

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

Análise Tribológica de Plásticos de Engenharia

por

Rafael Machado Carrasai

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 2016.



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

Análise Tribológica de Plásticos de Engenharia

por

Rafael Machado Carrasai

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, Fabricação e Automação Industrial**

Orientador: Prof. Patric Daniel Neis

Comissão de Avaliação:

Prof. Flavio José Lorini

Prof. Mario Ronald Sobczyk Sobrinho

Prof. Ney Francisco Ferreira

Porto Alegre, dezembro de 2016.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me proporcionar este momento, pois sem Ele nada disso seria possível. Aos meus pais por me criarem em um lar repleto de amor, companheirismo e amizade, e serem meus pontos de equilíbrio em todos os momentos, me confortando e me auxiliando sempre que necessário, sem medir esforços.

Aos meus avós, por serem fonte infinita de amor, e acima de tudo exemplos de caráter e de retidão. À minha irmã e meu cunhado, que são pessoas muito importantes e se fazem presentes em todas as situações, me apoiando e mostrando o lado bom das coisas. Ao meu sobrinho (a) que está chegando, que ainda nem conheço, mas já amo muito, e conto as horas para seu nascimento. À minha namorada, pelo companheirismo em todas as horas, o apoio nos momentos conturbados, a compreensão, e o amor que demonstra em cada gesto.

Aos colegas e grandes amigos que fiz na graduação por dividirem os sentimentos de agonia antes das provas, ajudas e explicações a cada problema mal compreendido, e por todos os momentos de descontração, pois fizeram com que esse tempo de graduação se tornasse, além de aulas e provas, reuniões de amigos.

Por fim, agradeço ao meu orientador Patric Daniel Neis, pelos conhecimentos transmitidos, e seu esforço para que o trabalho pudesse agregar o maior conhecimento possível, e aos colegas do LATRIB, Jean e Liu, pelo apoio no tratamento e análise dos resultados.

CARRASAI, R. M. **Análise Tribológica de Plásticos de Engenharia**. 2016. 20 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

RESUMO

Neste trabalho são estudados três plásticos de engenharia, o polioximetileno (POM-C), a poliamida 6 (PA6) e o acrilonitrila butadieno estireno (ABS). São analisadas suas propriedades tribológicas através de ensaios do tipo pino-sobre-disco. Foram realizados ensaios *stick-slip* no POM-C e no PA6, utilizando contracorpo de aço SAE 1020 e contracorpo de ferro fundido cinzento para o PA6. Para a determinação do limite PV (produto entre pressão de contato e velocidade de deslizamento) do ABS foi utilizado um contracorpo de ferro fundido cinzento. O POM-C não apresentou a ocorrência do fenômeno *stick-slip*. O PA6 apresentou *stick-slip* em todas as condições de ensaio. O PA6 apresentou maior severidade de *stick-slip* quando atritado em um contracorpo de ferro fundido cinzento. O ABS mostrou valores de limite PV relativamente altos para combinações de pressão de contato e velocidade de deslizamento.

PALAVRAS-CHAVE: POM-C, PA6, ABS e tribologia.

CARRASAI, R. M. **Tribological Analysis of Engineering Plastics**. 2016. 20 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

ABSTRACT

In this paper the tribological properties of three engineering plastics are studied: polyoxymethylene (POM-C), polyamide 6 (PA6) and acrylonitrile butadiene styrene (ABS). The experiments were carried out through a pin-on-disc tribometer. Stick-slip tests have been carried out in the POM-C and the PA6, using SAE 1020 steel counterpart for both polymers and gray cast iron counterpart for PA6. For determination of the PV limit (multiplication between contact pressure and slip velocity) of ABS a gray cast iron was used as counterpart. The POM-C did not present the occurrence of the stick-slip phenomenon. The PA6 showed stick-slip in all tested conditions, for both counterpart materials. The stick-slip presented higher severity in case of PA6 rubbed against gray cast iron material. The ABS when rubbed on the gray cast iron showed relatively high PV limit values for applications of contact pressure and slip velocity combinations.

KEYWORDS: POM-C, PA6, ABS and tribology.

ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	1
2.1 Objetivo Geral.....	1
2.2 Objetivos Específicos	1
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
3.1 Polímeros	2
3.1.1 Termorrígidos e Termoplásticos	2
3.1.2 Aditivos em Polímeros	2
3.1.3 Poliacetais, Poliamidas e ABS	2
3.2 Tribologia em Polímeros.....	3
3.2.1 Limite PV	4
3.2.2 <i>Stick-slip</i>	4
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	5
4.1 Par Tribológico	6
4.2 Ensaio.....	7
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	8
5.1 Análise do Limite PV.....	8
5.2 Análise de <i>Stick-slip</i>	11
6. CONCLUSÕES	13
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	13

1. INTRODUÇÃO

Para não perderem mercado, as empresas buscam aumentar sua produtividade com qualidade, ao mesmo tempo em que procuram racionalizar os custos. E um dos caminhos para se atingir essas metas está na substituição de peças metálicas por outras, construídas com plásticos de engenharia [Wiebeck e Harada, 2005]. Segundo Pogačnik e Kalin, 2012, o baixo custo para altos volumes de produção, peso reduzido, facilidade no processo de manufatura, e inclusive, presença de propriedades lubrificantes, justificam o crescimento da utilização destes polímeros como substitutos para ligas metálicas em diversas aplicações.

Os avanços tecnológicos trouxeram inúmeros tipos de plásticos de engenharia, para as mais variadas aplicações. Em pesquisa realizada nos manuais técnicos através do portal da internet de alguns fabricantes [Ensinger, 2016; Gehr, 2016], verificou-se a ausência de importantes dados tribológicos destes materiais. Notou-se que os fabricantes, quando fornecem informações tribológicas destes plásticos, utilizam condições de ensaio que têm pouca aplicação na prática. Dentre as características tribológicas não informadas está a possibilidade de ocorrência de vibrações induzidas por atrito (*stick-slip*). Este pode ser um importante dado para aplicações onde se fazem necessários movimentos precisos, como a robótica, por exemplo. Já o limite PV está relacionado a condições em que o material tem suas propriedades comprometidas devido ao aumento da temperatura causado pelo atrito, sendo assim, um fator importante na escolha do material [Booser, 1983]. Essa falta de informações tribológicas detalhadas acaba limitando a aplicabilidade destes plásticos frente às suas condições de uso.

Neste trabalho, propriedades tribológicas (*stick-slip* e limite PV) de 3 diferentes plásticos de engenharia (POM-C, PA6 e ABS) foram estudadas através de testes experimentais realizados em um tribômetro do tipo pino-sobre-disco. Para o ensaio *stick-slip*, as amostras foram submetidas a baixas velocidades de rotação para diferentes valores de pressão de contato. Para o ensaio do limite PV foi estabelecida uma pressão de contato e a velocidade de rotação foi incrementada a partir de uma velocidade pré-definida até a ocorrência do limite PV. Através dos resultados obtidos com o presente estudo, pretende-se facilitar a escolha e seleção do tipo de plástico para certas aplicações como, por exemplo, juntas e guias empregadas em posicionadores e braços robóticos, mancais, buchas, roletes, etc. Além disso, os resultados deste trabalho poderão ser utilizados para fins de comparação de desempenho destes plásticos com outros polímeros de engenharia sob as mesmas solicitações.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é analisar o *stick-slip* e o limite PV apresentados pelos seguintes plásticos de engenharia: poliacetal (POM-C), poliamida (PA6) e acrilonitrila butadieno estireno (ABS).

