



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**LIONEL LOIČ LIMOL**

**SOBRE A INFLUÊNCIA DA CARGA NORMAL E DO TAMANHO DA  
PARTÍCULA NO DESGASTE ABRASIVO DE MATERIAIS  
ELASTOMÉRICOS EMPREGADOS NA INDÚSTRIA DE  
BENEFICIAMENTO DE MINÉRIO.**

VITÓRIA

2014

**LIONEL LOÏC LIMOL**

**SOBRE A INFLUÊNCIA DA CARGA NORMAL E DO TAMANHO DA  
PARTÍCULA NO DESGASTE ABRASIVO DE MATERIAIS  
ELASTOMÉRICOS EMPREGADOS NA INDÚSTRIA DE  
BENEFICIAMENTO DE MINÉRIO.**

Dissertação submetida ao Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA.

Orientador: Prof. Dr. Cherlio Scandian.

VITÓRIA

2014

**LIONEL LOÏC LIMOL**

**SOBRE A INFLUÊNCIA DA CARGA NORMAL E DO TAMANHO DA  
PARTÍCULA NO DESGASTE ABRASIVO DE MATERIAIS  
ELASTOMÉRICOS EMPREGADOS NA INDÚSTRIA DE  
BENEFICIAMENTO DE MINÉRIO.**

Dissertação apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Aprovado em 14 de novembro de 2014.

COMISSÃO EXAMINADORA:

---

Prof. Dr. Cherlio Scandian  
Universidade Federal do Espírito Santo – UFES  
Orientador

---

Prof. Dr. Marcelo Camargo Severo de Macêdo  
Universidade Federal do Espírito Santo – UFES  
Examinador interno

---

Prof. Dr. Amilton Sinatora  
Universidade Federal do Espírito Santo – UFES  
Examinador externo

---

Prof. Dr. Fernando Lázaro Freire Junior  
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio  
Examinador externo

## AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida, pela oportunidade de ter saúde, família e apoio para vencer em meus objetivos.

A toda a minha família e esposa, por tudo que eles representam para mim e por sempre torcerem para eu alcançar meus objetivos.

Ao Prof. Dr. Cherlio Scandian pela sempre presente orientação deste trabalho e, sobretudo, pela amizade desenvolvida desde a minha chegada da França ao TRICORRMAT – UFES.

Ao Prof. Dr. Marcelo Camargo Severo de Macêdo pelas ótimas discussões sobre o tema e pela amizade.

À CAPES pela concessão da minha bolsa de estudos.

À mineradora Vale S.A. pelo apoio tecnológico e financeiro, sobretudo, ao Engenheiro Ronaldo Jabour, pelo empenho e suporte que tanto necessitou este trabalho.

Ao INES e, especialmente, ao Prof. Dr. Fernando Lázaro que, sem o seu apoio, este trabalho não se concluiria.

Ao LFS – USP, especificamente, o Prof. Dr. Amilton Sinatora pelos ensinamentos de Tribologia e pela formidável colaboração com o TRICORRMAT – UFES.

Ao Prof. Dr. Dante Franceschini pelas discussões sobre a caracterização dos elastômeros via infravermelho.

Aos colegas que me auxiliaram durante todo o curso de pós-graduação.

Ao apoio tecnológico dos laboratórios da UFES, o TRICORRMAT (Laboratório de Tribologia, Corrosão e Materiais), o LCSM (Laboratório de Caracterização de Superfícies de Materiais), o LCC (Laboratório de Combustão e Combustíveis) e, da USP, o LFS (Laboratório de Fenômenos de Superfícies).

Muito obrigado.

## RESUMO

Materiais elastoméricos, como poliuretanos e borrachas, são empregados na indústria de beneficiamento de minério pois têm excelentes propriedades mecânicas e um custo moderado comparado a metais. Esses polímeros são empregados principalmente no transporte e no peneiramento do minério.

Trabalhos anteriores sobre o desgaste abrasivo de elastômeros relatam a influência de parâmetros importantes como o tamanho da partícula abrasiva, a distância de deslizamento e a carga normal. Entretanto, a maneira como esses parâmetros influenciam no volume desgastado não é clara.

Neste estudo, o comportamento no desgaste abrasivo de elastômeros de um grupo de poliuretanos e de borrachas foi investigado à temperatura ambiente segundo o método pino-tambor (ASTM D5963). Os ensaios foram realizados a uma velocidade de 26 cm/s, com cargas de 5 N e 10 N. Além disso, parâmetros topográficos das lixas de alumina utilizadas (granulometria de P400 até P60) foram adquiridos por perfilometria 3D.

Os materiais foram caracterizados pela dureza Shore A e pelo método FTIR. Os micromecanismos foram investigados por MEV e relacionados a parâmetros topográficos das lixas de alumina.

A maioria dos poliuretanos mostrou ser mais resistente à abrasão do que as borrachas. Os mecanismos de desgaste tais como ondas de Schallamach, microcorte e formação de proa, variaram com o tamanho da partícula abrasiva e da carga. Pouca correlação entre dureza e desgaste foi observada.

**Palavras-Chave:** polímeros – testes, indústria mineral, partículas, desgaste abrasivo, materiais elastoméricos.

## ABSTRACT

Elastomeric materials, such as polyurethanes and rubbers, are widely used in the mining industry because of their moderate cost and excellent mechanical properties. Such polymers have been used mainly in transportation and screening for their appreciable abrasion wear resistance.

Previous work on abrasive wear of elastomers reported the influence of grit size, sliding distance and normal load on wear rate. However, the way how those parameters affect the wear rate is not clear yet.

In this study, the abrasive wear behavior of a group of polyurethanes and rubbers were investigated at room temperature according to a rotary drum abrasion method (ASTM D 5963). Pin-on-drum arrangement wear tests were carried out at 26 cm/s test speed and load value of 5 N and 10 N. Corundum paper grid varying from 60 to 400 mesh were used as an abrasive drum surface and their surface topography acquired from 3D profilometer. After each 40 meters, the mass loss of the pin was recorded until reaching 120 meters. The wear coefficient was deduced from wear volume.

The materials have been characterized by Shore A hardness and FTIR methods. The wear micromechanisms were investigated by the SEM and related to the corundum paper topographical parameters.

Most of polyurethanes show better wear resistance than rubbers. Wear mechanisms vary with abraded grit from Schallamach waves to microcutting and microploughing. Low correlation between ShoreA hardness and wear was observed.

