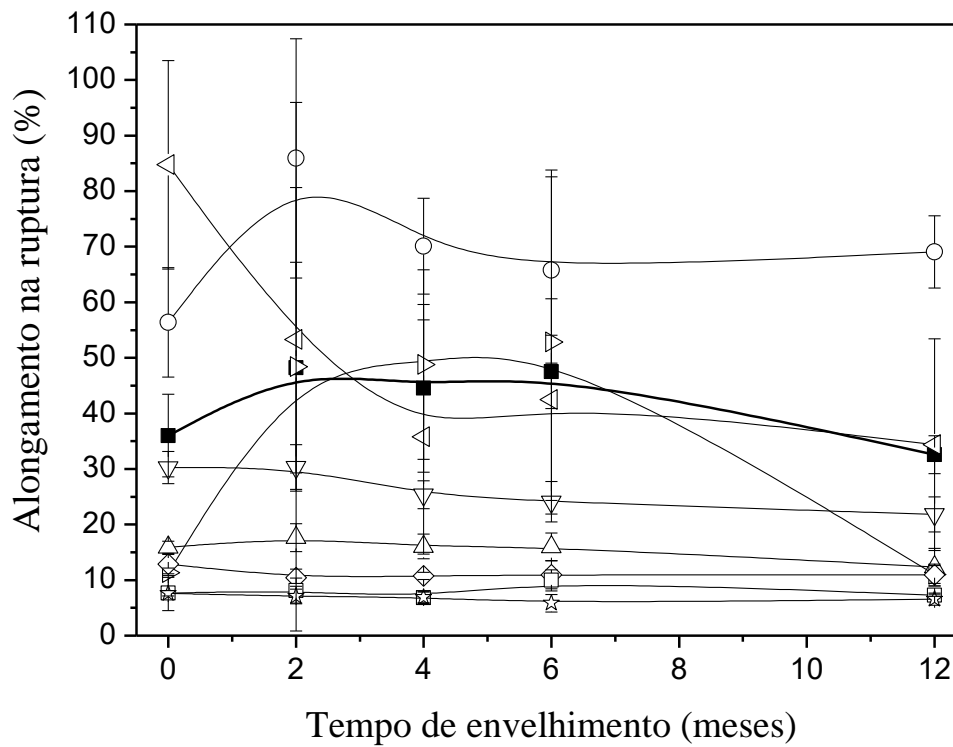
Figura 20- Resistência à tração para os compósitos PP/talco em função do tempo de envelhecimento: PP0 (-■-); PP5 (-○-); PP10 (-△-); PP15 (-▽-); PP20 (-◁-); PP25 (-▷-); PP30 (-◇-); PP35 (-□-) e PP40 (-☆-).



Fonte: Própria do autor

Na Figura 21 são apresentados os resultados de alongamento na ruptura dos compósitos PP/talco em função do tempo de envelhecimento térmico. O alongamento na ruptura é uma das propriedades mecânicas mais sensíveis aos efeitos da degradação dos polímeros, sofrendo normalmente reduções drásticas de valores à medida que o processo se desenvolve no material (SARON *et al.*, 2006). Com exceção dos compósitos PP20 e PP25, que apresentaram comportamento discrepante, todos os demais compósitos não mostraram variação de alongamento na ruptura em função do envelhecimento térmico em até 12 meses de exposição. Isto salienta a proposição de que nas condições de envelhecimento empregadas, o polipropileno não sofre ações consideráveis de degradação térmica, assim como o talco, independente do teor, não afeta a estabilidade do polímero frente à degradação.

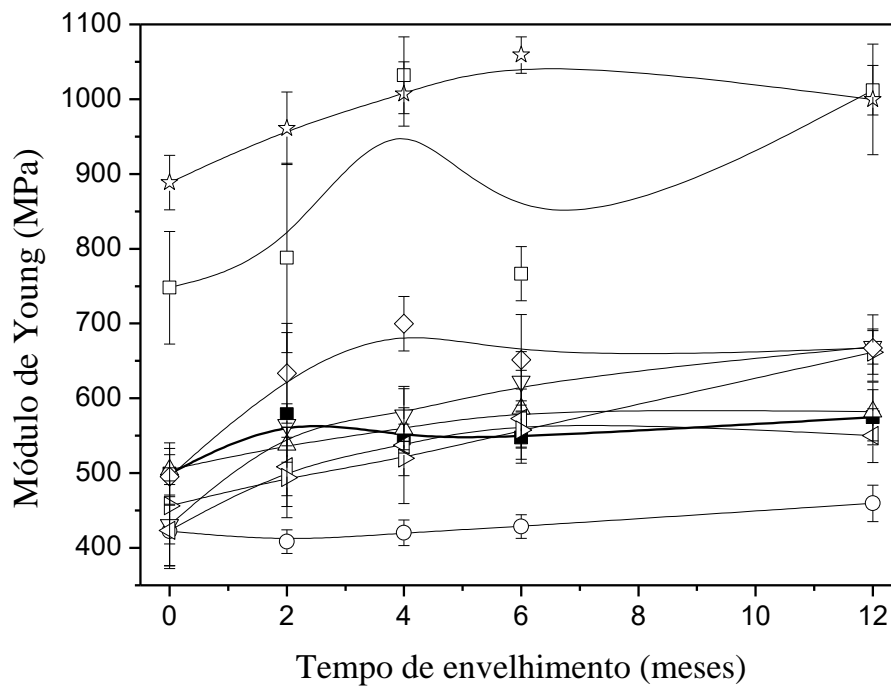
Figura 21- Alongamento na ruptura para os compósitos PP/talco em função do tempo de envelhecimento: PP0 (-■-); PP5 (-○-); PP10 (-△-); PP15 (-▽-); PP20 (-◁-); PP25 (-▷-); PP30 (-◇-); PP35 (-□-) e PP40 (-☆-).