2.2 Objetivos Específicos

- Analisar a ocorrência do fenômeno vibratório *stick-slip* resultante do escorregamento do POM-C e do PA6 contra o aço SAE 1020 e do PA6 contra ferro fundido e comparar qual par tribológico apresenta maior severidade em termos de potência de *slip*;
- Caracterizar o limite PV do ABS atritado em um contracorpo de ferro fundido;

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Polímeros

Polímeros são macromoléculas formadas por pequenas moléculas (monômeros) que se ligam por meio de uma reação denominada polimerização, realizada mediante reações químicas [Nunes, 2008]. Os polímeros são materiais que podem ser orgânicos ou inorgânicos, naturais ou sintéticos [Silva, 2010]. Quando o polímero tem apenas um tipo de mero (unidade química ligada por covalências, repetidas regularmente ao longo da cadeia), usa-se a expressão homopolímero (como em POM-H, onde H refere-se a homopolímero). Quando há mais de um tipo de mero, é designado copolímero (como em POM-C, onde C faz referência a copolímero) [Mano e Mendes, 1999]. Polímeros puros raramente são usados devido as suas características, por isso, aditivos são aplicados a esses materiais e a partir daí o termo “plástico” é utilizado [Crawford, 1998]. Segundo Nunes, 2008, os polímeros sintéticos, dependendo do modo como estão ligados química e estruturalmente, dividem-se em duas classes que são os termorrígidos e os termoplásticos.

3.1.1 Termorrígidos e Termoplásticos

Polímeros termorrígidos se tornam permanentemente duros quando calor é aplicado, não amolecendo no subsequente aquecimento [Callister, 1991]. Os polímeros termorrígidos, por aquecimento ou outra forma de tratamento, assumem estrutura reticulada, com ligações cruzadas, tornando-se infundíveis. Se a estrutura reticulada for proveniente de ligações covalentes fortes, ou a simples ligações hidrogênicas, mais fracas, o polímero termorrígido pode ser denominado termorrígido químico ou termorrígido físico, respectivamente. No primeiro caso, é totalmente insolúvel em quaisquer solventes; no segundo caso, pode ser solúvel em solventes adequados, muito polares, capazes de impedir a formação daquelas ligações hidrogênicas entre as cadeias [Mano e Mendes, 1999].

Os termoplásticos de engenharia têm ampliado seu escopo de aplicações, e muitas vezes substituindo os metais, pela sistemática melhoria de propriedades como a resistência mecânica, a tenacidade e a estabilidade dimensional [Silva, 2003]. Os polímeros termoplásticos 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 [Crawford, 1998]. Estes materiais são normalmente fabricados e moldados pela aplicação simultânea de calor e pressão [Callister, 1991]. Os termoplásticos têm a capacidade de amolecer e fluir quando sujeitos a um aumento de temperatura e pressão. Nos termoplásticos, sucessivas aplicações de temperatura e pressão são transformações físicas reversíveis. Por este motivo, os termoplásticos são solúveis, fundíveis e recicláveis [Canevarolo, 2006].

3.1.2 Aditivos em Polímeros

Aditivo é todo e qualquer material adicionado a um polímero visando a uma aplicação específica. A característica dos polímeros aceitarem uma grande variedade de aditivos é fundamentalmente importante, não só para melhorar suas propriedades físico-químicas, mas também para seu apelo visual, permitindo uma vasta gama de aplicações. Dentre as inúmeras classes de aditivos, citamos alguns exemplos: carga reforçante, plastificante, lubrificante, estabilizante, retardantes de chama, agentes nucleantes, antiestáticos, pigmentos, etc. [Canevarolo, 2006].

3.1.3 Poliacetais, Poliamidas e ABS

Poliacetais ou polioximetilenos (POM) são polímeros derivados do formaldeído ou do trioxano. Além dos homopolímeros, existem também os copolímeros, que normalmente utilizam

pequenas porcentagens de óxido de etileno como comonômeros. Os copolímeros, quando comparados aos homopolímeros, possuem melhor desempenho em soluções alcalinas fortes e em aplicações sob cargas de longo prazo [Wiebeck e Harada, 2005]. O Poliacetal é um termoplástico de estrutura semicristalina, com cadeia molecular linear, e seu processo de fabricação geralmente ocorre por injeção, moldagem por sopro ou extrusão [Zhao et al., 2016]. Segundo Wiebeck e Harada, 2005, os poliacetais possuem cristalinidade em torno de 75% e temperatura de fusão de 170 °C. Sua absorção de água é quase desprezível e são insolúveis nos solventes comuns à temperatura ambiente.

As poliamidas (PA), também conhecidas como náilons, são seguidas de um número, que se refere à quantidade de carbonos do aminoácido do qual foi originado o polímero [Mano e Mendes, 1999]. Os principais tipos de poliamidas utilizadas são PA 6 e PA 6.6. A poliamida é classificada como termoplástico de engenharia devido à alta resistência mecânica e estabilidade dimensional. Esta resistência mecânica é resultado das ligações do tipo pontes de hidrogênio, as quais também fazem com que as poliamidas apresentem alta absorção de água e tornem-se higroscópicas [Canevarolo, 2006]. A presença da água funciona como um plastificante do PA6, reduzindo a resistência mecânica e rigidez, mas aumentando a resistência ao impacto e tenacidade [Wiebeck e Harada, 2005].

O ABS é um termoplástico amorfo, copolimerizado a partir dos monômeros de acrilonitrila, butadieno e estireno. Uma grande variedade de propriedades pode ser explorada, fazendo-se diferentes combinações destes monômeros [Ensinger, 2016]. Segundo Wiebeck e Harada, 2005, um ABS típico contém cerca de 20% de elastômero, 25% de acrilonitrila e em torno de 55% de estireno. Além disso, normalmente, a temperatura de serviço do ABS, sem que ocorram deformações, está em torno de 80 °C no máximo. Os autores citam que as resinas de ABS são inflamáveis, queimam com muita facilidade e com grande formação de fuligem. O ABS é muito utilizado em aplicações da indústria automotiva e de eletrodomésticos.

3.2 Tribologia em Polímeros

Quando ocorre o deslizamento entre materiais poliméricos e contracorpos não poliméricos, que apresentam maiores valores de dureza e módulo de elasticidade, as propriedades do corpo polimérico tendem a determinar o comportamento do atrito. Isso, porém, não exclui a significativa parcela de contribuição de características de superfície (mecânicas, térmicas e físico-químicas) do contracorpo não polimérico [Bartenev e Lavrentev, 1981].

Nos polímeros, o atrito e o desgaste são extremamente complexos e dependem da natureza da aplicação e das propriedades dos materiais. Mesmo os polímeros reforçados têm valores de módulo de elasticidade muito menores que os metais. O atrito metal – polímero é caracterizado pelos mecanismos de adesão e deformação [Crawford, 1998; Rosato, 2003].

