

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA SOBRE O LIMITE PRESSÃO-
VELOCIDADE (PV) DO POLIACETAL COPOLÍMERO COM ADITIVO NEGRO-DE-FUMO

por

Edson Stochero Velozo

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 2019.

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

Velozo, Edson Stochero

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA SOBRE O LIMITE PRESSÃO-VELOCIDADE (PV) DO POLIACETAL COPOLÍMERO COM ADITIVO NEGRO-DE-FUMO / Edson Stochero Veloza. -- 2019.

20 f.

Orientador: Patric Daniel Neis.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto Alegre, BR-RS, 2019.

1. POM-C. 2. limite PV. 3. tribologia. I. Neis, Patric Daniel, orient. II. Título.

Edson Stochero Velozo

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA SOBRE O LIMITE PRESSÃO-VELOCIDADE (PV) DO POLIACETAL COPOLÍMERO COM ADITIVO NEGRO-DE-FUMO

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 CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Mario Roland Sobczyk Sobrinho
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Patric Daniel Neis

Comissão de Avaliação:

Prof. Patric Daniel Neis

Prof. Ney Francisco Ferreira

Prof. Fabiano Disconzi Wildner

Porto Alegre, dezembro de 2019.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pelo dom da vida e por me proporcionar conviver com tantas pessoas maravilhosas, que contribuíram para o meu crescimento pessoal e profissional.

Agradeço aos meus pais Salvador e Helena, por serem o meu porto seguro, por todo apoio e carinho incondicional, apesar da distância física, e por não medirem sacrifícios para que eu pudesse alcançar os meus objetivos.

A minha irmã Kelly, por todos os momentos de convivência, incentivo e auxílio durante a minha trajetória.

A minha namorada Bruna, pela paciência, compreensão e carinho.

Ao professor Patric Daniel Neis, pela orientação, disponibilidade permanente e ativa participação durante a elaboração do trabalho.

Aos amigos Diogo Buneder e Adriele Jacques Amaral, por todo auxílio durante esta etapa final do curso e pelos momentos de convivência e estudo.

Ao amigo Eduardo Moraes da Cunha por dividir ao longo de vários anos os fardos no Exército e os desafios das classes desta Universidade.

Aos integrantes do Laboratório de Tribologia da UFRGS, pelo valioso assessoramento durante a realização do trabalho, em especial ao colega Gustavo Gehlen pela ajuda com os ensaios.

Aos meus familiares e amigos pelo apoio e torcida.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – 2019

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA SOBRE O LIMITE PRESSÃO-VELOCIDADE (PV) DO POLIACETAL COPOLÍMERO COM ADITIVO NEGRO-DE-FUMO

Veloza, Edson Stochero

edsonvelozo@hotmail.com

Resumo: No presente trabalho buscou-se avaliar o limite PV de um polímero comercial (POM-C) aditivado com negro-de-fumo em faixas de temperatura distintas, quando atritado em um contracorpo de ferro fundido cinzento. O ensaio de desgaste foi executado em um tribômetro tipo pino-sobre-disco, variando-se a velocidade de deslizamento e a temperatura inicial dos testes. Foram utilizados dois lotes diferentes do mesmo polímero durante os ensaios, sendo que um deles possuía histórico térmico, originado por utilização prévia em ensaios de desgaste. Foi identificado o limite PV para as temperaturas iniciais de 30 °C, 55 °C e 85 °C. Para as temperaturas de 30 °C e 55 °C verificou-se dois limites PV distintos na mesma temperatura. Os ensaios do lote de amostras que havia sido afetado pelo histórico térmico, realizados nas temperaturas de 55 °C e 85 °C, apresentaram um comportamento fortemente influenciado pela temperatura, exibindo falha térmica localizada em algumas velocidades. Observou-se que as amostras testadas no presente estudo não apresentaram efeito de variação do atrito na condição de atingimento do limite PV. Em mais alta temperatura, formou-se mais filme no disco, reduzindo o desgaste em relação aos ensaios de mais baixa temperatura.

Palavras-chave: POM-C, limite PV, tribologia.

Abstract. The present paper aimed to evaluate the PV limit of a commercial polymer (POM-C) filled with carbon black in different temperature ranges when rubbed against a gray cast iron counterpart. The wear test was carried out through a pin-on-disk tribometer, varying the sliding speed and the initial temperature of the tests. Two different batches of the same polymer were used during the tests. One of the batches had a thermal history, originated by previous use in wear tests. The PV limit was identified for the initial temperatures of 30 °C, 55 °C and 85 °C. For the temperatures of 30 °C and 55 °C two distinct PV limits were found in the same temperature. The tests from the batch of samples which had been affected by the thermal history, performed at the temperature of 55 °C and 85 °C, presented a behavior strongly influenced by the temperature, showing localized thermal failure at some speeds. It was observed that the samples tested in the present study showed no effect of friction variation on the condition where the PV limit was reached. At higher temperature, more film formed on the disc, reducing wear compared to lower temperature tests.

Keywords: POM-C, PV limit, tribology.

1. INTRODUÇÃO

Holmberg e Erdemir (2017), após analisarem os quatro principais setores que consomem energia – transportes, manufatura, geração de energia e residencial – concluíram que 23% do consumo mundial de energia são originados por contatos tribológicos. Deste total, 20% é empregado para superar o atrito, e 3% é utilizado para remanufaturar peças desgastadas e equipamentos de reposição, devido ao desgaste e a falhas relacionadas ao atrito. Antigamente, a utilização de metais como materiais de engenharia para aplicações tribológicas era a alternativa mais empregada. Contudo, a crescente demanda por materiais mais eficazes fomentou o desenvolvimento de novas tecnologias utilizando materiais mais baratos, leves, menos nocivos ao meio ambiente e adequados ao emprego especial para cada necessidade. Neste contexto, os compostos poliméricos podem ser alternativas para materiais de desgaste em substituição a algumas ligas metálicas. Além disso, os metais possuem algumas limitações quando comparados aos polímeros – como por exemplo, o seu peso – e são menos flexíveis quanto à inserção de aditivos (HOLMBERG E ERDEMIR, 2017).

Atualmente, os polímeros e compósitos poliméricos se estabeleceram como materiais valiosos em inúmeras aplicações tribológicas. Os polímeros podem apresentar características únicas, tais como peso reduzido e excelentes propriedades tribológicas, como boa resistência ao desgaste e baixo atrito, além de receber diversos tipos de aditivos, inclusive lubrificantes (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2005). Os polímeros são ainda favorecidos por um elevado índice de mérito devido a sua baixa densidade. Este índice avalia o desempenho estrutural do material e inclui a viabilidade econômica do projeto (ALMEIDA; SOUZA, 2015). Adicionalmente, as características tribológicas também podem ser um fator de decisão para a escolha do melhor material a depender da sua aplicação.

Um fator interessante para a análise da viabilidade técnica de aplicar um polímero como superfície de contato tribológico é o conhecimento do limite Pressão-Velocidade (PV) do material, onde “P” é definido como a pressão de contato nominal e “V” é a velocidade de deslizamento. Stachowiak e Batchelor (2005) descreveram o limite de PV como um conceito empírico que define as condições em que ocorrerá um rápido desgaste de um polímero. Assim, acima do limite PV de um determinado material, haverá desgaste severo, o que levará a falha por desgaste. Abaixo do limite de PV, o desgaste é visto como moderado, isto é, um processo muito mais lento e controlado, envolvendo a liberação de pequenas partículas de desgaste (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2005).

Cada polímero tem seu próprio limite de PV e os catálogos dos fabricantes de polímeros de engenharia não costumam mencionar esta importante propriedade. Apenas limitam-se a fornecer informações de atrito e desgaste de forma qualitativa, reservando-se a informar se o material é “muito” ou “pouco” resistente. Desta forma, observa-se que o limite PV ainda é um conceito pouco explorado pela literatura. Além disso, não há estudos que relacionam a propriedade limite PV com a temperatura em testes de deslizamento, embora pesquisadores costumam mencionar que o limite PV esteja intimamente ligado à temperatura (LUDEMA, 1996).

Carrasai (2016) e Zanetti (2015), ambos ex-integrantes do grupo de pesquisadores do Laboratório de Tribologia (LATRIB) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, desenvolveram e aplicaram uma metodologia com o objetivo de realizar ensaios de curta duração (120 s), e sem repetição, para a obtenção do limite PV dos termoplásticos poliamida 6 (PA6) e acrilonitrilina butadieno estireno (ABS). Em seus estudos, Carrasai e Zanetti não analisaram a influência da temperatura durante a realização dos testes para determinação do limite PV dos materiais.

Com base no acima exposto, e em vista da ausência de estudos sobre o comportamento do limite PV em diferentes temperaturas, surgiu a questão de pesquisa: qual é o desempenho tribológico de um polímero comercial – poliacetal copolímero (POM-C) com aditivo negro-de-fumo – e o seu limite de Pressão-Velocidade quando submetido a diferentes temperaturas e velocidades de

deslizamento? Portanto, o objetivo geral do trabalho é avaliar o limite PV do referido polímero – atritado em um contracorpo de ferro fundido cinzento em ensaios pino-sobre-disco – sob diferentes condições de temperatura e velocidade. Além disso, buscou-se desenvolver uma metodologia de ensaio, estudar os mecanismos de desgaste envolvidos nos testes, e propor um modelo simplificado para explicar os fenômenos através do levantamento do diagrama Pressão-Velocidade-Temperatura (PVT).

2. FUNDAMENTAÇÃO

2.1 Polímeros

De acordo com Wiebeck e Harada (2005), o polímero é definido como um material orgânico ou inorgânico, de elevada massa molar pela repetição dos *meros*. É uma macromolécula formada por ligações covalentes (compartilhamento de elétrons). *Poli*, em grego, significa muitos e *meros*, partes. Com relação ao comportamento frente à elevação de temperatura, podemos classificar os polímeros em: termoplásticos e termorrígidos (termofixos).

