

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA CAMPUS DE BLUMENAU -  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS  
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

Oswaldo Rau Neto

Estudo do comportamento físico e termoquímico de polímeros comerciais para proposta de substituição de prolongadores de graxeira para uso em motores elétricos

Blumenau  
Dezembro, 2020

Oswaldo Rau Neto

Estudo do comportamento físico e termoquímico de polímeros comerciais para proposta de substituição de prolongadores de graxeira para uso em motores elétricos

Trabalho apresentado ao curso de graduação em Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina Campus Blumenau como parte dos requisitos para a obtenção do título de Engenheiro de Materiais.

Orientadora: Profa. Dra. Claudia Merlini

Blumenau  
Dezembro, 2020

Oswaldo Rau Neto

**Estudo do comportamento físico e termoquímico de polímeros comerciais  
para proposta de substituição de prolongadores de graxeira para uso em  
motores elétricos**

Este trabalho de graduação foi julgado adequado para a obtenção do título de Engenheiro de Materiais e aprovado em sua forma final pela Comissão Examinadora e pelo Curso de Graduação em Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina

Blumenau, 15 de dezembro de 2020.



Documento assinado digitalmente  
Oswaldo Rau Neto  
Data: 16/12/2020 12:11:13-0300  
CPF: 099.987.269-99

---

Oswaldo Rau Neto  
Acadêmico

**Banca Examinadora:**



Documento assinado digitalmente  
Claudia Merlini  
Data: 16/12/2020 12:27:21-0300  
CPF: 002.787.580-61

---

Prof. Dra. Claudia Merlini  
Presidente/Orientadora  
Universidade Federal de Santa Catarina



Documento assinado digitalmente  
Johnny de Nardi Martins  
Data: 16/12/2020 13:49:58-0300  
CPF: 003.147.250-83

---

Prof. Dr. Johnny de Nardi Martins  
Avaliador  
Universidade Federal de Santa Catarina



Documento assinado digitalmente  
Debora Pereira Schmitz  
Data: 16/12/2020 15:16:18-0300  
CPF: 074.383.489-54

---

Dra. Débora Pereira Schmitz  
Avaliadora  
Universidade Federal de Santa Catarina

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Rau Neto, Osvaldo

Estudo do comportamento físico e termoquímico de polímeros comerciais para proposta de substituição de prolongadores de graxeira para uso em motores elétricos / Osvaldo Rau Neto ; orientador, Prof. Dra Claudia Merlini , 2020.  
67 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Blumenau,  
Graduação em Engenharia de Materiais, Blumenau, 2020.

Inclui referências.

1. Engenharia de Materiais. 2. Seleção de materiais. 3. Envelhecimento. 4. Polímeros. 5. Graxeira. I. , Prof. Dra Claudia Merlini. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia de Materiais. III. Título.

## AGRADECIMENTOS

Aos meus queridos pais por todo esforço, amor e apoio que me deram durante todos estes anos.

À Universidade Federal de Santa Catarina Campus Blumenau pelo aprendizado inmensurável repassado para mim durante a graduação e investimento realizado para o desenvolvimento de diversos graduandos.

À minha professora orientadora Dra. Claudia Merlini pela contribuição excepcional de conhecimentos técnicos e instruções para realização deste trabalho.

Ao meus irmãos e colegas de trabalho na WEG Equipamentos Elétricos S.A., o qual contribuiu com o desenvolvimento deste estudo, de conhecimentos técnicos e de infindáveis lições.

À Deus por estar sempre comigo e me guiar em conhecer pessoas incríveis durante a minha trajetória profissional e de vida.

## RESUMO

O trabalho busca validar a substituição de matéria-prima de um componente metálico de motores elétricos por material polimérico. O componente abordado é o prolongador de graxeira, um elemento de fixação roscado que permite lubrificar os rolamentos de eixo de motores sem desmontagem da carcaça. Na aplicação do componente nos motores elétricos, a graxeira está protegida de impactos pelas tampas defletoras, porém deve resistir às intempéries e uma temperatura máxima de até 120 °C. Atualmente as graxeiras são compostas de dois componentes (bico graxeiro + prolongador) em material metálico (aço zincado) ou borracha (NBR) em diversos comprimentos. A proposta do trabalho é avaliar a viabilidade de utilização de um material polimérico que atenda os requisitos de aplicação para o prolongador, também oferecendo economia direta na compra de componente e ganho de produtividade. Os polímeros selecionados para ensaio são a poli(acrilonitrila-co-butadieno-co-estireno) (ABS), Polipropileno (PP) e o compósito de Poliamida 6 (Nylon 6) reforçado com 15% em massa de Fibra de Vidro. Os materiais foram avaliados através de caracterização por Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) e Espectroscopia no infravermelho por Transformada de Fourier, antes e após envelhecimento dos corpos de prova em graxa de óleo mineral com espessante de poliureia.

Ao fim foi possível determinar a viabilidade da aplicação com possível redução direta de custos de material através da comparação das propriedades obtidas experimentalmente e de literatura com os requisitos para o componente.

**Palavras-chave: Seleção de materiais, prolongador de graxeira, poliamida 6, ABS, polipropileno, envelhecimento.**

## **ABSTRACT**

This essay seeks to change a base material from a metallic component on electric motors to a polymer. The component in scope is the greasing extension, a threaded fixture device that enables the greasing of the axle bearings without disassembling of the case. In electric motors applications, the greasing extension is protected from impacts by the case covers, but must resist the effects of the elements and a max temperature of up to 120 °C. Currently, the greasing extensions are built from two components (greasing nipple + extension) in metallic material (zinc plated steel) or rubber (Nitrile rubber) in many lengths. The proposal of this essay is to evaluate the suitability of the use of a polymeric material that comply with the requisites for the extension, also providing direct savings in component purchase and gains in productivity. The polymers selected for the proposal are the poly(acrylonitrile-co-butadiene-co-styrene) (ABS) and Polypropylene (PP), and the Polyamide 6 (Nylon 6) reinforced with 15% mass fraction of glass fiber composite. The materials have been tested through the methods of Differential Scanning Calorimetry (DSC) and Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), before and after the aging of samples in mineral grease with polyurea thickener.

At the end, it was possible to determine the suitability of the application with direct material cost reduction through the comparison of properties obtained experimentally and through literature with the requisites for the component.

**Keywords: Materials selection, greasing extension, polyamide 6, ABS, polypropylene, aging.**

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Primeiro motor de indução trifásico .....	14
Figura 2 - Motor W22 Mining para aplicação especial em mineração, produzido pela empresa WEG Motores .....	15
Figura 3 - Esquema de funcionamento do motor elétrico .....	16
Figura 4 - Vista explodida de um motor elétrico comercial .....	16
Figura 5 - Detalhe da posição da graxeira na tampa dianteira de um motor Roller Table .	18
Figura 6 - Vista em corte do bico graxeiro .....	18
Figura 7 - Graxeira 45°, 90° e reta, respectivamente .....	19
Figura 8 - Relação entre Processamento, propriedades e estrutura dos materiais .....	21
Figura 9 - Campo de ação da seleção de materiais .....	22
Figura 10 - Fatores e relações presentes no campo da seleção de materiais .....	22
Figura 11 - Pirâmide dos polímeros destacando as principais classes quanto à estrutura e desempenho, consumo e numero de fabricantes .....	23
Figura 12 - Obtenção do polipropileno.....	25
Figura 13 - Reação de formação da estrutura do ABS .....	26
Figura 14 - Fórmula estrutural do copolímero ABS.....	26
Figura 15 - Interações polares entre moléculas de acrilonitrila.....	27
Figura 16 - Obtenção da PA 6 a partir da caprolactama.....	28
Figura 17 - Princípio de funcionamento do espectômetro FTIR.....	31
Figura 18 - Espectrograma natural e resultado após tratamento pela transformada de Fourier .....	31
Figura 19 - Operações realizadas nos espectrogramas para obter o espectro da amostra. ....	32
Figura 20 - Esquema óptico do acessório de ATR .....	33
Figura 21 - Representação de uma curva DSC demonstrando as possíveis leituras .....	36
Figura 22 - Determinação da $T_g$ através da curva DSC.....	38
Figura 23 - Picos de fusão e cristalização em uma curva DSC representando as temperaturas de início e conclusão da transição.....	39
Figura 24 – Consumo de itens de graxeira por comprimento de prolongador em 2018 para a empresa WEG Motores Brasil .....	41
Figura 25 - Corpos de prova de tração pré envelhecimento. Da esquerda para a direita,	

PA6, PP e ABS .....	46
Figura 26 - Corpos de prova cobertos em graxa Mobil Polyrex EM. Da esquerda para direita, PP, ABS e PA6. ....	46
Figura 27 – Amostra de PA6 sendo ensaiada no equipamento de FTIR .....	47
Figura 28 - Prensa de bancada e matriz utilizadas para preparação de seção plana de amostra.....	48
Figura 29 - Porta Amostra de alumínio preparado para o ensaio de DSC.....	48
Figura 30 - Rampa de aquecimento utilizada na caracterização por DSC das amostras..	48
Figura 31 - Curva de FTIR para o ABS antes e após envelhecimento .....	50
Figura 32 - Curva de DSC para a amostra de ABS em condição natural .....	52
Figura 33 - Curva de DSC para a amostra de Terluran HI-10 Envelhecido.....	52
Figura 34 - Curva de FTIR para a PA6 antes e após envelhecimento.....	53
Figura 35 - Curva de DSC para a amostra de PA6 em condição natural.....	55
Figura 36 - Curva de DSC para a amostra de PA6 em condição envelhecida .....	56
Figura 37 - Curva de FTIR para o PP H503 antes e após envelhecimento .....	58
Figura 38 - Curva de DSC para a amostra de PP na condição natural. ....	60
Figura 39 - Curva de DSC para a amostra de PP na condição envelhecida. ....	60
Figura 40 - Avaliação das propriedades de polímeros indicados para utilização em prolongador de graxeira.....	62

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades de interesse do polipropileno .....	25
Tabela 2 - Propriedades de interesse do polímero ABS .....	27
Tabela 3 – Propriedades de interesse para a PA6 não reforçada .....	28
Tabela 4 - Fatores instrumentais que influenciam as curvas de DSC .....	36
Tabela 5 - Características da amostra que influenciam os diagramas de DSC .....	37
Tabela 6 - Características de alguns polímeros semicristalinos .....	40
Tabela 7 - Propriedades que deverão ser atendidas pelo material proposto na substituição .....	42
Tabela 8 - Propriedades de interesse da resina Braskem H503.....	43
Tabela 9 - Propriedades de interesse do polímero ABS Terluran HI-10.....	44
Tabela 10 - Propriedades de interesse da PA6 grade AKROMID B3 GF15 .....	44
Tabela 11 - Especificações da graxa Mobil Polyrex EM .....	45
Tabela 12 - Picos de interesse para o polímero ABS .....	50
Tabela 13 - Picos de interesse para o polímero Poliamida 6.....	54
Tabela 14 - Grau de cristalinidade das amostras de PA6 em condição natural e envelhecida .....	57
Tabela 15 - Picos de interesse para o Polipropileno.....	58
Tabela 16 - Grau de cristalinidade das amostras de PP na condição natural.....	61

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

**ABNT** Associação Brasileira de Normas Técnicas

**ABS** poli(acrilonitrila-co-butadieno-co-estireno)

**DIN** Instituto Alemão para Normatização

**DSC** Calorimetria Exploratória Diferencial

**EVA** Etileno-acetato de vinila

**FTIR** Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier

**ISO** International Standards Organisation

**NBR** Borracha Nitrílica

**PBT** Polibutadieno Tereftalato

**PC** Policarbonato

**PE** Polietileno

**PE** polietileno

**PEEK** polieter-eter-cetona

**PMMA** Polimetacrilato de metila

**PP** Polipropileno

**PS** Poliestireno

**PTFE** poli(tetrafluoroetileno)

**PU** Poliuretano

**PUR** poliuréias

**PVC** Policloreto de vinila

**SAN** Estireno-acrilonitrila

**TCC** Trabalho de Conclusão de Curso

**WMO** Weg Motores

## SUMÁRIO

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA CAMPUS DE BLUMENAU - DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS .....	1
RESUMO .....	4
ABSTRACT .....	5
ÍNDICE DE FIGURAS .....	6
ÍNDICE DE TABELAS .....	8
1. INTRODUÇÃO .....	12
2. OBJETIVOS .....	13
2.1 Objetivo Geral .....	13
2.2 Objetivos Específicos .....	13
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	14
3.1 Contexto histórico da máquina elétrica .....	14
3.2 Componentes de um motor elétrico .....	15
3.3 Graxeira .....	17
3.4 Funcionamento da graxeira .....	18
3.5 Tipos de graxeira .....	19
3.6 Seleção de materiais .....	20
3.7 Polímeros termoplásticos .....	22
3.8 Polímeros termoplásticos para desenvolvimento de graxeira .....	24
3.9 Tipos de graxas comerciais .....	28
3.10 Técnicas de caracterização de materiais .....	30
3.10.1 Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) .....	30
3.10.2 Refletância Total Atenuada (ATR) .....	32
3.10.3 Calorimetria exploratória diferencial (DSC) .....	34
4. METODOLOGIA .....	41
4.1 Panorama Atual de graxeiras .....	41
4.2 Condições de contorno do problema .....	41
4.3 Materiais .....	42
4.3.1 Polímeros avaliados para a proposta .....	42
4.3.2 Graxa avaliada .....	44
4.4 Metodologias .....	45
4.4.1 Fabricação dos corpos de prova .....	45
4.4.2 Envelhecimento .....	45
4.5 Caracterizações .....	47
4.5.1 Espectroscopia no infravermelho por Transformada de Fourier .....	47
4.5.2 Calorimetria exploratória diferencial .....	47
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	49

5.1 Polímero ABS Terluran Hi-10 .....	49
5.1.1 Caracterização por espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier.	49
5.1.2 Caracterização por Calorimetria exploratória diferencial .....	51
5.2 Polímero PA6 AKROMID B3 GF15 .....	53
5.2.1 Caracterização por espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier.	53
5.2.2 Caracterização por Calorimetria exploratória diferencial .....	54
5.3 Polímero PP Braskem H503.....	57
5.3.1 Caracterização por espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier.	57
5.3.2 Caracterização por Calorimetria Exploratória Diferencial .....	59
5.4 Viabilidade da proposta .....	61
6. CONCLUSÃO .....	63
SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS .....	64
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	65

## 1. INTRODUÇÃO

No contexto industrial, a mudança e a melhoria são elementos constantes para o desenvolvimento da organização. Sendo assim, oportunidades e alternativas de melhoria e redução de custo devem ser observadas e avaliadas a todo momento. Um exemplo contextualizado e alinhado com o campo de atuação de Engenharia de Materiais é a substituição de matérias primas tradicionais e materiais de construção mecânica por soluções alternativas, com diversas possibilidades de ganho.

Do presente momento, pode-se observar uma tendência de substituição de componentes metálicos por poliméricos, apoiados pelo desenvolvimento de materiais poliméricos com propriedades balanceadas e liberdade de processamento. Esse tipo de substituição permite redução de peso dos componentes e do conjunto, redução de preço nas matérias-primas, produtividade, utilização de componentes próximos da forma final e liberdade de design, porém é necessário avaliar as condições em que o componente estará exposto e os requisitos para obter uma solução viável e vantajosa.

Os principais componentes sujeitos a essa substituição são componentes funcionais, estéticos ou funcionais, a exemplo desse trabalho que busca apresentar uma proposta de substituição de um tubo prolongador de graxeira utilizado em motores elétricos por uma solução polimérica através da seleção de possíveis candidatos da substituição. Esse componente opera sob ação mecânica e tem como principal objetivo permitir a lubrificação dos rolamentos pela parte externa do equipamento, guiando a graxa do ponto de injeção até o local onde a lubrificação é desejada. O mesmo deve apresentar rigidez, boa resistência ao impacto e integridade mecânica nas temperaturas máximas de operação do equipamento, e resistência química, de modo a não sofrer interações com a graxa utilizada na lubrificação. Nesse contexto, os materiais poliméricos sugeridos para utilização devem atender a tais requisitos, sendo que o PP, o ABS e o PA6 apresentam-se como candidatos devido à disponibilidade de mercado, boa processabilidade, boa resistência ao impacto e integridade mecânica e já são utilizados para algumas aplicações de motores elétricos, com facilidade para obtenção de amostras.

Com base no exposto acima, esse trabalho visa selecionar o candidato mais indicado para a substituição a partir da caracterização dos polímeros em exposição em graxas amplamente utilizadas em motores e comparação das propriedades antes e após o envelhecimento.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

O objetivo desse trabalho é avaliar a viabilidade da substituição de material de um componente metálico por polimérico.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Avaliar as propriedades térmicas dos polímeros comerciais PP, ABS e PA6 propostos para a substituição, considerando a compatibilidade com a graxa Mobil Polyrex EM indicada para motores elétricos.
- Realizar análise comparativa das propriedades e requisitos do projeto a fim de selecionar o polímero mais adequado para substituição do componente metálico.
- Elencar os custos de matéria-prima e os principais impactos da substituição de um componente metálico por uma alternativa polimérica.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

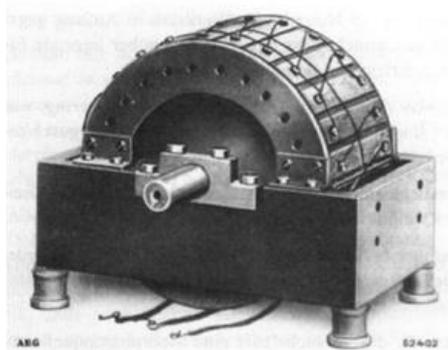
#### 3.1 Contexto histórico da máquina elétrica

Desde a descoberta das leis do eletromagnetismo, e principalmente a lei da indução eletromagnética de Faraday, em 1831, foi definida a fundamentação científica para a construção de máquinas girantes, capazes de transformar energia elétrica em mecânica e vice-versa, permitindo o uso do motor elétrico em acionamentos e aplicações industriais, assim como a transmissão de energia em longas distâncias. (RÜNCOS, 2019)

Por volta de 1840, as primeiras máquinas de corrente contínua já eram fabricadas e utilizadas como geradores ou motores. Nesse mesmo período, também surgiram as primeiras máquinas capazes de transformar energia mecânica em energia elétrica, e vice-versa, a partir das interações entre campos elétricos e magnéticos em um sistema de enrolamentos, denominados geradores síncronos. Nesse momento tornou-se possível gerar e transmitir energia elétrica em longas distâncias através de transformadores de corrente alternada. Em relação à construção da máquina, havia incerteza sobre qual o sistema mais eficiente e econômico: o monofásico, bifásico, trifásico ou m-fásico. Do ponto de vista de geração, transmissão e distribuição, o sistema mais aceito e empregado até hoje é o trifásico. (RÜNCOS, 2019)

A possibilidade de substituir os antigos acionamentos industriais à base de energia animal, humana e vapor por máquinas elétricas foi um grande fomento para o desenvolvimento deste campo do conhecimento. Finalmente, em 1891, Michael Dolivo-Dobrowolsky, engenheiro na empresa AEG em Berlim, construiu o primeiro motor de indução trifásico, ilustrado na Figura 1.