A temperatura de fusão dos polímeros, a velocidade de deslizamento, a carga aplicada e a rugosidade são fatores que influenciam a resposta tribológica dos polímeros. A baixa temperatura de fusão dos polímeros (quando comparada aos metais) aliada à baixa condutividade térmica faz com que a temperatura de contato gerada pelo atrito possa alcançar o ponto de fusão do polímero [Silva, 2010]. A variação na velocidade de deslizamento pode provocar mudanças significativas nos mecanismos de atrito, principalmente pela sua importância na temperatura desenvolvida na região de contato [Silva, 2003]. Unal e Mimaroglu, 2003, compararam a variação do coeficiente de atrito em função da carga aplicada sobre o polioximetileno (POM), o poli (éter-imida) (PEI) e o poli (tetra-fluoro-etileno) (PTFE) e concluíram que o POM teve a melhor estabilidade (menor variação) do atrito. Quaglioni et al., 2009, afirmaram que há relação entre rugosidade do contracorpo de metal e propriedades elásticas dos polímeros e atrito. Franklin e Kraker, 2003, concluíram que riscos perpendiculares à direção de deslizamento exercem maior influência sobre o desgaste do que os riscos paralelos à direção de deslizamento.

3.2.1 Limite PV

O PV representa o produto da pressão de contato P , pela velocidade de deslizamento V . O limite PV é um conceito amplamente utilizado para expressar a transição de desgaste moderado para severo de um componente polimérico [Silva, 2010]. Yamagushi, 1990, apresenta a curva de temperatura no contato pelo tempo para condições PV cada vez mais elevadas, mostrada na Figura 3.1. A Figura mostra que a temperatura no contato estabilizará em patamares cada vez mais elevados quanto mais severas forem às condições de pressão e velocidade (PV). A condição PV_{Max} representa a condição em que a temperatura no contato não se estabilizará e o material atingirá temperaturas elevadas, fundindo ou provocando uma intensa oxidação na região de contato. Este valor pode ser chamado PV limite [Silva, 2003].

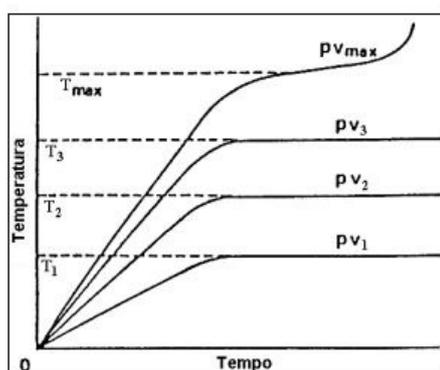


Figura 3.1 – Curva de temperatura no contato pelo tempo para condições PV [Adaptado: Yamagushi, 1990].

Por outro lado, o produto entre pressão e velocidade pode ser visto como um dos fatores que, juntamente com o coeficiente de atrito, constitui a energia de entrada na interface de deslizamento. Se a energia não é retirada a uma taxa suficiente, a temperatura da interface aumenta até ocorrer fusão ou carbonização, gerando desgaste severo [Ludema, 1996].

Normalmente em ensaios de determinação de limite PV, a velocidade é constante e a força é aumentada em intervalos de 30 a 300 minutos. Enquanto isso, a temperatura, o coeficiente de atrito e a taxa de desgaste são monitorados. Se os dados monitorados mantêm-se dentro de limites aceitáveis a força normal é incrementada [Zanetti, 2015]. O limite PV do material é atingido quando há um aumento substancial no torque ou temperatura, ou se a temperatura não se estabiliza após 30 minutos [Bayer, 2004].

Zanetti, 2015, desenvolveu uma metodologia com o objetivo de realizar ensaios de menor duração para obtenção do limite PV. Nestes ensaios, foi definida uma rotação inicial e incrementou-se a rotação ao invés da força normal. Ainda segundo a metodologia proposta pelo autor, os incrementos de rotação foram realizados em passos de tempo fixos (a cada 180s) até a ocorrência de aumento considerável do atrito (e torque consequentemente), caracterizando o limite PV do material.

3.2.2 *Stick-slip*

Bowden e Leben, 1939, criaram o termo *stick-slip* após observarem fases de agarramento (*stick*) e deslizamento (*slip*) que ocorreram na interface de contato entre dois materiais. Todo processo de *stick-slip* é ocasionado por uma inconstância da força de atrito motivada por outras variáveis tais como, tempo e velocidade [Stoeterau e Leal, 2002]. O *stick-slip* resulta de condições onde o atrito estático é maior que o dinâmico e ocorre em velocidades muito baixas. Os valores de coeficiente de atrito e área de contato são altos durante o “*stick*” e reduzem rapidamente durante o “*slip*” [Nielsen, 1967].

A variação na velocidade de deslizamento produz um tipo de oscilação no movimento, que por sua vez dá origem aos ruídos e vibrações. Esta oscilação na velocidade de

deslizamento (ou na força de atrito) é chamada *stick-slip* [Franceschini, 2014]. Segundo Hoggmark e Jacobsson, 2011, o fenômeno *stick-slip* pode ser diminuído em intensidade ou até mesmo desaparecer com a redução da carga normal ou com o aumento da velocidade de deslizamento. Segundo Franceschini, 2014, o padrão dente de serra é geralmente observado na curva da força de atrito em função do tempo. A Figura 3.2 mostra o comportamento do fenômeno *stick-slip* através do gráfico coeficiente de atrito versus tempo. Bhushan, 2002, afirma que os ruídos e rangidos associados ao *stick-slip* são indesejados e medidas devem ser tomadas para eliminar, ou pelo menos reduzir a amplitude das oscilações.

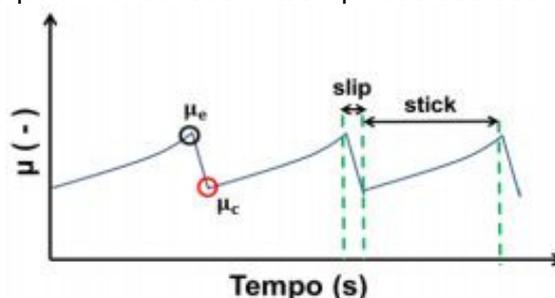


Figura 3.2 – Gráfico Coeficiente de atrito versus tempo [Adaptado: Zanetti, 2015].

Uma nova maneira de mensurar o *stick-slip* é por meio da Potência de *slip* (P_{slip}) [Neis et al., 2016], sendo esse parâmetro definido como:

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

Onde T é o torque [Nm], t é o tempo de slip [s] e os subscritos “e” e “c” representam estático e cinético, respectivamente.

