

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

FERNANDO JÚNIO DUARTE

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DO UHMWPE ADITIVADO  
COM RESÍDUO DA RETIFICAÇÃO DO AÇO ABNT 4340 ENDURECIDO**

BELO HORIZONTE

2018

FERNANDO JÚNIO DUARTE

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DO UHMWPE ADITIVADO COM  
RESÍDUO DA RETIFICAÇÃO DO AÇO ABNT 4340 ENDURECIDO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Leonardo Roberto da Silva

Coorientador: Francisco Vieira dos Santos

BELO HORIZONTE

2018

FERNANDO JÚNIO DUARTE

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DO UHMWPE ADITIVADO  
COM RESÍDUO DA RETIFICAÇÃO DO AÇO ABNT 4340 ENDURECIDO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Aprovado em:

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Leonardo Roberto da Silva (Orientador)

---

Eng. Francisco Vieira dos Santos (Coorientador)

---

Prof. Anderson Edson da Silva

---

Prof. João Paulo Ferreira Santos

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho à minha mãe Luzia Maria Duarte pelo seu amor, dedicação e apoio incondicional durante toda minha vida.

## AGRADECIMENTOS

A Deus por sempre estar ao meu lado durante todos os momentos.

Ao professor Leonardo Roberto da Silva pela simplicidade, paciência, atenção e ensinamentos que foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores do CEFET-MG por todos os ensinamentos transmitidos ao longo da minha graduação.

Ao grande amigo Francisco Vieira pela amizade, apoio e orientação.

Ao professor Marcelo Araújo Câmara e ao mestrando em Engenharia Mecânica da UFMG Douglas Maciel d'Auriol pela disponibilidade e apoio na condução do ensaio tribológico.

Aos colegas de trabalho do Departamento de Química da UFMG pela amizade, paciência e compreensão.

À minha família, meus pais José Antônio e Luzia Maria, e meus irmãos Júlio César e Sérgio Rodrigo pelo incentivo, companheirismo e compreensão pela minha ausência.

Às minhas tias Conceição, Divina, Cristina e Expedita (*in memoriam*) por sempre me apoiarem ao longo dessa jornada.

À minha namorada Ludmila Braga pelo amor, carinho e compreensão pela minha ausência.

Aos amigos Antônio César, Carlos Jacinto, Guilherme Lima, Guilherme Sena, Heitor Vieira, Lucas Toledo, Lucas Turani, Mateus Lula, Pedro Henrique, Rodrigo Silva, Rebeca Mansur, Samuel Bessa, Sebastião Libério, Vinicius Siqueira e Vitor Hugo pela parceria e momentos de descontração ao longo dessa caminhada.

Aos funcionários do CEFET-MG, em especial aos funcionários da biblioteca Deiler, senhor Luiz e Vera e à funcionária do restaurante universitário Sônia.

## RESUMO

Este trabalho relata o estudo do comportamento tribológico de compósitos à base de matriz de Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular (UHMWPE) incorporados com resíduo da retificação do aço ABNT 4340 endurecido. As composições foram projetadas para 5 e 10% (m/m) de particulados provenientes da retificação cilíndrica do aço ABNT 4340 endurecido em adição à matriz de UHMWPE. A avaliação microestrutural por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) mostrou que as partículas de resíduo estavam bem dispersas na matriz polimérica, no entanto, as partículas segregaram para os limites de fase em compósitos com composição de 10% em peso de resíduo. A adição do resíduo à matriz de UHMWPE resultou num aumento da tensão limite de escoamento. As medidas de calorimetria exploratória diferencial (DSC) indicaram que a adição do resíduo à matriz polimérica impactou o grau de cristalinidade, sendo que os compósitos com 5% e 10% apresentaram aumento de 32,67% e 45,43% respectivamente no grau de cristalinidade comparativamente com o UHMWPE puro. Estudos tribológicos foram realizados pelo método pino sobre disco, utilizando amostras contra aço ferramenta M12. Com a adição do resíduo à matriz de UHMWPE, o coeficiente de atrito diminuiu e apresentou menor alteração no processo de fricção. As características das superfícies de atrito do UHMWPE e dos compósitos foram analisadas em detalhe por meio de observações de microscopia óptica.

**Palavras chaves:** tribologia, compósito, UHMWPE, reciclagem de resíduos.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: Desenho esquemático comparando polietilenos para moldagem por injeção, sopro e extrusão com uma cadeia polimérica de UHMWPE. ....	7
FIGURA 2: (a) e (b) Revestimento de UHMWPE em caçamba de caminhões utilizados em mineração. (c) Rolos de UHMWPE de esteiras transportadoras utilizadas para transporte de minério a longas distâncias.....	8
FIGURA 3: Representação esquemática da morfologia característica do UHMWPE.....	9
FIGURA 4: Micrografia de UHMWPE mostrando regiões amorfas e cristalinas (lamelas). ..	10
FIGURA 5: Modelo esquemático de duas superfícies em contato deslizante.....	13
FIGURA 6: Origem do atrito associado ao deslizamento de uma aspereza dura deslizando contra uma superfície polimérica. ....	14
FIGURA 7: Ilustração esquemática das componentes de adesão e deformação do atrito entre um polímero e uma contraface metálica.....	15
FIGURA 8: Modelo de deslizamento entre cadeias moleculares de PE. ....	16
FIGURA 9: Comparação do coeficiente de atrito em função do tempo de operação do UHMWPE puro e do UHMWPE modificado com diferentes pesos moleculares. ....	17
FIGURA 10: Coeficientes de atrito e desgaste do UHMWPE sobre contraface com rugosidade de 0,14-0,13 $\mu\text{m}$ versus temperatura de contato interfacial.....	18
FIGURA 11: Coeficiente de atrito em função da velocidade de deslizamento para polímeros semi-cristalinos.....	19
FIGURA 12: Variação do coeficiente de atrito com a velocidade de deslizamento para diferentes polímeros. ....	19
FIGURA 13: (a) Taxa de desgaste e (b) Coeficiente de atrito cinético de PTFE puro e PTFE preenchido com grafite; fibra de vidro e bronze em função da variação da velocidade de deslizamento a 23°C.....	20
FIGURA 14: Relação entre coeficiente de atrito e carga para várias velocidades de deslizamento do par poliamida e aço.....	22
FIGURA 15: Principais mecanismos de desgaste abrasivo. ....	24
FIGURA 16: Correlação de Ratner-Lancaster. ....	25
FIGURA 17: Esquema do desgaste adesivo.....	26
FIGURA 18: Fluxograma dos procedimentos realizados.....	27
FIGURA 19: (a) geometria da peça usinada (b) representação da superfície retificada.....	28

FIGURA 20: (a) operação de retificação (b) uso de fluido de retificação (c) operação de dressagem. ....	29
FIGURA 21: Moinho Planetário de alta energia. ....	29
FIGURA 22: Prensa Hidráulica com aquecimento. ....	30
FIGURA 23: Molde metálico tripartido. ....	30
FIGURA 24: Etapas do processamento das chapas poliméricas. ....	31
FIGURA 25: a) Prensa, matriz e placa b) sistema de corte c) corpos de prova de tração das três composições. ....	31
FIGURA 26: Equipamento SHIMADZU FRX - 720. ....	32
Figura 27: Equipamento Máquina de MEV modelo SED X. ....	33
FIGURA 28: Máquina de ensaio universal SHIMADZU, modelo AG-X. ....	34
FIGURA 29: Tribômetro. ....	35
FIGURA 30: Método de fixação do disco. ....	36
FIGURA 31: Configuração da medição da temperatura superficial do compósito no ensaio. ....	37
FIGURA 32: Distribuição granulométrica do resíduo. ....	38
FIGURA 33: Amostra do pó do resíduo utilizado como carga e análise elementar qualitativa por EDS. ....	40
FIGURA 34: Morfologia do pó de UHMWPE. ....	41
FIGURA 35: Microscopia Eletrônica de Varredura: a) Resíduo após processamento de cominuição. b) Superfície da fratura frágil do UHMWPE puro c) Superfície da fratura frágil do UHMWPE com 5% de carga d) Superfície da fratura frágil do UHMWPE com 10% de carga. ....	42
FIGURA 36: Amostra com 5% de carga e análise elementar qualitativa por EDS. ....	43
FIGURA 37: Amostra com 10% de carga e análise elementar qualitativa por EDS. ....	44
FIGURA 38: Tensão x Deformação convencional dos corpos de prova puro e com carga. ....	45
FIGURA 39: Tensão limite de escoamento das amostras de UHMWPE puro, com 5% e com 10 % de carga. ....	46
FIGURA 40: Análise Tukey para as médias das tensões limites de escoamento ....	47
FIGURA 41: Alongamento Final das amostras de UHMWPE puro e aditivado com 5% e com 10% de carga. ....	47
FIGURA 42: Análise Tukey para as médias do alongamento final. ....	48
FIGURA 43: Resistência à tração na ruptura das amostras de UHMWPE puro, com 5% e com 10% de carga. ....	49
FIGURA 44: Análise Tukey para as médias de resistência à tração. ....	50

FIGURA 45: Curva de aquecimento das amostras de UHMWPE puro e dos compósitos. ....	51
FIGURA 46: Curva de resfriamento das amostras de UHMWPE puro e dos compósitos. ....	52
FIGURA 47: Coeficiente de atrito em função da distância percorrida. ....	53
FIGURA 48: Coeficiente de atrito em função dos cem primeiros metros percorridos. ....	54
FIGURA 49: Coeficiente de atrito após os 1100 metros. ....	55
FIGURA 50: Imagem termográfica do disco de UHMWPE puro: A) temperatura de referência B) início do teste C) final do teste. ....	56
FIGURA 51: Imagem termográfica do disco de UHMWPE com 5% de carga: A) temperatura de referência B) início do teste C) final do teste. ....	57
FIGURA 52: Imagem termográfica do disco de UHMWPE com 10% de carga: A) temperatura de referência B) início do teste C) final do teste. ....	58
FIGURA 53: Imagens de microscopia óptica da amostra de UHMWPE puro: A) Superfície fora da trilha de desgaste B) Mecanismo de desgaste abrasivo C) Local de maior desgaste D) Direção de deslizamento. ....	59
FIGURA 54: Imagens de microscopia óptica da amostra de UHMWPE + 5% de carga: A) Superfície fora da trilha de desgaste B) Mecanismo de desgaste abrasivo C) Local de maior desgaste D) Desgaste adesivo. ....	60
FIGURA 55: Imagens de microscopia óptica da amostra de UHMWPE + 10% de carga: A) Superfície fora da trilha de desgaste B) Mecanismo de desgaste abrasivo C) Local de maior desgaste D) Desgaste adesivo. ....	61

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1: Propriedades físicas, mecânicas e térmicas do UHMWPE-3041.....	28
TABELA 2: Composição química (em %) do aço ABNT 4340 .....	28
TABELA 3: Parâmetros do teste de pino sobre disco. ....	36
TABELA 4: Análise elementar do resíduo por FAAS. ....	39
TABELA 5: Análise elementar do resíduo por FRX.....	39
TABELA 6: ANOVA para o fator tensão limite de escoamento. ....	46
TABELA 7: Anova para o fator alongamento final. ....	48
TABELA 8: ANOVA para o fator de resistência à tração. ....	49
TABELA 9: Efeito da adição de carga (resíduo) nos parâmetros de cristalização dos compósitos à base de UHMWPE. ....	52
TABELA 10: Parâmetros de rugosidade dos corpos de prova para ensaio tribológico. ....	54

## LISTA DE SIMBOLOS E NOMECLATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

$\text{Al}_2\text{O}_3$  - Óxido de Alumínio

DSC - Calorimetria exploratória diferencial

EDS - Espectroscopia por energia dispersiva

FAAS - Espectroscopia de Absorção Atômica por Chama

FRX - Fluorescência de raio X

HDPE - Polietileno de Alta Densidade

IF - Índice de fluidez

LDPE - Polietileno de Baixa Densidade

LLDPE - Polietileno de Baixa Densidade Linear

MET - Microscopia Eletrônica de Transmissão

MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura

PE - Polietileno

PEEK - Poli-eter-eter-cetona

PTFE - Politetrafluoretileno

RPM- Rotações por minuto

Tg - Temperatura de transição vítrea

UHMWPE - *Ultra High Molecular Weight Polyethylene* (Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular)

Xc - Grau de Cristalinidade

$\sigma_u$  - Tensão de tração na ruptura

$\epsilon_u$  - Alongamento

$\tau_s$  - Tensão de cisalhamento

$A_r$  - Área real de contato

$\sigma_y$  - Pressão de rendimento

$\Delta H_f$  - Entalpia de fusão

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	4
2 OBJETIVOS.....	6
2.1 Objetivo geral .....	6
2.2 Objetivos específicos .....	6
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	7
3.1 Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular - UHMWPE.....	7
3.1.1 Processamento do UHMWPE .....	10
3.2 Compósitos de matriz polimérica .....	11
3.3 Atrito de polímeros .....	12
3.4 Efeito das características de compostos poliméricos no atrito.....	15
3.5 Parâmetros do sistema tribológico que afetam o atrito.....	17
3.5.1 Velocidade de deslizamento.....	17
3.5.2 Carga normal aplicada.....	21
3.5.3 Temperatura de contato.....	22
3.6 Desgaste de polímeros .....	23
3.6.1 Mecanismos de desgastes coesivos .....	24
3.6.1.1 Mecanismo de desgaste abrasivo.....	24
3.6.1.2 Mecanismo de desgaste por fadiga.....	25
3.6.2 Mecanismos de desgaste adesivo .....	26
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	27
4.1 Métodos e matérias primas utilizadas .....	27
4.2 Ensaio de caracterização .....	32
4.2.1 Caracterização do resíduo .....	32
4.2.2 Caracterização do polímero utilizado como matriz.....	32
4.2.3 Caracterização do compósito. ....	33
4.2.3.1 Caracterização morfológica.....	33
4.2.3.2 Ensaio mecânico .....	33
4.2.3.3 Ensaio de determinação do grau de cristalinidade por DSC .....	34
4.2.3.4 Ensaio tribológico.....	35
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	38
5.1 Caracterizações do resíduo .....	38
5.1.1 Distribuição granulométrica do resíduo .....	38

5.1.2 Análise química do resíduo .....	38
5.1.3 Análise por MEV e EDS .....	39
5.2 Caracterização morfológica do UHMWPE .....	40
5.3 Caracterizações do compósito.....	41
5.3.1 Análise morfológica do compósito .....	41
5.3.2 Ensaio de tração .....	44
5.3.3 Grau de cristalinidade.....	50
5.3.4 Análise tribológica .....	52
6 CONCLUSÃO.....	62
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	63

## 1 INTRODUÇÃO

Compósitos de matriz polimérica são amplamente utilizados como materiais de engenharia para aplicações técnicas em que as propriedades tribológicas são de considerável importância (ABDELBARY, 2015). Suas propriedades autolubrificantes são comumente exploradas em componentes como rolamentos, engrenagens, anéis de pistão e correias de transmissão com o intuito de evitar a necessidade de lubrificação com óleo ou graxa e conseqüentemente seus problemas de contaminação (NURUZZAMAN e CHOWDHURY, 2012). Além disso, devido a vantagens como custo relativamente baixo para produção de altos volumes, baixo peso, elevada resistência ao desgaste e baixo coeficiente de atrito potencializam o uso de compósitos de matriz polimérica (POGACNIK e KALIN, 2012). No entanto, quando o contato entre os pares de deslizamento está presente, há o problema de atrito e desgaste. O coeficiente de atrito pode, em geral, ser reduzido e a resistência ao desgaste aumentada pela seleção das combinações corretas dos materiais em contato (NURUZZAMAN e CHOWDHURY, 2012).

O Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular (UHMWPE) é um polímero de engenharia que possui excelentes propriedades como baixa absorção de água, baixo coeficiente de atrito, alta resistência ao desgaste, excelente estabilidade química e alta resistência ao impacto, vantagens que o tornam potencialmente adequado para aplicações tribológicas (WANG *et al*, 2017). Para melhorar ainda mais suas propriedades mecânicas e resposta tribológica, são necessárias modificações como incorporação de cargas no polímero (FRIEDRICH e SCHLARB, 2011).

O coeficiente de atrito e a taxa de desgaste do UHMWPE puro não satisfazem aos requisitos para uso em componentes autolubrificantes (ABDELBARY, 2015). Atualmente, poucas aplicações tribológicas utilizam polímeros em sua forma original devido ao fato de que nenhum polímero pode fornecer uma taxa de desgaste razoavelmente baixa, com o melhor coeficiente de atrito necessário para um bom desempenho em trabalho. Portanto, há uma necessidade de modificar a maioria dos polímeros por meio da incorporação de uma carga adequada que pode reduzir a taxa de desgaste e, dependendo do requisito de projeto, aumentar ou diminuir o coeficiente de atrito (FRIEDRICH e SCHLARB, 2011).

Nos últimos anos, a preocupação com a destinação dos resíduos sólidos provindos da usinagem de metais tem se tornado assunto relevante, tendo em vista os impactos ambientais que podem ser causados pelo seu descarte. Nesse contexto, a preparação de compósitos

utilizando da incorporação de resíduos metálicos como carga em materiais poliméricos tem se tornado uma alternativa viável para amenizar o problema (TEIXEIRA, 2007).

Na usinagem de materiais metálicos utilizando o processo de retificação é utilizado como ferramenta de corte um rebolo com grãos abrasivos com geometria indefinida composta principalmente de materiais cerâmicos. A retificação de aços gera um subproduto formado por resíduos metálicos, particulados provenientes do rebolo devido o seu desgaste e a operação de dressagem, bem como fluidos de corte que são utilizados com o objetivo de reduzir os danos térmicos causados pelo aumento da temperatura na interface peça/rebolo devido ao atrito entre a peça e o rebolo e às altas velocidades de corte envolvidas no processo (MALKIN, 2008).

Como o principal objetivo da indústria é obter a maior eficiência possível, produzindo componentes com propriedades mecânicas e tribológicas desejáveis com menor custo possível, o uso de resíduos provenientes do processo de retificação, como carga em polímeros para fabricação de componentes mecânicos, pode ser uma alternativa viável para diminuir o custo de produção e melhorar as propriedades tribológicas do sistema, além de contribuir com o meio ambiente oferecendo uma boa alternativa para a destinação dos resíduos (FRLIC, 2016).

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Produzir compósitos de matriz de UHMWPE com reforço de partículas provindas do processo de retificação do aço ABNT 4340 endurecido, utilizando rebolo convencional de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , nas proporções de 5% e 10% (m/m) e posteriormente avaliar suas propriedades mecânicas e tribológicas em comparação com o UHMWPE puro.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Analisar a morfologia dos compósitos por meio da microscopia eletrônica de varredura.
- Verificar a influência da adição de partículas do resíduo da retificação do aço ABNT 4340 endurecido em uma matriz de UHMWPE na tensão limite de escoamento e na resistência à tração;
- Analisar a influência do grau de cristalinidade com a adição da carga à matriz polimérica;
- Estudar os efeitos da adição de carga à matriz polimérica no coeficiente de atrito do compósito;

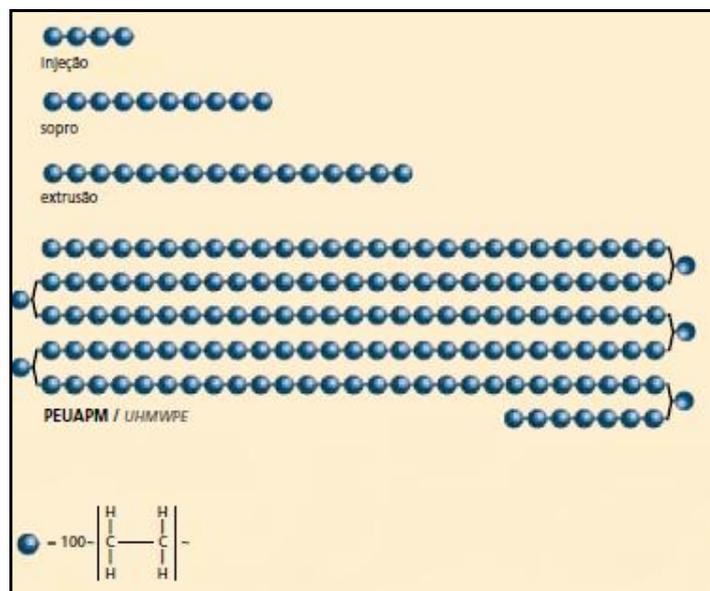
### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta alguns conceitos relevantes sobre o polímero utilizado como matriz, tais como propriedades mecânicas e estruturais, os quais podem ser relacionados com seu comportamento tribológico. É apresentado o conceito de compósito de matriz polimérica e a importância da adição de cargas com intuito de melhorar a resistência ao desgaste. Além disso, são apresentados os principais parâmetros do sistema tribológico que afetam o atrito e o desgaste de polímeros e compósitos.

#### 3.1 Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular - UHMWPE

O polietileno é, provavelmente, o polímero mais utilizado e o mais facilmente encontrado na vida diária, além de ser o material polimérico mais popular em todo o mundo, possui uma das mais simples estruturas entre todos os polímeros comerciais. Há vários tipos de polietilenos, Polietileno de Baixa Densidade (LDPE), Polietileno de Baixa Densidade Linear (LLDPE), Polietileno de Alta Densidade (HDPE) e Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular (UHMWPE) que são sintetizados com diferentes massas molares e arquiteturas de cadeia. Na Figura 1 é demonstrada qualitativamente a ordem de grandeza na diferença da cadeia polimérica de um polietileno para injeção, sopro e extrusão e o UHMWPE (WIEBECK e HARADA, 2005; KURTZ, 2009).

**Figura 1: Desenho esquemático comparando polietilenos para moldagem por injeção, sopro e extrusão com uma cadeia polimérica de UHMWPE.**



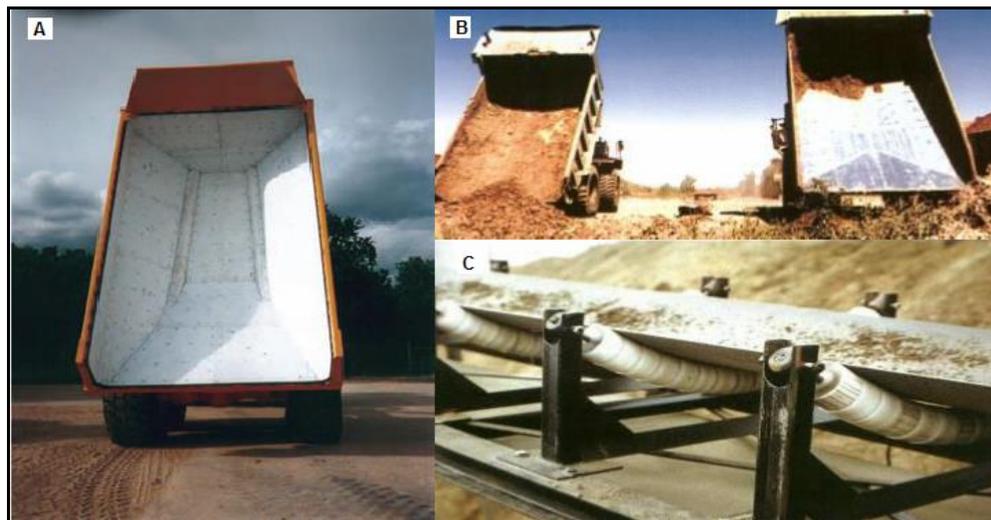
Fonte: BRASKEM, 2017.

O UHMWPE é um polímero semicristalino, de poucas ramificações e baixíssimo número de insaturações, com densidade média em torno de  $0,930 \text{ g/cm}^3$ , branco e opaco, com uma temperatura de transição vítrea entre  $-100^\circ\text{C}$  e  $-125^\circ\text{C}$  e uma temperatura de fusão de  $135^\circ\text{C}$ , com uma cristalinidade em torno de 45% em geral (WIEBECK e HARADA, 2005).