Termoplásticos são os polímeros que têm a capacidade de amolecer, fundir e fluir quando submetidos a um aumento de temperatura e pressão. Ao retirar esses elementos, o polímero solidifica-se e adquire o formato do molde no qual foi colocado (NUNES; LOPES, 2014). Os polímeros termoplásticos têm estruturas moleculares lineares e ramificadas, eles amolecem quando são aquecidos e endurecem quando são resfriados. Estes processos são totalmente reversíveis e podem ser repetidos (CALLISTER; RETHWISCH, 2016). Portanto, os termoplásticos podem ser reciclados. Exemplos de termoplásticos incluem: polietileno, poliestireno, policloreto de vinila (PVC) e o poliacetil, objeto de estudo do presente trabalho.

Os polímeros termorrígidos tornam-se permanentemente rígidos durante a formação da sua rede. Esses polímeros apresentam ligações cruzadas covalentes entre as cadeias moleculares adjacentes. Durante os tratamentos térmicos, essas ligações prendem as cadeias umas às outras para resistir aos movimentos de vibração e de rotação da cadeia em temperaturas elevadas. Os polímeros termorrígidos são, em geral, mais rígidos e mais resistentes do que os termoplásticos, e também possuem melhor estabilidade dimensional (CALLISTER; RETHWISCH, 2016). Os termorrígidos não são recicláveis. Como exemplos, tem-se: epóxis, resinas fenólicas e algumas resinas poliéster.

2.1.1 Limite Pressão-Velocidade (PV)

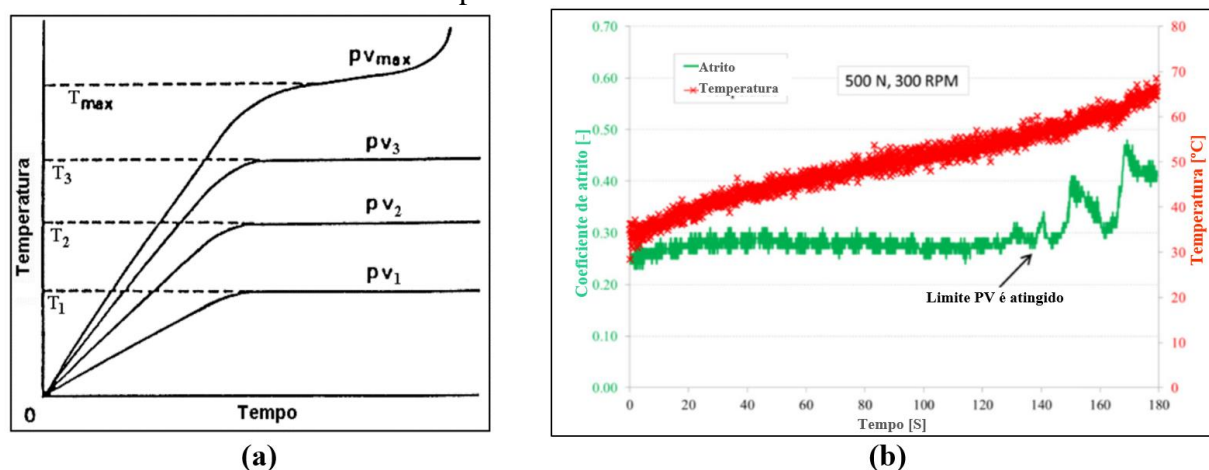
De acordo com Gerdeen e Rorrer (2012), o limite PV é um valor crítico a partir do qual o sistema tribológico não desempenha a sua função adequadamente, ou seja, quando ultrapassado este limite o desgaste altera do regime moderado para o severo. O limite PV geralmente é baseado no valor máximo permitido do produto entre Pressão-Velocidade, onde “P” é a pressão de contato e “V” é a velocidade de deslizamento. O fator é amplamente utilizado como critério de desempenho para materiais de desgaste (ABDELBARAY, 2014).

O produto PV, juntamente com o coeficiente de atrito, constitui a energia de entrada na interface deslizante. Se a energia de entrada não é removida a uma taxa suficiente, a temperatura na interface se eleva até ocorrer fusão (BEKHET, 1999). Em seu trabalho sobre o valor PV, Silva (2010) ressalta que o aumento na velocidade não equivale a um aumento na pressão de contato, cada um destes dois parâmetros exerce influência específica sobre o limite PV.

Silva (2003) utilizou a Figura 1-(a) para explicar que a temperatura no contato de deslizamento estabilizará em patamares cada vez mais elevados quanto mais severas forem as condições de pressão e velocidade (PV). A condição PV_{max} representa a situação 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. PV_{max} é considerado o limite PV do polímero.

Segundo Bayer (2004), outra forma de se identificar o limite PV é pela instabilidade do atrito. O autor relata que, quando o material atinge o limite PV durante os testes de deslizamento, poderá ocorrer um aumento substancial na força de atrito ou na temperatura. Neis *et al.* (2017), em seus estudos sobre as propriedades tribológicas de diferentes tipos de poliamida 6 (PA6), observaram que antes de o material atingir o limite PV, o atrito instantâneo permanecia relativamente estável e a temperatura seguia um perfil térmico típico. No entanto, quando o limite PV foi atingido, o atrito se tornou instável e a temperatura apresentou aumento considerável, conforme Figura 1-(b).

Figura 1 - Fatores relacionados ao limite PV: (a) alteração na temperatura no contato; (b) alterações na temperatura e coeficiente de atrito.



Fonte: (a) adaptado de Yamaguchi (1990); (b) adaptado de Neis *et al.* (2017).

2.1.2 Poliacetal copolímero (POM-C)

O poliacetal copolímero ou polioximetileno copolímero (POM-C) é um termoplástico de engenharia amplamente utilizado em muitos setores industriais por apresentar excelentes propriedades físicas, mecânicas, auto lubrificantes e químicas (RAHMAN; *et al.*, 2016). Segundo Duan *et al.* (2005), o POM é um termoplástico de engenharia de extensa utilização, que consiste na repetição de ligações carbono-oxigênio na forma de grupos oximetileno (OCH₂). Samyn e Baets (2005) observaram que o poliacetal é largamente utilizado para fazer pequenas rodas dentadas, rolamentos de esferas, peças de precisão, produtos automotivos e eletrônicos de consumo.

A maior utilização do poliacetal está na substituição dos metais. Sua rigidez, baixo peso, estabilidade dimensional e resistência à corrosão, ao desgaste e à abrasão, permitem substituir o bronze, ferro fundido e zinco pelo poliacetal em alguns casos (WIEBECK; HARADA, 2005).

Entre os aditivos, o negro-de-fumo ocupa um lugar de destaque na indústria por melhorar as propriedades físicas e mecânicas dos compostos e artefatos – propriedades tais como resistência à flexão, resiliência, resistência à abrasão e módulo de elasticidade – além de reduzir custos e não aumentar de forma considerável a densidade da composição quando comparado com as cargas inorgânicas. O negro-de-fumo é composto por carbono elementar cristalizado na forma de partículas esféricas isoladas ou agregadas, todas de dimensões coloidais (entre 0,1 e 0,001 nanômetros) (WIEBECK; HARADA, 2005).

Segundo informações do catálogo de um grande fabricante de materiais poliméricos, o POM-C aditivado com negro-de-fumo condutivo – objeto de estudo desse trabalho – tem como principais características: alta resistência mecânica, boa usinabilidade, boa resistência química, alta tenacidade, boas propriedades de deslize, boa resistência à radiação ultravioleta e ao intemperismo (ENSINGER, 2017). A Tabela A1 exibida no Anexo A apresenta algumas propriedades do material de acordo com o fabricante.

2.1.3 Influência da temperatura nos polímeros

De acordo com Almeida (2015), os polímeros são materiais sensíveis às variações de temperatura e podem ter sua estrutura modificada em função dessa variação. O comportamento térmico de um polímero está diretamente relacionado à sua composição química, sua estrutura, bem como à presença de aditivos. É normal que eles apresentem temperaturas que marcam as transições térmicas. Uma delas, denominada temperatura de transição vítrea (T_g), ocorre devido ao início da movimentação das cadeias da fase amorfa do material. Nesse ponto as cadeias, ou parte delas, começam a se movimentar devido à energia dada a elas pelo aquecimento do polímero. Quando o material plástico, por meio do resfriamento, alcança temperaturas inferiores à T_g , ele se torna rígido e conseqüentemente frágil. Entretanto, quando está sendo aquecido (acima de T_g), tem seu comportamento alterado para flexível e borrachoso (ALMEIDA, 2015).

Outras temperaturas importantes para o entendimento do comportamento do polímero são: temperatura de fusão cristalina (T_f) e temperatura de cristalização (T_c). Na T_f as regiões cristalinas desaparecem com o processo de fusão durante o aquecimento e há uma alteração do estado sólido para o fundido. Por outro lado, a T_c é definida como a temperatura na qual os polímeros cristalizáveis atingem uma ordenação espacial que permita a formação de uma estrutura cristalina. A cristalização acontece em temperaturas entre T_g e T_f ($T_g < T_c < T_f$) (NUNES, 2014).

Um fator que pode influenciar o comportamento dos polímeros é a sua cristalinidade. Becerra (2015), em seu estudo sobre o efeito da cristalinidade nas propriedades dos polímeros durante a aplicação do tratamento térmico de recozimento, relata que o aumento do grau de cristalinidade faz com que o material seja mais denso, menos dúctil e mais duro. Para polímeros termoplásticos, como o polipropileno e o polietileno, a temperatura de recozimento é próxima à temperatura de fusão (T_f) e o polímero se torna mais rígido após ser submetido ao tratamento térmico (BECERRA, 2015). Kurusu (2011) estudou o efeito do tratamento térmico em outro termoplástico, o poli(3-hidroxibutirato) (PHB), e concluiu que após a aplicação do recozimento ocorreu o aumento da cristalinidade.