Figura 1 - Primeiro motor de indução trifásico



Fonte: Revista de engenharia elétrica ETZ (1917).

A máquina de Dobrowolsky não se parece em nada com os motores fabricados 120 anos depois, conforme ilustrado na Figura 2, porém constituiu um fato histórico muito importante, demonstrando a possibilidade de fabricar uma máquina elétrica, baseada na teoria do campo girante, e que atendesse às necessidades da indústria, proporcionando um bom acionamento, robusto e economicamente viável. Ao longo dos anos, a pesquisa e o desenvolvimento de novos materiais permitiram que as propriedades fossem otimizadas, aumentando o desempenho e a eficiência energética dos motores. Além disso, características construtivas e de geometria auxiliaram nesse desenvolvimento, permitindo maior eficiência e potência em carcaças menores e sistemas de menor massa.

Figura 2 - Motor W22 Mining para aplicação especial em mineração, produzido pela empresa WEG Motores

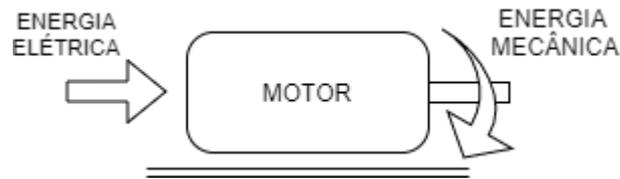


Fonte: Catálogo de produtos WEG (2020).

### **3.2 Componentes de um motor elétrico**

De acordo com Fillippo Filho (2000), o motor elétrico é uma máquina que transforma energia elétrica em energia mecânica, geralmente transmitida por um eixo de rotação, como ilustrado na Figura 3.

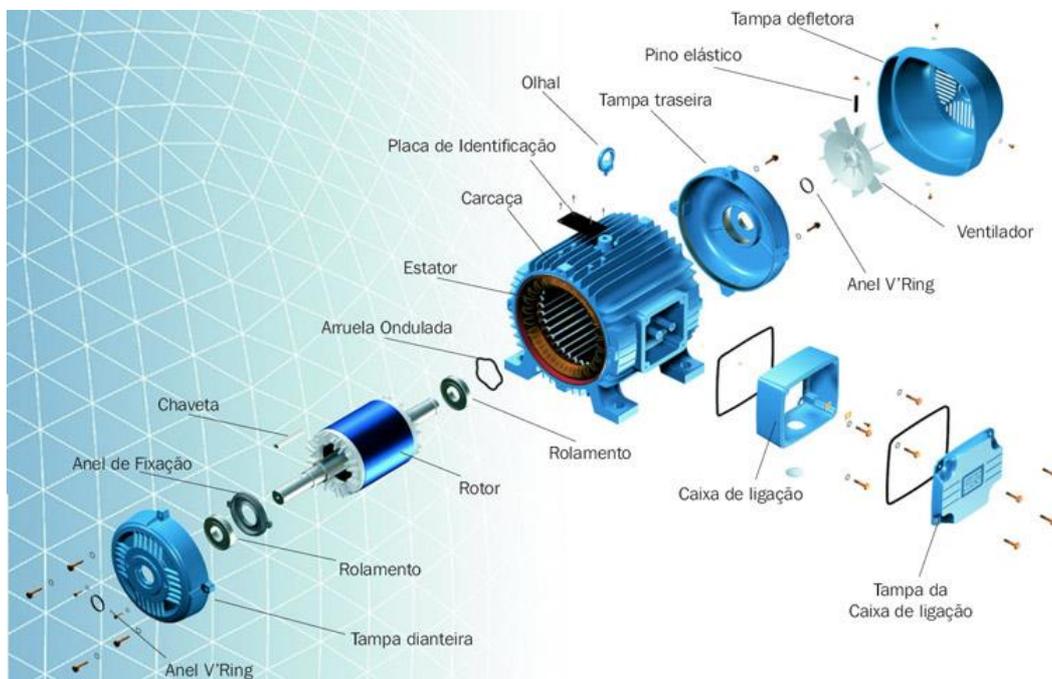
Figura 3 - Esquema de funcionamento do motor elétrico



Fonte: Adaptado de Filippo Filho, 2000.

Porém, o funcionamento da máquina depende de uma série de componentes, atuando como um sistema. Numa visão detalhada dos componentes, pode-se observar as principais partes construtivas e funcionais do motor, conforme Figura 4. Nesse sentido, temos: i) as partes estruturais (carcaça, placas, tampas, olhal) que constituem a proteção dos componentes internos, assim como garantem o fluxo de calor e permitem a instalação e movimentação do motor, nas mais diversas posições; ii) elétricas (caixa de ligação, cabos), que permitem a condução de energia elétrica entre os componentes e a ligação com a rede elétrica e iii) funcionais (rotor, estator, eixo e rolamentos), responsáveis pelo efeito de transformação de energia elétrica em mecânica e fundamentais para a geração e transmissão de movimento

Figura 4 - Vista explodida de um motor elétrico comercial



Fonte: Obtido de [www.roncatec.com.br](http://www.roncatec.com.br) (2010).

Diversas configurações e modos construtivos desses componentes originam linhas comerciais de motores, destinados para uma série de aplicações. Requisitos como eficiência energética, ambiente e temperatura de trabalho definem o projeto elétrico e mecânico do motor. Nesse trabalho serão tratados apenas aspectos mecânicos, sem considerações acerca de características elétricas como potência e eficiência energética. Mais especificamente, o componente tratado será o prolongador de graxeira, que permite a lubrificação dos mancais e rolamentos pela parte externa da carcaça.

### **3.3 Graxeira**

Um componente importante é a graxeira, responsável pela injeção de graxa lubrificante nos rolamentos ou mancais de deslizamento, em contato direto com eixo de rotação. A graxeira é um componente estrutural da família dos elementos de fixação que tem como objetivo facilitar a lubrificação de peças, máquinas e equipamentos. Por esse bico é possível injetar graxa em eixos, suspensões, tuchos, buchas, rolamentos, mancais, articulações. Além disso, protege o ponto de lubrificação contra impurezas diversas e evita o retorno da graxa para o ambiente externo. Pode ser empregado em diversos projetos mecânicos de máquinas, para segmentos como agrícolas, automotiva, industrial entre outros. A maioria dos motores produzidos pela WEG possui um sistema de injeção de graxa que permite a lubrificação do motor sem a necessidade de desmontá-lo.

O projeto da graxeira possui um bico graxeiro e um prolongador, ambos metálicos, que permitem a injeção de graxa no eixo do rotor. Devido à quantidade de itens disponíveis, existem diversos comprimentos possíveis de prolongador, que permitem o posicionamento do bico na região mais adequada de acesso. Na Figura 5 podemos observar o posicionamento da graxeira no motor elétrico WEG Roller Table.

Figura 5 - Detalhe da posição da graxeira na tampa dianteira de um motor Roller Table



Fonte: Catálogo WEG (2020).

### 3.4 Funcionamento da graxeira

Em relação ao funcionamento do bico, o mesmo possui em seu interior uma esfera metálica tensionada por uma mola de retenção. A tensão da mola pode ser moderada ou alta, dependendo do tipo de engraxadeira a ser utilizada para injeção da graxa. Na aplicação, a pressão feita pela pistola empurra a esfera contra a mola, liberando um canal para a passagem do óleo. Após a tensão liberada, a esfera retorna à posição inicial, interrompendo o fluxo e fechando novamente o sistema. Na Figura 6 abaixo, são evidenciados os componentes do sistema, em corte lateral.

Figura 6 - Vista em corte do bico graxeiro



Fonte: Solidprize (2019).

### 3.5 Tipos de graxeira

Os tipos e formatos de bico de graxeira seguem um padrão de mercado, e podem ser do tipo: graxeira reta, graxeira angular 45° e graxeira angular 90°, que se refere ao posicionamento do bico em relação à rosca e o tubo prolongador, como ilustrado na Figura 7. Os tipos de rosca também seguem um padrão de mercado para montagem no prolongador destinado, conforme descrito nas normas internacionais da *International Standards Organization* (ISO), Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e *Deutsches Institut für Normung* (DIN).

Figura 7 - Graxeira 45°, 90° e reta, respectivamente



Fonte: CRV Industrial (2019).

Para a grande maioria dos motores elétricos comerciais, os tipos de graxa utilizadas e recomendadas são as graxas com espessante de poliureia, por apresentar elevada temperatura de operação e longa vida útil, e a frequência e quantidade a ser aplicada varia conforme o equipamento e as condições de uso. Com a especificação e o emprego da graxeira, é possível executar a lubrificação sem a necessidade de desmontar o equipamento ou enviar para uma assistência autorizada. Caso o equipamento seja utilizado em aplicações de temperatura elevada (uso contínuo acima de 100 °C) ou quando especificado pelo cliente, outras graxas podem ser utilizadas.

Os prolongadores podem ser fabricados em aço, borracha ou polímero, de acordo com o projeto do equipamento. De modo geral, a escolha do material do prolongador leva em consideração aspectos geométricos da construção (distância da tampa ao rolamento e sentido de alinhamento), compatibilidade com as graxas empregadas e classe de

temperatura para qual o motor é especificado. Os materiais metálicos são os mais utilizados pois permitem uma boa resistência química com os lubrificantes e podem operar em diversos ambientes severos, tais como locais de mineração, zonas marítimas e ambientes com temperaturas superiores a 200 °C, enquanto que os componentes de borracha são indicados para montagens complexas, pois permitem dobramento e moldagem do prolongador. As graxas com prolongador polimérico são mais indicadas para sistemas refrigerados, ou protegidos de ambientes agressivos.

No uso de materiais poliméricos para fabricação de prolongadores de graxa, as vantagens podem se manifestar pelas propriedades singulares dos mesmos, tais como:

- Baixo peso específico (0,9 g/cm<sup>3</sup> para o polipropileno a 2 g/cm<sup>3</sup> para resinas fenólicas), que leva a peças inerentemente mais leves;
- Maior liberdade de desenho, por meio de técnicas de processamento como injeção, extrusão, sopro e manufatura aditiva;
- Boa resistência química e a corrosão, quando respeitadas as condições ambientais e parâmetros da seleção de materiais.
- Redução de custo da peça final (comparando produtividade de técnicas como moldagem em injeção com a conformação mecânica em aços)
- Redução de operações (visto que os polímeros possuem bom acabamento no processamento e não necessitam de tratamentos superficiais posteriores, como zincagem)

As principais limitações do uso de materiais poliméricos em substituição aos metálicos estão relacionadas ao limite de temperatura de operação (associados a temperatura de distorção térmica e ponto de fusão), variações de propriedades mecânicas com a temperatura (associadas especialmente à temperatura de transição vítrea) e possíveis interações com a graxa lubrificante ou contaminantes externos.

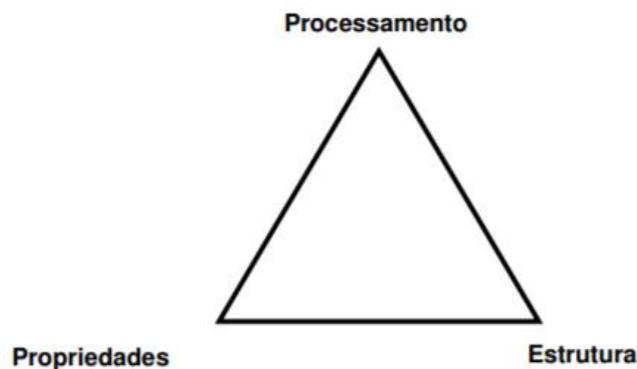
### **3.6 Seleção de materiais**

No desenvolvimento de componentes e seleção de materiais, diversos aspectos devem ser levados em consideração até que seja atingida a condição mais adequada, respeitando-se as etapas do projeto. No início do conceito, o *design* do componente está indefinido e as opções são amplas. Conforme o desenho se torna mais focado e toma forma, os critérios de seleção ficam mais precisos e a lista de materiais que pode atendê-

los estreita-se. Nessa etapa dados mais precisos são necessários e uma maneira diferente de analisar a escolha deve ser usada. O processo deve reconhecer a riqueza inicial da escolha, estreitar a mesma para um pequeno grupo, e prover a precisão e detalhe para qual a seleção final será feita. (ASHBY, 1999)

Os campos de estudo de Ciência e Engenharia de Materiais aprofundaram as relações entre estrutura e propriedades dos materiais e como os processos de fabricação afetam as demais características. Pode-se afirmar que os três fatores são relacionados, como exemplificado na Figura 8 - Relação entre Processamento, propriedades e estrutura dos materiais

Figura 8 - Relação entre Processamento, propriedades e estrutura dos materiais



Fonte: Adaptado de Tomasi e Botta, 1991.

Entender essas relações faz parte da atuação do engenheiro de Materiais e do escopo de seleção de materiais e design de produto. É necessário definir as condições de contorno de um projeto e sua otimização, e adequar o material a estes requisitos, bem como aos meios de produção disponíveis, de forma economicamente viável. Considerando um componente, que possui projeto, aplicação e ambiente definidos, deve ser adicionada uma nova dimensão ao triângulo da Figura 8, que é a dimensão da aplicação, e assim se define o campo de ação da seleção de materiais, conforme Figura 9.

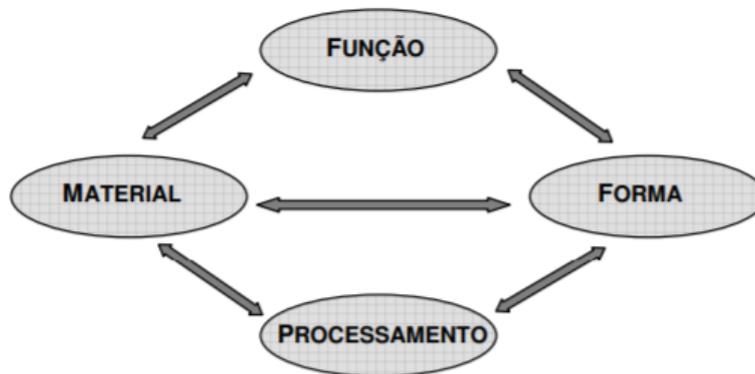
Figura 9 - Campo de ação da seleção de materiais



Fonte: Adaptado de Tomasi e Botta, 1991.

Para Ashby (1991), o processo de seleção de materiais deve considerar a dimensão de Função, já que a mesma dita a escolha do material, e a dimensão de Forma, que é escolhida para que um material realize uma função. O processamento dependerá do material escolhido e influencia na escolha da forma para que seja realizada uma função. Essas relações estão exemplificadas na Figura 10 - Fatores e relações presentes no campo da seleção de materiais

Figura 10 - Fatores e relações presentes no campo da seleção de materiais



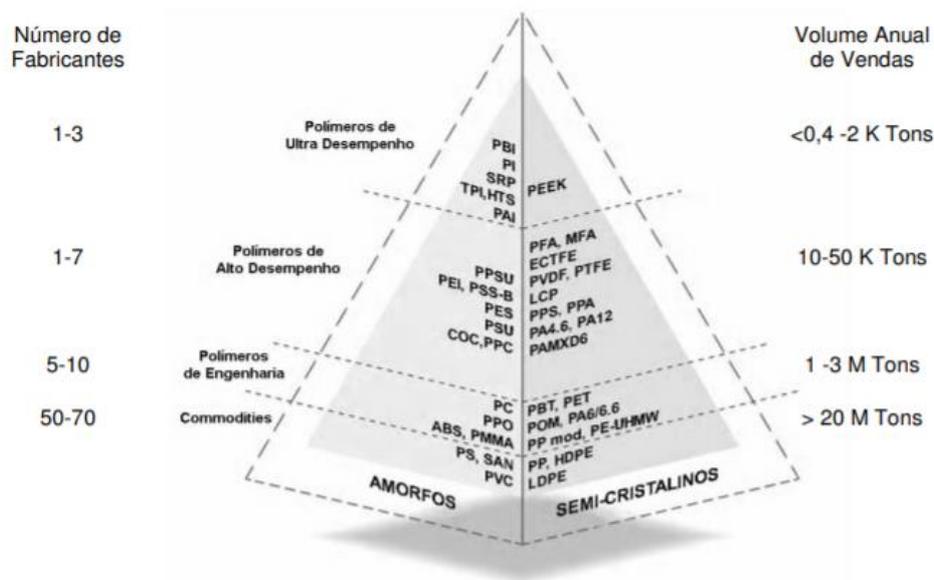
Fonte: Adaptado de Ashby (1991)

Em relação ao prolongador de graxeira, a forma e função já estão bem definidos pelo componente atual, e a seleção de materiais possui as opções de variar apenas o material (polimérico em substituição ao metálico), e o processamento utilizado, que é a conformação mecânica para os metais, e pode ser substituída por extrusão ou injeção no componente polimérico.