O UHMWPE tem uma massa molar cerca de 10 vezes maior que o polietileno de alta densidade. Essa massa molar extremamente alta confere ao polímero diversas propriedades de destaque como: alta resistência ao desgaste por abrasão, alta resistência ao impacto, além de baixíssimo coeficiente de atrito que torna o material auto lubrificante. Aplicações industriais diversas como acoplamentos, trilhos de máquinas, guia para correntes, isoladores de ruído, mancais, pistões, polias, rolamentos, parafusos sem fim, silenciadores, apoios, batentes e válvulas podem ser desenvolvidas com esse material. Mais de 90% da sua produção mundial é empregada nas indústrias (COUTINHO, 2003; WIEBECK e HARADA, 2005; BRASKEM, 2017).

As indústrias de mineração são grandes consumidoras de UHMWPE para recobrimento de vagões para transporte de minério, revestimento de caçamba de caminhões basculantes e na confecção de rolos de esteiras transportadoras, conforme ilustrado na Figura 2, devido aos seus baixos coeficientes de atrito e desgaste (WIEBECK e HARADA, 2005).

**Figura 2: (a) e (b) Revestimento de UHMWPE em caçamba de caminhões utilizados em mineração. (c) Rolos de UHMWPE de esteiras transportadoras utilizadas para transporte de minério a longas distâncias.**



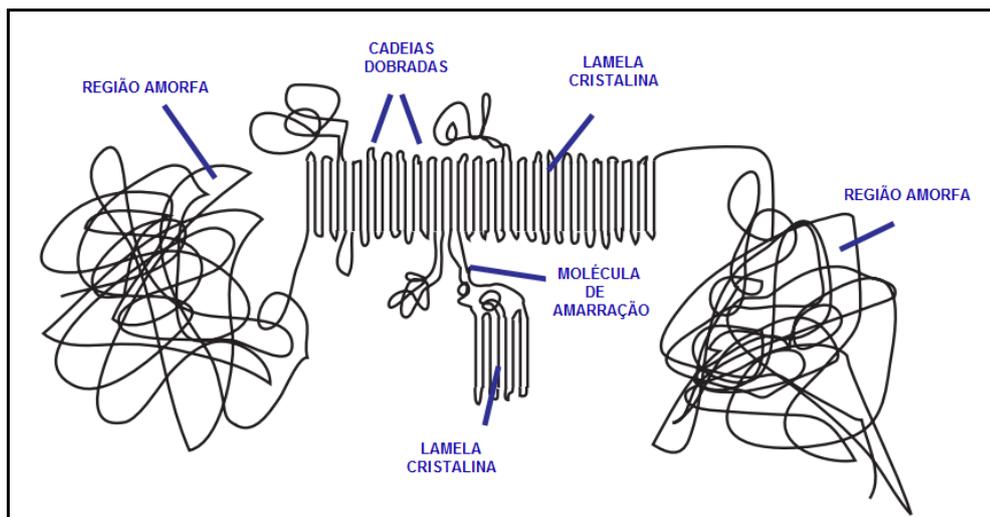
Fonte: BRASKEM, 2017.

O UHMWPE apresenta estrutura formada por lamelas cristalinas ligadas por moléculas de ligação em uma matriz amorfa. A maior quantidade de moléculas de ligação interlamelares, devido ao seu alto peso molecular, proporciona ao UHMWPE propriedades

diferenciadas em relação aos polietilenos convencionais, tais como, tenacidade, resistência à fadiga e resistência ao desgaste (KURTZ, 2009).

A cadeia molecular do UHMWPE é extensa e pode formar um emaranhado com energia interna que faz com que as moléculas ganhem liberdade a temperaturas elevadas. Quando resfriada abaixo da temperatura de fusão, a cadeia molecular do polietileno tem a tendência de girar em torno das ligações C – C e criar dobras em cadeia. Essa dobra de cadeia, por sua vez, permite que a molécula forme regiões locais, ordenadas em lâminas, conhecidas como lamelas cristalinas. Essas lamelas estão inseridas em regiões amorfas (desordenadas) e podem se comunicar com as lamelas circundantes por moléculas de amarração, conforme ilustrado na Figura 3. Com isso, diversas estruturas podem ser geradas dentro de uma mesma molécula sob diferentes condições de resfriamento (KURTZ, 2009).

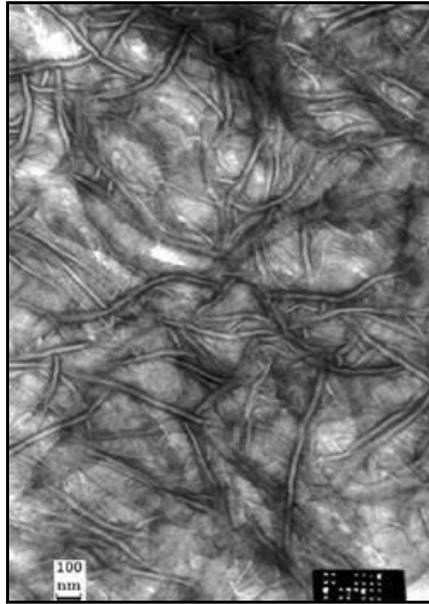
**Figura 3: Representação esquemática da morfologia característica do UHMWPE.**



Fonte: KURTZ, 2009

A morfologia cristalina do UHMWPE pode ser visualizada através de Microscopia Eletrônica de Transmissão (MET). Na Figura 4 é ilustrada uma micrografia de MET, onde é possível verificar regiões amorfas (em cinza) interligadas a lamelas cristalinas que aparecem como linhas brancas com um contorno escuro.

**Figura 4: Micrografia de UHMWPE mostrando regiões amorfas e cristalinas (lamelas).**



Fonte: KURTZ, 2009.

### **3.1.1 Processamento do UHMWPE**

A massa molar extremamente elevada do UHMWPE resulta em uma viscosidade muito alta e como consequência, o seu índice de fluidez (IF) medido a 190 °C com uma carga de 21,6 Kg se aproxima de zero, ou seja, o UHMWPE não escoava mesmo quando submetido a temperaturas acima da temperatura de fusão, sendo impossível processá-lo pelos métodos convencionais como extrusão convencional, sopro e injeção. Portanto, são necessárias técnicas especiais de processamento, como extrusão RAM (extrusão acionada por um pistão hidráulico) ou moldagem por compressão a quente, para produção de semiacabados em forma de chapas ou perfis (WIEBECK, 2005; KURTZ, 2009).

A extrusão RAM é um processo de sinterização do pó para formar um perfil maciço e contínuo. Diferentemente da extrusão convencional, em que o transporte de material é feito por uma rosca sem fim, a extrusão RAM é um processo do tipo batelada sem cisalhamento e mistura em que o material particulado é alimentado a uma matriz alongada enquanto um pistão compatível com o contorno da cavidade da matriz percorre um trajeto de ida e volta na zona de alimentação. Neste trajeto dá-se a compactação do pó e a transferência de calor para o polímero, ocorrendo a sinterização e em seguida o extrudado passa pelo resfriamento para então seguir para processos de acabamento (COLUMBY, 2008; BRASKEM, 2017).

Já a moldagem por compressão a quente (processo mais comum para transformação do UHMWPE) é um processo de compactação do pó em um molde através de uma prensa

hidráulica aquecida. O molde é aquecido o suficiente para causar a fusão do polímero em uma velocidade satisfatória para que o material flua, mesmo com sua alta viscosidade e posteriormente é resfriado até sua completa solidificação. Uma alta pressão hidráulica é aplicada sobre a placa superior ou inferior atuando sobre os moldes que são previamente apoiados sobre as placas (COLUMBY, 2008; BRASKEM, 2017).

O mecanismo empregado no processamento é a autodifusão, onde as cadeias do UHMWPE (ou segmentos de cadeia) em partículas adjacentes da resina misturam-se a um nível molecular. A cinética de difusão intergranular é promovida pela proximidade das interfaces a pressões elevadas e tem suas cadeias poliméricas termicamente ativadas a temperaturas elevadas. Assim, para processamento do UHMWPE é preciso altas pressões e temperaturas adequadas por um tempo suficiente para que as cadeias moleculares migrem através dos limites de grão (GALDINO, 2014).

Na maioria dos casos, os materiais semiacabados produzidos pelos processos de moldagem por compressão a quente e extrusão RAM são submetidos aos processos de usinagem para transformá-los em peças acabadas que serão utilizadas nas mais diversas aplicações do material (BRASKEM, 2017).

### **3.2 Compósitos de matriz polimérica**

A adição de cargas em uma matriz polimérica é comumente usada como um meio de melhorar as propriedades mecânicas e resistência ao desgaste de polímeros. Os compósitos de polímero normalmente consistem em uma matriz que incorpora um ou mais enchimentos de reforço. O agente de reforço pode ter a forma de partículas e proporciona alta dureza, força ou elasticidade, enquanto a matriz, que é um material polimérico, acrescenta auto-lubrificação, fazendo assim uma combinação única. Esses compósitos combinam o melhor e eliminam as piores propriedades das fases individuais. No entanto, o seu uso na aplicação prática é limitado devido a uma compreensão incompleta de sua resistência ao desgaste e aos meios pelos quais ele pode ser controlado e melhorado (ABDELBARY, 2015).

De acordo com Shang (2018), a interface entre o enchimento e a matriz desempenha um papel crítico nas propriedades do composto final. A interface pode ser afetada pelo tamanho e pela forma do preenchimento devido a diferentes áreas de superfície específicas e reatividade superficial.

Em geral, as características deformacionais da segunda fase nos compósitos desempenham um papel muito importante na modificação da interface. A classificação da

formulação de compósitos de matriz polimérica, do ponto de vista material deformacional, pode ser dividida basicamente em dois tipos. Uma é onde as "fases macias e lubrificantes" são adicionadas a uma matriz de uma "fase dura" relativamente contínua e a segunda é o tipo onde a "fase dura e forte" é dispersa em uma matriz de "fase mole" (STACHOWIAK, 2006).

Segundo Stachowiak (2006), quando uma fase macia é adicionada a matriz de uma "fase dura" a intenção é fornecer um material de baixo cisalhamento ou autolubrificante em uma matriz rígida e, portanto, um terceiro corpo lubrificante. O uso de PTFE ou grafite em polímeros mais duros, como o PEEK ou o *nylon 66*, é um bom exemplo desse tipo de composto amplamente utilizado. A segunda fase não contribui para a melhoria de quaisquer outras propriedades mecânicas, como o módulo de elasticidade. Além disso, pode haver uma redução drástica nas propriedades mecânicas como resultado da inclusão da fase macia na matriz. A principal vantagem da utilização de um material lubrificante tão macio como o PTFE na matriz é a redução dos coeficientes de atrito e desgaste até uma porcentagem em peso ideal (de 5 a 20%) da fase macia e um aumento correspondente no limite do produto pressão-velocidade (PV). A utilização de uma porcentagem de fase mole muito grande poderá reduzir o módulo de elasticidade e a resistência e, assim, pode ocasionar um aumento da taxa de desgaste.

No caso em que uma fase dura é dispersa em uma matriz flexível, a principal vantagem é aumentar a rigidez da matriz, no entanto, pode haver uma perda correspondente de tenacidade. Enquanto o atrito é controlado pela propriedade autolubrificante da matriz, a resistência ao desgaste é melhorada porque a capacidade de carga do compósito é basicamente aumentada devido à presença de uma segunda fase dura (STACHOWIAK, 2006).

As respostas tribológicas de compósitos poliméricos quando deslizadas contra superfícies de metal duras (e "lisas") dependem mais das propriedades de interface e menos das propriedades coesivas ou subsuperficiais. No entanto, este último controla as propriedades de fratura da subsuperfície nos regimes de alta taxa de desgaste e é uma fração significativa na abrasão bruta e na fadiga de contato rolante (SHANG, 2018).

### **3.3 Atrito de polímeros**

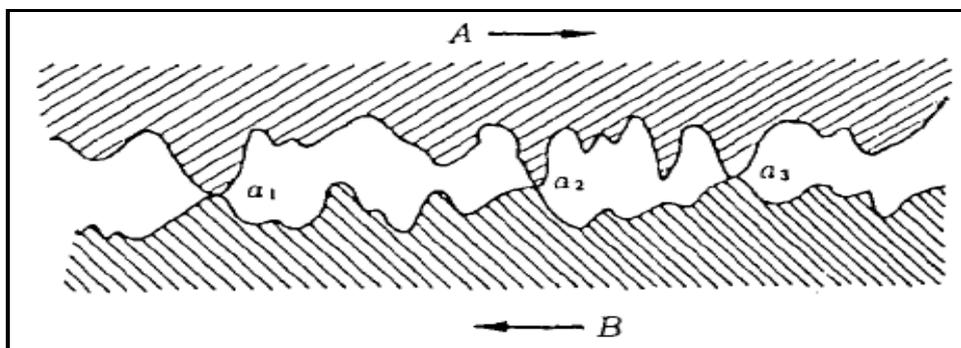
De acordo com Friedrich (1986), atrito é a força de resistência tangencial ao limite comum entre dois corpos quando, sob a ação de uma força externa, um corpo se move ou tende ao movimento, em relação à superfície do outro.

O atrito é um fenômeno muito comum em sistemas mecânicos que pode ser aumentado ou diminuído dependendo dos pares de deslizamento e parâmetros operacionais. A força de atrito é governada pelo processo que ocorre nas camadas superficiais finas dos corpos correspondentes (ABDELBARY, 2015).

O contato entre polímeros, ou entre um polímero e um metal, é predominantemente elástico fato este que diferencia o atrito metálico e o polimérico. A extensão da plasticidade na região de contato é definida pela relação entre o módulo de elasticidade e a dureza do material mais macio. Além disso, os polímeros apresentam propriedades viscoelásticas e mostram um aumento acentuado da tensão de escoamento com a taxa de deformação (HUTCHINGS e SHIPWAY, 2017).

Os principais componentes que devem ser levados em consideração no estudo do atrito são a adesão e a deformação. A adesão tem sua origem na interface entre o corpo deslizante e a contraface e é definida como o cisalhamento de junções adesivas formadas em regiões da área real de contato. A formação de junções interfaciais geralmente é influenciada pela natureza das áreas de contato, além da natureza química da superfície e das tensões criadas nas camadas superficiais devido às condições de carga aplicada (ABDELBARY, 2015). Vale ressaltar que a soma das áreas de todas as junções constitui a área real de contato, que é muito menor que a área interfacial total devido à presença de asperezas na superfície dos materiais. Na Figura 5 são representadas esquematicamente duas superfícies (A e B) em contato deslizante, onde a soma das junções  $a_1$ ,  $a_2$  e  $a_3$  representa a área real de contato (YAMAGUCHI, 1990).

**Figura 5: Modelo esquemático de duas superfícies em contato deslizante.**

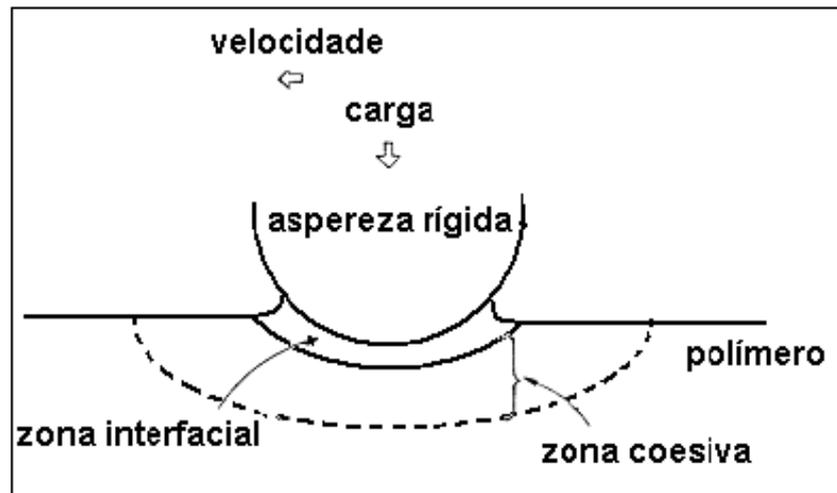


Fonte: YAMAGUCHI, 1990

A componente de deformação envolve a dissipação de energia em um volume elevado em torno da área local de contato e o termo de adesão é originado da interface entre o material deslizante e a contraface. Na Figura 6 são demonstradas as regiões onde essas duas fontes de

atrito se originam, para o deslizamento de uma aspereza dura sobre uma superfície de polímero, sendo que o mecanismo de deformação está relacionado à zona coesiva e o mecanismo de adesão à zona interfacial (HUTCHINGS e SHIPWAY, 2017).

**Figura 6: Origem do atrito associado ao deslizamento de uma aspereza dura deslizando contra uma superfície polimérica.**



Fonte: HUTCHINGS E SHIPWAY, 2017 (adaptado).

De acordo com Abdelbary (2015), a força de adesão na interface entre as asperezas é igual à resistência ao cisalhamento do polímero que é proporcional a tensão de cisalhamento necessária para produzir deslizamento entre as superfícies de atrito. A força de adesão  $F_a$  que resiste ao deslizamento entre as superfícies é dada pela Equação 1

$$F_a = \tau_s \cdot A_r \quad (1)$$

onde  $\tau_s$  é a tensão de cisalhamento necessária para produzir deslizamento entre as superfícies de atrito e  $A_r$  é a área real de contato. Para o caso de polímeros termoplásticos,  $F_a$  pode variar com a temperatura, especialmente próximo da temperatura de transição vítrea.

Ainda conforme Abdelbary (2015), a energia de deformação é o componente dominante do atrito durante o desgaste abrasivo. É atribuída à deformação causada por asperezas na contraface dura que penetra na superfície mais macia do polímero e gera uma ranhura no polímero. O principal fator que envolve a deformação de polímeros é a dissipação de energia mecânica que depende das propriedades mecânicas do polímero, condições de deslizamento, temperatura superficial, condições ambientais entre outras. A energia de deformação representada pelo processo que gera ranhuras é atribuída ao segundo componente de atrito,  $F_d$ , e dado pela Equação 2

$$F_d = \sigma_y \cdot A_{r2} \quad (2)$$

onde  $\sigma_y$  é a pressão de rendimento do polímero e  $A_{r2}$  é a área da trilha sulcada.

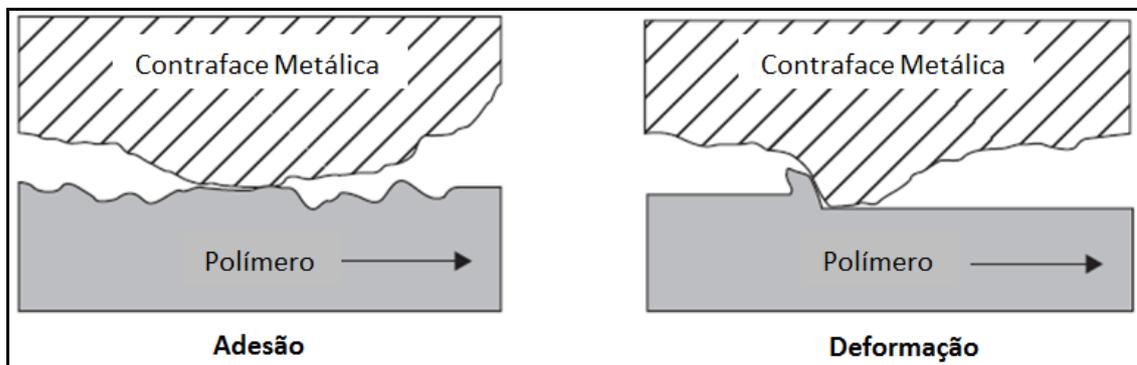
Conforme Blau (2008), devido aos seus baixos módulos de elasticidade, o contato de polímeros termoplásticos tem maior probabilidade de ser elástico. Segundo Silva (2003) as interações eletrostáticas e/ou de Van der Waals atuam diretamente sobre o mecanismo de adesão de polímeros deslizando a seco sobre uma superfície “lisa”, impactando diretamente no coeficiente de atrito. A força de adesão é geralmente o componente mais importante para os metais e para polímeros deslizando a seco sobre superfícies “lisas”, no entanto, para polímeros deslizando sobre superfícies ásperas ou na presença de um lubrificante, a componente de deformação pode se tornar significativa.

Entretanto, não é simples investigar separadamente os efeitos de ambos os componentes do atrito, e muitas vezes é suficiente considerar que a força de atrito é apenas a soma simples das componentes  $F_a$  e  $F_d$  conforme a Equação 3 (ABDELBARY, 2015).

$$F = F_a + F_d \quad (3)$$

Na Figura 7 são representadas esquematicamente as componentes de adesão e deformação de um polímero em contato deslizante sobre uma contraface metálica.

**Figura 7: Ilustração esquemática das componentes de adesão e deformação do atrito entre um polímero e uma contraface metálica.**



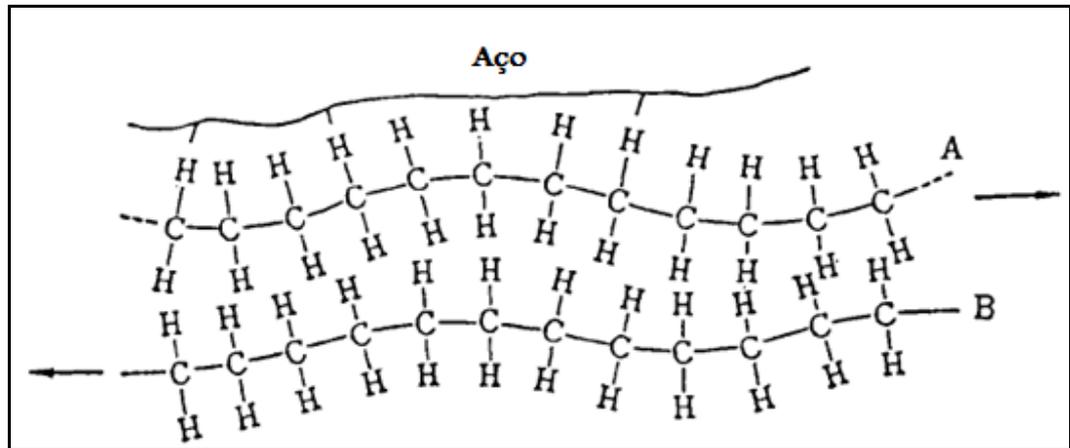
Fonte: ABDELBARY, 2015 (adaptado).

### 3.4 Efeito das características de compostos poliméricos no atrito.

De acordo com Yamaguchi (1990), a resistência ao atrito é equivalente à força necessária para romper a área de contato verdadeira no cisalhamento. São representados na Figura 8 os aspectos microscópicos do contato e do atrito entre duas superfícies sólidas usando polietileno (PE) e aço como exemplo. Neste caso, ocorre deslizamento relativo entre as moléculas A e B, porque a resistência ao cisalhamento entre a molécula A do PE e a superfície de aço à qual ela adere é maior do que aquela entre as moléculas de PE. A

resistência ao movimento entre as moléculas A e B é, portanto, equivalente à energia de ligação molecular entre elas. Essa energia de ligação molecular entre as moléculas se traduz na componente de adesão do atrito.