Polímeros termoplásticos geralmente têm reduzida condutividade térmica e baixa temperatura de fusão em comparação com metais (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017). Quando os polímeros fundem, seus coeficientes de atrito e taxas de desgaste são alterados. O mecanismo de desgaste relacionado a esse comportamento pode ser classificado como “desgaste por fusão” (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2005). O poliacetal copolímero exibe boa retenção de propriedades quando exposto ao ar e a temperaturas até 105 °C por um longo período de tempo (WIEBECK; HARADA, 2005).

Bekhet (1999) estudou o comportamento de outro polímero, o polipropileno, deslizando contra o aço. Ele mencionou que a temperatura gerada na interface do contato devido ao atrito foi suficiente para fundir a superfície polimérica, o que, segundo ele, facilita a transferência de polímero para a superfície de aço por adesão (ou aderência). Segundo Hutchings e Shipway (2017), alterações importantes no polímero ocorrem quando a temperatura na interface atinge o ponto de amolecimento do polímero. Acima deste ponto, a taxa de desgaste é alta e o polímero é capaz de soltar mais material, que se adere na contraparte.

Assim, outra temperatura de interesse é a temperatura de amolecimento do polímero. Manrich (2005) apresenta a temperatura de amolecimento como uma temperatura situada entre a T_g e a T_f . De acordo com o autor ela é obtida através do teste denominado Vicat. Este teste é regulamentado por norma específica sendo que a temperatura de amolecimento é obtida quando uma agulha de 1mm penetrar em um corpo de prova imerso em óleo, onde a temperatura varia a uma taxa constante.

2.1.4 Mecanismos de desgaste

Atrito e desgaste são causados por interações microscópicas entre superfícies que estão em contato mecânico e deslizam uma contra a outra. As respostas a essas interações são resultantes dos materiais, das características geométricas e topográficas das superfícies e das condições globais sob as quais estas superfícies são submetidas durante o deslizamento, ou seja, carregamento, temperatura, atmosfera, tipo de contato, entre outros. Todos os aspectos físicos, químicos e geométricos das faces em contato, e a atmosfera ao redor, afetam as interações superficiais e, portanto, também as características do sistema (SILVA, 2010).

De acordo com o acima exposto, podem ocorrer diversos tipos de desgaste no contato polímero metal. A seguir, serão apresentados os dois tipos de desgaste mais comuns: abrasão e adesão. A Figura 2 ilustra esses mecanismos.

O desgaste abrasivo ocorre sempre que um objeto sólido é atritado contra um material de dureza igual ou superior, o que causa a perda de material (STACHOWIAK, BATCHELOR, 2005). A literatura indica dois tipos de desgaste abrasivo: a dois corpos e a três corpos. O primeiro pode ser exemplificado pela ação de uma lixa sobre a superfície, as asperezas duras ou grãos rígidos passam pela superfície como uma ferramenta de corte. No segundo, as partículas são livres para deslizar e rolar sobre a superfície (HUTCHINGS, 1992).

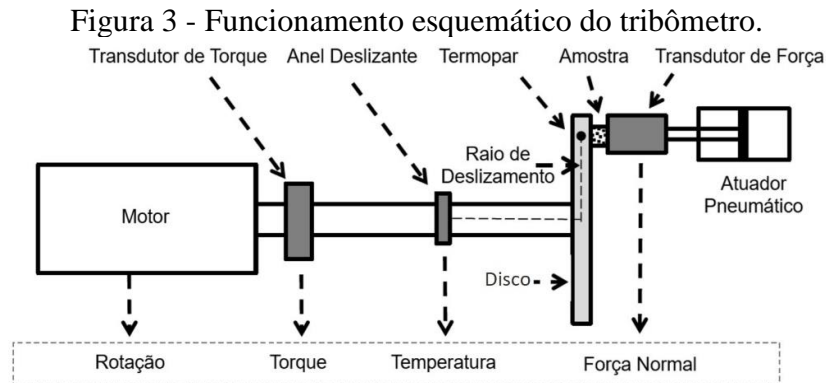
O desgaste adesivo é caracterizado por altas taxas de desgaste e um coeficiente de atrito elevado e instável (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2005). O desgaste adesivo ocorre quando uma superfície é lisa e envolve a transferência de polímero para o contracorpo mais duro (metal), e a consequente remoção de detritos de desgaste conhecidos por *debris* (HUTCHINGS, 1992). No desgaste adesivo de alguns polímeros há formação de um filme de transferência, onde o material é transferido de uma superfície para a outra, antes de ser liberado como partícula de desgaste (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2005). A formação de filme é caracterizada pelo cisalhamento acompanhado do destacamento de fragmentos de polímeros que se fixam sobre o contracorpo metálico, geralmente seguido por uma diminuição do atrito, pois o contato deixa de ser metal-polímero e passa a ser polímero-polímero (SILVA, 2010).



Fonte: adaptado de Stachowiak e Batchelor (2005).

3. METODOLOGIA

O tribômetro utilizado durante os testes pino-sobre-disco está ilustrado na Figura 3 (NEIS; *et al.*, 2017). O tribômetro é equipado com vários transdutores para registrar dados como torque, temperatura e força normal. A temperatura é adquirida por um termopar tipo K posicionado no meio da espessura do disco rotativo. Todos os dados são coletados por uma placa de aquisição e controlador instalados em um computador.



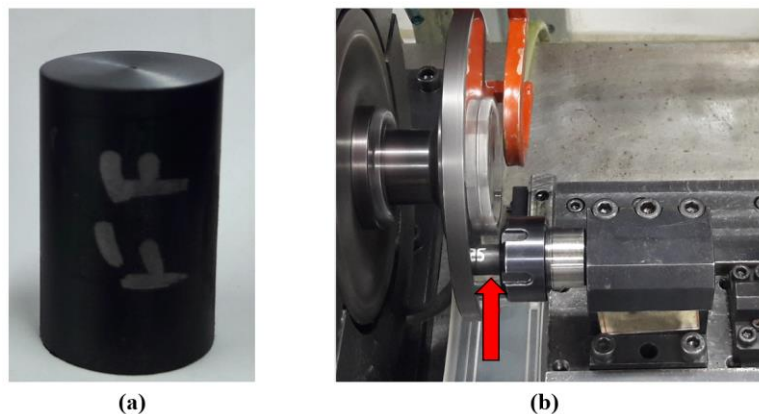
Pavlak *et al.* (2017) calcularam a repetibilidade e incertezas dos instrumentos utilizados no tribômetro do LATRIB. Os resultados são mostrados na Tabela B1 do Anexo B.

O coeficiente de atrito (μ) foi calculado a partir do torque (T [N.m]), do raio (R [m]) e da força normal (F_N [N]) da amostra sobre o disco, conforme a equação 1:

$$\mu = \frac{T}{RF_N} \quad (1)$$

As amostras de POM-C empregadas no presente estudo foram obtidas em forma de barras com diâmetro de 30 mm, sendo posteriormente usinadas para o diâmetro de 15 mm, com o objetivo de atender aos requisitos dimensionais do tribômetro, conforme Figura 4.

Figura 4 - Configuração e montagem das amostras: (a) amostra POM-C utilizada no ensaio; (b) amostra montada no tribômetro sendo atritada no disco de ferro fundido.



Fonte: arquivo pessoal.

O disco sobre o qual as amostras foram atritadas (contracorpo) era composto por ferro fundido cinzento. Antes de cada ensaio, o disco foi lixado empregando-se lixas de granulometrias de 240, 360, 500 e 1200, na respectiva sequência, de forma a obter uma rugosidade superficial homogênea do disco para todos os ensaios.

Foram adquiridos 2 lotes de POM-C (lote 1 e lote 2), em instantes de tempo distintos. Nos ensaios do lote 1, utilizou-se 54 amostras, totalmente novas. Para os ensaios do lote 2, utilizou-se 17 amostras aproveitando-se as suas duas extremidades. Os diferentes tipos de ensaios foram nomeados da seguinte forma: “ensaio A”, “ensaio B”, “ensaio C” e “ensaio D”. As amostras do lote 2 foram reutilizadas e, desta forma, foram parcial (ensaio C) ou totalmente (ensaios D) afetadas pelo histórico térmico dos ensaios anteriores. As peculiaridades de cada ensaio encontram-se descritas na Tabela 1.

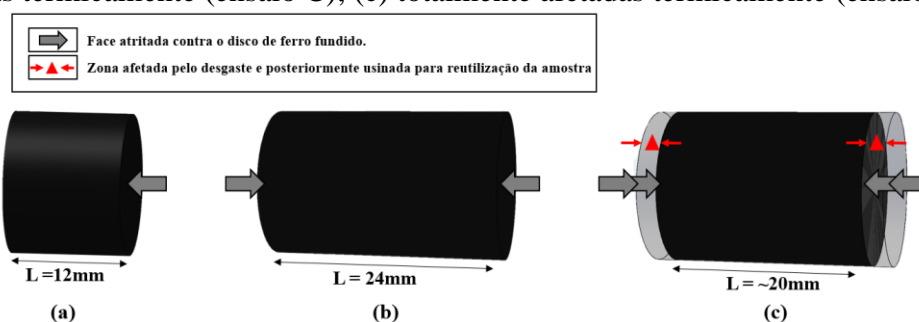
Tabela 1 - Detalhamento das amostras por ensaio.

Ensaio	Lote de material	Amostra nova	Lados da amostra utilizados	Comprimento da amostra [mm]	Influência da temperatura na amostra antes da realização do ensaio
A	1	Sim	1	12	Não afetada termicamente. Ver esquema figura 5-a.
B					
C	2	Sim	2	24	Parcialmente afetada. Ver esquema figura 5-b.
D		Não	2	Aprox. 20	Totalmente afetada. Ver esquema figura 5-c.

Fonte: elaboração própria.

