

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA

CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

NICHOLAS ROYDEN MARTINGO JOHNSON

**EFEITO DA ORIENTAÇÃO DAS MACROMOLÉCULAS NO  
COEFICIENTE DE ATRITO DE POLÍMEROS TERMOPLÁSTICOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2019

NICHOLAS ROYDEN MARTINGO JOHNSON

## **EFEITO DA ORIENTAÇÃO DAS MACROMOLÉCULAS NO COEFICIENTE DE ATRITO DE POLÍMEROS TERMOPLÁSTICOS**

Proposta de Projeto de Pesquisa apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para aprovação na disciplina.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Henrique da Silva

CURITIBA

2019

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa "Efeito da orientação das macromoléculas no coeficiente de atrito de polímeros termoplásticos", realizado pelo aluno(s) Nicholas Royden Martingo Johnson, como requisito para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Dr., Carlos Henrique da Silva

DAMEC, UTFPR

Orientador

Prof. Dr., Márcia Silva de Araújo

DAMEC, UTFPR

Avaliador

Prof. MSc., Pedro Luiz Fiad do Amaral

DAMEC, UTFPR

Avaliador

Curitiba, 5 de Dezembro de 2019.

## RESUMO

Em estudo anterior, focado em características tribológicas de amostras de politetrafluoroetileno (PTFE), foi levantada a possibilidade da influência da orientação das macromoléculas carbônicas nas suas propriedades tribológicas. O estudo atual se propõe a realizar uma análise em amostras de diferentes polímeros, avaliando e quantificando o efeito dessa característica nas diferentes propriedades tribológicas de cada um desses materiais. Ensaio preliminares de riscamento, seguidos de caracterização, por meio de medições em um rugosímetro e em um durômetro, foram realizados em amostras de PTFE puro laminado a quente, confirmando a influência da orientação do riscamento com relação às direções de laminação das placas, sendo que para o riscamento na direção longitudinal, o COF apresentou valores reduzidos, e valores de desgaste elevados, comparativamente à direção transversal. Após a validação do método por meio dos ensaios preliminares, foram preparadas amostras de polipropileno (PP), polietileno de alta densidade (HDPE), e polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE) que foram igualmente ensaiados e analisados para comparação dos resultados para diferentes materiais. Os resultados demonstraram que para todos os materiais, com exceção do UHMWPE houve uma redução no atrito quando medido longitudinalmente à direção de estiramento de fabricação (direção de alinhamento das macromoléculas), e não foi observada alteração significativa no desgaste.

**Palavras-chave:** tribologia, termoplásticos, processo de fabricação, macromoléculas.

## ABSTRACT

During a previous study, focused on the tribological characteristics of PTFE (polytetrafluoroethylene), the possibility that the orientation of carbonic macromolecules might have influence upon the tribological properties of PTFE was raised. The current study proposes to perform an analysis of samples of different polymers, evaluating and quantifying the effect of this characteristic on the different tribological properties of each of these materials. Preliminary scratch tests, followed by characterization, by means of measurements on a rugosimeter and a durometer, were performed on samples of hot rolled, pure PTFE. These tests confirmed the influence of the orientation of the scratch, with respect to the direction of lamination of the samples, upon their tribological properties, as the COF presented reduced values in the longitudinal direction, while a higher degree of wear was suffered. After the validation of the method, samples of PP, HDPE and UHMWPE were also prepared, tested and analysed for result comparison between different materials. The results showed that all the materials, with the exception of UHMWPE had a reduction on the values of friction when it was measured longitudinally to the manufacturing flow direction (alignment direction of the macromolecules), while no significant change in wear was observed.

**Key words:** tribology, thermoplastics, manufacturing processes, macromolecule.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Esquema do processo de desgaste em contato metal-polímero em função da rugosidade do contra-corpo (a) extremamente lisa (b) nível de rugosidade mais elevado.

Figura 2: Representação esquemática da estrutura lamelar do PTFE

Figura 3: Diagrama de fases do PTFE a baixa pressão

Figura 4: Esquema representativo da chapa de material passando pelos cilindros de laminação durante uma etapa de redução

Figura 5: Área de moldabilidade de um polímero

Figura 6: Diagrama esquemático de equipamento de moldagem por injeção

Figura 7: Diagrama esquemático de uma extrusora

Figura 8: Efeito da velocidade de deslizamento no COF em diversos polímeros

Figura 9: Tribograma sobre superfície de polipropileno

Figura 10: Esquematização ensaio de riscamento

Figura 11: Representação do material ao longo da preparação dos corpos de prova

Figura 12: Fluxograma das atividades desenvolvidas

Figura 13: Exemplo de perfil de aspereza (PTFE LR)

Figura 14: Exemplo de medição de largura de risco

Figura 15: Exemplo de medição de profundidade de risco

Figura 16: Perfil de rugosidade das amostras TR e LR

Figura 17: Variação da largura com relação a carga aplicada nas direções LR e TR

Figura 18: Comparação da largura dos riscos com relação a carga aplicada nas direções LR e TR

Figura 19: Variação da profundidade com relação a carga aplicada nas direções LR e TR

Figura 20: Comparação da profundidade dos riscos com relação a carga aplicada nas direções LR e TR

Figura 21: Gráficos de coeficiente de atrito vs tempo por configuração 2, 5 e 8N

Figura 22: Gráficos de coeficiente de atrito vs tempo por configuração 15, 20 e 25N

Figura 23: Variação da largura com relação a carga aplicada nas direções LR e TR

Figura 24: Variação da profundidade com relação a carga para os materiais PTFE, PEAD, PP e UHMW aplicada nas direções LR e TR

Figura 25: Comparação da largura e profundidade dos riscos com relação a carga aplicada nas direções LR e TR para HDPE, PP e UHMW

Figura 26: Gráficos de coeficiente de atrito vs tempo para o UHMW na configuração de carga de 15N nas direções LR e TR.

Figura 27: Valores médios de COF medidos para HDPE nas condições LR e TR nas diferentes condições de carga

Figura 28: Valores médios de COF medidos para PP nas condições LR e TR nas diferentes condições de carga

Figura 29: Valores médios de COF medidos para UHMW nas condições LR e TR nas diferentes condições de carga



Figura 30: Valores médios de COF medidos para o PTFE nas condições LR e TR nas diferentes condições de carga

Figura 31: Comparação dos valores médios de COF, tomando o COF do PTFE (LR) como referência para carregamentos de 10N, 15N, 20N e 25N

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1: Propriedades dos materiais fornecidas pelo fabricante

Tabela 2: Dados de Tg e Tm dos materiais utilizados

Tabela 3: Valores médios de COF medidos para PTFE

Tabela 4: Resultados do teste de significância 2ª etapa

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

PTFE – Politetrafluoroetileno

COF – *Coefficient of friction* (Coeficiente de atrito)

LR – Longitudinal ao riscamento

TR – Transversal ao riscamento

PP – Polipropileno

HDPE – *High density polyethylene* (polietileno de alta densidade)

UHMWPE – *Ultra high molecular weight polyethylene* (polietileno de ultra alto peso molecular)

Ra – Desvio Aritmético Médio

Rq – Desvio Médio Quadrático

Rsk – Assimetria de distribuição das alturas

Rku – Curtose da distribuição das alturas

Rdq – Rampa média quadrática

Rsm – Espaçamento médio entre picos

Rpc – Número de picos por centímetro

Rda – Rampa aritmética média

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1	Contexto do Tema	1
1.2	Caracterização do Problema	1
1.3	Objetivos	1
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>3</b>
2.1	Polímeros	3
2.2	Politetrafluoroetileno (PTFE)	3
2.3	Polipropileno	6
2.4	Polietileno	7
2.5	Processos de fabricação	7
2.5.1	– Laminação	8
2.5.2	– Extrusão	9
2.5.3	– Sinterização	11
2.6	Tribologia em polímeros	12
2.6.1	- Atrito	12
2.6.2	– Orientação de ensaios	14
2.6.3	– Rugosidade	15
2.7	Ensaio de riscamento	16
<b>3</b>	<b>Materiais e métodos</b>	<b>18</b>
3.1	Materiais	18
3.2	Métodos	19
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>25</b>
4.1	Resultados 1ª etapa	25
4.2	Resultados do teste de significância 2ª etapa	31
4.3	Resultados finais	32
<b>5</b>	<b>Conclusões</b>	<b>42</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>43</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contexto do Tema

Em projetos mecânicos, o uso de componentes poliméricos em regiões de deslizamento entre superfícies é uma prática constante, e o uso da informação do coeficiente de atrito de pares formados por esses materiais poliméricos é extremamente relevante, com impacto na vida útil, desempenho, e custo do projeto.

Devido à vasta diversidade de situações em que ocorre tal contato entre superfícies, diferentes propriedades tribológicas são mais adequadas para cada situação específica, e obter a geometria mais adequada, do ponto de vista dos sentidos de movimentação das peças, permite uma melhor seleção dos materiais envolvidos nestes sistemas.

## 1.2 Caracterização do Problema

Dependendo do processo de fabricação, componentes fabricados em materiais poliméricos podem ter as suas macromoléculas alinhadas em algum determinado sentido. Em estudo anterior com amostras de compósitos de PTFE e PTFE puro, realizada por Silva (2017), observou-se que as placas de PTFE puro apresentavam uma elevada anisotropia de suas propriedades mecânicas, então foi levantada a hipótese de que essa anisotropia, provocada pela orientação de suas macromoléculas, devido ao processo de laminação, poderia influenciar as características tribológicas das amostras, mas devido a restrições daquele estudo, não foi possível verificar a validade da hipótese, e tal influência ainda não pode ser confirmada e quantificada.

## 1.3 Objetivos

O projeto objetiva, realizar ensaios de riscamento em amostras de materiais termoplásticos puros obtidos por processos de fabricação que induzem anisotropia das propriedades mecânicas, para verificar quais materiais são mais propensos a ter as suas propriedades tribológicas alteradas com o sentido de movimento com relação à direção em que as suas macromoléculas estão alinhadas. Além de quantificar essa influência nos valores de coeficiente de atrito para definir a dimensão dessa influência e qual a aplicação seria mais adequada para cada geometria.

## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1 Polímeros**

A palavra polímero vem do grego, significando “muitas partes”, e foi criada para designar compostos de elevada massa molecular média. Polímeros são macromoléculas, com unidades químicas repetidas regularmente, chamadas de meros, cujo número médio representa o grau de polimerização (MANO; MENDES, 2004).

Materiais poliméricos são amplamente utilizados nos setores estrutural, automobilístico e aeroespacial, devido à boa combinação de alta resistência e módulo específicos, e sua facilidade de processamento, resistência à corrosão e baixo atrito (SAHIN, 2015).

Os polímeros podem ser classificados com relação ao comportamento mecânico em plásticos, elastômeros e fibras. Sendo que os plásticos são rígidos ou semi-rígidos, elastômeros possuem a capacidade de se deformar elasticamente pelo menos 2 vezes o seu comprimento, e as fibras possuem relações de comprimento por diâmetro da ordem de 100, sendo exclusivamente termoplásticos (CANEVAROLO, 2006).

Plásticos são também divididos de acordo com o seu comportamento sob aquecimento, em que são classificados entre termoplásticos, que plastificam de forma completamente reversível ao serem aquecidos devido as suas cadeias lineares ou ramificadas, e termofixos, polímeros com alta densidade de ligação cruzada que se tornam permanentemente rígidos após a cura, e não plastificam sob aquecimento (CALLISTER; RETHIWSCH, 2012).

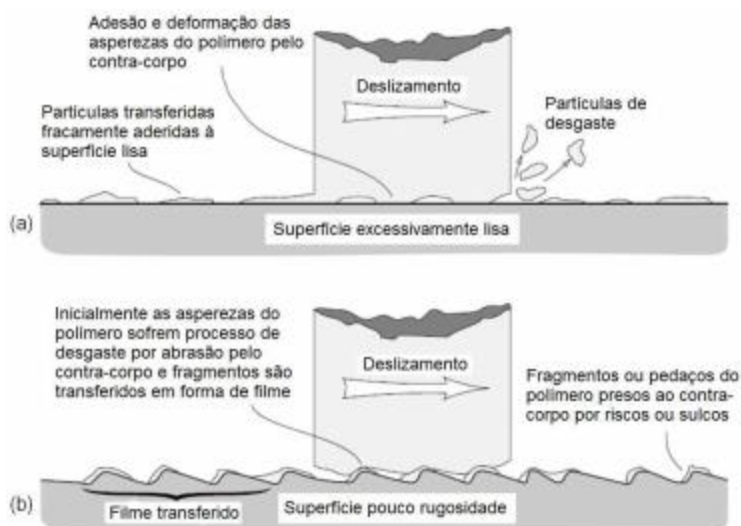
### **2.2 Politetrafluoroetileno (PTFE)**



O uso de politetrafluoroetileno (PTFE), conhecido pelo nome comercial Teflon, e seus compósitos em unidades de fricção e selos é extremamente comum, devido às características da sua estrutura molecular e supramolecular, que garantem uma combinação única de resistência mecânica, resiliência, e características termofísicas, anticorrosivas e tribológicas, que permitem uso eficiente desses produtos. (PANDA *et al.*, 2017).

O PTFE contém 2 átomos de flúor ligados a cada carbono da cadeia polimérica, como ilustrado na figura 1 abaixo. Sua massa molecular é da ordem de  $10^5$ - $10^8$ , possui 95% de cristalinidade e  $T_v=127\text{ }^\circ\text{C}$  e  $T_f=327\text{ }^\circ\text{C}$  (MANO; MENDES, 2004).

Quando em contato deslizante contra uma superfície metálica, o PTFE causa a formação de um filme, como representado esquematicamente na figura 1, e apresenta características ser um material autolubrificante, tornando-o um excelente lubrificante sólido, com a desvantagem apenas de uma elevada taxa de desgaste sob condições normais de atrito (Ayman *et al.*, 2012), o que resulta em seu uso frequente na forma de compósitos com fibra de vidro e carbono (SAHIN, 2015).



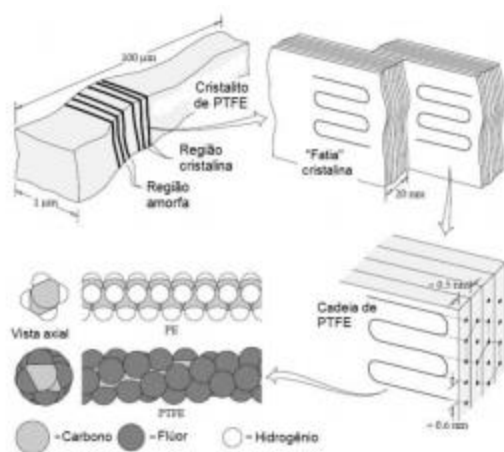
**Figura 1: Esquema do processo de desgaste em contato metal-polímero em função da rugosidade do contra-corpo (a) extremamente lisa (b) nível de rugosidade mais elevado.**

**Fonte: VALE (2014)**

A temperatura de trabalho alcançada pelo PTFE é uma das mais elevadas entre polímeros, suportando temperaturas de trabalho contínuo de 260° C, e valores mais elevados para exposições curtas (DUPONT, 2018)

Devido à sua elevada viscosidade no estado fundido, o PTFE não pode ser transformado pelos métodos tradicionais de extrusão e injeção, sendo o principal método de transformação deste polímero a prensagem sob temperatura ambiente, seguida de sinterização a temperaturas acima do ponto de fusão. (STRABELLI *et al.* 2014). Ele é sinterizado sob a forma de tarugos ou placas, que são subsequentemente cortados, laminados ou usinados (MANO; MENDES, 2004).