Neis et al., 2011, avaliou a relação de fatores mecânicos, como rigidez e amortecimento, com a intensidade de *stick-slip* através de um *stick-slip tester* (máquina para testar *stick-slip*), onde amostras de pastilha e disco de freio foram empregadas. As velocidades de deslizamento, assim como a carga normal também foram variadas. Os autores concluíram que o aumento da rigidez gera uma redução do tempo de *stick*, bem como uma redução na intensidade das oscilações. Já o efeito do amortecimento equivalente sobre as amplitudes de vibração não é tão direto (é não-linear) e depende do nível de rigidez do sistema mecânico.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a caracterização das propriedades tribológicas dos polímeros em estudo, foram realizados ensaios de *stick-slip* e limite PV com auxílio do tribômetro do LATRIB. A taxa de aquisição de dados foi de 200 Hz para todos os ensaios. Um sistema de aquisição e controle de dados da DSpace® gerenciou todos os processos realizados pelo tribômetro. A placa é conectada ao slot PCI do computador e é compatível com a ferramenta Simulink da MatLab. O *Control Desktop*, software que acompanha o pacote de aquisição da DSpace®, permite exportação dos dados pelo *hardware*, para o MatLab ou para planilhas Excel [Neis et al., 2008].

A força aplicada foi medida através de um transdutor de força, a velocidade foi controlada por um conversor de frequência, o torque foi medido por um transdutor de torque e a temperatura foi medida por dois termopares do tipo K instalados no meio da espessura do disco [Neis et al., 2008]. Os dados foram processados com o auxílio das ferramentas Microsoft Excel e Matlab (Mathworks®). Um esquema do tribômetro pino-sobre-disco é apresentado na Figura 4.1.

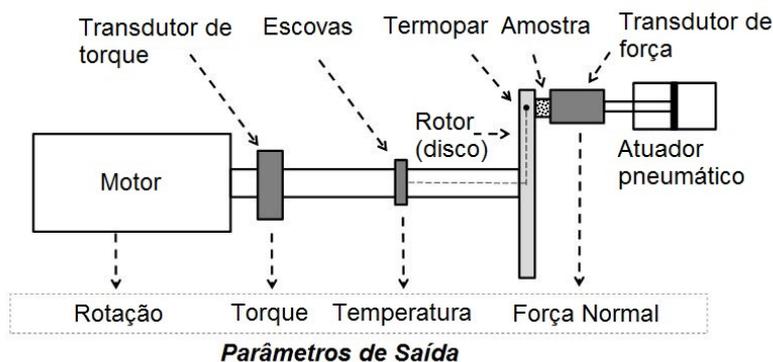


Figura 4.1 – Esquema do tribômetro [Neis et al., 2015].

4.1 Par Tribológico

Para realização dos ensaios, um disco de aço SAE 1020 e outro de ferro fundido cinzento (fofo) foram utilizados como contrapartes. Estes discos foram lixados por lixas de granulometria 280, 360, 400, 500, 600 e 1200, respectivamente, até o que mesmo adquira uma rugosidade radial de $R_a < 0,2 \mu\text{m}$.

As amostras de plásticos empregadas no presente estudo foram polioximetileno (POM-C), poliamida 6 (PA6) e ABS, conhecidos comercialmente como TECAFORM AH natural (POM C 277669), TECAGLIDE green, e TECARAN ABS grey, respectivamente. Todos esses plásticos são fabricados pela Ensinger. As características dos materiais estudados podem ser verificadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Características dos polímeros em estudo.

Material	Aditivo	Cor	Módulo de elasticidade	Tensão de cisalhamento	Temperatura de serviço à longo prazo	Condutividade térmica	Ponto de amolecimento
[-]	[-]	[-]	[MPa]	[MPa]	[°C]	[W/mK]	[°C]
POM-C	Não possui	Branco	2900	67	100-140	0,39	110
PA6	Lubrificante sólido não informado	Verde	3100	76	100-130	0,38	Não informado
ABS	Não informado	Cinza	1700	32	75	0,17	82-104

Os corpos de prova foram usinados a partir de barras fundidas até tomarem as dimensões mostradas na Figura 4.2. Para a realização dos ensaios tribológicos foram utilizados dois corpos de prova de PA6, um corpo de prova de POM-C e um corpo de prova de ABS, sendo o ABS2 o mesmo corpo de prova ABS1 após retífica.

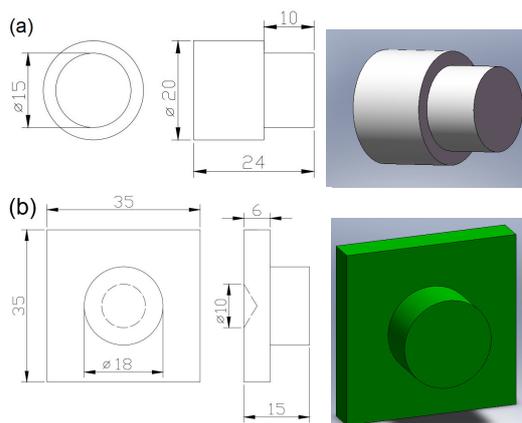


Figura 4.2 - Dimensões do corpo de prova: POM-C e ABS (a); PA6 (b).

4.2 Ensaios

A Tabela 4.2 apresenta os parâmetros adotados na realização da etapa de assentamento e dos ensaios de limite PV e *stick-slip*. Note que foi realizada uma etapa de assentamento antes da realização de cada ensaio, visando o aumento da área de contato do par de fricção e a estabilidade do coeficiente de atrito ao final desta etapa [Franceschini, 2014]. A força aplicada foi alterada para o ensaio POM-C x Aço para termos uma pressão de contato igual para todas as amostras, já que o diâmetro dos pinos é diferente.

Tabela 4.2 – Parâmetros utilizados na etapa de assentamento, ensaio de limite PV e ensaio *stick-slip*.

Etapa	Par tribológico	Diâmetro da amostra	Duração	Temperatura inicial	Velocidade de deslizamento	Rotação do disco	Pressão de contato	Força normal aplicada	Repetições	Corpo de prova
[-]	[-]	[mm]	[s]	[°C]	[m/s]	[rpm]	[MPa]	[N]	[-]	[-]
Assentamento	POM-C x Aço	15	300	50	1,40	334	1,7	300	1	-
							1,1	200	1	
							0,6	100	1	
	PA6 x Aço	18	300	50	1,40	334	1,7	432	1	-
							1,1	288	1	
							0,6	144	1	
PA6 x Ferro fundido cinzento	18	300	50	1,40	334	1,7	432	1	-	
						1,1	288	1		
ABS x Ferro fundido cinzento	15	300	50	1,40	334	1,7	300	1	ABS1	
						1,1	200	1	ABS2	
Stick-slip	POM-C x Aço	15	120	30	$4,20 \cdot 10^{-3}$	1	2,8	500	1	-
							2,8	500	1	
							2,8	720	3	
							2,3	576	3	
							1,7	432	3	
							1,1	288	3	
	PA6 x Aço	18	300	30	$1,70 \cdot 10^{-3}$	0,40	0,4	100	3	-
							0,4	100	3	
							2,8	720	2	
							2,3	576	2	
							1,7	432	2	
							1,1	288	2	
PA6 x Ferro fundido cinzento	18	300	30	$1,70 \cdot 10^{-3}$	0,40	0,4	100	2	-	
						0,4	100	2		
						2,8	720	2		
						2,3	576	2		
						1,7	432	2		
						1,1	288	2		
Limite PV	ABS x Ferro fundido cinzento	15	60	50	1,36 + incrementos de 0,2 até o limite PV	325 + incrementos de 50	1,7	300	1	ABS1
					2,16 + incrementos de 0,2 até o limite PV	525 + incrementos de 50	1,1	200	1	ABS2

Conforme mostrado na Tabela 4.2, para caracterização do limite PV foi adotada a metodologia sugerida por Zanetti, 2015, onde a carga normal foi mantida constante e a velocidade foi incrementada, até o material alcançar a condição de limite PV. As velocidades

para a caracterização do limite PV iniciaram diferentes com o objetivo de reduzir o tempo dos ensaios.