**Keywords:** polymers – tests, mining industry, grit size, abrasive wear, elastomeric materials.

## LISTA DE SIGLAS

ABS - Acrilonitrilo-butadieno-estireno  
APK – Policetona alifático  
ASTM - America Society for Testing and Materials  
BDO – 1,4- butanodiol  
FT-IR - Espectroscopia no Infravermelho  
MDI - Difenil metano diisocianato  
MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura  
MOCA - Metileno bis-o-cloro-anillina  
NR - Borracha natural  
SBR - Borracha sintética  
PA - Poliamida  
PCL - Policaprolactona  
POM - Polióxido de metileno/poliformaldeído  
PP - Polipropileno  
PPS – Poli (sulfeto de p-fenileno)  
PPG - Polioxipropileno glicol  
PS – Poliestireno  
PTFE - Politetrafluoroetileno  
PTMEG - Politetrametileno éter glicol  
PU - Poliuretano  
PVC - Policloreto de vinila  
TDI - Tolueno diisocianato  
UFES - Universidade Federal do Espírito Santo  
UHMWPE - Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular  
USP - Universidade de São Paulo

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama circular de proporção do tipo de desgaste ocorrendo na indústria .....	15
Figura 2: Exemplo de desgaste a dois e a três corpos (ZUM GAHR, 1987).....	15
Figura 3: Diagrama esquemático apresentando a variação em importância dos mecanismos de abrasão e fadiga nos polímeros (HUTCHINGS, 1992, apud, EVANS and LANCASTER, 1979).....	16
Figura 4: Parâmetros do desgaste abrasivo (adaptado de ZUM GAHR, 1987).....	16
Figura 5: Relação esquemática da taxa de desgaste com a variação do tamanho da partícula abrasiva (CORONADO e SINATORA, 2011).....	18
Figura 6: Relação entre a perda de massa no desgaste com a variação da partícula abrasiva na erosão e no desgaste abrasivo com deslizamento e de partículas abrasivas (adaptado de MISRA e FINNIE, 1981).....	18
Figura 7: Coeficiente de desgaste do PMMA em função do tamanho médio de partículas abrasivas em um ensaio do tipo pino-disco (SIN, 1979).....	19
Figura 8: Perda volumétrica de náilons em função do tamanho médio de partículas abrasivas em um ensaio do tipo pino-disco (SRINATH, 2006).....	19
Figura 9: Perda volumétrica de polímeros em função do tamanho médio de partículas abrasivas em um ensaio do tipo pino-disco (UNAL, 2005).....	20
Figura 10: Relação entre taxa de desgaste e diâmetro médio das partículas abrasivas (IWAI, 1997). 20	
Figura 11: Gráficos de correlação do coeficiente de desgaste em função da dureza (na esquerda) e da energia de ruptura (na direita) (HUTCHINGS, 1992).....	21
Figura 12: Desenvolvimento de padrões abrasivos para uma borracha natural sobre lixa de granada. Distância deslizada: a) 120 cm; b)180 cm; c)240 cm; e) 720 cm (SCHALLAMACH, 1958).....	22
Figura 13: Desenho esquemático da propagação de ondas de Schallamach (BARQUINS, 1983). .....	23
Figura 14: Desenho esquemático de quatro métodos para determinar as taxas de desgaste abrasivo: (a) Pino sobre disco, (b) Pino sobre placa, (c) pino sobre tambor e (d) roda de borracha (HUTCHINGS, 1992).....	23
Figura 15: Máquina de ensaio ASTM D 5963. ....	24
Figura 16: Representação esquemática do abrasômetro previsto na norma ASTM D 5963: (a) vista geral e (b) detalhes do sistema de aplicação de carga e posicionamento da lixa abrasiva (ASTM D5963).....	25
Figura 17: Representação esquemática de uma unidade repetida para um polietileno (CALLISTER, 2012).....	25
Figura 18: Monômero tetrafluoretileno sendo polimerizado e formando o politetrafluoretileno (Teflon®) (CALLISTER, 2012). ....	26
Figura 19: representação esquemática da ligação uretânica (PRISACARIU, 2011).....	27
Figura 20: Representação esquemática dos segmentos macios e rígidos de poliuretanos (PRISCARIU, 2011).....	28
Figura 21: Representação esquemática das moléculas de TDI e MDI (CLEMITSON, 2008).....	28
Figura 22: Representação esquemática dos principais polióis (CLEMITSON, 2008). ....	29
Figura 23: Representação esquemática dos principais extensores de cadeia (CLEMITSON, 2008)...	29
Figura 24: Representação esquemática de uma cadeia de poliuretano PTMEG/ MDI/ BD (HILL, 1996).....	29
Figura 25: Representação esquemática de uma unidade repetida para (a) o 2-metil-buta-1,3-dieno (NR) e para (b)Poli (butadieno-co-estireno) (SBR) (CIULLO, 1999). ....	30



