

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DE PLÁSTICOS DE ENGENHARIA  
UTILIZANDO UM TRIBÔMETRO

por

George Lucas de Paula Guedes Zanetti

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Dezembro de 2015



Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Escola de Engenharia  
Departamento de Engenharia Mecânica

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DE PLÁSTICOS DE ENGENHARIA  
UTILIZANDO UM TRIBÔMETRO

por

George Lucas de Paula Guedes Zanetti

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Alcy Rodolfo dos Santos Carrara  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. Patric Daniel Neis

Comissão de Avaliação:

Prof. Cintia C. Petry Mazzaferro

Prof. Ney Francisco Ferreira

Prof. Mario Roland Sobczyk Sobrinho

Porto Alegre, 01 de Dezembro de 2015.

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a Sandra, minha mãe, e ao Pedro, meu Tatá, que a minha vida inteira me apoiaram nos meus sonhos, não importando quais fossem. Eles me educaram, me prepararam para a vida e me orientaram. Sempre foram e sempre serão meu alicerce, onde em qualquer momento de dificuldade posso me apoiar e me reerguer novamente. Muito obrigado pela compreensão gigantesca e pelo auxílio nas minhas empreitadas.

Devo agradecer também ao professor Patric Daniel Neis que transmitiu suas experiências para mim na forma de orientação e suporte para que meu trabalho fluísse da melhor maneira possível.

A equipe do LATRIB contribuiu muito na realização desse trabalho. Felipe foi de grande ajuda nos ensaios, auxiliando numa melhor compreensão do equipamento. Jean apoiou na programação e no tratamento de dados dos testes. A eles, obrigado.

Aos ilustres colegas “peões com grife” que auxiliaram em todo o caminho percorrido na faculdade, ajudando de inúmeras formas possíveis com amizade, parceria, troca de experiências e conhecimento técnico. Graças a eles, a trajetória para a realização dessa conquista foi muito mais suave e gratificante.

Por fim, quero agradecer a compreensão da minha namorada Ana Hamerski nesse semestre que foi bem conturbado devido ao encerramento do curso. Ela me auxiliou nesse trabalho emocionalmente, contribuindo como um porto seguro de descanso e desabafo, e tecnicamente, ajudando com dicas de suas experiências de um curso já concluído.

Para melhorar é preciso mudar. Para ser perfeito é preciso mudar frequentemente

*Winston Churchill*

Zanetti, G. L. P. G. **Análise do Comportamento Tribológico de Plásticos de Engenharia Utilizando um Tribômetro**. 2015. 22 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

## RESUMO

Os plásticos estudados neste trabalho são duas poliamidas 6 (PA6) fundidas diferenciadas pelo tipo de aditivo que compõe suas matrizes poliméricas e pela cor verde e preta. A fim de avaliar o comportamento tribológico desses materiais, dois tipos de ensaios foram realizados utilizando um tribômetro com um contracorpo de aço SAE 1020. Um teste visou determinar o limite PV (pressão de contato multiplicada pela velocidade de deslizamento) e o outro analisar a propensão ao surgimento do fenômeno de *stick-slip*. Além disso, micrografias foram realizadas ao final dos ensaios para a caracterização dos mecanismos de desgaste presentes no par tribológico polímero-metal. O polímero verde apresentou um limite PV mais elevado do que o preto, mostrando-se mais resistente à transição do regime de desgaste moderado para o severo. Para o ensaio de *stick-slip*, o polímero preto demonstrou maior propensão ao surgimento do fenômeno do que o verde. A partir das imagens de microscópio, pode-se perceber que o coeficiente de atrito mais baixo do plástico verde se deu em função da formação de filme transferido devido ao mecanismo de adesão.

**PALAVRAS-CHAVE:** Poliamida 6, limite PV, *stick-slip* e tribologia.

Zanetti, G. L. P. G. **Tribological Behavior Analysis of Engineering Plastics Using a Tribometer**. 2015. 22 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

## ABSTRACT

The engineering plastics studied in this paper are two casted polyamides 6 (PA6) differentiated by the additive type that compose its polymeric matrix and by the color green and black. In order to access the tribological behavior of these materials, two kind of tests were carried out using a tribometer with a steel SAE 1020 counterpart. One test aimed to determine the PV limit (contact pressure multiplied by the sliding velocity) and the other to analyze the stick-slip phenomenon propensity. Moreover, microscopic examination was performed on each test end for characterization of the wear mechanism found on the polymer-metal tribological pair. The green polymer turned out to have a higher PV limit than the black, showing that the green is more resistant to a transition from moderate to severe wear regime. For the stick-slip test, the black polymer exhibited greater propensity than the green. Likewise, from the microscope images, it was possible to realize that the smaller green polymer coefficient of friction was due to film transferred formation because of the adhesion mechanism.

**KEYWORDS:** Polyamide 6, PV limit, stick-slip and tribology.

## ÍNDICE

	Pág.
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>1</b>
2.1. Objetivo Geral.....	1
2.2. Objetivos Específicos .....	1
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>1</b>
3.1. Tribologia.....	1
3.2. Polímeros.....	2
3.2.1. Termoplásticos e Termofixos.....	2
3.2.2. Poliamidas .....	2
3.2.3. Aditivos em Polímeros .....	3
3.3. Tribologia de polímeros .....	3
3.3.1. Desgaste em Polímeros .....	4
3.3.2. Efeito da temperatura .....	4
3.3.3. Limite pressão de contato vs. velocidade de deslizamento (PV).....	5
3.4. <i>Stick-slip</i> .....	6
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>7</b>
4.1. Par tribológico.....	7
4.2. Ensaio.....	8
4.2.1. Limite PV .....	8
4.2.2. <i>Stick-slip</i> .....	8
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>8</b>
5.1. Limite PV .....	8
5.2. Mecanismos de Desgaste .....	11
5.3. <i>Stick-slip</i> .....	12
<b>6. CONCLUSÕES .....</b>	<b>13</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>13</b>
<b>APÊNDICE I.....</b>	<b>16</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O intuito das pesquisas tribológicas compreende a redução das perdas resultantes de atrito e desgaste de sistemas nos quais haja superfícies interagindo sob movimento relativo. O conhecimento nessa área proporciona ganhos de eficiência e de desempenho na planta, menos paradas e economias significantes [Bhushan, 2013]. A literatura e os catálogos de muitos fabricantes carecem de informações sobre desgaste de plásticos de engenharia e estudos do fenômeno vibratório de *stick-slip*. Segundo Gerdeen e Rorrer, 2012, o comportamento de desgaste dos polímeros apresenta uma dependência muito forte da relação PV (pressão de contato multiplicada pela velocidade de deslizamento), sendo que cada plástico apresenta um valor de limite PV que influencia no desgaste do material em operação. Usualmente, a determinação do limite PV é realizada a partir de ensaios muito longos (30-300 min) [Bayer, 2004]. Materiais poliméricos vêm substituindo materiais tradicionais em função das suas propriedades únicas, como boa resistência mecânica, baixo peso, habilidade auto-lubrificante, resistência ao desgaste e boa relação custo benefício no processo de fabricação [Song et al., 2015]. Segundo Pogačnik e Kalin, 2012, plásticos são comumente utilizados em diferentes aplicações tribológicas como rolamentos, buchas, rolos de deslizamento guias, engrenagens e rodas dentadas.

Portanto, o presente trabalho visou caracterizar plásticos de engenharia (polímeros com características especiais) de acordo com seus comportamentos tribológicos em um sistema de interação polímero-metal. As análises foram realizadas em dois tipos de poliamidas 6 (PA6) fundidas atritadas a seco contra um disco de aço SAE 1020, utilizando um tribômetro. Para tanto, a fim de analisar parâmetros que afetam a tribologia de polímeros, um novo tipo de ensaio para a identificação do limite PV foi proposto, e testes de propensão ao surgimento de não-linearidades e vibrações (*stick-slip*) foram realizados em ambos os materiais. Por fim, micrografias dos corpos de prova foram analisadas visando compreender os mecanismos de desgaste envolvidos no par tribológico estudado.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1. Objetivo Geral

O objetivo do presente trabalho é analisar e caracterizar plásticos de engenharia utilizando um tribômetro.