Já o ensaio *stick-slip* foi realizado com velocidade de deslizamento constante durante 120 s para o POM-C e 300 s para o PA6. A fim de aleatorizar os testes, a força foi aplicada em ordem decrescente de magnitude na primeira repetição, crescente na segunda repetição e decrescente na terceira repetição no ensaio PA6 x Aço. Já no ensaio PA6 x ferro fundido cinzento foram realizadas 2 repetições, iniciando de maneira decrescente e fazendo o ensaio de maneira crescente na segunda repetição. As conclusões tribológicas deste trabalho são apenas preliminares uma vez que mais ensaios seriam necessários para termos uma conclusão definitiva.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Análise do Limite PV

A Figura 5.1 ilustra o comportamento do torque e do coeficiente de atrito em função do tempo para a amostra ABS1 atritada contra ferro fundido cinzento em uma condição de ensaio onde não foi atingido o limite PV. Com exceção dos 10 primeiros segundos, onde constata-se um efeito de assentamento, o comportamento do torque e do coeficiente de atrito mostrou-se relativamente estável ao longo do tempo.

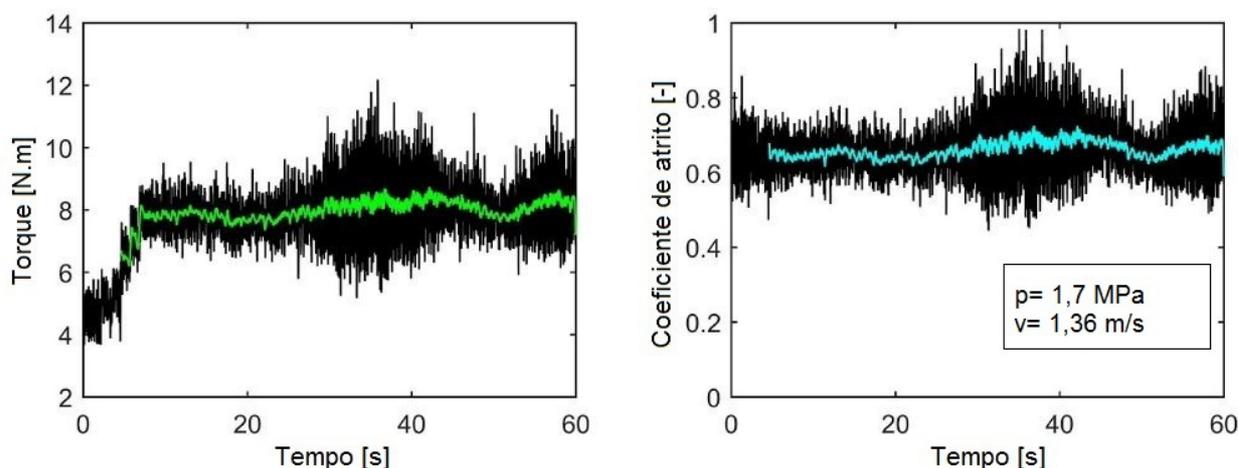


Figura 5.1 – Gráfico de torque e coeficiente de atrito em função do tempo para a amostra ABS1 antes da ocorrência do limite PV.

As Figuras 5.2 e 5.3 mostram os gráficos de torque e coeficiente de atrito em função do tempo nas condições de obtenção do limite PV das amostras ABS1 e ABS2, respectivamente. O limite PV do ABS1, cujo ensaio foi executado a uma pressão de contato de 1,7 MPa, foi obtido com velocidade de 2,36 m/s, enquanto para o ABS2 (com pressão de contato de 1,1 MPa) a velocidade de deslizamento em que ocorreu o limite PV foi de 2,76 m/s. Nestas curvas, a linha mais fina e central representa os dados filtrados dos pontos pretos, que representam os dados brutos. As setas indicam o momento em que o limite PV é atingido.

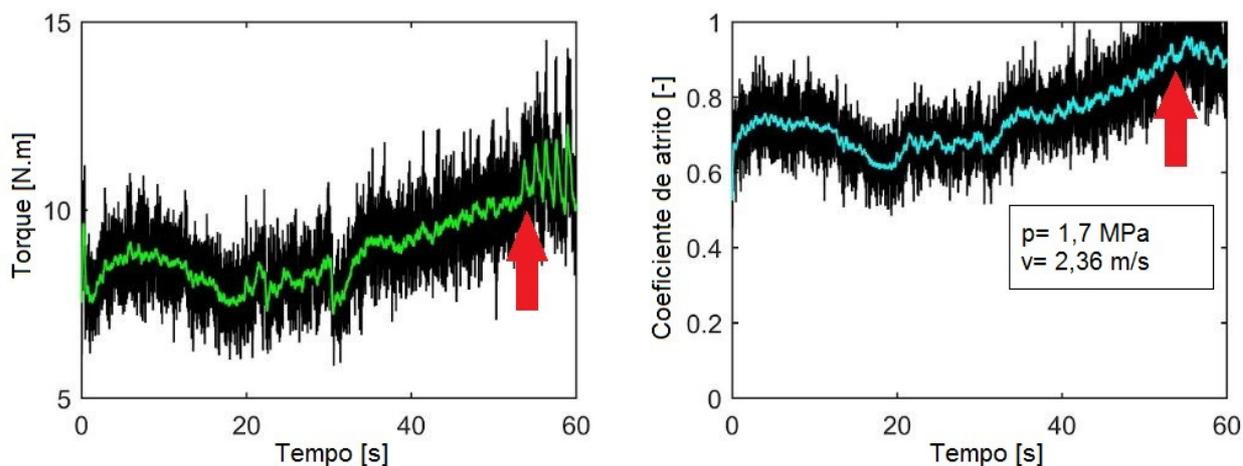


Figura 5.2 – Gráfico de torque e coeficiente de atrito para ABS1 (força de 300 N) na ocorrência do limite PV.