O esquema apresentado na Figura 5-a ilustra as amostras completamente novas do lote 1 que foram utilizadas nos ensaios A e B. O esquema da Figura 5-b apresenta as amostras novas do lote 2 utilizadas no ensaio C. Por fim, o esquema da Figura 5-c mostra as amostras do ensaio D, que foram reutilizadas do ensaio C após terem sido usinados e removidos os dois lados (faces) afetados pelo desgaste do ensaio anterior. “L” é especificado como comprimento da amostra.

Figura 5 - Esquema das amostras: (a) não afetadas termicamente (ensaios A e B); (b) parcialmente afetadas termicamente (ensaio C); (c) totalmente afetadas termicamente (ensaio D).



Fonte: elaboração própria.

As amostras do ensaio C (Fig. 5-b) foram parcialmente afetadas termicamente pois tiveram os seus dois lados utilizados para testes (inicialmente uma extremidade para uma velocidade e depois a outra extremidade para outra velocidade, ambas pertencentes a séries diferentes conforme será apresentado na Tab. 2). Observou-se que ao se proceder o ensaio na segunda extremidade da amostra, pode ter ocorrido interferência do histórico térmico do ensaio realizado na extremidade do lado oposto e, conseqüentemente, esta variação de temperatura modificou algumas propriedades do polímero. Este histórico térmico foi originado pela temperatura inicial a qual a amostra foi submetida e variação de temperatura em decorrência da realização do ensaio de atrito.

Por outro lado, para as amostras do ensaio D (Fig. 5-c) definiu-se como totalmente afetadas termicamente, uma vez que foram reaproveitadas daquelas utilizadas no ensaio C após uma pequena remoção de material da face mediante o processo usinagem. Esta usinagem da zona afetada pelo desgaste não foi suficiente para apagar o histórico térmico deixado após a realização do ensaio C. Com isto, o histórico térmico do ensaio C permaneceu e afetou o desempenho das amostras utilizadas no ensaio D, como será mostrado na seção de resultados.

Definiram-se as temperaturas iniciais de testes em 30 °C, 55 °C e 85 °C. Estes valores foram propositalmente escolhidos para ficarem abaixo das temperaturas de serviço do material, sendo 100 °C para o parâmetro de longa duração e 140 °C para o de curta duração (ENSINGER, 2017).

A Tabela 2 ilustra as condições do ensaio. Foi empregada a força normal de 200 N para exercer a pressão sobre a amostra. A aquisição de dados foi realizada na taxa de 100 Hz. Em cada série de velocidade utilizou-se uma diferente amostra de polímero. Cada série de velocidades foi repetida 10

vezes sem a amostra ser retirada do tribômetro. Cada repetição durou 60 s. Nos ensaios do lote 1 foram suprimidas as duas primeiras velocidades 1,0 e 1,1 m/s.

Tabela 2 - Condições de ensaio.

Ensaio	Série (Amostra)	Temperatura inicial (°C)	Velocidade inicial (m/s)	Incremento de velocidade (m/s)
A	1 – 9	30	1,2	Incrementos de 0,1 por série até atingir velocidade final de 2,0.
	10 – 18	55		
	19 – 27	85		
B	28 – 36	30	1,2	Incrementos de 0,1 por série até atingir velocidade final de 2,0.
	37 – 45	55		
	46 – 54	85		
C	55 – 65	30	1,0	Incrementos de 0,1 por série até atingir velocidade final de 2,0.
	66 – 76	55		
	77 – 87	85		
D	88 – 98	30	1,0	Incrementos de 0,1 por série até atingir velocidade final de 2,0.
	99 – 109	55		
	110 – 120	85		

Fonte: elaboração própria.

As amostras foram pesadas em uma balança de precisão com resolução de 0,0001 g antes e após o término de cada série de velocidade, com o objetivo de obter o desgaste das amostras.

Para os ensaios A, B e D optou-se, adicionalmente, por capturar e mensurar a massa de detritos poliméricos (*debris*) que caíam do polímero e do disco de ferro fundido ao final de cada série de velocidade. O objetivo foi mensurar, a partir de uma relação com a perda de massa total, a massa de *debris* que ficou aderida no disco. Desta forma, durante a realização dos ensaios, os *debris* que caíam do disco e da amostra eram coletados em um pote.

Por ocasião da finalização da série completa de 10 repetições, retirava-se a amostra do tribômetro, fotografava-se a pista de atrito no disco e capturava-se a imagem do referido corpo de prova através de um estereoscópio da Zeiss.

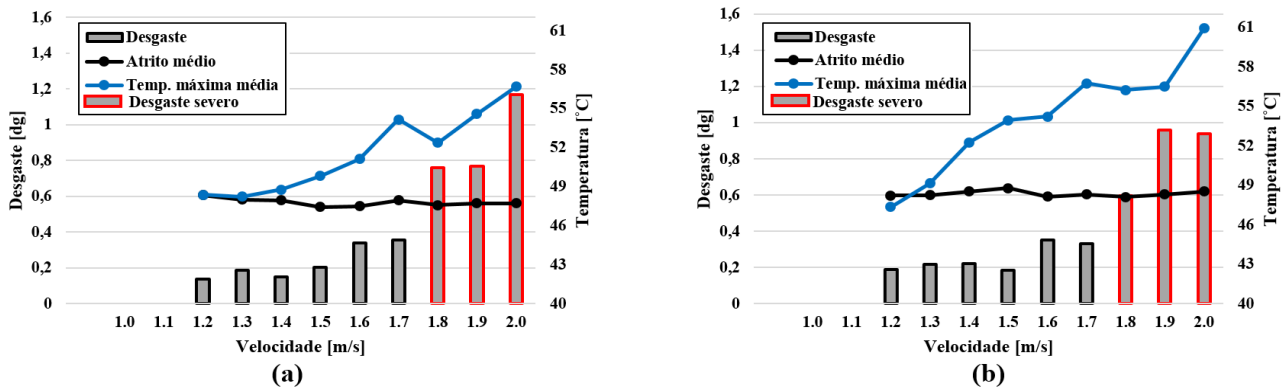
O critério utilizado para a identificação do desgaste severo, e consequente definição do limite PV, consistiu na análise conjunta – em cada velocidade de ensaio – entre o desgaste apresentado pela amostra, o filme aderido no disco e a quantidade de material rejeitado. Desta forma, verificou-se os desgastes ocorridos e, caso um determinado desgaste fosse superior ao dobro da média dos desgastes anteriores, tornava-se um indicativo para a definição do limite PV. Aliado a isto, verificava-se o filme aderido no disco com relação à sua homogeneidade e quantidade aderida. Caso o filme aderido no disco fosse homogêneo, tornava-se indicativo de desgaste moderado. Por outro lado, caso o filme fosse heterogêneo, era indicativo de desgaste severo.

4. RESULTADOS

4.1 Limite PV a 30 °C

A Figura 6 mostra os resultados de desgaste das amostras do lote 1 obtidos a partir da temperatura inicial de 30 °C. Observa-se que, para ambos os ensaios A (Fig. 6-a) e B (Fig. 6-b), o limite PV foi atingido em $V=1,8$ m/s ($PV=2,04$ MPa.m/s, considerando $P=1,13$ MPa, cálculos apresentados no apêndice A). Nesta velocidade, houve aumento abrupto do desgaste – dobro do valor – com mudança do regime de desgaste de moderado para severo. A proximidade entre os gráficos resultantes de ambos ensaios (A e B) mostra a boa repetitividade dos testes experimentais. Nota: os valores de desgaste do gráfico estão em decigramas (dg) para proporcionar resolução ao gráfico.

Figura 6 - Dados obtidos a temperatura inicial de 30 °C: (a) ensaio A; (b) ensaio B.

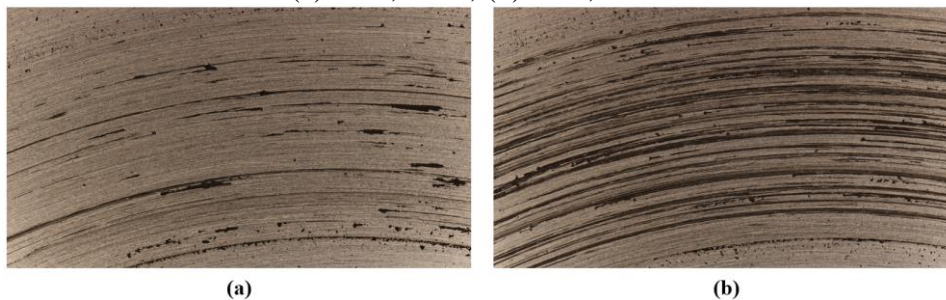


Fonte: elaboração própria.

A Figura 7 apresenta imagens do disco para uma condição anterior ao limite PV (Fig. 5.2-a) e no atingimento de tal limite (Fig. 5.2-b). No primeiro caso, observa-se uma quantidade moderada de partículas de adesão de polímero no disco. Por outro lado, na condição do limite PV – onde há desgaste severo – uma expressiva quantidade de material ficou aderido sobre a superfície do disco, heterogeneamente distribuído.

Figura 7 - Superfície do disco após a realização do ensaio A na temperatura inicial de 30 °C:

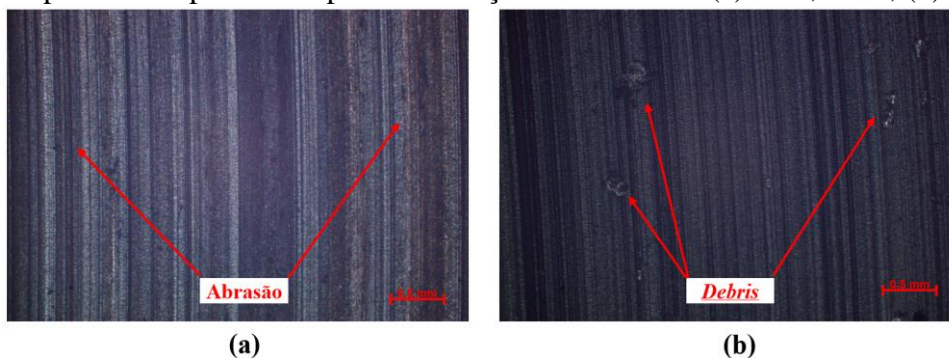
(a) $V=1,7$ m/s; (b) $V=1,8$ m/s.