O PTFE possui estrutura complexa, formada por camadas alternadas de cristaltos de cadeia dobrada, com alto índice de cristalinidade, e cadeias amorfas formadas por moléculas de ligação relativamente mais fracas (VALE, 2014). Sua estrutura está representada na figura 2.

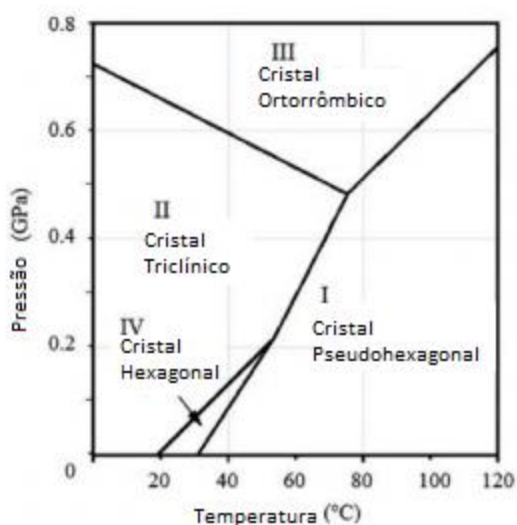


**Figura 2: Representação esquemática da estrutura lamelar do PTFE**

**Fonte: VALE (2014)**

O PTFE apresenta três fases cristalinas à pressão atmosférica. O diagrama na figura 3 mostra as transições importantes que ocorrem de acordo com a temperatura e a pressão. Quando o PTFE sofre a aplicação de uma carga, na fase triclinica (região 2), devido à falta de mobilidade, as regiões cristalinas são orientadas fora da direção principal de carregamento. Para a fase hexagonal (região 4), a orientação das macromoléculas também ocorre fora da direção do carregamento, mas sofrem deformação contínua, rotacionando e tendendo a se alinhar. Para a fase

pseudo-hexagonal (região 1), a orientação preferencial ocorre na direção do carregamento para qualquer magnitude de deformação (VALE, 2017).



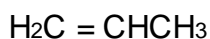
**Figura 3: Diagrama de fases do PTFE a baixa pressão**

**Fonte: adaptado de VALE (2017)**

### 2.3 Polipropileno

O polipropileno (PP) é um polímero termoplástico de baixa densidade, baixo custo de fabricação e de fácil moldagem, amplamente utilizado em aplicações como para-choques automotivos, carcaças de eletrodomésticos, recipientes e material hospitalar.

Ele é obtido através da polimerização dos gases propileno e propeno, e seus monômeros possuem a fórmula:



As formas comuns de processamento do polipropileno são injeção, extrusão de filmes, extrusão de filamentos, e termoformagem.

## 2.4 Polietileno

O Polietileno (PE), é produzido de diversas formas, e cada uma tem diferentes propriedades devido às suas diferenças estruturais.

O HDPE (High density Polyethylene), é uma classificação do polietileno que foi definida pela norma ASTM D1248 para o polietileno com densidades superiores a 0,941. Ele é usualmente fabricado com baixas quantidades de buteno ou hexeno como um comonômero utilizado para controlar a ramificação. Como um material semicristalino, o HDPE possui tanto regiões cristalinas quanto regiões amorfas, mas é capaz de atingir valores superiores a 90% de cristalinidade, enquanto o polietileno de baixa densidade chega a valores de apenas 40% (HANDBOOK ..., 2008).

O HDPE é principalmente utilizado para a fabricação de tubos, devido às suas propriedades mecânicas, físicas e químicas que garantem boa resistência à deformação e ao termofissuramento. A sua massa molecular tem influência sobre as suas propriedades, sendo frágil em baixos pesos moleculares e apresentando maior resistência ao impacto conforme ele aumenta (COUTINHO *et al.*, 2003).

O UHMWPE, (Ultra High Molecular Weight Polyethylene), ou polietileno de ultra alto peso molecular, é um polímero sintético composto de cadeias parafínicas, lineares ou ramificadas, cuja massa molar média é igual ou superior a  $2,5 \times 10^6$  g.mol<sup>-1</sup>. Sua elevada massa molar, apresenta propriedades únicas, como altíssima resistência à abrasão e ao impacto, e baixo coeficiente de fricção, sendo considerado um plástico de engenharia. (BITTENCOURT *et al.*, 2016).

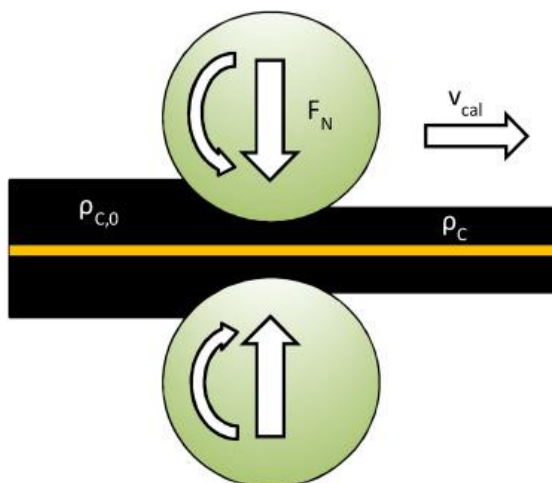
Os métodos de processamento por fusão, tais como a moldagem por injeção ou extrusão convencional não podem ser usados para este polímero devido à sua alta viscosidade no estado fundido nas temperaturas de processamento (SANGEETA, 2000).

## 2.5 Processos de fabricação

Neste capítulo serão apresentados alguns dos tradicionais processos de fabricação de polímeros. Os processos de fabricação que foram considerados relevantes para este trabalho sendo: extrusão, laminação e sinterização.

### 2.5.1 – Laminação

A laminação é um processo de conformação mecânica que consiste na passagem de um corpo sólido entre dois cilindros que giram em sentidos opostos com a mesma velocidade superficial, distanciados entre si de uma distância menor do que a espessura do corpo a ser deformado. O processo é extremamente antigo, sendo a mais antiga ilustração de um laminador uma gravura de Leonardo da Vinci, de 1486, que se destinava à laminação a frio de barras chatas de ouro para cunhagem de moedas (MACHADO, 2009).



**Figura 4: Esquema representativo da chapa de material passando pelos cilindros de laminação durante uma etapa de redução**

**Fonte: Meyer et al.**

O processo usualmente é realizado em múltiplas etapas de redução, cada uma resultando na redução de espessura e alongamento do corpo, além de um alargamento, que é relativamente pequeno e usualmente desprezado. Isso pode ser realizado com laminadores em linha, ou com um conjunto único de cilindros, variando a distância entre os cilindros ou variando o diâmetro do cilindro ao longo do seu comprimento.

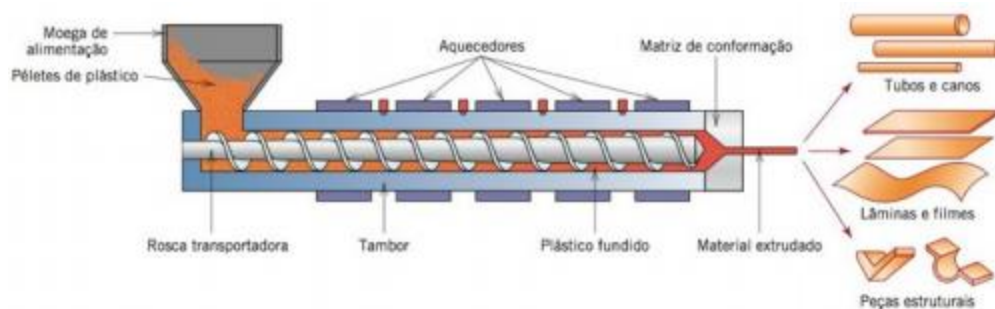
No processo de laminação, o polímero sofre um processo de deformação plástica, de forma que as cadeias adjacentes às lamelas deslizam umas em relação às outras tal que as dobras das cadeias fiquem mais alinhadas com a direção de laminação, produzindo uma estrutura altamente orientada (CALLISTER; RETHIWSCH, 2012).

As principais vantagens desse processo são a alta estabilidade dimensional do produto e o baixo custo para grandes volumes de produção, com suas limitações sendo o alto custo dos equipamentos e ferramentas, e a aplicabilidade restrita a formas simples e perfis transversais (HARPER; PETRIE 2006).

## 2.5.2 – Extrusão

A extrusão é uma técnica utilizada para moldagem de polímeros termoplásticos viscosos sob pressão, forçando o material a escoar através do orifício de uma matriz para formação de uma peça contínua, e funciona similarmente à extrusão de metais.

A principal aplicação dessa técnica é a produção de segmentos contínuos com seção transversal de geometria constante (CALLISTER; RETHIWSCH, 2012).



**Figura 7: Diagrama esquemático de uma extrusora**

**Fonte: Callister (2012)**

O sistema de extrusão é composto pela extrusora, a matriz, o sistema de resfriamento, um puxador e o equipamento de corte.

O material peletizado é transportado através de uma câmara por uma rosca ou parafuso sem fim, onde ele é compactado, fundido e conformado como uma carga contínua de um fluido viscoso. A massa é então forçada através de um orifício na matriz, e é solidificada por sopradores de ar, um borrifo de água ou um banho. Por fim o extrudado é cortado em comprimentos pré-determinados. (GROOVER, 2007).

Na extrusora, cerca de 80% da energia térmica é gerada pelo cisalhamento sobre o material gerado pelo movimento da rosca, com exceção dos sistemas de rosca dupla, onde há menor cisalhamento, e o resto é obtido pelo uso de aquecedores (MANRICH, 2005).

A rosca é a parte central do equipamento de extrusão, e seu desenho depende de vários fatores relacionados com a reologia do polímero, a capacidade de produção e a temperatura de fusão. A rosca é dividida em 3 zonas, a zona de alimentação, a zona de plastificação e a zona de bombeamento (INNOVA, 2016).

A zona de alimentação é localizada nos primeiros filetes, onde os pellets fluem livremente pela gravidade, formando uma camada elástica que não sofre cisalhamento. Essa camada é acionada pelas forças de fricção entre ela e as superfícies do cilindro e da rosca, e a diferença de fricção entre estas superfícies é o que determina o transporte do material, sendo que o fluxo de translação será maior quanto maior a diferença entre os coeficientes de fricção (sendo o coeficiente da rosca menor que o do cilindro). O cilindro deve ser mantido a uma temperatura superior à da rosca, de forma com que o material tenda a aderir à parede, escorrendo na superfície da rosca. Caso a rosca esteja muito quente há a possibilidade do material se grudar e girar com o mesmo (INNOVA, 2016).

A zona de compressão é a zona em que coexistem polímero sólido e fundido, onde o material sofre a fusão devido aos mecanismos de condução térmica com a parede do cilindro e de transformação da energia mecânica devido à deformação do material. O objetivo é conferir densidade ao material, eliminando o ar entre as partículas enquanto ocorre a fusão (INNOVA, 2016).

A zona de bombeamento refere-se à área da rosca em que o material está completamente fundido, e a função dela é a de realizar a homogeneização do

material. Os parâmetros da geometria da rosca dependem do material a ser transformado (INNOVA, 2016).

Dentro da matriz, o polímero é transformado, e as suas cadeias se orientam na direção do fluxo, porém, devido ao atrito entre as paredes do cilindro e a matriz, juntamente com o efeito do tempo de relaxação, ocorre um inchamento do extrudado, dependente da temperatura, da taxa de cisalhamento, do atrito e do comprimento e espessura da matriz (ASSUMPÇÃO, 2016).

### **2.5.3 – Sinterização**

A sinterização de polímeros é técnica amplamente utilizada em vários ramos industriais, como as indústrias automobilística e eletro-eletrônica.

A sinterização é um processo frequentemente utilizado para transformação de PTFE, além de outros polímeros, como PEEK e PI. Exemplos de componentes fabricados por sinterização são rolamentos, buchas, arruelas, anéis de pistão e elementos de guia.

Componentes fabricados por sinterização possuem características isotrópicas, sem orientações definidas nas suas macromoléculas

A sinterização é um fenômeno de caráter universal. Ela ocorre, por exemplo, quando partículas de no máximo poucas centenas de micrometros de diâmetro encontram-se em estreito contato e a temperatura do ambiente é suficientemente alta para produzir a união por coalescência, isto é, pela fusão de superfícies adjacentes. Para que a sinterização ocorra é necessário que o sistema de partículas esteja o mais empacotado possível e que os vazios existentes entre elas sejam também, no máximo, micrométricos (CARDOSO, *et al.* 2018).

Quanto maior a temperatura e tempo de sinterização, menor será o nível de porosidade final, porém, será maior a probabilidade de cisão das macromoléculas devido à degradação térmica. Durante a sinterização define-se também a microestrutura e o grau de cristalinidade do polímero (STRABELLI, *et al.* 2014).



## 2.6 Tribologia em polímeros

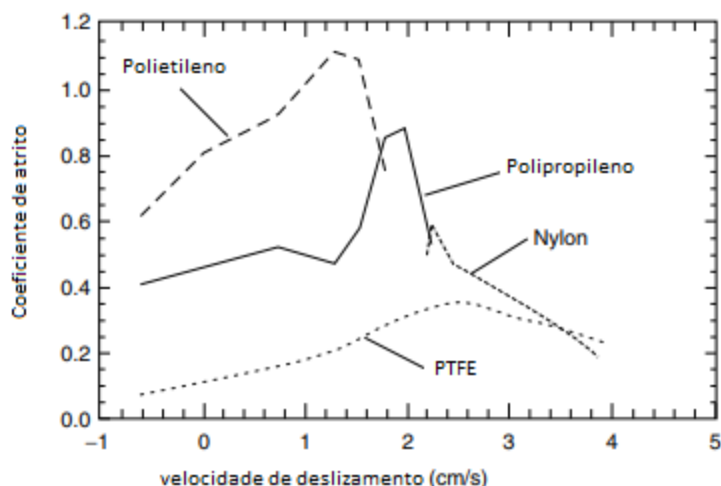
Com o aumento no uso de materiais poliméricos, estudos particulares começaram a ser realizados para essa classificação de materiais, sendo que percebeu-se que o atrito e desgaste se comportam de forma diferente do que com materiais metálicos, cujos conceitos eram previamente utilizados (BARTENEV; LAVRENTEV, 1981).

Contato entre polímeros, ou entre polímeros e metais, são usualmente predominantemente elásticos, diferenciando-se do contato entre metais. Além disso, a maioria dos polímeros são viscoelásticos, e apresentam uma alta dependência com relação ao tempo nas suas propriedades mecânicas (HUTCHINGS, 1992).

### 2.6.1 - Atrito

O atrito ocorre quando dois corpos entram em contato, tendo-se uma região de contato aparente, e o contato real ocorrendo nas asperezas dos dois corpos, na região superior das superfícies (STACHOVIK; BATCHELOR, 2001). Diversos fatores afetam o atrito gerado nessas asperezas, como a pressão de contato, o acabamento superficial, a velocidade de deslizamento e a temperatura no contato, entretanto, é difícil estudar a contribuição desses fatores separadamente (BLAU, 2009).