**Figura 8: Modelo de deslizamento entre cadeias moleculares de PE.**

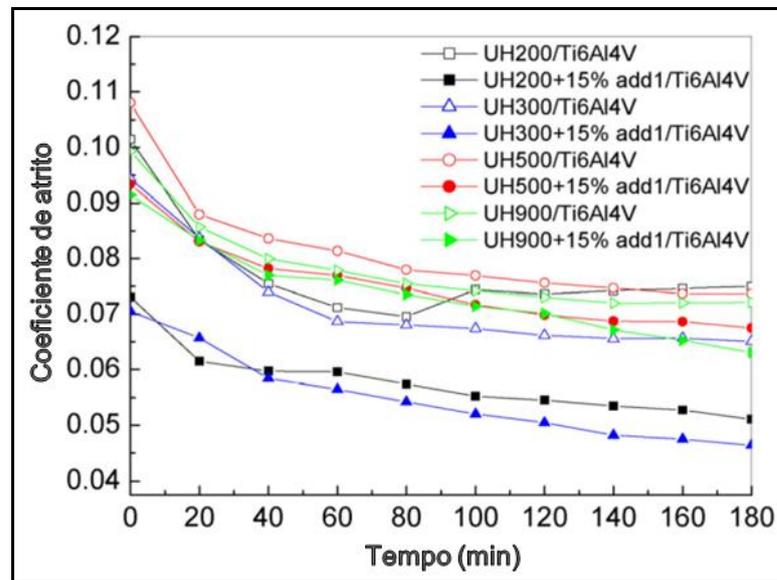


Fonte: YAMAGUCHI, 1990

O conceito de resistência ao cisalhamento entre as duas moléculas A e B também pode ser considerado do ponto de vista morfológico onde, por exemplo, o grau de simetria da estrutura molecular pode influenciar o coeficiente de atrito. Quanto mais grupos volumétricos a cadeia apresentar, maiores serão os valores de coeficiente de atrito (SILVA, 2003). No entanto, de acordo com Lee (1985), pesos moleculares mais altos e ou emaranhados extensivos resultam em redução do desgaste por atrito.

Liu e seus colaboradores (2016) analisaram a influência do peso molecular no atrito e desgaste do UHMWPE e seus compósitos com Cu (II) deslizando sobre a liga Ti6Al4V sob condição de lubrificação utilizando água deionizada. A Figura 9 ilustra a variação do coeficiente de atrito em função do tempo de operação para amostras de UHMWPE e compósito UHMWPE/Cu (II) com quatro diferentes pesos moleculares, sendo 2, 3, 5 e 9 milhões. Observa-se que o coeficiente de atrito varia com a variação do peso molecular para as mesmas condições de ensaio.

**Figura 9: Comparação do coeficiente de atrito em função do tempo de operação do UHMWPE puro e do UHMWPE modificado com diferentes pesos moleculares.**



Fonte: LIU et al, 2016 (Adaptado)

Na Figura 9 é demonstrado que o menor coeficiente de atrito dentre os pares UHMWPE puro/ Ti6Al4V e UHMWPE modificado / Ti6Al4V analisados foi alcançado pela faixa de peso molecular da ordem de 3 milhões. Além disso, observou-se que o UHMWPE modificado apresentou uma redução de 29% no coeficiente de atrito em comparação com o UHMWPE puro no deslizamento sobre a liga Ti6Al4V.

### 3.5 Parâmetros do sistema tribológico que afetam o atrito

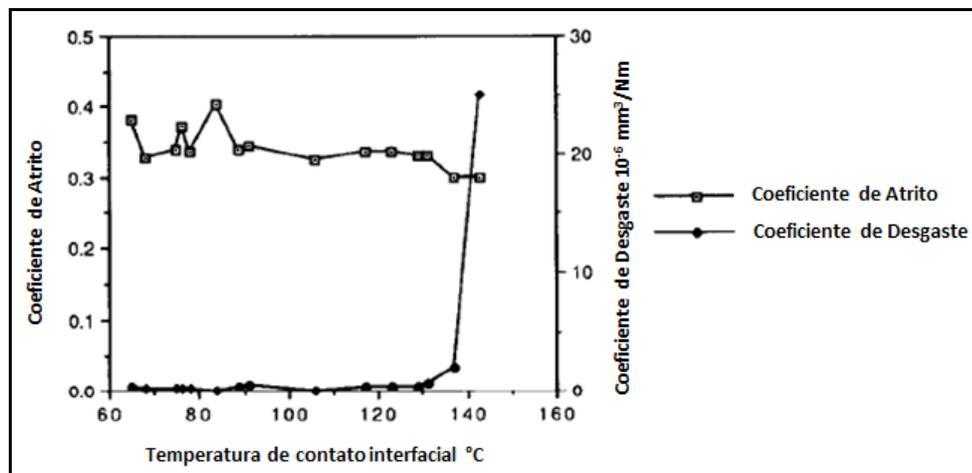
#### 3.5.1 Velocidade de deslizamento

O efeito da velocidade de deslizamento no atrito e desgaste entre aço e polímero atua na variação da temperatura interfacial dos corpos envolvidos (ZHANG, 1998). Uma forte dependência do coeficiente de atrito na velocidade de deslizamento é observada quando a temperatura do polímero aproxima-se da temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) (ABDELBARAY, 2015).

Barrett *et al* (1992) em seu estudo experimental sobre atrito e desgaste do UHMWPE deslizando sobre um aço ligado descobriu que o desgaste do UHMWPE é criticamente dependente da temperatura da superfície. Quando a temperatura interfacial excede um valor crítico, próximo ao ponto de amolecimento do UHMWPE, o desgaste ocorre muito rápido, enquanto que pode haver uma pequena diminuição do atrito, apresentando uma perda súbita

de uma camada de polímero fundido ou amolecido. Na Figura 10 são demonstrados os coeficientes de atrito e desgaste do UHMWPE como uma função da temperatura interfacial para uma rugosidade da contraface de  $0,13 \mu\text{m} - 0,14 \mu\text{m}$ . É possível perceber um grande efeito da temperatura de contato numa faixa próxima a  $136^\circ\text{C}$  que é a temperatura de amolecimento do UHMWPE em que há um aumento extremamente elevado no coeficiente de desgaste, enquanto que o coeficiente de atrito tem um leve decréscimo.

**Figura 10: Coeficientes de atrito e desgaste do UHMWPE sobre contraface com rugosidade de  $0,14-0,13 \mu\text{m}$  versus temperatura de contato interfacial.**



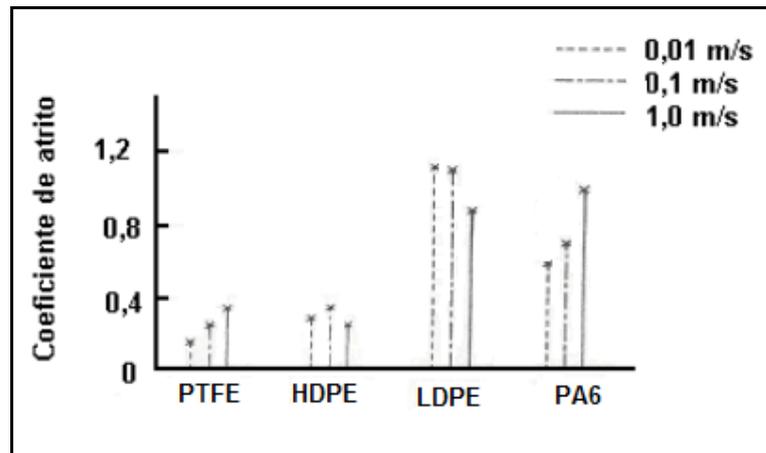
Fonte: BARRETT *et al*, 1992 (adaptado)

Além disso, Barrett e seus colaboradores (1992) observaram que em altas velocidades de deslizamento, o desgaste é influenciado pela rugosidade da superfície em que o aumento da mesma contribui para o aumento da temperatura na interface do tribossistema.

Dickens *et al* (1986) em seu trabalho, observou que baixos coeficientes de atrito do polímero PTFE em contato deslizante sobre um aço foram obtidos apenas para velocidades de deslizamento muito baixas e pressões de contato relativamente altas. No entanto, segundo Abdelbary (2015), existe uma velocidade de deslizamento crítica sobre a qual a temperatura instantânea, gerada na interface, pode ser alcançada e a taxa de desgaste reduz-se ligeiramente devido à fusão superficial e ao amolecimento do polímero. Esta temperatura é chamada de temperatura *flash* e é causada por atrito adesivo na interface de contato instantâneo.

De acordo com Silva (2003) o comportamento do coeficiente de atrito com a variação da velocidade de deslizamento de polímeros pode variar para diferentes tribossistemas. Sendo que o coeficiente de atrito pode ter uma relação direta ou inversamente proporcional ao aumento da velocidade de deslizamento dependendo dos materiais em contato, conforme ilustrado na Figura 11.

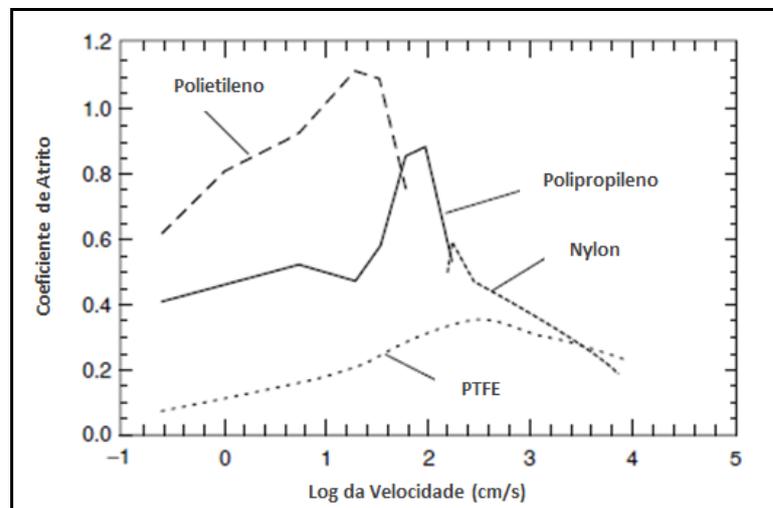
Figura 11: Coeficiente de atrito em função da velocidade de deslizamento para polímeros semi-cristalinos.



Fonte: SILVA, 2003.

De acordo com Blau (2008), existe uma faixa de velocidade de deslizamento em que o polímero exibe um coeficiente de atrito máximo. Na Figura 12 é demonstrado que essa velocidade varia para diferentes tipos de polímeros. O coeficiente de atrito apresenta diminuição com o aumento da velocidade de deslizamento após essa faixa.

Figura 12: Variação do coeficiente de atrito com a velocidade de deslizamento para diferentes polímeros.

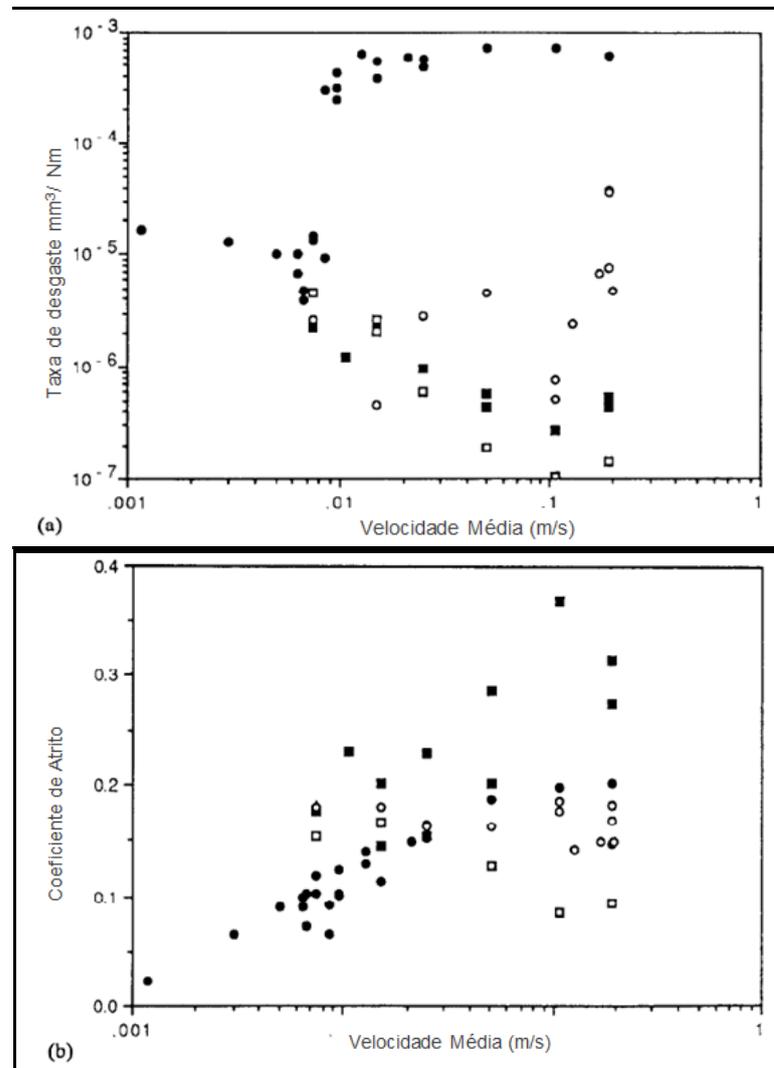


Fonte: BLAU, 2008 (adaptado).

Blanchet e Kennedy (1992) estudaram o comportamento da taxa de desgaste e do coeficiente de atrito em função da velocidade de deslizamento comparando o PTFE puro com três compósitos de PTFE aditivado com cargas, sendo fibra de vidro (25% em peso), bronze (40% em peso) e grafite (15% em peso). Segundo os autores, existe uma faixa de velocidade de deslizamento (aproximadamente  $0,01 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) em que o desgaste do PTFE puro passa por uma transição de brando para severo. Enquanto que todos os três compósitos apresentaram

coeficientes de atrito próximo a 0,2 na faixa de velocidade de deslizamento crítica, à medida que a velocidade de deslizamento era aumentada a partir do valor crítico, o atrito do compósito de PTFE aditivado com bronze apresentava diminuição significativa enquanto que o atrito do compósito de grafite permanecia constante e o de fibra de vidro aumentava. Já a taxa de desgaste dos compósitos com cargas de fibra de vidro e com carga de bronze diminuiu para velocidades de deslizamento acima da faixa de transição de desgaste do PTFE puro, conforme demonstrado na Figura 13. Portanto, dependendo do sistema, a adição de cargas a uma matriz polimérica pode atuar de forma a interromper a deformação subsuperficial e à propagação de fendas inibindo o desgaste severo em altas velocidades de deslizamento.

**Figura 13: (a) Taxa de desgaste e (b) Coeficiente de atrito cinético de PTFE puro e PTFE preenchido com grafite; fibra de vidro e bronze em função da variação da velocidade de deslizamento a 23°C.**



Legenda: ● PTFE sem preenchimento ○ PTFE com 15% de grafite ■ PTFE com 25% de fibra de vidro □ PTFE com 40% de bronze

Fonte: BLANCHET e KENNEDY, 1992 (adaptado).

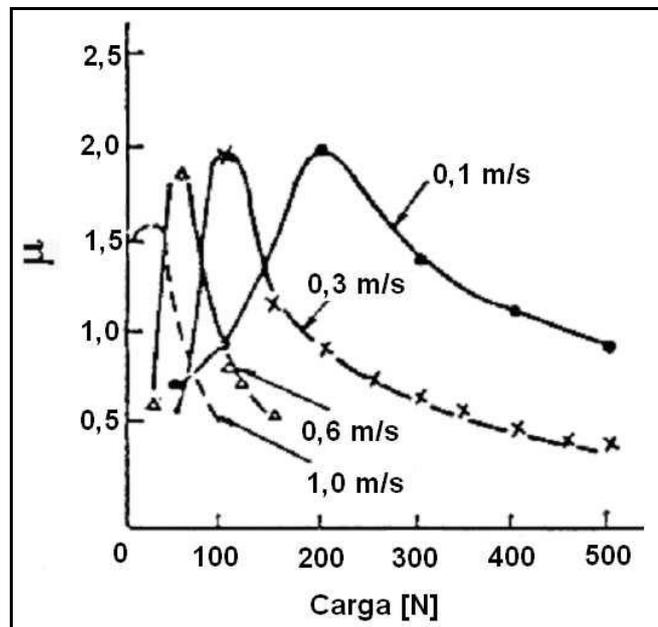
### 3.5.2 Carga normal aplicada

De acordo com Blau (2008), o mecanismo de atrito de polímeros varia dependendo da carga normal aplicada. A força de atrito deixa de ser proporcional à força normal quando as condições de contato desencadeiam o início de processos interfaciais. Quando duas superfícies são colocadas em contato sob uma carga normal, as asperezas se deformam primeiro elasticamente e depois plasticamente à medida que a carga aumenta, até que a pressão aplicada se iguale a força contrária distribuída sobre a área de contato em expansão e o crescimento das junções é interrompido.

Conforme Hutchings e Shipway (2017), o contato de materiais poliméricos é quase completamente elástico, exceto contra superfícies muito ásperas. Além disso, de acordo com Abdelbary (2015), o amolecimento através do aumento da temperatura do polímero em deslizamento e a deformação plástica nas interações da aspereza têm um papel dominante na determinação da área real de contato.

Segundo Abdelbary (2015), para processos de deslizamentos de polímeros termoplásticos com aplicação de altas cargas, de 10 a 100 N, o coeficiente de atrito tende a se manter constante, enquanto que para faixa de cargas relativamente menores, de 0,02 a 1 N, à medida que a carga diminui, a deformação elástica das asperezas superficiais rege o processo de deslizamento, com conseqüente aumento do coeficiente de atrito. Contudo, Yamaguchi (1990), demonstrou em seu trabalho comparativo utilizando poliamida no deslizamento com aço em diferentes velocidades, que o coeficiente de atrito apresenta uma região de máximo com a variação carga aplicada, conforme ilustra a Figura 14.

**Figura 14: Relação entre coeficiente de atrito e carga para várias velocidades de deslizamento do par poliamida e aço.**



Fonte: YAMAGUCHI, 1990

Portanto a influência da carga aplicada no coeficiente de atrito no deslizamento do polímero corresponde à transição do contato elástico para o plástico e, além disso, o aumento na temperatura de deslizamento devido à carga aplicada também pode afetar as transições viscoelásticas em polímeros e conseqüentemente afetar o mecanismo de atrito (ABDELBARY, 2015).

### 3.5.3 Temperatura de contato

A variação da temperatura no contato entre materiais, afeta de forma significativa a força de atrito. Devido à baixa condutividade térmica e baixo ponto de fusão dos polímeros, o parâmetro temperatura se torna ainda mais importante com relação ao coeficiente de atrito. O calor é geralmente gerado devido ao atrito da deformação do polímero durante o seu deslizamento em pontos de contato reais. A formação sequencial e o cisalhamento de ligações adesivas também é outra fonte de geração de calor. Com o aquecimento, as propriedades mecânicas de um polímero mostram uma transição do estado vítreo, com alta resistência e alta rigidez, para o estado de borracha, com menor resistência e menor rigidez. Além disso, as temperaturas impostas, tanto por atrito quanto externamente, podem combinar com efeitos de fadiga superficial acelerando a degradação do polímero (HUTCHINGS, 2017).

De acordo com Stachowiak e Batchelor (2013), em situações de deslizamento a seco, o aumento tanto da carga normal como da velocidade de deslizamento irá provocar um aquecimento na região de contato e, conseqüentemente, um aumento na temperatura. No entanto, conforme Kalin e Vizintin (2001) as altas temperaturas de contato não se limitam a uma alta velocidade relativa de deslizamento das superfícies de atrito. As altas frequências de atrito de curta duração que ocorrem em pontos de contato têm um efeito de aquecimento similar.

### **3.6 Desgaste de polímeros**

De acordo com Hutchings e Shipway (2017), devido ao fato de polímeros apresentarem baixos coeficientes de atrito (tipicamente entre 0,1 e 0,5) quando colocados em contato deslizante com materiais mais duros como metais e cerâmicas, eles são frequentemente utilizados não lubrificadas em aplicações tribológicas.

Conforme Yamaguchi (1990), o desgaste ocasionado pelo contato entre dois corpos é resultado de combinações complexas de alguns fenômenos e diferentes condições. Segundo Abdelbary (2015), o desgaste dos polímeros pode ser subdividido em três grupos principais: adesão, abrasão e fadiga superficial.

Hutchings e Shipway (2017) afirmam que quase toda a deformação devido ao contato ou deslizamento entre polímero e metal ou cerâmica ocorre no polímero, e o acabamento superficial da contraface dura tem uma forte influência no mecanismo de desgaste resultante. Se a contraface for lisa, o desgaste pode resultar da adesão entre as superfícies e envolver a deformação apenas nas camadas superficiais do polímero. Por outro lado, se a contraface for áspera, suas asperezas causarão uma deformação no polímero a uma profundidade significativa resultando então na abrasão associada à deformação plástica do polímero, ou no crescimento de trincas por fadiga na região deformada. Essas duas classes de mecanismo de desgaste, envolvendo deformação superficial e subsuperficial, respectivamente, foram denominadas processos de desgaste interfacial e coesivo. Em geral, os polímeros que deslizam em contrafaces duras altamente polidas sofrerão desgaste adesivo, enquanto superfícies torneadas ou retificadas promovem mecanismos coesivos.

Cada mecanismo de desgaste é regido por suas próprias leis e em muitas ocasiões, pode agir de maneira a afetar os demais. É importante ressaltar que nem sempre é fácil diferenciar esses tipos de desgaste, pois eles são inter-relacionados e raramente ocorrem separadamente (ABDELBARY, 2015).

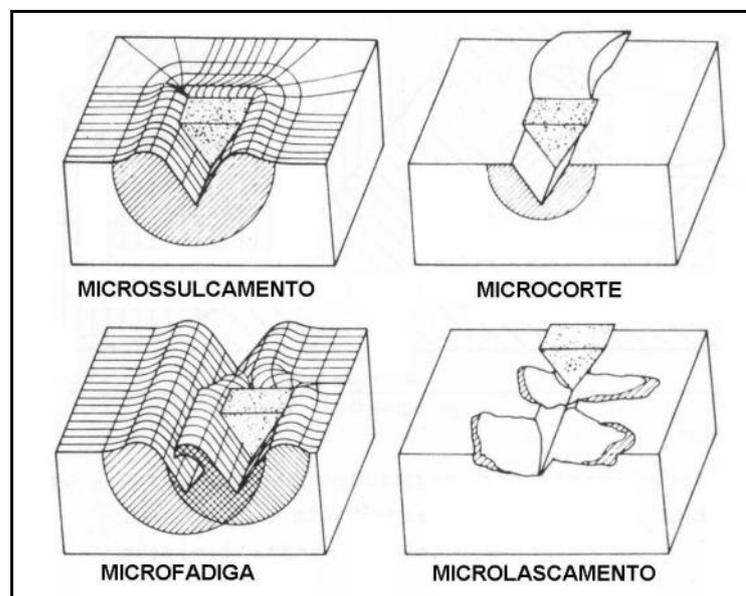
### 3.6.1 Mecanismos de desgastes coesivos

O desgaste coesivo resulta da deformação do material de superfície e subsuperfície, causada pela passagem de uma protuberância na contraface sobre a superfície do polímero. A protuberância pode ser uma aspereza em uma superfície dura ou, por exemplo, detritos poliméricos transferidos para a contraface. A deformação resultante no polímero pode ser plástica que resulta do mecanismo de desgaste por abrasão ou elástica que por sua vez está associada à fadiga (HUTCHINGS e SHIPWAY, 2017).

#### 3.6.1.1 Mecanismo de desgaste abrasivo

De acordo com Abdelbary (2015) o desgaste abrasivo é causado por asperezas duras na contraface, que penetram a superfície de fricção do polímero e removem o material, resultando em micro-usinagem, desgaste de sulcos, rasgões, aragem, arranhões e rachaduras na superfície. Na Figura 15 são mostrados alguns dos principais mecanismos de desgaste abrasivo.