Fonte: arquivo pessoal.

Com auxílio da microscopia obtida da superfície do polímero, pode-se observar que em $V=1,7$ m/s (Fig. 8-a) prevalece o desgaste por abrasão. Em $V=1,8$ m/s (Fig. 8-b) constata-se, além de marcas de abrasão, a adesão de *debris* na superfície do polímero após o limite PV ser atingido.

Figura 8 - Superfície do polímero após a realização do ensaio A: (a) $V=1,7$ m/s; (b) $V=1,8$ m/s.

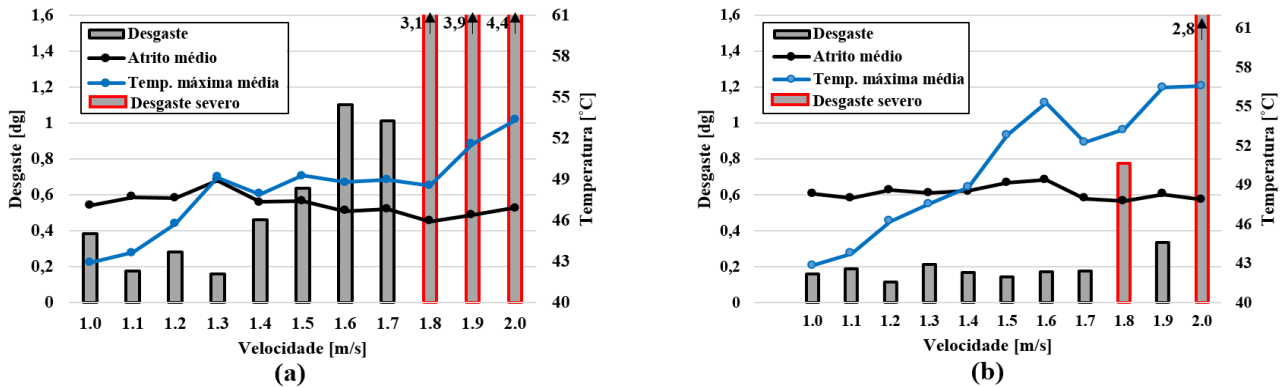


Fonte: arquivo pessoal.

A Figura 9 ilustra os resultados das amostras do lote 2, para os ensaios C e D com a temperatura inicial de 30 °C. Sugere-se que o limite PV também ocorreu em $V=1,8$ m/s, pois nesta velocidade o desgaste foi aproximadamente três vezes maior. Nota-se ainda que, em muitos casos, o gráfico de

barras (desgaste) na condição de desgaste severo ultrapassou o limite superior do gráfico ($\gg 1,6$ dg).

Figura 9 - Dados obtidos a temperatura inicial de 30 °C: (a) ensaio C; (b) ensaio D.



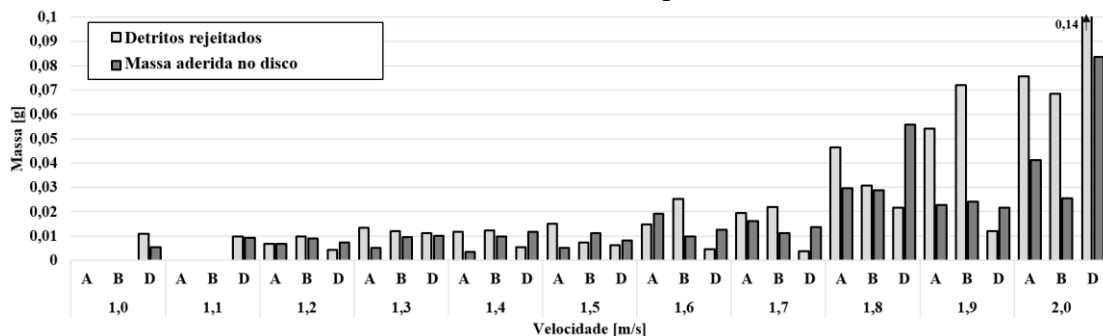
Fonte: elaboração própria.

Durante o regime severo, foi observado o desgaste consideravelmente maior em algumas amostras do lote 2, em especial no ensaio C, quando comparadas àquelas do lote 1. Além disto, no ensaio D verificou-se a existência de dois limites PV nas velocidades de 1,8 m/s (limite PV1) e 2,0 m/s (limite PV2), posto que na velocidade de 1,9 m/s ocorreu desgaste moderado. Considera-se que as amostras do lote 2 foram influenciadas pelo histórico térmico dos ensaios anteriores, o qual ocasionou o aumento do grau de cristalinidade do polímero. Entretanto, não foi possível estabelecer correlação precisa entre os resultados do ensaio C (parcialmente afetado termicamente) e D (totalmente afetado termicamente), pois eles tiveram diferentes históricos térmicos.

Embora a literatura reporte que ao atingir o limite PV o atrito sofra um aumento considerável (LUDEMA, 1996), não foi observado este efeito para nenhuma das amostras dos ensaios A, B, C e D na temperatura de 30 °C. A instabilidade (mudança abrupta) do atrito ao atingir o ponto PV havia sido reportada em trabalhos prévios de pesquisadores do LATRIB, que estudaram o limite PV de ABS e PA6 (NEIS *et al.*, 2017; CARRASAI, 2016; ZANETTI, 2015).

A Figura 10 apresenta uma estimativa da massa de polímero que ficou aderida no disco e a quantidade de detritos rejeitados, excetuando-se o ensaio C que não teve este dado mensurado. Nas velocidades acima do limite PV, verifica-se o aumento considerável da quantidade de detritos rejeitados, os quais não ficaram aderidos ao disco. Observa-se ainda que, no ensaio D, na condição de $v=1,9$ m/s (onde o regime de desgaste voltou a ser moderado), a quantidade de detritos rejeitados foi relativamente pequena, da mesma ordem de grandeza dos demais ensaios na condição de regime moderado.

Figura 10 - Detritos rejeitados e estimativa da massa aderida no disco durante ensaios A, B e D em diferentes velocidades submetidos a temperatura inicial de 30 °C.

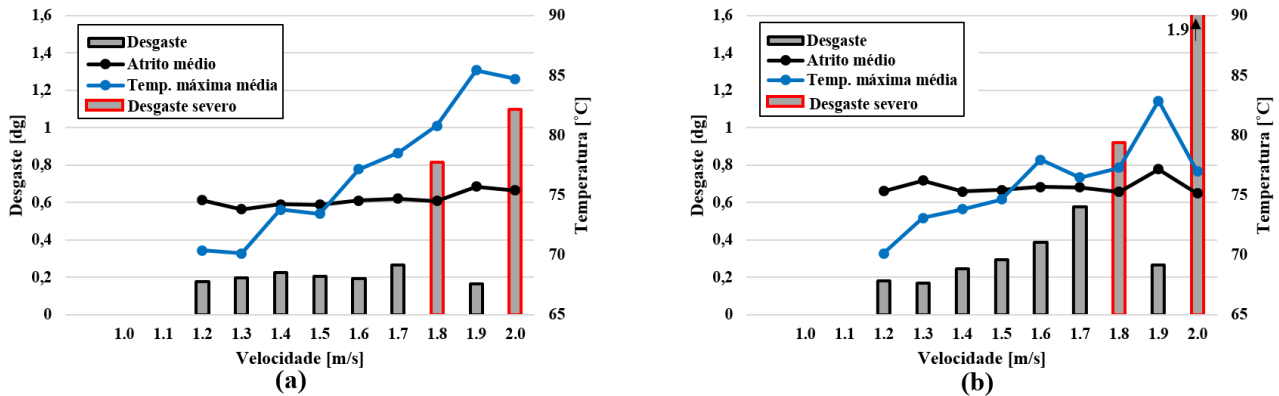


Fonte: elaboração própria.

4.2 Limite PV a 55 °C

Considerando-se que o limite PV é uma fronteira que divide desgaste moderado a severo, verifica-se a existência de dois limites PV para a temperatura inicial de ensaio de 55 °C: limite PV1 em $V=1,8$ m/s e limite PV2 em $V=2,0$ m/s (Figura 11).

Figura 11 - Dados obtidos a temperatura inicial de 55°C: (a) ensaio A; (b) ensaio B.

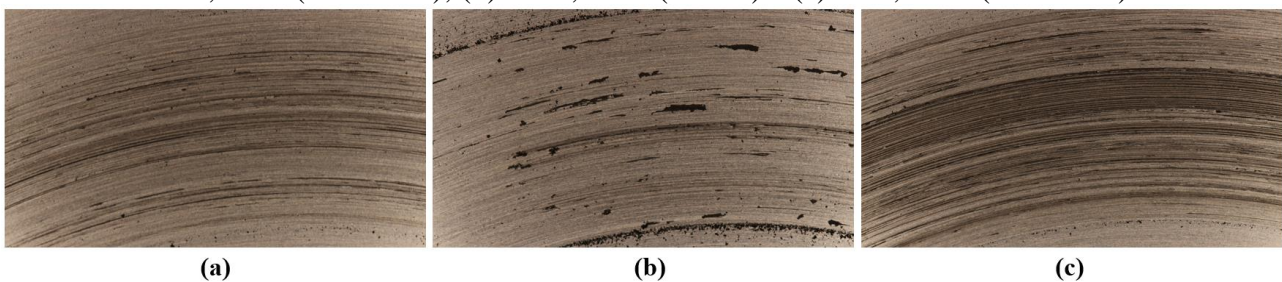


Fonte: elaboração própria.