Figura 26: Curva tensão x deformação para uma borracha natural (azul) e vulcanizada (vermelha) (CALLISTER, 2007).....	31
Figura 27: Vista transversal de seções de tubulações de polpa de minério onde foram extraídos a) Pu1, b) Pu2, c) Pu3.....	32
Figura 28: Vista de cima de pedaços de correias transportadoras onde foram extraídos a) Rub1, b) Rub2, c) Rub3.....	32
Figura 29: Espectro no infravermelho do etanol ( <a href="http://orgchem.colorado.edu">http://orgchem.colorado.edu</a> ). ....	33
Figura 30: Espectrofotômetro Bruker no Laboratório de Combustão e Combustíveis. ....	34
Figura 31: Durômetro portátil de dureza Shore A. ....	34
Figura 32: Balança Sartorius com dispositivo para medição de densidade.....	35
Figura 33: Imagens da microscopia eletrônica de varredura para as granulometrias a) P60, b) P120, c) P180, d) P240 e e) P400. ....	36
Figura 34: Fluxograma das etapas do protocolo de ensaio.....	37
Figura 35: Ferramenta de corte utilizada nesse trabalho. ....	38
Figura 36: Máquina de corte. ....	39
Figura 37: Máquina de ensaio utilizada.....	39
Figura 38: Orifício aonde a amostra foi colocada. ....	40
Figura 39: Mecanismo da máquina de ensaio abrasivo.....	40
Figura 40: Parafuso sem fim e guia do cabeçote. ....	41
Figura 41: Espectro no infravermelho de Pu1. ....	42
Figura 42: Espectro no infravermelho de Pu2. ....	43
Figura 43: Espectro no infravermelho de Pu3. ....	43
Figura 44: Espectro no infravermelho de Pu2 e de sua subsuperfície. ....	45
Figura 45: Oxidação do agrupamento metileno central do isocianato (ROSU, 2009). ....	45
Figura 46: Espectro no infravermelho de Rub1, Rub2 e Rub3. ....	46
Figura 47: Distribuição das alturas das asperidades das diferentes lixas. ....	47
Figura 48: Perda volumétrica para todos os materiais a 5 N para a lixa P 60. ....	49
Figura 49: Perda volumétrica para todos os materiais a 10 N para a lixa P 60. ....	49
Figura 50: Coeficiente de desgaste em função da altura média das asperidades para os poliuretanos a 5 N. ....	51
Figura 51: Coeficiente de desgaste em função da altura média das asperidades para os poliuretanos a 10 N. ....	51
Figura 52: Coeficiente de desgaste em função da altura média das asperidades para as borrachas a 5 N. ....	52
Figura 53: Coeficiente de desgaste em função da altura média das asperidades para as borrachas a 10 N. ....	52
Figura 54: Imagens de microscopia eletrônica após ensaio de Pu1 (esquerda) e de Pu3 (direita) para todas as lixas com carga aplicada de 5 N. A seta indica o sentido do deslizamento. ....	54
Figura 55: Imagens de microscopia eletrônica após ensaio da Rub3 para todas as lixas com cargas aplicada de 5 N (esquerda) e a 10 N (direita). A seta indica o sentido do deslizamento.....	56
Figura 56: Perda volumétrica em função da dureza Shore A para ensaios a 5 N com a lixa P60. ....	57
Figura 57: Perda volumétrica em função da dureza Shore A para ensaios a 10 N com a lixa P60. ....	57
Figura 58: Perda volumétrica em função da dureza Shore A para ensaios a 5 N com a lixa P400. ....	58
Figura 59: Perda volumétrica em função da dureza Shore A para ensaios a 10 N com a lixa P400. ....	58
Figura 60: Perda volumétrica para todos os materiais a 5 N para a lixa P 60. ....	64
Figura 61: Perda volumétrica para todos os materiais a 5 N para a lixa P 60. ....	64

Figura 62: Perda volumétrica para todos os materiais a 5 N para a lixa P 60. ....	65
Figura 63: Perda volumétrica para todos os materiais a 5 N para a lixa P 60. ....	65
Figura 64: Perda volumétrica para todos os materiais a 5 N para a lixa P 60. ....	66
Figura 65: Perda volumétrica para todos os materiais a 10 N para a lixa P 60. ....	66
Figura 66: Perda volumétrica para todos os materiais a 5 N para a lixa P 120. ....	67
Figura 67: Perda volumétrica para todos os materiais a 10 N para a lixa P 120. ....	67
Figura 68: Perda volumétrica para todos os materiais a 5 N para a lixa P 180. ....	68
Figura 69: Perda volumétrica para todos os materiais a 10 N para a lixa P 180. ....	68
Figura 70: Perda volumétrica para todos os materiais a 5 N para a lixa P 240. ....	69
Figura 71: Perda volumétrica para todos os materiais a 10 N para a lixa P 240. ....	69
Figura 72: Perda volumétrica para todos os materiais a 5 N para a lixa P 400. ....	70
Figura 73: Perda volumétrica para todos os materiais a 10 N para a lixa P 400. ....	70
Figura 74: Imagens de microscopia eletrônica após ensaio de Pu1.....	71
Figura 75: Imagens de microscopia eletrônica após ensaio de Pu2.....	72
Figura 76: Imagens de microscopia eletrônica após ensaio de Pu3.....	73
Figura 77: Imagens de microscopia eletrônica após ensaio de Rub1. ....	74
Figura 78: Imagens de microscopia eletrônica após ensaio de Rub2. ....	75
Figura 79: Imagens de microscopia eletrônica após ensaio de Rub3. ....	76
Figura 80: Perda volumétrica em função da dureza ShoreA para ensaios a 5 N (esquerda) e 10 N (direita) com a lixa P60. ....	77
Figura 81: Perda volumétrica em função da dureza ShoreA para ensaios a 5 N (esquerda) e 10 N (direita) com a lixa P120. ....	77
Figura 82: Perda volumétrica em função da dureza ShoreA para ensaios a 5 N (esquerda) e 10 N (direita) com a lixa P180. ....	77
Figura 83: Perda volumétrica em função da dureza ShoreA para ensaios a 5 N (esquerda) e 10 N (direita) com a lixa P240. ....	78
Figura 84: Perda volumétrica em função da dureza ShoreA para ensaios a 5 N (esquerda) e 10 N (direita) com a lixa P400. ....	78

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características dos poliuretanos. ....	47
Tabela 2: Características das borrachas. ....	47
Tabela 3: Altura média das asperidades das lixas abrasivas. ....	48

## SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS .....	3
RESUMO .....	4
ABSTRACT .....	5
LISTA DE FIGURAS .....	7
LISTA DE TABELAS .....	10
SUMÁRIO .....	11
I. Introdução .....	12
II. Revisão Bibliográfica.....	14
1 Tribologia.....	14
Desgaste abrasivo.....	14
2 Polímeros.....	25
Elastômeros.....	26
III. Materiais e Métodos .....	32
1 Materiais.....	32
2 Caracterização das propriedades estruturais e mecânicas .....	33
Espectroscopia no infravermelho (FT-IR) .....	33
Dureza .....	34
Densidade.....	35
3 Caracterização topográfica das lixas abrasivas .....	35
4 Ensaio de desgaste abrasivo .....	36
Preparação de amostras para ensaio.....	38
Execução dos ensaios.....	39
Análise em MEV das superfícies desgastadas .....	41
IV. Resultados e Discussão .....	42
1 Caracterização das propriedades estruturais e mecânicas .....	42
2 Caracterização topográfica das lixas abrasivas .....	47
3 Desgaste abrasivo.....	48
V. Conclusão.....	59
VI. Trabalhos futuros.....	60
VII. Referências bibliográficas .....	61
VIII. Anexos.....	64

## I. Introdução

A indústria mineral mundial apresentou lucros de aproximadamente 44 bilhões de dólares em 2012, e o Brasil, com cerca de 391 milhões de toneladas de produção de minério de ferro, exportou 330 milhões de toneladas em 2013 (International Steel Statistics Bureau, 2014). A demanda crescente em aço incentiva o estudo do desgaste dos componentes empregados na extração e transporte do minério de ferro, a fim de diminuir os gastos de manutenção e as paradas de produção e, por final, aumentar a vida útil desses componentes.