### 3.7 Polímeros termoplásticos

Segundo Canevarolo (1990), polímeros termoplásticos são polímeros que, quando submetidos a um aumento substancial de temperatura e pressão, amolecem e fluem, podendo ser moldados nessas condições e, após o alívio da solicitação, solidificam assumindo a forma do molde. O polímero pode ser reprocessado a partir de novas aplicações de temperatura e pressão, tornando-os materiais recicláveis. Os polímeros termoplásticos possuem moléculas com cadeia linear ou ramificada, podendo ser semicristalinos ou amorfos, com ligações intramoleculares primárias e intermoleculares secundárias. Além disso, a categoria pode ser dividida em termos do desempenho mecânico, como ilustrado na Figura 11. A posição exata de cada polímero na classificação pode variar considerando critérios de propriedades mecânicas, óticas ou de custo, mas a ordenação de classes é a mesma.

Figura 11 - Pirâmide dos polímeros destacando as principais classes quanto à estrutura e desempenho, consumo e número de fabricantes



Fonte: Adaptado de Solvay Advanced Polymers (2016).

- Termoplásticos convencionais (*Commodities*)

Termoplásticos convencionais são polímeros de baixo custo, baixo nível de exigência mecânica, alta produção e facilidade de processamento. Esses são os polímeros de maior produção, representando 90% da produção total de polímeros no mundo. Como exemplos de *commodities* podemos citar o poliestireno (PS), as poliolefinas (PE, PP) e o poli(cloreto de vinila) (PVC).

- Termoplásticos especiais ou *mid-range*

Representa uma subdivisão dos polímeros *commodities* com custo e propriedades levemente superiores aos convencionais, geralmente com propriedades ou características específicos para a aplicação. Nessa classe, podemos considerar os copolímeros Acetato de Vinila (EVA), Estireno-Acrilonitrila (SAN), assim como o Polimetilmetacrilato (PMMA).

- Termoplásticos de Engenharia

Os termoplásticos de engenharia são utilizados para fabricação de componentes mecânicos como engrenagens, dispositivos de encaixe e travamento e indústria eletrônica e automobilística, portanto são materiais de alta rigidez, tenacidade e estabilidade dimensional. Como exemplo, podemos citar as poliamidas, poliésteres (Poli(etileno Tereftalato) PET e Poli(Tereftalato de Butileno) PBT), policarbonato (PC) e o poli(acrilonitrila-co-butadieno-co-estireno) (ABS).

- Termoplásticos de engenharia especiais ou de alto desempenho

Os termoplásticos de alto desempenho são utilizados em aplicações de rigidez em alta temperatura (geralmente acima de 150°C). Essa estabilidade térmica é obtida em cadeias complexas e de alta massa molar. Podem ser exemplos os polímeros contendo enxofre (polisulfonas), poliimidas, alguns poliuretanos (PU) e o poli(éter-éter-cetona) (PEEK).

### **3.8 Polímeros termoplásticos para desenvolvimento de graxeira**

No trabalho foram elencados três polímeros termoplásticos possíveis para a fabricação do componente da graxeira, considerando questões de propriedades térmicas, processamento, custo, a já presente utilização em motores elétricos e disponibilidade de mercado, conforme tópicos a seguir:

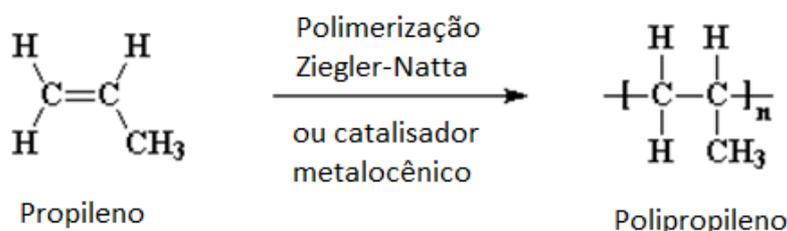
- Polipropileno homopolímero (PP).

O polipropileno é um polímero linear da classe das poliolefinas obtido a partir da polimerização do monômero propileno, como ilustrado na reação da Figura 12. É um dos polímeros termoplásticos mais utilizados pela indústria, com uma diversidade de aplicações que incluem embalagens rígidas e flexíveis, em para-choques de automóveis, eletrodomésticos, brinquedos e material hospitalar devido às propriedades de boa

resistência mecânica e flexibilidade em temperatura ambiente, baixa densidade (da ordem de 0.86 g/cm<sup>3</sup> a 0.92 g/cm<sup>3</sup>), baixo custo e facilidade de moldagem (MANO e MENDES, 2004).

A indústria petroquímica disponibiliza vários tipos de polipropilenos comerciais, tais como: PP homopolímero, PP copolímero heterofásico (copolímero em bloco de propileno e etileno) e PP copolímero randômico (copolímero randômico de propileno e etileno). O PP homopolímero contém apenas o monômero propileno em sua cadeia molecular e, sendo predominantemente de configuração isotática, pode atingir um grau de cristalinidade de até 70% (BATALIOTTI *apud* NASCIMENTO, TIMÓTEO e RABELLO, 2016).

Figura 12 - Obtenção do polipropileno



Fonte: Adaptado de Polymer Science Learning Center (2003).

As principais propriedades de interesse do polipropileno estão elencadas na Tabela 1. A baixa densidade apresentada pelo polipropileno o torna indicado para projetos de redução de peso, e a temperatura de transição vítrea de -18 °C indica que o mesmo é flexível em temperatura ambiente.

Tabela 1 - Propriedades de interesse do polipropileno

<b>Propriedade</b>	<b>Método</b>	<b>Unidade</b>	<b>Valores</b>
<i>Densidade</i>	ASTM D792	g/cm <sup>3</sup>	0,91
<i>Temperatura de fusão</i>	DIN 53736	°C	165
<i>Temperatura de transição vítrea</i>	DIN 53736	°C	- 18
<i>Tensão de escoamento à tração</i>	ASTM D638	MPa	35

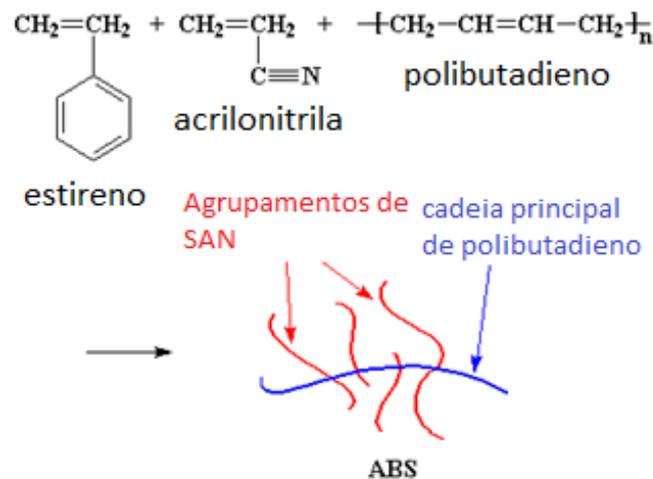
Fonte: Adaptado de GRUPO RPF (2018).

- Poli(acrilonitrila-co-butadieno-co-estireno) (ABS).

O ABS, considerado um termoplástico de engenharia, é um copolímero formado pelos monômeros de Acrilonitrila, Butadieno e Estireno em processo de polimerização em

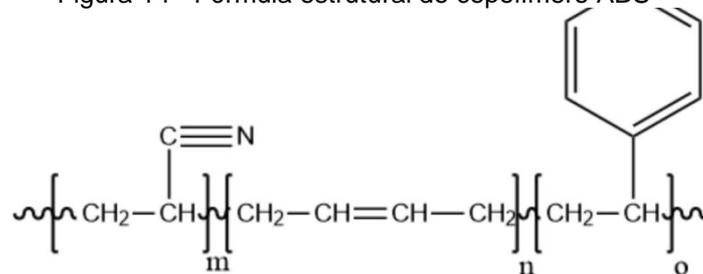
emulsão ou em massa, resultando em uma longa molécula, conforme reação da figura 13. Devido à alta quantidade de ramificações, o polímero de ABS tem estrutura predominantemente amorfa. As proporções de cada monômero podem variar, porém a composição usual é de 50% de estireno, e o restante distribuído entre demais monômeros. (MANO e MENDES, 2004).

Figura 13 - Reação de formação da estrutura do ABS



Fonte: Adaptado de Polymer Science Learning Center (2003).

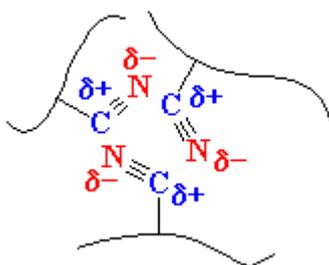
Figura 14 - Fórmula estrutural do copolímero ABS



Fonte: Adaptado de Miranda (2016).

Os grupos nitrila presentes nas cadeias da porção estireno acrilonitrila (SAN) são altamente polares e geram elevada atração intra e intermolecular com outras cadeias de SAN. Esse efeito permite às cargas opostas se estabilizar, conforme ilustrado na Figura 15. A forte atração intermolecular eleva a resistência mecânica e estabilidade do polímero formado. Além disso, a molécula de polibutadieno garante resistência ao impacto por ser altamente flexível a temperatura ambiente ( $T_g$  de aproximadamente  $-80\text{ }^\circ\text{C}$ ). Algumas propriedades de interesse industrial para o polímero ABS estão exibidas na Tabela 2.

Figura 15 - Interações polares entre moléculas de acrilonitrila



Fonte: Polymer Science Learning Center (2003).

Tabela 2 - Propriedades de interesse do polímero ABS

<b>Propriedade</b>	<b>Unidade</b>	<b>Valores</b>
<i>Densidade</i>	g/cm <sup>3</sup>	1,20
<i>Temperatura de transição vítrea (fração SAN)</i>	°C	108
<i>Tensão de escoamento à tração</i>	MPa	45

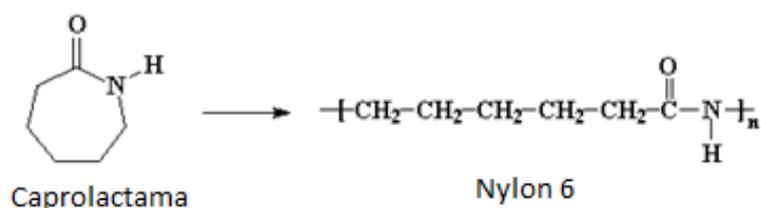
Fonte: Adaptado de MatWeb (2020).

- Poliamida 6 (PA6)

As poliamidas são polímeros de interesse comercial comumente utilizados na forma de fibras e conhecidos pelo nome comercial *Nylon*. A principal diferença entre a Poliamida 6 e a equivalente mais conhecida Poliamida 6,6 está na quantidade de átomos de carbono na cadeia principal do monômero e a forma de obtenção.

Enquanto que a poliamida 6, 6 é obtida a partir de dois monômeros (ácido adípico e hexametileno diamina) por policondensação, a PA6 é sintetizada em polimerização por abertura de anel a partir de um único reagente, a caprolactama. Essa diferença na obtenção caracteriza uma vantagem da PA6 em relação à cadeia de fornecimento, visto que um dos precursores do hexametileno diamina possui poucos fabricantes e está sujeita à escassez de mercado. A reação simplificada de síntese da poliamida 6 é ilustrada na Figura 16 abaixo.

Figura 16 - Obtenção da PA 6 a partir da caprolactama



Fonte: Polymer Science Learning Center (2003).

A PA6 é um polímero de interesse industrial por sua elevada resistência mecânica e química, boa resistência à fadiga, abrasão e ao impacto. Suas principais aplicações incluem a fabricação de engrenagens, material esportivo, conectores elétricos e componentes eletrodomésticos (MANO e MENDES, 2004). Em aplicações industriais, a poliamida é geralmente utilizada reforçada com teor de 10% a 35% de fibras de vidro.

A poliamida 6 não reforçada exibe resistência ao escoamento na tração da ordem de 50 a 90 Mpa, densidade próxima de outros polímeros comerciais, na ordem de 1,13 g/cm<sup>3</sup>, e uma Tg de 60 °C, sendo rígida a temperatura ambiente, com temperatura máxima de uso prolongado entre 80 a 120 °C, a depender do *grade* utilizado, qualificando a mesma para substituição do componente sugerido, conforme resumido na Tabela 3.

Tabela 3 – Propriedades de interesse para a PA6 não reforçada

<b>Propriedade</b>	<b>Unidade</b>	<b>Valores</b>
<i>Densidade</i>	g/cm <sup>3</sup>	1,13
<i>Resistência ao escoamento sob tração</i>	Mpa	50 – 90
<i>Temperatura de transição vítrea</i>	°C	60
<i>Temperatura máxima de uso contínuo</i>	°C	80 – 120
<i>Ponto de fusão</i>	°C	223

Fonte: Adaptado de Omnexus (2010).

### 3.9 Tipos de graxas comerciais

De acordo com Carreteiro e Belmiro (2006, apud RATÃO, 2013, p. 25), as graxas são caracterizadas em função dos três elementos básicos da composição: o fluido lubrificante, o espessante e os aditivos. O fluido lubrificante presente nas graxas é uma espécie de óleo e pode ser do tipo mineral, graxo ou sintético:

- Óleos minerais

São óleos derivados do petróleo e suas propriedades se relacionam à natureza do óleo de origem e o processo de refino empregado. Os mais utilizados são do tipo parafinas (constituídos de alcanos com cadeias lineares), naftalênicas (misto entre alcanos e aromáticos) e de tipo cadeia aromática (RATÃO, 2013).

- Óleos graxos

São óleos vegetais e animais compostos por cadeias mono ou poli-insaturadas, com alto grau de ácidos graxos que possuem altíssima lubricidade e aderência em superfícies metálicas, devido à alta polaridade. Atualmente esse tipo de óleos foi majoritariamente substituído por óleos minerais, principalmente pelo motivo de degradarem facilmente sob temperatura ou pressão (RATÃO, 2013).

- Óleos sintéticos

Esse tipo de óleo é obtido através de síntese orgânica com propriedades lubrificantes variadas. Entre os mais utilizados estão: ésteres de ácidos dibásicos, ésteres de organofosfatos, ésteres de silicatos, silicones, poliolefinas, poliglicóis e polifeniléteres. Os óleos sintéticos geralmente têm propriedades funcionais melhores que óleos minerais e graxos, por possuir cadeias mais estáveis e maior resistência a degradar sob temperatura e pressão. Em contrapartida, seu valor comercial é muito superior (RATÃO, 2013).

Os espessantes utilizados na composição são agentes modificadores da estrutura do fluido, elevando a sua viscosidade. O efeito de aumento da viscosidade ocorre pois o espessante é insolúvel no lubrificante e cria um sistema do tipo coloidal. A relação entre quantidade de agente espessante e consistência varia de acordo com o tipo de espessante utilizado, porém a consistência de uma graxa será sempre uma função crescente da concentração da fase dispersa. A natureza química e concentração do espessante confere características como: consistência, temperatura de trabalho, e comportamento na presença de água e temperaturas elevadas. (LUBARSA, 1970 apud RATÃO, 2013, p. 26). Os principais espessantes utilizados são os do tipo sabão metálico e não sabão.

- Espessantes tipo sabão metálico

Esses sabões são obtidos pela neutralização de um ácido graxo orgânico como, por exemplo, o ácido oleico e ácido esteárico, por um produto metálico alcalino como hidróxido

de sódio, lítio alumínio ou bário em uma reação conhecida como saponificação. Um exemplo da reação de saponificação entre o ácido esteárico e o hidróxido de sódio, formando um estearato (sabão) e um glicerol (RATÃO, 2013).

- Espessantes não sabão:

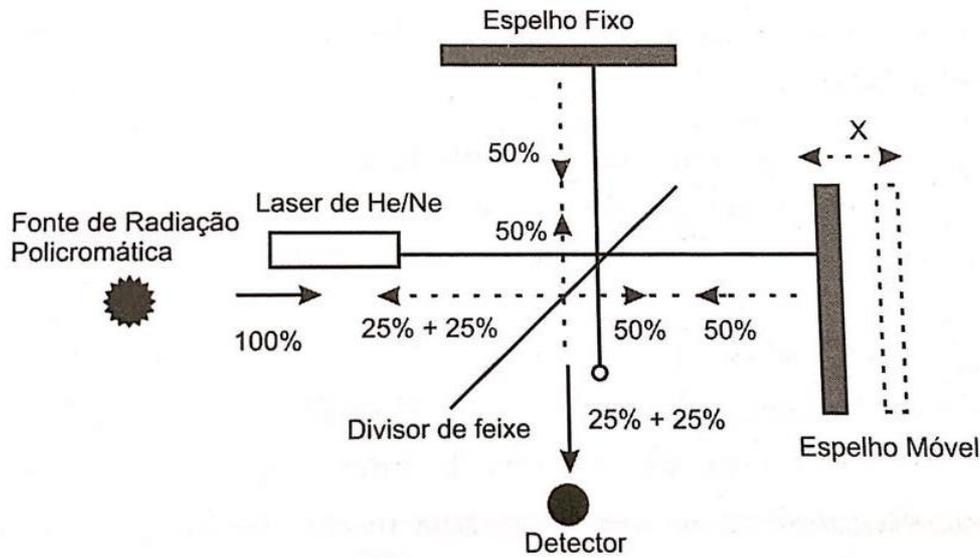
São compostos orgânicos ou inorgânicos insolúveis em todas as temperaturas, porém, são capazes de ligar-se ao óleo devido a sua estrutura de superfície porosa. Os espessantes não sabão mais utilizados são as poliuréias (PUR), argilas oleaginosas (bentonitas), gel de sílica e plásticos como o poli(tetrafluoroetileno) (PTFE) e polietileno (PE) (RUNGE, 1994 apud RATÃO, 2013, p. 26). Os espessantes à base de poliureia destacam-se por apresentar alto ponto de gota (temperatura na qual a graxa passa do estado semi-sólido para o líquido), boa estabilidade térmica, alta durabilidade, boa resistência a água e boa proteção contra a corrosão (RATÃO, 2013).