### 2.2. Objetivos Específicos

- Efetuar ensaios no tribômetro do Laboratório de Tribologia (LATRIB) da UFRGS;
- Realizar a caracterização do limite PV que os materiais suportam em aplicações de atrito a seco, desenvolvendo uma nova proposta de ensaio, executada em um tempo mais curto comparado aos ensaios usuais.
- Definir uma metodologia e efetuar os respectivos ensaios para avaliar o efeito de *stick-slip* nos materiais estudados;
- Obter imagens microscópicas com o intuito de identificar os mecanismos de desgaste presentes no sistema tribológico polímero-metal.

## 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 3.1. Tribologia

O conceito moderno define a tribologia como “a ciência e tecnologia de interação das superfícies em movimento relativo, e compreende o estudo de fenômenos de atrito, desgaste, erosão e lubrificação” [Hutchings, 1992]. O estudo e a análise dos sistemas tribológicos são complexos em função das inúmeras variáveis presentes no conjunto. Segundo Ludema, 1996, o desgaste e o atrito custam dinheiro, diminuem a produtividade de uma nação, afetam a segurança nacional e a qualidade de vida, além de poderem causar acidentes.

Basicamente, o par tribológico formado por um corpo (material em análise) e um contracorpo (material de contato), forma um sistema tribológico, junto com o meio em que está inserido [Rodrigues, 2007]. A modelagem do atrito e do desgaste apresenta características únicas em cada situação, logo, tribotestes (ensaios tribológicos) tornam-se essenciais para a avaliação, o desenvolvimento e a seleção de materiais aplicados em tribossistemas. De acordo com Vásquez, 2003 e Czichos et al., 1995, o modo como o atrito e o desgaste se comportam resulta do tipo de meio lubrificante, das propriedades do par tribológico, da atmosfera (umidade e temperatura) e das condições operacionais, (força normal aplicada, distância deslizada, velocidade de deslizamento e tempo de deslizamento).

### 3.2. Polímeros

Polímeros são macromoléculas de alto peso molecular formados por longas cadeias de unidades repetidas, os meros [Silva, 2010], e estão presentes em animais e vegetais (principalmente proteínas). Como exemplo podemos citar a seda, o betume, a borracha e a celulose [Crawford, 1998]. Após o desenvolvimento do processo de polimerização, tornou-se possível a fabricação de polímeros sintéticos.

Apesar de haver uma distinção, normalmente as definições de polímeros e plásticos são adotadas como sinônimas. Polímeros são as substâncias puras resultantes da polimerização, porém, esses materiais raramente são utilizados puros em função das suas características. Por essa razão, aditivos são aplicados, e então, o termo plástico é empregado [Crawford, 1998]. Segundo Callister et al., 2007, em algumas aplicações, componentes de madeira e metal são substituídos por plásticos devido ao seu baixo custo de produção e propriedades satisfatórias. Materiais plásticos são classificados em termoplásticos e termofixos.

#### 3.2.1. Termoplásticos e Termofixos

Polímeros termoplásticos como policloreto de polivinila (PVC), poliamida (PA), polipropileno (PP) e polietileno (PE), são substâncias que, quando aquecidas, têm suas forças intermoleculares enfraquecidas, tornando-se flexíveis e moles, devido à presença de longas cadeias de moléculas unidas por ligações de Van der Waals. Em altas temperaturas, os termoplásticos se tornam fluidos viscosos, mas quando resfriados voltam ao estado sólido [Crawford, 1998]. O processo de aquecimento e resfriamento desses materiais é totalmente reversível e pode ser repetido indefinidamente, sendo uma de suas maiores vantagens [Callister et al., 2007].

Polímeros termofixos, como borrachas vulcanizadas, epóxi, resinas fenólicas e de poliéster, apresentam esse nome por formarem uma rede de cadeias moleculares muito rígidas [Vegt, 2008]. A reação química que produz essa substância ocorre em dois estágios: primeiro, há a formação de longas cadeias de moléculas como nos termoplásticos; segundo, ocorre a formação de ligações covalentes cruzadas (*cross-linking*) no processo de moldagem com a ação de pressão e calor. Quando resfriado, uma estrutura em rede reticulada se estabelece dentro do material com ligações muito fortes, as quais não permitem que o material seja amolecido novamente, se tornando frágil [Crawford, 1998]. Polímeros termofixos são geralmente mais fortes e resistentes mecanicamente do que termoplásticos, além de apresentarem melhor estabilidade dimensional [Callister et al., 2007].

#### 3.2.2. Poliamidas

As poliamidas (PA), geralmente conhecidas por nylons, são plásticos de engenharia amplamente utilizados e podem ser de vários tipos como PA-6, PA-6,6, PA-11, PA-4,6 e PA-12 [Crawford, 1998], diferenciados pela estrutura da cadeia molecular e pelo número de átomos de carbono consecutivos na cadeia, representados pelos valores após a abreviação de poliamida (PA) [Vegt, 2008]. Esses materiais são polímeros cristalinos com boa resistência mecânica, à abrasão e a solventes, baixa densidade e coeficiente de atrito e facilidade de processamento [Callister et al., 2007; Chen et al., 2004]. Entretanto, apresentam temperaturas



de fusão baixas e absorvem água muito facilmente, o que deteriora as propriedades mecânicas e a estabilidade dimensional. De acordo com Chen et al., 2004, a boa resistência ao desgaste se deve à habilidade de formar filmes transferidos adesivos quando deslizam contra um contracorpo de metal, conferindo-os baixo coeficiente de atrito.

### 3.2.3. Aditivos em Polímeros

As aplicações de polímeros clássicos são limitadas devido às baixas propriedades mecânicas, térmicas e tribológicas [Unal e Mimaroglu, 2012]. Por isso, reforços e aditivos são aplicados de modo a incrementar o desempenho dos polímeros. Os aditivos podem ser separados por função antiestéticos, agentes de ligação, enchimentos de reforço (*fillers*), lubrificantes, anti-chamas, agentes nucleantes, plastificantes e antioxidantes [Brydson,1999].

Aditivos são incorporados pelos fabricantes e, normalmente, informações disponibilizadas sobre o efeito deles são limitadas. Unal e Mimaroglu, 2012, realizaram um estudo sobre o desempenho da PA-6 e misturas dela com grafite e cera sob várias condições de deslizamento a seco contra um contracorpo de aço inox. Os testes foram realizados utilizando um tribômetro pino sobre disco com uma força constante de 100 N e velocidades de deslizamento de 0,4, 0,8 e 1,6 m/s. Os resultados na Figura 3.1 demonstram que a adição de aditivos como cera e grafite diminuem o coeficiente de atrito da poliamida 6.

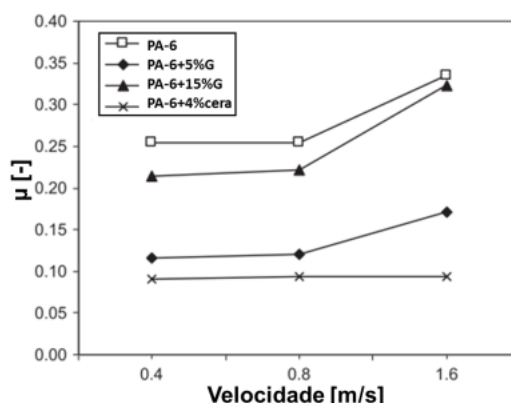


Figura 3.1 – Variação do coeficiente de atrito com a velocidade para PA-6 pura, PA-6+5%Grafite, PA-6+15%Grafite e PA-6+4%cera [Adaptado de Unal e Mimaroglu, 2012].

### 3.3. Tribologia de polímeros

Polímeros de alto desempenho apresentam baixos coeficientes de atritos, normalmente entre 0,015 e 0,6, o que não ocorre para metais e cerâmicos [Vegt, 2008]. Um estudo realizado por Hutchings, 1992, mostrou que plásticos são normalmente utilizados em aplicações tribológicas não lubrificadas, geralmente deslizando contra um contracorpo mais rígido. Como pode ser visto na Figura 3.2, que mostra o coeficiente de atrito para alguns tipos de polímeros, os materiais com menor coeficiente de atrito são o politetrafluoretileno (PTFE), poliacetil (POM) e polietileno de alta densidade (HDPE).

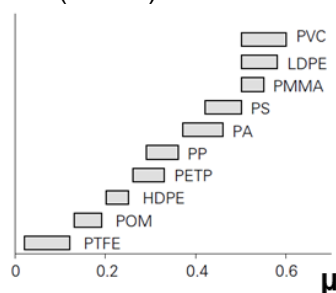


Figura 3.2 – Coeficiente de atrito para alguns polímeros [Vegt, 2008].