Apesar do conhecimento limitado no entendimento do desgaste abrasivo em materiais poliméricos, os poliuretanos e as borrachas têm sido utilizados mais frequentemente em aplicações de desgaste nas indústrias de beneficiamento de minério, apresentando um futuro promissor (SARE, 2001). Os poliuretanos, por exemplo, possuem um preço atrativo, excelentes propriedades mecânicas e alta resistência ao desgaste na classe dos polímeros (HILL, 1997).

As correias transportadoras são consideradas um elemento chave do escoamento contínuo do minério de ferro durante seu longo processamento; desde a sua extração na mina passando pela britagem e o peneiramento, até chegar ao porão dos navios no porto. A camada externa destas correias é composta de um material elastomérico que deve ser resistente a esforços cíclicos de tração e compressão, intempéries, impactos, abrasão e corte.

Após os processos de peneiramento fino, moagem e operações de concentração, o minério encontra-se adicionado a quantidades substanciais de água, dando origem a uma mistura heterogênea denominada polpa, constituída de partículas sólidas em suspensão em um meio aquoso (VALADÃO, 2007). Essa polpa, extremamente abrasiva, é transportada por tubulações revestidas internamente com poliuretano, devendo este ser resistente à abrasão e à hidrólise.

Este trabalho tem como objetivo caracterizar a resistência ao desgaste abrasivo de diferentes componentes elastoméricos empregados na indústria de beneficiamento de minério, tais como correias transportadoras e revestimentos internos de tubulação de polpa de minério de ferro segundo a norma ASTM D5963 variando três parâmetros de ensaio:

- O tamanho da partícula abrasiva (de 35  $\mu\text{m}$  a 260  $\mu\text{m}$ );

- A carga aplicada (5 N e 10 N);
- A distância de deslizamento (de 40 m a 120 m).

Após os ensaios de desgaste, imagens de microscopia eletrônica serviram de suporte para exibir uma correlação entre morfologia topográfica das lixas (altura média das partículas) e valores do desgaste.

## II. Revisão Bibliográfica

### 1 Tribologia

“A tribologia é a ciência e tecnologia que estuda a interação de superfícies em movimento relativo, e de práticas relacionadas” (JOST, 1966). Ela se firma na investigação científica dos três pilares: atrito, lubrificação e desgaste.

Atrito e desgaste não são propriedades intrínsecas aos materiais, mas sim características dos sistemas de engenharia chamados tribossistemas. Cada tribossistema oferece condições distintas que refletirão no comportamento tribológico – atrito e desgaste.

O atrito é a resistência ao movimento relativo surgindo a partir de interações dos sólidos na área real de contato e depende do par de materiais em contato e do tribossistema (ZUM GAHR, 1987). BLAU (2009) mostrou a complexidade do atrito devido as várias maneiras de dissipar a energia produzida quando um corpo desliza sobre outro.

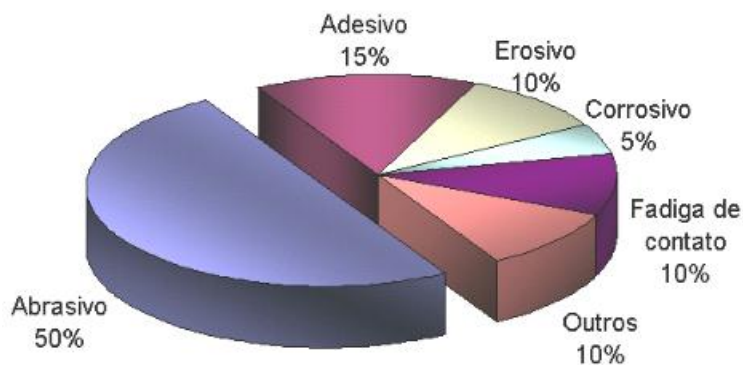
O desgaste, por sua vez, é definido como sendo a perda progressiva de matéria da superfície de um corpo como consequência do movimento relativo de um segundo corpo sobre o primeiro. Estatísticas realizadas em países desenvolvidos indicam que de 1 a 5% do PIB é gasto pela ação direta ou indireta do desgaste (CZICHOS,1992).

#### Desgaste abrasivo

LUDEMA (1996) relaciona 34 diferentes termos ao discutir a nomenclatura sobre desgaste. Para efeito de classificação, podem-se dividir os principais tipos de desgaste com base nos respectivos mecanismos. Assim, tem-se:

- Desgaste por deslizamento ou adesivo;
- Desgaste por abrasão ou abrasivo;
- Desgaste por erosão ou erosivo;
- Desgaste por fadiga de contato;
- Desgaste por reação tribo-química.

O desgaste abrasivo, segundo EYRE (1978), seria responsável por 50% das falhas de peças e componentes nos diversos ramos da indústria em relação ao desgaste (Figura 1).



**Figura 1: Diagrama circular de proporção do tipo de desgaste ocorrendo na indústria (EYRE, 1966).**

ZUM GAHR (1987) define o desgaste abrasivo como sendo a remoção de material de uma superfície causada por partículas duras. Tais partículas podem estar entre ou incrustadas em uma ou ambas as superfícies em movimento relativo. Por partícula dura entende-se um fragmento ou protuberância de material com maior dureza em relação à outra superfície mais macia. A distinção pode ser feita entre o desgaste abrasivo a dois ou a três corpos (Figura 2). Nos dias atuais o desgaste é denominado ou “por riscamento” (quando uma das superfícies tem partículas duras protuberantes e deslizam sobre a outra), ou “por rolamento” (quando as partículas são livres para rolar e deslizar entre as duas superfícies).



**Figura 2: Exemplo de desgaste a dois e a três corpos (ZUM GAHR, 1987).**

A Figura 3 retrata a contribuição do mecanismo de desgaste à medida que se varia a rugosidade superficial do contra corpo e o módulo de elasticidade do polímero. Para um elastômero, que possui um baixo módulo de elasticidade, o contato com uma aspereza do contra corpo irá resultar, na grande maioria das vezes, em deformação elástica, prevalecendo o mecanismo de desgaste por fadiga. Nesta mesma figura (Figura 3), o termo “abrasão” trata de mecanismos essencialmente plásticos de remoção de material polimérico.