### **3.10 Técnicas de caracterização de materiais**

#### 3.10.1 Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)

De acordo com Canevarolo (2004), a técnica de Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier é amplamente utilizada para caracterização de materiais poliméricos, e atua pela interação da radiação eletromagnética com a matéria. De modo simplificado, ao emitir uma radiação infravermelho (IR) em uma amostra, a radiação será absorvida ou refletida conforme as vibrações normais dos átomos e ligações presentes naquela molécula, permitindo uma caracterização com base nas ligações moleculares. No equipamento, uma fonte de luz emite um feixe contínuo em uma ampla faixa espectral da região IR dirigido a um divisor de feixe, que divide o feixe em duas partes iguais, com a primeira metade refletindo na direção perpendicular à incidência em direção a um espelho plano fixo, e a outra metade transmitindo na direção da incidência a um espelho plano móvel, que percorre uma distância de varredura. As componentes de radiação utilizadas pelo interferômetro são a metade vinda do espelho fixo e a metade vinda pelo espelho móvel. Estas componentes de luz sofrem recombinação no divisor de feixe, ocorrendo interferências construtivas se as duas radiações estiverem em fase, ou interferência destrutivas se as radiações estiverem defasadas em  $180^\circ$ . A radiação resultante dessa interação passará pelo compartimento de amostra e será então focalizada no detector. O esquema descrito está ilustrado na Figura 17.

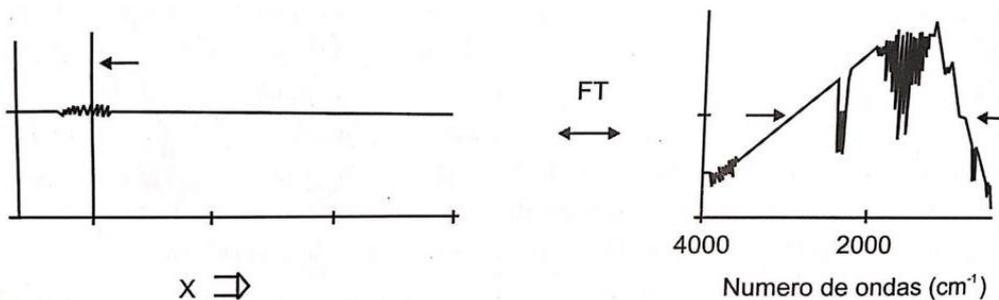
Figura 17 - Princípio de funcionamento do espectômetro FTIR



Fonte: Adaptado de Canevarolo (2004).

O detector captará o somatório das interferências durante o deslocamento do espelho móvel, e o perfil da figura observada é determinado de interferograma. O equipamento FTIR, realiza então uma operação matemática de transformada de Fourier, e se obtém o espectro IR natural, que é o perfil espectral de intensidade pelo número de ondas, como demonstrado na Figura 18. Dessa operação matemática advém o nome de espectroscopia infravermelho por transformada de Fourier (CANEVAROLO, 2004).

Figura 18 - Espectrograma natural e resultado após tratamento pela transformada de Fourier



Fonte: Adaptado de Canevarolo (2004).

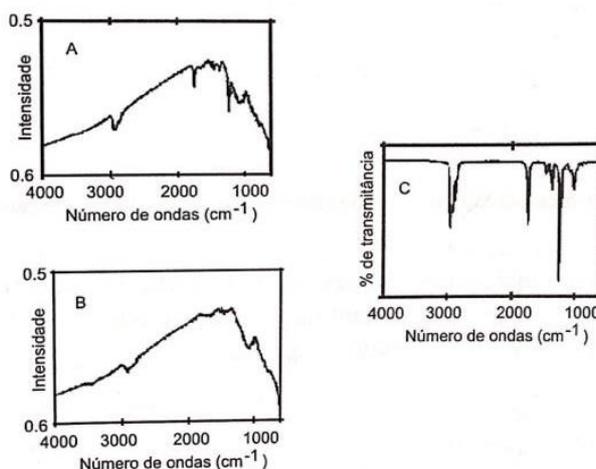
No espectrômetro FTIR pode-se efetuar várias varreduras e acumular os interferogramas correspondentes. Esse processo é conhecido por coadição, e a vantagem de utilizar o processo é que o mesmo aumenta significativamente a razão sinal/ruído (S/N, *signal to noise*), segundo a expressão:

$$\frac{S}{N} \propto (n)^{1/2}$$

onde  $n$  é um número de varreduras. Assim, quando se efetuam 100 varreduras, a razão S/N sofrerá um aumento de 10 vezes em relação a um espectro de uma única varredura (CANEVAROLO, 2004).

Após efetuar a transformada de Fourier de um interferograma, obtém-se o espectro natural do ensaio. O espectro de feixe obtido sem a amostra corresponde ao espectro de referência (*background*). O espectro de referência contém informações do aparelho (fonte, divisor de feixe, detector, dos espelhos, do suporte da amostra, da matriz da amostra) e do ambiente no compartimento de amostra (presença de vapor de água e CO<sub>2</sub> do ar). Ao obter o espectro de feixe da amostra, este espectro conterá todas as informações do espectro de referência, e também informações da amostra. A Figura 19, adaptada de CANEVAROLO, demonstra as operações efetuadas pelo computador nos espectros de referência (à esquerda) para obter o espectro IR normal de uma amostra (Razão entre espectro da amostra e de referência).

Figura 19 - Operações realizadas nos espectrogramas para obter o espectro da amostra. Espectro da amostra (A), espectro de referência (B) e razão entre referências (C).



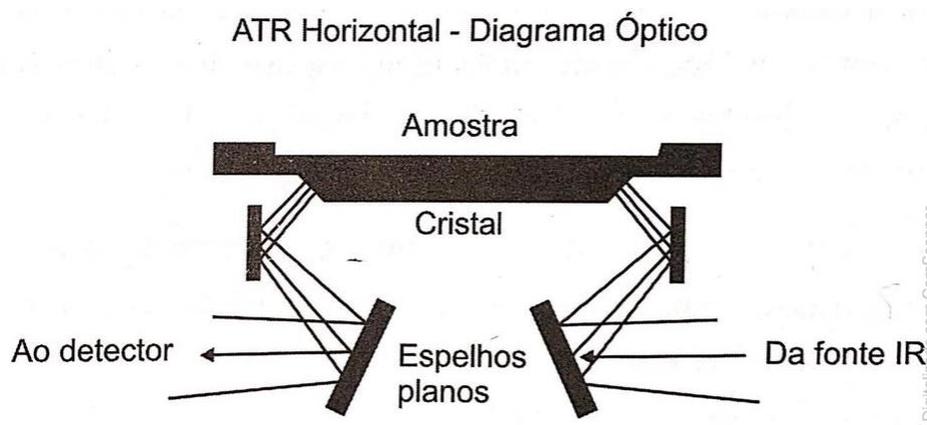
Fonte: Adaptado de Canevarolo (2004).

### 3.10.2 Refletância Total Atenuada (ATR)

O acessório ATR é bastante utilizado em análises de FTIR para se obter espectros de boa qualidade de polímeros nas formas de filme, folha plana, chapa plana, líquido ou em solução, nos quais a amostra deve estar em perfeito contato físico com a superfície do cristal. O acessório é montado no compartimento de amostra do espectrômetro,

normalmente adaptado à configuração específica do equipamento conforme o fabricante. O elemento principal acessório é o cristal, cujo material deve ser transparente à radiação infravermelho, apresentar alto índice de refração na faixa do infravermelho e um determinado ângulo de incidência da radiação. Além do cristal, o acessório possui dois espelhos planos, um deles orientando o feixe de incidência ao cristal, e o outro orientando o feixe que sai do cristal até o detector (CANEVAROLO, 2004). A Figura 20 abaixo demonstra o esquema óptico de um acessório ATR horizontal típico.

Figura 20 - Esquema óptico do acessório de ATR



Fonte: Adaptado de Canevarolo (2004).

O feixe infravermelho incidente no cristal, a um dado ângulo de incidência, atinge a superfície e sofre o fenômeno de reflexão total, devido ao alto índice de refração do cristal em relação ao meio (amostra ou ar). Assim, o feixe IR propaga-se ao longo do cristal até sair na extremidade oposta. O cristal funciona como um guia de onda do feixe IR. O feixe IR, ao atingir a superfície do cristal em contato com a amostra, penetra na superfície da mesma, e caso a amostra absorver parte da radiação, esta fração de energia será detectada. A radiação IR que penetra na amostra e é atenuada é chamada de onda evanescente. O termo refletância total atenuada deriva desse efeito. Dado a natureza do fenômeno, o contato físico entre a amostra e o cristal é de fundamental importância. Além disso, a superfície do cristal deve ser limpa e sem ranhuras na superfície. Um dispositivo deve ser adaptado para permitir aplicação de pressão sobre a amostra, a fim de melhorar o contato físico e a qualidade do espectro (CANEVAROLO, 2004).

O acessório ATR é muito prático, rápido, não destrói a amostra e dispensa a preparação prévia de amostra, sendo por isso um modo bastante difundido de obtenção de

espectros IR de polímeros. O espectro de referência é obtido com o acessório contendo o cristal limpo, seco e sem amostra.

### 3.10.3 Calorimetria exploratória diferencial (DSC)

De acordo com Canevarolo (2004), Calorimetria exploratória diferencial (do inglês *Differential scanning calorimetry* ou DSC) se refere a uma técnica de análise térmica que mede o fluxo de calor de uma amostra (em relação a uma referência), resultante de reações endotérmicas ou exotérmicas, durante aquecimento ou resfriamento. Esses instrumentos são divididos nas configurações de DSC de fluxo de calor e DSC de compensação de potência. Os limites de temperatura podem variar entre os equipamentos, mas geralmente encontram-se na faixa de -180 a 725°C

O DSC de fluxo de calor é uma técnica derivada da análise térmica diferencial, que mede a diferença de temperatura de uma amostra (A) e um material de referência (R), conforme a expressão  $T = T_a - T_R$ , enquanto ambos são submetidos a uma programação controlada de temperatura. Neste tipo de DSC, a amostra e a referência são colocadas em cápsulas idênticas sobre um disco termoelétrico e aquecidos por uma única fonte de calor. O calor é transferido para as cápsulas de amostra e referência por meio do disco, com o fluxo entre as cápsulas controlado por meio de termopares conectados ao disco, uma vez que  $\Delta T$ , é proporcional à variação de entalpia, à capacidade calorífica e à resistência térmica total do fluxo calórico (CANEVAROLO, 2004).

O DSC de compensação de potência é um calorímetro que mede diretamente a energia envolvida nos eventos térmicos. A amostra e a referência são aquecidas ou resfriadas separadamente em fornos idênticos. O princípio de funcionamento do equipamento pressupõe que a amostra e a referência sejam mantidas em condições isotérmicas. Assim, se a amostra sofre alteração da temperatura promovida por um evento endotérmico ou exotérmico, os termopares detectam a diferença de temperatura entre a amostra e a referência, e o equipamento modifica a potência de um dos fornos a fim de igualar a temperatura de ambos. A diferença entre o calor depositado na amostra e na referência ( $dH/dt$ ) é registrada em função da temperatura (T) ou do tempo (t) (CANEVAROLO, 2004).

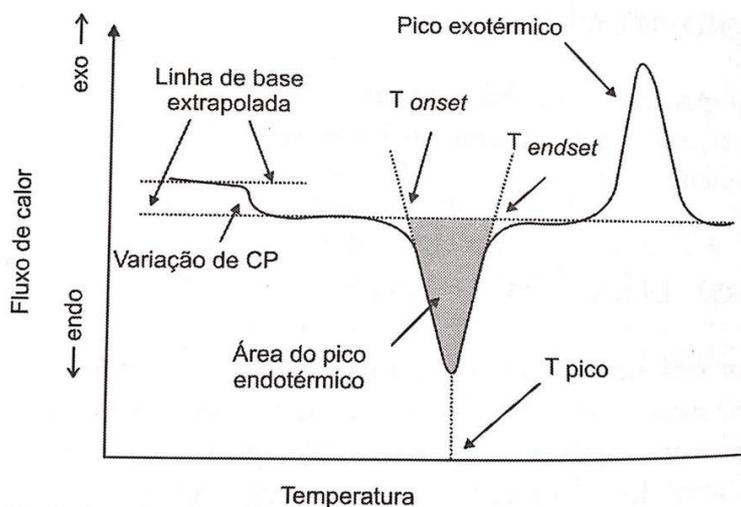
Assim como o ensaio de FTIR, o equipamento DSC realiza a comparação entre uma linha base de referência e a curva obtida pelo ensaio com uma amostra, utilizando as mesmas condições experimentais (programação de temperatura, atmosfera do forno e

vazão de gás). A linha base ideal é uma reta paralela ao eixo X em toda a faixa de temperatura analisada, entretanto, variações no sentido positivo ou negativo do sinal podem ocorrer, e estão associadas com a construção do forno, vazão do gás de arraste, desgaste do equipamento, material residual depositado sobre o sensor ou a combinação dos mesmos. Outras alterações da linha base podem ser decorrentes de variação de calor específico da amostra, perda de massa da amostra, ou alteração da programação de temperatura do equipamento (CANEVAROLO, 2004).

Os eventos térmicos desejados que geram modificações em curvas de DSC podem ser transições de primeira e de segunda ordem. As transições de primeira ordem apresentam variação de entalpia – reação endotérmica ou exotérmica – e geram picos nas curvas obtidas do equipamento. Alguns exemplos de reações endotérmicas em polímeros são: fusão, perda de massa da amostra (por vaporização de água, aditivos ou produtos voláteis de reação), dessorção e reações de redução. Eventos exotérmicos em polímeros podem ser: cristalização, reações de polimerização, cura, oxidação, degradação oxidativa, adsorção, entre outros. As transições de segunda ordem caracterizam-se pela variação da capacidade calorífica, porém sem variações de entalpia, portanto, essas reações não geram picos nas curvas de DSC, apresentando um deslocamento da linha base em forma de S (CANEVAROLO, 2004). Um exemplo característico de transição de segunda ordem é a transição vítrea.

No equipamento DSC de compensação de potência, os eventos endotérmicos têm variação positiva de entalpia ( $\Delta H > 0$ ) e geram picos ascendentes na curva. Eventos exotérmicos por sua vez geram picos descendentes. Um exemplo de representação de curva de DSC de fluxo de calor é ilustrado na Figura 21, com legendas e títulos para os eixos.

Figura 21 - Representação de uma curva DSC demonstrando as possíveis leituras



Fonte: Adaptado de Canevarolo (2004).

Alguns fatores que interferem nas curvas de DSC e podem ser manipulados a fim de aumentar a confiabilidade e reprodutibilidade dos dados são fatores instrumentais e característicos da amostra, resumidos na Tabela 4 e Tabela 5.

Tabela 4 - Fatores instrumentais que influenciam as curvas de DSC

Fatores	Variáveis	Aplicações	Efeito
Razão (ou taxa) de aquecimento	Lenta	Alta resolução	Melhor separação de eventos. Picos menores e mais largos
	Rápida	Alta sensibilidade, detecção de pequenas transições	Baixa resolução de eventos consecutivos. Picos mais finos e com maior amplitude
Atmosfera do forno	Estática (sem gás fluente)	Sistemas fechados ou sem liberações de voláteis	Acúmulo de voláteis sobre a amostra. Temperatura dos eventos mais alta que atmosfera dinâmica
	Dinâmica	Quando há liberação de voláteis que precisam ser removidos	Arrasta voláteis para fora da célula DSC, mantendo a atmosfera do forno constante
Tipo de gás fluente	Inerte (N <sub>2</sub> , He, Ar)	Não interfere nas reações ou transições da amostra	Atua como gás de arraste
	Reativo (ar, O <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> )	Reações de oxidação ou redução da amostra	Interação de gás com amostra
Condutividade térmica do gás de arraste	Alta (He, H <sub>2</sub> )	Separação de eventos em temperaturas próximas	Picos de menor área e maior resolução
	Baixa (N <sub>2</sub> , Ar)	Transições pequenas	Aumenta a área dos picos e a sensibilidade.

Fonte: Adaptado de Canevarolo (2004).

Tabela 5 - Características da amostra que influenciam os diagramas de DSC

<b>Fator</b>	<b>Variáveis</b>	<b>Características</b>	<b>Efeito</b>
<i>Massa</i>	Pequena	Melhora a resolução de picos próximos. É possível combinar com razões de aquecimento mais altas	Linha base do diagrama mais alta. Menor área de picos próximos. Deslocamento dos picos para menores temperaturas.
	Grande	Picos maiores possuem baixa resolução.	Deslocamento dos picos para temperaturas mais altas. Maior área de picos próximos. Linha base do diagrama mais baixa
<i>Forma</i>	Corpo único	Continuidade da transmissão de calor.	Menor superfície da amostra favorece detecção de eventos fracos
	Pó	Descontinuidade eleva a temperatura do evento térmico.	Maior superfície total da amostra aumenta a resolução dos picos
	Fibras	Deve ser cortada em pedaços e comprimida dentro da cápsula	Melhora contato com cápsula e sensor. Aumenta sensibilidade
	Pasta	Espalhar uniformemente no fundo da cápsula	Aumenta a resolução.

Fonte: Adaptado de Canevarolo (2004).

Algumas transições de polímeros e características que podem ser extraídas da curva DSC são: a temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ), a alteração na capacidade calorífica com o aumento da temperatura, e as temperaturas de fusão e cristalização, detalhadas abaixo:

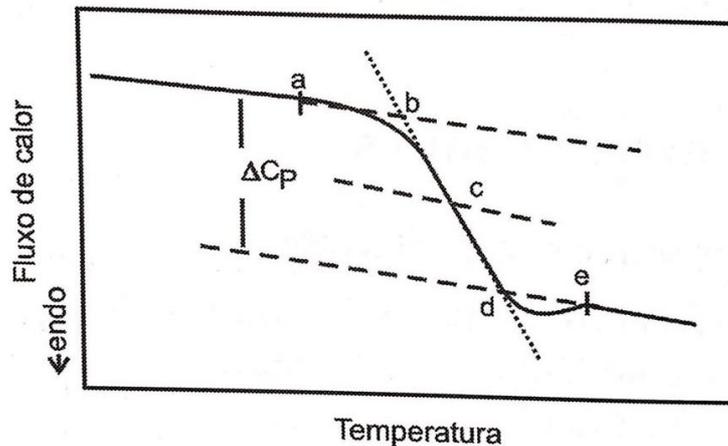
- Temperatura de transição vítrea ( $T_g$ )

A temperatura de transição vítrea é aquela na qual se inicia o movimento de segmentos da cadeia polimérica. A passagem do estado vítreo (mais ordenado) para um estado “borrachoso” (mais flexível e menos ordenado) é uma transição de segunda ordem, portanto acompanhado de variação na capacidade calorífica da amostra, e aparece como uma variação da linha base na curva DSC.