Fonte: Própria do autor

Na Figura 22 são apresentados os resultados de módulo de Young dos compósitos PP/talco em função do tempo de envelhecimento térmico.

Figura 22- Módulo de Young para os compósitos PP/talco em função do tempo de envelhecimento: PP0 (-■-); PP5 (-○-); PP10 (-△-); PP15 (-▽-); PP20 (-◁-); PP25 (-▷-); PP30 (-◇-); PP35 (-□-) e PP40 (-☆-).



Fonte: Própria do autor

No geral, uma discreta tendência de aumento no módulo de Young pode ser verificada nos compósitos PP/talco em função do aumento do tempo de envelhecimento, a qual se torna ainda menos relevante quando o desvio padrão das medidas é considerado. Este aumento na rigidez do material deve estar relacionado com o mesmo efeito de relaxação de tensões devido à ação de aquecimento do material e que causa aumento na resistência à tração dos compósitos (Figura 16). Novamente é possível afirmar que o talco não afeta a estabilidade do polipropileno frente à degradação térmica no intervalo de tempo de 1 ano em que o experimento foi conduzido. De forma que, teores elevados de talco de 30 e 40% em massa no material podem conduzir a aumento desejável de rigidez e resistência à tração no compósito e redução de custo da matéria-prima, sem comprometer o seu desempenho frente à degradação térmica.

6. CONCLUSÕES

Este trabalho proporcionou a compreensão da problemática inicial deste estudo. Desta forma, é possível dizer que o compósito de polipropileno com 40% em massa de talco na composição, avaliado neste estudo, não se degradou em função da temperatura do habitáculo motor ou do farol, e as perdas de desempenho das peças se devem pela insuficiência do talco na composição, abaixo de 40% em massa.

A presença do mineral talco em compósitos com o polímero polipropileno provoca mudanças nas propriedades do material. Não há uma tendência clara nas propriedades mecânicas obtidas por ensaios de tração e impacto quando o talco está presente em teores de até 20% em massa nos compósitos. Entretanto, uma ação reforçante, denotada por aumento da resistência à tração, acompanhada por um aumento considerado de rigidez do material, redução de alongamento na ruptura e diminuição de resistência ao impacto, é verificada quando o talco está presente em concentrações acima de 30% em massa nos compósitos.

O comportamento das propriedades mecânicas dos compósitos PP/talco pode ser atribuído a efeitos competitivos de plastificação e restrição de movimentação molecular que a carga provoca na matriz polimérica em função da concentração no compósito, de modo que em baixas concentrações de talco, o efeito de plastificação da matriz é mais relevante, enquanto nos compósitos com teores elevados de talco deve predominar a restrição de movimentação das cadeias poliméricas em decorrência da diminuição de volume livre no material. O efeito de plastificação do talco sobre a matriz de polipropileno pode ser constatado pela diminuição nas temperaturas de relaxações do polímero relacionadas às fases amorfa e cristalina, bem com ao aumento do índice de fluidez dos compósitos com baixos teores de carga.

O aumento do teor de talco melhora a estabilidade do polímero frente à decomposição térmica. Por outro lado, não se verifica mudanças na estabilidade térmica em longo prazo sob temperaturas de até 100 °C durante o intervalo de tempo de 1 ano. Desta forma, é possível utilizar compósitos PP/talco na indústria automotiva com teores de até 40% em massa de talco na composição, de modo a atender especificações de propriedades, condições adequadas de processabilidade e redução de custos com

matéria-prima sem comprometer o desempenho de estabilidade do material frente à degradação térmica em longo prazo.