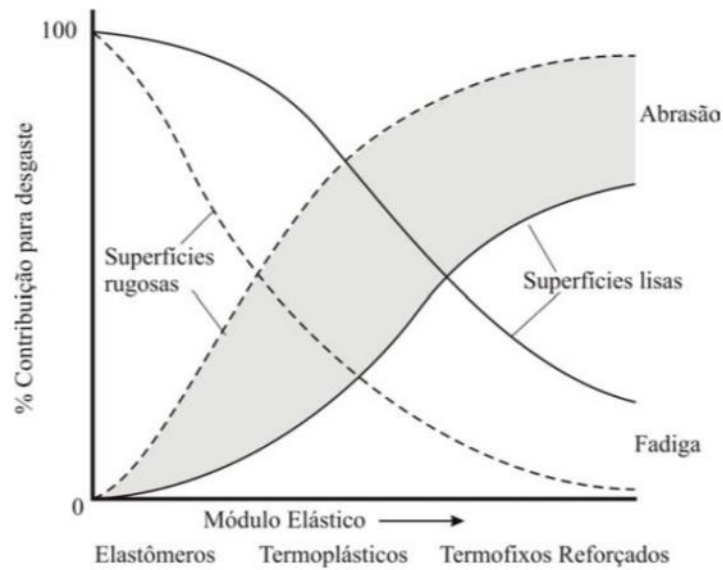


Figura 3: Diagrama esquemático apresentando a variação em importância dos mecanismos de abrasão e fadiga nos polímeros (HUTCHINGS, 1992, apud, EVANS and LANCASTER, 1979).

*Fatores que influenciam o desgaste abrasivo*

A resistência ao desgaste abrasivo não é uma propriedade intrínseca do material, mas é altamente dependente das características do tribossistema (ZUM GAHR, 1987).

A Figura 4, adaptada de ZUM GAHR (1987), apresenta os principais parâmetros que influenciam na perda de massa dos materiais em abrasão.



Figura 4: Parâmetros do desgaste abrasivo (adaptado de ZUM GAHR, 1987).

Das variáveis relacionadas acima a carga aplicada, o tamanho da partícula abrasiva e a dureza do material exercem, sem dúvida, uma importância preponderante no desgaste.

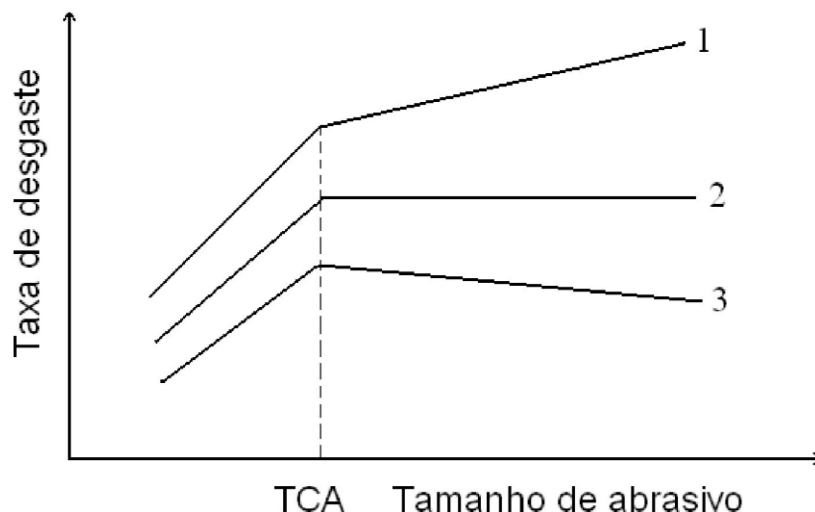
MISRA e FINNIE (1981), SRINATH e GNANAMOORTHY (2006), HARSHA (2011) e ZAAMOUT (2004) estudaram o efeito da carga no desgaste abrasivo de polímeros termoplásticos rígidos, tais como o polimetil-metacrilato (acrílico), nanocompósitos de Náilon e argila, politetrafluoretileno (teflon®), polipropileno, polietileno de alta densidade, poliamida entre outros. Os ensaios foram realizados com os abrasômetros roda de borracha e pino contra lixa; os resultados mostraram um aumento do volume desgastado ao aumentar a carga aplicada.

As partículas duras possuem três características fundamentais que influenciam no desgaste abrasivo. Segundo HUTCHINGS (1992), elas são:

- dureza;
- forma;
- tamanho.

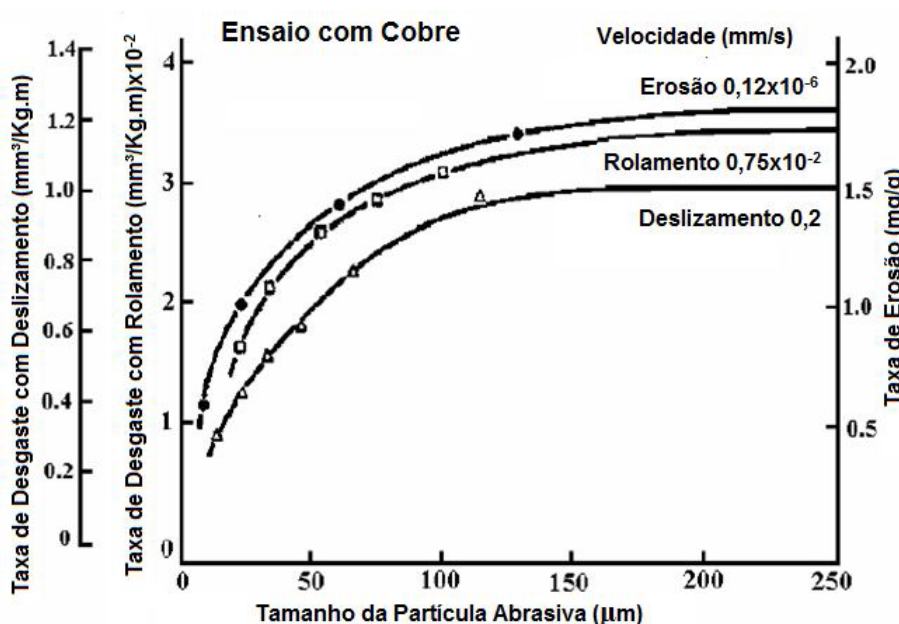
O efeito do tamanho da partícula abrasiva no desgaste é mais complexo que o efeito da carga. Os estudos deste efeito em metais e ligas são numerosos (NATHAN e JONES (1966), LARSEN-BADSE (1972), MISRA e FINNIE (1981), CORONADO e SINATORA (2011), DUBBERSTEIN (2013)).