**Figura 15: Principais mecanismos de desgaste abrasivo.**

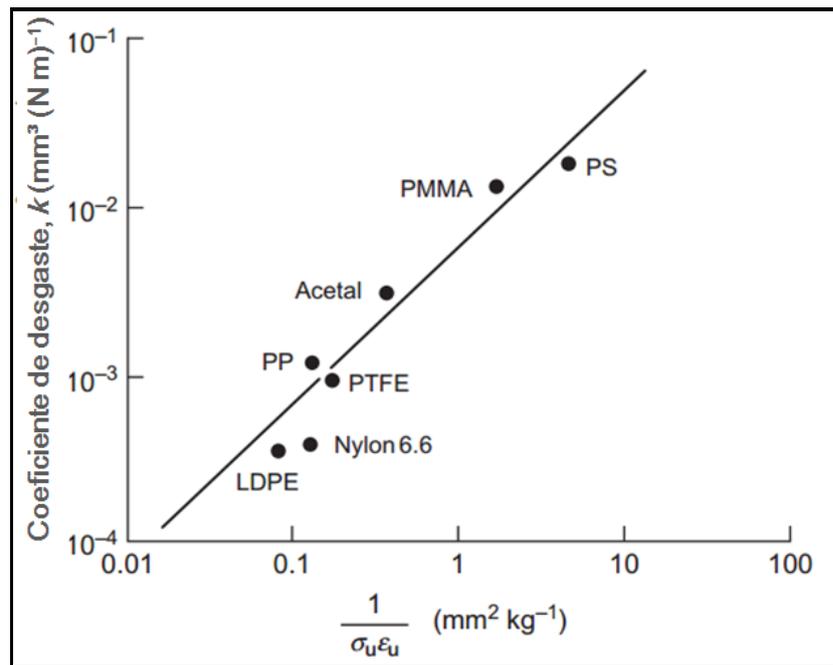


Fonte: Adaptado de ZUM GAHR, 1987.

Conforme Hutchings e Shipway (2017) existe uma correlação entre taxas de desgaste abrasivo e valores de  $1/\sigma_u \epsilon_u$ , onde  $\sigma_u$  e  $\epsilon_u$  são a tensão de tração na ruptura e o alongamento para o polímero, medidos em um teste de tração convencional. Os autores ainda ressaltam que

embora as condições sob as quais  $\sigma_u$  e  $\epsilon_u$  são medidas diferem consideravelmente, especialmente em termos de taxa de deformação, daquelas em contato deslizante, a validade dessa correlação, às vezes chamada de correlação de Ratner-Lancaster, é amplamente reconhecida. A correlação de Ratner-Lancaster para alguns polímeros termoplásticos é demonstrada na Figura 16.

**Figura 16: Correlação de Ratner-Lancaster.**



Fonte: Adaptado de HUTCHINGS e SHIPWAY (2017)

Outra forma de desgaste abrasivo é o desgaste abrasivo a três corpos, que ocorre quando partículas abrasivas duras são inseridas em um sistema tribológico polimérico. A partícula abrasiva livre penetra facilmente na superfície do polímero resultando em desgaste do polímero (ABDELBARAY, 2015).

### **3.6.1.2 Mecanismo de desgaste por fadiga**

O desgaste por fadiga de superfície ocorre durante o atrito, acompanhando quase todos os tipos de desgaste. Cada aspereza da superfície de atrito experimenta carga e descarga repetidas das asperezas da contraface e com isso, a área onde ocorre fricção sofre estresse cíclico no deslizamento rotativo. Os ciclos repetidos levam à iniciação de trincas subsuperficiais na superfície do polímero, que com sucessivas deformações, leva à propagação da trinca paralelamente à superfície, e os detritos podem então ser arrancados da

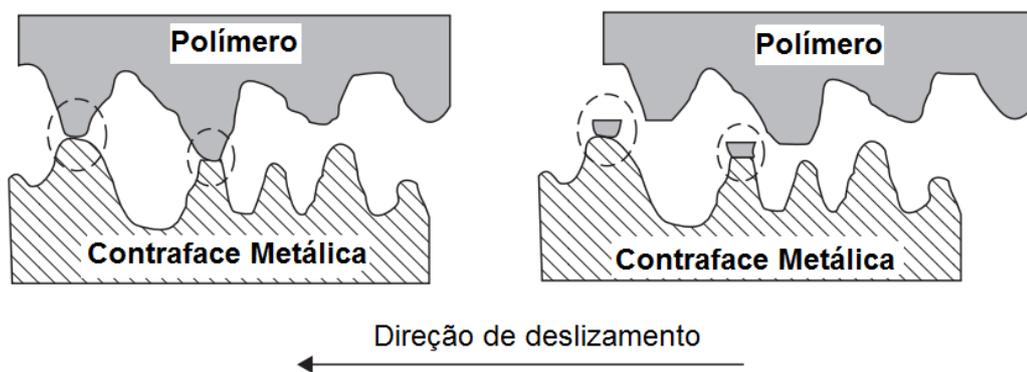
superfície por movimento contínuo. A nova superfície do material também experimenta o mesmo estresse cíclico, o que leva a um processo progressivo, e a liberação dos fragmentos torna-se rápida (STACHOWIAK e BATCHELOR, 2013).

O tipo de ciclo de tensão envolvido em um processo de fadiga depende das propriedades mecânicas do polímero em questão. O ambiente desempenha um papel dominante na determinação da tensão necessária para a nucleação da trinca superficial e a taxa de propagação da trinca. Além disso, as forças de adesão através da interface afetam a distribuição de tensão, e a adesão pode desempenhar um papel importante na fadiga (HUTCHINGS E SHIPWAY, 2017).

### 3.6.2 Mecanismos de desgaste adesivo

O desgaste adesivo é a forma mais comum de desgaste no deslizamento a seco, que surge do cisalhamento da adesão entre as superfícies. Esta forma de desgaste é provavelmente a mais significativa no desgaste de um polímero quando desliza repetidamente sobre a mesma faixa de desgaste em uma contraface de metal lisa. Durante o deslizamento repetido, a alta pressão local causa deformação plástica levando à formação de uma junção adesiva e os sucessivos movimentos de deslizamento resultam em formação e ruptura destas junções de forma contínua e então uma película fina do polímero macio é transferida para a superfície de contato rígido, conforme ilustra a Figura 17 (ABDELBARY, 2015).

Figura 17: Esquema do desgaste adesivo.

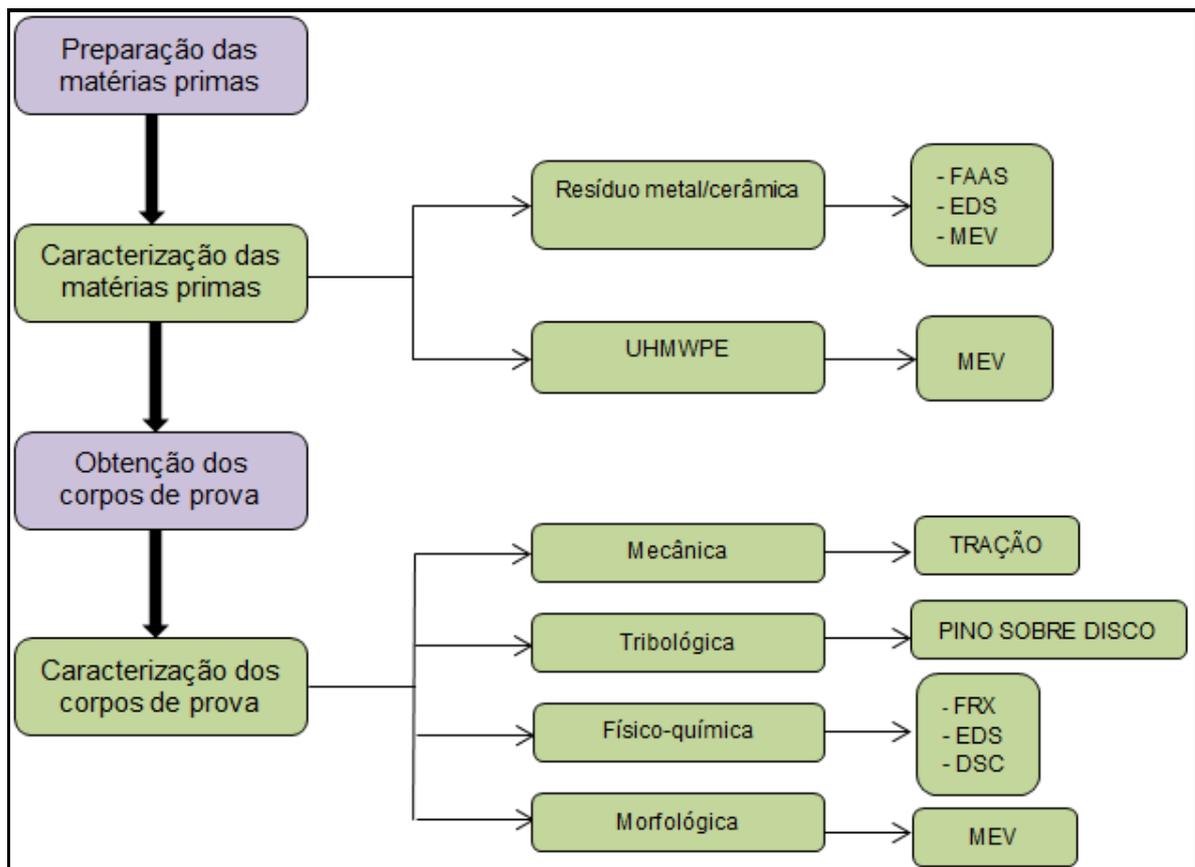


Fonte: Adaptado de ABDELBARY (2015)

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para posterior avaliação das propriedades mecânicas e tribológicas do compósito, foram construídos corpos de prova contendo 0%, 5% e 10% em massa de partículas providas do resíduo de retificação incorporadas à matriz polimérica. O fluxograma da Figura 18 descreve sistematicamente os procedimentos realizados para confecção deste trabalho.

Figura 18: Fluxograma dos procedimentos realizados.



Fonte: Próprio autor

### 4.1 Métodos e matérias primas utilizadas

O polímero utilizado como matriz polimérica foi o UHMWPE-3041 cujas propriedades físicas, mecânicas e térmicas estão descritas na Tabela 1.

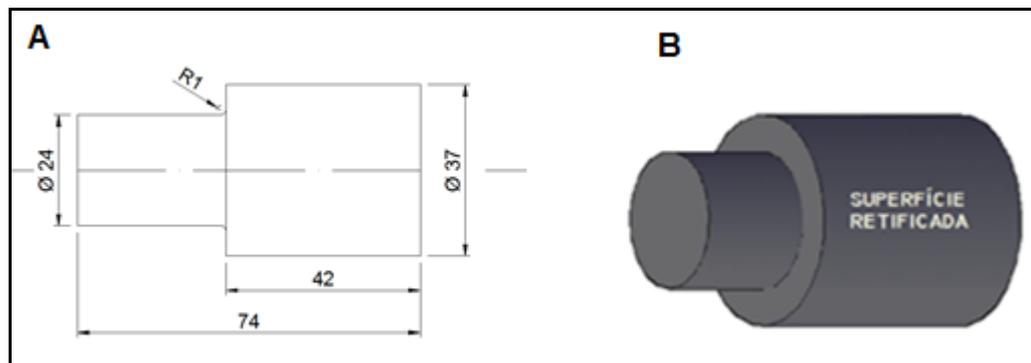
Tabela 1: Propriedades físicas, mecânicas e térmicas do UHMWPE-3041.

Propriedades	Unidades	Valores Típicos
Viscosimetria intrínseca	dL/g	14
Massa molar média	g/mol	$3,0 \times 10^6$
Densidade	g/cm <sup>3</sup>	0,925
Limite de escoamento	MPa	$\geq 17$
Resistência à tração na ruptura	MPa	$> 30$
Alongamento final	%	$> 350$
Dureza Shore D	-	64
Temperatura de fusão	°C	128

Fonte: Braskem, 2011.

O resíduo utilizado como carga é provindo do processo de retificação cilíndrica por mergulho do aço ABNT 4340 temperado e revenido (dureza de  $52 \pm 2$  HRC). Na Figura 19 é representada a geometria do corpo de prova (a) e a superfície usinada (b).

Figura 19: (a) geometria da peça usinada (b) representação da superfície retificada



Fonte: Próprio autor

A composição química do aço ABNT 4340 foi fornecida pelo fabricante conforme Tabela 2.

Tabela 2: Composição química do aço ABNT 4340 em peso (%)

C	Mn	P	Si	S	Cr	Ni	Mo	Al	Cu	Co	V	Fe
0,4	0,7	0,007	0,35	0,001	0,78	1,74	0,24	0,015	0,05	0,01	0,01	Balanço

Fonte: Villares Metals

Foi utilizada uma retificadora cilíndrica universal, marca *TosHostivar*, com potência equivalente a 9 kW, e rebolo convencional de óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ), com as seguintes dimensões e características: (355,6 x 50,8 x 127 mm - FE 38A60KV). Na Figura 20 é mostrada a operação de usinagem de onde foram gerados os resíduos da retificação (a) e (b) e do processo de dressagem (c).

**Figura 20:** (a) operação de retificação (b) uso de fluido de retificação (c) operação de dressagem.



Fonte: Próprio autor

O resíduo passou por um processo de secagem em um forno à temperatura de 200°C por 60 minutos, conforme metodologia utilizada por Teixeira (2007). Após a secagem do resíduo, foi feita sua cominuição utilizando-se de um moinho planetário de alta energia, por onde a amostra permaneceu durante 2 minutos a 300 RPM, conforme ilustra a Figura 21.

**Figura 21:** Moinho Planetário de alta energia.



Fonte: Próprio autor

Para confecção dos corpos de prova, três diferentes composições polímero/carga cerâmico-metálica foram adotadas neste estudo com 0%, 5% e 10% (fração mássica total) de pó de resíduo da retificação. Para placas de 1,0 mm de espessura, 22 g de material do

conjunto polímero/resíduo da retificação foram pesados. A homogeneização do conjunto polímero/resíduo foi feita mecanicamente misturando os mesmos em um béquer.

Placas foram confeccionadas por compressão em prensa hidráulica com aquecimento marca Solab – SL1, conforme Figura 23.

**Figura 22: Prensa Hidráulica com aquecimento.**



Fonte: Próprio autor

Um molde metálico tripartido foi utilizado com dimensões de (80 x 80 x 1) mm na confecção de placas para corpos de prova de tração, ilustrado na Figura 23. Filmes de Kapton foram utilizados como material desmoldante nos processos de compressão.

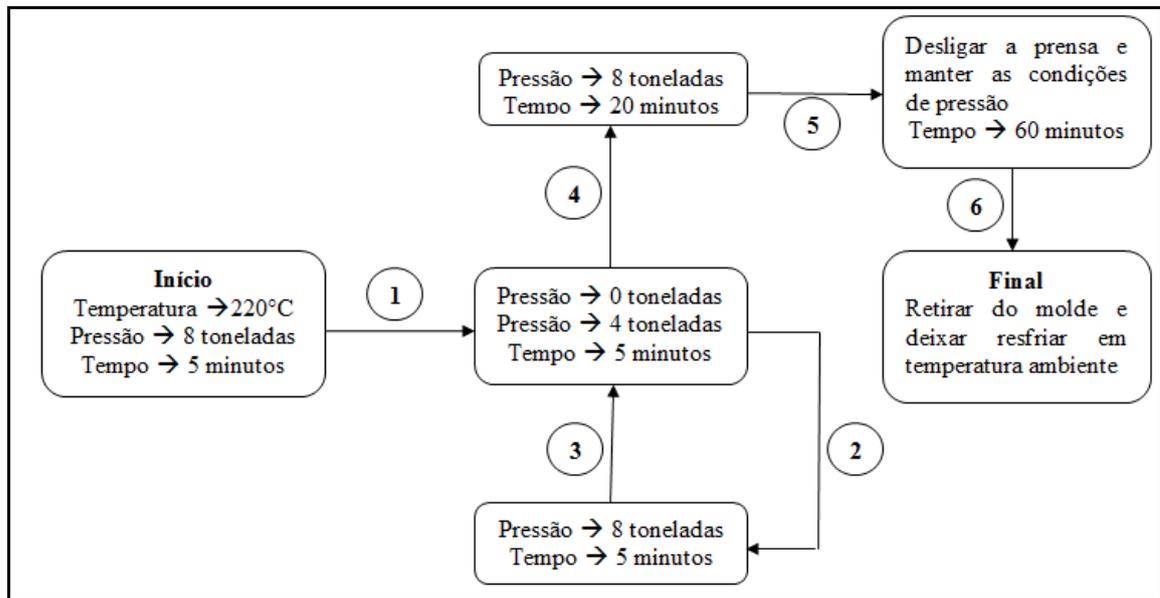
**Figura 23: Molde metálico tripartido.**



Fonte: Próprio autor

O processamento das chapas foi realizado em seis etapas conforme ilustra a Figura 24.

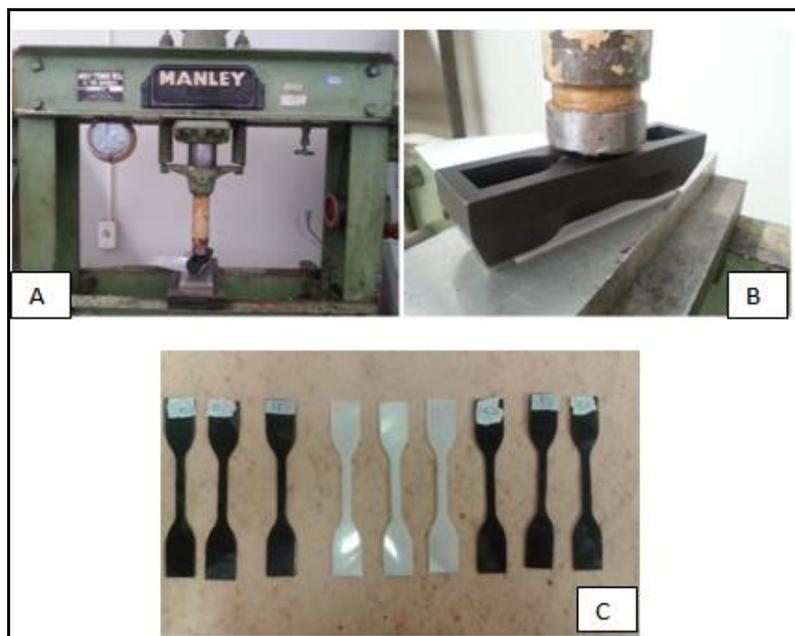
**Figura 24: Etapas do processamento das chapas poliméricas.**



Fonte: Próprio autor

Na confecção dos corpos para os ensaios de tração, uma matriz metálica e uma prensa hidráulica tipo *Manley Division HP-25*, Figura 25 (a), foram utilizadas e três corpos de prova foram extraídos de cada placa (1,0 mm) em um total de três placas. Durante a etapa de corte as placas poliméricas foram posicionadas entre a matriz metálica e a base da prensa, Figura 25 (b), e o destacamento dos corpos de prova promovido por pressão mecânica ao sistema. Os corpos foram produzidos em três composições diferentes, como consta Figura 25 (c).

**Figura 25: a) Prensa, matriz e placa b) sistema de corte c) corpos de prova de tração das três composições.**



Fonte: Próprio autor

## 4.2 Caracterização

### 4.2.1 Caracterização do resíduo

Para caracterização do resíduo, foram feitos os seguintes ensaios:

- Análise granulométrica utilizando um granulômetro a laser Cilas 1090. O equipamento fornece a distribuição de tamanho de partículas de amostras em pós finos, na faixa de 0.04 - 500  $\mu\text{m}$ . A obscuração utilizada para análise foi de 17% e o tempo de ultrassom foi de 60 segundos.
- Espectroscopia de Absorção Atômica por Chama (FAAS), equipamento presente no Departamento de Química da UFMG, para verificação da composição química do resíduo. O peso da amostra analisada foi de 0,0637g.
- Como análise complementar a anterior, foi feita uma análise quantitativa utilizando um espectrômetro de fluorescência de raios X por energia dispersiva (FRX), utilizando um equipamento FRX - 720 SHIMADZU presente no DEMAT – CEFET MG, conforme Figura 26.

**Figura 26: Equipamento SHIMADZU FRX - 720.**



Fonte: Próprio autor

### 4.2.2 Caracterização do polímero utilizado como matriz

Foi realizada caracterização morfológica do pó de UHMWPE por meio da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). A amostra foi metalizada com ouro.

### 4.2.3 Caracterização do compósito.

#### 4.2.3.1 Caracterização morfológica

Para analisar a morfologia e a composição química do compósito, foi utilizado o MEV com EDS acoplado, equipamento da marca SHIMADZU e modelo SED X presente no DEMAT – CEFET MG conforme é mostrado na Figura 27. Foram analisadas as superfícies da seção transversal dos corpos de prova. As amostras passaram por um processo de fratura frágil no qual foi utilizado o nitrogênio líquido conforme metodologia adotada por Melk (2018).

**Figura 27: Equipamento Máquina de MEV modelo SED X.**



Fonte: Próprio autor

#### 4.2.3.2 Ensaio mecânico

Foi realizado ensaio de tração, conforme norma ASTM D3039, utilizando uma máquina de ensaio universal SHIMADZU, modelo AG-X com célula de carga de 10 kN presente no laboratório de polímeros do DEMAT- CEFET MG, conforme Figura 28. Durante o ensaio de tração, utilizou-se uma velocidade de ensaio de 50 mm/min. Como equipamento de auxílio, foi utilizado um paquímetro digital para aferir as medidas de largura, espessura e comprimento útil dos corpos de prova.

**Figura 28: Máquina de ensaio universal SHIMADZU, modelo AG-X.**



Fonte: Próprio autor

O software ORIGIN 8.5 foi utilizado com intuito de validar os resultados, onde foram feitas análises estatísticas por meio da análise de variância (ANOVA – *One-Way*) com nível de confiança de 95%. As hipóteses levantadas foram:

- Hipótese nula ( $H_0$ ) → As médias, para cada propriedade, dos três materiais estudados (polímero puro, com 5% e com 10% de carga) são iguais.
- Hipótese alternativa ( $H_1$ ) → As médias de um ou mais materiais são diferentes.

$$\text{Ou seja, } \begin{cases} H_0 = \mu_{0\%} = \mu_{5\%} = \mu_{10\%} \\ H_1 = \mu_l \neq \mu_m \text{ para algum } l \neq m \end{cases}$$

Portanto, para valores de  $p < 0,05$  rejeita-se  $H_0$ .

A diferença entre as médias foi avaliada por pares pelo teste Tukey. O nível de significância ( $\alpha$ ) utilizado foi de 0,05.

#### **4.2.3.3 Ensaio de determinação do grau de cristalinidade por DSC**

O grau de cristalinidade das amostras foi calculado através do ensaio de calorimetria exploratória diferencial (DSC) conforme metodologia utilizada por Kong e Hay (2003). As análises de DSC foram realizadas em atmosfera de nitrogênio utilizando o equipamento SHIMADZU DSC-60.

De acordo com metodologia utilizada no trabalho de Sui e seus colaboradores (2009), as amostras foram aquecidas a uma taxa de  $10^\circ\text{C min}^{-1}$  a  $200^\circ\text{C}$  para eliminar qualquer

histórico térmico anterior e posteriormente foram resfriadas a 30°C a uma taxa de 10°C min<sup>-1</sup>. Em seguida, as amostras foram aquecidas novamente a 200°C com a taxa de 10°C min<sup>-1</sup>.

Conforme Wang e seus colaboradores (2016), a cristalinidade foi calculada usando a Equação 4.