As imagens do disco (Figura 12) mostram que em $V=1,7$ m/s (Fig. 12-a) a adesão no disco ainda estava homogênea (logo, desgaste é moderado). Em $V=1,8$ m/s (Fig. 12-2b) – onde ocorreu o PV1 – o desgaste tornou-se heterogêneo, concentrando mais detritos em pontos específicos da superfície do disco. Na velocidade de 1,9 m/s (Fig. 12-c), na qual o desgaste volta ao regime moderado, o filme no disco tornou-se novamente uniforme e esta homogeneidade abrandou o desgaste. Por fim, em $V=2,0$ m/s o desgaste tornou-se mais uma vez severo, configurando-se o PV2.

Constata-se que quando o filme é homogêneo, o desgaste é moderado. Quando este é heterogêneo, o desgaste tende a ser severo.

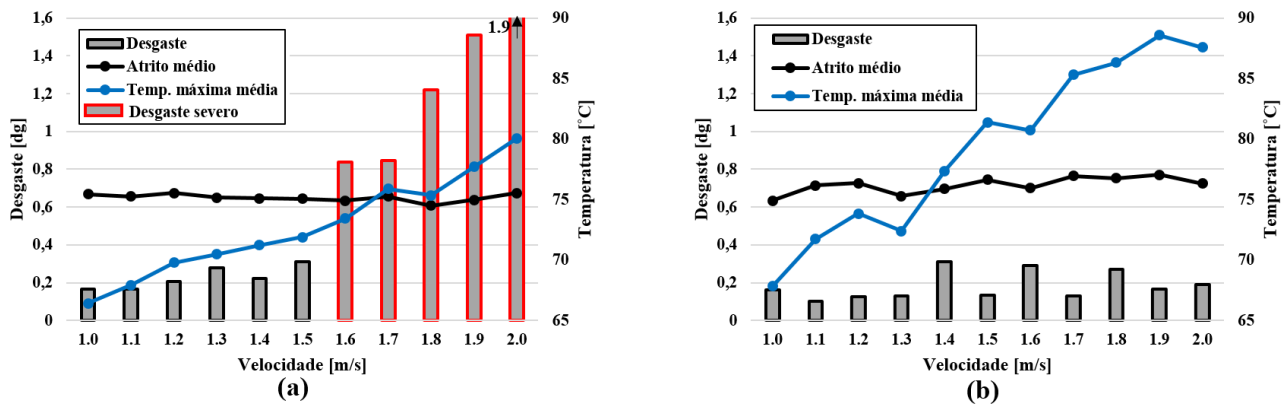
Figura 12 - Superfície do disco após a realização do ensaio A na temperatura inicial de 55 °C: (a) $V=1,7$ m/s (moderado); (b) $V=1,8$ m/s (severo) e (c) $V=1,9$ m/s (moderado).



Fonte: arquivo pessoal.

Por outro lado, nas amostras do lote 2 (Figura 13), observa-se indícios de que o ensaio C atingiu o limite PV em $V=1,6$ m/s. Para o ensaio D as amostras não atingiram o limite PV, uma vez que o desgaste foi relativamente reduzido em todas as condições. Acredita-se que, pelo fato de as amostras terem sido reutilizadas e já terem sofrido grande influência da temperatura (amostras totalmente afetadas termicamente), ocorreu uma recristalização da sua estrutura, o que acabou alterando as respectivas propriedades iniciais.

Figura 13 - Dados obtidos a temperatura inicial de 55 °C: (a) ensaio C; (b) ensaio D.

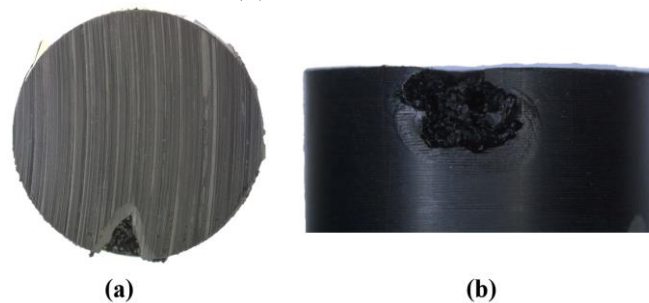


Fonte: elaboração própria.

Durante os ensaios A, B, C e D a 55 °C, o atrito mais uma vez permaneceu constante, não havendo efeito do atrito durante o atingimento do limite PV.

No ensaio C a 55 °C, percebeu-se falha térmica localizada nas amostras submetidas a velocidades mais elevadas – acima de $V=1,6$ m/s – e caracterizada por uma fusão localizada no início da região de deslizamento, conforme pode ser visto na Figura 14. A hipótese é que isso tenha ocorrido devido ao maior comprimento ($L=24$ mm) das amostras dos ensaios C, o que dificultou a dissipação do calor, levando o polímero a fusão local. Deve-se destacar que o surgimento do desgaste severo (limite PV) e a fusão localizada são dois fenômenos distintos, que por coincidência ocorreram a uma mesma velocidade ($V=1,6$ m/s) neste ensaio.

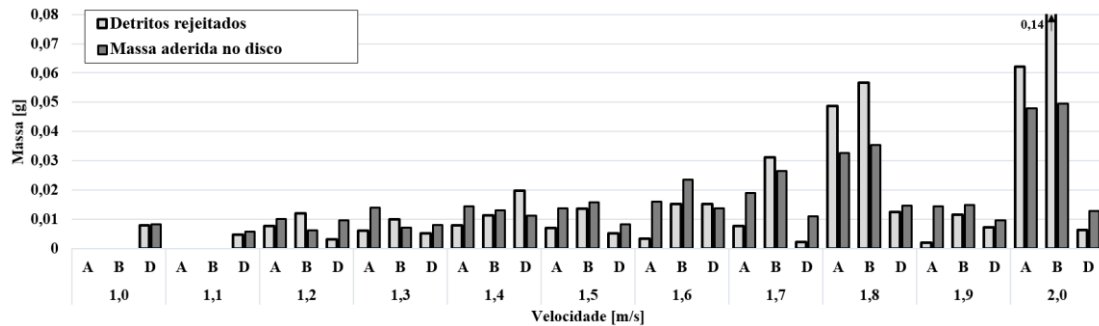
Figura 14 - Fusão localizada ocorrida no ensaio C em $V=1,6$ m/s: (a) vista superior da face atritada; (b) vista frontal.



Fonte: arquivo pessoal.

A Figura 15 ilustra a massa dos detritos coletados das amostras e a proporção aderida no disco. Na condição de atingimento do limite PV, $V=1,8$ m/s para os ensaios A e B, os detritos rejeitados foram elevados. Já na próxima condição (ensaios A e B), $V=1,9$ m/s, os detritos rejeitados foram baixos e caracterizados por uma parcela maior de polímero aderida ao disco do que rejeitada. Por estes motivos, os desgastes em $V=1,9$ m/s podem ser considerados como moderados. Nota-se ainda que no ensaio D, onde a amostra foi totalmente afetada termicamente e que não teve ocorrência de limite PV, a quantidade de detritos coletados no decorrer de todo o teste foi reduzida, sendo um indicativo de desgaste moderado.

Figura 15 - Detritos rejeitados e estimativa da massa aderida no disco durante ensaios A, B e D em diferentes velocidades submetidos a temperatura inicial de 55 °C.

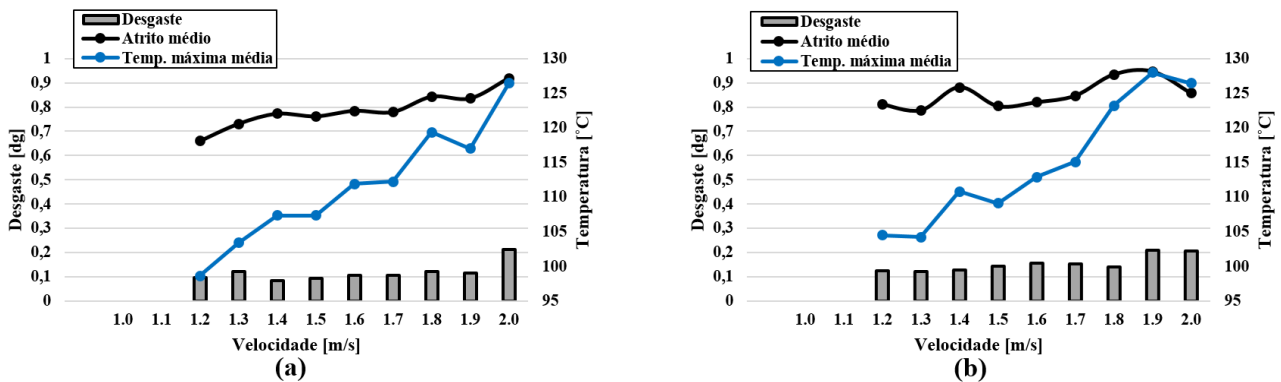


Fonte: elaboração própria.

4.3 Limite PV a 85 °C

Na Figura 16, ensaios realizados a temperatura inicial de 85 °C, observa-se que as amostras dos ensaios A e B não atingiram o limite PV de acordo com o parâmetro de desgaste severo, mas verifica-se que o atrito cresce continuamente no ensaio A.

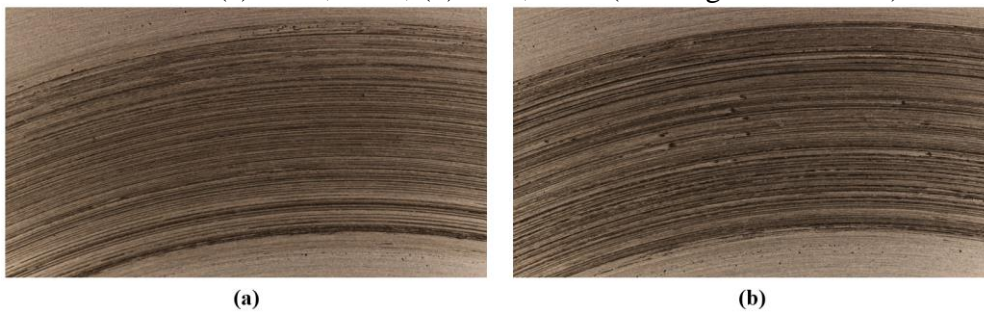
Figura 16 - Dados obtidos a temperatura inicial de 85 °C: (a) ensaio A; (b) ensaio B.