O procedimento para determinação da  $T_g$  por DSC está descrito em normas internacionais como a ASTM E 1356 (Método Padronizado de teste para atribuição das temperaturas de transição vítrea por calorimetria exploratória diferencial), entre outras. Na Figura 22 está representada a interpretação da curva para essa transição. Os pontos “a” e “e” correspondem ao início e fim do evento de variação de calor específico da amostra. Entretanto, a faixa de temperatura que caracteriza a transição vítrea de um polímero está contida entre os pontos “b” e “d”. Em geral, quando a  $T_g$  é citada como uma temperatura

única, refere-se ao ponto “c” intermediário entre as temperaturas de início e conclusão do evento.

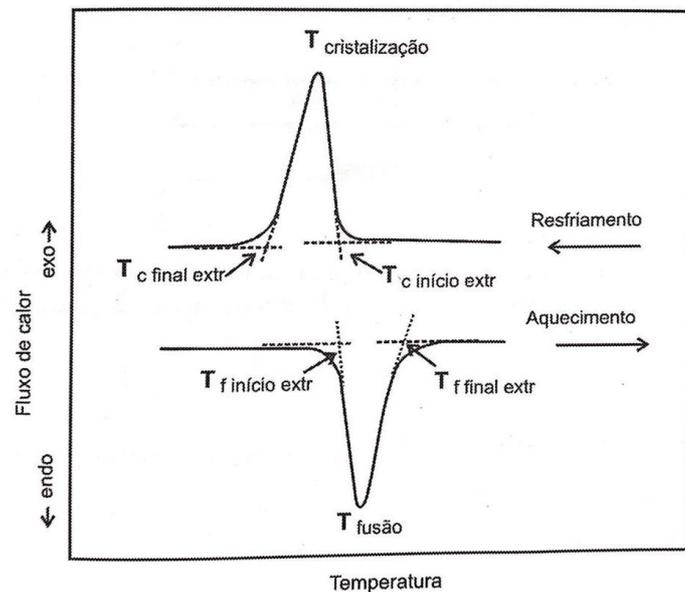
Figura 22 - Determinação da  $T_g$  através da curva DSC



Fonte: Adaptado de Canevarolo (2004).

A presença de uma “aparente fusão” associada à transição vítrea observada em uma curva de DSC é devida à relaxação molecular do polímero, que geralmente aparece como uma transição endotérmica próxima ao final da transição vítrea. Tensões acumuladas na amostra como resultado de processamento ou tratamento, denominados como histórico térmico são liberadas quando o material é aquecido, e por essa razão, geralmente se utiliza um duplo aquecimento no ensaio de DSC a fim de apagar o histórico térmico do material ensaiado. Algumas interpretações típicas da curva de DSC para os fenômenos de fusão e cristalização estão demonstrados na Figura 23

Figura 23 - Picos de fusão e cristalização em uma curva DSC representando as temperaturas de início e conclusão da transição.



Fonte: Adaptado de Canevarolo (2004).

- Grau de cristalinidade

A cristalinidade de polímeros geralmente é da ordem de 20 a 70% e pode ser determinada no ensaio de DSC, empregando-se a relação:

$$X = \frac{[\Delta H_f]}{[\Delta H_f^\circ]} * 100$$

Onde  $[\Delta H_f]$  é o calor de fusão da amostra,  $[\Delta H_f^\circ]$  é o calor de fusão de um polímero hipoteticamente 100% cristalino. Na Tabela 6, adaptada de Canevarolo (2004, *apud* Kaiserberger e Mettler, 1994) são demonstrados o grau de cristalinidade para alguns polímeros comerciais.

Tabela 6 - Características de alguns polímeros semicristalinos

Polímero	Abreviatura	Temperatura de fusão (°C)	$\Delta H_f^\circ$ (J/g)	Cristalinidade (%)
Polietileno de baixa densidade	PE-BD	83...105	140	40...68
		105...120	140	45...75
		120...130	140	65...85
Polietileno de alta densidade	PE-AD	130...141*	(218...310) 293*	75...95
Polipropileno	PP	112...208	207...209*	40...70
		160...165*		60...70
Poliestireno	PS	(225...250), 243*	(80...96) 86*	Depende do grau de cristalinidade
Poliamida 6	PA 6	220...260	(160...230) 190*	20...45
Poliamida 11	PA 11	180...200	224	20...40
Poliamida 66	PA 66	(250...280) 255*	(165...300) 195*	35...60
Poli(tereftalato de etila) semicristalino.	PET	(250...285), 255*	(73...145) 140*	...40
Poli(tetraflúor etileno)	PTFE	(190...355) 327*	82*...115	55...70
Poli(cloreto de vinila)	PVC	(212...310) 273*	(44...202) 176*	Depende dos tipos cristalinos

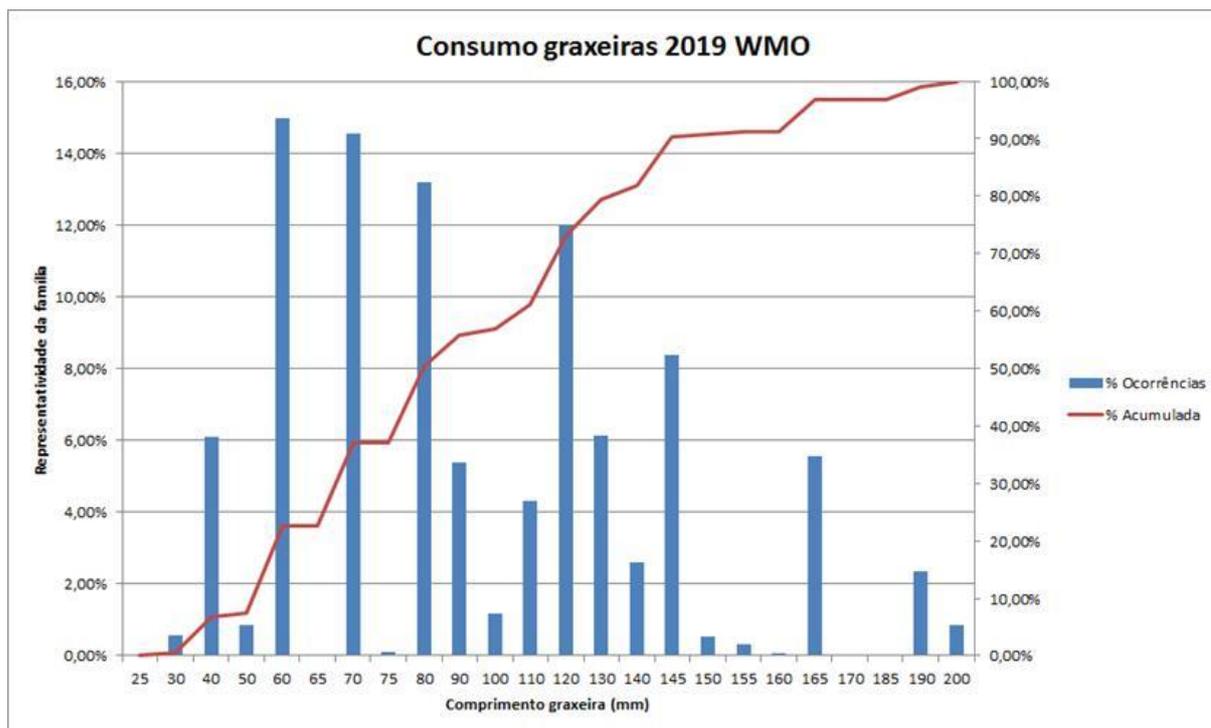
Fonte: Adaptado de Canevarolo (2004, *apud* Kaiserberger e Mettler, 1994).

## 4. METODOLOGIA

### 4.1 Panorama Atual de graxeiras

As graxeiras metálicas utilizadas nos produtos WEG no escopo desse trabalho são fabricadas em diversos comprimentos de prolongador, que variam conforme o tamanho da carcaça de motor em que a mesma será montada. Quanto maiores as carcaças, maior deverá ser o comprimento do prolongador para permitir o acesso ao bico graxeiro situado na parte externa da carcaça. Na Figura 24 está evidenciada a tendência de consumo de itens de graxeira por comprimento de prolongador na empresa WEG Motores Brasil. A partir do gráfico, pode-se concluir que a maior parte do consumo está nos prolongadores de 40 a 165 mm e a concepção da substituição do componente deve considerar essa faixa para o desenho do mesmo.

Figura 24 – Consumo de itens de graxeira por comprimento de prolongador em 2018 para a empresa WEG Motores Brasil



Fonte: O Autor (2020)

### 4.2 Condições de contorno do problema

As condições de contorno do problema e requisitos para a substituição do material foram estabelecidos observando o componente atual e as especificações que o mesmo deve atender quando na aplicação. Desse modo, o material selecionado para a graxeira

não deve exibir perdas de propriedade significativa após exposição prolongada a graxas e óleos, especialmente em contato com a graxa Mobil Polyrex EM, graxa de maior aplicação e consumo para os motores elétricos. Em relação a temperatura, o componente deve suportar picos de até 120°C (temperatura de alerta do mancal) sem comprometer a integridade do mesmo por fusão, flexão ou degradação do material.

Considerando propriedades mecânicas, o componente deve atender um grau de proteção contra impactos (IK) grau 08 conforme a norma ABTN NBR IEC 62262, igual ao especificado para o equipamento, que significa que o componente deve suportar o impacto de uma massa de 1,7 Kg liberada a uma altura de 295 mm sem comprometer a integridade do mesmo. Propriedades como resistência a tração e resistência a flexão possuem pouco peso na decisão final, visto que a única solicitação presente no componente está na fixação do mesmo ao motor, que deve permitir um rosqueamento. As principais propriedades elencadas são resumidas na Tabela 7 abaixo.

Tabela 7 - Propriedades que deverão ser atendidas pelo material proposto na substituição

<b>Característica</b>	<b>Requisito</b>
<i>Resistência química</i>	Deve ser compatível com graxa Mobil Polyrex
<i>Resistência a temperatura</i>	Deve suportar uma temperatura máxima de até 120° C
<i>Proteção contra impacto</i>	Conforme grau IK 08

Fonte: O Autor (2020).

### 4.3 Materiais

#### 4.3.1 Polímeros avaliados para a proposta

Para a comparação das propriedades e execução dos ensaios, foram selecionados três *grades* de polímeros comerciais já utilizados em componentes de motores elétricos, considerando aspectos de custo, propriedade mecânica e disponibilidade de mercado. Os polímeros foram obtidos na forma comercial, sob os grades de Polipropileno (Braskem H503), poliamida 6 reforçada com 15%*m* de fibra de vidro (Akromid B3 GF 15) e poli(acrilonitrila-co-butadieno-co-estireno) (Terluran HI-10). As principais propriedades de cada grade estão descritos nas seções abaixo.

- Polipropileno Braskem H503

O PP H503 é um polímero aditivado composto de polipropileno para uso geral. Possui alta processabilidade com boa estabilidade do fundido, bom balanço entre rigidez e resistência ao impacto e é indicada para moldagem por injeção, filmes biorientados e extrusão geral (BRASKEM, 2017). Na Tabela 8 estão apresentadas as principais propriedades de um *grade* comercial do PP PP H503 fabricado pela empresa Braskem.

Tabela 8 - Propriedades de interesse da resina Braskem H503

<b>Propriedade</b>	<b>Método</b>	<b>Unidade</b>	<b>Valores</b>
<i>Densidade</i>	ASTM D 792	g/cm <sup>3</sup>	0,905
<i>Módulo de Flexão secante a 1%</i>	ASTM D 790	MPa	1300
<i>Resistência à Tração no Escoamento</i>	ASTM D 638	MPa	35
<i>Alongamento no Escoamento</i>	ASTM D 638	%	11
<i>Resistência ao impacto Izod a 23 °C</i>	ISO 180/A	J/m	30
<i>Temperatura de Deflexão Térmica a 0,455 Mpa</i>	ASTM D 648	°C	98
<i>Temperatura de Deflexão Térmica a 1,820 Mpa</i>	ASTM D 648	°C	55
<i>Temperatura de Amolecimento Vicat a 10 N</i>	D 1525	°C	155

Fonte: Adaptado de BRASKEM (2017).

- ABS Terluran® HI-10

O polímero comercial ABS Terluran HI-10 do fabricante INEOS é um *grade* para moldagem por extrusão e injeção com alta tenacidade e alta resistência ao impacto mesmo a temperaturas abaixo de 0 °C. Seu uso é recomendado para as indústrias de equipamentos eletrônicos, equipamentos para esporte e lazer, eletrodomésticos e bens de construção (INEOS, 2016). Na Tabela 9 são apresentadas as principais propriedades do *grade* comercial ABS Terluran® HI-10.

Tabela 9 - Propriedades de interesse do polímero ABS Terluran HI-10

<b>Propriedade</b>	<b>Método</b>	<b>Unidade</b>	<b>Valores</b>
<i>Densidade</i>	ISO 1183	kg/m <sup>3</sup>	1030
<i>Resistência a flexão a 23 °C</i>	ISO 178	MPa	56
<i>Resistência à Tração no Escoamento a 23 °C</i>	ISO 527	MPa	38
<i>Alongamento no Escoamento a 23 °C</i>	ISO 527	%	2,8
<i>Resistência ao impacto Izod a 23 °C</i>	ISO 180/A	kJ/m <sup>2</sup>	36
<i>Temperatura de Deflexão Térmica a 0,455 Mpa</i>	ASTM D 648	°C	97
<i>Temperatura de Deflexão Térmica a 1,820 Mpa</i>	ASTM D 648	°C	93
<i>Temperatura de Amolecimento Vicat a 10 N</i>	ISO 306	°C	103

Fonte: Obtido de UL Prospector (2020).

- PA 6 Akromid B3 GF15

A PA 6 Akromid B3 GF 15 do fabricante Akro-Plastic é um polímero reforçado com 15% em massa de fibra de vidro, na cor preta e com média rigidez. A mesma é altamente indicada para carcaças e invólucros destinados à indústria automotiva, eletrônica e moveleira (AKRO-PLASTIC, 2019). Na Tabela 10 são apresentadas as principais propriedades da PA 6Akromid B3 GF15 utilizado nesse trabalho.

Tabela 10 - Propriedades de interesse da PA6 grade AKROMID B3 GF15

<b>Propriedade</b>	<b>Método</b>	<b>Unidade</b>	<b>Valores</b>
<i>Densidade</i>	ISO 1183	g/cm <sup>3</sup>	1,21
<i>Módulo elástico a 1mm/min</i>	ISO 527-2	MPa	5500
<i>Resistência à Tração no Escoamento a 23 °C</i>	ISO 527	MPa	110
<i>Alongamento no Escoamento a 23 °C</i>	ISO 527	%	4
<i>Resistência ao impacto Charpy a 23 °C</i>	ISO 179-1/1eU	kJ/m <sup>2</sup>	75
<i>Temperatura de fusão</i>	DIN 11357-1	°C	225
<i>Temperatura de Deflexão Térmica a 1,820 Mpa</i>	ISO 75	°C	216

Fonte: AKRO-PLASTIC (2019).

#### 4.3.2 Graxa avaliada

Na avaliação realizada para o motor elétrico, será considerada somente a graxa responsável pelo maior volume de consumo, de nome comercial Mobil Polyrex EM. A graxa

Mobil Polyrex EM é uma graxa a base de poliureia, formulada para uso em rolamentos de motores elétricos. A mesma possui formulação para uso prolongado em altas temperaturas, aditivos de resistência à corrosão e características de baixo ruído. As principais propriedades são apresentadas na Tabela 11, adaptada do site do fabricante.

Tabela 11 - Especificações da graxa Mobil Polyrex EM

<b>Característica</b>	<b>Propriedade</b>	<b>Unidade</b>
<i>Cor</i>	Azul	-
<i>Viscosidade à 40 °C</i>	115	cSt
<i>Viscosidade à 100 °C</i>	12,2	cSt
<i>Ponto de gota (ASTM D2265)</i>	260	°C
<i>Vida da graxa a alta temperatura (ASTM D3336, 177 °C)</i>	750 +	Horas
<i>Arranque</i>	7500	g.cm
<i>Funcionamento</i>	800	g.cm
<i>Proteção contra ferrugem (ASTM D1743, água destilada)</i>	Passa	-
<i>Lavagem por água (ASTM D1264, perda)</i>	1,9	%

Fonte: Adaptado de Mobil Industrial (2017).