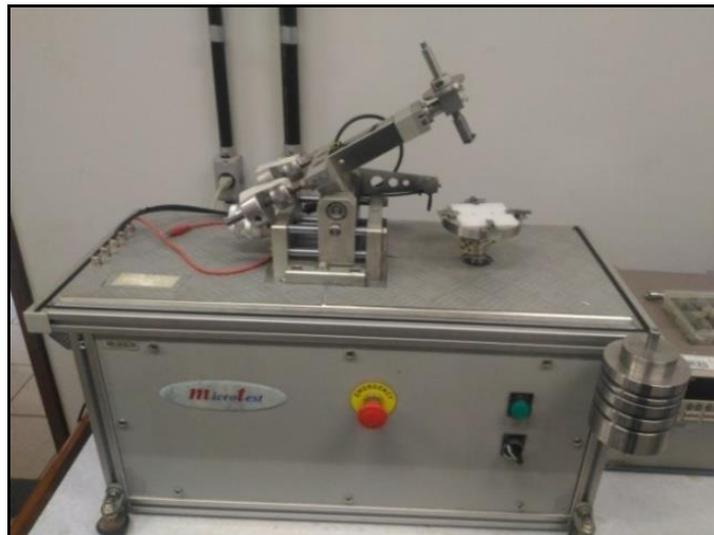
$$X_c (\%) = \frac{\Delta H_f}{(1-\phi)\Delta H_f^0} \times 100 \quad (4)$$

Onde  $X_c$  é o grau de cristalinidade,  $\Delta H_f$  é a entalpia de fusão do material analisado,  $\Delta H_f^0$  é a entalpia de fusão para o polímero 100% cristalino (de acordo com Melk e Emami (2018), para UHMWPE,  $\Delta H_f^0 = 289 \text{ Jg}^{-1}$ ) e  $\phi$  é a fração de peso do material utilizado como carga no compósito.

#### 4.2.3.4 Ensaio tribológico

Foram realizados ensaios tribológicos na configuração pino sobre disco de acordo com a norma internacional ASTM G99-04, utilizando-se o equipamento tribômetro *Microphotonics* modelo SMTA/ 0100-MT/60/NI do laboratório de Tribologia do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG, demonstrado na Figura 29.

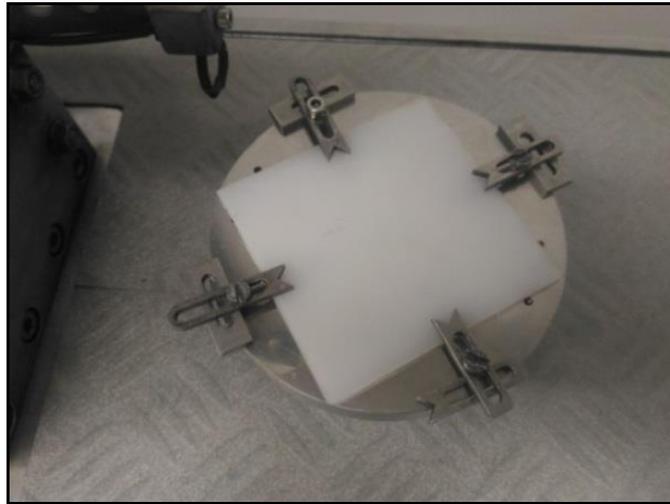
**Figura 29: Tribômetro.**



Fonte: Próprio autor

Na Figura 30 é mostrado o método de fixação das amostras, onde elas foram apoiadas por quatro extremidades durante a realização do ensaio.

**Figura 30: Método de fixação do disco.**



Fonte: Próprio autor

O software de aquisição de dados utilizado foi o NANOVEA. O ensaio foi realizado utilizando deslizamento a seco, onde o pino utilizado foi do tipo abaulado feito de aço ferramenta (M12) com diâmetro de 6,0 mm.

Os principais parâmetros do ensaio pino sobre disco estão apresentados na Tabela 3.

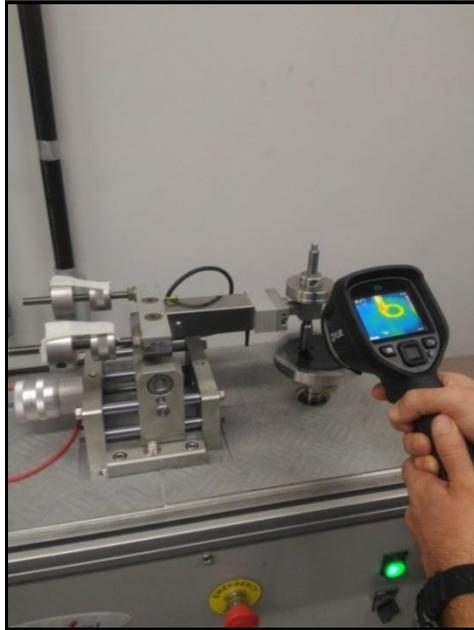
**Tabela 3: Parâmetros do teste de pino sobre disco.**

Força normal (N)	50
Velocidade tangencial (m/s)	0,2
Velocidade de rotação (RPM)	182
Distância percorrida (m)	1500,22
Raio da trilha (mm)	10,5
Temperatura (°C)	20,3 a 27,3
Umidade relativa do ar (%)	55

Fonte: Próprio autor

A temperatura superficial do compósito (disco) foi medida durante o ensaio de deslizamento, com o auxílio de uma câmera infravermelha (E5, Flir, EUA). Durante os testes, a temperatura foi medida logo acima da linha de contato pino/disco conforme Pogacnik (2012). Na Figura 31 é demonstrada a configuração de medição de temperatura adotada no ensaio.

**Figura 31: Configuração da medição da temperatura superficial do compósito no ensaio.**



Fonte: Próprio autor

Para a caracterização da superfície dos discos, foi utilizado um rugosímetro *Mitutoyo* modelo SJ-301, com comprimento de amostragem (*cut off*) de 0,8 mm conforme norma DIN 4776. Foram feitas cinco medidas de rugosidade em cada disco, em direções opostas equidistantes. Os parâmetros avaliados foram rugosidade média ( $R_a$ ) e rugosidade média real ( $R_z$ ).

Para a caracterização dos mecanismos de desgastes presentes nas amostras após o ensaio pino sobre disco foi utilizado um microscópio óptico *Kontrol* modelo IM 713 com câmera MDCE-5A acoplada ao equipamento. O software *Scope Photo* foi utilizado para aquisição das imagens.

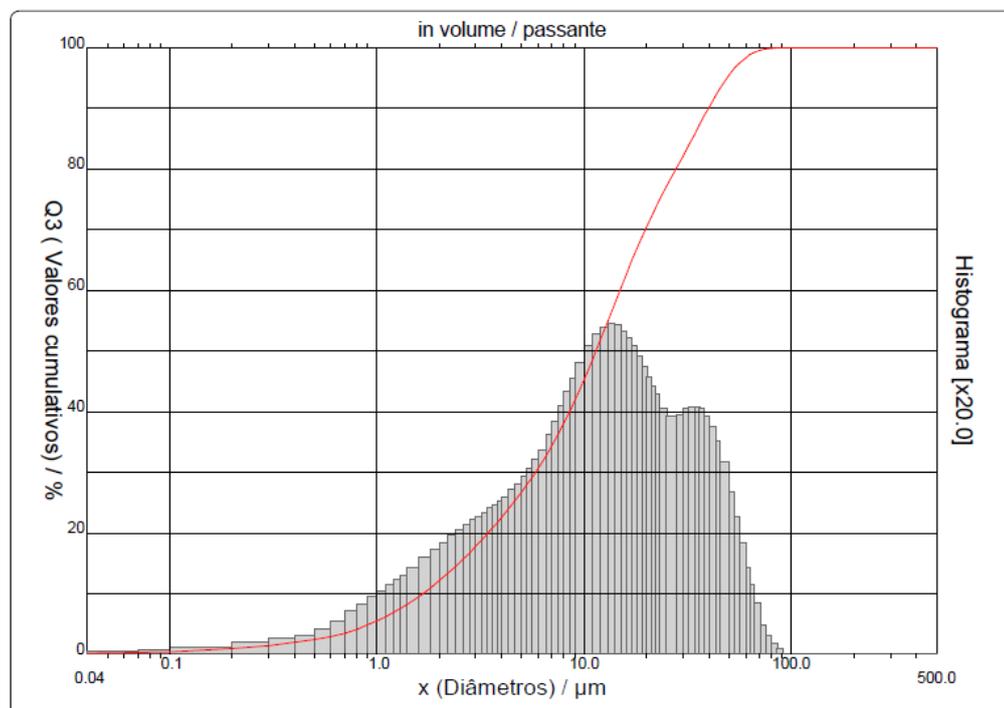
## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Caracterizações do resíduo

#### 5.1.1 Distribuição granulométrica do resíduo

Por meio da análise granulométrica do resíduo, conforme Figura 32, foi possível identificar que a amostra possui distribuição monomodal de tamanho de partículas e seu diâmetro médio é de 16,33  $\mu\text{m}$ .

**Figura 32: Distribuição granulométrica do resíduo.**



Fonte: Próprio autor

#### 5.1.2 Análise química do resíduo

Na Tabela 4 é demonstrado o percentual dos principais elementos presentes na amostra do resíduo pelo método de FAAS.

**Tabela 4: Análise elementar do resíduo por FAAS.**

<b>Elemento</b>	<b>Percentual presente na amostra (%)</b>
Fe	64,54
Al	0,35
Ni	1,06
Cr	0,43
Mn	0,43
Mo	0,49

Fonte: Próprio autor

Na Tabela 5 é descrito a análise elementar do resíduo por FRX.

**Tabela 5: Análise elementar do resíduo por FRX.**

<b>Elemento</b>	<b>Percentual presente na amostra (%)</b>
Fe	87.33
Al	0.79
Ni	1.38
Cr	0.69
Mn	0.64
Mo	0.31

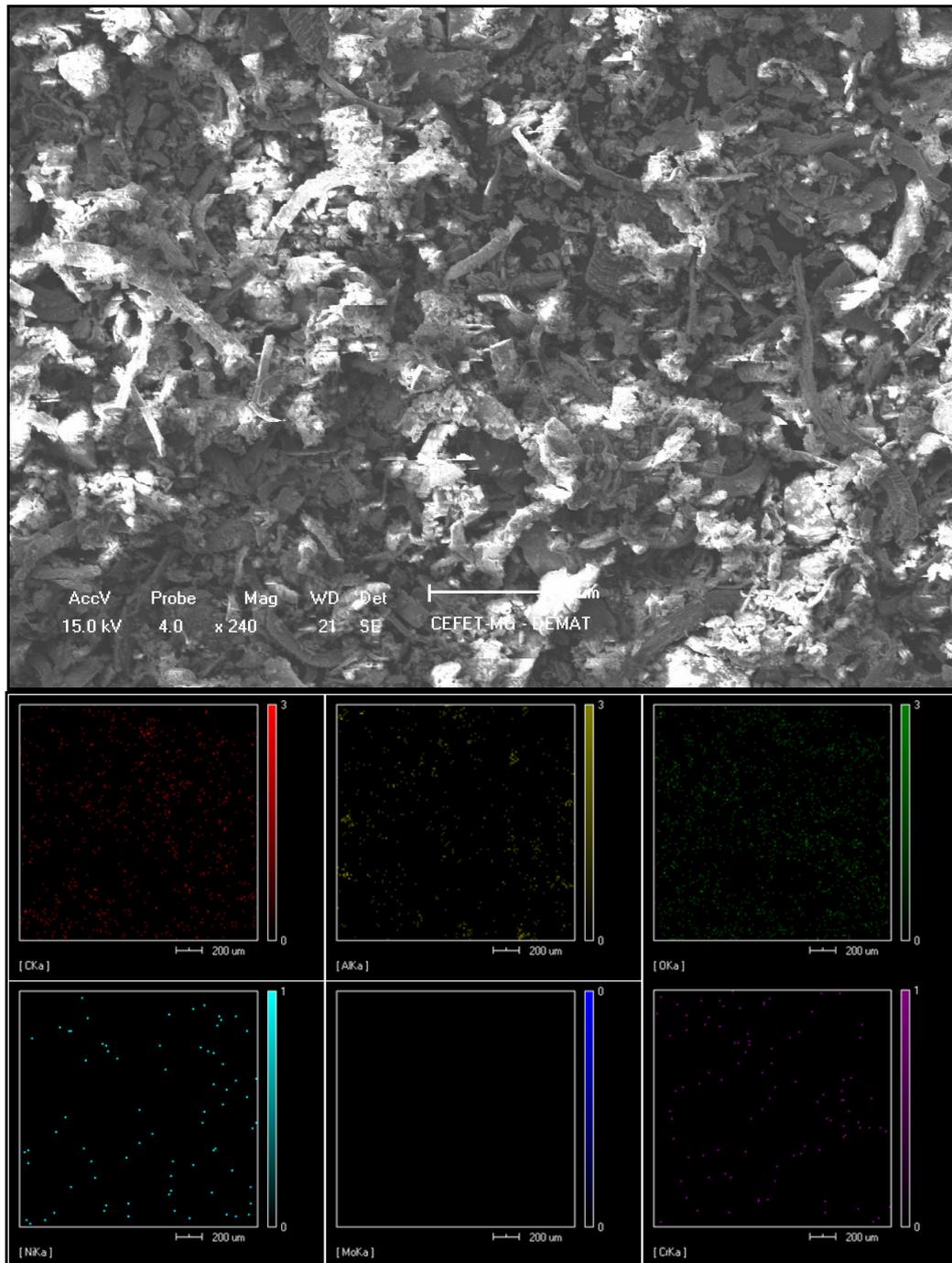
Fonte: Próprio autor

Por meio dos resultados dos dois métodos adotados, pode ser observada a presença de alumínio proveniente da composição da alumina ( $Al_2O_3$ ) que está presente nas partículas que desprendem do rebolo no processo de retificação.

### **5.1.3 Análise por MEV e EDS**

Os resultados da microscopia dos pós da carga metal/cerâmica são revelados na Figura 33 que mostra a imagem do resíduo com aumento de 240x e sua composição química qualitativa obtida por meio do MEV e do EDS respectivamente. A morfologia do resíduo apresenta característica pontiaguda em forma de fibra e em sua composição química é possível observar os elementos Al e O provindos da alumina e C, Ni, Cr e Mo (este em pequena quantidade) derivados do aço ABNT 4340.

Figura 33: Amostra do pó do resíduo utilizado como carga e análise elementar qualitativa por EDS.

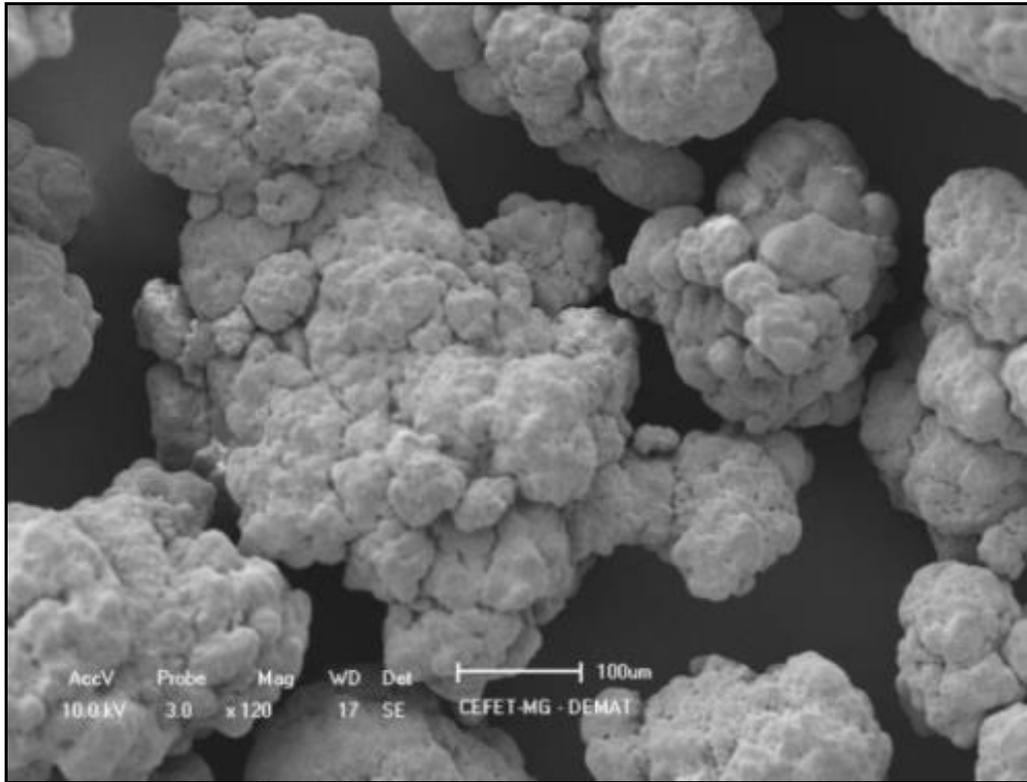


Fonte: Próprio autor

## 5.2 Caracterização morfológica do UHMWPE

Na Figura 34 é mostrada a morfologia do pó de UHMWPE, o qual se apresenta com formato de “cérebro” conforme descrito por Kurtz (2009).

**Figura 34: Morfologia do pó de UHMWPE.**



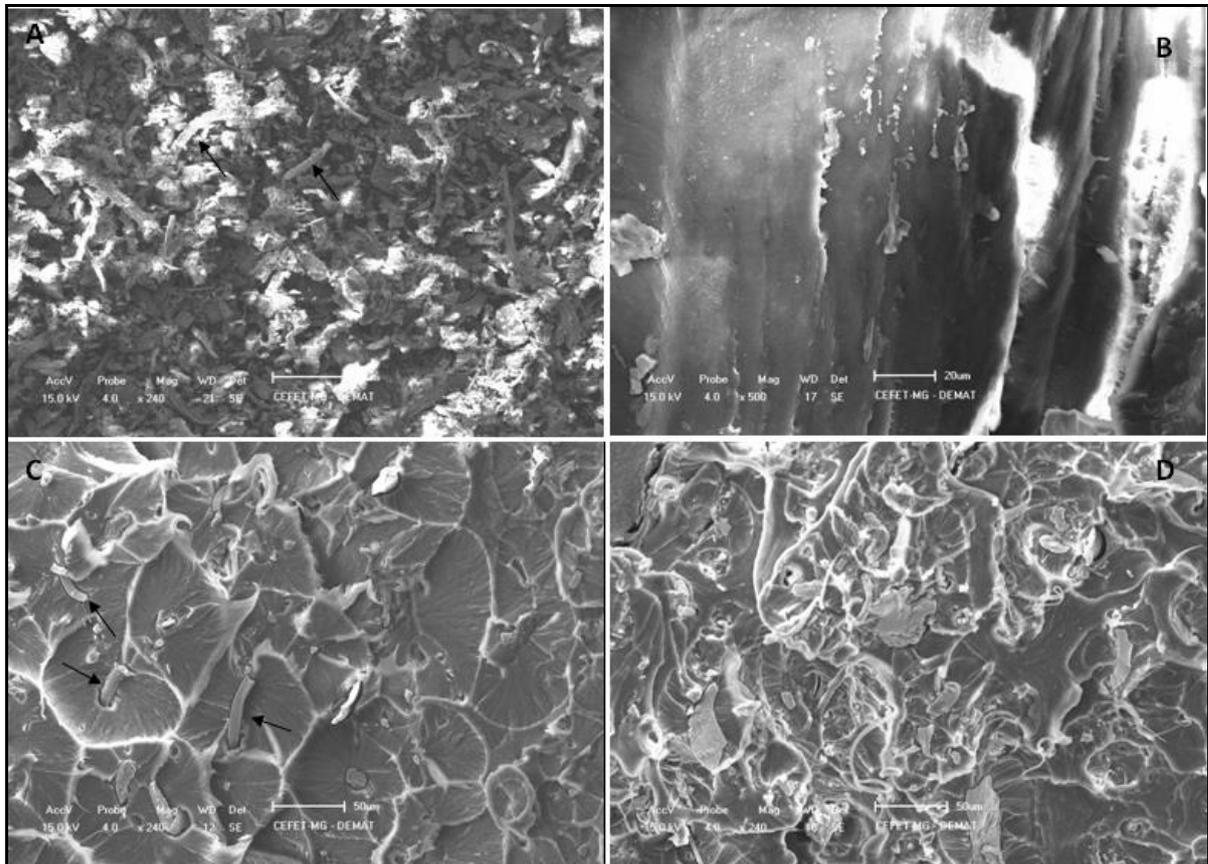
Fonte: Próprio autor

### **5.3 Caracterizações do compósito**

#### **5.3.1 Análise morfológica do compósito**

Na Figura 35 é mostrada a morfologia do pó utilizado como carga (A) e as superfícies fraturadas criogenicamente das amostras do UHMWPE puro (B) e dos compósitos com 5% e 10% de carga (C) e (D) respectivamente. Por meio das setas é possível observar a morfologia da carga presente tanto no pó como no compósito. Por meio da morfologia das superfícies é possível observar a distribuição da carga na matriz polimérica.

**Figura 35: Microscopia Eletrônica de Varredura: a) Resíduo após processamento de cominuição. b) Superfície da fratura frágil do UHMWPE puro c) Superfície da fratura frágil do UHMWPE com 5% de carga d) Superfície da fratura frágil do UHMWPE com 10% de carga.**



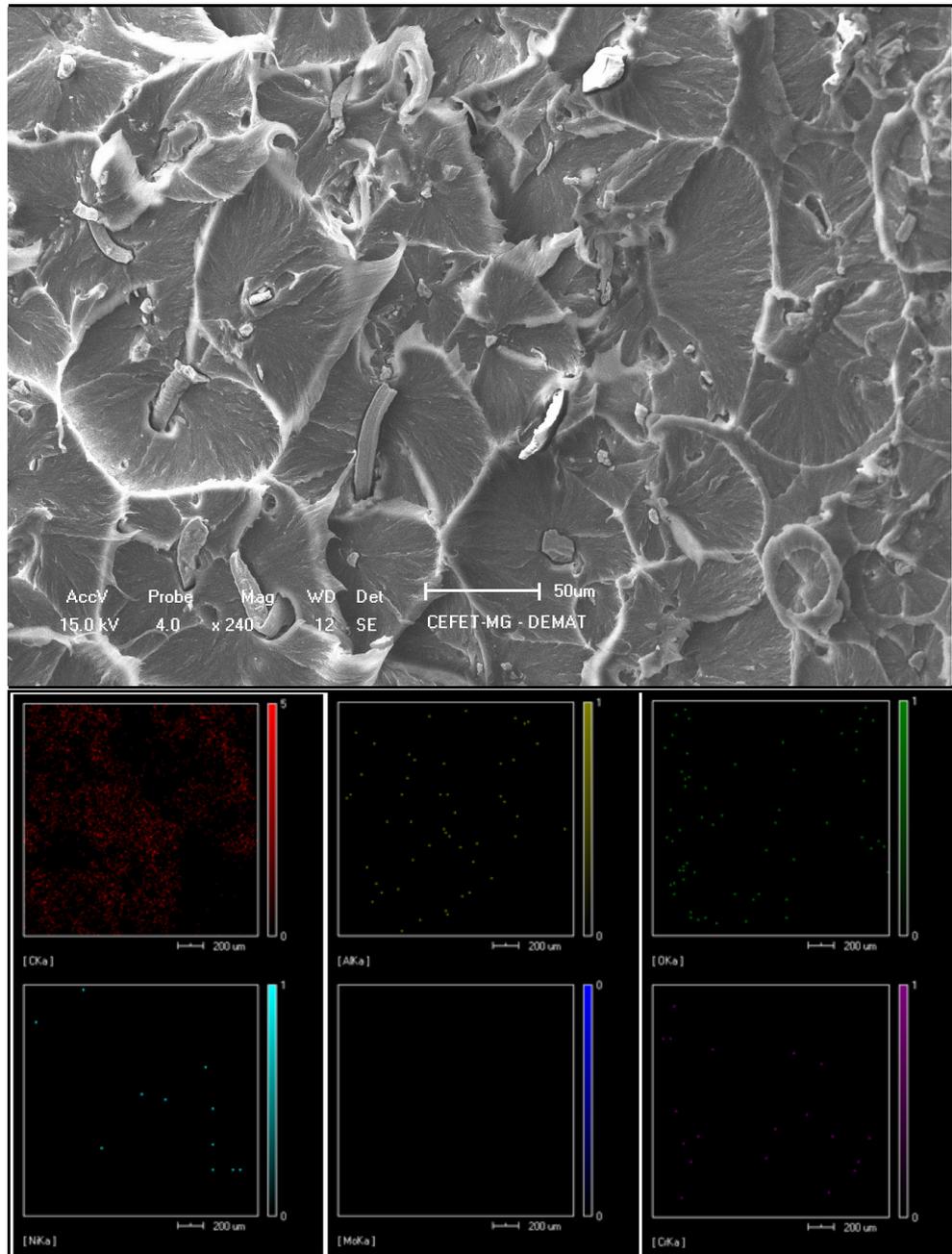
Fonte: Próprio autor

As cargas podem atuar como locais de nucleação para ocorrer a cristalização. No entanto, aumentando o conteúdo dos enchimentos acima de certo nível, diminui a mobilidade das cadeias poliméricas resultando em uma influência negativa na cristalinidade (VADIVEL, 2018).