Existe uma tendência generalizada de que conforme a velocidade aumenta, o coeficiente de atrito diminui. Entretanto, pequenas variações de velocidade de deslizamento podem tanto aumentar a força resistente quanto diminuí-la, sendo o seu efeito no coeficiente de atrito difícil de prever. A figura 8 demonstra alguns exemplos de possíveis relações entre a velocidade de deslizamento e a força de atrito.

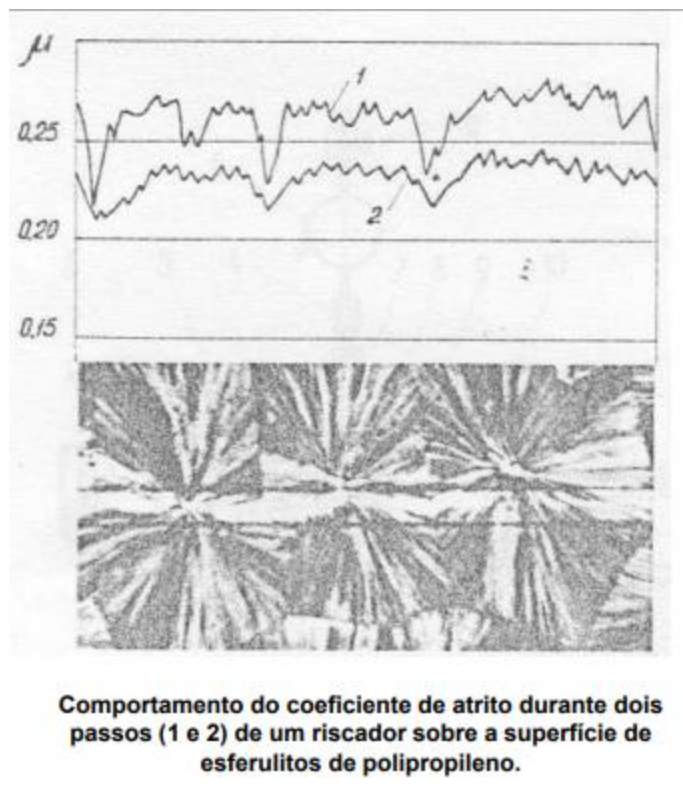


**Figura 8: Efeito da velocidade de deslizamento no COF em diversos polímeros**

**Fonte: Adaptado de BLAU (2009)**

A influência da força normal na força de atrito é uma das variáveis tribológicas mais estudadas. A pressão de contato aparente corresponde a força normal aplicada dividida pela área aparente, uma quantidade macroscópica. Era o método usual utilizado para calcular o coeficiente de atrito, considerado uma constante para um par de materiais. Entretanto, estudos futuros comprovaram que a proporcionalidade da força de atrito e a força normal muda quando condições de contato causam mudanças nos processos interfaciais, sendo o exemplo mais claro a mudança de deformação elástica para deformação plástica.

Um fator de interesse a esse trabalho, que demonstrou, em análise realizada por Bely, *et al.* (1970), possuir efeito sobre o coeficiente de atrito, foi o efeito da estrutura do polímero. A figura 9 demonstra os resultados encontrados de que os menores valores de atrito foram observados nas bordas dos esferulitos, e que os valores de atrito medidos transversalmente às lamelas dos esferulitos foram mais elevados com relação aos medidos longitudinalmente. Desta forma, deixando claro que as características microestruturais afetam as propriedades tribológicas de polímeros.



**Figura 9: Tribograma sobre superfície de polipropileno**

**Fonte: Bely *et al.* (1970).**

### 2.6.2 – Orientação de ensaios

Ao longo dos estudos realizados para compreender as interações de nível atômico relacionadas com o atrito, foi observada anisotropia na fricção de deslizamento de acordo com a orientação molecular. (Liley *et al.* 2019). Outros estudos observaram mudanças significativas nas propriedades tribológicas de nanotubos de carbono alinhados nas direções horizontal e vertical, devido à capacidade dos nanotubos de comprimir em resposta às cargas aplicadas (B. Ni and S. B. Sinnott), e um aumento das forças de fricção em monocamadas de polidiacetileno em experimentos com deslizamento na direção perpendicular à da orientação da estrutura polimérica. (CARPICK *et al.* 1997).

Diretamente relacionado a este estudo, Inkook *et al.* comprovaram, por meio de simulações de dinâmica molecular e microtribometria que a orientação estrutural da interface de deslizamento de PTFE possui grande influência nos valores de atrito e

desgaste, sendo as forças de atrito e desgaste maiores no deslizamento perpendicular à orientação da estrutura polimérica, envolvendo a cisão e reorientação molecular. Apesar de outros estudos indicarem um aumento no atrito no deslizamento entre placas de PTFE orientadas paralelamente, devido ao componente de adesão ser aumentado (TABOR, 1961).

### 2.6.3 – Rugosidade

Os parâmetros de rugosidade utilizados neste trabalho foram o Ra, Rq, Rsk, Rku, Rda, Rdq, Rsm e Rpc, sendo todos parâmetros de rugosidade 2D.

Dentre eles, os parâmetros Ra, Rq, Rku e Rsk são considerados parâmetros médios, o Rpc e o Rsm são parâmetros de espaçamento e o Rda e Rdq são parâmetros híbridos.

O parâmetro Ra fornece a informação sobre a média de alturas e profundidades de picos e vales e um valor baixo aproxima a superfície rugosa de uma superfície plana ideal.

O parâmetro Rq fornece o desvio padrão da distribuição de alturas, dado similar ao do parâmetro Ra, apresentando, entretanto, uma maior sensibilidade à presença de valores extremos. (PÁDOA, 2018).

O parâmetro Rsk é utilizado para medir a simetria do perfil com relação à linha média, e é sensível à grandes picos ou vales ocasionais. Ele é útil para diferenciar perfis com o mesmo Ra e Rq mas formas diferentes.

O Rku, ou kurtose descreve o grau de agudeza do perfil de densidade de probabilidade do perfil, sendo que para valores superiores a 3 o perfil é considerado como tendo muitos picos altos e vales baixos. (GADELMAWLA, *et al.*, 2002).

O Rda é definido como a inclinação absoluta média do perfil no trecho de avaliação, e é afetado por diversas propriedades do material, como atrito, lubrificação hidrodinâmica e refletância, enquanto o Rdq é a raiz quadrada média da inclinação média.

O valor de RSm é o espaçamento médio entre picos e fornece uma medida de densidade linear.

O parâmetro  $RP_c$  expressa a contagem de picos e é considerada uma medida complementar ao parâmetro  $RS_m$  na caracterização da densidade de picos (PÁDOA, 2018).

## 2.7 Ensaio de riscamento

Deformação por risco em superfícies poliméricas se tornaram um campo de estudo importante na ciência dos materiais conforme os polímeros demonstraram a capacidade de suportar danos durante a vida de serviço, com a expansão da sua variedade de usos. (WONG, 2003)

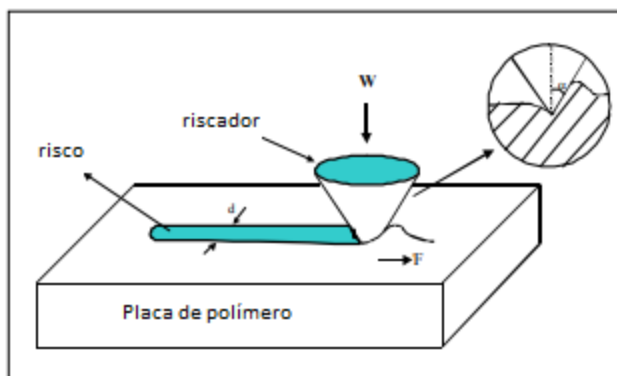
Existe uma ampla gama de aplicações nas quais a resistência ao riscamento pode fornecer dados importantes, como para camadas poliméricas para proteção de tinta automotiva, ou como um método para avaliar outras propriedades mecânicas cruciais (BLACKMAN *et al.* 2015)

A resistência ao riscamento pode ser avaliada de diversas formas, dependendo dos pontos de interesse, por meio da dureza de riscamento, dureza tangencial, ou por mecanismos de desgaste. Mas como a maior parte desses ensaios foram desenvolvidos para metais e cerâmicos, esses testes precisam ser alterados para a aplicação em polímeros, e usualmente são aplicados de formas diferentes de uma empresa para outra, devido a falta de padronização, portanto oferecendo normalmente apenas uma escala comparativa como resultado (WONG, 2003).

As propriedades do material que controlam os parâmetros do processo de riscamento são a tenacidade à fratura e tensão de escoamento, influenciando o quão regulares os riscos realizados são, e qual a resistência ao riscamento. (BLACKMAN, *et al.* 2015). Outros estudos também comprovaram a relação entre a resistência à compressão e as propriedades de riscamento (KOJIO *et al.*, 2019).

Briscoe *et al.* explicam que a energia necessária para riscar a superfície depende do tipo de deformação envolvida, viscoelástica, plástica, visco-elástica-plástica, ou frágil, além da velocidade de riscamento e da temperatura. Também foi

demonstrado que os mecanismos de deformação para o UHMWPE em cargas acima de 4N e temperatura ambiente são principalmente frágeis.

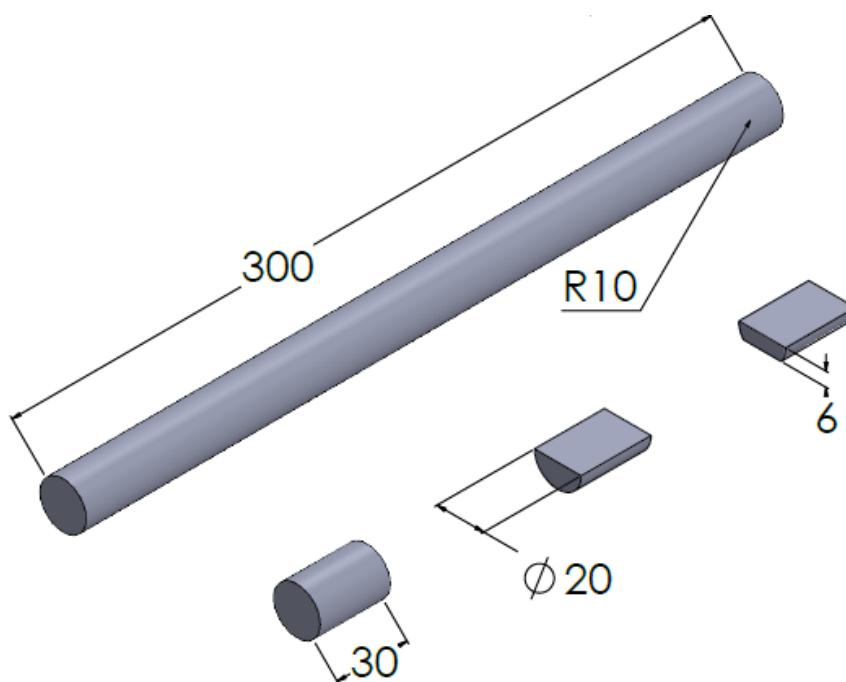


**Figura 10: Esquematização ensaio de riscamento**  
**Fonte: Wong (2002)**

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Materiais

Para os ensaios deste TCC, foram analisadas amostras de UHMWPE, PP e HDPE, polímeros cujas propriedades tribológicas possuem grande relevância nas suas aplicações. As amostras foram adquiridas na empresa Nitaplast, sendo os materiais nomeados Nitadur, Nitapro e Nitalen respectivamente. As amostras foram preparadas de barras de material extrudado, de diâmetro 20mm. O corpo e contracorpo utilizados no ensaio de riscamento foram os corpos poliméricos e um indentador Rockwell C. A figura 11 apresenta visualmente as dimensões dos corpos de prova ao longo do processo de preparo das amostras, com as dimensões dadas em milímetros.



**Figura 11: Representação do material ao longo da preparação dos corpos de prova<sup>1</sup>**

Ensaio preliminares foram realizados com placas de PTFE puro, um lubrificante sólido amplamente utilizado, obtidas da empresa Tecnoflur, fabricadas

---

<sup>1</sup> Figuras e tabelas sem indicação de fonte são de autoria própria

por sinterização seguida de laminação a quente, com a estrutura cristalina pseudo-hexagonal.

**Tabela 1: Propriedades dos materiais fornecidas pelo fabricante**

	<i>Nitadur</i> (UHMWPE)	<i>Nitapro</i> (PP)	<i>Nitalen</i> (HDPE)	<i>PTFE</i>
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	0,93	0,91	0,95	2,1
Resistência a tração (MPa)	30	35	31	22
Módulo de Elasticidade (MPa)	800	1300	750	260
Módulo de Cisalhante (MPa)	1000	1300	1200	-
Dureza Rockwell	R70	R86	R65	68
*COF	0,15	0,30	0,29	

**Fontes: Nitaplast (2019) e Assumpção (2016).**

\*Dados de COF medidos contra aço temperado e retificado em condições de  $p=0,05\text{N/mm}^2$   $v=0,6\text{m/s}$

**Tabela 2: Dados de Tv e Tf encontrados dos materiais utilizados**

	<i>UHMWPE</i>	<i>PP</i>	<i>HDPE</i>	<i>PTFE</i>
Tv (°C)	-112	-30	-70	-20
Tf (°C)	135	165	132	327

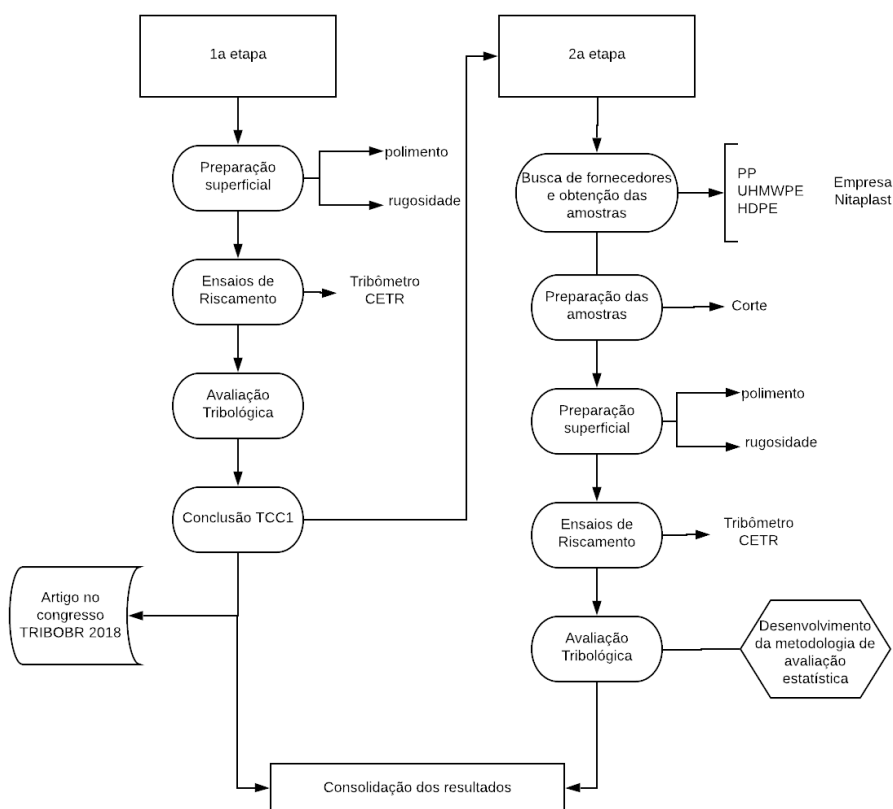
**Fontes: Nitaplast (2019) e Assumpção (2016).**

### 3.2 Métodos

O trabalho foi desenvolvido ao longo de 2 etapas. A 1ª etapa sendo responsável pelo desenvolvimento da metodologia de ensaio, utilizando as amostras de PTFE, culminou na apresentação do TCC1 e a publicação de um artigo no congresso TRIBOBR, e a 2ª etapa sendo referente aos subsequentes ensaios com



PP, HDPE e UHMWPE, e a análise dos resultados. A figura 12 apresenta um fluxograma dos procedimentos realizados.