Reporta-se da literatura que o desgaste aumenta linearmente com o aumento do tamanho do abrasivo até um tamanho crítico (TCA) e, a partir desse tamanho, o desgaste pode continuar crescendo com uma inclinação menor, como ilustrado esquematicamente na curva (1) da Figura 5, ou se manter constante, como na curva (2), ou diminuir, como na curva (3). Existem muitas hipóteses tentando explicar esse comportamento, mas ainda não existe uma explicação geral aceita por toda a comunidade científica. O fenômeno do TCA apresenta-se no desgaste abrasivo, na erosão e nos processos de usinagem por abrasão e corte (CORONADO e SINATORA, 2011).



**Figura 5: Relação esquemática da taxa de desgaste com a variação do tamanho da partícula abrasiva (CORONADO e SINATORA, 2011).**

MISRA e FINNIE (1981), em ensaios realizados com cobre e abrasivo de carbeto de silício (SiC) em desgaste abrasivo e erosivo, encontraram um TCA de aproximadamente 100  $\mu\text{m}$ , conforme mostrado na Figura 6, comprovando a existência do fenômeno do TCA.



**Figura 6: Relação entre a perda de massa no desgaste com a variação da partícula abrasiva na erosão e no desgaste abrasivo com deslizamento e de partículas abrasivas (adaptado de MISRA e FINNIE, 1981).**

Já para polímeros rígidos, a observação do TCA não é óbvia (SIN (1979), SRINATH e GNANAMOORTHY (2006), UNAL (2005) e ZAAMOUT (2004)) conforme Figuras 7, 8 e 9.

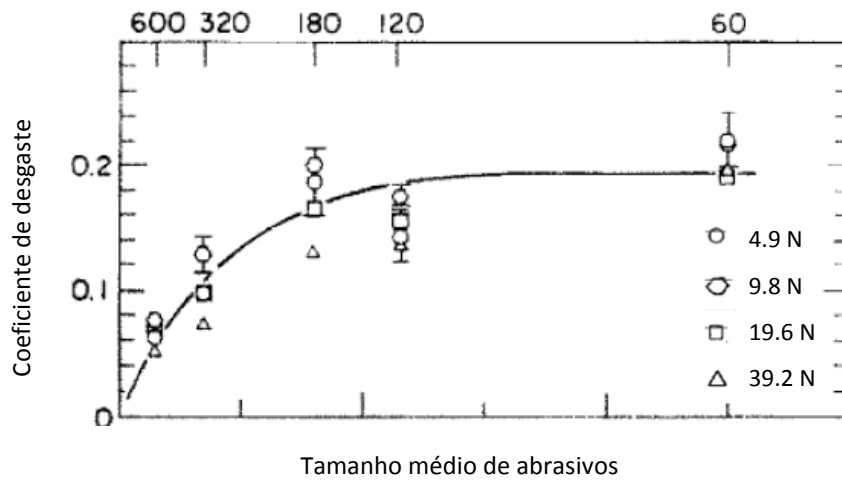


Figura 7: Coeficiente de desgaste do PMMA em função do tamanho médio de partículas abrasivas em um ensaio do tipo pino-disco (SIN, 1979).

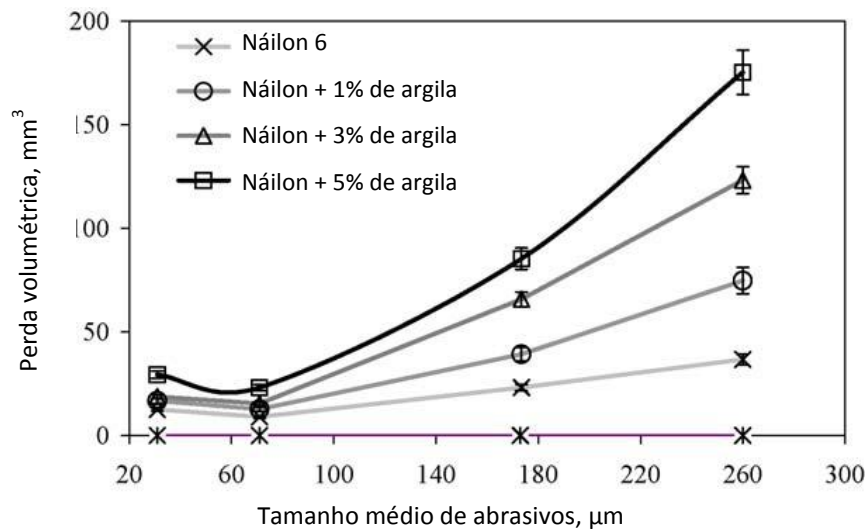
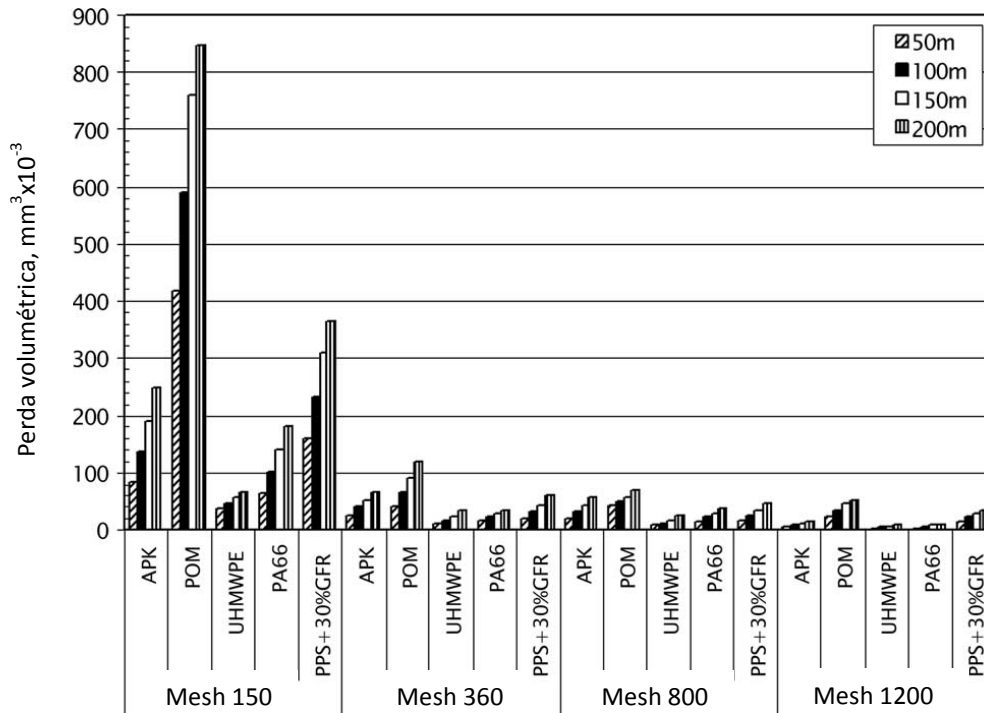