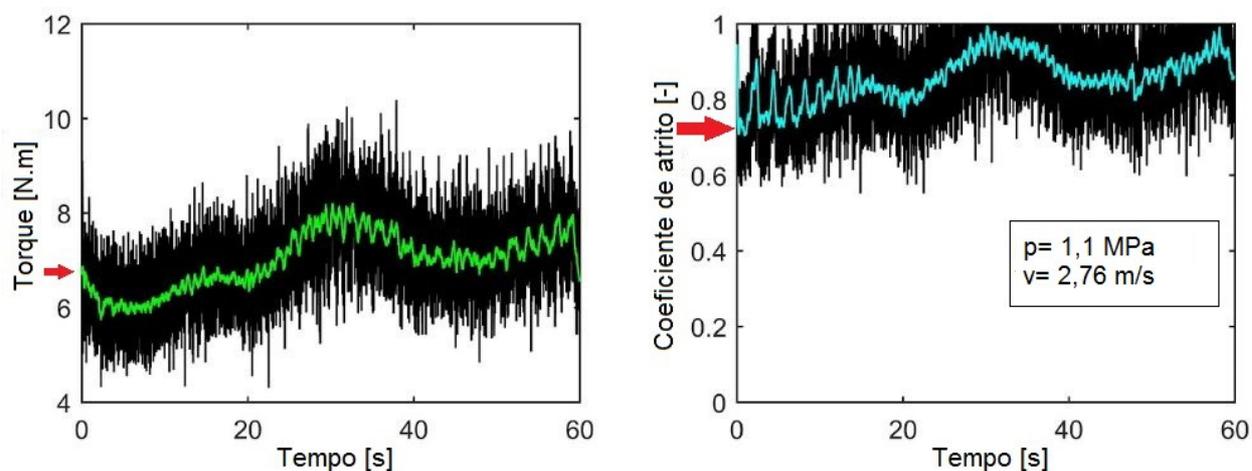


Figura 5.3 – Gráfico de torque e coeficiente de atrito para ABS2 (força de 200 N) na ocorrência do limite PV.

A Figura 5.2 mostra que o limite PV na amostra ABS1 foi atingido no final do ensaio, enquanto a Figura 5.3 mostra que o corpo de prova ABS2 atingiu seu limite PV instantaneamente ao início do ensaio. Os resultados dos ensaios do limite PV sobre as amostras de ABS atritadas contra ferro fundido cinzento são mostrados na Tabela 5.1. Observou-se que o limite PV do ABS1 foi de 4,01 MPa.m/s, enquanto para o ABS2 foi de 3,03 MPa.m/s. A diferença entre os dois casos é provavelmente devido aos diferentes procedimentos de teste empregados no assentamento das amostras ABS1 e ABS2.

Tabela 5.1 – Valores de limite PV para os ensaios realizados no ABS atritado sobre o contracorpo de ferro fundido cinzento.

Amostra	Pressão de contato	Velocidade de deslizamento	PV
[-]	[MPa]	[m/s]	[MPa.m/s]
ABS1	1,7	2,36	4,01
ABS2	1,1	2,76	3,03
PV médio =			3,52

Mesmo com poucos resultados de ensaio, calculou-se o valor médio do limite PV e chegou-se ao resultado de limite PV médio de 3,52 MPa.m/s. Notou-se que o ABS apresentou valores médios de limite PV superiores aos obtidos por Zanetti, 2015, em PA6 atritados contra Aço SAE 1020 (2,72 MPa.m/s).

A Figura 5.4 apresenta uma fotografia tirada das amostras de ABS após alcançarem o limite PV. Notou-se efeito de deformação plástica sobre as superfícies das duas amostras. Esta deformação é causada pelo fato das amostras ultrapassarem o ponto de amolecimento do ABS causado pelo aumento da temperatura. O sentido de escorregamento do disco em relação às amostras está indicado nas Figuras.

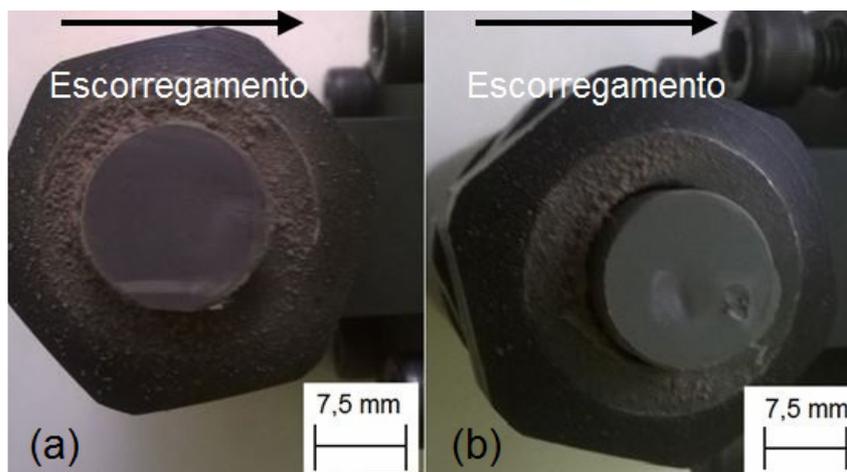


Figura 5.4 – Superfície das amostras ABS1 (a); e ABS2 (b) após alcançarem o limite PV.

A Tabela 5.2 mostra a temperatura máxima atingida em cada ensaio de limite PV. Em destaque estão a temperatura máxima e a velocidade de deslizamento correspondente ao ensaio em que o limite PV foi atingido. Notou-se que a temperatura dos ensaios em destaque esteve dentro da faixa de temperatura correspondente ao ponto de amolecimento do material informado pelo fabricante (82 °C a 104 °C).

Tabela 5.2 – Temperatura máxima atingida em cada ensaio.

Amostra	Velocidade de deslizamento	Força normal	Pressão de contato	Temperatura máxima do ensaio
[-]	[m/s]	[N]	[MPa]	[°C]
ABS1	1,36	300	1,7	80,8
	1,56			79,9
	1,76			79,6
	1,96			95,0
	2,16			93,1
	2,36			100,7
ABS2	2,16	200	1,1	79,1
	2,36			83,2
	2,56			91,7
	2,76			96,9

A Figura 5.5 mostra o disco de ferro fundido cinzento após a realização do ensaio de limite PV da amostra ABS2. O disco apresentou pequenos fragmentos da amostra ABS2 levemente aderidos originados por abrasão.



Figura 5.5 – Disco de ferro fundido cinzento após realização do ensaio de limite PV na amostra ABS2.

5.2 Análise de *Stick-slip*

Na Tabela 5.3 são apresentados os parâmetros como coeficiente de atrito estático e cinético, tempo de *slip*, variação de torque e frequência de eventos, medidos nos ensaios de *stick-slip* para PA6 x Aço e PA6 x ferro fundido cinzento. O par tribológico POM-C x Aço SAE 1020 não apresentou ocorrência do fenômeno *stick-slip* em nenhuma condição de ensaio, por isso não existem dados de resposta para essa amostra.

Tabela 5.3 – Resultado do processamento dos dados dos ensaios de *stick-slip*.