**Figura 12: Fluxograma das atividades desenvolvidas**

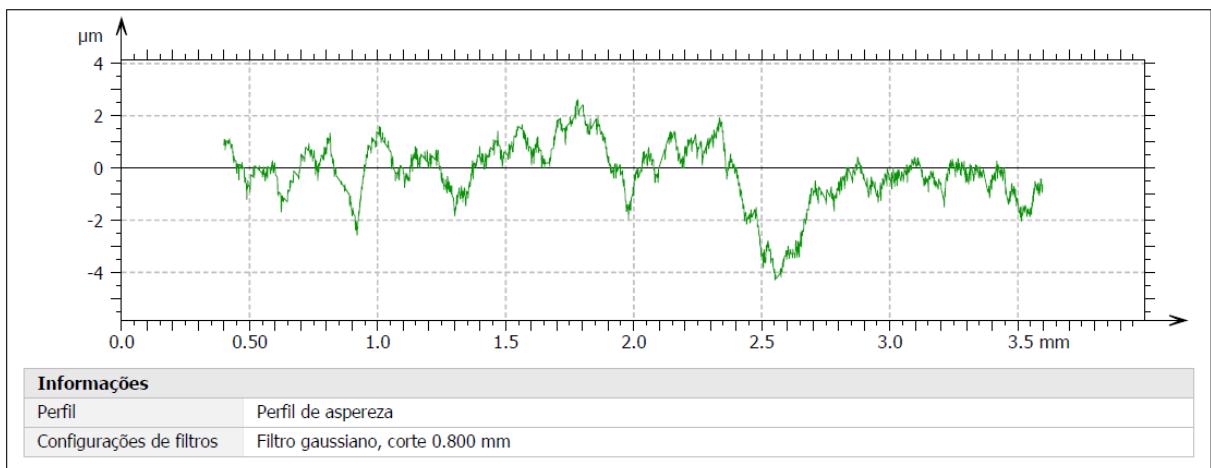
### 3.2.1 1ª Etapa

Aqui são apresentados os ensaios realizados previamente para validação da relevância do assunto de interesse do estudo, sendo eles um ensaio de riscamento, e a caracterização da profundidade dos riscos, por meio de um rugosímetro. Com objetivo principal de obter os valores de coeficiente de atrito e de desgaste para cada uma das configurações.

#### 3.2.1.1 Preparação superficial

Para o preparo da superfície, os corpos de prova foram lixados manualmente com lixas de granulometria 80 e 240, e então foram polidas.

Em seguida, com o uso de um rugosímetro Taylor-Hobson Surtronic S-100 foi realizada a caracterização das superfícies das amostras, obtendo confirmação de que elas se encontravam nas mesmas condições de acabamento, os parâmetros considerados na análise dos perfis das amostras foram o Ra, Rq, Rsk, Rku, Rdq, RSm, R<sub>Pc</sub> e Rda. Obtidos a partir do perfil de aspereza, separado do perfil de ondulação, como exemplificado na Figura 13. Foram realizadas 5 medições, em posições distintas da superfície da amostra, com uma distância de 5mm entre as posições de cada medição, com comprimento de medição de 3.5mm, cut-off de 0.8mm, que foi mantido após encontrar o valor de Ra dentro da faixa de 0.1 e 2mm.



**Figura 13: Exemplo de perfil de aspereza (PTFE LR)**

### 3.2.1.2 Ensaios de Riscamento

Os ensaios tribológicos na configuração de riscamento foram realizados na UTFPR no Laboratório de Superfícies e Contato (LASC) em um tribômetro do fabricante Bruker, modelo CETR-UMT.

Os ensaios de riscamento foram realizados com uma duração fixa de 30s e velocidade de 0,5mm/s, gerando riscos com comprimento de 15mm, e carga variando entre 2, 5, 8, 15, 20 e 25N e um penetrador Rockwell C.

Durante a 2ª etapa, os ensaios foram realizados mantendo a duração de 30s e velocidade de 0,5mm/s, mas as cargas utilizadas foram de 10, 15, 20 e 25N. Foram

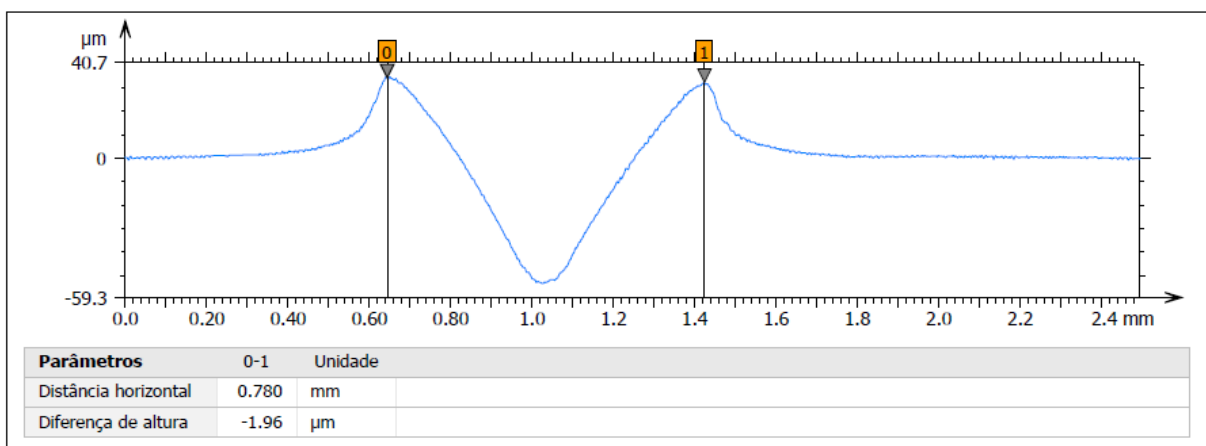
utilizadas cargas mais elevadas com relação aos ensaios preliminares para aumentar a dimensão das medidas, reduzindo o erro relativo, e para fazer uso de apenas uma célula de carga, reduzindo a quantidade de variáveis influenciando o resultado.

Com relação aos valores de COF medidos, foi observado que eles se mantiveram estáveis dentro dos intervalos de 1,4 a 4,0 mm, e, portanto, foi decidido restringir a análise neste intervalo. Ou seja, a etapa de *running-in* finaliza-se em 1,4 mm e a etapa de *steady-state* vai de 1,4 até 4,0 mm.

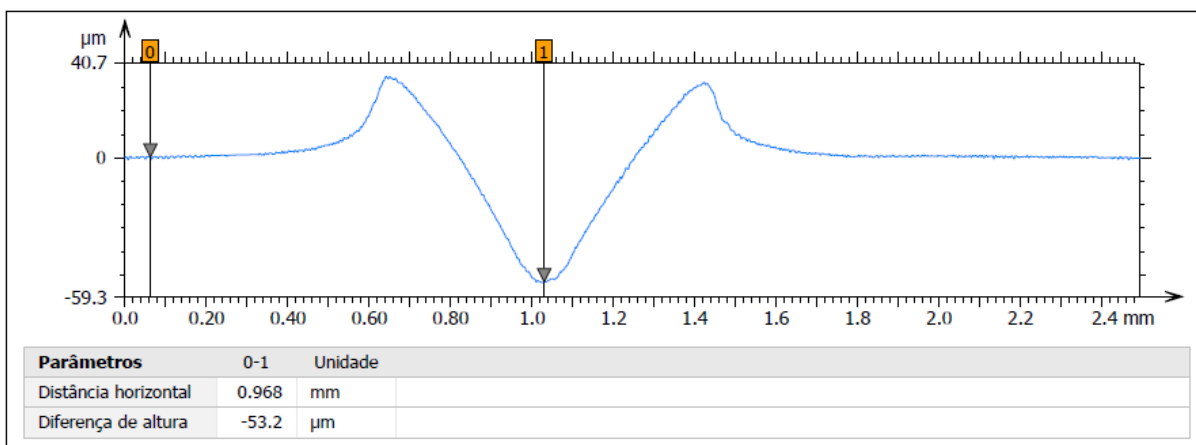
### 3.2.1.3 Avaliação tribológica

As medições características dos riscos foram realizadas em um rugosímetro Taylor Hobson, Surtronic S-100. E avaliadas por meio do programa incluso, TalyProfile Lite 7.1.7106 além de uso como perfilômetro para obtenção dos dados de profundidade e largura dos riscos.

As medições foram feitas utilizando um comprimento de medição de 4mm. E para a análise das dimensões do risco, nenhum filtro foi utilizado, e foram considerados o vale do risco e os picos mais próximos de ambos os lados, como exemplificado nas figuras 13 e 14 abaixo.



**Figura 14: Exemplo de medição de largura de risco**



**Figura 15: Exemplo de medição de profundidade de risco**

### 3.2.2 2ª etapa

Após a validação da metodologia ao longo da 1ª etapa do trabalho, a mesma foi utilizada para a realização dos ensaios finais, com a adição de uma maior análise estatística e etapas adicionais de preparação das amostras devido ao fato delas se originarem em forma de barras.

As novas amostras obtidas foram preparadas, e então foram realizados ensaios de riscamento e caracterização da profundidade dos riscos, por meio de um rugosímetro.

#### 3.2.2.1 Preparo das amostras

Os materiais utilizados na segunda etapa, o HDPE, PP e UHMWPE, foram obtidos em forma de barras cilíndricas foram cortados no comprimento de 30mm com uma serra fita, e então cortadas no meio ao longo do comprimento, com o uso lento de uma serra manual, para evitar aquecimento do material e mudança das

propriedades na superfície a ser ensaiada. Em seguida os corpos semi-cilíndricos tiveram a outra extremidade fresada para obter-se uma superfície oposta paralela para apoio durante os ensaios, e foram lixados e polidos.

### 3.2.2.2 Análise Estatística

Os dados obtidos de profundidade e largura dos riscos, tiveram os seus valores de média calculados entre as 5 medições realizadas em cada um dos 3 corpos de prova, e então foram comparados entre si graficamente, considerando uma dispersão de dois desvios padrão.

Para a análise dos resultados de COF, inicialmente buscou-se fazer uma comparação entre as diferentes curvas de atrito medidas para cada um dos 3 corpos de prova de cada material por meio do uso de regressões lineares, e um teste de Shapiro Wilk foi aplicado para verificação da normalidade das distribuições, com o uso do software PAST, sendo elas então identificadas como distribuições Anormais.

Foi realizado então um teste de hipótese de Mann Whitney, comparando as diferentes medições realizadas para cada uma das configurações, cujos resultados estão apresentados na tabela 4 na seção de resultados, com o objetivo de verificar que as medições dentro das mesmas condições eram estatisticamente iguais, sendo que alguns corpos de prova foram excluídos de análises futuras devido à grande quantidade de resultados incompatíveis.

Em seguida, devido à dificuldade em lidar com as regressões devido à não-normalidade da distribuição, foi decidido mudar a metodologia para uma análise de médias, sendo que todos os resultados de todos os pontos medidos para cada corpo de prova da mesma amostra foram agrupados, e tratados como um conjunto de dados, do qual foi extraído uma média, que foi comparada com as outras amostras utilizando uma dispersão de 2 desvios padrão.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Resultados 1ª etapa

Nessa seção são apresentados os resultados preliminares obtidos para as placas de PTFE avaliadas com o objetivo de validar a tese da influência da orientação das cadeias de macromoléculas no COF.

As amostras analisadas foram as de PTFE puro, ensaiadas por riscamento longitudinalmente e transversalmente à direção de laminação das placas (LR e TR respectivamente).

Primeiramente as amostras tiveram os seus perfis de rugosidade analisados no rugosímetro, para confirmar a similaridade dos perfis, de forma a excluir a influência dessa variável nos resultados seguintes, e os resultados obtidos indicaram que o perfil de rugosidade de ambas as amostras é igual, dentro dos desvios padrão, como demonstrado na Figura 16.