Este estudo, além de compreender as particularidades de uma problemática da indústria automotiva, também indica outras oportunidades que poderão ser desenvolvidas no futuro em dissertações de mestrado ou teses doutorado, como por exemplo. A oportunidade de utilização de maior porcentagem da carga mineral talco em compósitos PP/talco e o entendimento de seu comportamento mecânico e térmico são algumas das vertentes que podem ser exploradas.

REFERÊNCIAS

ABBAS, G.; BEHZADFAR, E.; ARJMAND, M. Properties of talc filled reactor-made thermoplastic polyolefin composites. **Journal of Polymer Research**. v. 26, p. 241-248, 2019.

ABIPLAST, Indústria brasileira de transformação de material plástico. Perfil 2015. 2016. Disponível em: http://file.abiplast.org.br/download/2016/perfil_2015.pdf. Acesso em: 10 Jan 2017.

ASTM D 1238: Standard Test Method for Melt Flow Rates of Thermoplastics by Extrusion Plastometer. United States, 2013.

ASTM D 256: Standard test methods for determining the Izod pendulum impact resistance of plastics. United States, 2013.

ASTM D 638: Standard test method for tensile properties of plastics. United States, 2014.

ASTM E2550: Standard Test Method for Thermal Stability by Thermogravimetry. United States, 2011.

BIOVITAL. **Catálogo técnico Talco Talmag**. Disponível em: <https://www.biovital.ind.br/doutor/uploads/2/downloads/2021/01/download-talco-talmag-1c0ebf9eda.pdf>. Acesso em: 27 out. 2021.

BOUAKKAZ, A. O.; ALBEDAH, A.; BOUIADJRA, B. B.; KHAN, S. M. A.; BENYAHIA, F.; ELMEGUENNI, M. Effect of temperature on the mechanical properties of polypropylene–talc composites. **Journal of Thermoplastic Composites**. v. 31, n.7 , p. 896-912, 2018.

BOUIADJARA, B. A. B.; ALDEBAH, A.; BOUZIANE, M. M.; BOUAKKAZ, A. O.; BENYAHIA, F.; MOHAMED, D. M. A. K. **Journal of Fail Analytical and Prevention**. v. 18, p. 1111-1119, 2018.

CARVALHO, E. A., ALMEIDA, S. L. M. **Caulim e carbonato de cálcio: competição na indústria de papel**. Rio de Janeiro: CETEM/CNPq, 1997. n. 41. (Série Estudos e Documentos).

CHONG, T. H., SHEIKHOLESLAMI, R. Thermodynamics and kinetics for mixed calcium carbonate and calcium sulfate precipitation. **Chemical Engineering Science**, v. 56, n. 18, p. 5391-5400, 2001.

CODOLINI, A.; LI, Q. M.; WILKINSON, A. Influence of machining process on the mechanical behaviour of injection-moulded specimens of talc-filled polypropylene. v. **Polymer Testing** Volume 62, September 2017, Pages 342-347

DALPIAZ, Giovani. Estudo do efeito de cargas minerais em compósitos poliméricos particulados em matriz de polipropileno. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Minas). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Minas, Metalúrgica e de Materiais. 2006.

DESHMUKH, K. A.; PODE, G. R.; ROY, S. R.; GUPTE, B. K.; DESHMUKH, A. D.; CHOPRA, S.; PESHWE, D. R. Effect of cryo-ageing at liquid nitrogen temperature and subsequent thermal-annealing on the interface of talc filled polypropylene with different particle size. **Transactions of the Indian Institute of Metals**, v. 71, n.2, p. 403-409, 2018.

DNPM. Departamento Nacional de Produção Mineral. Anuário Mineral Brasileiro – 2015. Disponível em: <http://www.dnpm.gov.br/dnpm/sumarios/sumario-mineral-2015> Acesso em: 08 jan. 2017.

GARAY, C. A. **Efeito da adição de carbonato de cálcio em compósitos poliméricos moldados por RTM e RTM-Ligth**. 2010. Dissertação de (Mestrado em Engenharia Minas, Metalúrgica e de Materiais). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Porto Alegre. 2010.

GHANBARI, A.; BEHZADFAR, E.; ARJMAND, M. Properties of talc filled reactor-made thermoplastic polyolefin composites. **Journal of Polymer Research**. v. 26, p.241, 2019. doi:10.1007/s10965-019-1902-6.

HEMAIS, C. A. Polímeros e a indústria automobilística. **Polímeros**, v. 13, n. 2, p. 107-114, 2003.

HENRIQUES, L. **Estudo das propriedades físicas e mecânicas de compósito de polipropileno de alta cristalinidade reforçado com talco para aplicações automotivas em ambientes de alta temperatura “under the hood”**. 2015, 89f. Dissertação (Mestrado). Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, 2015.