Na Figura 36 é possível observar a morfologia da superfície fraturada em nitrogênio líquido do compósito de matriz de UHMWPE com 5% em massa de carga metal/cerâmica.

A análise química qualitativa identifica uma boa homogeneização da carga na matriz polimérica. A análise de DSC que será descrita em tópico a seguir abordará o grau de cristalinidade das amostras.

**Figura 36: Amostra com 5% de carga e análise elementar qualitativa por EDS.**

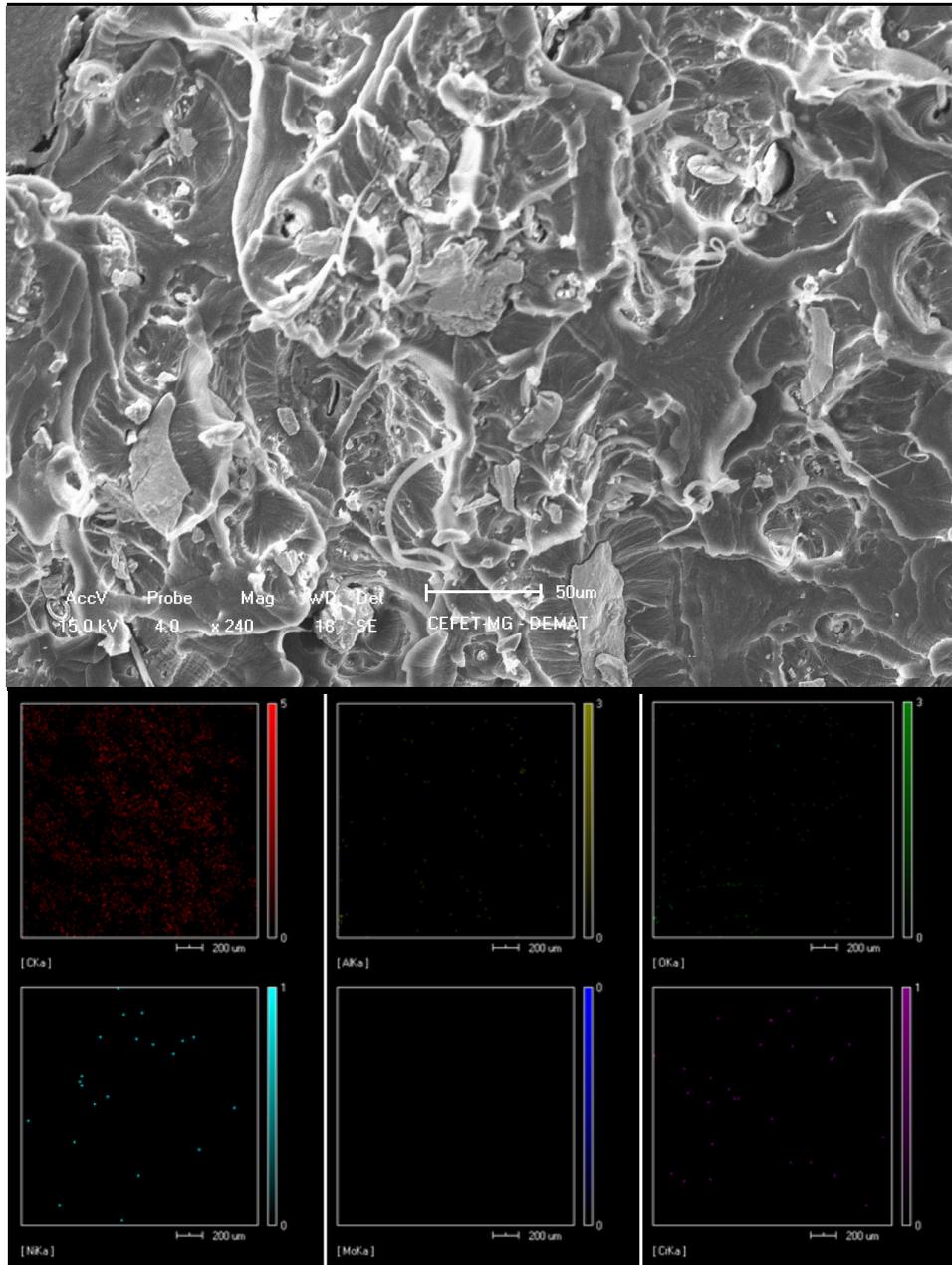


Fonte: Próprio autor

Na superfície da amostra com 10% de carga é possível observar uma maior concentração dos elementos de carga na matriz através da análise química qualitativa. A morfologia da superfície fraturada, Figura 37, mostra uma maior aglomeração de carga com relação ao compósito que possui 5% de carga. Segundo (Azam e Samad, 2018) a aglomeração de cargas na matriz polimérica indica ineficiência do processo de dispersão. Resultado semelhante foi encontrado por (Gupta e Riyad, 2018) onde foi observada a segregação de

partículas de  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$  na matriz de UHMWPE no compósito contendo 20% em peso de  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$ .

**Figura 37: Amostra com 10% de carga e análise elementar qualitativa por EDS.**



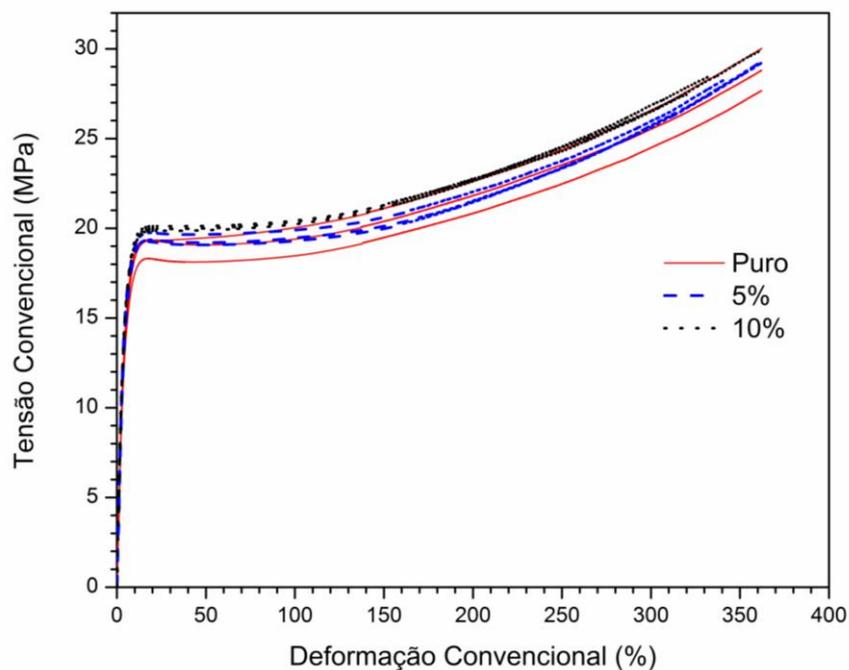
Fonte: Próprio autor

### 5.3.2 Ensaio de tração

O resultado do ensaio de tração está ilustrado na Figura 38, que apresenta a curva de Tensão convencional x Deformação convencional dos corpos de prova do UHMWPE puro, com 5% e 10% em massa de carga respectivamente. De acordo com a análise estatística

realizada (ANOVA – *One-Way*), ao nível de significância de 0,05 a média da tensão limite de escoamento dos materiais analisados apresentou diferença significativa com o acréscimo de 10% de carga (valor de p igual 0,04853). Esse fato se deve ao possível aumento de cristalinidade da amostra devido à presença de carga que atua como agente nucleante para cristalização. Conforme Vieille e seus colaboradores (2013), com o aumento de cristalização, o compósito tende a aumentar o módulo de elasticidade e a tensão limite de escoamento.

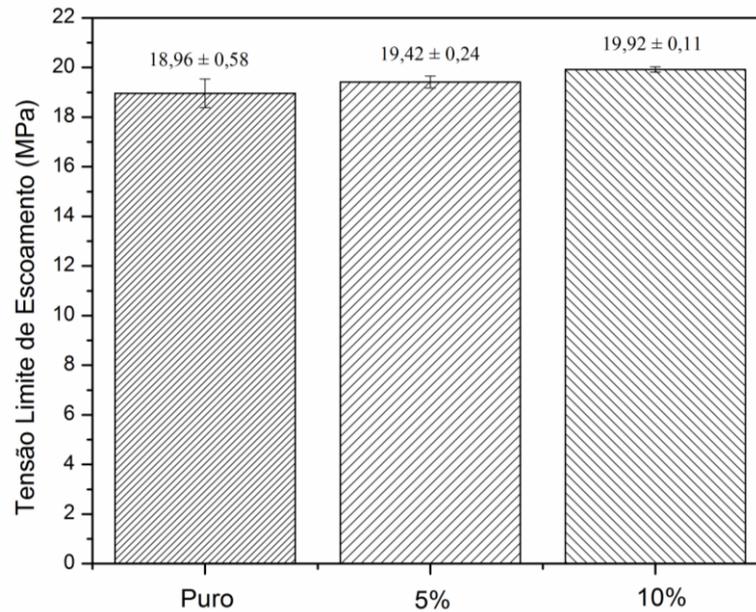
**Figura 38: Tensão x Deformação convencional dos corpos de prova puro e com carga.**



Fonte: Próprio autor

Na Figura 39 é demonstrada a tensão limite de escoamento para as amostras de UHMWPE puro e seus compósitos com 5% e 10% de resíduo da retificação, onde houve diferença significativa do limite de escoamento do compósito com a adição de carga, com nível de significância de 0,05 conforme demonstrado na Tabela 6.

**Figura 39: Tensão limite de escoamento das amostras de UHMWPE puro, com 5% e com 10 % de carga.**



Fonte: Próprio autor

A Tabela 6 representa a ANOVA para o fator tensão limite de escoamento.

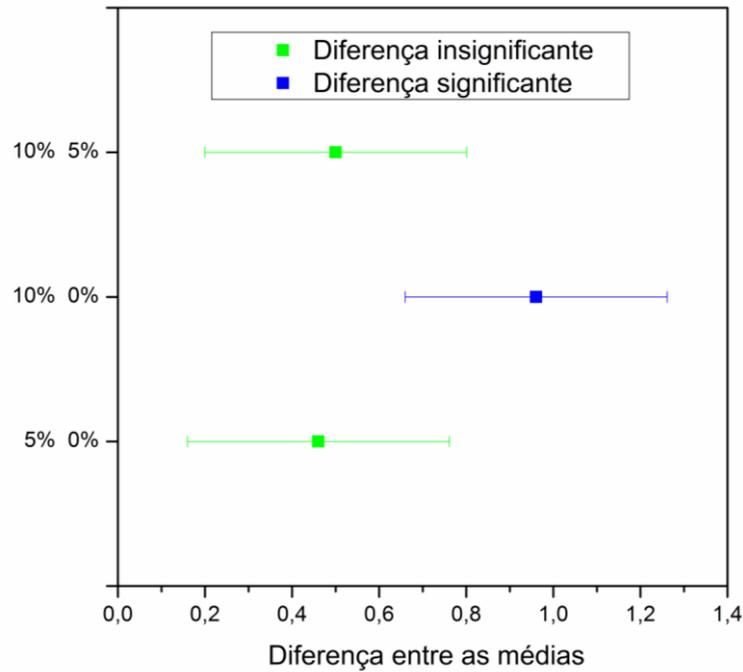
**Tabela 6: ANOVA para o fator tensão limite de escoamento.**

	Graus de Liberdade	Soma de Quadrados	Média dos Quadrados	Valor de F	Valor de p
<b>Modelo</b>	2	1,38473	0,69236	5,09769	0,04853
<b>Erro</b>	6	0,81492	0,13582		
<b>Total</b>	8	2,19964			

Fonte: Próprio autor

Por meio do teste de Tukey com nível de confiança de 95 %, foi possível afirmar que houve aumento significativo no limite de escoamento com o acréscimo 10% de carga à matriz polimérica enquanto que o acréscimo de 5% de carga não ocasionou diferença significativa ao nível de significância de 0,05 conforme ilustra a Figura 40.

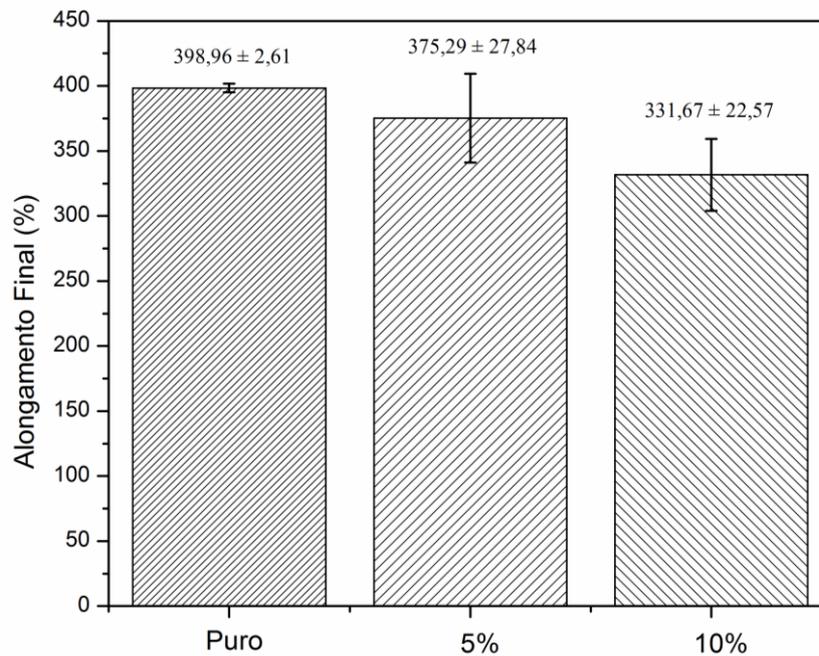
**Figura 40: Análise Tukey para as médias das tensões limites de escoamento**



Fonte: Próprio autor

Na Figura 41 estão mostrados os valores médios de alongamento final para as amostras de UHMWPE puro, composto de UHMWPE com 5% em massa de carga e composto de UHMWPE com 10% em massa de carga.

**Figura 41: Alongamento Final das amostras de UHMWPE puro e aditivado com 5% e com 10% de carga.**



Fonte: Próprio autor

Conforme resultado de ANOVA – *One-Way*, com 0,05 de nível de significância, houve uma diminuição do percentual de deformação das amostras à medida que há o acréscimo de carga o que implica em uma menor tenacidade do compósito com 10% de carga em relação ao polímero puro. A Tabela 7 representa a ANOVA para o fator alongamento final das amostras onde, pelo valor de  $p < 0,05$  é indicado que as médias dos alongamentos finais das amostras possuem diferenças significativas.

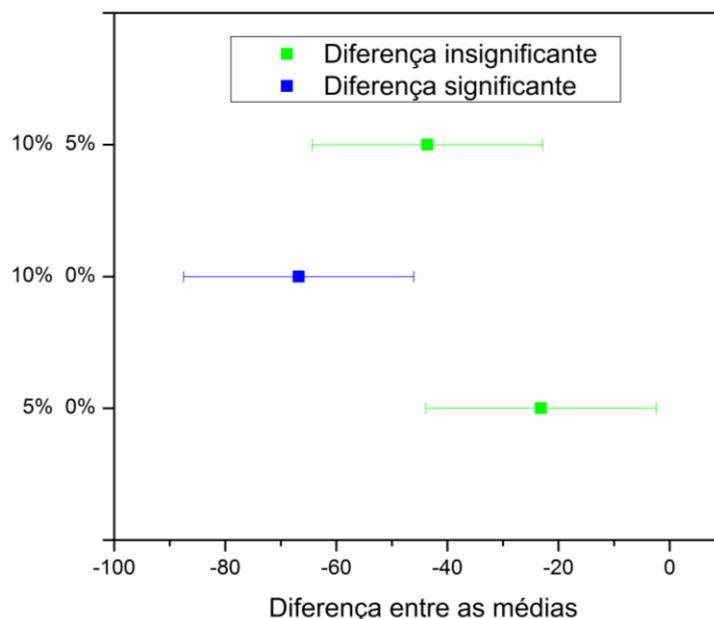
**Tabela 7: Anova para o fator alongamento final.**

	<b>Graus de Liberdade</b>	<b>Soma de Quadrados</b>	<b>Média dos Quadrados</b>	<b>Valor de F</b>	<b>Valor de p</b>
<b>Modelo</b>	2	6899,27055	3449,63527	5,34389	0,04648
<b>Erro</b>	6	3873,17469	645,52911		
<b>Total</b>	8	10772,44524			

Fonte: Próprio autor

Por meio do teste de Tukey com nível de confiança de 95%, foi possível afirmar que houve diminuição significativa no alongamento final das amostras com o acréscimo de 10% de carga à matriz polimérica enquanto que o acréscimo de 5% de carga não ocasionou diferença significativa ao nível de significância de 0,05 conforme ilustra a Figura 42.

**Figura 42: Análise Tukey para as médias do alongamento final.**

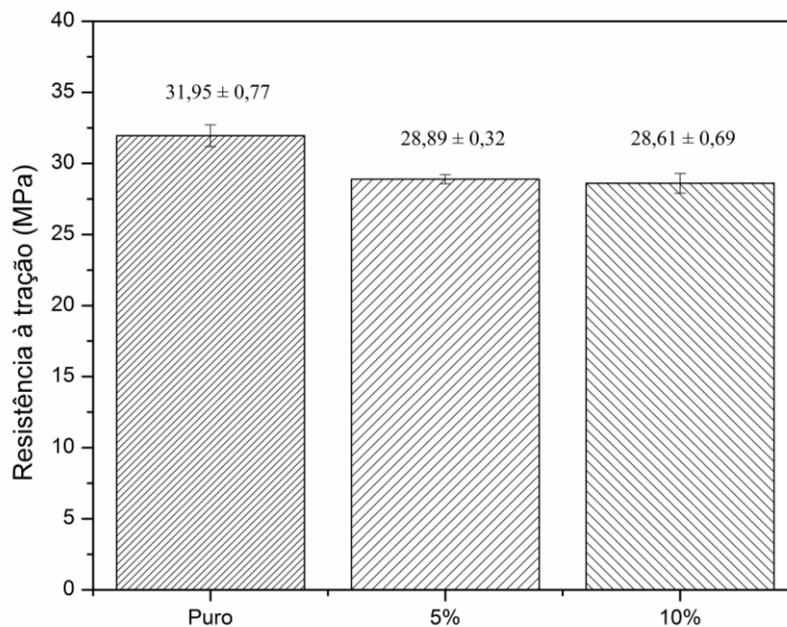


Fonte: Próprio autor

No entanto, mesmo resultando em uma diminuição no alongamento final, o compósito contendo 10% em massa de carga manteve-se próximo a faixa de valores típicos fornecidos pelo fabricante para UHMWPE puro (>350), conforme demonstrado na Tabela 1.

Na Figura 43 é possível observar que houve decréscimo da resistência à tração na ruptura com o aumento da incorporação de carga metal/cerâmica na matriz polimérica. Esse resultado foi confirmado por ANOVA utilizando-se nível de confiança de 95% conforme indica a Tabela 8.

**Figura 43: Resistência à tração na ruptura das amostras de UHMWPE puro, com 5% e com 10% de carga.**



Fonte: Próprio autor

A Tabela 8 representa a ANOVA para o fator resistência à tração das amostras onde, pelo valor de  $p < 0,05$  é indicado que as médias dos valores de resistência à tração de pelo menos um par de amostras possui diferença significativa.

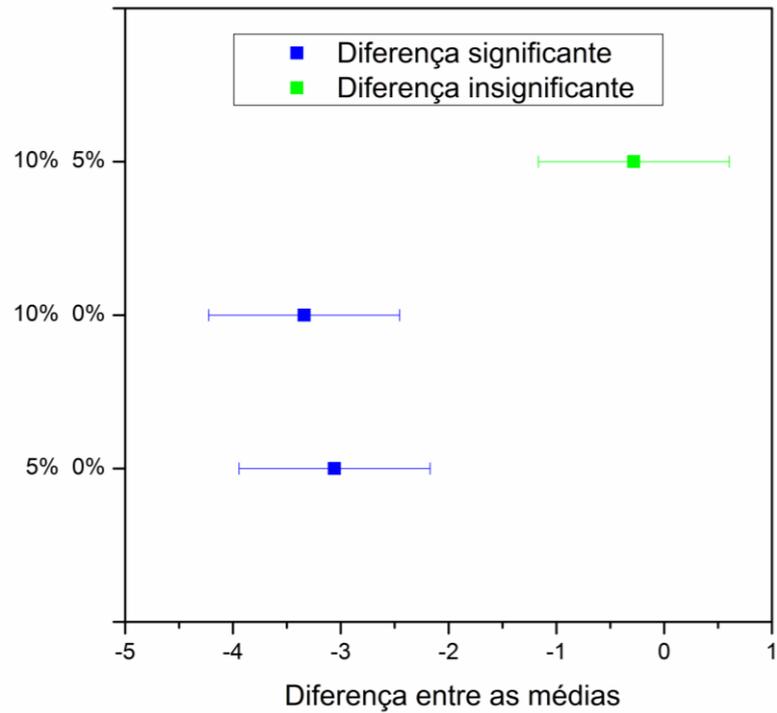
**Tabela 8: ANOVA para o fator de resistência à tração.**

	Graus de Liberdade	Soma de Quadrados	Média dos Quadrados	Valor de F	Valor de p
<b>Modelo</b>	2	20,58369	10,29184	8,74962	0,01665
<b>Erro</b>	6	7,05757	1,17626		
<b>Total</b>	8	27,64126			

Fonte: Próprio autor

Houve diminuição significativa da resistência à tração com o acréscimo tanto de 5% quanto de 10% de carga ao UHMWPE, conforme indica a Figura 44 referente ao teste Tukey com nível de significância de 0,05. De acordo com Vadivel e seus colaboradores (2018), reduções na resistência à tração de materiais compósitos devido à adição de carga podem estar associadas a problemas de dispersão da carga na matriz.