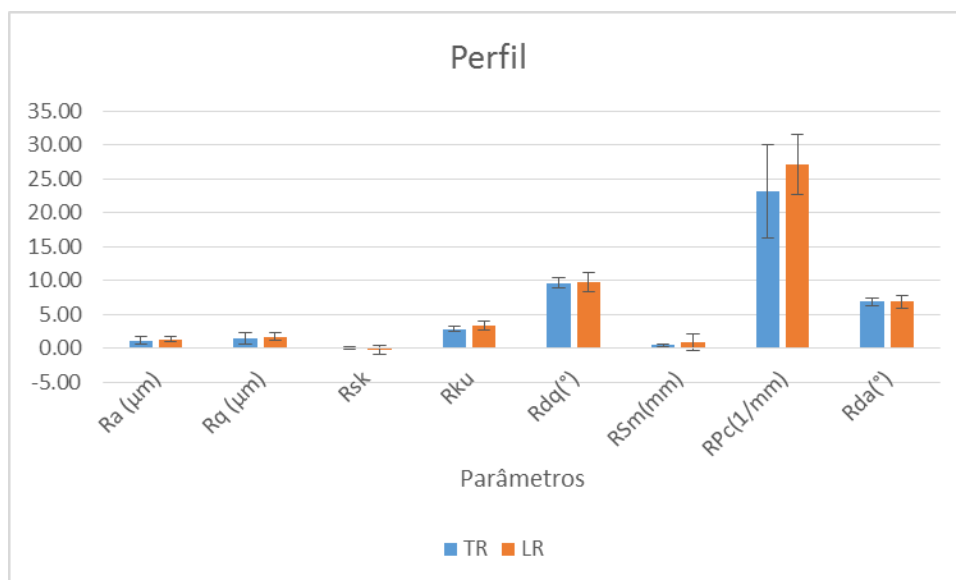
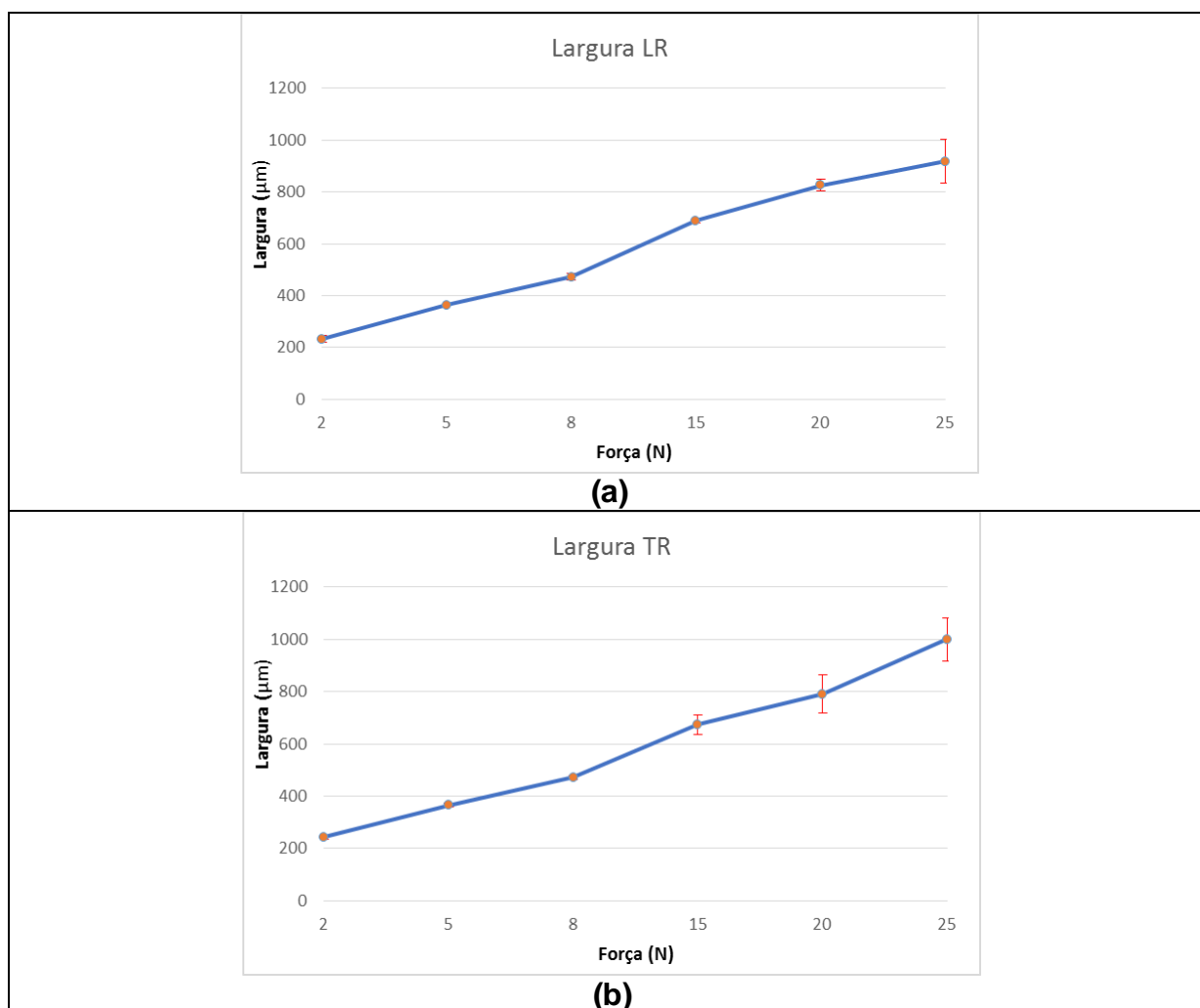
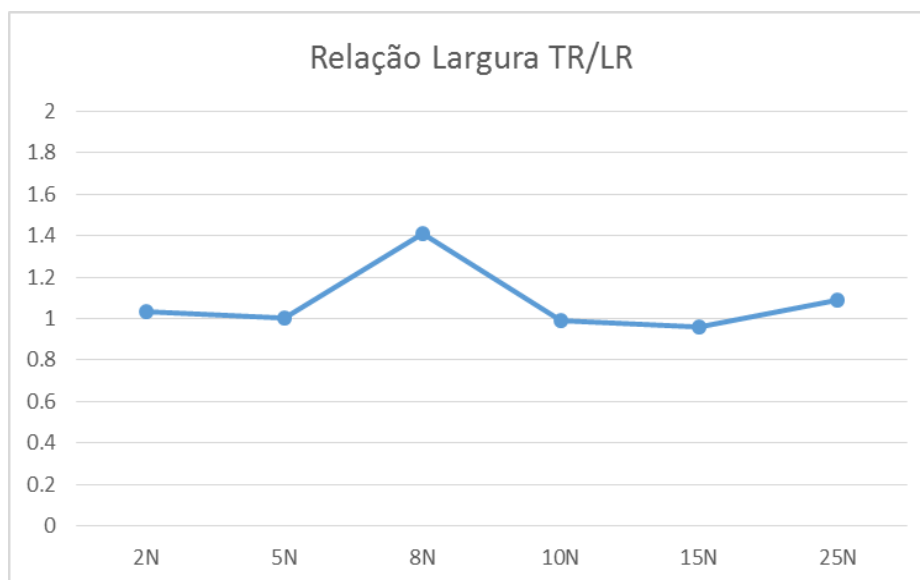


Figura 16: Perfil de rugosidade das amostras TR e LR

Para ambas as amostras foram medidos os valores de largura e de profundidade dos riscos, os valores de largura e profundidade foram apresentados graficamente nas figuras 16 e 18, respectivamente, e foram representados comparativamente nas figuras 17 e 19. A partir dos gráficos, é possível perceber que enquanto a orientação dos ensaios não apresentou grande influência nos resultados de largura dos riscos, com um valor médio do fator LR/TR sendo de 0,94 variação pouco expressiva diante do desvio padrão das medições, ela possuiu uma influência consideravelmente mais expressiva nos valores de profundidade dos riscos, com um fator LR/TR médio de 1,26. Observou-se, entretanto, que para cargas mais baixas, ocorreu o aumento do desgaste na direção TR.

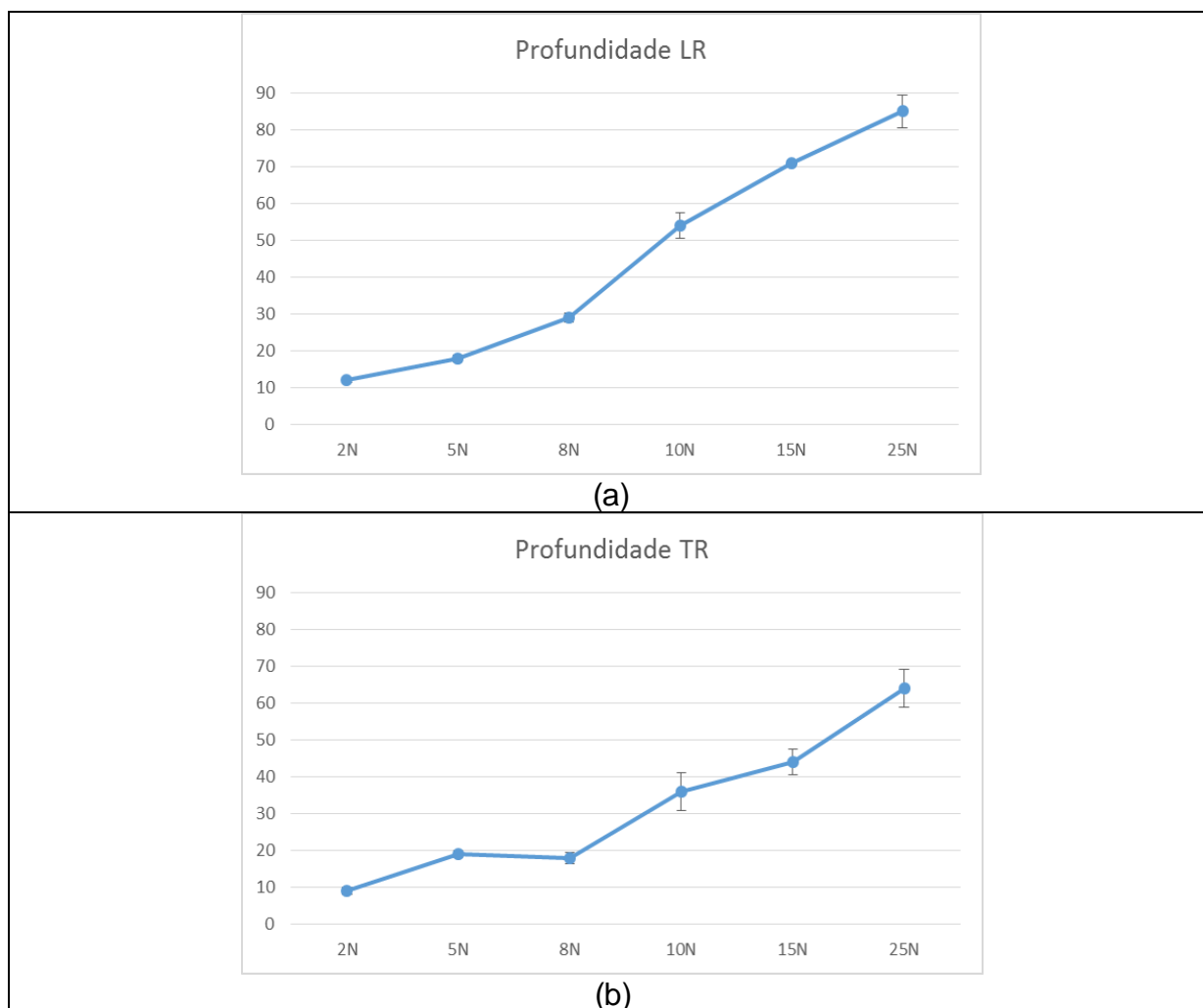


**Figura 17: Variação da largura com relação a carga aplicada nas direções LR (a) e TR (b)**

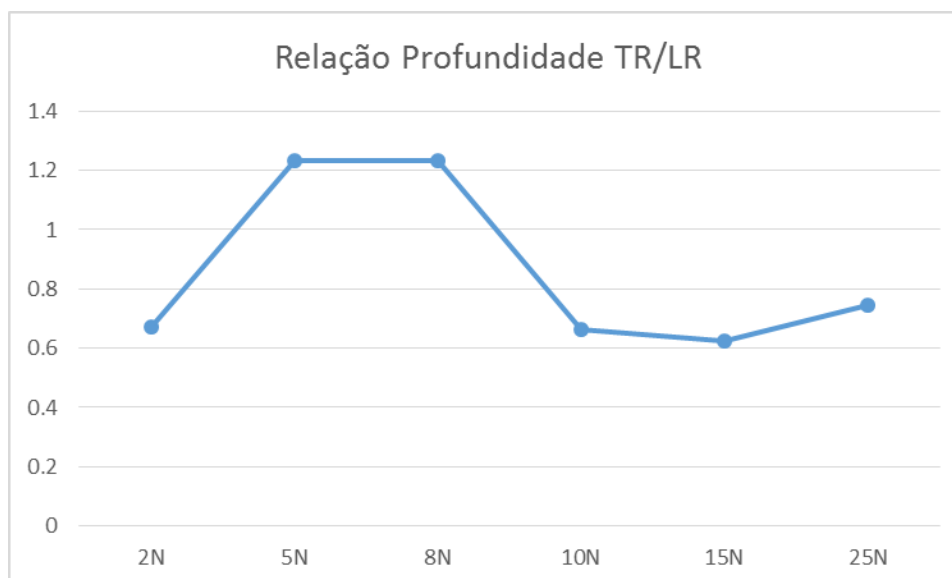


**Figura 18: Comparação da largura dos riscos com relação a carga aplicada nas direções LR e TR**





**Figura 19: Variação da profundidade com relação a carga aplicada nas direções LR e TR**



**Figura 20: Comparação da profundidade dos riscos com relação a carga aplicada nas direções LR e TR**

Os valores de medições de COF ao longo do tempo nos ensaios de riscamento foram colocados em gráficos, apresentados nas figuras 20 e 21. Por meio dos gráficos foi possível verificar que em para todas as diferentes cargas aplicadas, o COF na direção LR se mostrou menor com relação aos valores medidos na direção TR.

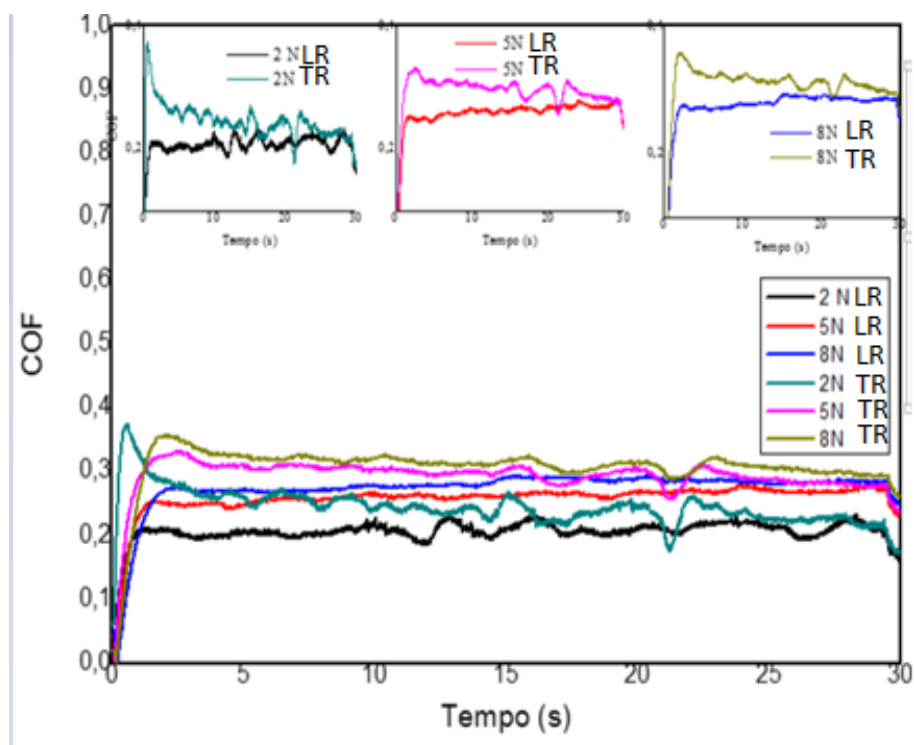


Figura 21: Gráficos de coeficiente de atrito - COF vs tempo de ensaio para 3 níveis de cargas: 2, 5 e 8N.

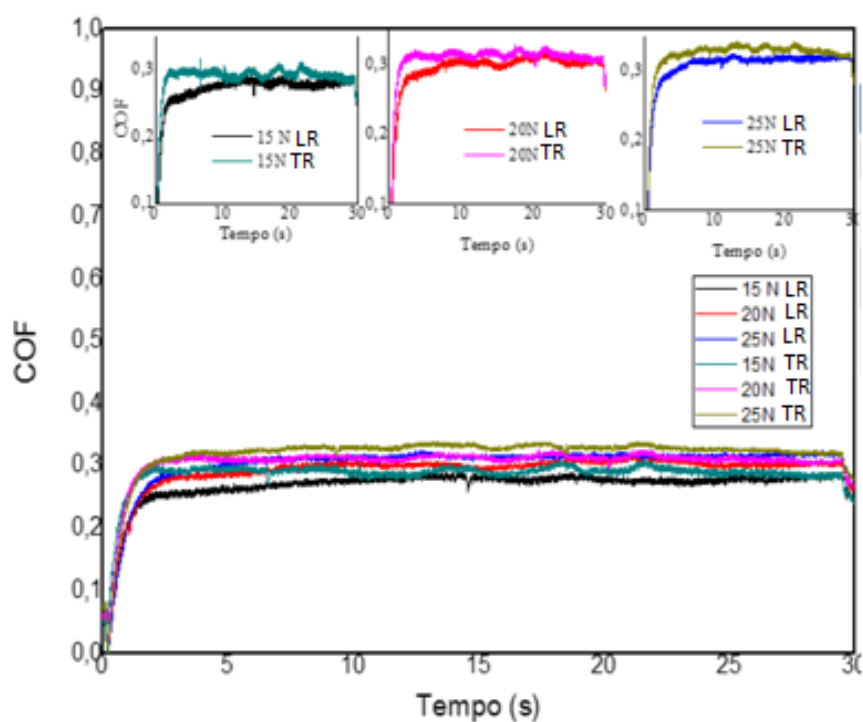


Figura 22: Gráficos de coeficiente de atrito - COF vs tempo de ensaio para 3 níveis de cargas: 15, 20 e 25N.