## 4.4 Metodologias

### 4.4.1 Fabricação dos corpos de prova

Os corpos de prova utilizados para os ensaios foram fabricados por processo de injeção de rosca simples nas grades comerciais de polipropileno Braskem H503, ABS Terluran HI-10 do fabricante Celanese e poliamida 6 reforçada com 15% de fibra de vidro Akromid B3 GF15 do fabricante Akro-Plastic conforme norma ASTM D638 Tipo IV

### 4.4.2 Envelhecimento

A fim de observar as possíveis interações dos polímeros candidatos para a substituição e a graxa empregada nos motores elétricos, amostras a serem analisadas foram submetidas a uma condição de envelhecimento. Foram obtidos corpos de prova de tração dos *grades* propostos, como exibido na

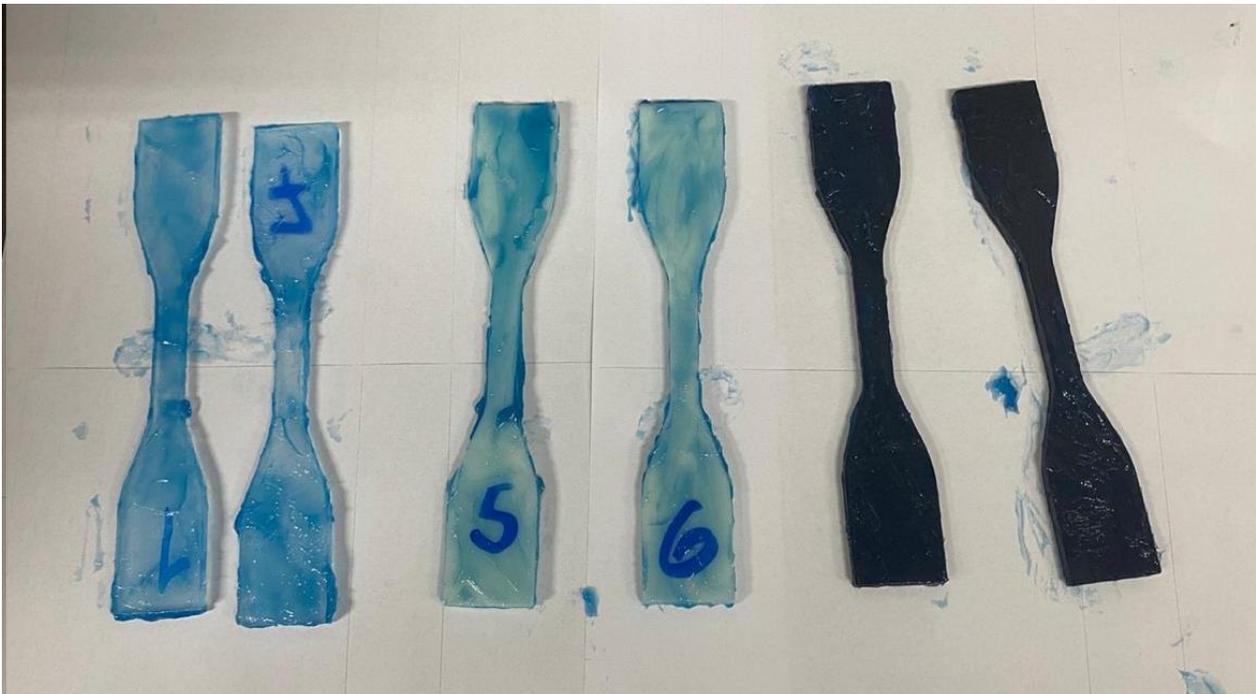
Figura 25. Os corpos de prova foram então cobertos em graxa Mobil Polyrex EM, como exibido na Figura 26, e mantidos por 416 dias protegidos de luz e intempéries em temperatura ambiente, e ensaiados nas condições natural e após envelhecimento para comparação de propriedades.

Figura 25 - Corpos de prova de tração pré envelhecimento. Da esquerda para a direita, PA6, PP e ABS



Fonte: O Autor (2020).

Figura 26 - Corpos de prova cobertos em graxa Mobil Polyrex EM. Da esquerda para direita, PP, ABS e PA6.



Fonte: O Autor (2020).

## 4.5 Caracterizações

### 4.5.1 Espectroscopia no infravermelho por Transformada de Fourier

As amostras poliméricas na condição natural e envelhecidas foram caracterizadas pela técnica de FTIR com reflexão total atenuada na faixa de comprimentos de onda de 4000 a 650  $\text{cm}^{-1}$ , com 4 escaneamentos, em um equipamento PerkinElmer Frontier, exibido na Figura 27. Para efeito de comparação, as amostras cobertas em graxa foram limpas utilizando uma solução de álcool etílico 99%. As amostras foram então posicionadas sobre o cristal detector e pressionadas com uma força de 150 N pelo dispositivo fixador até a execução do programa.

Figura 27 – Amostra de PA6 sendo ensaiada no equipamento de FTIR



Fonte: O Autor (2020).

### 4.5.2 Calorimetria exploratória diferencial

Para investigação das propriedades térmicas por DSC dos polímeros selecionados, as amostras poliméricas foram preparadas a partir de uma prensagem de seção dos corpos de prova em uma prensa de bancada ilustrada na Figura 28 - Prensa de bancada e matriz utilizadas para preparação de seção plana de amostra para obtenção de uma chapa fina. Em sequência, 10 mg da amostra foram pesados e encapsulados em porta-amostra de alumínio (Figura 29) que foi ensaiado em um equipamento de fluxo de calor PerkinElmer

DSC6000 em uma rampa de temperatura ilustrada na Figura 30, de -40 a 200°C, seguida de resfriamento até a temperatura inicial de -40°C e um segundo aquecimento até a temperatura 200°C em uma taxa de 10°C/min, em atmosfera de nitrogênio com vazão de 20 mL/min, conforme a programação padrão do equipamento.

Figura 28 - Prensa de bancada e matriz utilizadas para preparação de seção plana de amostra



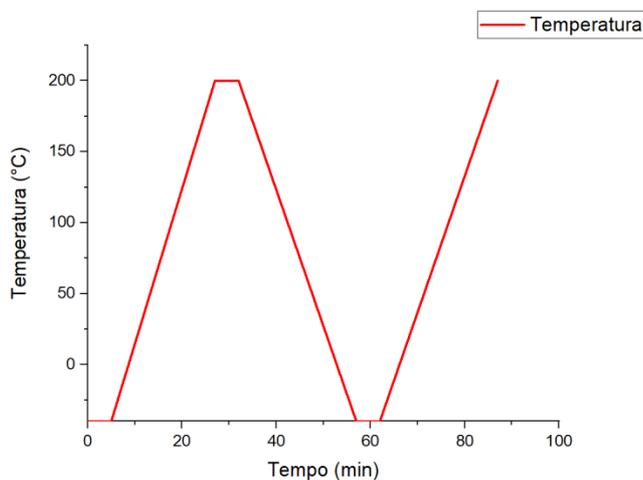
Fonte: O Autor (2020).

Figura 29 - Porta Amostra de alumínio preparado para o ensaio de DSC



Fonte: O Autor (2020).

Figura 30 - Rampa de aquecimento utilizada na caracterização por DSC das amostras



## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

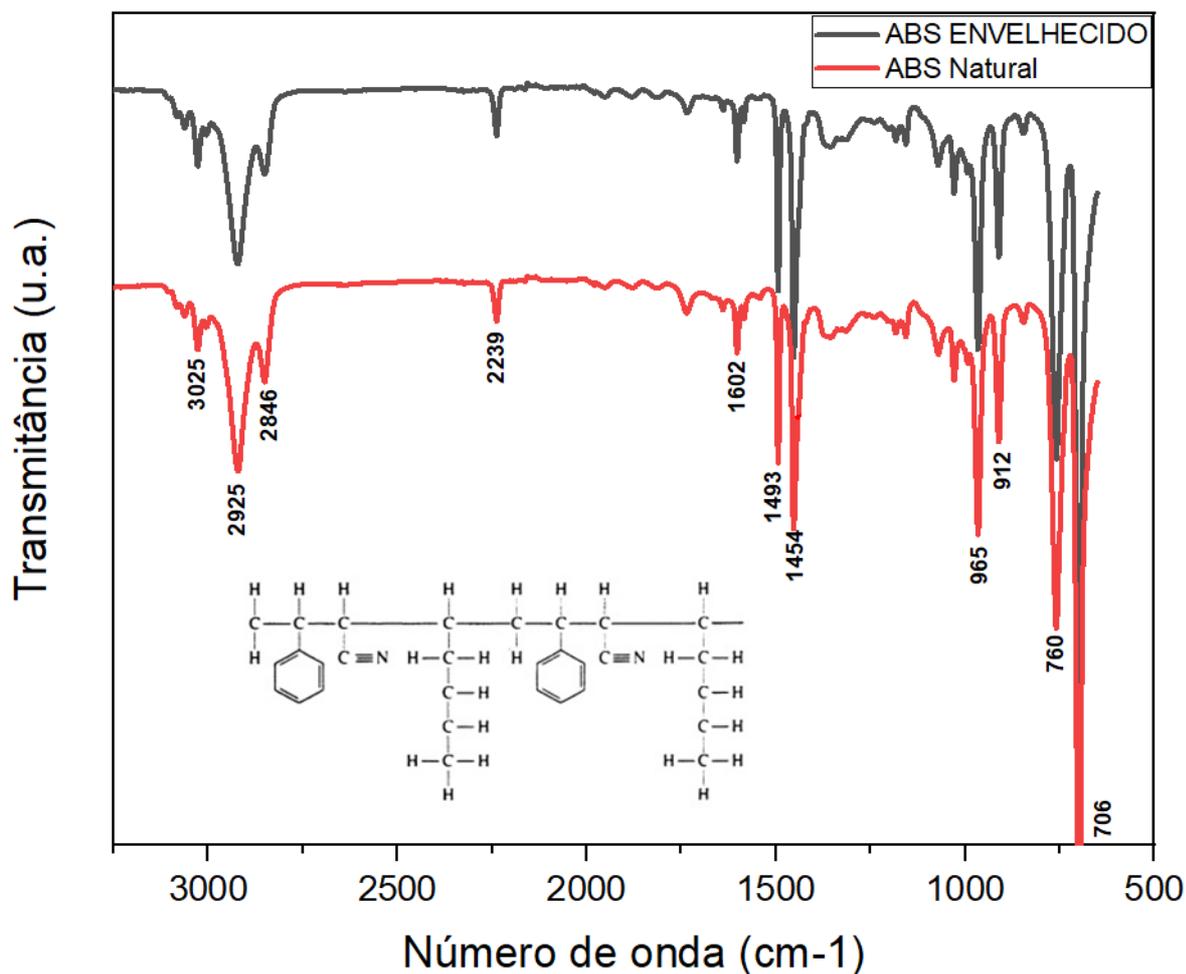
O comportamento térmico dos polímeros elencados foi analisado via DSC nas condições natural e após envelhecimento. A primeira corrida de aquecimento no DSC apresenta forte influência das etapas anteriores de processamento dos materiais, portanto, um primeiro aquecimento foi realizado para todas as amostras com o intuito de apagar o histórico térmico do material. Também foram caracterizados por FTIR, com o intuito de avaliar alterações estruturais decorrentes do envelhecimento com a graxa. Para isso, os perfis de curva foram comparados e os grupos funcionais identificados com base em valores obtidos de literatura.

### 5.1 Polímero ABS Terluran Hi-10

#### 5.1.1 Caracterização por espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier

Os resultados obtidos no ensaio de FTIR para as amostras de ABS em estado natural e envelhecidas, estão representados graficamente na Figura 31. A análise dos picos indica o estiramento de ligações Carbono-Hidrogênio (CH e CH<sub>2</sub>) na região entre 3025 a 2846 cm<sup>-1</sup>, com um pico característico em 2239 cm<sup>-1</sup> proveniente da ligação C-N (C≡N) do grupo nitrila e das ligações C-C no anel aromático em 1602 cm<sup>-1</sup>. Outras bandas relacionadas a ligações C-C e CH são observadas na região entre 1493 a 706 cm<sup>-1</sup> (CHARLES; RAMKUMAAR, 2009). As principais bandas estão resumidas conforme Tabela 12. Do ponto de vista de interação com a graxa, pode-se concluir que não houve alteração da estrutura química do polímero após o envelhecimento, pois o aspecto das curvas e os números de onda correspondentes aos grupos funcionais permanecem os mesmos, para as amostras antes e após envelhecimento.

Figura 31 - Curva de FTIR para o ABS antes e após envelhecimento



Fonte: O Autor (2020).

Tabela 12 - Picos de interesse para o polímero ABS

Mero	Número de onda (cm <sup>-1</sup> )	Ligação associada	Tipo
Acrilonitrila	2239	C≡N	Alifático
Estireno	3025	C-H	Aromático
	1602	C-C	Aromático
	1493	CH <sub>2</sub>	Aromático
	760	C-H	Aromático
Estireno, Acrilonitrila e Butadieno	2846	CH <sub>2</sub>	Alifático
	1454	CH <sub>2</sub>	Alifático
	965	C-H	Alifático
	912	C-H	Alifático
	706	CH <sub>2</sub>	Alifático

Fonte: Adaptado de Charles e Ramkumaar (2009)

### 5.1.2 Caracterização por Calorimetria exploratória diferencial

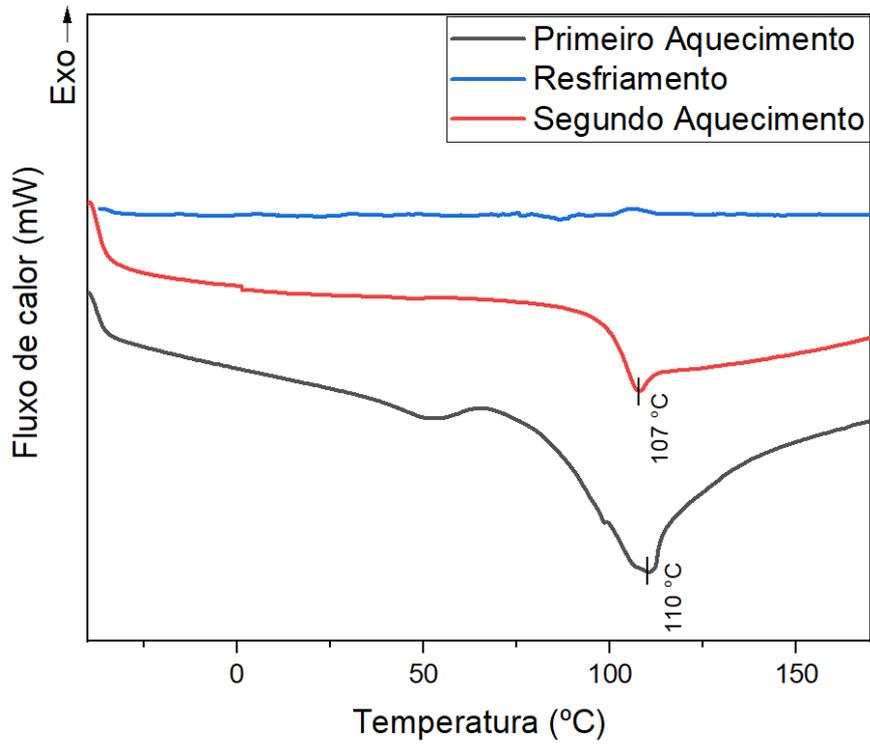
As amostras do polímero ABS Terluran HI-10 foram ensaiadas por Calorimetria Exploratória Diferencial, e as curvas geradas são exibidas nas Figura 32 e 33 nas condições natural e envelhecida, respectivamente.

Analisando as curvas geradas, é possível observar uma variação no perfil da linha base durante o aquecimento em torno de 110°C para o primeiro e segundo aquecimento. A variação observada é característica da transição vítrea do polímero, coerente com os dados apresentados no *datasheet* do fabricante (Amolecimento Vicat a 10N em 103 °C) (UL Prospector, 2020). Avaliando-se as curvas de resfriamento, a transição vítrea pode ser observada na temperatura similar ao aquecimento.

Os valores de transição vítrea no primeiro (110°C) e segundo aquecimento (107°C) para a amostra em estado natural apresentaram uma pequena variação, indicando que a amostra processada via injeção, pode ter sofrido um resfriamento mais rápido. Esse efeito é característico do histórico térmico do material, levando a alterações nas temperaturas de transição e resistência ao escoamento devido às condições de processamento. Para a amostra envelhecida, a temperatura de transição vítrea no primeiro aquecimento (108 °C) e no segundo aquecimento (109 °C) foram muito próximas e não são diferenças consideráveis em relação ao histórico térmico do material.

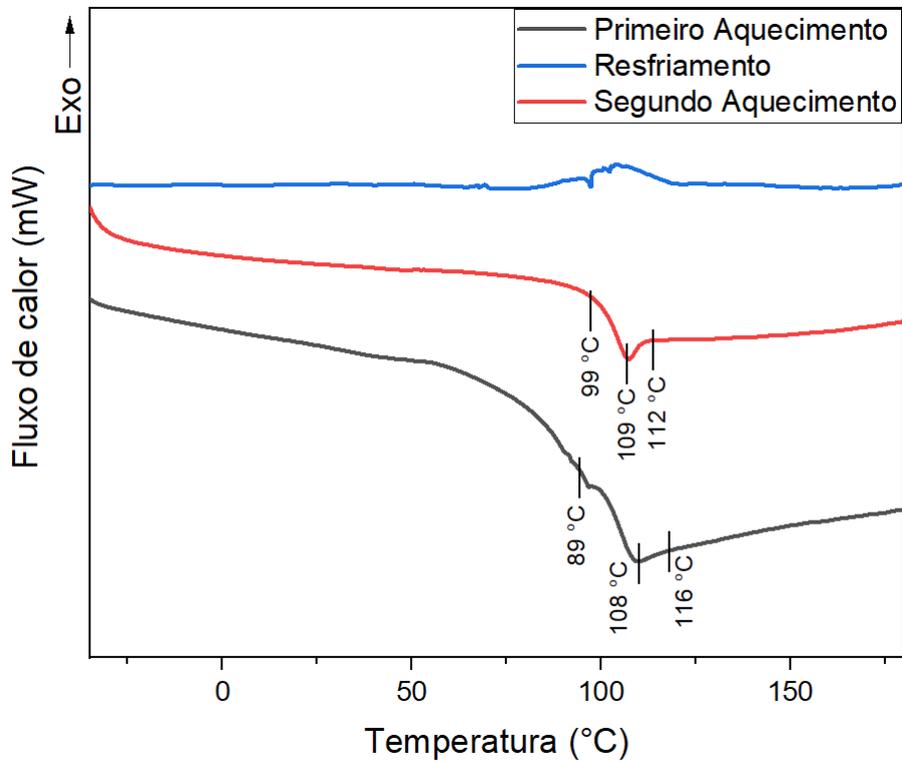
Em relação ao envelhecimento devido ao contato prolongado com a graxa, nenhuma alteração significativa (>1,5°C) nas temperaturas de transição característica pode ser observada, indicando que houve pouca ou nenhuma interação molecular do polímero com a graxa após a exposição prolongada.