**Figura 44: Análise Tukey para as médias de resistência à tração.**

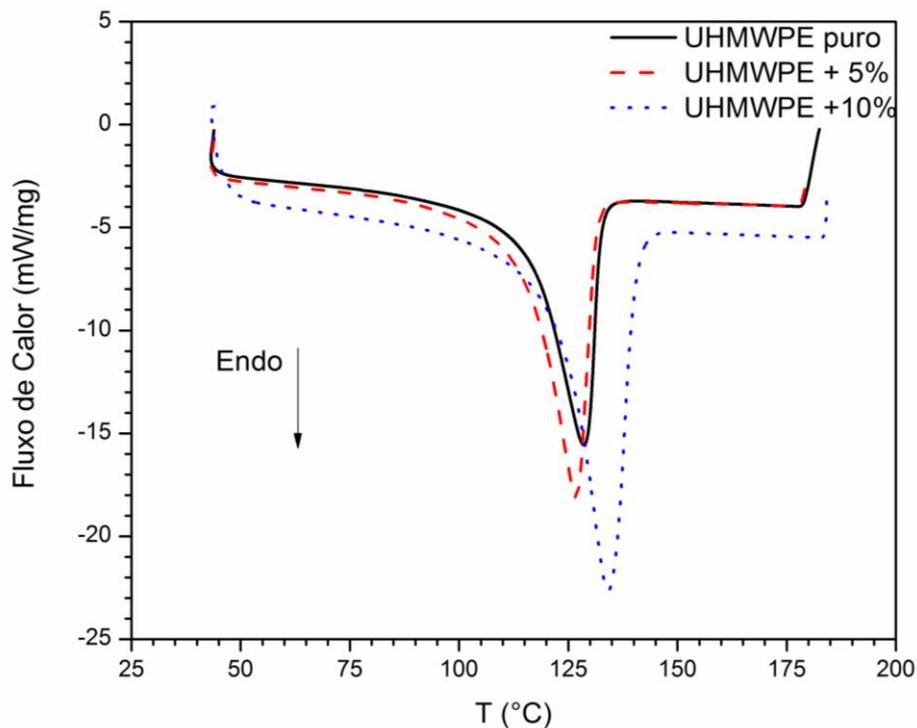


Fonte: Próprio autor

### 5.3.3 Grau de cristalinidade

A curva de aquecimento das amostras obtida por DSC, Figura 45, indica um aumento do pico endotérmico com o acréscimo de carga à matriz polimérica.

Figura 45: Curva de aquecimento das amostras de UHMWPE puro e dos compósitos.



Fonte: Próprio autor

Na Tabela 9 estão indicados o grau de cristalinidade e as temperaturas de fusão e de cristalização das amostras. Observa-se que o grau de cristalinidade, calculado através da equação 4, teve um acréscimo de 32,67% na amostra de UHMWPE contendo 5% de carga em relação ao UHMWPE puro, enquanto que o grau de cristalinidade da amostra de UHMWPE contendo 10% de carga alcançou um acréscimo de 45,43% em relação ao UHMWPE puro. De acordo com Sui e seus colaboradores (2009), a adição de cargas à matriz polimérica pode favorecer o aumento da cristalinidade devido ao fato de que as partículas dispersas na matriz podem atuar como núcleos heterogêneos promovendo assim um aumento de núcleos para a cristalização. Portanto, a adição do resíduo da retificação do aço ABNT 4340, pode facilitar o processo de nucleação, aumentando assim o grau de cristalinidade dos compósitos em relação ao polímero puro.

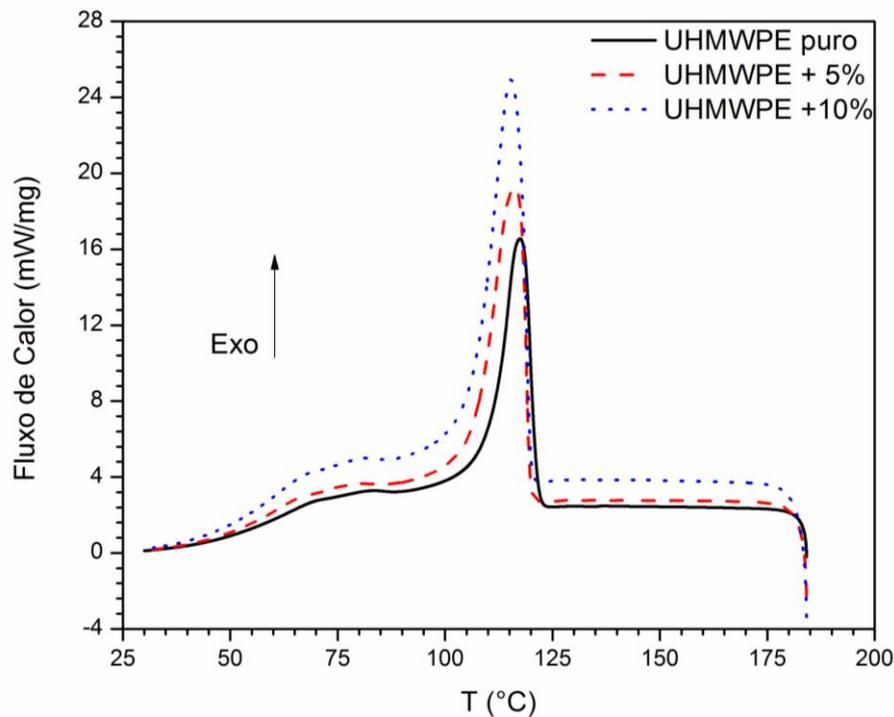
**Tabela 9: Efeito da adição de carga (resíduo) nos parâmetros de cristalização dos compósitos à base de UHMWPE.**

	Temperatura de Fusão (°C)	Temperatura de cristalização (°C)	Grau de Cristalinidade (%)
UHMWPE Puro	128,47	116,55	53
UHMWPE + 5%	127,06	116,14	70
UHMWPE + 10%	134,39	115,36	77

Fonte: Próprio autor

Na Figura 46 é mostrada a curva de resfriamento das amostras no ensaio de DSC.

**Figura 46: Curva de resfriamento das amostras de UHMWPE puro e dos compósitos.**



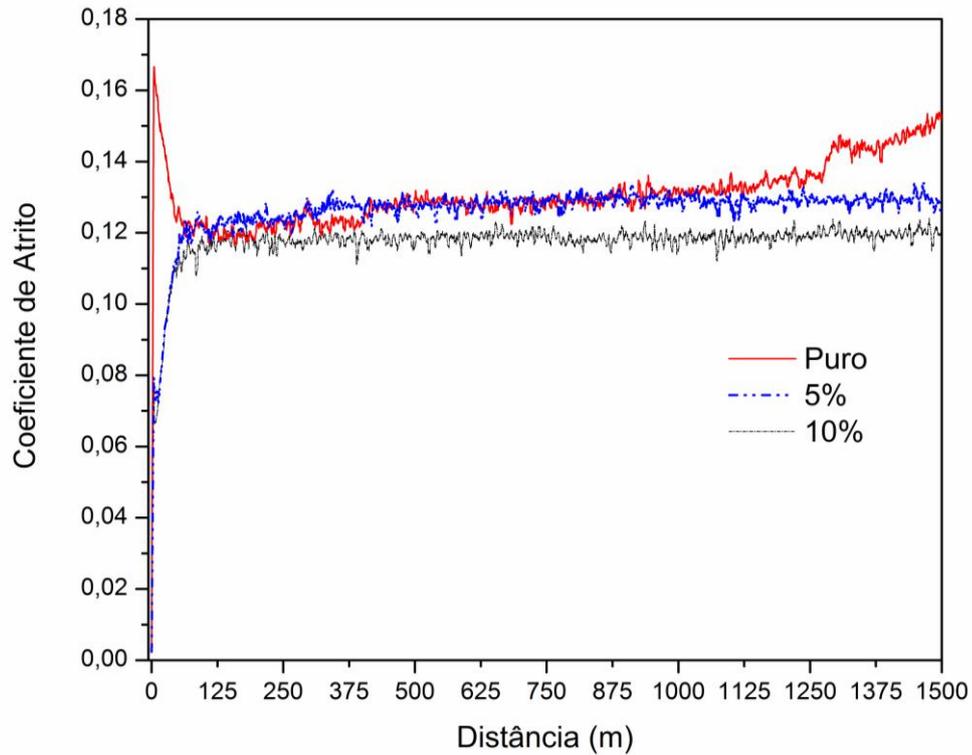
Fonte: Próprio autor

### 5.3.4 Análise tribológica

Na Figura 47 são demonstrados os perfis de coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento do ensaio pino sobre disco. Observa-se que o período de amaciamento (*running-in*) foi semelhante para as três amostras, se mantendo até os 100 primeiros metros. O coeficiente de atrito se manteve estável na faixa entre 100 e 1100 metros.

Gupta e Riyad (2018) encontraram resultados semelhantes no deslizamento entre alumina e UHMWPE puro e seus compósitos com  $Ti_3SiC_2$ .

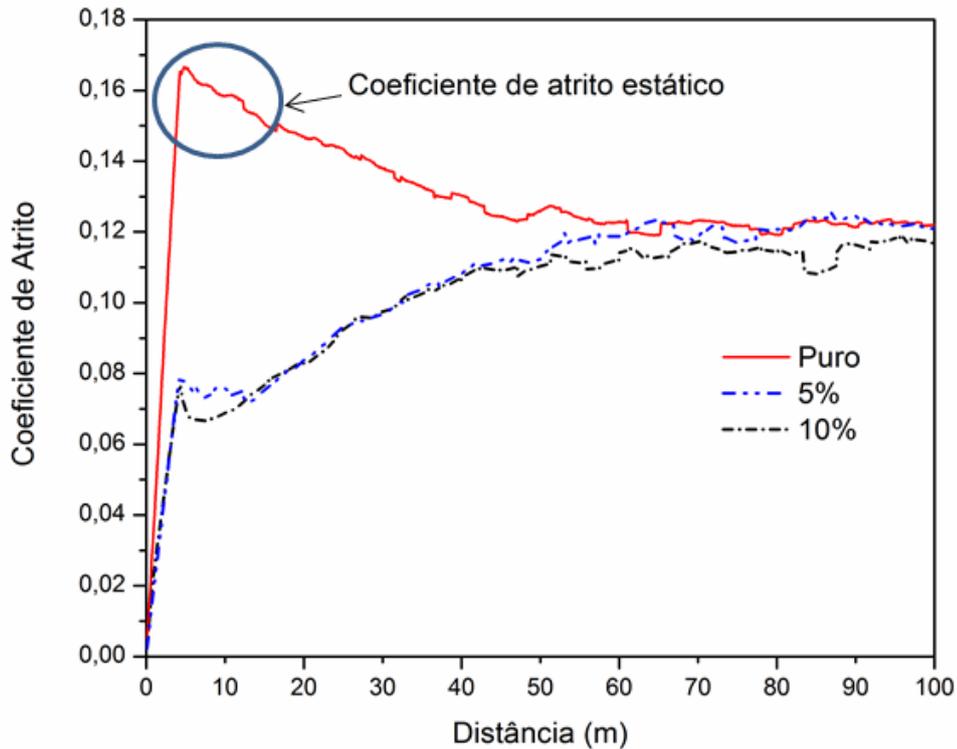
**Figura 47: Coeficiente de atrito em função da distância percorrida.**



Fonte: Próprio autor

De acordo com a Figura 48, o coeficiente de atrito estático da amostra de UHMWPE puro, foi maior em relação aos compósitos UHMWPE + 5% e UHMWPE + 10%. Esse fato pode ser explicado pela característica estrutural do UHMWPE que se apresenta linear fazendo com que haja uma força extra no limiar do movimento, retardando o processo de transferência das camadas de cristalitos para o contra corpo (STACHOWIAK e BATCHELOR, 2013; HUTCHINGS, 2017).

**Figura 48: Coeficiente de atrito em função dos cem primeiros metros percorridos.**



Fonte: Próprio autor

Conforme Tabela 10, o UHMWPE puro possui menores valores de Ra e Rz em relação aos seus compósitos. Valores de Ra e Rz menores implicam em picos menores na superfície e com isso existe uma maior área de contato real entre o pino deslizante (padrão para as três amostras) e o disco no início do ensaio. A partir dos 100 metros iniciais o coeficiente de atrito das amostras se manteve estável devido ao achatamento dos picos.

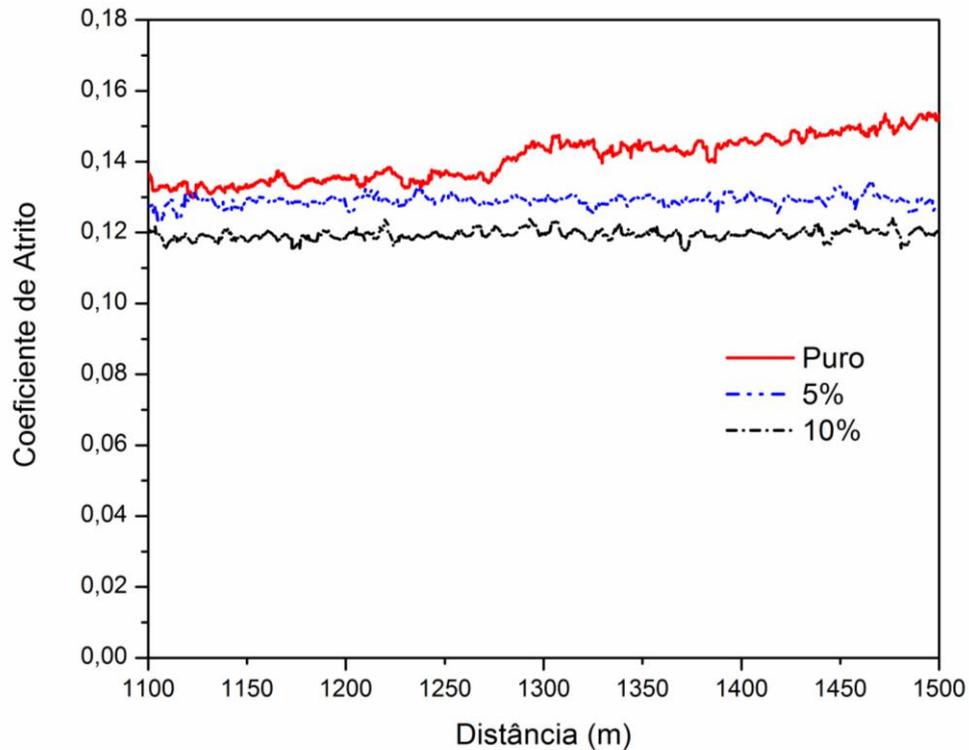
**Tabela 10: Parâmetros de rugosidade dos corpos de prova para ensaio tribológico.**

	UHMWPE puro	UHMWPE + 5%	UHMWPE + 10%
Ra ( $\mu\text{m}$ )	$0,11 \pm 0,01$	$0,16 \pm 0,04$	$0,22 \pm 0,03$
Rz ( $\mu\text{m}$ )	$0,78 \pm 0,12$	$1,57 \pm 0,21$	$1,75 \pm 0,15$

Fonte: Próprio autor

Na Figura 49 é mostrado que a partir dos 1100 metros o coeficiente de atrito do UHMWPE puro tende a aumentar enquanto que para os compósitos o coeficiente de atrito se manteve estável até o fim do ensaio em 1500 metros.

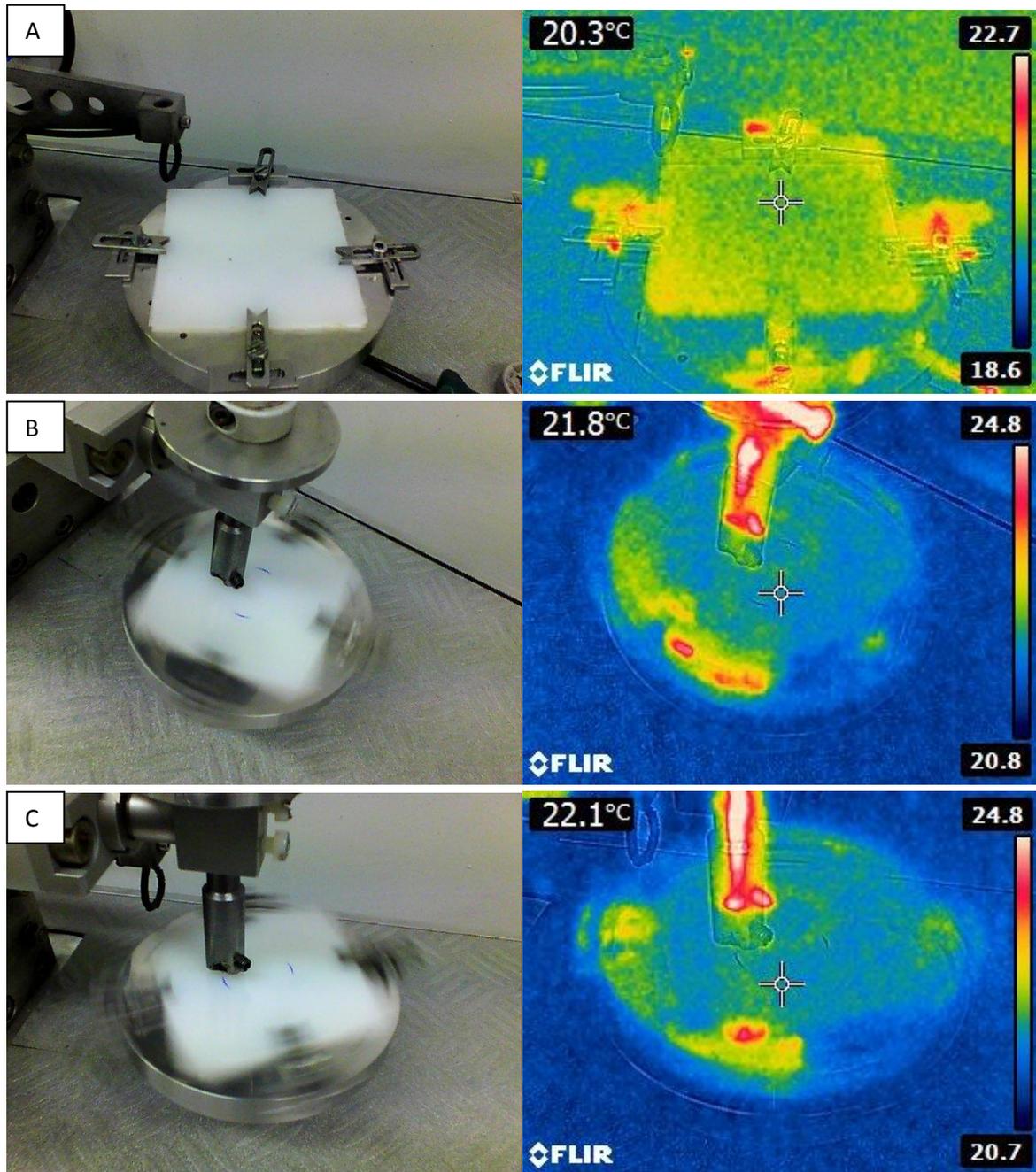
**Figura 49: Coeficiente de atrito após os 1100 metros.**



Fonte: Próprio autor

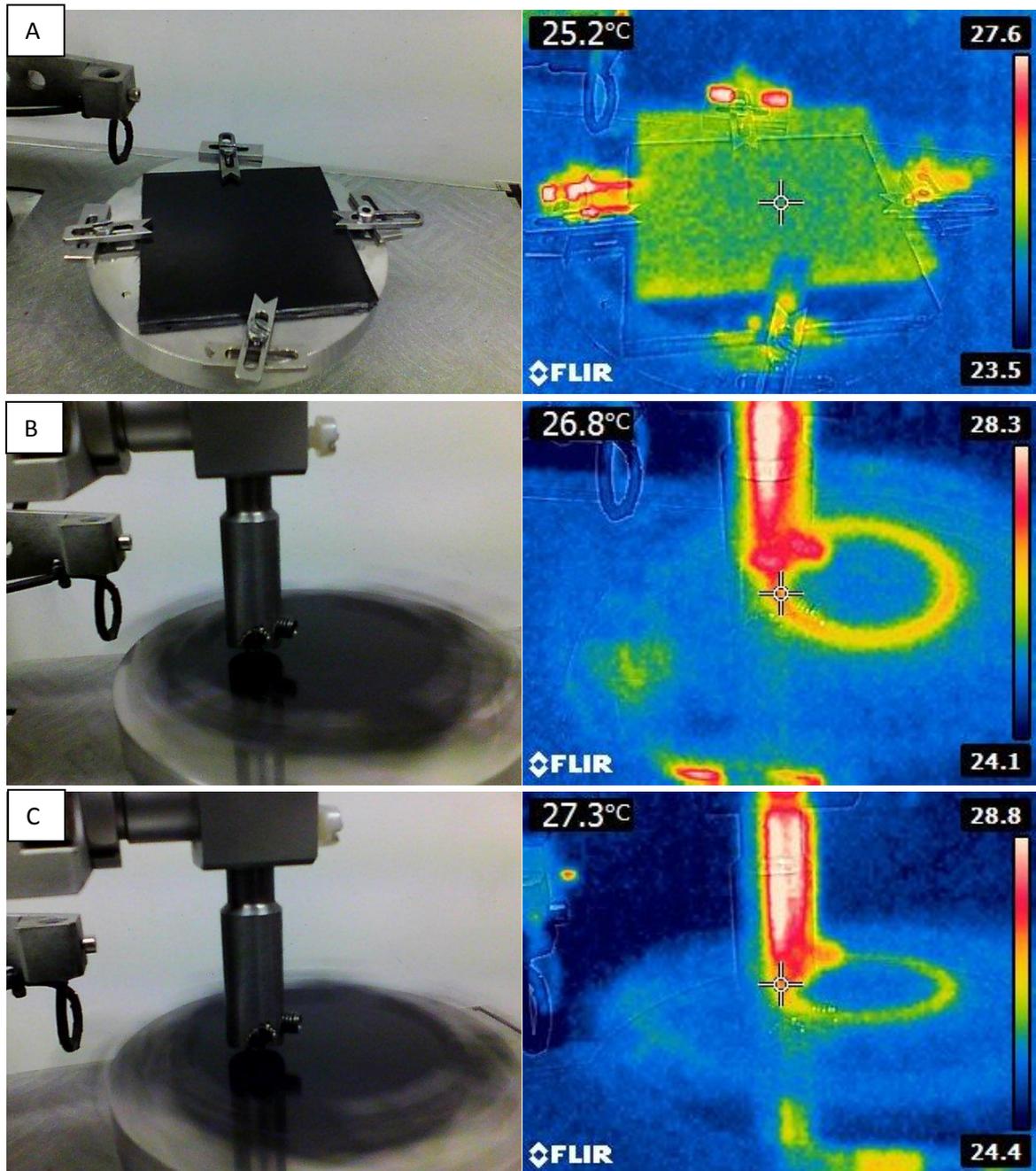
Nas Figuras 50, 51 e 52 são demonstrados os termogramas das amostras de UHMWPE puro, com 5% de carga e com 10% de carga respectivamente. Foram medidas as temperaturas pontuais nas áreas superficiais mais próximas do pino onde estão indicadas no canto superior esquerdo. As imagens 50 A, 51A e 52A representam as temperaturas superficiais de cada amostra antes de iniciar o teste e todas as amostras foram referenciadas a temperatura ambiente. Observa-se que a diferença entre as temperaturas iniciais (Figuras 50A, 51A e 52A) e as temperaturas finais (Figuras 50C, 51C e 52C) em média se mantiveram constantes (aproximadamente 2°C) indicando que a adição do resíduo de retificação do aço ABNT 4340 à matriz polimérica tem efeito insignificante na condutividade térmica do UHMWPE.

Figura 50: Imagem termográfica do disco de UHMWPE puro: A) temperatura de referência B) início do teste C) final do teste.