Par tribológico	Força normal aplicada	Pressão nominal	Ocorrência Sim ou Não	Eventos	Tempo de <i>slip</i>	μ_e	μ_c	$\Delta\mu$	ΔT	Potência de <i>Slip</i>	Somatório de potência de <i>slip</i>	Frequência de eventos
[-]	[N]	[MPa]	[S ou N]	[-]	[s]	[-]	[-]	[-]	[N.m]	[N.m/s]	[N.m/s]	[Hz]
PA6 x Aço	720	2,8	S	112	0,28	0,19	0,14	0,05	1,51	5,44	17,41	0,39
	576	2,3	S	130	0,27	0,19	0,14	0,06	1,32	4,84		0,43
	432	1,7	S	167	0,27	0,21	0,15	0,06	1,00	3,72		0,56
	288	1,1	S	242	0,25	0,23	0,18	0,06	0,64	2,52		0,81
	100	0,4	S	622	0,19	0,27	0,24	0,04	0,17	0,89		2,07
PA6 x Ferro fundido cinzento	720	2,8	S	26	0,45	0,43	0,20	0,24	7,16	16,00	49,35	0,09
	576	2,3	S	29	0,45	0,44	0,18	0,26	6,26	13,82		0,10
	432	1,7	S	42	0,44	0,42	0,17	0,25	4,46	10,01		0,14
	288	1,1	S	60	0,44	0,44	0,19	0,25	3,05	6,89		0,20
	100	0,4	S	140	0,42	0,55	0,28	0,27	1,12	2,64		0,47

Na Tabela 5.3, μ_c , μ_e e $\Delta\mu$ representam coeficientes de atrito cinético, estático e a variação de coeficientes de atrito, respectivamente, enquanto ΔT representa a variação do torque. O PA6 apresentou o fenômeno *stick-slip* em todas as condições de ensaio, mostrando maior severidade em relação ao coeficiente de atrito quando o deslizamento ocorreu sobre o contracorpo de ferro fundido cinzento.

Da Tabela 5.3, notou-se que os valores de coeficiente de atrito estático e cinético foram maiores em todas as condições de carga para o contracorpo de ferro fundido cinzento, destacando-se o atrito estático por apresentar valores aproximadamente 200% maiores. A diferença entre coeficiente de atrito estático e cinético apresentou-se menor para o par tribológico PA6 x Aço SAE 1020, justificando o maior número de eventos (400% maior) e a menor amplitude de *stick-slip* para este par. A menor amplitude de *stick-slip*, bem como o maior número de eventos do PA6 x Aço SAE 1020, para condições de força de 720 N, podem ser observados na Figura 5.6. O processamento dos dados para a obtenção dos gráficos apresentados na Figura 5.6 foi realizado com filtro do tipo passa-baixa, frequência de passe de 8 Hz, frequência de corte de 10 Hz, atenuação de 60 dB e janela tipo kaiser.

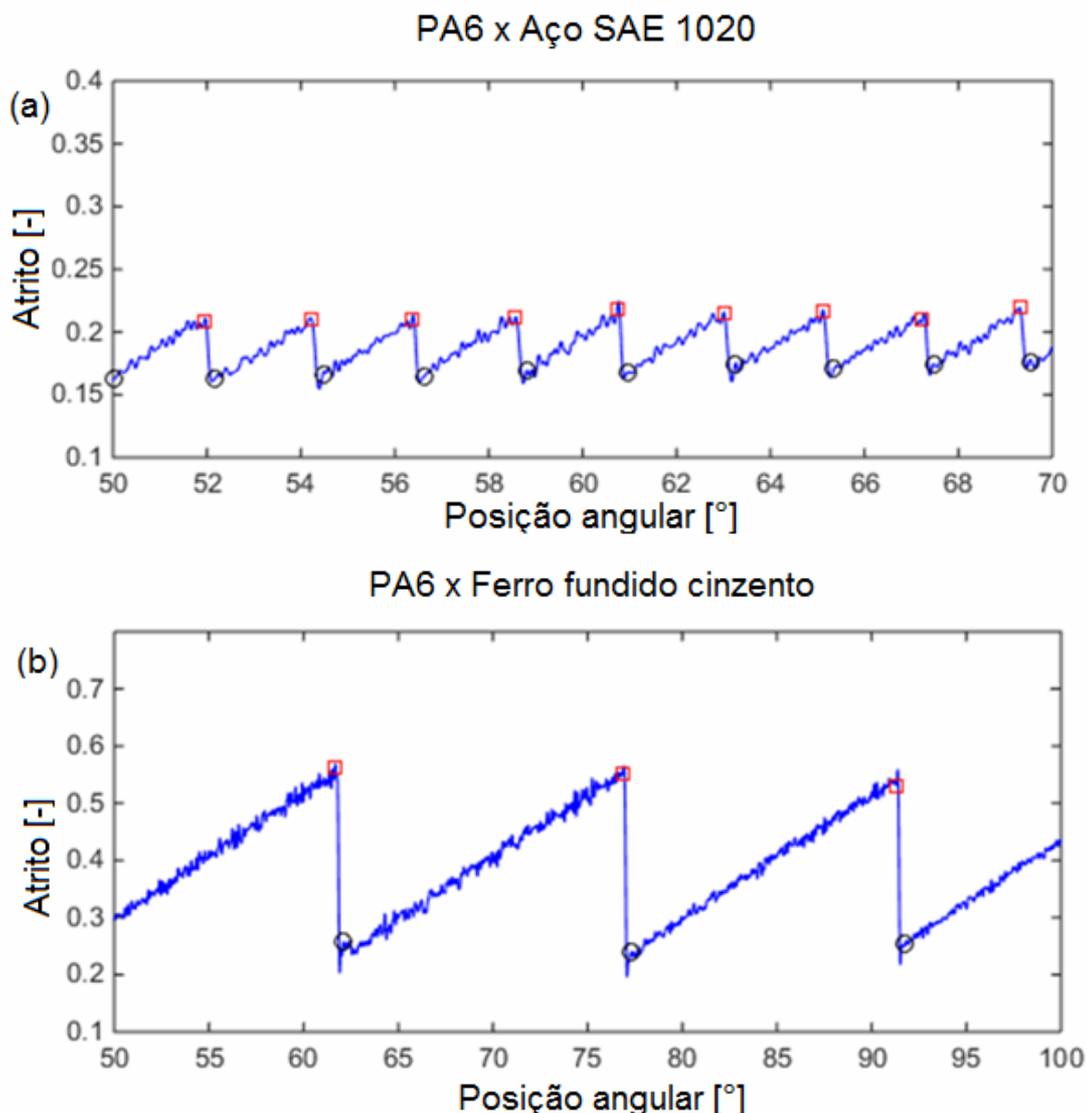


Figura 5.6 – Atrito durante o stick-slip para condições de força de 720 N para (a) PA6 x Aço SAE 1020 e (b) PA6 x ferro fundido cinzento.

Analisou-se graficamente as potências de *slip* do PA6 x Aço SAE 1020 e PA6 x ferro fundido cinzento, onde observou-se que, para cada valor de força normal aplicada, o *stick-slip* mostrou-se mais severo para o par PA6 x ferro fundido cinzento. Isso pode ser visto na Figura 5.7, onde está plotada a potência de *slip* média em função da carga aplicada em cada ensaio. Notou-se que o PA6 em contato com o ferro fundido cinzento apresentou valores de potência de *slip* aproximadamente 300% maiores para cada aplicação de força.