HORIBA, L. **Laser diffraction analysis of magnesium silicate (Talc)**. Disponível em: https://www.horiba.com/en_en/applications/materials/nonmetallic-minerals/laser-diffraction-analysis-of-magnesium-silicate-talc/ Acesso em: 27 out. 2021.

LEVY, L. C.; PARDINI, F. **Compósitos Estruturais: Ciência e Tecnologia**. 1 ed. São Paulo: Edgar Blucher Editora, 2006. 59p.

LIMA, A.B.T. **Aplicações de cargas minerais em polímeros**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007. doi:10.11606/D.3.2007.tde-27062007-185421.

LINHARES, P. B.; CASTILHO, L. A.; BARBOSA, S. E. Pro-Degradant Effect of Talc Nanoparticles on Polypropylene Films. **Journal of Polymers and the Environment**. v. 27, p. 1666-1676, 2019.

MAIER, C.; CALAFUT, T. **Polypropylene the definitive user's guide and databook**, Norwich, NY: Plastics Design Library, 1998.

MARINUCCI, G. Materiais compósitos poliméricos: **Fundamentos e tecnologia**, 1.ed. São Paulo: Editora Artliber, 2011.

MARKZUK, V. C. **Reaproveitamento de pallets industriais para preparação e caracterização mecânica de compósitos poliméricos**. 2015. 67f. Dissertação (Mestrado Profissional em Materiais) – Fundação Oswaldo Aranha – Campus Três Poços, Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda, 2015.

MARTINS, F.R. **Caracterização do fresamento de chapas de compósito polímero reforçado com fibras de carbono (PRFC)**. 2014. 161 p. Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, SP. Disponível em: <http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=000931949>. Acesso em: 2 abr. 2017.

MENARD, K. P. **Dynamic mechanical analysis, a practical introduction**. New York: CRC Press, 1999.

MITTAL, P.; NARESH, S.; LUTHRA, P.; SINGH, A.; DHALEWAL, J. S.; KAPER, G. S. Polypropylene composites reinforced with hybrid inorganic fillers: morphological, mechanical and rheological properties. **Journal of Thermoplastic Composite**. v. 32, p. 848-864, 2019.

MOORE, E.P. Polypropylene Handbook: **Polymerization, Characterization, Properties, Processing**, 1st ed. New York: Hanser Gardner Publications, 1996.

MORENO, D. D. P.; SARON, C. Low-density polyethylene/polyamide 6 blends form multilayer films waste. **Journal of Applied Polymer Science**. v. 136, p. 47456, 2019.

MULINARI, D. R. **Comportamento térmico, mecânico e morfológico dos compósitos de polietileno de alta densidade reforçados com fibras de celulose do bagaço de cana de açúcar**. 2009, 112 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2009.

NOGUEIRA, B. Talco: pedra que vira arte, **Revista Mineração & Sustentabilidade**. Abril de 2017. Disponível em: <https://revistamineracao.com.br/2017/04/13/talco-pedra-que-vira-arte/>. Acesso em: 27 out. 2021.

OLIVEIRA, F.V. **Processamento de carbonato de cálcio para aplicação nas indústrias de papel e de plástico**. 63p. Curso de Pós-Graduação em Engenharia

Metalúrgica e de Minas. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2009.

OLIVEIRA, J. L. **Processamento e caracterização de compostos de polipropileno reforçados com fibras da palmeira real australiana**. 2015. 62f. 2009. Dissertação (Mestrado Profissional em Materiais) – Fundação Oswaldo Aranha, Centro Universitário de Volta Redonda - UniFOA, Volta Redonda, 2015.

PAOLI, M A. **Degradação e estabilização de polímeros**. São Paulo: Artliber, 2009.

PASQUINI, N.; ADDEO, A. **Polypropylene Handbook**. New York: Hanser, 2005.

PONTES, I. F.; ALMEIDA, S. L. M. **Rochas e Minerais Industriais**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2005 Cap. 29, p. 607-628.

ROCHA, M. C. G; COUTINHO. F. M. B.; BALKE. S. Índice de fluidez: uma variável de controle de processos de degradação controlada de polipropileno por extrusão reativa. **Polímeros**, v. 4, p.33-37, 1994.

RODA, Daniel Tietz. Tudo sobre Plásticos. 2013. Disponível em: <http://www.tudosobreplasticos.com/compostos/compostos.asp>. Acesso em: 12 abr. 2015.

SARON, C.; FELISBERTI, M. I.; ZULLI, F. GIORDANO, M. Influence of copper-phthalocyanine on the photodegradation of polycarbonate. **Polymer Degradation and Stability**, v. 91, p. 3301-3311, 2006

SARON, C.; FELISBERTI, M. I.; ZULLI, F. GIORDANO, M. Effects of bismuth vanadate and anthraquinone dye on the photodegradation of polycarbonate. **Journal of Brazilian Chemical Society**. v. 18, p. 900-910, 2007.