Quando o deslizamento ocorre entre materiais poliméricos e contracorpos não poliméricos, as propriedades do corpo tendem a determinar o comportamento do atrito, mas não descarta-se a contribuição das características do contracorpo rígido [Bartenev e Lavrentev, 1981]. Além disso, há importante influência da lubrificação no sistema de atrito: o valor de coeficiente de atrito entre o nylon e um contracorpo de aço é reduzido de 0,47 a 0,19 se lubrificado por água e a 0,08 se lubrificado por óleo [Vegt, 2008].

### 3.3.1. Desgaste em Polímeros

A definição de desgaste pela norma ASTM G 40 (2005) é “dano a uma superfície sólida, geralmente envolvendo progressiva perda de material, devido ao movimento relativo entre esta superfície de contato”. Além disso, pela norma DIN 50320 (1979), os principais fenômenos de desgaste são: adesão, abrasão, fadiga superficial e reação triboquímica. Um estudo realizado por Briscoe, 1981, distinguiu os mecanismos de desgaste de polímeros em dois tipos: desgaste coesivo e interfacial (Figura 3.3).



Figura 3.3 – Duas classes gerais de mecanismos de desgaste [Adaptado: Briscoe, 1981].

Segundo Hutchings, 1992, o desgaste coesivo contempla mecanismos como abrasão e fadiga, ou, mais precisamente, a abrasão resultante da deformação plástica do polímero ou por crescimento de trinca na região deformada (deformação elástica). Por exemplo, a deformação no contato entre elastômeros e contracorpos mais rígidos será elástica devido ao baixo módulo de elasticidade, predominando o mecanismo de fadiga superficial. Por outro lado, Ludema, 1996, demonstrou que polímeros termofixos, normalmente, apresentam deformações plásticas em função do módulo de elasticidade mais elevado, sofrendo desgaste de abrasão em contato com as asperezas do contracorpo.

Já o desgaste interfacial inclui a adesão e a reação triboquímica como mecanismos, os quais ocorrem na região próxima à zona de contato do par tribológico. O desgaste adesivo é o mais importante deles, ocorrendo quando o contracorpo apresenta rugosidade baixa e material é transferido ao contracorpo mais duro, posteriormente, removido como partícula de desgaste [Hutchings, 1992].

### 3.3.2. Efeito da temperatura

Os polímeros são materiais viscoelásticos com baixa temperatura de fusão e condutividade térmica, tornando-os mais propensos à ação da temperatura do que o contracorpo metálico. Há um aumento de temperatura na interface deslizante, pois a maioria da energia gerada é transformada em calor, o que gera transições térmicas na superfície do corpo (polímero ou composto polimérico), como fusão, oxidação ou pirólise [Kar e Bahadur, 1982]. De acordo com Stachowiak e Batchelor, 1996, quando no ensaio tribológico os polímeros fundem, existe alteração no coeficiente de atrito e na taxa de desgaste, classificado como “desgaste por fusão”.

Bekhet, 1999, analisando o comportamento do polipropileno deslizando contra o aço, mostrou que a temperatura gerada no ensaio fundiu a superfície do polímero, o que, segundo ele, facilitou o surgimento do mecanismo de adesão pela transferência de material polimérico para a superfície do aço. A Figura 3.4 mostra como o desgaste de alguns polímeros se

relaciona com a temperatura, ficando evidente que há um aumento do mesmo devido à elevação da temperatura [Vegt, 2008].

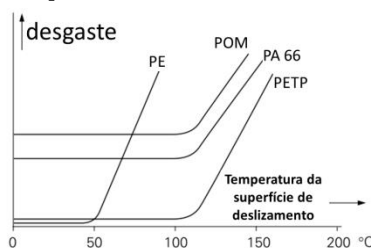


Figura 3.4 – Relação entre abrasão e temperatura para alguns polímeros [Vegt, 2008].

### 3.3.3. Limite pressão de contato vs. velocidade de deslizamento (PV)

O limite PV é um valor crítico no qual o sistema tribológico não desempenha mais a função adequadamente, ou seja, quando ultrapassado, altera do regime de desgaste moderado para o severo (Figura 3.5-a) [Gerdeen e Rorrer, 2012]. O produto entre pressão e velocidade juntamente com o coeficiente de atrito representam a energia de entrada na interface de deslizamento. Se a energia de entrada não é removida a uma taxa suficiente, a temperatura na interface se eleva até ocorrer fusão ou carbonização, gerando desgaste severo [Ludema, 1996]. Este limite é único para cada polímero como ilustra a Figura 3.5-b.

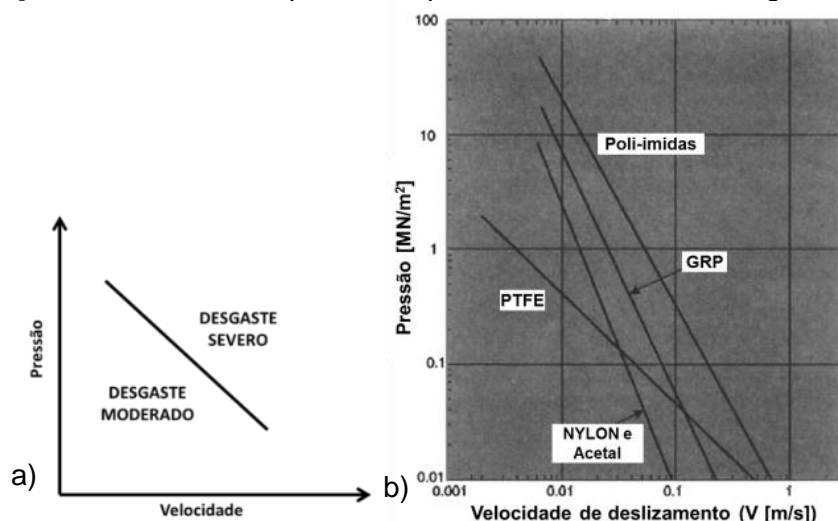


Figura 3.5 – a) Diagrama representativo do limite PV; b) Limite PV típicos para alguns materiais poliméricos [Adaptado de Crawford, 1998].

Samyn e Schoukens, 2008, avaliaram a influência do par PV no atrito em poli-imidas sintetizadas atritadas contra um aço DIN 1.2738 (40CrMnMo846) com rugosidade de  $R_a=0.05\mu$ . Testando forças normais de 50, 100, 150 e 200 N e velocidades de 0,3, 0,6, 0,9 e 1,2 m/s, perceberam que valores acima do limite PV de 1,5 MPa.m/s originaria desgaste severo no corpo polimérico. Segundo Lancaster, 1973, o valor determinado como limite PV do material é quando nem a temperatura ou nem o coeficiente de atrito conseguem estabilizar. Logo, acredita-se que esses valores de pressão e velocidade, multiplicados pelo coeficiente de atrito médio, correspondem à energia máxima que o material é capaz de suportar.

Usualmente, a determinação do limite PV em polímeros contra metais é realizada utilizando um eixo rotativo com uma metade de rolamento ou bucha de material polimérico, a fim de simular o embuchamento de um eixo (Figura 3.6-a) [Gerdeen e Rorrer, 2012].

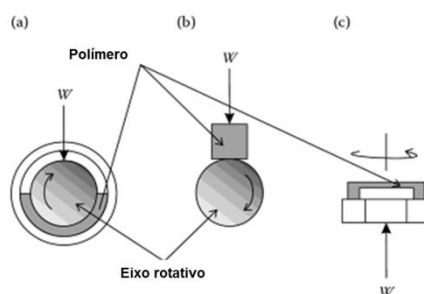


Figura 3.6 – Configurações de ensaios para a determinação do limite PV de polímeros onde  $W$  é a carga normal. (a) Bucha, (b) Bloco e (c) Arruela de pressão [Adaptado de Gerdeen e Rorrer, 2012].

Nesses tipos de ensaios, primeiro uma velocidade constante é imposta, após a força é aumentada durante 30 a 300 min, enquanto a temperatura, o coeficiente de atrito e a taxa de desgaste são monitorados. Se os dados monitorados estão dentro de limites aceitáveis, a força normal é incrementada. Bayer, 2004, descreve os mesmos tipos de ensaios para a caracterização tribológica de polímeros. Ele afirma que os valores de limite PV são determinados quando há um aumento substancial no torque ou na temperatura, ou se a temperatura não estabiliza após 30 min. Um exemplo do comportamento do teste, utilizando a configuração da Figura 3.6-a, pode ser visto na Figura 3.7.