Fonte: elaboração própria.

Para os ensaios A e B executados a 85 °C, observou-se a formação de uma quantidade elevada de filme homogêneo aderido ao disco (Figura 17) em velocidades distantes entre si.

Figura 17 - Superfícies típicas do disco após a realização dos ensaios A e B na temperatura inicial de 85 °C: (a) $V=1,2$ m/s; (b) $V=1,8$ m/s (na imagem: ensaio A).

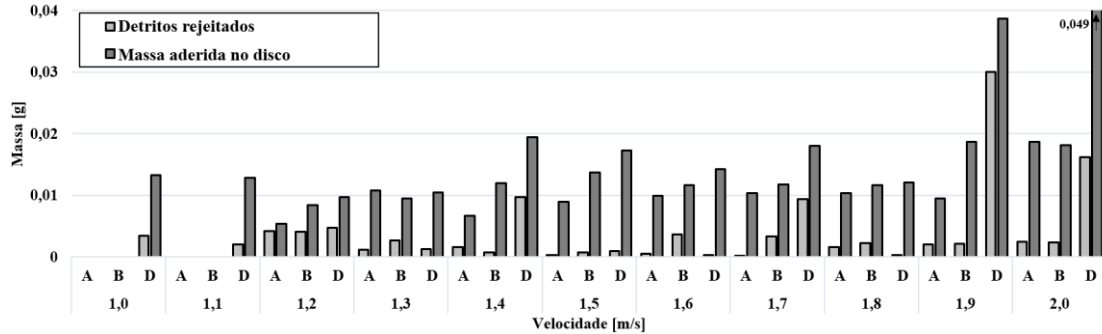


Fonte: arquivo pessoal.

Analisando-se o gráfico da Figura 18, pode-se observar que, para todos os ensaios, a massa de polímero aderida ao disco foi superior quando comparada à massa de detritos rejeitados, corroborando com a observação anteriormente apresentada para Figura 17. A hipótese é que estes

ensaios estejam próximos à temperatura de amolecimento do polímero, onde sabidamente há grande despreendimento de material, conforme a literatura (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

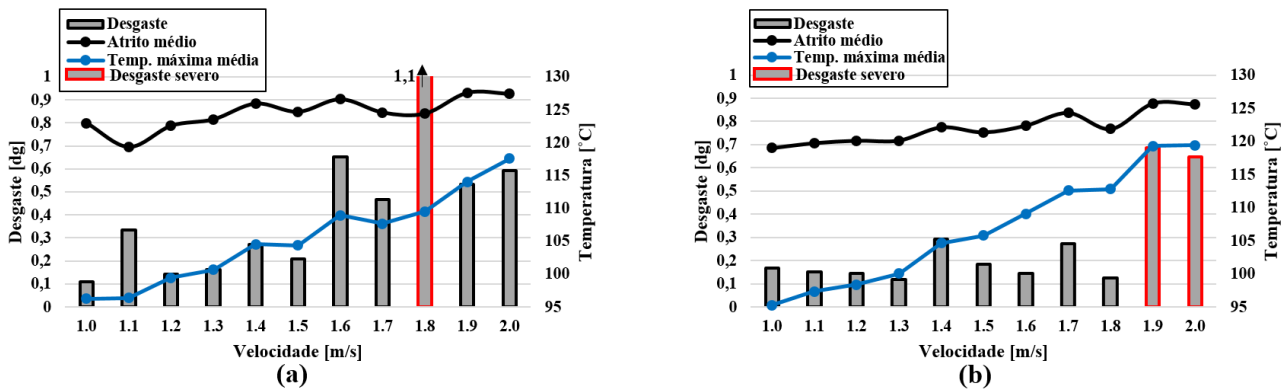
Figura 18 - Detritos rejeitados e estimativa da massa aderida no disco durante ensaios A, B e D em diferentes velocidades submetidos a temperatura inicial de 85 °C.



Fonte: elaboração própria.

De acordo com a Figura 19, para os ensaios C e D, os resultados foram também afetados pela reutilização das amostras (amostras parcial ou totalmente afetadas termicamente). Para o ensaio C (Fig. 19-a) observa-se a ocorrência do limite PV em $V=1,8$ m/s, porém nas velocidades subsequentes o desgaste retorna para o regime moderado. Por outro lado, para o ensaio D, verifica-se o surgimento do desgaste severo a partir da velocidade de 1,9 m/s, caracterizando a ocorrência do limite PV nesta velocidade.

Figura 19 - Dados obtidos a temperatura inicial de 85 °C: (a) ensaio C; (b) ensaio D.



Fonte: elaboração própria.

A Figura 20 corrobora com a hipótese de que o limite PV e o efeito de falha térmica localizada são fenômenos distintos. Verificou-se que o limite PV do ensaio C foi atingido em $V=1,8$ m/s (Fig. 19-a). Contudo, a fusão localizada da amostra do ensaio C iniciou em $V=1,4$ m/s (Figura 20), continuando nas condições seguintes.

Figura 20 - Fusão localizada ocorrida no ensaio C: (a) $V=1,4$ m/s, vista superior da face atritada; (b) $V=1,4$ m/s, vista frontal; (c) $V=1,5$ m/s, vista superior da face atritada; (d) $V=1,5$ m/s, vista frontal.



Fonte: arquivo pessoal.

Para as amostras utilizadas no ensaio D também foram identificadas fusão a partir da velocidade de 1,4 m/s. Um diagrama PVT do POM-C é apresentado no Apêndice B.

5. CONCLUSÃO

Com base na análise realizada através deste trabalho, conclui-se que:

- Foi possível identificar o limite PV para as temperaturas iniciais de 30 °C, 55 °C e 85 °C. Para a temperatura de 55 °C, nos ensaios com amostras novas (ensaios A e B), verificou-se o surgimento de dois limites PV distintos (PV1 e PV2). Mesmo fenômeno foi observado no ensaio D (amostras totalmente afetadas termicamente) a temperatura de 30 °C. A ocorrência de dois limites PV distintos para um mesmo ensaio ainda não havia sido relatada na literatura.
- As amostras do polímero POM-C com aditivo de negro-de-fumo, testadas no presente estudo, não apresentaram efeito significativo de variação do atrito na condição de atingimento do limite PV;
- Em algumas velocidades dos ensaios a mais altas temperaturas (55 °C e 85 °C), formou-se um filme homogêneo no disco, abrandando o desgaste em relação aos ensaios de mais baixa temperatura (30 °C);
- O tipo de desgaste predominante a altas temperaturas foi o de adesão. Em baixas temperaturas e velocidades de deslizamento, observou-se o desgaste predominante por abrasão seguido de adesão;
- O histórico térmico (caso extremo: ensaio D) é importante e afeta o limite PV. O efeito foi no sentido de reduzir o limite PV dos materiais, o que pode ser ruim do ponto de vista do desempenho;
- A fusão localizada surgiu nas amostras de maior comprimento (ensaios C e D) devido à baixa dissipação térmica.

Para trabalhos futuros, sugere-se a realização de mais ensaios utilizando a metodologia desenvolvida de determinação do limite PV e empregando amostras completamente novas, com o intuito de avaliar a repetibilidade dos resultados. Adicionalmente, recomenda-se a realização de ensaios usando um intervalo de temperaturas mais reduzido e buscando evitar a utilização de temperaturas iniciais superiores a 85 °C. Por fim, é aconselhado que o comprimento da amostra seja mantido com o objetivo de evitar variação nos resultados ocasionadas pela dissipação térmica desigual em amostras de comprimentos diferentes.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDELBARY, A. **Wear of Polymers and Composites**. 1st. New York: Elsevier, 2014.
- ALMEIDA, G.S.G.; SOUZA W.B. **Engenharia dos Polímeros: Tipos de Aditivos, Propriedades e Aplicações**. 1 ed. São Paulo: Editora Érica, 2015.
- BAYER, R. G. **Engineering design for wear**. 2 ed. New York: CRC Press, 2004.
- BECERRA, A.F.C. **Caracterização de PEAD antes e após envelhecimento e diferentes meios e condições**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Matérias e Processos Químicos e Metalúrgicos) - Departamento de Engenharia Química de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015. Disponível em <<https://doi.org/10.17771/PUCRio.acad.26152>>
- BEKHET, N.E. Tribological behavior of drawn polypropylene. **Wear**. v.236, n.1–2, p. 55-61, 1999. Disponível em <[https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(99\)00262-8](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(99)00262-8)>
- CALLISTER, W.D.; RETHWISCH, D.G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 9 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.
- CARRASAI, R.M. **Análise tribológica de plásticos de engenharia**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016. Disponível em <<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/150600/001009145.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>
- DUAN, Y.; LI, H.; LIU, X. **Study on the thermal degradation of polyoxymethylene by Thermogravimetry-Fourier Transform Infrared Spectroscopy (TG-FTIR)**. Disponível em <<https://doi.org/10.1002/app.22913>>
- ENSINGER. **TECAFORM AH ELS black – Semiacabados**. 2017. Disponível em: <<https://www.ensingerplastics.com/pt-br/semiacabados/produtos/acetel-esd-condutivo-tecaform-ah-els-black#/product-technical-detail-collapse-item-1-lvl-1>>.
- GERDEEN, J.C.; RORRER, R.A.L. **Engineering Design with Polymers and Composites**. 2 ed. New York: CRC press, 2012.
- HOLMBERG, K.; ERDEMIR, A. Influence of Tribology on Global Energy Consumption, Costs, and Emissions. **Friction**. v.5, n.3, p.263–284, 2017. Disponível em <<https://doi.org/10.1007/s40544-017-0183-5>>
- HUTCHINGS, I.M. **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials**. London: Edward Arnold, 1992.
- HUTCHINGS, I.M.; SHIPWAY, P. **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials**. 2 ed. Oxford : Butterworth-Heinemann (Elsevier), 2017.
- IEC. International Standard IEC 60216-1. **Guide for the determination of thermal endurance properties of electrical insulating material**. Geneva, 2013. Disponível em: <<https://www.evs.ee/preview/iec-60216-1-2013-en.pdf>>

KURUSU, R.S. **Efeito do tempo de recozimento nas propriedades mecânicas e de biodegradação de materiais baseados em poli(3-hidroxi-butirato) (PHB)**. 2011. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde-01112011-122640/publico/dissert_rafael_ED_final.pdf>

LUDEMA, K.C. **Friction, wear, lubrication: A Textbook in Tribology**. 1 ed. Florida: CRC Press, 1996.