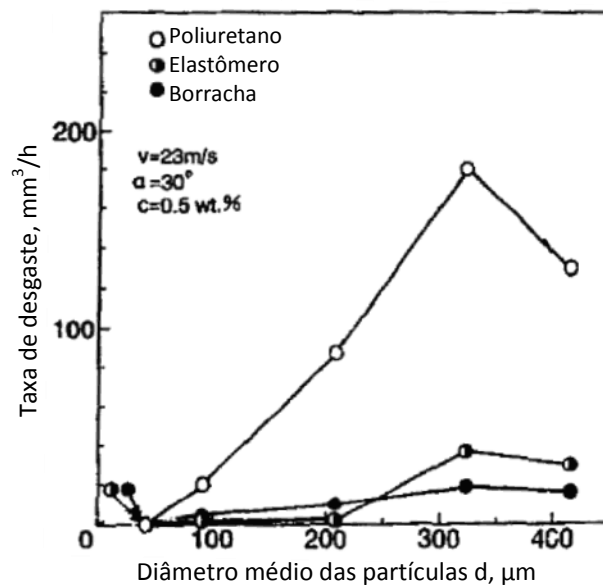
Figura 8: Perda volumétrica de náïlons em função do tamanho médio de partículas abrasivas em um ensaio do tipo pino-disco (SRINATH, 2006).



**Figura 9: Perda volumétrica de polímeros em função do tamanho médio de partículas abrasivas em um ensaio do tipo pino-disco (UNAL, 2005).**

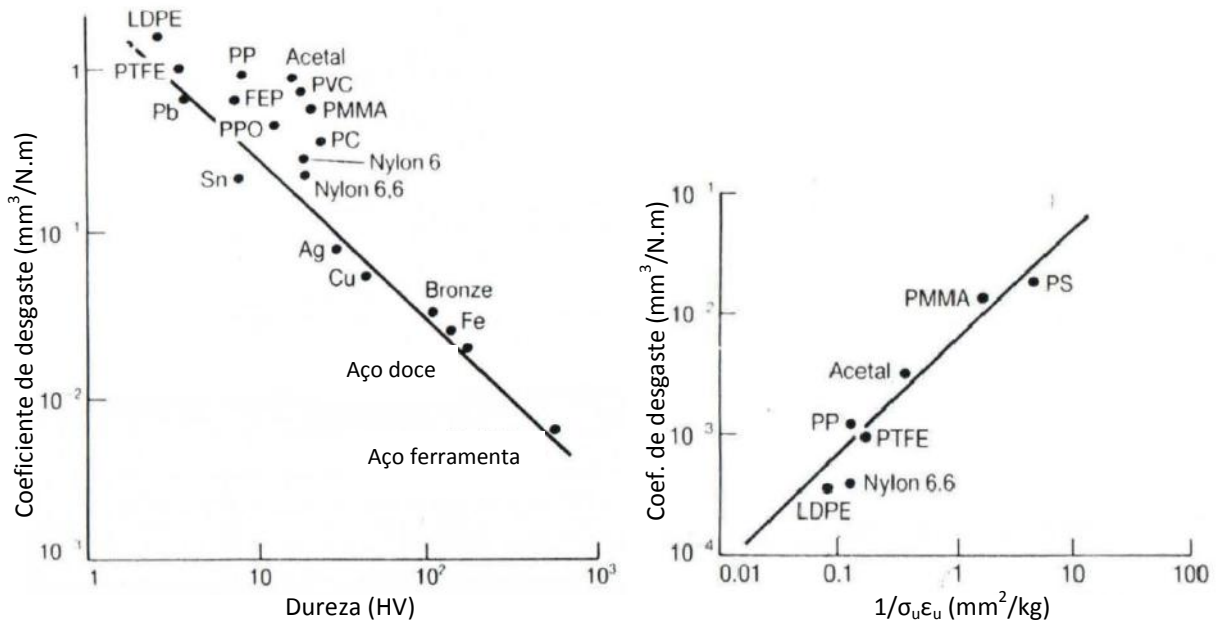
Porém, para polímeros elastoméricos, poucos são os estudos sobre o efeito do tamanho da partícula no desgaste abrasivo.

IWAI e NAMBU (1997) estudaram o efeito do tamanho das partículas no desgaste erosivo de elastômeros tais como borrachas e poliuretanos em um ensaio com jato de lama abrasiva (Figura 10).



**Figura 10: Relação entre taxa de desgaste e diâmetro médio das partículas abrasivas (IWAI, 1997).**

Enquanto existe uma relação entre a resistência ao desgaste e a dureza do material para metais e ligas na maioria dos casos; para polímeros essa relação não aparece de maneira nítida (Figura 11). O desgaste de polímeros, de maneira geral, e de termoplásticos, de maneira especial, apresenta uma correlação mais fraca com a dureza do que com a tenacidade (área em baixo da curva tensão x alongamento) (Figura 11).