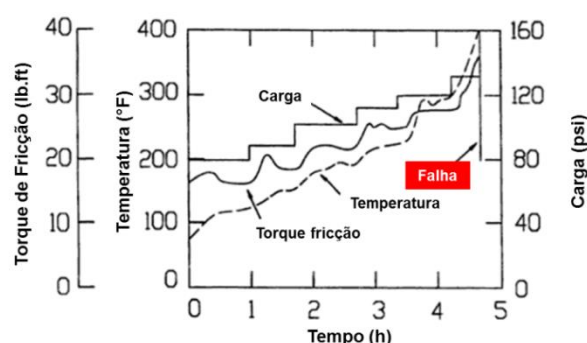


Figura 3.7 – Diagrama de incremento de carga usado para a determinação do limite PV de um polímero utilizando o aparato da Figura 3.6 (a) [Adaptado de Bayer, 2004].

### 3.4. *Stick-slip*

Nenhum sistema mecânico de deslizamento funciona perfeitamente suave. Eles vibram, como pode ser visto nas medições do coeficiente de atrito. Algumas vibrações têm amplitudes ou frequências que incomodam as pessoas, como freios, embreagens, tênis de esporte em pisos polidos, mancais de rolamentos e deslizamento, etc. Vibrações devido ao atrito em máquinas resultam da dinâmica do sistema mecânico que atua no par tribológico e das propriedades de atrito dos materiais em contato. Quando extremas, podem danificar a máquina ou produzir peças não conformes em uma linha de produção [Ludema, 1996].

O *stick-slip* é um fenômeno não-linear induzido pelo atrito, normalmente observado em baixas velocidades. Ele representa um tipo de vibração indesejável em movimentos de precisão e operações silenciosas. Fisicamente, a causa mais aceita pela literatura para a ocorrência do *stick-slip* é quando o coeficiente de atrito estático excede o coeficiente de atrito cinético. Durante o estado de “*stick*”, não há movimento relativo entre as duas superfícies em contato, já no “*slip*”, o valor da velocidade relativa aumenta de zero até o máximo, decrescendo a zero para o início do “*stick*” [Zhang e Li, 2003; Bowden e Tabor, 1986; Gao et al., 1993].

Neis et al., 2015, avaliando o melhor parâmetro para caracterizar a propensão de um ruído indesejável em pastilhas de freio automotivo, denominado *creep-groan*, causado pelo *stick-slip*, ensaiou em um tribômetro três tipos de materiais: um semi-metálico e dois NAO (*non-asbestos organic*). Através de revisão da literatura e uma análise estatística utilizando o

coeficiente de correlação de Pearson ( $\rho$ ), o parâmetro potência de slip ( $P_{slip}$ ), calculado pela Equação 3.1, foi definido como o melhor parâmetro para caracterizar e quantificar o *stick-slip*.

$$P_{slip} [Nm/s] = \Delta T / \Delta t_{slip} = (T_e - T_c) / (t_c - t_e) \quad (3.1)$$

Onde  $T$  é o torque [Nm],  $t$  é tempo de slip [s] e os subscritos  $e$  e  $c$  representam estático e cinético, respectivamente. A Figura 3.8 ilustra uma curva típica de um ensaio de *stick-slip*.

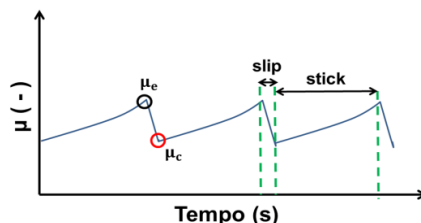


Figura 3.8 – Dados de saída de um ensaio tribológico para a avaliação de *stick-slip*.

#### 4. MATERIAIS E MÉTODOS

A análise do comportamento tribológico dos plásticos de engenharia foi realizada através de ensaios de limite PV e de *stick-slip* (fenômeno caracterizado por sucessivas alternâncias de aderência e deslizamento no contato entre dois corpos). Além disso, imagens de microscópio foram obtidas a fim de caracterizar os mecanismos de desgastes envolvidos no par tribológico polímero-metal. Os testes foram executados utilizando o equipamento conhecido como tribômetro (Figura 4.1) [Neis, 2012].

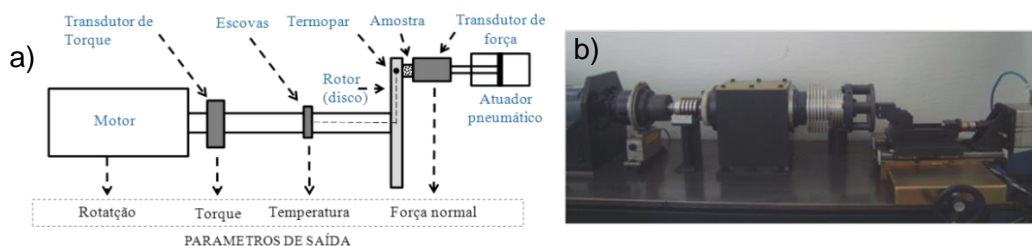


Figura 4.1 – Tribômetro do LATRIB (a) Foto; (b) Esquema [Adaptado: Neis et al., 2015].

Nesse equipamento, a força normal provém de um atuador pneumático no qual o corpo de prova está inserido. A temperatura é adquirida por um termopar tipo K posicionados no meio da espessura do disco rotativo (6 mm da superfície). O coeficiente de atrito ( $\mu$ ) é calculado a partir do torque, do raio e da força normal. A repetibilidade das medidas de atrito realizadas por essa máquina é de  $\pm 0,013$  [Neis, 2012].

##### 4.1. Par tribológico

O disco no qual as amostras foram atritadas consiste em um aço SAE 1020. Antes do início dos ensaios (limite PV e *stick-slip*), o disco foi lixado com lixas de diferentes granulações para limpar e deixar a superfície com rugosidade radial inferior a  $R_a = 0,2 \mu m$ . As lixas foram utilizadas na ordem de granulometria de 280, 360, 400, 500, 600 e 1500.

Também foi efetuado um assentamento (durante 5 min a 200 RPM e 150 N de força) antes de cada ensaio, com o propósito de eliminar as marcas de usinagem e camadas subsuperficiais afetadas pela fabricação [Chen, et al., 2003].

Os materiais testados são polímeros poliamida 6 fundida (PA6) verde e preto, diferenciados pelo tipo de aditivo apresentado na mistura: PA6 verde (PA6\_V), contém um lubrificante sólido não especificado pelo fabricante; PA6 preto (PA6\_P) contém o bissulfeto de molibdênio ( $MoS_2$ ).

Quatro corpos de prova de cada material foram usinados a partir de barras fundidas seguindo um padrão dimensional conforme a Figura 4.2. Os materiais para ensaio possuem

diâmetro de 18 mm e foram posicionados no tribômetro com as linhas de usinagem perpendiculares à velocidade tangencial de deslizamento do disco, a uma distância radial de 40 mm do centro do contracorpo.

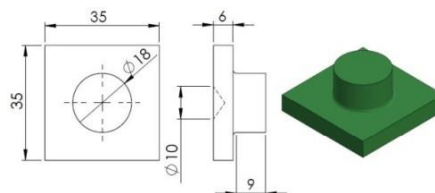


Figura 4.2 – Desenho base para a usinagem dos corpos de prova utilizados nos ensaios.

## 4.2. Ensaios

Segundo Ludema, 1996, o acabamento superficial dos polímeros apresenta pouco ou quase nenhum efeito sobre a taxa de desgaste no regime permanente de atrito, pois os desgastes preenchem as ranhuras superficiais dos materiais atritados. Além disso, um estudo realizado por Erdemir, et al., 1990, determinou que uma duração de ensaio de 2 min é suficiente para que um sistema tribológico entre no regime permanente. Logo, todos os ensaios executados tiveram tempos de duração iguais ou superiores a 2 min, com a intenção de garantir o regime permanente. Após os testes, os softwares MS Excel® e Mathworks MATLAB® foram utilizados no processamento e tratamento de dados.

### 4.2.1. Limite PV

A metodologia desenvolvida consiste em ensaiar durante 180 s cada corpo de prova a forças constantes, partindo de uma rotação inicial pré-ajustada. Incrementos de rotação ( $n$ ) de 25 RPM foram efetuados até que a ocorrência de um aumento considerável do atrito (e torque, conseqüentemente) fosse verificada, caracterizando o limite PV do material. A Tabela 4.1 mostra os parâmetros iniciais utilizados para cada corpo de prova. V1, V3 e V4 dizem respeito aos corpos de prova do PA6\_V de numeração 1, 3 e 4, respectivamente. O mesmo vale para P1, P3 e P4, que são, respectivamente, os corpos de prova 1, 3 e 4 do PA6\_P. Os corpos de prova V2 e P2 foram utilizados nos ensaios de *stick-slip*.