Figura 32 - Curva de DSC para a amostra de ABS em condição natural



Fonte: O Autor (2020)

Figura 33 - Curva de DSC para a amostra de Terluran HI-10 Envelhecido



Fonte: O Autor (2020)

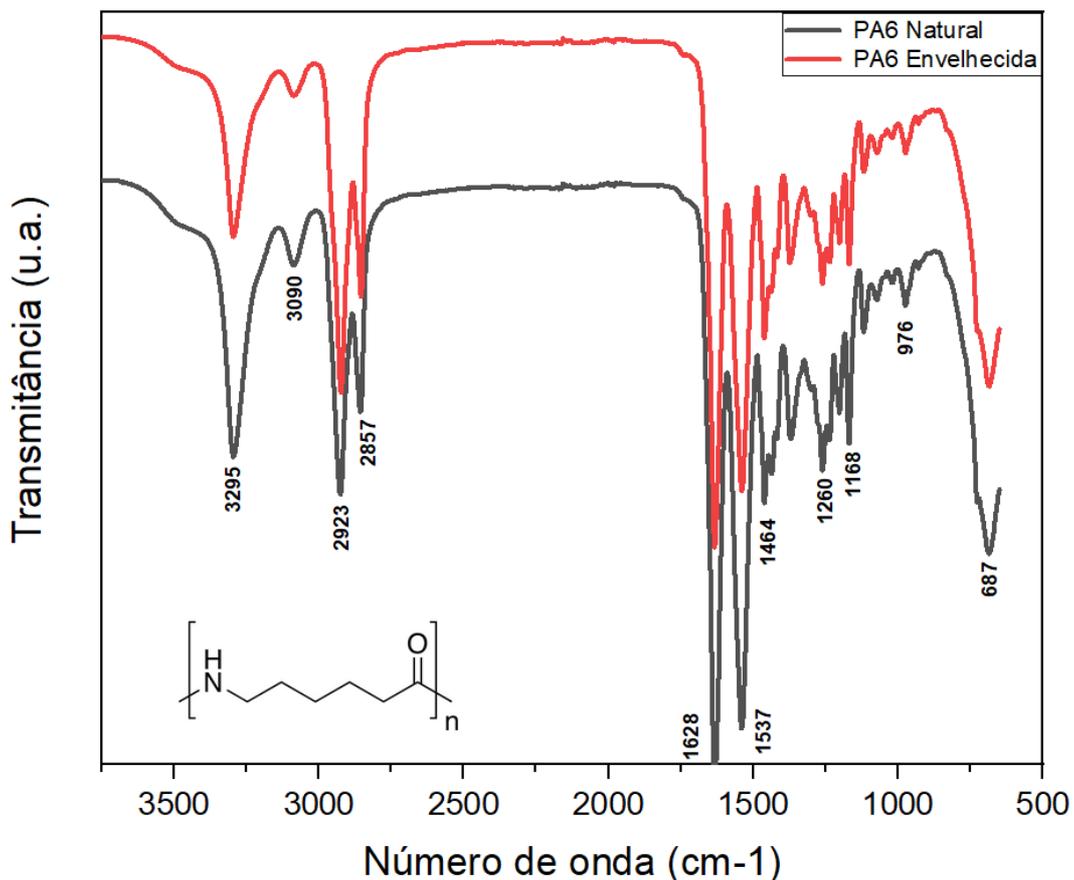
## 5.2 Polímero PA6 AKROMID B3 GF15

### 5.2.1 Caracterização por espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier

Os resultados obtidos do ensaio de FTIR para a PA6 AKROMID B3 GF15 estão representados graficamente na Figura 34 para as amostras em estado natural e envelhecida. A análise dos picos da PA 6 antes e após envelhecimento indica a presença das ligações C-N para o comprimento de onda  $3295\text{ cm}^{-1}$  e C=O para o comprimento  $1628\text{ cm}^{-1}$  no grupo amida. Os demais picos como o comprimento de onda 3090, 2923, 2857 e  $687\text{ cm}^{-1}$  estão associadas as ligações C-C e C-H da parte hidrocarboneto da molécula, resumidos conforme Tabela 13. (MAGEED, 2010).

Do ponto de vista de interação com a graxa, assim como para o ABS, pode-se concluir que não houve alteração da estrutura química do polímero após o envelhecimento, pois o aspecto das curvas e os picos característicos permanecem os mesmos para as amostras antes e após envelhecimento.

Figura 34 - Curva de FTIR para a PA6 antes e após envelhecimento.



Fonte: O Autor (2020).

Tabela 13 - Picos de interesse para o polímero Poliamida 6

<b>Polímero</b>	<b>Número de de onda (cm<sup>-1</sup>)</b>	<b>Ligação associada</b>	<b>Fração do monômero correspondente às ligações</b>
<i>Poliamida 6</i>	3295	C-N	Fração amida
	1628	C=O	
	1537	N-H	
	1260	N-H	
	3090	CH	Fração principal hidrocarboneto
	2923	CH <sub>2</sub>	
	2857	CH <sub>2</sub>	
	2846	CH <sub>2</sub>	
	1168	CH <sub>2</sub>	
	976	C-C	
	687	C-C	
	1454	CH <sub>2</sub> / NH	Fração hidrocarboneto/ Amida

Fonte: Adaptado de Mageed (2010).

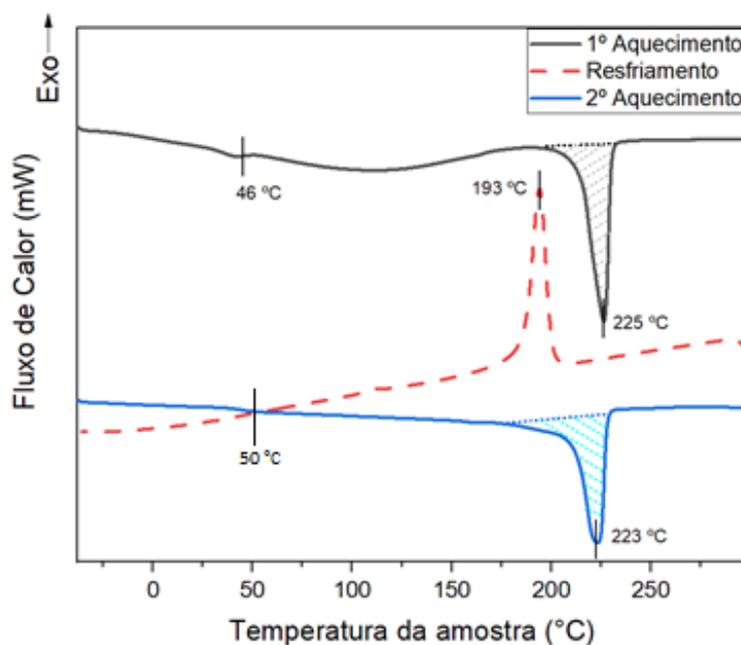
### 5.2.2 Caracterização por Calorimetria exploratória diferencial

As curvas obtidas no ensaio de DSC para as amostras de PA 6 natural e envelhecida estão apresentadas nas Figura 35 e Figura 36. Avaliando-se as temperaturas de transições observadas no primeiro aquecimento para a amostra natural, podemos destacar o pico endotérmico característico da fusão do material em 225 °C, compatível com o valor de 220 °C (Omnexus, 2010) encontrado na literatura. Para a curva de resfriamento é possível observar um pico exotérmico com máxima energia na temperatura de 193 °C, relacionado como a temperatura de cristalização do fundido. Comparando o primeiro e segundo aquecimento, pode-se destacar a temperatura característica de fusão mais elevada no primeiro aquecimento, devido ao histórico térmico do material, que indica um maior grau de cristalinidade no primeiro aquecimento, resultante do processo de resfriamento utilizado na fabricação dos corpos de prova.

Em relação ao comportamento apresentado nas condições antes e após o ensaio de envelhecimento, a variação apresentada de 1 °C para o primeiro aquecimento, e 2 °C para o segundo aquecimento, não são indício de alterações na estrutura químicas do polímero causadas pela exposição à graxa.

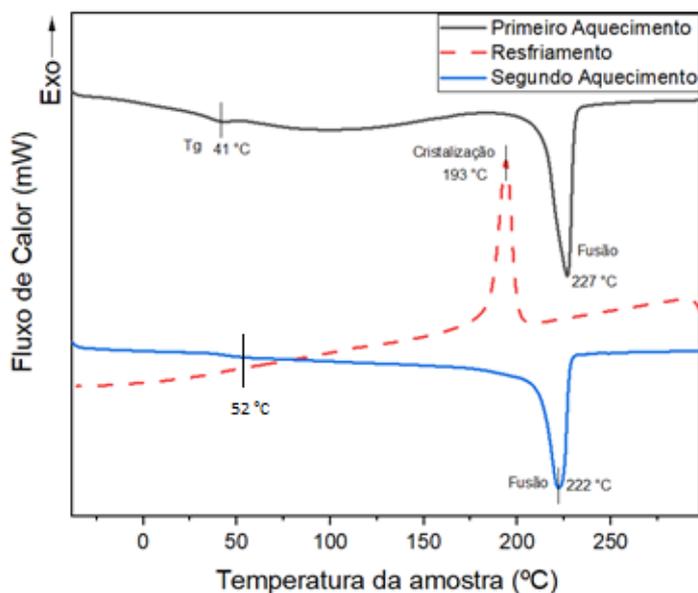
Um desvio na linha base, característico da temperatura de transição vítrea, foi observado na temperatura de 46 °C para a amostra em condição natural no primeiro aquecimento e 50 °C no segundo aquecimento, e 41°C em condição envelhecida no primeiro aquecimento e 52 °C no segundo aquecimento, comparável ao valor de 60 °C encontrado na literatura (Omnexus, 2010). A diferença pode ser associada ao histórico térmico de processamento do material, devido as condições de resfriamento no processo de injeção e no ensaio de DSC.

Figura 35 - Curva de DSC para a amostra de PA6 em condição natural



Fonte: O Autor (2020)

Figura 36 - Curva de DSC para a amostra de PA6 em condição envelhecida



Fonte: O Autor (2020)

Os picos característicos de fusão para o PA6 em condição natural foram integrados no programa Origin apresentando os valores de energia de fusão de 86,05 J/g para o primeiro aquecimento e 94,93 J/g no segundo aquecimento e de 88,41 J/g no primeiro aquecimento e 106,48 J/g no segundo aquecimento para a amostra envelhecida. Comparando com o valor de literatura  $\Delta H_{PA6}^{\circ} = 198,8 \text{ J/g}$  (Oliveira *et al*, 2011) foram calculados o grau de cristalinidade de acordo com a Equação 1, considerando a fração de 85% de PA6 conforme Tabela 14. Com base nos valores de grau de cristalinidade obtidos antes e após envelhecimento, nada pode ser concluído sobre possíveis interações da graxa com o polímero avaliado, visto que as diferenças são pequenas (<5%). Essa afirmação é reforçada pelo fato que nenhuma alteração foi observada antes e após envelhecimento no ensaio de FTIR. Comparando o primeiro e segundo aquecimento para ambas as condições, é possível visualizar um aumento da cristalinidade no segundo aquecimento, característico do apagamento do histórico térmico do polímero e causado pelo resfriamento utilizado durante o ensaio (10 °C/min).

Equação 1 - Cálculo do grau de cristalinidade de um polímero

$$X_c = \frac{\Delta H_f}{\Delta H_f^* \phi} \cdot 100$$

Tabela 14 - Grau de cristalinidade das amostras de PA6 em condição natural e envelhecida.

<b>Amostra</b>	<b>Condição de aquecimento do polímero</b>	<b>Entalpia de fusão (J/g)</b>	<b>Cristalinidade (%)</b>
<i>Natural</i>	1 <sup>o</sup> Aquecimento	86,05	50,9
	2 <sup>o</sup> Aquecimento	94,93	56,17
<i>Envelhecida</i>	1 <sup>o</sup> Aquecimento	88,41	52,31
	2 <sup>o</sup> Aquecimento	106,48	63,01

Fonte: O Autor (2020).

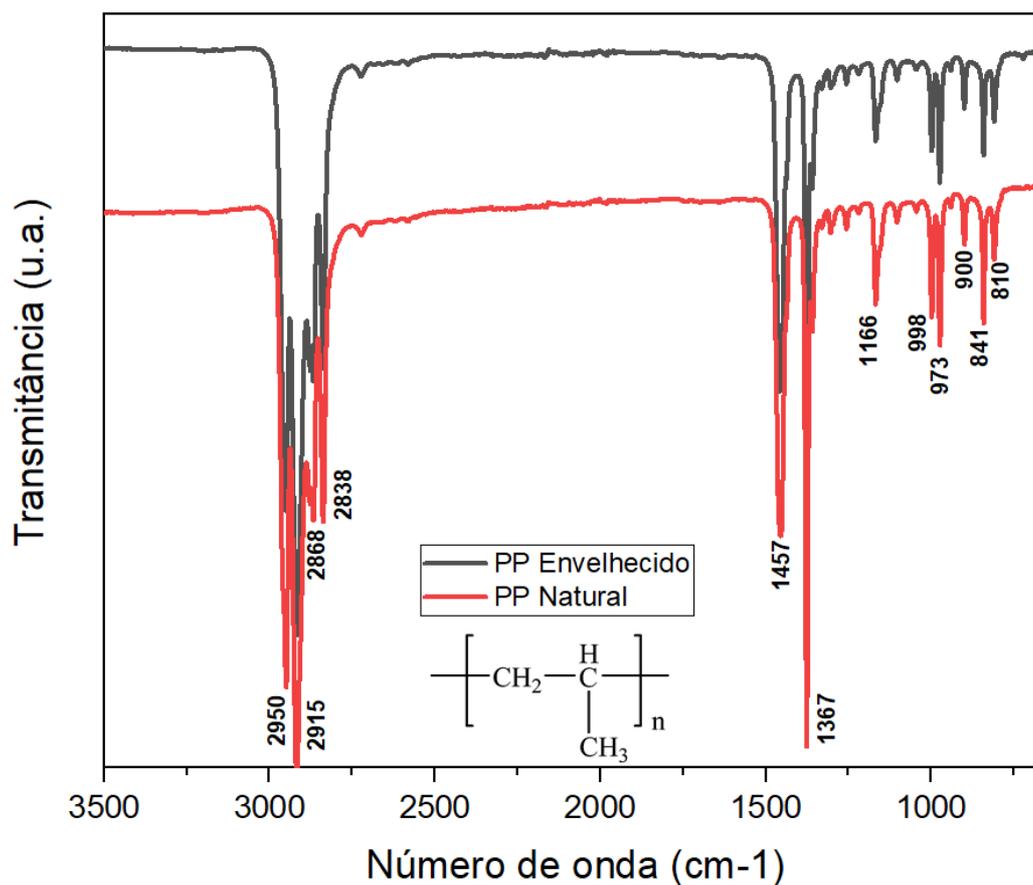
### 5.3 Polímero PP Braskem H503

#### 5.3.1 Caracterização por espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier

Os resultados obtidos do ensaio de FTIR para o PP Braskem H503 estão representados graficamente na Figura 37 para as amostras envelhecidas e em estado natural. A análise dos picos indica a presença das ligações CH<sub>3</sub> para os picos de 2950, 2915, 1457 e 1367 cm<sup>-1</sup>, enquanto que os picos de 973 e 810 cm<sup>-1</sup> são característicos das ligações C-C. Os picos observados em 1166 e 841 cm<sup>-1</sup> são provenientes das ligações C-H (C-H), e os picos observados no comprimento de onda igual a 2868 e 2838 cm<sup>-1</sup> representam o grupo CH<sub>2</sub> (ANDREASSEN, 1999), resumidos conforme Tabela 15

Do ponto de vista de interação com a graxa, assim como os demais polímeros ensaiados, não foi observada alteração do espectrograma após envelhecimento das amostras.

Figura 37 - Curva de FTIR para o PP H503 antes e após envelhecimento



Fonte: O Autor (2020).

Tabela 15 - Picos de interesse para o Polipropileno

Polímero	Número de onda (cm <sup>-1</sup> )	Ligação associada	Tipo de cadeia
<i>Polipropileno Braskem H503</i>	810	C-C	Alifático
	998	C-C / CH <sub>3</sub>	
	973	C-C / CH <sub>3</sub>	
	1166	CH	
	841	CH/ CH <sub>3</sub>	
	2868	CH <sub>2</sub>	
	2838	CH <sub>2</sub>	
	900	CH <sub>2</sub>	
	2950	CH <sub>3</sub>	
	2915	CH <sub>3</sub>	
	1457	CH <sub>3</sub>	
	1367	CH <sub>3</sub>	

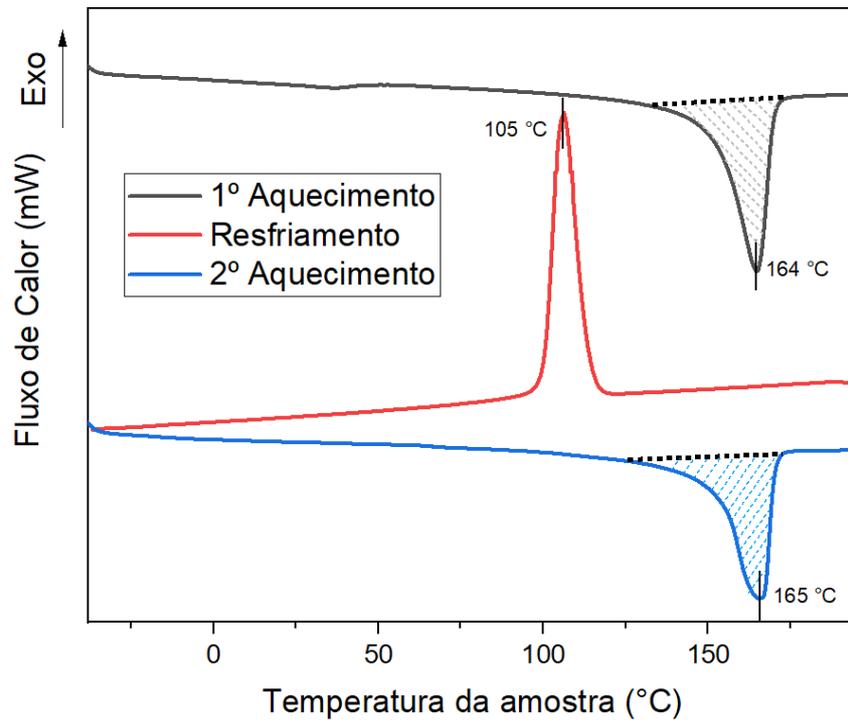
Fonte: Adaptado de Andreassen (1999).