MANRICH, S. **Processamento de termoplásticos**. 1 ed. São Paulo: Artliber, 2005.

NEIS, P.D.; FERREIRA, N.F.; POLETTO, J.C.; SUKUMARAN, J.; ANDÓ, M.; ZHANG, Y. Tribological behavior of polyamide-6 plastics and their potential use in industrial applications. **Wear**. v.376–377, Part B, p.1391-1398, 2017. Disponível em <<https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.01.090>>

NUNES, E.C.D.; LOPES, F.R.S. **Polímeros: conceitos, estrutura molecular, classificação e propriedades**. 1 ed. São Paulo: Editora Érica, 2014.

PAVLAK, R.P.; NEIS, P.D.; POLETTO, J.C.; BARROS, L.Y.; FERREIRA, N.F. Wear, friction and NVH characterization using a laboratory-scale tribometer. **13th SAE Brasil International Brake Colloquium & Engineering Display**, 2017. Disponível em <<https://doi.org/10.4271/2017-36-0003>>

RAHMAN, M.S.; SHAISLAMOV, U.; YANG, J.; KIM, J.; YU, H.Y.; CHOI, S.; LEE, H. Effects of electron beam irradiation on tribological and physico-chemical properties of Polyoxymethylene copolymer (POM-C). **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research**. v.387, p.54-62, 2016. Disponível em <<https://doi.org/10.1016/j.nimb.2016.10.001>>

SAMYN, P.; BAETES P. D.; Friction of polyoxymethylene homopolymer in highly loaded applications extrapolated from small-scale testing. **Tribology Letters**. V.3, N.3, 2015. Disponível em <<https://doi.org/10.1007/s11249-005-6144-6>>

SILVA, C.H. **Degradação de UHMWPE e de POM devido à ação tribológica contra aço inoxidável e alumina**. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003. Disponível em <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3132/tde-24122013-114021/publico/Tese_CarlosHenriquedaSilva_unprotected.pdf>

SILVA, R.C.L. **Desgaste de Polímeros Estruturais de Engenharia em Contato de Deslizamento Com Cilindro Metálico**. 2010. Tese (Doutorado em Tecnologia de Materiais; Projetos Mecânicos; Termociências) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010. Disponível em <<https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/15565>>

STACHOWIAK, G.W.; BATCHELOR, A.W. **Engineering Tribology**. 3 ed. Burlington: Butterworth Heinemann, 2005.

YAMAGUCHI, Y.; **Tribology of plastic materials – Their characteristics and applications to sliding components**. New York: Elsevier Science Publishers, 1990.

WIEBECK, H.; HARADA J. **Plásticos de Engenharia, tecnologia e aplicações**. 1 ed. São Paulo: Artliber editora, 2005.

ZANETTI, G.L.P.G. **Análise do comportamento tribológico de plásticos de engenharia utilizando um tribômetro**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015. Disponível em <
<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/132628/000984054.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>

APÊNDICE A

A1. Cálculo do limite PV para a temperatura inicial de 30 °C

Dados:

Força: $F = 200\text{N}$

Diâmetro da amostra: $D = 15\text{mm}$

Velocidade: $V = 1,8\text{m/s}$

Área de contato:

$$A = \pi r^2$$

$$A = \pi \cdot 7,5^2 = 176,71\text{mm}^2$$

(A.1)

Pressão:

$$P = \frac{F}{A}$$

(A.2)

$$P = \frac{200}{176,71} = 1,13\text{ MPa}$$

Limite PV:

$$\text{Limite PV} = P \cdot V$$

(A.3)

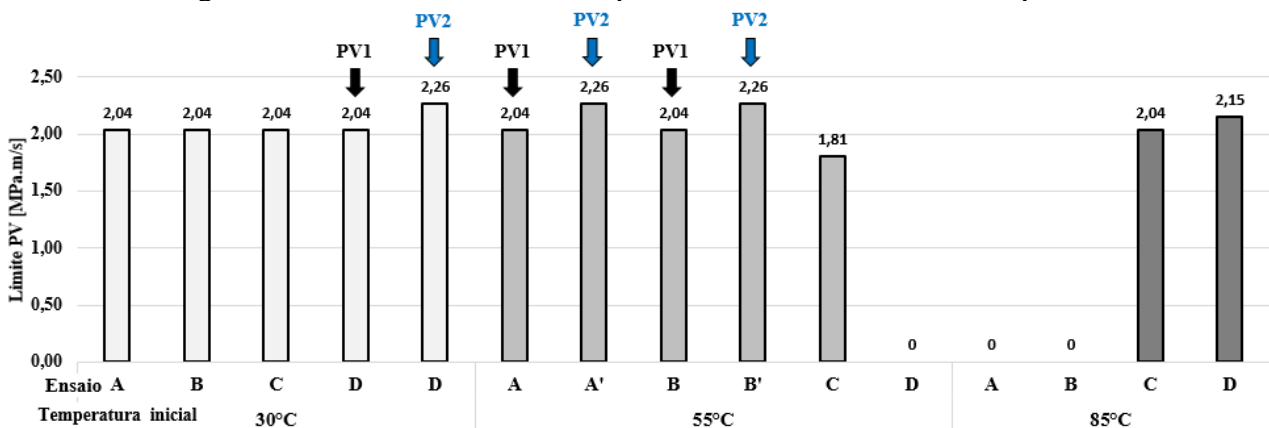
$$P \cdot V = 1,13\text{MPa} \cdot 1,8\text{m/s} = \mathbf{2,04\text{ Mpa.m/s (Limite PV)}}$$

APÊNDICE B

B1 Diagrama PVT do POM-C com aditivo negro-de-fumo

Com base nas velocidades em que ocorreu o limite PV, foi gerado o diagrama comparativo entre os diferentes limites PV para cada ensaio e temperatura, conforme apresentado na Figura B1. Pode-se inferir que a temperatura apresenta influência importante para os ensaios A e B, que não sofreram histórico térmico, pois na temperatura de 85 °C o limite PV não foi atingido. Portanto verifica-se que para esses dois ensaios, A e B, o limite PV irá aumentar com o aumento de temperatura como foi o caso. Já as amostras dos ensaios C e D (com histórico térmico), o efeito da temperatura não foi claro.

Figura B1 - Valores de Limite PV para os diferentes ensaios e temperaturas.



Fonte: elaboração própria.

ANEXO A

A1 - Propriedades do POM-C aditivado com negro-de-fumo

A tabela A1 apresenta algumas propriedades do POM-C aditivado com negro-de-fumo condutivo.

Tabela A1 - Propriedades do POM-C aditivado com negro-de-fumo.

Propriedade	Parâmetro	Valor	Unidade
Temperatura de transição vítrea	-	- 60	°C
Temperatura de fusão	-	169	°C
Temperatura de serviço	curta duração	140	°C
Temperatura de serviço	longa duração	100	°C
Calor específico	-	1,3	J/(g.K)
Condutividade térmica	-	0,46	W/(K.m)
Resistência a compressão	1% / 2% / 5%, 5mm/min, 10N	16/25/45	MPa
Dureza e indentação	-	96	MPa

Fonte: Adaptado de Ensinger (2017).

O parâmetro “longa duração” mencionado na Tabela A1 é caracterizado como o máximo de temperatura em ar quente que um plástico suporta por 20.000 horas, sem perder 50% das suas propriedades iniciais tais como dureza e resistência (IEC, 2013). Por outro lado, “curta duração” é definida por minutos ou até horas de pico de temperatura que o plástico pode suportar sem causar danos às suas propriedades físicas. Observa-se que o fabricante não menciona informações do limite PV no seu catálogo (ENSINGER, 2017). Além disto, percebe-se que a temperatura de serviço é um parâmetro baseado em características puramente térmicas do polímero, sem levar em conta aspectos de esforços mecânicos.

ANEXO B

B1 - Incertezas de medidas do tribômetro

A Tabela B1 apresenta as incertezas do tribômetro utilizado durante os testes pino-sobre-disco.

Tabela B1 - Incertezas de medidas do tribômetro.

Sistema de Força			
Sensor HBM UOC 1KN	Classe = 0,2	FE = 1000 N	Incerteza = ± 2 N
Condicionador HBM Clip AE 301	Classe = 0,1	FE = 1000 N	Incerteza = ± 1 N
Aquisição dSpace ds1104	resol. = 4.8mV / 1vl	FE = 1000 N	Incerteza = $\pm 0,49$ N
			Incerteza total = $\pm 2,29$ N
Sistema de Torque			
Sensor HBM T10F 200 N.m	Classe = 0,1	FE = 200 Nm	Incerteza = $\pm 0,2$ Nm
Condicionador HBM Clip MP60	Classe = 0,05	FE = 35 Nm	Incerteza = $\pm 0,02$ Nm
Aquisição dSpace ds1104	resol. = 4.8mV / 1vl	FE = 35 Nm	Incerteza = $\pm 0,02$ Nm
			Incerteza total = $\pm 0,20$ Nm
Raio de Deslize			
Paquímetro digital	Acur. = $\pm 0,02$ mm	Truncam. = $\pm 0,01$ mm	Incerteza total = $\pm 0,02$ mm

Fonte: Adaptado: Pavlak *et al.* (2017).