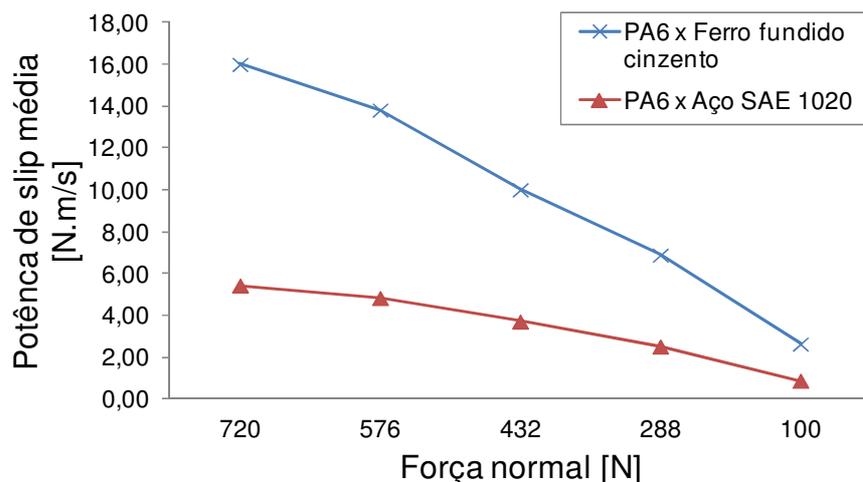


Figura 5.7 – Gráfico da força normal versus potência de *slip* média para PA6 contra aço e ferro fundido.

O comportamento apresentado pela poliamida PA6 atritada sobre o contracorpo de ferro fundido cinzento pode ser resultado de reação entre o lubrificante sólido e o contracorpo de ferro fundido cinzento. Esperava-se que o par tribológico PA6 x ferro fundido cinzento apresentasse menor potência de *slip* quando comparado ao par tribológico PA6 x aço SAE 1020 devido a maior presença de carbono (que possui propriedade lubrificante) no disco de ferro fundido cinzento.

6. CONCLUSÕES

Baseado no estudo preliminar feito através deste trabalho, concluiu-se que:

- O POM-C não apresentou *stick-slip* quando ensaiado com um contracorpo de aço SAE 1020;
- O PA6 caracterizou-se por apresentar o fenômeno vibratório *stick-slip* para todas as condições de ensaio empregadas, bem como para os dois contracorpos (aço SAE 1020 e ferro fundido cinzento);
- O par tribológico PA6 x ferro fundido cinzento apresentou a ocorrência do *stick-slip* de forma mais severa em relação à potência de *slip*, a qual mostrou-se aproximadamente 300% maior que o par PA6 x aço SAE 1020;
- O limite PV médio deste material foi de 3,52 MPa.m/s;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bartenev, G. M.; Lavrentev, V. V.; **“Friction and wear of polymers”**, Amsterdam, Elsevier, 1981.

Bayer, R. G.; **“Engineering Design for Wear”**, CRC Press, 2nd edition, 2004.

Bhushan, B.; **“Introduction to tribology.”** John Wiley & Sons, New York, 2002.

Booser, E. Richard; **“CRC HANDBOOK OF LUBRIFICATION: Theory and Practice of Tribology.”** v. 2. New York: CRC Press LLC, 1983.

Bowden, F. P.; Leben, L.; **“The nature of sliding and the analysis of friction.”** Proceedings of the Royal Society of London. Series A 169, pp. 371-391, 1939.

Callister, W. D.; Materials science and engineering, an introduction, John Wiley & Sons, Inc.; New York, 1991.

Canevarolo, S. V.; **“Ciência dos polímeros – um texto básico para tecnólogos e engenheiros”**, 2ª edição, Artliber, 2006.

Crawford, R. J.; **“Plastics engineering”**, 3rd ed., Oxford: Elsevier Science, 1998.

Ensinger, **“Ficha técnica de produtos”**. Disponível em: <http://ensinger.com.br/>. Acessado em 28/08/2016.

Franceschini, J.; **“Avaliação do fenômeno de stick-slip em materiais de fricção com utilização de um tribômetro.”** Dissertação de mestrado na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pp.104, 2014.

Franklin, S. E.; Kraker, A.; **“Investigation of counterface surface topography effects on the wear and transfer behavior of a POM – 20% PTFE composite.”** Wear, v. 255, 2003.

Gehr, **“Technical data sheets”**. Disponível em: <http://www.gehrplastics.com/>. Acessado em 28/08/2016.

Hoggmark-S.; Jacobsson, S. **“Tribologi - Friktion Smörjning Nötning.”** Ångströmlaboratoriet, 2011.

Ludema, K. C.; **“Friction, wear, lubrication”**, CRC Press, 1996.

Mano, E. B.; Mendes, L. C.; **“Introdução a polímeros.”** 2ª edição, Edgard Blucher, São Paulo, 1999.

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.

Neis, P. D.; De Baets, P.; Ost, W.; Perez Delgado, Y.; Loccufer, M.; Al-Bender, F.; Ferreira N. F.; Lorini, F. J.; **“Investigation of the dynamic response in a dry friction process using a rotating stick-slip tester.”** Wear, Elsevier, 2011.

Neis, P. D.; Ferreira, N. F.; Poletto, J. C.; Motozo, L. T.; Masotti, D.; **“Quantification of brake creep groan in vehicle tests and its relation with stick-slip obtained in laboratory tests”**, Journal of Sound and Vibration, vol. 369, pp. 63-76, 2016.

Neis, P. D., **“Projeto e construção de um tribômetro para estudos relacionados a materiais de fricção veiculares”**, Dissertação de Mestrado, 2008.

Nielsen. L. E. **“Mechanical Properties of Polymers.”** Reinhold publishing corporation, 1967.

Nunes, R. A.; **“Abrasão, desgastes e atrito sob deslizamentos de recobrimento preparados por aspersão térmica a partir de PET pós consumo.”** Tese de Doutorado, Universidade Federal de Ouro Preto, 2008.

Pogačnik, A.; Kalin, M.; **“Parameters influencing the running-in and long-term tribological behaviour of polyamide (PA) against polyacetal (POM) and steel”**, Wear. 290–291 (2012) 140–148. doi:10.1016/j.wear.2012.04.017.

Quaglioni, V.; Dubini, P.; Ferroni, D.; Poggi, C.; **“Influence of counterface roughness on friction properties of engineering plastics for bearing applications.”** Materials and design, v.30, 2009.

Rosato, D. V.; **“Plastics Engineered Product Design.”** Elsevier, 2003.

Silva, C. H.; **“Degradação de UHMWPE e de POM devido à ação tribológica contra aço inoxidável e alumina.”** Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2003.

Silva, R. C. L.; **“Desgaste de polímeros estruturais de engenharia em contato de deslizamento com cilindro metálico”** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2010.

Stoeterau, R. L.; Leal, L. C. **“Apostila de Tribologia.”** Departamento de Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.

Unal, U.; Mimaroglu, A.; **“Influence of teste conditions on the properties of polymer – Industrial Lubrification and Tribology.”** 2003.

Wiebek, H., Harada I.; **“Plásticos de Engenharia”**, Artliber, 2005.

Yamagushi, Y.; **“Tribology of plastic materials – their characteristics and applications to sliding component.”** Tribology series, nº 16, Elsevier, 1990.

Zanetti, G. L. P. G. **“Análise do comportamento tribológico de plásticos utilizando um tribômetro.”** Trabalho de conclusão do curso em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, pp. 22, 2015.

Zhao, W.; Wang, Y.; Wang X.; Wu, D.; **“Fabrication, mechanical performance and tribological behaviors of polyacetal-fiber-reinforced metakaolin-based geopolymeric composites.”**, Ceramics International 42 (2016) 6329–6341.