Tabela 4.1 – Forças normais ( $F_N$ ) e rotações iniciais ( $n_0$ ) para cada corpo de prova (CP).

CP	$F_N$ [N]	$n_0$ [RPM]	CP	$F_N$ [N]	$n_0$ [RPM]
V1	300	300	P1	200	200
V3	500	200	P3	300	50
V4	600	150	P4	400	25

Ao final da detecção do limite PV do material, todas as amostras foram analisadas em um microscópio óptico de bancada da marca Zeiss (modelo Axio Lab.A1).

### 4.2.2. *Stick-slip*

Nos corpos de prova V2 e P2 foram realizadas 5 condições de ensaio de *stick-slip* contemplando forças de 600 a 200 N com decrementos de 100 N. Todos os testes ocorreram a uma rotação de 1 RPM, durante um tempo de 120 s e uma taxa de aquisição de 200 Hz. A fim de obter dados para identificar as alternâncias entre aderência e deslizamento do fenômeno de vibração *stick-slip*, um encoder (resolução: 5000 pontos/revolução) foi posicionado no disco do tribômetro.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Limite PV

A Figura 5.1 ilustra a detecção do limite PV para o corpo de prova V3 em 3 ensaios com rotações de 200, 250 e 300 RPM, todos com uma força normal de 500 N.

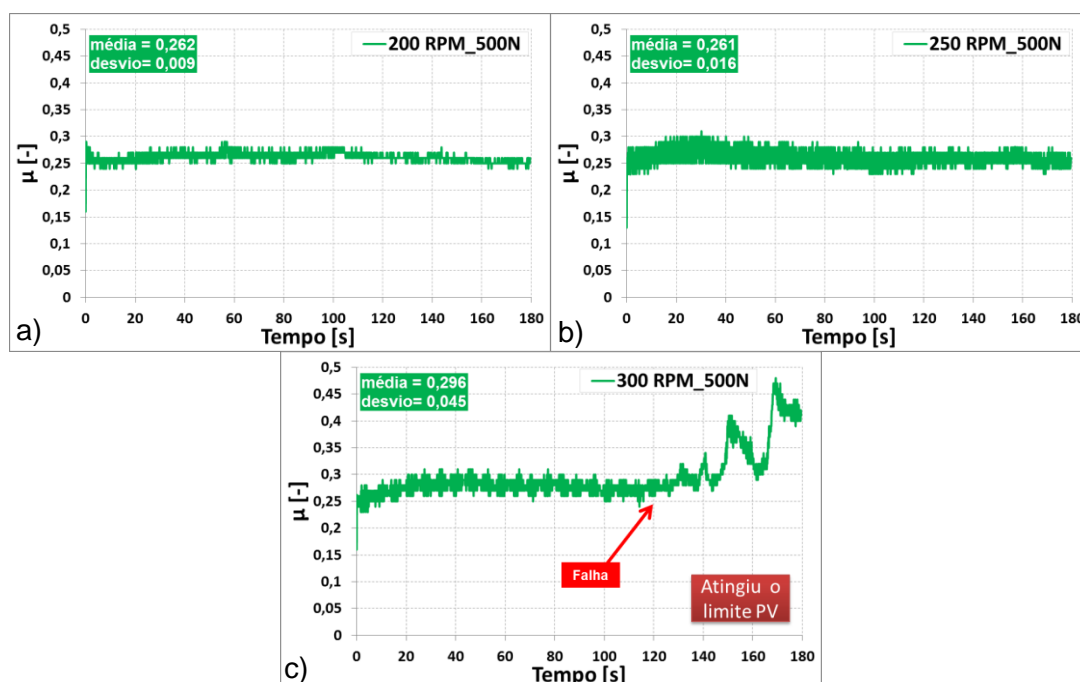


Figura 5.1 – Demonstrativo do critério de definição do limite PV para a amostra V3 do material PA6\_V a uma carga normal de 500 N e rotações de a) 200 RPM; b) 250 RPM; c) 300 RPM.

Analisando os gráficos do material verde (Figura 5.1) e do preto (Apêndice I – Figura I.1), é possível perceber a estabilidade do coeficiente de atrito com os incrementos de rotação, até que ocorra a falha ao atingir o limite PV do material. A Figura 5.2 ilustra as curvas PV para os termoplásticos estudados e os valores de limite PV obtidos estão listados na Tabela 5.1, bem como a média dos valores ( $\overline{PV}$ ) e o desvio padrão ( $s_{PV}$ ). Para o cálculo da constante PV, foi utilizado o valor de 254 mm<sup>2</sup> como área de contato do corpo de prova no disco e o diâmetro de 40 mm como raio para conversão da rotação em velocidade tangencial.

Tabela 5.1 – Valores de limite PV encontrados para os materiais PA6\_V e PA6\_P, média das constantes PV ( $\overline{PV}$ ) e desvio padrão ( $s_{PV}$ ).

VERDE						PRETO					
CP	n [RPM]	F <sub>N</sub> [N]	P [MPa]	V [m/s]	PV [MPa.m/s]	CP	n [RPM]	F <sub>N</sub> [N]	P [MPa]	V [m/s]	PV [MPa.m/s]
V1	600	300	1,181	2,5133	2,968	P1	250	200	0,787	1,0472	0,825
V3	300	500	1,969	1,2566	2,474	P3	175	300	1,181	0,7330	0,866
V4	275	600	2,362	1,1519	2,721	P4	125	400	1,575	0,5236	0,825
					$\overline{PV}$						$\overline{PV}$
					$s_{PV}$						$s_{PV}$
					2,721						0,838
					0,202						0,019

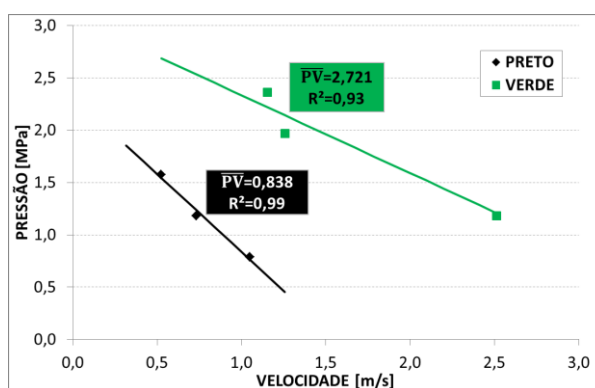


Figura 5.2 – Relação PV para os materiais termoplásticos analisados (PA6\_V e PA6\_P).



Através da Figura 5.2, percebe-se que o material PA6\_V apresenta um limite PV maior que o PA6\_P, concluindo-se que o primeiro tem uma melhor resistência ao desgaste, por exemplo, em uma aplicação de mancal de deslizamento com um contracorpo de metal. A Figura 5.3 mostra um comparativo entre os valores de limite PV dos polímeros analisados e plásticos encontrados na literatura [ASM International, 2003; Matweb, 2015], permitindo concluir que os aditivos nos plásticos de engenharia estudados aumentaram o limite PV da PA6 fundida.

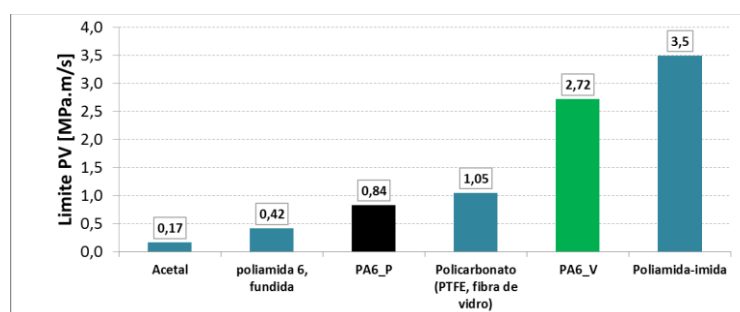


Figura 5.3 – Limites PV para vários polímeros comparando com PA6\_V e PA6\_P.