### 5.3.2 Caracterização por Calorimetria Exploratória Diferencial

As curvas obtidas no ensaio de DSC estão apresentadas nas Figura 38 e Figura 39 abaixo para as condições de amostra envelhecida e natural. Em análise das transições relevantes observadas nas curvas, podemos destacar os picos endotérmicos característicos da temperatura de fusão na temperatura de 164 °C para o primeiro aquecimento e 165 °C para o segundo aquecimento e na condição natural, e de 163 °C no primeiro aquecimento e 162 °C no segundo aquecimento para a amostra envelhecida. As temperaturas são compatíveis com temperatura de fusão verificada na literatura de 165°C (GRUPO RPF, 2018). Na curva de resfriamento da amostra em condição natural é possível observar um pico exotérmico pronunciado característico da máxima cristalização do material, na temperatura de 105 °C. A diferença entre as temperaturas exibidas para fusão no aquecimento e cristalização no resfriamento é consequência da elevada energia necessária para nucleação.

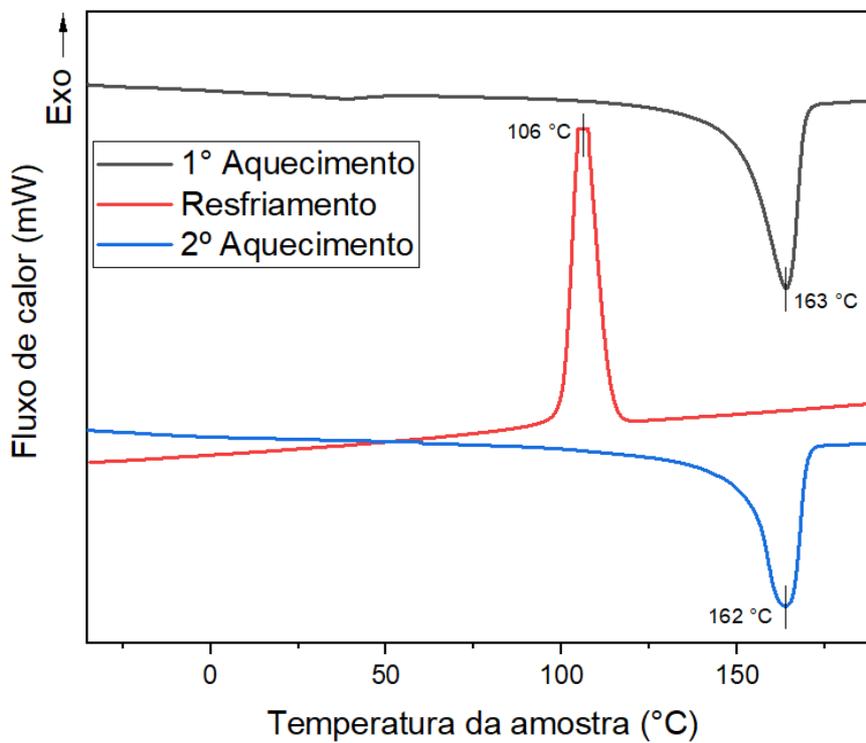
Nenhuma informação de temperatura de transição vítrea foi observada no ensaio, pois conforme literatura, a mesma ocorre em -18 °C (GRUPO RPF, 2018), e temperaturas inferiores a -10 °C apresentaram espectros pouco confiáveis e foram omitidas para esses gráficos. Assim como para as amostras de ABS e PA6 ensaiadas, para o PP não foi possível detectar nenhuma alteração significativa nas propriedades térmicas do polímero após a exposição prolongada com a graxa.

Figura 38 - Curva de DSC para a amostra de PP na condição natural.



Fonte: O Autor (2020).

Figura 39 - Curva de DSC para a amostra de PP na condição envelhecida.



Fonte: O Autor (2020).

Os picos característicos de fusão para o PP em condição natural foram integrados no programa Origin apresentando os valores de energia de fusão de 151 J/g para o primeiro aquecimento e 154 J/g no segundo aquecimento. Os picos de fusão foram integrados para a curva do PP envelhecido, chegando aos valores de 152 J/g no primeiro aquecimento e 148 J/g no segundo aquecimento. Comparando com o valor de literatura  $\Delta H_{PP}^{\circ} = 207 \text{ J/g}$  (NETZSCH, 2006) foram calculados o grau de cristalinidade conforme Tabela 16. Com base nos valores de grau de cristalinidade obtidos antes e após envelhecimento, nada pode ser concluído sobre possíveis interações da graxa com o polímero avaliado, visto que as diferenças são pequenas (<5%). Essa afirmação é reforçada pelo fato que nenhuma alteração foi observada antes e após envelhecimento no ensaio de FTIR. Comparando o primeiro e segundo aquecimento para ambas as condições, é possível visualizar uma divergência da cristalinidade pouco relevante, causado pelo apagamento do histórico térmico do polímero no primeiro aquecimento, resfriamento controlado a taxa de 10 °C/min durante o resfriamento e consecutivo segundo aquecimento.

Tabela 16 - Grau de cristalinidade das amostras de PP na condição natural.

<b>Amostra</b>	<b>Condição de aquecimento do polímero</b>	<b>Entalpia de fusão (J/g)</b>	<b>Cristalinidade (%)</b>
<i>Natural</i>	1º Aquecimento	151	72,9
	2º Aquecimento	154	74,4
<i>Envelhecida</i>	1º Aquecimento	152	73,4
	2º Aquecimento	148	71,4

Fonte: O Autor (2020).

#### 5.4 Viabilidade da proposta

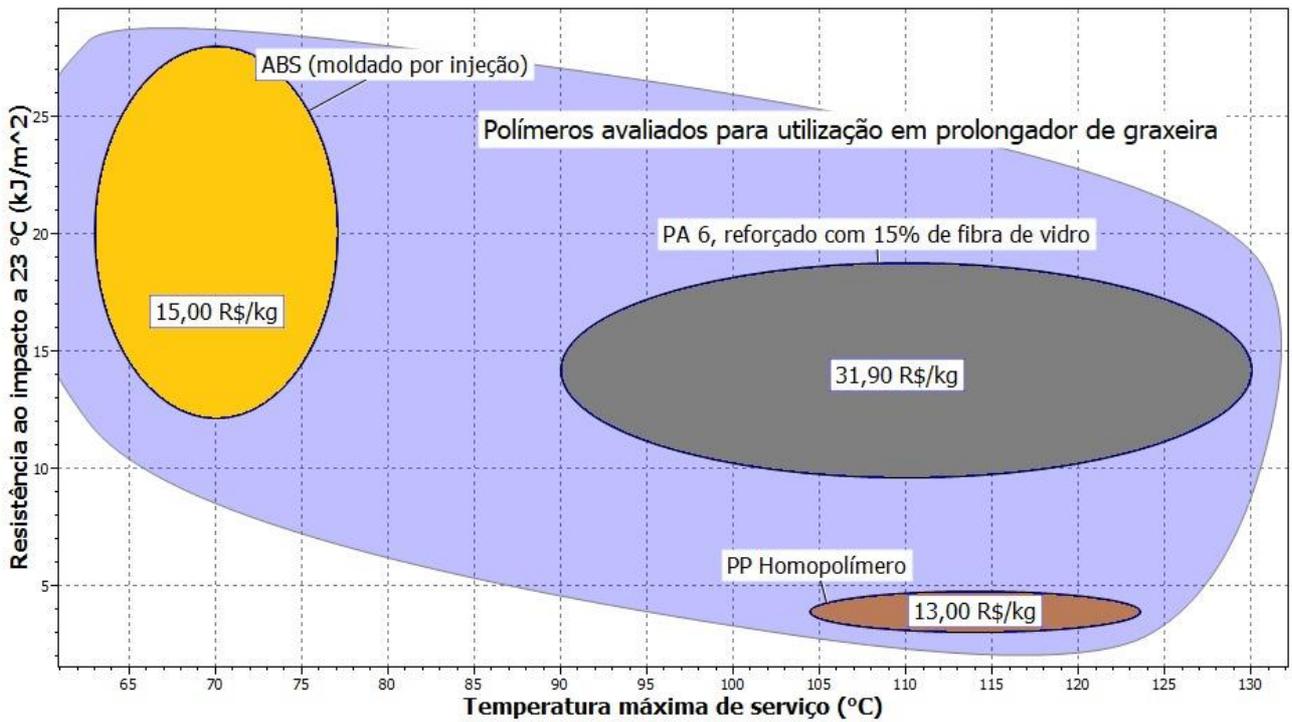
Para representar a viabilidade da proposta de substituição, incluindo parâmetros de custo, foi elaborado um gráfico no software CES Selector, exibido na Figura 40, relacionando os principais requisitos da aplicação, de resistência ao impacto, máxima temperatura de operação, e preço líquido por kg do material virgem, obtido de cotações com fornecedores.

A partir do gráfico, é possível concluir que o polímero ABS, apesar da elevada resistência ao impacto é limitado pela temperatura máxima de operação (entre 65 e 75°C) e não é indicado para a aplicação desejada. Comparando os polímeros PP e PA6 reforçada com 15% de fibra de vidro, pode-se concluir que ambos atendem a temperatura desejada

na operação, e a escolha entre ambos depende do custo desejado para o componente.

Considerando que o principal objetivo do estudo é uma redução de custo do material atualmente empregado na produção do prolongador de graxeira, a opção mais indicada para a substituição é o PP Homopolímero, cuja seleção deve ser validada em testes de vida após a fabricação de protótipos funcionais.

Figura 40 - Avaliação das propriedades de polímeros indicados para utilização em prolongador de graxeira



Fonte: O Autor (2020).

## 6. CONCLUSÃO

A busca por inovação e melhoria contínua é um tópico emergente e muito presente no ramo industrial e de tecnologia na busca por redução de custos, produtividade e competitividade. O desenvolvimento e a pesquisa dos campos de ciência e engenharia de materiais impulsiona os benefícios através da utilização de componentes alternativos e materiais inovadores. Nesse trabalho foram estudadas três opções comerciais poliméricas para substituição de um componente estrutural de motores elétricos tradicionalmente metálico.

As propriedades verificadas de modo experimental e em revisão de literatura mostraram que é possível aplicar a substituição da matéria-prima metálica pelo componente polimérico, devido à ausência de interações do componente polimérico com o principal contaminante da aplicação, que é a graxa de lubrificação dos motores.

A partir dos ensaios de DSC, avaliou-se as temperaturas de transições características de cada polímero, de modo a correlacionar com a temperatura máxima de uso, considerada principal limitante para a proposta de substituição. Conforme verificado nos ensaios de DSC, verifica-se que os polímeros PP e PA apresentam temperatura de fusão em 162 °C e 222 °C, respectivamente. Já o ABS mostra-se como o pior candidato nesse quesito, já que o mesmo possui uma temperatura de transição vítrea em 110 °C, mais próxima do limite aceitável para o componente (com temperatura máxima de serviço recomendada entre 65 e 75°C). É importante destacar que os limites de temperatura de uso são inferiores as temperaturas de fusão e transição vítrea reportadas para os polímeros.

Em relação às solicitações mecânicas impostos na aplicação, a utilização de polímeros se mostra viável considerando a boa resistência ao escoamento e principalmente resistência ao impacto, conforme verificado em literatura. Essas características podem ainda ser aprimoradas pela utilização de polímeros reforçados ou pelo emprego de aditivos.

Em relação ao balanço geral de propriedades, o compósito de poliamida 6 reforçada com 15% de fibra de vidro se apresenta como melhor candidato para a proposta, devido à elevada resistência ao impacto e temperatura máxima de operação. Adicionando o parâmetro de custo das matérias-primas, pode-se concluir que a melhor opção avaliada é o Polipropileno H503, cuja substituição deve ser validada em avaliação funcional de protótipo.

## **SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS**

A validação da substituição do componente pela matéria prima polimérica pode ser concluída pela avaliação de vida de um protótipo funcional. É sugerido a fabricação de um prolongador em polipropileno, considerando o dimensional necessário. O protótipo deve então ser montado em motores postos em funcionamento por um período prolongado e submetido a testes de resistência ao impacto.

Adicionalmente pode ser avaliado a compatibilidade química do polipropileno e a poliamida 6 com outros lubrificantes utilizados em motores, como o politetrafluoroetileno (PTFE) e as graxas de sabão de lítio.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abdul Mageed, Hind Mahdi. (2010). **An FTIR Study of Characterization of Neat and UV Stabilized Nylon 6,6 Polymer Films**. KMUTNB: International Journal of Applied Science and Technology (KMUTNB Int J Appl Sci Technol). Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/328542758\\_An\\_FTIR\\_Study\\_of\\_Characterization\\_of\\_Neat\\_and\\_UV\\_Stabilized\\_Nylon\\_66\\_Polymer\\_Films](https://www.researchgate.net/publication/328542758_An_FTIR_Study_of_Characterization_of_Neat_and_UV_Stabilized_Nylon_66_Polymer_Films). Acesso em: 15 nov. 2020.

AKRO-PLASTIC. **AKROMID® B3 GF 15 S3 black (2345)**. 2019. Disponível em: <https://akro-plastic.com/productfilter/details/2345/>. Acesso em: 03 nov. 2020.

ANDREASSEN, Erik. Infrared and Raman spectroscopy of polypropylene. In: KARGER-KOCSIS, J. (ed.). **Polypropylene: An A-Z Reference**. Dordrecht: Kluwer Publishers, 1999. p. 320-328. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/264461705\\_Infrared\\_and\\_Raman\\_spectroscopy\\_of\\_polypropylene](https://www.researchgate.net/publication/264461705_Infrared_and_Raman_spectroscopy_of_polypropylene). Acesso em: 16 nov. 2020.

BATALIOTI, Murlo Dobri. **Avaliação da degradação do polipropileno sob múltiplas extrusões com e sem antioxidante**. 2016. 43 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2016.

CANEVAROLO JR, S. V. **Ciência dos Polímeros – Um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. 2ª edição., São Paulo: Artliber, 2002.

CHARLES, J; RAMKUMAAR, G.R.. FTIR and Thermal Studies on Polyethylene Terephthalate and Acrylonitrile Butadiene Styrene. **Asian Journal Of Chemistry**. Nagar, p. 4389-4398. mar. 2009. Disponível em: [http://www.asianjournalofchemistry.co.in/User/ViewFreeArticle.aspx?ArticleID=21\\_6\\_39](http://www.asianjournalofchemistry.co.in/User/ViewFreeArticle.aspx?ArticleID=21_6_39). Acesso em: 14 nov. 2020.

CHEMICAL AND ENGINEERING NEWS. **Why chemical companies are investing in high-end polymers**. Disponível em: <https://cen.acs.org/articles/94/i9/chemical-companies-investing-high-end.html>. Acesso em: 08 abr. 2020.

CRV INDUSTRIAL. **Conheça a graxeira, seus principais tipos e aplicações**. 2019. Disponível em: <http://crvindustrial.com/blog/conheca-a-graxeira-seus-principais-tipos-e-aplicacoes>. Acesso em: 15 out. 2019.

EXXONMOBIL. **Mobil Polyrex EM: Graxa para rolamentos de motores elétricos**. 2017. Disponível em: <https://www.mobilindustrial.com.br/media/1569/mobil-polyrex-em-serie-pds-2017.pdf>. Acesso em: 08 maio 2020.

FILIPPO FILHO, Guilherme. **Motor de Indução**. São Paulo: Ed. Érica, 2000. (243).

GRUPO RPF. **Entenda o que é polipropileno (PP) e para o que serve**. Disponível em: <https://www.gruporpf.com.br/blog/entenda-o-que-e-polipropileno-pp-que-para-o-que-serve/>. Acesso em: 03 nov. 2018.



POLYMER SCIENCE LEARNING CENTER. **Level Two: Polymers Up Close and Personal**. 2003. Disponível em: <https://pslc.ws/macrog/level2.htm>. Acesso em: 17 abr. 2020.

RATÃO, Natalia Torres. **Graxa de poliuréia - Estudo da compatibilidade da poliuréia, polialfaolefina e politetrafluoroetileno irradiado para melhoria da lubrificidade e estabilidade**. 2013. 78 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências na Área de Tecnologia Nuclear - Materiais, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2013. Disponível em: [http://pelicano.ipen.br/PosG30/TextoCompleto/Natalia%20Torres%20Ratao\\_M.pdf](http://pelicano.ipen.br/PosG30/TextoCompleto/Natalia%20Torres%20Ratao_M.pdf). Acesso em: 10 ago. 2020.

RONCATEC (São Paulo). **VISTA EXPLODIDA DE UM MOTOR ELÉTRICO**. Disponível em: <http://www.roncatec.com.br/motor-eletrico-sp.html>. Acesso em: 01 abr. 2020.

SOLIDPRIZE (Santa Catarina). **Tipos de graxeiras. 2019**. Disponível em: <https://www.solidprize.com.br/2017/09/tipos-de-graxeiras.html>. Acesso em: 15 out. 2019.

TOMASI, R.; BOTTA, W. **Uma proposta para reformulação do currículo do curso de graduação em engenharia de Materiais**. In: SEMINÁRIO SOBRE ENSINO DE METALURGIA E MATERIAIS, 1991, São Paulo: Anais, ABM, 1991

UL PROSPECTOR PLASTICS. Braskem PP H 503. 2004. Disponível em: <https://materials.ulprospector.com/en/profile/default?e=78143>. Acesso em: 17 abr. 2020.

UL PROSPECTOR PLASTICS. **Terluran® HI-10**. 2013. Disponível em: <https://materials.ulprospector.com/en/profile/default?e=38210>. Acesso em: 17 abr. 2020.

WEG (Jaraguá do Sul). **W22 Mining IR3**. Disponível em: <https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Motores-Elétricos/Trifásico---Baixa-Tensão/Eficiência-Energética/IR3-Premium/W22-Mining-IR3-Premium/W22-Mining-IR3-Premium-75-cv-8P-280S-M-3F-220-380-440-V-60-Hz-IC411---TFVE---B3D/p/12808642>. Acesso em: 12 fev. 2020.