Entretanto, os valores médios calculados, juntamente com os desvios padrão, apresentados na Tabela 3, levantaram um problema.

**Tabela 3: Valores médios de COF medidos para PTFE**

Carga (N)	COF direção longitudinal	COF direção transversal
2	0,20 ± 0,02	0,24 ± 0,03
5	0,26 ± 0,03	0,29 ± 0,03
8	0,27 ± 0,03	0,30 ± 0,04
15	0,27 ± 0,03	0,28 ± 0,03
20	0,29 ± 0,04	0,30 ± 0,03
25	0,30 ± 0,04	0,32 ± 0,04

A relação previamente observada, não pode ser confirmada por meio dos valores médios devido à magnitude dessa diferença ser muito próxima da do desvio padrão, implicando na necessidade da utilização de técnicas para redução do desvio padrão nas análises futuras, como a análise de trechos mais curtos distantes do princípio e do fim das medições. Entretanto, observou-se mais claramente a partir dos valores médios uma tendência do impacto da direção no COF ser mais alta para baixos valores de carga.

#### 4.2 Resultados do teste de significância 2ª etapa

**Tabela 4: Medianas dos valores de COF medidos para cada corpo de prova.**

	CARGA [N]	CP 1	CP 2	CP 3
HDPE LR	15	0,31	0,35	0,34
	20	0,32	0,37	0,34
	25	0,35	0,37	0,35
	30	0,35	0,38	0,35
HDPE TR	15	0,30	0,32	0,35
	20	0,42	0,35	0,35
	25	0,40	0,35	0,35
	30	0,40	0,38	0,35

PP LR	15	0,39	NA	0,45
	20	0,55	0,39	0,49
	25	0,54	0,38	0,49
	30	0,51	0,42	0,48
PP TR	15	0,42	0,47	0,41
	20	0,45	0,48	0,34
	25	0,47	0,47	0,35
	30	0,50	0,45	0,37
UHMW TR	15	0,31	0,30	0,31
	20	0,31	0,33	NA
	25	0,36	0,31	0,32
	30	0,35	0,33	0,32
UHMW LR	15	0,33	0,30	0,31
	20	0,33	0,32	0,31
	25	0,34	0,33	0,32
	30N	0,30	0,32	0,32

Devido à alta quantidade de resultados incompatíveis, os corpos de prova 2 de PP LR e 3 de PP TR foram desconsideradas nas análises seguintes, partindo da premissa de que elas representam uma condição diferente das demais.

Os valores de COF em cada ponto das medições realizadas dentro dos intervalos considerados, foram então agrupados e analisados como um único grupo de dados para cada condição de ensaio.

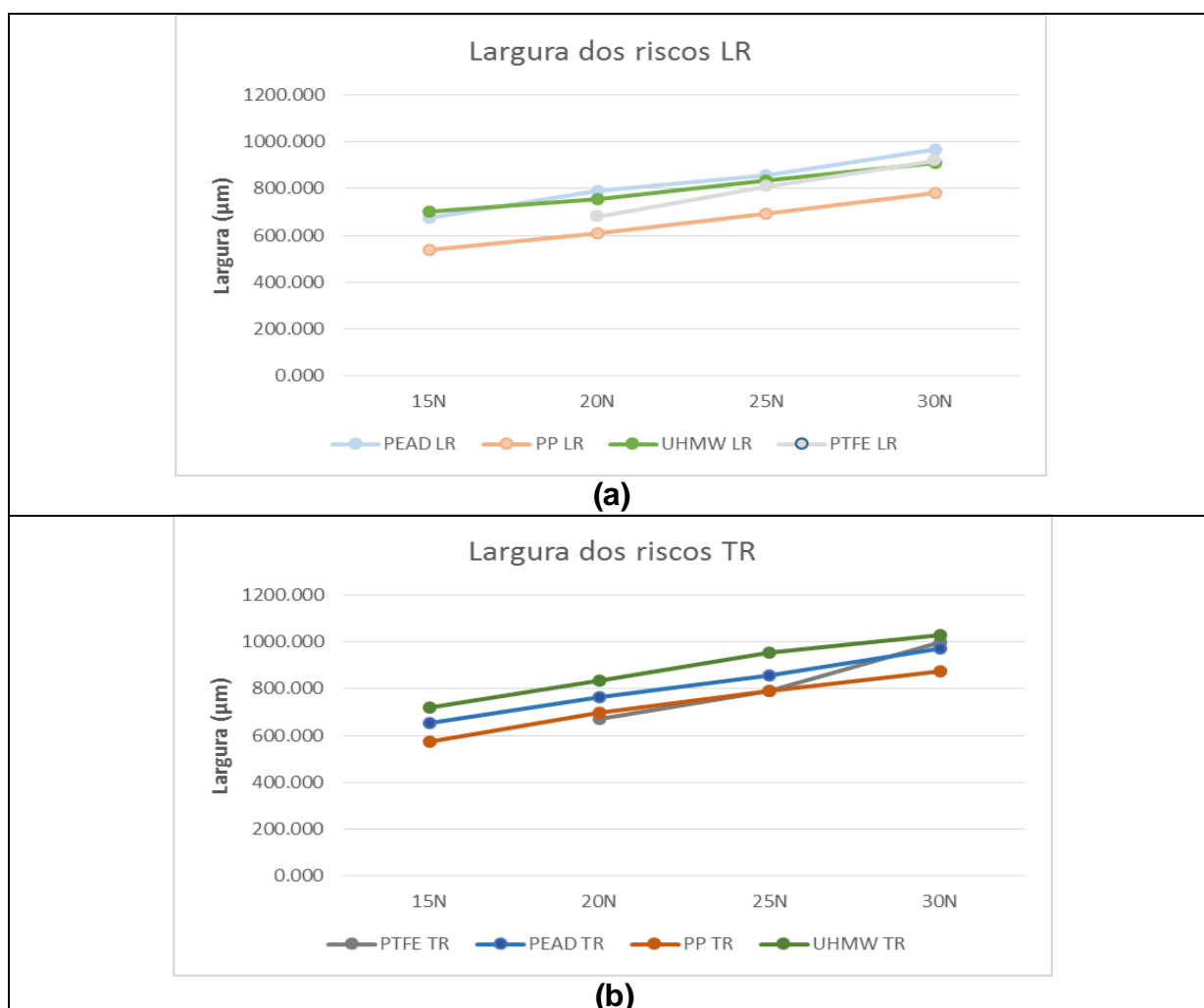
#### 4.3 Resultados finais

Nessa seção são apresentados os resultados finais obtidos para as amostras de outros materiais poliméricos avaliadas com o objetivo de quantificar a influência da orientação das cadeias de macromoléculas no COF em diferentes materiais.

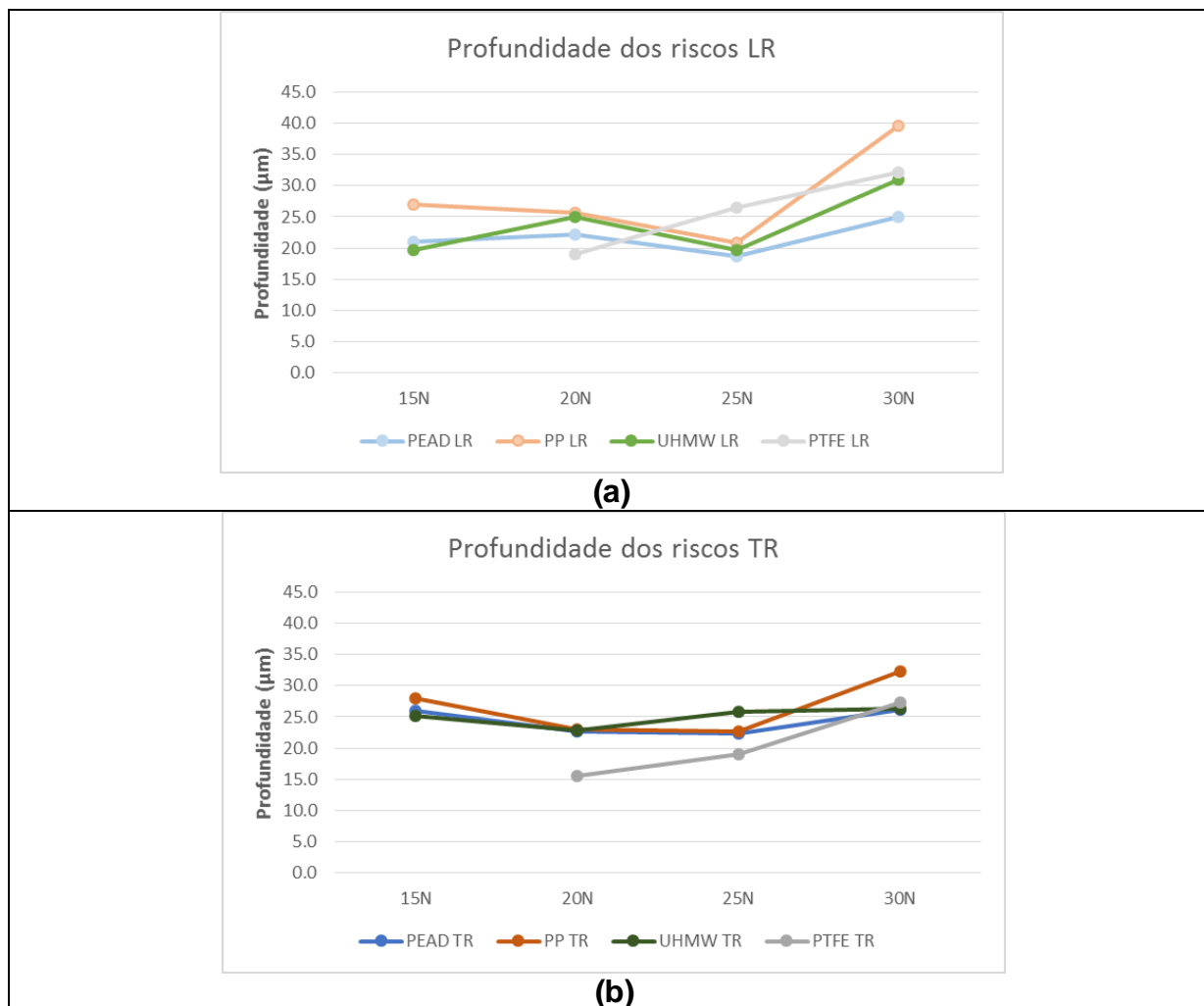
As amostras analisadas foram as de PP, UHMW e PEAD, ensaiadas por riscamento longitudinalmente e transversalmente à direção de extrusão das barras (LR e TR respectivamente).

Para cada uma das amostras foram medidos os valores de largura e de profundidade dos riscos, os valores de largura e profundidade foram apresentados

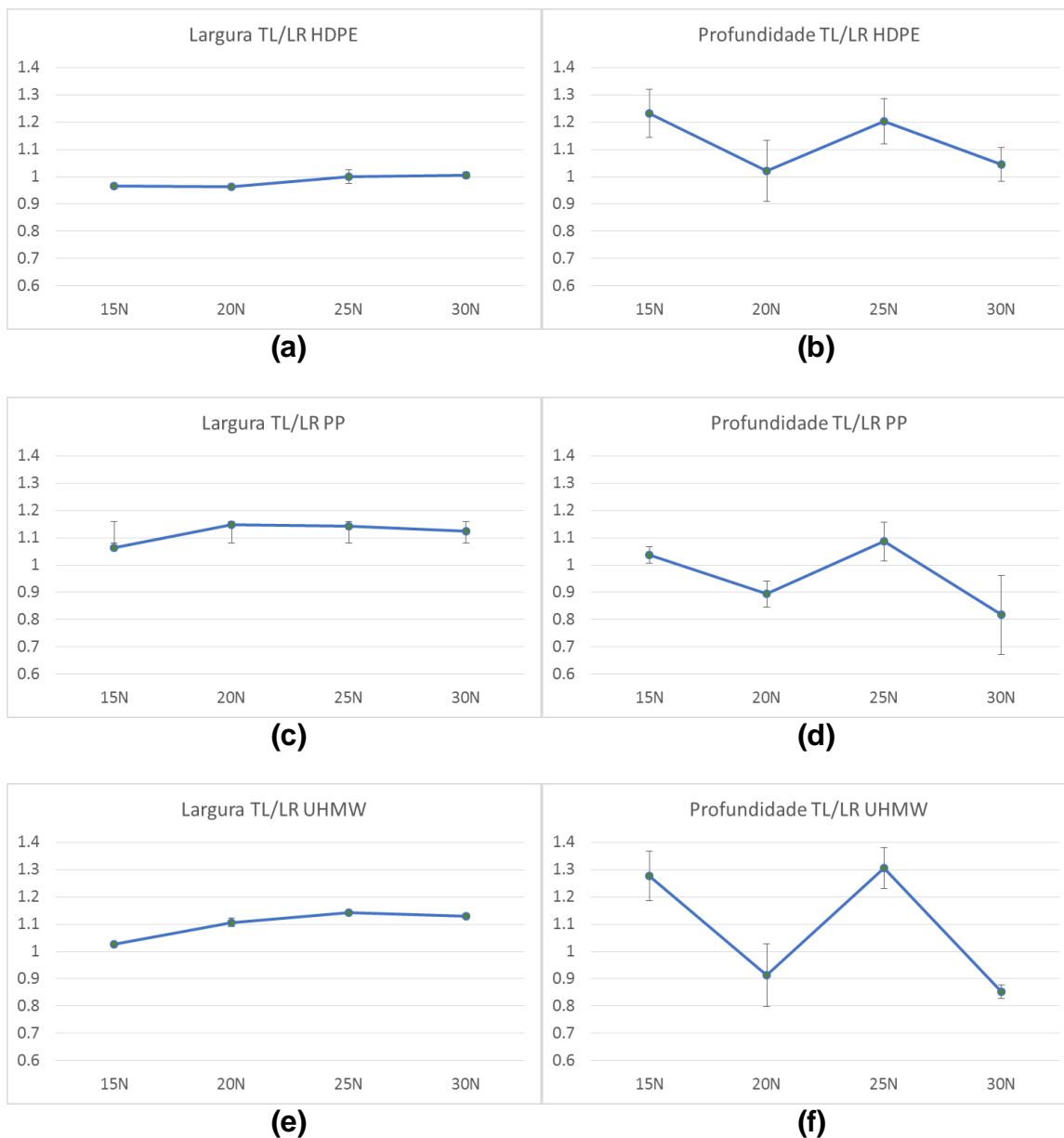
graficamente nas Figura 23 e 23, respectivamente, e foram representados comparativamente nas figuras 24. Os gráficos demonstram que com relação à largura, as variações foram consistentes tanto com relação à carga quanto com relação ao sentido, com cargas maiores reduzindo a largura dos riscos, e a largura dos riscos sendo maior no sentido TR comparado ao sentido LR, enquanto nenhum padrão pode ser observado para os resultados de profundidade dos riscos.