A Figura 5.4 mostra as imagens dos corpos de prova após atingirem o limite PV. O PA6\_V apresentou falhas localizadas em regiões bem similares (mesma distância radial do centro do disco) enquanto no PA6\_P as falhas ocorreram em posições diferentes em cada amostra. Note que a amostra P1 apresentou a falha do material concentrada na região coesiva.



Figura 5.4 – Corpos de prova dos plásticos de engenharia estudados após terem alcançado o limite PV do material. A seta “V” indica a direção de deslizamento do disco.

Na Tabela 5.2, percebe-se que o coeficiente de atrito do PA6\_V é menor do que a do PA6\_P. O valor PV, quando alcançado, refere-se a uma transição na qual o material apresentará falha prematura em operação [Fisher, 2005]. Por isso, foi realizada a avaliação da reversibilidade do material após a falha por PV.

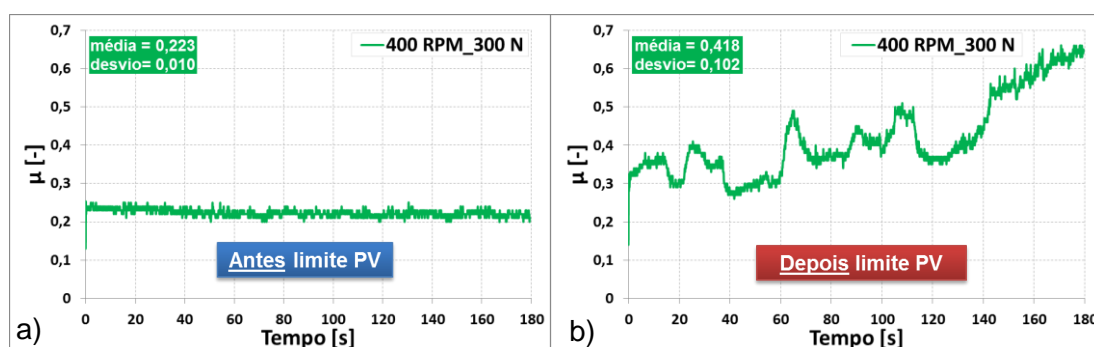
Tabela 5.2 – Coeficientes de atrito médios ( $\bar{\mu}$ ) e desvios padrões ( $s_{\mu}$ ) para os ensaios em regime de desgaste moderado (antes do limite PV ocorrer) nos corpos de prova poliméricos em análise.

	$F_N$ [N]	$\bar{\mu}$	$s_{\mu}$		$F_N$ [N]	$\bar{\mu}$	$s_{\mu}$
V1	300	0,253	0,020	P1	200	0,403	0,026
V3	500	0,262	0,012	P3	300	0,467	0,025
V4	600	0,241	0,014	P4	400	0,443	0,023
<b>média</b>		<b>0,252</b>	<b>0,015</b>	<b>média</b>		<b>0,438</b>	<b>0,025</b>

A amostra V1 falhou por limite PV a uma rotação de 600 RPM e força de 300 N. A Figura 5.5-a ilustra o comportamento do atrito do corpo de prova V1 antes de ter atingido o limite PV em uma condição de teste considerada de desgaste moderado ( $n=400$  RPM e  $F_N=300$  N). Observou-se que o dano causado ao alcançar esse limite é irreversível, pois a



Figura 5.5-b ilustra o caráter caótico do coeficiente de atrito do material após ele ter falhado por limite PV.



## 5.2. Mecanismos de Desgaste

A Figura 5.6 mostra micrografias das amostras V1 e V4 após atingirem o limite PV, alcançado por V1 com  $F_N=300$  N e  $n=600$  RPM, e por V4 com  $F_N=600$  N e  $n=275$  RPM.

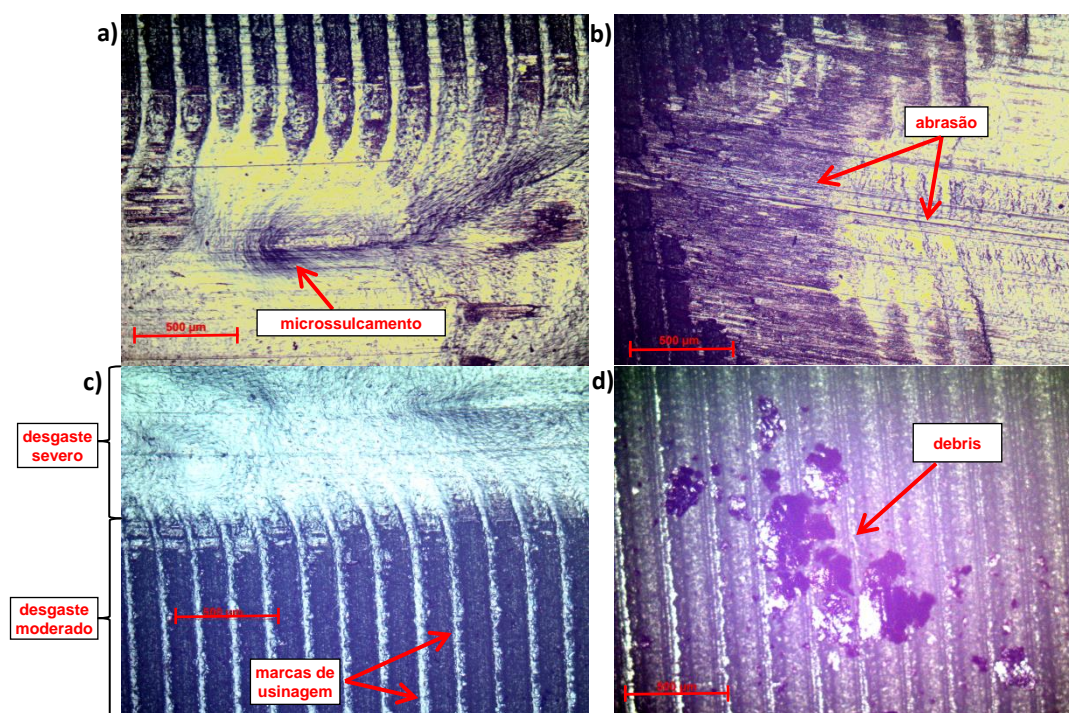


Figura 5.6 – Micrografias (objetiva de 5x) das amostras V1 (a, b e c) e V4 (d). Direção de deslizamento da direita para a esquerda.

Segundo Zum-Ghar, 1987, o mecanismo de desgaste de microsulcamento ocorre quando a passagem de uma partícula abrasiva não provoca a remoção do material da superfície do corpo desgastado. Entretanto, a ação de várias partículas abrasivas em conjunto, deslocando o material das bordas de uma ranhura de um lado para o outro por inúmeras vezes, provoca o destacamento do material por fadiga de baixo ciclo. Portanto, na região da Figura 5.6-a, além de haver uma aparente fusão do material ao atingir o limite PV (desgaste por fusão), também ocorreu um microsulcamento, além do mecanismo de desgaste adesivo (arrancamento de material pela superfície do disco). De acordo com Stachowiak e Batchelor, 1996, o desgaste adesivo tem como fator característico a formação de filme transferido de uma superfície para a outra, sendo após liberado como partícula de desgaste (debris) (Figura 5.6-d).

Na Figura 5.6-b percebe-se a presença do mecanismo de abrasão, caracterizado pelos riscos paralelos à direção de deslizamento. Além disso, é notável a região de transição entre o local onde a deformação plástica ocorreu e o local onde o desgaste ainda é moderado (Figura 5.6-c).

Na Figura 5.7 é possível analisar as superfícies de desgaste de P1. As amostras de PA6\_P apresentaram abrasão (Figura 5.7-a), microsulcamentos e desgaste por fusão (ambos não mostrados na figura), assim como o PA6\_V. Entretanto, no polímero preto ocorreu um amolecimento do material ocasionado uma deformação plástica, o que pode ser constatado pela curvatura das linhas de usinagem e pela aparência de fusão na Figura 5.7-b. Além disso, constatou-se pouco ou nenhum efeito de adesão no PA6\_P, não havendo formação de filme e de debris. Tal fato pode justificar o maior atrito encontrado pelo preto, pois a maior presença de filme tende a reduzir o coeficiente de atrito.