SATO, A. K. **Desenvolvimento e caracterização de um compósito híbrido de polipropileno homopolímero e micro fibra de sílica amorfa e fibra de madeira, utilizando agente de acoplagem**. 2008. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, 2008.

SHARMA, A. M. **Mechanical behavior, water absorption and morphology of wheat straw, talc, mica and wollastonite filled polypropylene composites**. 2012. 155 f. Dissertação (mestrado), University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada, 2012.

SILVEIRA, L. H. **Desenvolvimento de processo de incorporação de fibra de vidro orientada em matriz de polipropileno e obtenção de pellets com fibras longas**. 2008, Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2008.

WAH, C. A.; CHOONG, L. Y.; NEON, G. S. Effects of titanate coupling agent on rheological behavior, dispersion characteristic and mechanical properties of talc filled polypropylene. **European Polymer Journal**, v. 36, p. 789-801, 2000.

WIEBECK, H; HARADA, J. **Plásticos de Engenharia: Tecnologia e Aplicações**. São Paulo: Artliber, 2012. 350 p.

WYPYCH, G. **Handbook of fillers**. 4th. ed. Toronto: ChemTec Publishing. 2016. 938p.

XIANG, L., XIANG, Y., WANG, Z. G., JIN, Y. Influence of chemical additives on the formation of super-fine calcium carbonate. **Power Technology**, v. 126, n. 2, p. 129-133, July 2002.

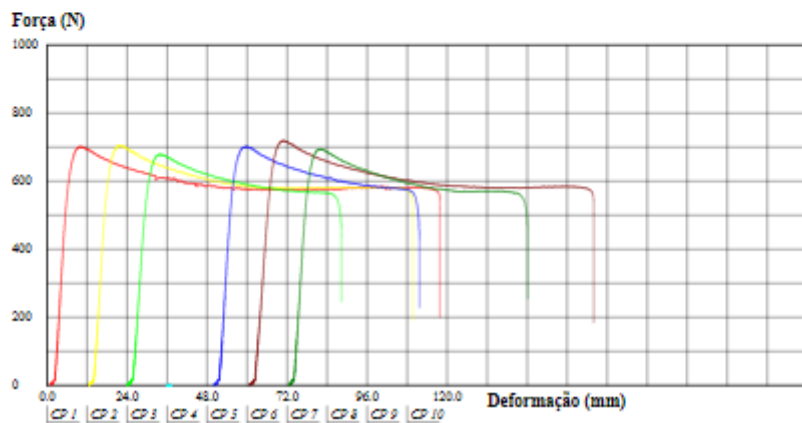
ANEXO B - Curvas de tração do PP5

EEL - USP / Departamento de Engenharia de Materiais
Laboratório de Ensaios Mecânicos

Relatório de Ensaio

Máquina: Emic DL2000 Cálculo: Trd 24 Extensômetro: - Data: 05/09/2019 Hora: 12:06:53 Trabalho nº **0573**
Programa: Test versão 3.04 Método de Ensaio: **TRAÇÃO CLODOALDO**
Ident. Amostras: ***** USUÁRIO: **IGOR - GUILHERME** MATERIAL: **PP5** LOTE: 05/09/19

Corpo de Prova	Largura (mm)	Espessura (mm)	Compr. Base (mm)	Força		Mod. Elástico (MPa)	Def. Especif. Ruptura (mm/mm)	Def. Especif. Força Max. (mm/mm)
				Força Máx. (N)	Força Média (MPa)			
CP 1	12.82	3.21	99.00	701.65	17.05	404.81	1.19	0
CP 2	12.81	3.21	99.00	706.81	17.19	399.18	0.99	0
CP 3	12.81	3.21	99.00	679.42	16.52	363.25	0.65	0
CP 4	12.87	3.11	99.00	0.69	0.02	*	*	0
CP 5	12.81	3.20	99.00	702.85	17.15	398.18	0.64	0
CP 6	12.83	3.21	99.00	719.56	17.47	337.94	1.05	0
CP 7	12.80	3.20	99.00	694.75	16.96	386.58	0.73	0
Número CPs	7	7	7	7	7	6	6	7
Média	12.82	3.193	99.00	600.8	14.62	381.7	0.8747	0.08918
Desv. Padrão	0.02340	0.03684	0.0000	264.9	6.447	26.04	0.2317	0.04023
Mínimo	12.80	3.110	99.00	0.6891	0.01722	337.9	0.6437	0.00006592
Máximo	12.87	3.210	99.00	719.6	17.47	404.8	1.191	0.1195