**Figura 23: Variação da largura com relação a carga para os materiais PTFE, PEAD, PP e UHMW nas direções LR (a) e TR (b)**



**Figura 24: Variação da profundidade com relação a carga para os materiais PTFE, PEAD, PP e UHMW nas direções LR (a) e TR (b)**



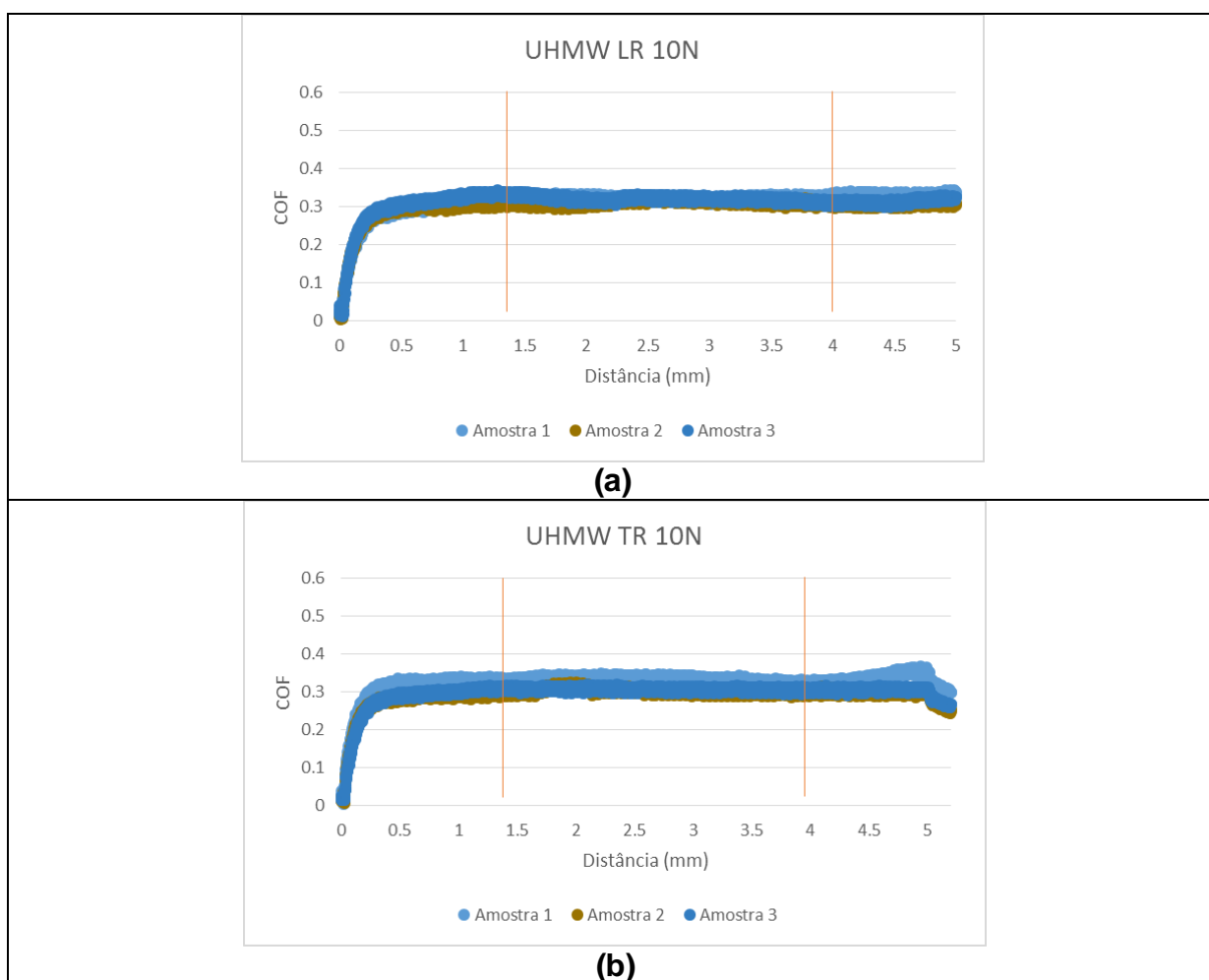
**Figura 25: Comparação da largura e profundidade dos riscos com relação a carga aplicada nas direções LR e TR para HDPE (a) e (b), PP (c) e (d) e UHMW (e) e (f)**

A partir dos gráficos, é possível perceber que enquanto a orientação dos ensaios não apresentou influência perceptível nos valores de largura para o HDPE, mas foi consistentemente maior para os materiais PP e UHMW no sentido TR. Enquanto que com relação à profundidade dos riscos, a influência do sentido oscilou consideravelmente de acordo com a carga, mas foi em média maior nos sentidos TR



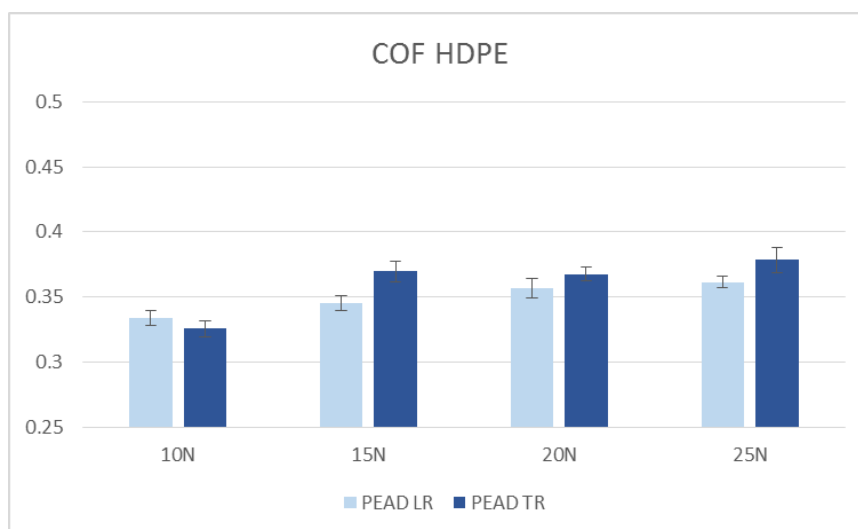
para os materiais HDPE e UHMW, e não apresentou diferença significativa para o PP.

Os valores de medições de COF ao longo do tempo nos ensaios de riscamento foram colocados em gráficos, e após análise dos gráficos, foi decidido restringir como intervalo de análise o período de 5s a 25s, intervalo em que os valores se mantiveram mais consistentes a um regime permanente. Alguns dos gráficos estão demonstrados como exemplo nas figura 26 abaixo.

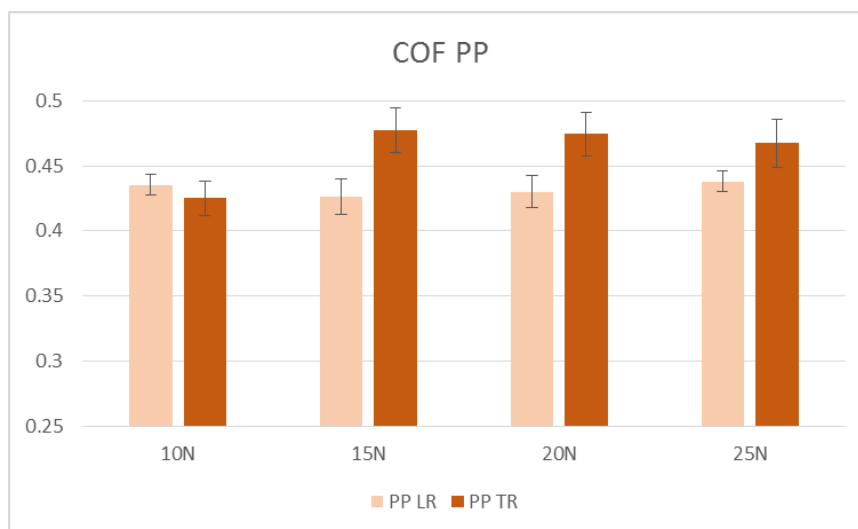


**Figura 26: Gráficos de coeficiente de atrito vs tempo para o UHMW na configuração de carga de 15N nas direções LR (a) e TR (b).**

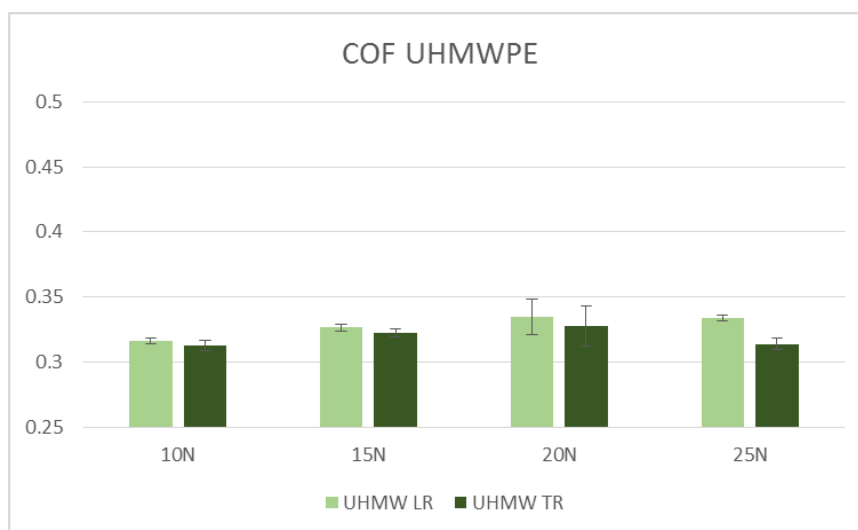
Os valores médios de COF obtidos para cada condição foram então comparados, para cada material, entre as condições LR e TR nas tabelas abaixo:



**Figura 27: Valores médios de COF medidos para HDPE nas condições LR e TR nas diferentes condições de carga**

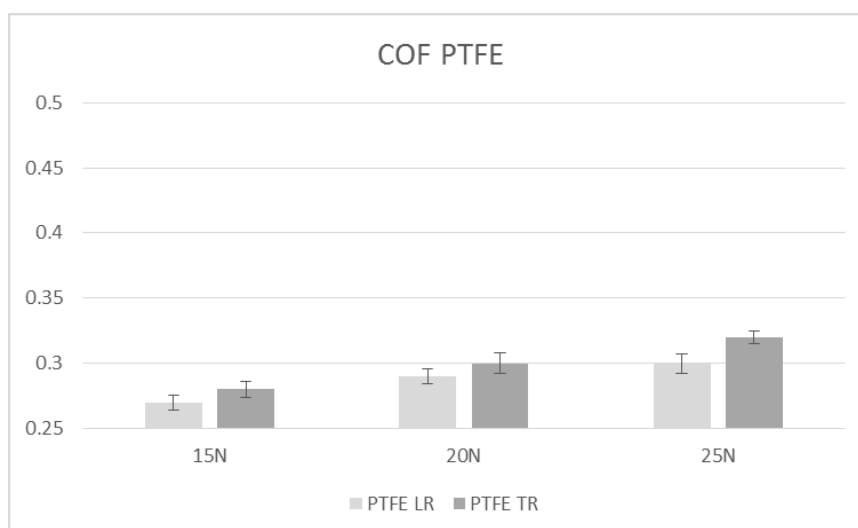


**Figura 28: Valores médios de COF medidos para PP nas condições LR e TR nas diferentes condições de carga**



**Figura 29: Valores médios de COF medidos para UHMW nas condições LR e TR nas diferentes condições de carga**

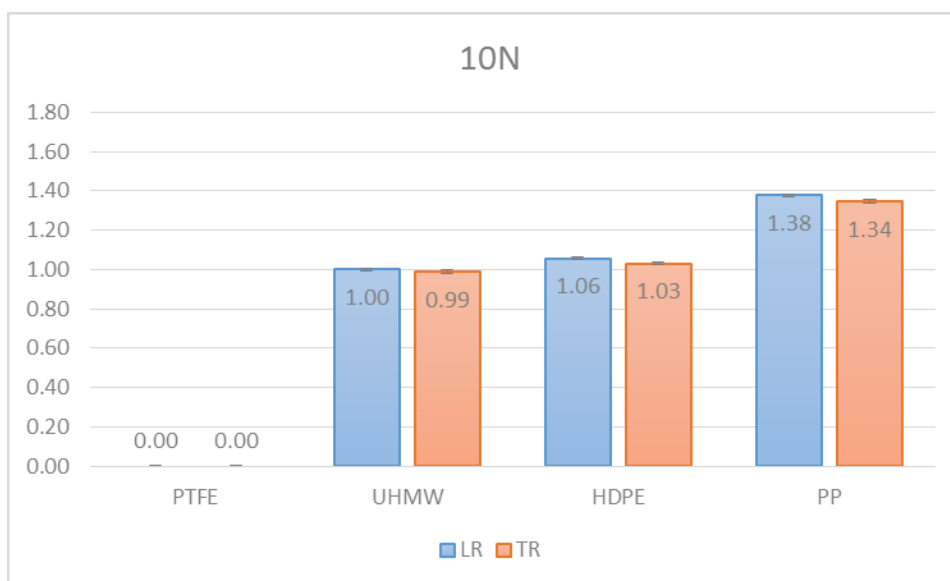
Os dados obtidos previamente para o PTFE foram reavaliados, utilizando os mesmos métodos dos outros materiais e está representado no gráfico abaixo para comparação.



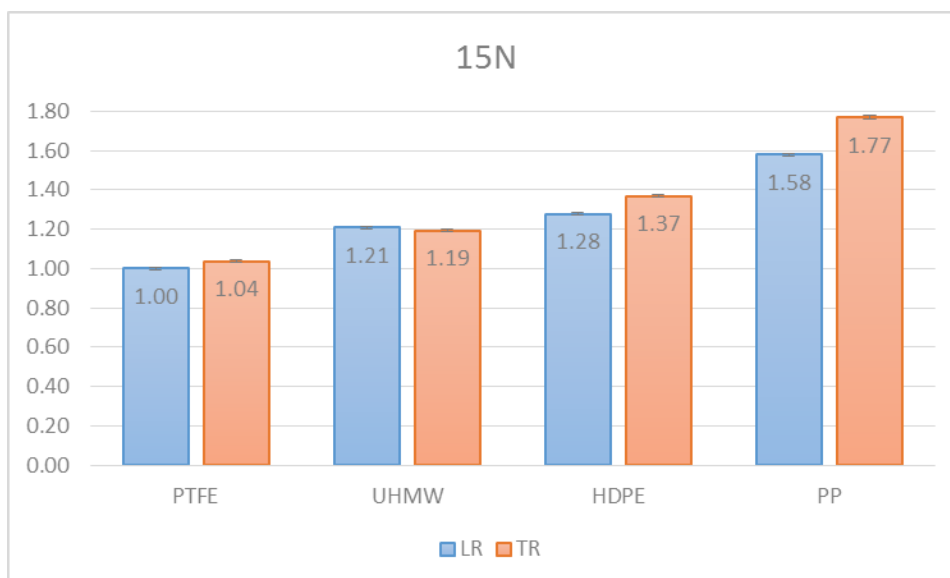
**Figura 30: Valores médios de COF medidos para o PTFE nas condições LR e TR nas diferentes condições de carga conforme analisado na 2ª etapa**

Por meio dos gráficos verificou-se que para os materiais PP e HDPE, a influência da orientação nos valores de COF foi perceptível, para cargas de 15N ou mais, sendo os valores no sentido TR consistentemente mais altos, enquanto as diferenças medidas nas amostras de UHMW foram desprezíveis, mantendo-se dentro dos intervalos de desvio padrão.