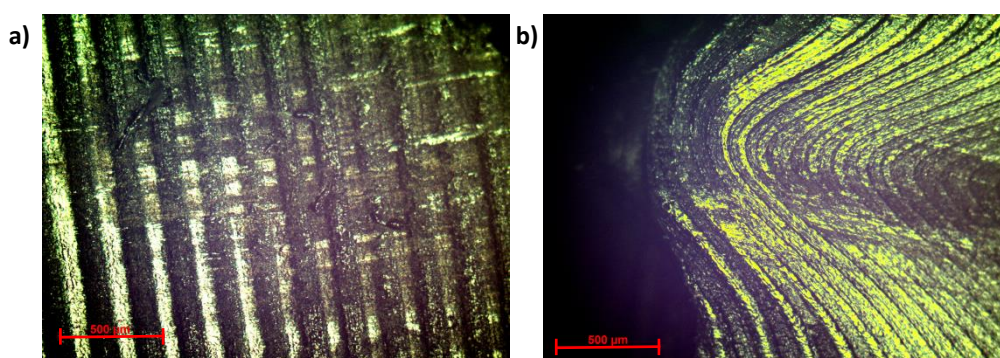


Figura 5.7 – Micrografias (objetiva de 5x) da amostra P1. Direção de deslizamento da direita para a esquerda.

### 5.3. Stick-slip

A Tabela 5.3 resume as variáveis de saída pertinentes do ensaio de *stick-slip*, mostrando a ocorrência ou não de *stick-slip*, a quantidade de eventos ( $N_{ev}$ ), a média do período dos eventos ( $t_{ev}$ ), a média dos coeficientes de atrito estáticos ( $\mu_e$ ), a média dos coeficientes de atrito cinéticos ( $\mu_c$ ), a frequência de eventos de *stick-slip* ( $f_{ev}$ ) e a média das diferenças entre os torques de atrito estático e cinético ( $\Delta T = T_e - T_c$ ). Para efeito de análise, um evento é caracterizado pelo início do “*slip*” até o fim do “*stick*”, isto é, do momento o qual o coeficiente de atrito estático é superado, ocorrendo o deslizamento até que a aderência ocorra novamente.

Tabela 5.3 – Variáveis de saída dos ensaios de *stick-slip* (rotação 1 RPM e tempo de 120 s).

CP	$F_N$	Stick-slip	$N_{ev}$	$t_{ev}$	$\mu_e$	$\mu_c$	$f_{ev}$	$\Delta T$
	[N]	[Sim ou Não]	[-]	[s]	[-]	[-]	[Hz]	[Nm]
VERDE	600	Sim	147	0,35	0,26	0,22	1,23	0,73
	500	Sim	156	0,33	0,25	0,22	1,30	0,60
	400	Sim	103	0,32	0,26	0,23	0,86	0,47
	300	Não	-	-	-	0,24	-	-
	200	Não	-	-	-	0,23	-	-
PRETO	600	Sim	163	0,54	0,44	0,38	1,36	0,61
	500	Sim	145	0,44	0,40	0,34	1,21	0,76
	400	Sim	130	0,42	0,36	0,32	1,08	0,75
	300	Sim	124	0,42	0,35	0,32	1,03	0,63
	200	Sim	66	0,41	0,37	0,35	0,55	0,50

O material PA6\_P apresentou *stick-slip* em todas as forças normais testadas, enquanto no material PA6\_V esse fenômeno vibratório não ocorreu para forças menores do que 300 N. Além disso, a diminuição da carga normal ocasionou a redução da quantidade de eventos e frequência dos mesmos. Zhang e Li, 2003, utilizando um equipamento de indentação deslizante (*Scratch Test*), buscaram avaliar o processo de deslizamento do polímero estireno-acrilonitrilo (SAN) com a ocorrência de *stick-slip*, concluindo que o período e a amplitude ( $\Delta T$ )

de stick-slip aumentam com a elevação da força normal. Tal efeito foi verificado nas amostras usadas no presente estudo, à exceção da condição de 600N (PA6\_P).

Eiss e Hanchi, 1998, estudando o *stick-slip* de compósitos feitos a partir de polipropileno contra diversos tipos de contracorpos não metálicos, concluíram que quanto menor o coeficiente de atrito estático do material, menor a propensão de ocorrência de ruído causado pelo *stick-slip*. Logo, pode-se dizer que o PA6\_V tem um melhor desempenho para aplicações de baixo ruído e de precisão. A Figura 5.8 ilustra o parâmetro  $P_{slip}$  dos materiais estudados, evidenciando que o PA6\_P apresenta potência de slip para todas as condições de forças ensaiadas.

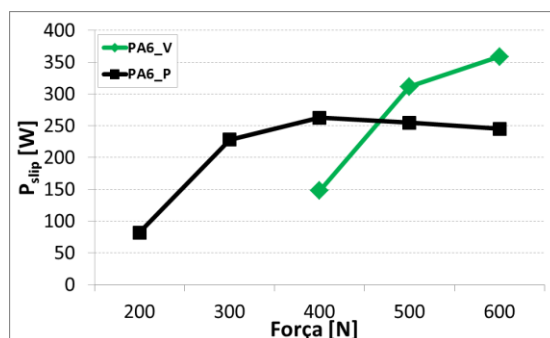


Figura 5.8 – Potência de slip ( $P_{slip}$ ) para os plásticos de engenharia estudados testados a uma rotação de 1 RPM durante 120 s.

De acordo com Neis et al., 2015, quanto maior a quantidade de energia dissipada no tempo, representado pela potência de slip, maior é a severidade de ocorrência do processo vibratório de stick-slip. Além disso, a Figura 5.8 mostra que, ao ser projetado em condições abaixo de onde não ocorre o stick-slip, o PA6\_V apresenta um bom desempenho se comparado com o PA6\_P. Contudo, em forças mais altas, o verde tende a ter stick-slip mais severo que o PA6\_P.

## 6. CONCLUSÕES

Ambos os ensaios, limite PV e *stick-slip*, foram importantes ferramentas para a caracterização do comportamento tribológico do sistema polímero-metal e avaliação de cada material estudado (PA-6 fundida verde e preto). A metodologia desenvolvida para uma rápida determinação do limite PV apresentou resultados satisfatórios. O PA6\_V exibiu uma maior resistência ao desgaste devido ao limite PV médio de 2,7 MPa.m/s ser superior ao do PA6\_P de 0,8 MPa.m/s. Em termos de propensão a vibração causada pelo *stick-slip*, o PA6\_P, por apresentar coeficiente de atrito estático médio maior comparado ao PA6\_V e potências de slip ( $P_{slip}$ ) em todas as condições ensaiadas, mostrou-se mais suscetível ao surgimento de *stick-slip*. Por fim, as micrografias ilustraram mecanismos de desgaste como abrasão, microsulcamentos, adesão e desgaste por fusão, enfatizando o surgimento de adesão apenas no polímero verde, o que acredita-se ter auxiliado no desempenho tribológico diferenciado em relação ao polímero preto.

Como sugestão para trabalhos futuros, mais ensaios utilizando a metodologia desenvolvida de determinação do limite PV devem ser realizados, com o intuito de avaliar a repetibilidade dos resultados. Além disso, devem ser realizados ensaios de limite PV mais conhecidos pela literatura para que possam ser comparados com a metodologia desenvolvida.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Society for Testing and Materials (ASTM), “**Standard Terminology Realating to Wear and Erosion – G40**”, Estados Unidos da América, 2005.

ASM International, “**Characterization and Failure Analysis of Plastics**”, 2003.

Bartenev, G. M., Lavrentev, V. V., **"Instruments and Methods for Friction and Wear Research"**, Elsevier Scientific Pub. Co., pp 261-302, 1981.

Bayer, R. G.; **"Engineering Design for Wear"**, CRC Press, 2<sup>nd</sup> edition, 2004.

Bekhet, N. E., **"Tribological Behaviour of Drawn Polypropylene"**, Wear, vol. 236, p 55-61, 1999.

Bowden, F. P., Tabor, D. T., **"The Friction and Lubrication of Solids"**, Clarendon Press, 1986.

Briscoe, B., **"Wear of Polymers: Na Essay on Fundamentals Aspects"**, Tribology International, vol. 14, pp 231-243, 1981.

Brydson, J. A., **"Plastics Materials"**, 7<sup>th</sup> edition, 1999.

Callister, W. D., Rethwisch, D. G., Wiley, J., **"Materials Science and Engineering"**, 9<sup>th</sup> edition, 2014.

Chen, Y. K., Modi, O. P., Mhay, A. S., Chrysanthou, A., O'Sullivan, J. M., **"The effect of different metallic counterface materials and different surface treatments on the wear and friction of polyamide 66 and its composite in rolling-sliding contact"**, Wear, vol. 255, pp. 714-721, 2003.