ANEXO C - Curvas de tração do PP10

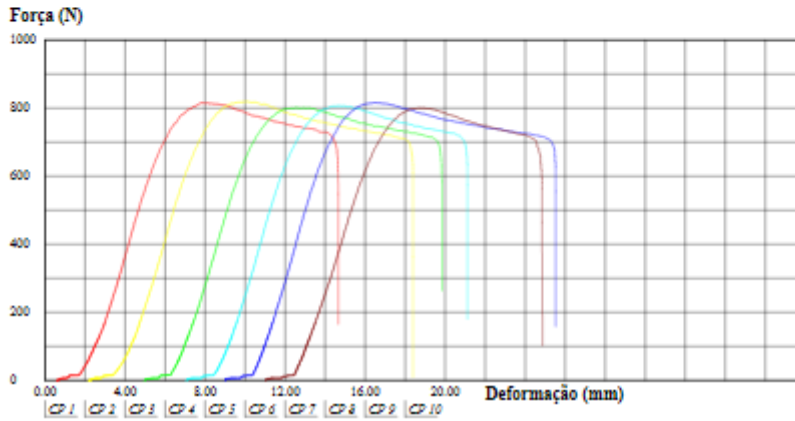
EEL - USP / Departamento de Engenharia de Materiais
Laboratório de Ensaios Mecânicos

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL2000** Célula: **Trd 24** Sinalizador: - Data: **05/09/2019** Hora: **09:00:15** Trabalho n°: **0566**
 Programa: **Tesc versão 3.04** Método de Ensaio: **TRAÇÃO CLODOALDO**
 Ident. Amostra: ***** USUÁRIO: **IGOR - GUILHERME** MATERIAL: **PP10** LOTE: **05/09/19**

Corpo de Prova	Largura (mm)	Espessura (mm)	Compr. Base (mm)	Força		Mod. Elástico (MPa)	Def. Especif. Ruptura (mm/mm)	Def. Especif. Força Max. (mm/mm)
				Força Max. (N)	Força Max. (MPa)			
CP 1	12.87	3.11	99.00	815.69	20.38	505.85	0.15	0
CP 2	12.93	3.12	99.00	819.99	20.33	502.44	0.17	0
CP 3	12.62	3.05	99.00	802.25	20.84	522.49	0.16	0
CP 4	12.73	3.24	99.00	807.07	19.57	506.10	0.15	0
CP 5	12.75	3.16	99.00	816.55	20.27	522.67	0.18	0
CP 6	12.77	3.21	99.00	800.87	19.54	468.20	0.15	0

Número CPs	6	6	6	6	6	6	6	6
Média	12.78	3.148	99.00	810.4	20.15	504.6	0.1589	0.08509
Desv. Padrão	0.1093	0.06969	0.0000	8.075	0.5081	19.90	0.01106	0.003981
Mínimo	12.62	3.050	99.00	800.9	19.54	468.2	0.1480	0.07939
Máximo	12.93	3.240	99.00	820.0	20.84	522.7	0.1770	0.08864



ANEXO D - Curvas de tração do PP15

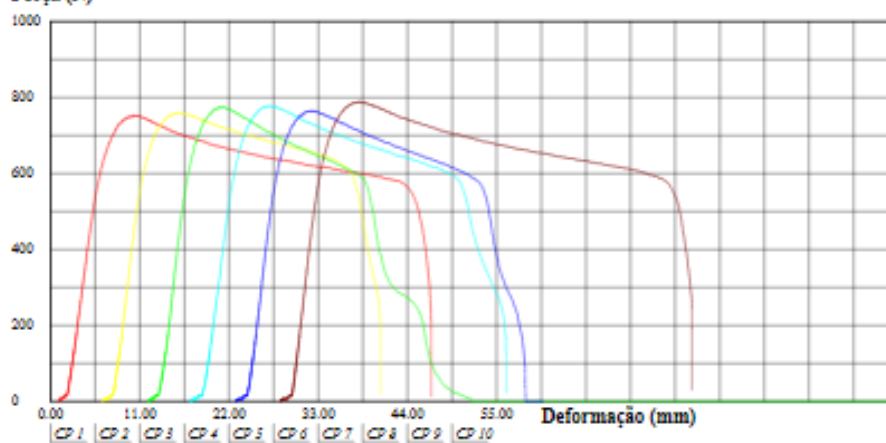
EEL - USP / Departamento de Engenharia de Materiais
Laboratório de Ensaios Mecânicos

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL2000** Célula: **Trd 24** Extensômetro: - Data: **05/09/2019** Hora: **09:33:42** Trabalho n° **0567**
 Programa: **Test versão 3.04** Método de Ensaio: **TRAÇÃO CLODOALDO**
 Ident. Amostra: ***** USUÁRIO: **IGOR - GUILHERME** MATERIAL: **PP15** LOTE: **05/09/19**