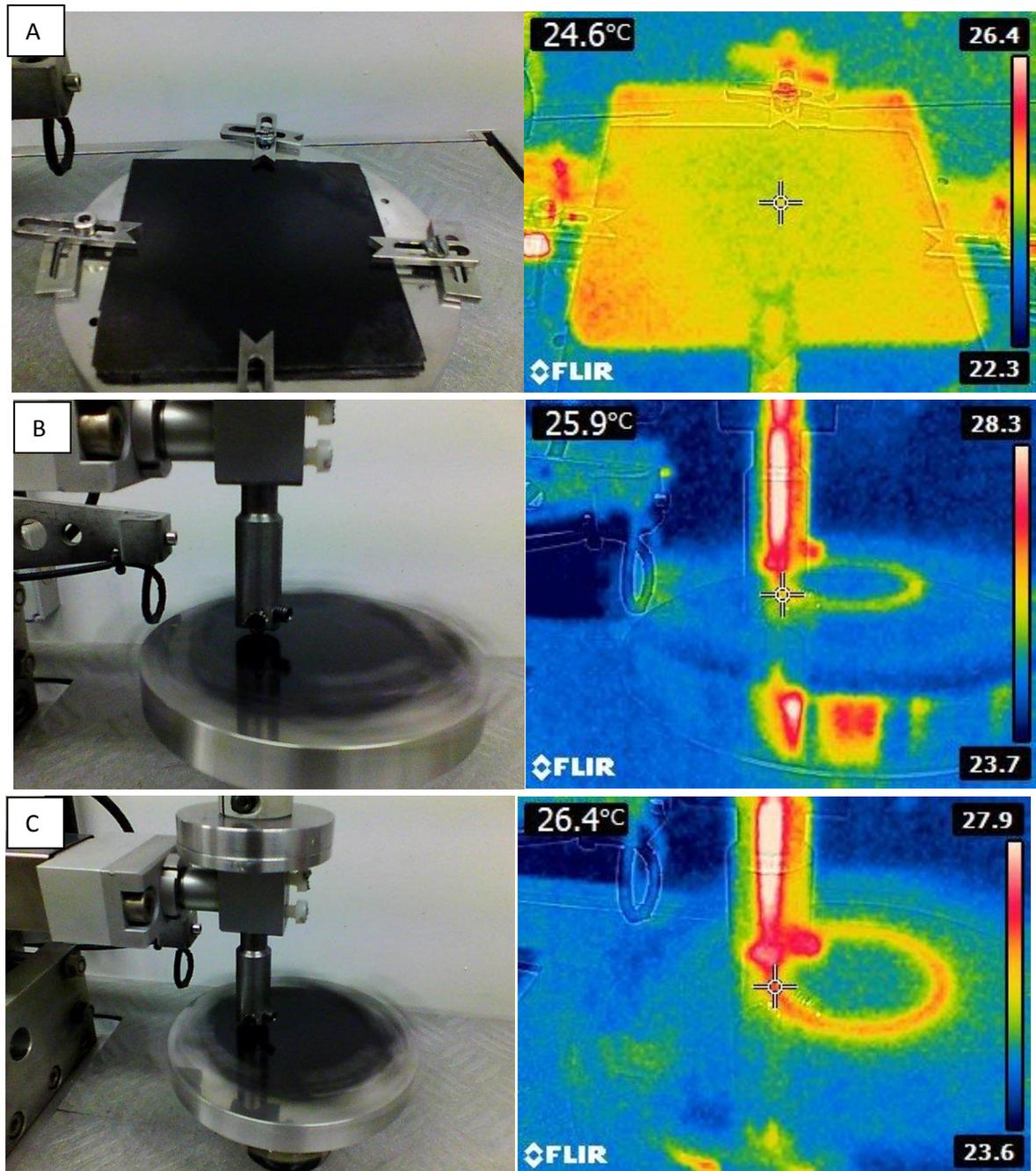
Fonte: Próprio autor

Figura 51: Imagem termográfica do disco de UHMWPE com 5% de carga: A) temperatura de referência B) início do teste C) final do teste.



Fonte: Próprio autor

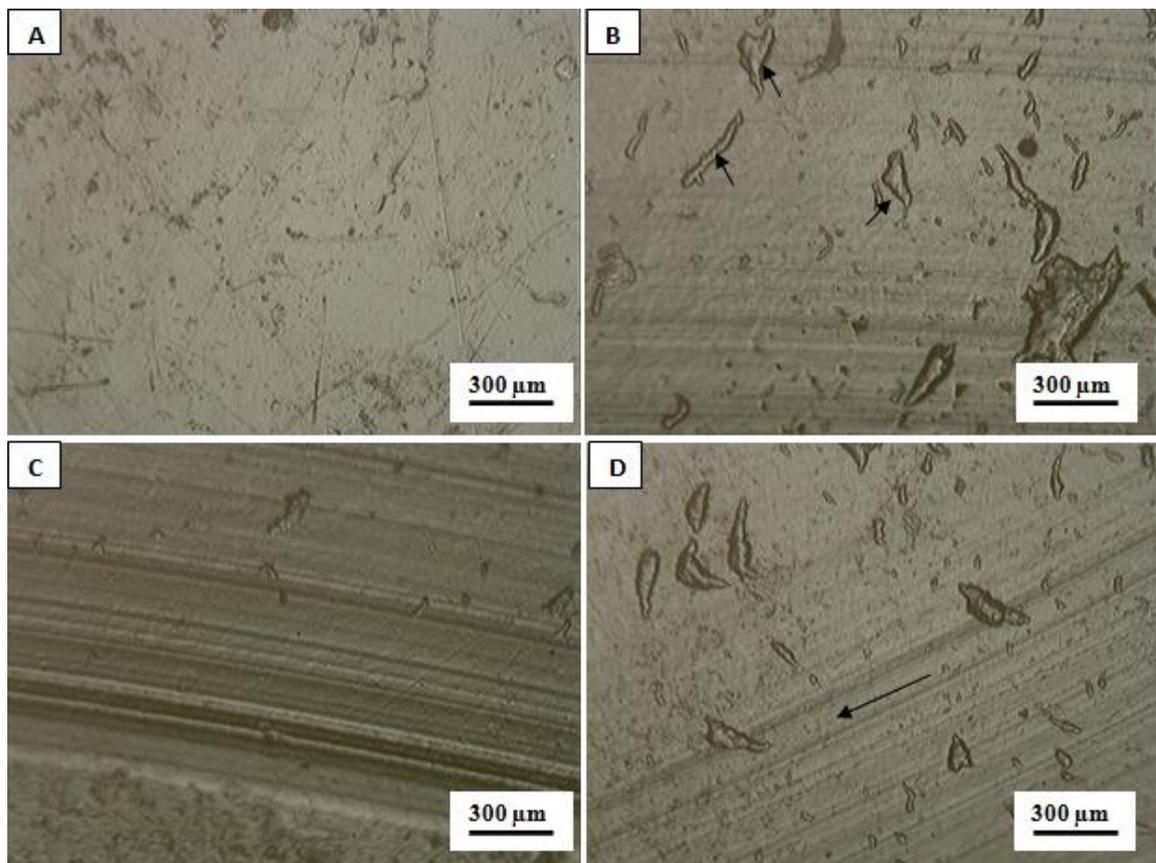
Figura 52: Imagem termográfica do disco de UHMWPE com 10% de carga: A) temperatura de referência B) início do teste C) final do teste.



Fonte: Próprio autor

Na Figura 53 são demonstrados os principais mecanismos de desgaste sofrido pela amostra de UHMWPE puro durante deslizando em contato com o pino de aço ferramenta M12. Na Figura 53A é mostrado a superfície da amostra fora da região da trilha de desgaste, onde pode ser observado pequenos riscos em direções aleatórias caracterizados pelo acabamento superficial criado no processo de confecção das chapas. Houve desgaste abrasivo, conforme indicado na Figura 53B onde pode ser observado partículas aderidas à superfície. Na Figura 53C é mostrado o mecanismo de desgaste abrasivo de microsulcamento presente na amostra. Os desgastes abrasivos se intensificaram nas laterais da trilha de desgaste. A direção de deslizamento do pino é demonstrada na Figura 53D.

**Figura 53: Imagens de microscopia óptica da amostra de UHMWPE puro: A) Superfície fora da trilha de desgaste B) Mecanismo de desgaste abrasivo C) Local de maior desgaste D) Direção de deslizamento.**

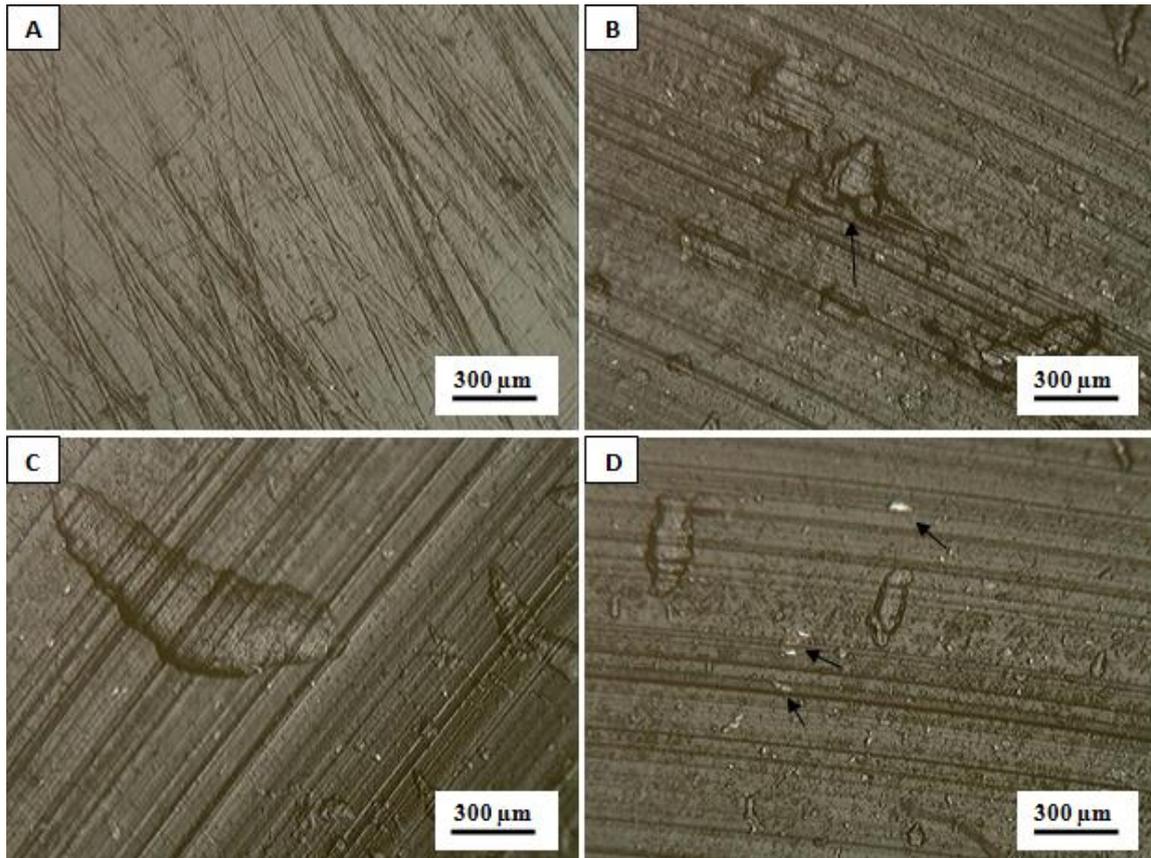


Fonte: Próprio autor

Na Figura 54 são mostradas imagens dos mecanismos de desgaste presentes na amostra de UHMWPE + 5% após o ensaio de pino sobre disco. Na Figura 54A é mostrado o aspecto do acabamento superficial da amostra. Observa-se que no geral a amostra de UHMWPE + 5% possui mais riscos superficiais do que o UHMWPE puro, confirmando o

resultado demonstrado na Tabela 10. Na Figura 54B são demonstrados mecanismos de desgaste adesivo, enquanto que a Figura 54C mostra os mecanismos de desgaste abrasivo de microlascamento e de microfadiga. Partículas (debris) do pino de M12 estão presentes na amostra de UHMWPE + 5% caracterizando um mecanismo de adesão conforme Figura 54D.

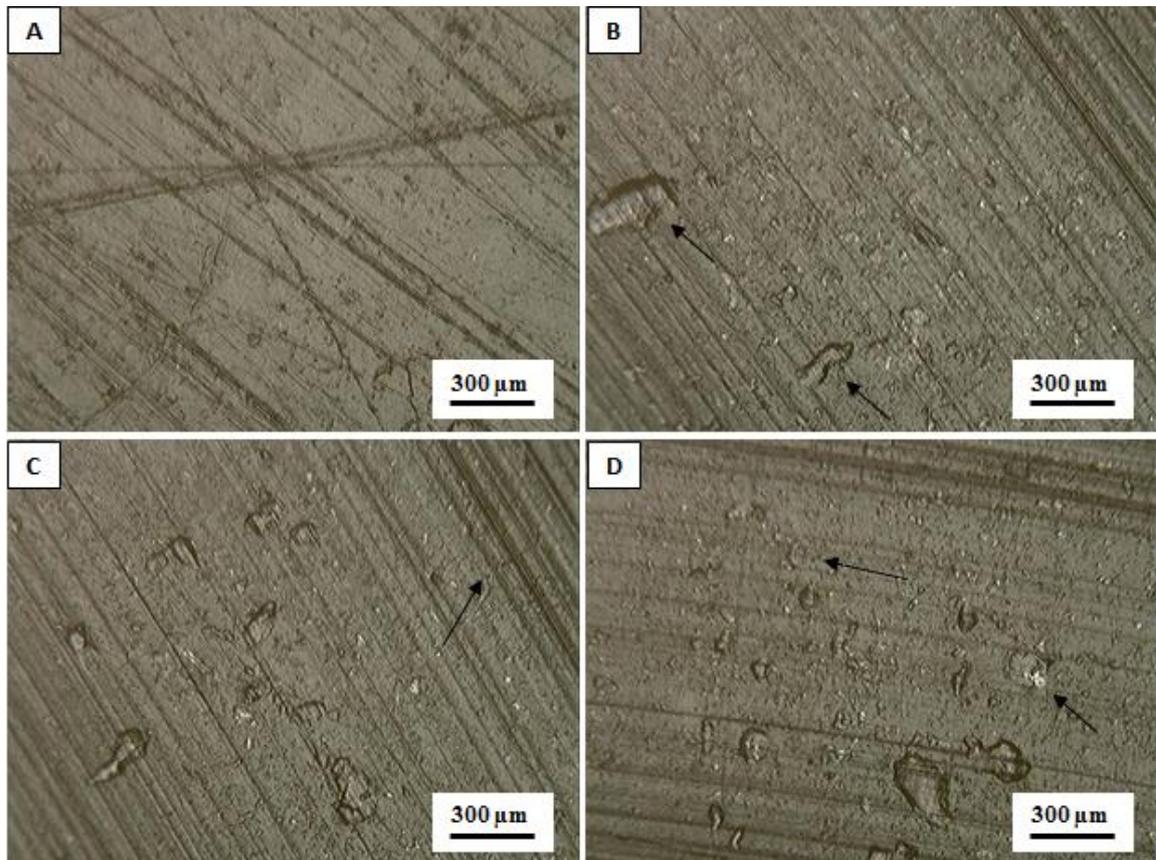
**Figura 54: Imagens de microscopia óptica da amostra de UHMWPE + 5% de carga: A) Superfície fora da trilha de desgaste B) Mecanismo de desgaste abrasivo C) Local de maior desgaste D) Desgaste adesivo.**



Fonte: Próprio autor

Imagens da superfície do UHMWPE + 10% antes e após o ensaio pino sobre disco são mostradas na Figura 55. É possível observar na Figura 55A, a superfície do composto antes de sofrer desgaste através do teste pino sobre disco. Nas Figuras 55B e 55D estão indicadas partículas aderidas à superfície de deslizamento, evidenciando desgaste adesivo. Os mecanismos de desgaste abrasivo de microssulcamento e microfadiga presentes na amostra são mostrados na Figura 55C.

**Figura 55: Imagens de microscopia óptica da amostra de UHMWPE + 10% de carga: A) Superfície fora da trilha de desgaste B) Mecanismo de desgaste abrasivo C) Local de maior desgaste D) Desgaste adesivo.**



Fonte: Próprio autor

## 6 CONCLUSÃO

O estudo desenvolvido neste trabalho avaliou as propriedades mecânicas e tribológicas do UHMWPE com a adição de carga metal/cerâmica provinda do processo de retificação do aço ABNT 4340 endurecido. Diante dos resultados das técnicas de caracterização feitas em conjunto com o ensaio mecânico de tração, as seguintes conclusões podem ser deduzidas:

- A avaliação microestrutural por MEV/EDS mostrou que as partículas de resíduo estão bem dispersas na matriz polimérica, no entanto, as partículas segregaram para os limites de fase nos compósitos com composição de 10% em peso de resíduo.
- A adição do resíduo à matriz de UHMWPE resultou num aumento da tensão limite de escoamento com o acréscimo da porcentagem em peso, no entanto, houve uma diminuição do percentual de deformação das amostras à medida que há o acréscimo de carga o que implica em uma menor ductilidade do compósito com 10% de carga em relação ao polímero puro.
- As medidas de calorimetria exploratória diferencial indicaram que a adição do resíduo à matriz polimérica impactou no grau de cristalinidade, sendo que os compósitos com 5 % e 10% apresentaram aumento de 32,67% e 45,43% respectivamente no grau de cristalinidade comparativamente com o UHMWPE puro.
- Com a adição do resíduo à matriz de UHMWPE, o coeficiente de atrito diminuiu e apresentou menor alteração no processo de fricção.
- As amostras de UHMWPE puro e os compósitos UHMWPE +5% e UHMWPE +10% apresentaram desgastes adesivo e abrasivo.

Se tratando de questões ambientais, a substituição do polímero puro pelo compósito acarreta na diminuição dos impactos ambientais causados pelo descarte do resíduo do processo de retificação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDELBARY, Ahmed. *Wear of polymers and composites*. Woodhead Publishing, 2015.

AZAM, M.; SAMAD, M. A. *UHMWPE hybrid nanocomposite coating reinforced with nanoclay and carbon nanotubes for tribological applications under water with/without abrasives*. Tribology International, v. 124, p. 145-155, 2018.

BARRETT, T. S.; STACHOWIAK, G. W.; BATCHELOR, A. W. *Effect of roughness and sliding speed on the wear and friction of ultra-high molecular weight polyethylene*. Wear, v. 153, n. 2, p. 331-350, 1992.

BLANCHET, T. A.; KENNEDY, F. E. *Sliding wear mechanism of polytetrafluoroethylene (PTFE) and PTFE composites*. Wear, v. 153, n. 1, p. 229-243, 1992.

BLAU, P. J. *Friction science and technology: from concepts to applications*. CRC press, 2008.

BRASKEM. **PEUAPM: Ultra High Molecular Weight Polyethylene (PEUAPM)**. Brasilplast, 2017. Disponível em: < <http://www.braskem.com.br> >. Acesso em: 14/04/2018

COLUMBY, R. B. R. **UTEC® – Um Plástico de Engenharia Desenvolvido na Bahia**. Camaçari, v. 23, n. 1-3, 2008.

COUTINHO, F.M.B.; MELLO, I.L.; MARIA, L.C.S. **Polietileno: principais tipos, propriedades e aplicações**. Polímeros v.13 n.1 São Carlos. 2003. Instituto de Química, UERJ.

DICKENS, P. M.; SULLIVAN, J. L.; LANCASTER, J. K. *Speed effects on the dry and lubricated wear of polymers*. Wear, v. 112, n. 3-4, p. 273-289, 1986.

FRIEDRICH, K. *Friction and wear of polymer composites*. Elsevier, 1986.

FRIEDRICH, K.; SCHLARB, A. K. *Tribology of polymeric nanocomposites: friction and wear of bulk materials and coatings*. Elsevier, Vol.55, 2011.

FRLIC, S. *Tribological Behaviour of Polymer Materials for Gear Applications*, 2016, Dissertação de Mestrado, Lulea University of Technology.

GALDINO, G. V. *Avaliação do efeito do reprocessamento do polietileno de ultra alto peso molecular sobre suas propriedades mecânicas, térmicas e morfológicas*. 2014. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.

GUPTA, S.; RIYAD, M. F. *Synthesis and tribological behavior of novel UHMWPE-Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> composites*. *Polymer Composites*, v. 39, n. 1, p. 254-262, 2018.

HUTCHINGS, I.; SHIPWAY, P. *Tribology: friction and wear of engineering materials*. Butterworth-Heinemann, 2017.

KALIN, M.; VIZINTIN, J. *Comparison of different theoretical models for flash temperature calculation under fretting conditions*. *Tribology International*, v. 34, n. 12, p. 831-839, 2001.

KONG, Y.; HAY, J. N. *The enthalpy of fusion and degree of crystallinity of polymers as measured by DSC*. *European Polymer Journal*, v. 39, n. 8, p. 1721-1727, 2003.

KURTZ, S. M. *UHMWPE biomaterials handbook: ultra high molecular weight polyethylene in total joint replacement and medical devices*. Academic Press, 2009.

LEE, L. *Polymer Wear and Its Control*. American Chemical Society, Washington, DC, 1985.

LIU, M.; WU, L.; ZHANG, F.; FU, J. *Influence of molecular weight of modified ultrahigh-molecular-weight polyethylene with Cu (II) chelate of bisalicylaldehydeethylenediamine on wear-resistant materials*. *Friction*, v. 4, n. 2, p. 116-123, 2016.

MALKIN, S.; GUO, C. *Grinding technology: theory and application of machining with abrasives*. Industrial Press Inc., 2008.

MELK, L.; EMAMI, N. *Mechanical and thermal performances of UHMWPE blended vitamin E reinforced carbon nanoparticle composites*. Composites Part B: Engineering, v. 146, p. 20-27, 2018.

NURUZZAMAN, D.; CHOWDHURY, M. *Friction and wear of polymer and composites*. In: Composites and Their Properties. In Tech, 2012.

POGACNIK, A.; KALIN, M. *Parameters influencing the running-in and long-term tribological behaviour of polyamide (PA) against polyacetal (POM) and steel*. Wear, v. 290, p. 140-148, 2012.

SHANG, Y.; ZHAO, Y.; LIU, Y.; ZHU, Y.; JIANG, Z.; ZHANG, H. *The effect of micron-graphite particle size on the mechanical and tribological properties of PEEK Composites*. High Performance Polymers, v. 30, n. 2, p. 153-160, 2018.

STACHOWIAK, G. W. *Wear: materials, mechanisms and practice*. John Wiley & Sons, 2006.

STACHOWIAK, G.; BATCHELOR, A. W. *Engineering tribology*. Butterworth-Heinemann, 2013.

STANDARD, A. S. T. M. G99, *Standard test method for wear testing with a pin-on-disk apparatus*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2006.

SILVA, C. H. **Degradação de UHMWPE e de POM devido à ação tribológica contra aço inoxidável e alumina**. 2003. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo.

SUI, G.; ZHONG, W. H.; REN, X.; WANG, X. Q.; YANG, X. P. *Structure, mechanical properties and friction behavior of UHMWPE/HDPE/carbon nanofibers*. Materials Chemistry and Physics, v. 115, n. 1, p. 404-412, 2009.

TEIXEIRA, A. **Caracterização e aproveitamento de cavacos dos processos de retificação de anéis de pistão**. 2007. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Itajubá.

VADIVEL, H. S.; GOLCHIN, A.; EMAMI, N. *Tribological behaviour of carbon filled hybrid UHMWPE composites in water*. Tribology International, v. 124, p. 169-177, 2018.

VIEILLE, B.; ALBOUY, W.; CHEVALIER, L.; TALEB, L. *About the influence of stamping on thermoplastic-based composites for aeronautical applications*. Composites Part B: Engineering, v. 45, n. 1, p. 821-834, 2013.

WANG, Y.; YIN, Z.; LI, H.; GAO, G.; ZHANG, X. *Friction and wear characteristics of ultrahigh molecular weight polyethylene (UHMWPE) composites containing glass fibers and carbon fibers under dry and water-lubricated conditions*. Wear, v. 380, p. 42-51, 2017.

WANG, Q.; WANG, H.; WANG, Y.; YAN, F. *The influences of several carbon additions on the fretting wear behaviors of UHMWPE composites*. Tribology International, 93, 390-398, 2016.

WIEBECK, H.; HARADA, J. *Plásticos de Engenharia: tecnologia e aplicações*, São Paulo, Artliber, 2005.

YAMAGUCHI, Y. *Tribology of plastic materials: their characteristics and applications to sliding components*. Elsevier, 1990.

ZHANG, S. W. *State-of-the-art of polymer tribology*. Tribology International, v. 31, n. 1-3, p. 49-60, 1998.

ZUM, G. K. H. *Microstructure and Wear of Materials*- Tribology Series, n.10 - Elsevier Science Publishers, 1987.