Chen, Z., Li, T., Yang, Y., Liu, X., Lv, R., **"Mechanical and tribological properties of PA/PPS blends"**, Wear, vol. 257, pp.696–707. 2004.

Crawford, R.J., **"Plastics Engineering"**, Butterworth-Heinemann, 1998.

Czichos, H., **"Influence of Adhesive and Abrasive Mechanisms on the Tribological Behaviour of Thermoplastic Polymers"**. Wear, vol. 88, pp 27–43, 1983.

Deutsches Institut für Normung (DIN), **"Verschleiss Begriffe, Systemanalyse von Verschleissvorgängen, Gilederung des Verschleissgebietes"**, Deutschland, 1979.

Eiss, N.S., Hanchi, J., **"Stick-slip friction in dissimilar polymer pairs used in automobile interiors"**, Tribology International, vol. 31, pp 653–659, 1998.

Erdemir, A., Fenske, G.R., Nichols, F. A., Erck, R. A., **"Self-lubrication boric acid films for tribological application"**, Proceedings of the Japan International Tribology Conference, pp 1797–1802, 1990.

Fisher, L. W., **"Selection of engineering materials and adhesives"**, CRC, 1<sup>st</sup> edition, 2005.

Gao, C., Kuhlmann-Wilsdorf, D., Makel, D.D., **"Fundamentals of stick-slip"**, Wear, vol. 162-164(PART B), pp1139–1149, 1993.

Gerdeen, J. C.; Rorrer, R. A. L.; **"Engineering Design with Polymers and Composites"**, CRC/Taylor & Francis, 2<sup>nd</sup> edition, 2012.

Hutchings, I. M., **"Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials"**, CRC Press, 1992.

Kar, M. K., Bahadur, S. **"An Investigation of the Temperature Rise in Polymer-Metal Sliding"**, Wear, vol. 82, pp 81-92, 1982.

Lancaster, J., **"Dry bearings: a survey of materials and factors affecting their performance"**, Tribology International, vol. 6, pp 219–251. 1973.



- Ludema, K. C., **“Friction, wear, lubrication”**, CRC Press, 1996.
- Matweb, **“Online Materials Information”**. Disponível em: <http://www.matweb.com/>. Acessado em 20/10/2015.
- Neis, P. D., **“Development of a Multifunctional Tribometer with Independent Temperature Control of the Brake Disk”**, Doctoral thesis, Joint PhD between Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Brazil) and Ghent University (Belgium), 2012.
- Neis, P. D., Ferreira, N. F., Silva, F. P., **“Comparison Between Methods for Measuring Wear in Brake Friction Materials”**, 2014.
- Neis, P.D., Ferreira, N. F., Matozo, L. T., Masotti, D., Poletto, J. C., **“Definition of a suitable parameter for characterizing creep-groan propensity in brake pads”**, SAE International, pp 1–7, 2015.
- Pogačnik, A., Kalin, M., **“Parameters influencing the running-in and long-term tribological behaviour of polyamide (PA) against polyacetal (POM) and steel”**, Wear, pp 290-291, 2012.
- Rodrigues, A. A., **“Investigação das características tribológicas e ambientais de termoplásticos de engenharia especiais para uso em materiais de atrito”**, Dissertação de Mestrado, 2007.
- Samyn, P.; Schoukens, G., **“The effect of processing method on dry sliding performance of polyimides at high load/high velocity conditions”**, European Polymer Journal, 44(3), pp.716–732. 2008
- Silva, R.C.L., **“Desgaste de Polímeros Estruturais de Engenharia em Contato de Deslizamento com Cilindro Metálico”**, Dissertação de Mestrado, 2010.
- Song, F.; Wang, Q.; Wang, T., **“The effects of crystallinity on the mechanical properties and the limiting PV (pressure $\times$ velocity) value of PTFE”** Tribology International, 93, pp.1–10. 2015.
- Stachowiak, G. W., Batchlor, A. W., **“Engineering Tribology”**, Butterworth-Heinemann, 744p, 1996.
- Unal, H.; Mimaroglu, A., **“Friction and wear performance of polyamide 6 and graphite and wax polyamide 6 composites under dry sliding conditions”**, Wear, 289, pp.132–137. 2012.
- Vásquez, D. H. G., **“Estudo Comparativo do Comportamento Tribológico de Três Materiais Termoplásticos Submetidos A Desgaste por Deslizamento a Seco”**, Dissertação (Mestrado), São Paulo, 2003.
- Vegt, A. K. van der, **“From Polymers to Plastics”**, VSSD, 2008.
- Zhang, S.L.; Li, J.C.M., **“Slip process of stick-slip motion in the scratching of a polymer”** Materials Science and Engineering, vol. 344, pp 182–189, 2003.
- Zum-Gahr, K. H., **“Microstructure and Wear of Materials”**, Tribology Series, nº 10, Elsevier Scientific Publishing Company, 1987.

## APÊNDICE I

O mesmo critério foi usado para a definição dos limites PV do material PA6\_P, como mostra a Figura I.1. Nos gráficos, encontram-se testes com uma força normal de 300 N e rotações de 50, 100, 150 e 175 RPM.

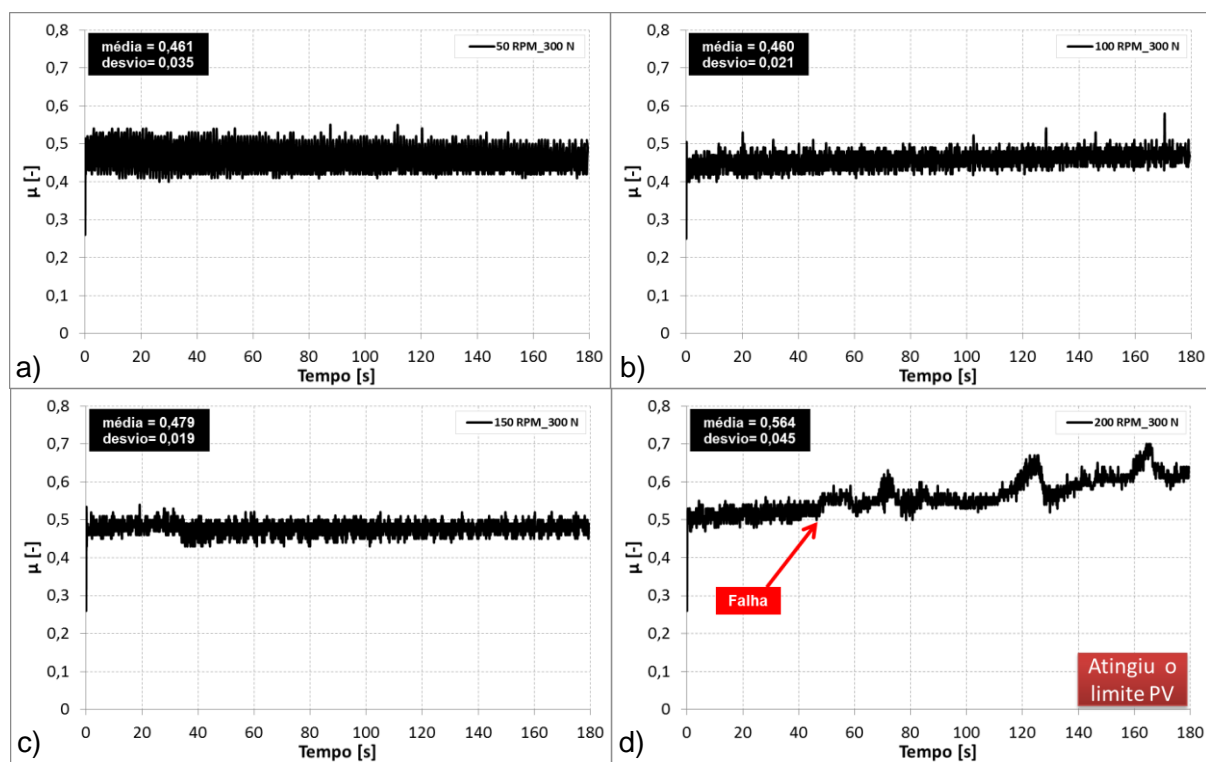


Figura I.1 - Demonstrativo do critério de definição do limite PV para corpo de prova P3 do material PA6\_P a uma carga normal de 300 N e rotações de a) 50 RPM; b) 100 RPM; c) 150 RPM; d) 200 RPM (atingiu o limite PV do P3).