Corpo de Prova	Largura (mm)	Espessura (mm)	Compr. Base (mm)	Força	Tensão	Mod. Elástico (MPa)	Def. Especif.	Def. Especif.
				Força Max. (N)	Força Max. (MPa)		Ruptura (mm/mm)	Força Max. (mm/mm)
CP 1	12.75	3.16	99.00	753.67	18.71	400.86	0.47	0
CP 2	12.76	3.16	99.00	760.73	18.87	456.25	0.36	0
CP 3	12.78	3.15	99.00	775.20	19.26	483.31	*	0
CP 4	12.74	3.16	99.00	778.65	19.34	423.52	0.40	0
CP 5	12.73	3.15	99.00	765.04	19.08	463.92	*	0
CP 6	12.77	3.18	99.00	789.50	19.44	465.83	0.52	0
Número CPs	6	6	6	6	6	6	4	6
Média	12.76	3.160	99.00	770.5	19.12	448.9	0.4379	0.1051
Desv. Padrão	0.01871	0.01095	0.0000	13.10	0.2857	30.67	0.07395	0.002034
Mínimo	12.73	3.150	99.00	753.7	18.71	400.9	0.3555	0.1018
Máximo	12.78	3.180	99.00	789.5	19.44	483.3	0.5212	0.1076

Força (N)



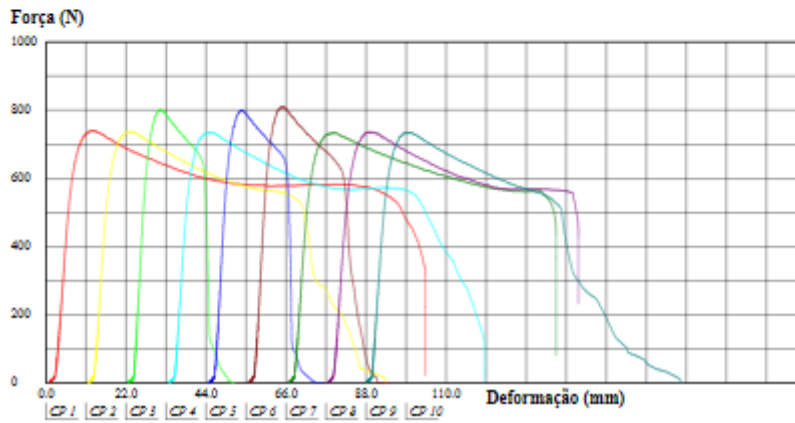
ANEXO E - Curvas de tração do PP20

EEL - USP / Departamento de Engenharia de Materiais
Laboratório de Ensaios Mecânicos

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL2000** Célula: **Trd 24** Escalonômetro: - Data: **05/09/2019** Hora: **10:08:30** Trabalho n.º: **0568**
Programa: **Tesc versão 3.04** Método de Ensaio: **TRAÇÃO CLODOALDO**
Ident. Amostras: ***** USUÁRIO: **IGOR - GUILHERME** MATERIAL: **PP20** LOTE: **05/09/19**

Corpo de Prova	Largura (mm)	Espessura (mm)	Compr. Base (mm)	Força	Tensão	Mod. Elástico (MPa)	Def. Especif. (mm/mm)	Def. Especif. (mínimo)
				Força Máx. (N)	Força Máx. (MPa)			
CP 1	12.75	3.19	99.00	741.09	18.22	362.53	1.05	0
CP 2	12.75	3.19	99.00	739.03	18.17	423.25	*	0
CP 3	13.09	3.23	99.00	803.46	19.00	470.65	*	0
CP 4	12.90	3.21	99.00	736.62	17.79	405.01	0.88	0
CP 5	12.90	3.22	99.00	800.70	19.28	455.29	*	0
CP 6	12.75	3.23	99.00	811.21	19.70	491.53	*	0
CP 7	12.80	3.20	99.00	734.72	17.94	392.98	0.75	0
CP 8	12.79	3.23	99.00	737.82	17.86	394.87	0.70	0
CP 9	12.82	3.22	99.00	735.58	17.82	384.71	*	0
Número CPs	9	9	9	9	9	9	4	9
Média	12.84	3.213	99.00	760.0	18.42	423.4	0.8474	0.1166
Dev. Padrão	0.1110	0.01658	0.0000	33.98	0.7171	47.42	0.1578	0.01328
Mínimo	12.75	3.190	99.00	734.7	17.79	362.5	0.7011	0.09469
Máximo	13.09	3.230	99.00	811.2	19.70	491.5	1.054	0.1340