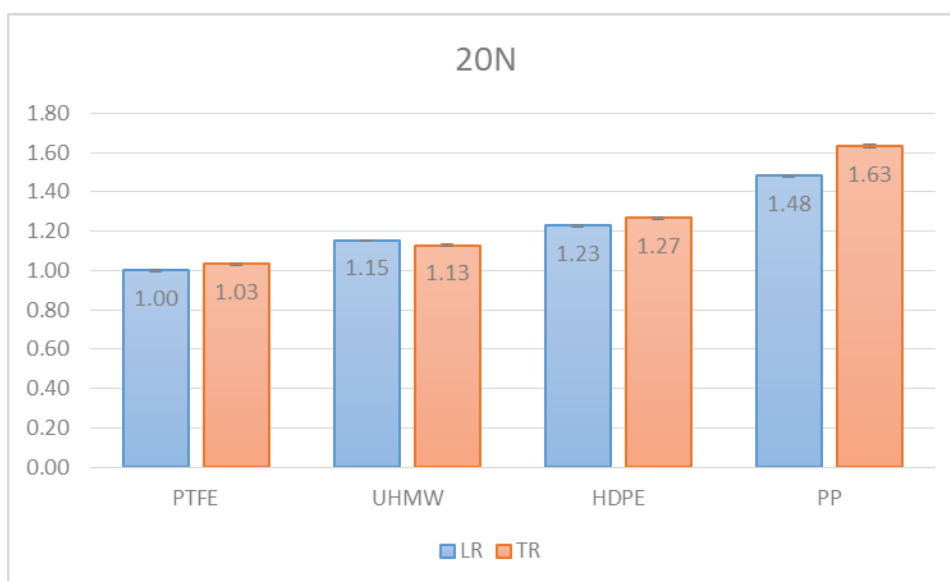
Para obter-se um método visual de comparação entre os valores de COF para os diferentes materiais, foi decidido criar um gráfico para cada condição de carga ensaiada, comparando os valores de média medidos para cada um dos materiais de forma proporcional a uma referência. A referência utilizada o valor de COF medido para o PTFE no sentido LR, por ser consistentemente o menor valor, com a exceção dos valores para a carga de 10N, o UHMW LR foi utilizado como referência, devido ao fato do PTFE não haver sido ensaiado nesta condição.



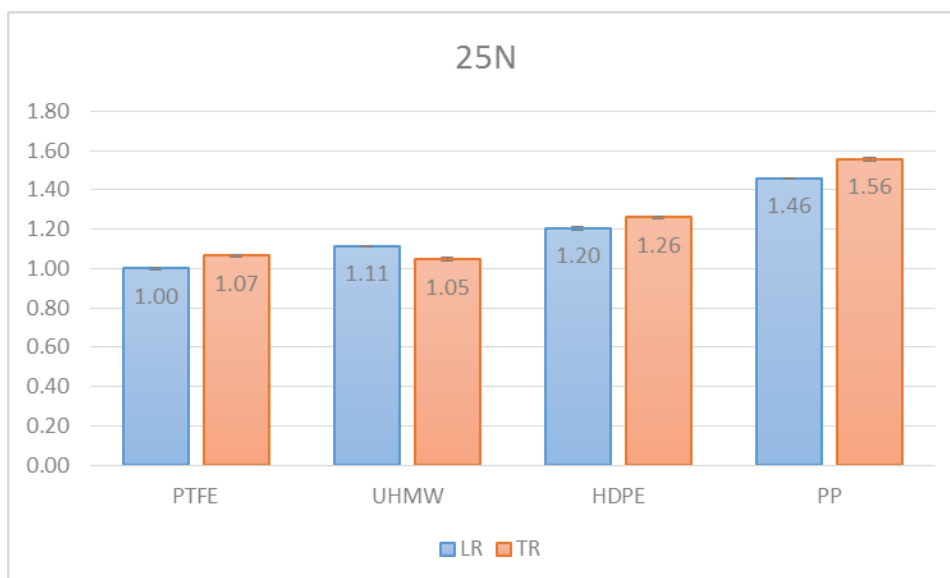
(a)



(b)



(c)



(d)

**Figura 31: Comparação dos valores médios de COF, tomando o COF do PTFE (LR) como referência para carregamentos de (a) 10N (b) 15N (c) 20N e (d) 25N**

Por meio dessa comparação, foi possível perceber que independentemente das condições de carga, os materiais mantiveram uma ordem constante de valores de atrito, com o PTFE tendo os menores valores, seguido pelo UHMW e HDPE e o PP apresentando os maiores valores, entretanto, para cada incremento de carga, a diferença entre os valores foi reduzida, sendo que a diferença máxima parte de um valor de 77% para a carga de 10N, e passa a ser apenas 56% para uma condição de carga de 25N.

## 5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que:

- Com relação ao COF, o UHMW não apresentou nenhuma diferença significativa com relação à orientação dos ensaios, além de um leve decréscimo no valor de COF para a carga de 25N no sentido transversal, os outros materiais, entretanto, todos apresentaram um aumento no COF quando ensaiados na direção transversal, apesar dessa diferença ter sido reduzida conforme houve um aumento da carga.
- Entre os diferentes materiais, o PTFE apresentou os menores valores de COF, seguido pelo UHMWPE, o PEAD, e o PP teve os maiores valores de atrito. A diferença entre estes valores tende a reduzir com o aumento da carga aplicada. Além disso, o PP também apresentou os maiores valores de desgaste, enquanto os outros 3 materiais apresentaram valores similares.
- O desgaste ao longo de todos os materiais aumentou com relação ao aumento da carga aplicada, sendo que enquanto a profundidade dos riscos apresentou aumento apenas para a carga mais elevada, a largura dos riscos aumentou linearmente para todos os materiais.
- Cada material apresentou resultados distintos com relação ao efeito da orientação dos ensaios no desgaste. O HDPE não apresentou nenhuma diferença significativa, e o PP e UHMWPE sofreram ranhuras ligeiramente mais largas no sentido TR. O PTFE foi o único material que apresentou diferença significativa, sofrendo desgaste mais intenso na direção longitudinal, sendo essa influência mais notável com o aumento da carga.

## 6 REFERÊNCIAS

ALMEIDA, A. M.; BRANCIFORTI, M. C.; BRETAS, R. E. S. **Avaliação da orientação molecular de moldados de polipropileno utilizando figuras de pólo obtidas por difração de raios X.** Polímeros vol.17 no.1, 2007.

ASSUMPÇÃO, R. **Projeto preliminar de uma mini injetora/extrusora híbrida de baixo custo para processamento de polímeros com finalidade acadêmica.** Trabalho de conclusão de curso em engenharia mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016.

AYMAN, A.; EL-SHAFEI, Z.; ABDALLAH, ALSHENNAWY; ALY, E; WAHID, W. **Friction and Wear of Polymer Composites Filled by Nano-Particles: A Review.** World Journal of Nano Science and engineering, 2012.

BARBIERI, R. A. **Influência da temperatura de sinterização nas propriedades mecânicas de molas de alumina injetadas em baixa pressão.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de Caxias do Sul, 2011.

BARTENEV, G. M.; LAVRENTEV, V. V. **Friction And Wear Of Polymers.** Amsterdam: Elsevier, 1981.

BITTENCOURT, BERNADETE A. et al . **Cold compression molding of ultra high molecular weight polyethylene. Part 1: influence of the size, distribution and morphology of particles on the green density.** Polímeros, São Carlos , v. 19, n. 3, p.224-230, 2016.

BLACKMAN, B. R. K.; HOULT, T.; PATEL, Y.; STEININGER, H.; WILLIAMS, J.G. **Steady-State Scratch Testing of Polymers.** Polymer Testing Vol. 49 p 38-45, 2016.

BLAU, P. J. **Friction Science and Technology: From Concepts to Applications.** 2nd. ed. New York: CRC Press, 2009.

BELY, V. A.; SAVKIN, V. G. & SVIRIDYONOK, A. I. **Effect of structure on polymer friction.** Wear, Vol. 19, p 11-18, 1971

CALLISTER J. W. D.; RETHWISCH, D. G. **Materials Science and Engineering: An Introduction.** 8. ed. Hoboken,: John Wiley & Sons, 2014.

CANEVAROLO Jr, S. V. **Ciência dos Polímeros.** São Carlos: Artliber, 2006

CARPICK, R. W.; SALMERON, M. **Scratching the surface: Fundamental Investigations of Tribology with Atomic Force Microscopy.** Chem. Rev. 97, 1997



CORREA, C. A.; YAMAKAWA, R. S.; RAZZINO, C. A.; HAGE J. E. **Tenacidade à fratura de blendas PA 6/ABS avaliada através do método EWF (Trabalho Essencial de Fratura) - parte a: avaliação do efeito do compatibilizante.** Polímeros, 17(1), 36-45, 2007

COUTINHO, F. M. B; MELLO, I. L; MARIA, L. C. S; **Polietileno, principais tipos, propriedades e aplicações.** Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 13, nº 1, p. 1-13, 2003.

CRAWFORD, R. J.; THRONE, J. L. **Rotational Molding Technology.** New York: William Andrew Publishing, 2002.

DUPONT. **PTFE Handbook** Disponível em: [http://www.rjchase.com/ptfe\\_handbook.pdf](http://www.rjchase.com/ptfe_handbook.pdf). Acesso em: 04 nov. 2018

GADELMAWLA, E. S.; KOURA, M. M.; MAKSOUD, T. M. A.; ELEWA, I. M.; SOLIMAN, H. H. **Roughness Parameters.** Journal of Materials Processing Technology 123, 2002.

GROOVER, M. P. **Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials Processes and Systems.** 7. ed. Hoboken,: John Wiley & Sons, 2007

HUTCHINGS, I. M. **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials.** Cambridge: Butterworth Heinemann, 1992.

**Handbook of Polyethylene Pipe**, 2nd Ed., Plastics Pipe Institute, Irving, TX, USA (2008).

HARPER, C. A.; PETRIE, E. M. **Plastics Materials And Processes: A Concise Encyclopedia.** New Jersey: John Wiley & Sons, 2003.

INKOOK, J.; BURRIS, D. L. DICKRELL, P. L.; BARRY, P. R. SANTOS, C.; PERRY, S. S. PHILLPOT, S. R.; SINNOTT, S. B. SAWYER, W. G. **Sliding orientation effectis on the tribological properties of polytetrafluoretilene.** Journal of Applied Physics, vol 102, 2019.

INNOVA, **Manual de extrusão**. 2019.

KOJIO, K.; KAJIWARA, T.; YAMAMOTO, S.; FUJIMOTO, A.; FUKADA, K.; NAGANO, C.; MASUDA, S.; CHENG, C. H.; NOZAKI, S; KAMITANI, K.; TAKAHARA, A. **Direct visualization of the molecular orientation and microstructure of glassy transparent polymers after the scratch test based on optical microscopy and X-ray scattering**. Polymer, Volume 181, 2019

LILEY, M.; GOURDON, D.; STAMOU, D.; MESETH, U.; FISCHER, T. M.; LAUTZ, C.; STAHLBERG, H.; VOGEL, H.; BURNHAM, N. A. **Friction Anisotropy and Asymmetry of a Compliant Monolayer Induced by a Small Molecular Tilt**, Science 280, 1998.

MACHADO, M. L. P; **Conformação dos Metais Fundamentos e Aplicações**. Vitória: IFPR, 2009.

MANO, E. B.; MENDES, L. C. **Introdução a Polímeros**. Edgard Blücher, 2004.

MANRICH, Silvio. **Processamento de termoplásticos: rosca única, extrusão e matrizes, injeção e moldes**. São Paulo: Artliber Editora, 2005.

MEYER, C.; BOCKHOLT, H.; HASELRIEDER, W.; KWADE, A. **Characterization of the calendaring process for compaction of electrodes for lithium-ion batteries**, Journal of Materials Processing Technology, Volume 249, 2017

PÁDOA, C. A. F. **Avaliação experimental da influência da rugosidade, dureza e pressão de contato no desempenho da vedação estática metálica de gases**.

Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2018.

PANDA, A.; DYADYURA, K.; VALÍČEK, J.; HARNIČÁROVÁ, M.; ZAJAC, J.; MODRÁK, V.; PANDOVÁ, I.; VRABÉL, P.; NOVÁKOVÁ-MARCINČÍNOVÁ, E.; PAVELEK, Z. **Manufacturing Technology of Composite Materials—Principles of Modification of Polymer Composite Materials Technology Based on Polytetrafluoroethylene**. *Materials* 2017, 10, 377, 2017.

RIETZLER, B.; BECHTOLD, T.; PHAM, T. **Controlled Surface Modification of Polyamide 6.6 Fibres Using CaCl<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O/EtOH**. *Polymers* 2018, 10(2), 207, 2018.

ŞAHİN, Y. **Analysis of abrasive wear behavior of PTFE composite using Taguchi's technique**. *Cogent Engineering*, 2(1), 1000510, 2015.

SANTHARAM, P.; PARENTEAU, P.; CHARRIER, P.; TAVEAU, D.; SAUX, V. L.; MARCO, Y. **Complex fibers orientation distribution evaluation in short glass fiber-reinforced thermoplastic (PA66 GF50)**. *MATEC Web Conf.* 165 22026, 2018.

SANTOS, H. M. M.; VEIGA, F. J. B.; PINA, E. M. S. T. **Obtenção de pellets por extrusão e esferonização farmacêutica. Parte II. Avaliação das características física de pellets**. *Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas* vol. 42, n. 3, jul./set., 2006

SANGEETA, H. JOG, J. P. **Moldagem por compressão a frio do polietileno de ultra alto peso molecular. Parte 1: influência do tamanho, distribuição e morfologia da partícula na densidade a verde**. *Bull. Mater. Sci.*, 23, p.221-226 (2000).

SILVA, A. R. **Avaliação do Desempenho Tribológico de Composições de PTFE em Ensaio Tipo Esfera Disco**. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2017.

NI, B. SINNOT, S. B. **Tribological properties of carbon nanotube bundles predicted from atomistic simulations**. Surface Science, Volume 487, Issues 1-3, 2001.

STACHOVIK, G. W.; BATCHELOR, A. W. **Engineering Tribology**. 3. ed. EUA: Butterworth Heinemann, 2001.

STRABELLI, P. G.; SCIUTI, V. F.; MONTILHA, F. S.; CANTO, L. B.; CANTO, R. B. **Influência de variáveis de sinterização na microestrutura de peças de PTFE moldadas por prensagem isostática**. Polímeros vol.24 no.5, 2014.

TABOR, D; WILLIAMS, W **The Effect Of Orientation Of Friction Of Polytetrafluorethylen**. Wear, Volume 4 Issue 5, 1961

TADMOR, Z.; GOGOS, C. G. **Principles of Polymer Processing**. 2. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2006.

VALE, J. L. **Estudo do Comportamento Tribológico do Politetrafluoretileno em Deslizamento sem Lubrificação Contra Aço Inoxidável** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2014.

VALE, J. L.; SILVA, C. H.; CRUZ, C. M. G. S. **Assessment of tribological behavior and physicochemical properties alterations of polytetrafluorethylene imposed by wear test**. Industrial Lubrication and Tribology, Vol. 69 Issue: 4, pg. 550-558, 2017

WONG, M. H. **The Development of Scratch Test Methodology and Characterization of Surface Damage of Polypropylene.** Thesis (Masters) – Mechanical Engineering, Texas A&M University, College Station, 2003.