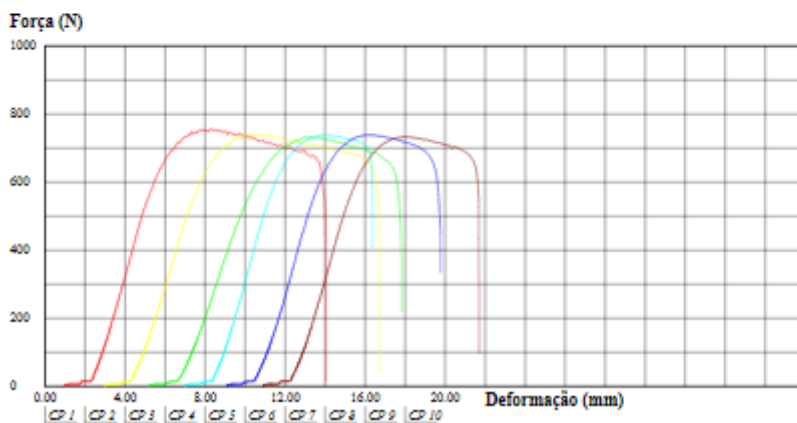
ANEXO F- Curvas de tração do PP30

EEL - USP / Departamento de Engenharia de Materiais
Laboratório de Ensaios Mecânicos

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL2000** Célula: **Trd 24** Extensômetro: - Data: **05/09/2019** Hora: **11:01:36** Trabalho n° **0569**
 Programa: **Tesc versão 3.04** Método de Ensaio: **TRAÇÃO CLODOALDO**
 Ident. Amostra: USUÁRIO: **IGOR - GUILHERME** MATERIAL: **PP30** LOTE: **05/09/19**

Corpo de Prova	Largura (mm)	Espessura (mm)	Compr. Base (mm)	Força	Tensão	Mod. Elástico (MPa)	Del. Especif. Ruptura (mm/mm)	Del. Especif. Força Máx. (mm/mm)
				Força Máx. (N)	Força Máx. (MPa)			
CP 1	12.81	3.20	99.00	756.60	18.46	514.62	0.14	0
CP 2	12.80	3.23	99.00	740.75	17.92	478.77	0.15	0
CP 3	12.82	3.22	99.00	734.20	17.79	424.80	0.14	0
CP 4	12.83	3.21	99.00	738.51	17.93	522.64	0.10	0
CP 5	12.82	3.22	99.00	738.68	17.89	520.14	0.12	0
CP 6	12.83	3.20	99.00	733.34	17.86	509.79	0.12	0
Número CPs	6	6	6	6	6	6	6	6
Média	12.82	3.213	99.00	740.3	17.97	495.1	0.1286	0.08497
Desv. Padrão	0.01169	0.01211	0.0000	8.452	0.2420	37.92	0.01716	0.006647
Mínimo	12.80	3.200	99.00	733.3	17.79	424.8	0.1047	0.07961
Máximo	12.83	3.230	99.00	756.6	18.46	522.6	0.1487	0.09787



ANEXO G - Curvas de tração do PP40

EEL - USP / Departamento de Engenharia de Materiais
Laboratório de Ensaios Mecânicos

Relatório de Ensaio

Máquina: Emic DL2000 Célula: Trd 24 Estensômetro: - Data: 05/09/2019 Hora: 11:31:46 Trabalho n° 0571
Programa: Test versão 3.04 Método de Ensaio: TRAÇÃO CLODOALDO
Ident. Amostra: ***** USUÁRIO: IGOR - GUILHERME MATERIAL: PP40 LOTE: 05/09/19

Corpo de Prova	Largura (mm)	Espessura (mm)	Compr. Base (mm)	Força		Mod. Elástico (MPa)	Def. Especif.	
				Força Máx. (N)	Tensão Força Máx. (MPa)		Ruptura (mm/mm)	Força Máx. (mm/mm)
CP 1	12.83	3.22	99.00	1009.14	24.43	896.59	0.07	0
CP 2	12.85	3.22	99.00	1024.65	24.76	908.85	0.07	0
CP 3	12.85	3.21	99.00	1024.47	24.84	890.69	0.08	0
CP 4	12.86	3.23	99.00	1022.92	24.63	890.32	0.08	0
CP 5	12.85	3.23	99.00	990.71	23.87	819.32	0.08	0
CP 6	12.85	3.21	99.00	1025.16	24.85	925.06	0.08	0
Número CPs	6	6	6	6	6	6	6	6
Média	12.85	3.220	99.00	1016	24.56	888.5	0.07611	0.06741
Desv. Padrão	0.009832	0.008944	0.0000	13.89	0.3750	36.36	0.004770	0.003812
Mínimo	12.83	3.210	99.00	990.7	23.87	819.3	0.06936	0.06277
Máximo	12.86	3.230	99.00	1025	24.85	925.1	0.08237	0.07294

Força (N)