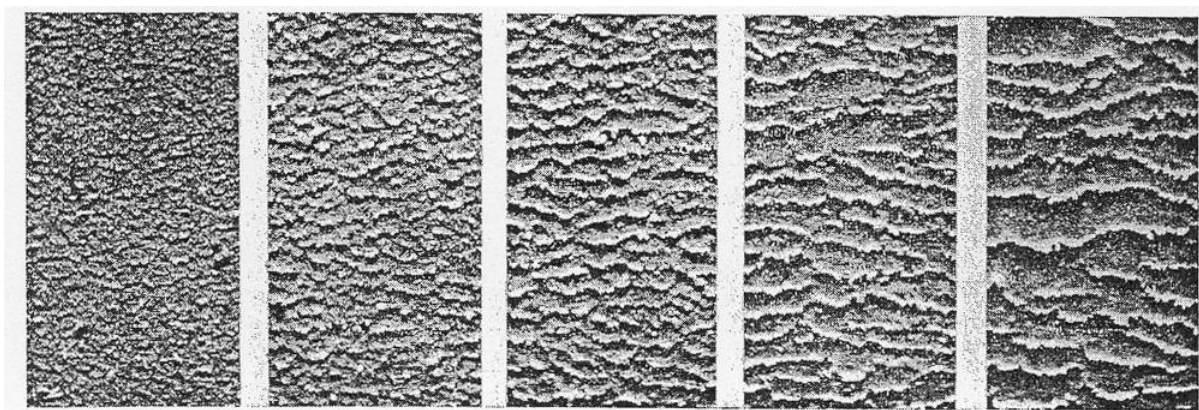


**Figura 11: Gráficos de correlação do coeficiente de desgaste em função da dureza (na esquerda) e da energia de ruptura (na direita) (HUTCHINGS, 1992).**

### *Desgaste abrasivo de elastômeros*

Elastômeros são utilizados em aplicações de engenharia devido ao seu baixo módulo de elasticidade e alto alongamento. Algumas dessas aplicações são: pneus, telas de peneiramento e correias transportadoras, dentre outras.

Durante a abrasão de elastômeros, um padrão particular pode ser observado na superfície desgastada. Este padrão apresenta linhas paralelas à direção do deslizamento chamadas de ondas de Schallmach (Figura 12).

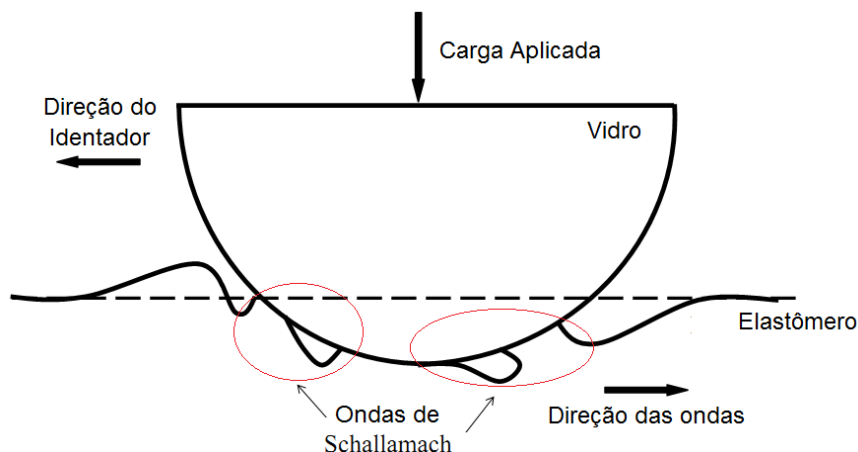


**Figura 12: Desenvolvimento de padrões abrasivos para uma borracha natural sobre lixa de granada. Distância deslizada: a) 120 cm; b)180 cm; c)240 cm; e) 720 cm (SCHALLAMACH, 1958).**

SCHALLAMACH (1971) demonstrou em suas pesquisas que, para condições específicas de deslizamento entre esferas rígidas e superfícies de elastômero (ou vice-versa), a superfície elastomérica comprimida situada na parte frontal da região de contato sofre flambagem, provocando ondas de “destacamento” que se propagam do início até o final da área de contato, a velocidades superiores a do movimento deslizante da partícula dura (Figura 13). Sob estas circunstâncias, um deslizamento real não ocorre. Ondas são formadas no elastômero, permitindo movimento relativo entre as superfícies aderidas do abrasivo e do elastômero sem escorregar entre duas ondas sucessivas.

A força motriz destas ondas é o gradiente das tensões tangenciais provocadas pela força de atrito entre partícula rígida e elastômero (ROBERTS e THOMAS, 1975). Os deslocamentos grosseiros são associados a estas ondas e se originam de uma instabilidade elástica devido a tensões compressivas tangenciais na zona do contato. A adesão na zona de contato foi considerada como a principal razão para a flambagem na superfície do elastômero (BEST, 1981).

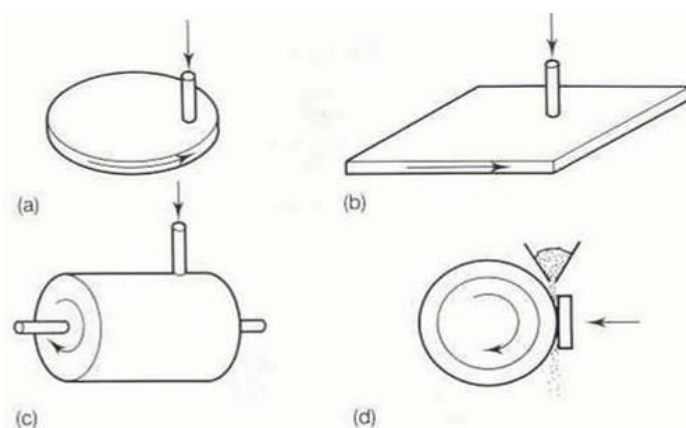
GENT (1989) atribui a formação de trincas superficiais à expansão elástica não restringida de micro vazios que, ao se abrirem, atingem a superfície. GENT e PULFORD (1983) sugeriram que a separação de pequenas partículas (debris) de 1  $\mu\text{m}$  a 5  $\mu\text{m}$  inicia o processo abrasivo.



**Figura 13: Desenho esquemático da propagação de ondas de Schallamach (BARQUINS, 1983).**

#### *Métodos de ensaio de desgaste abrasivo*

Vários arranjos experimentais têm sido utilizados para o estudo do desgaste abrasivo. As investigações têm por objetivo tanto o entendimento dos mecanismos envolvidos como a simulação de situações reais. Estes ensaios fornecem um banco de dados de taxas de desgaste e coeficientes de atrito. O controle e a medição de todas as variáveis com influência no desgaste são importantes; tais variáveis incluem: velocidade, carga, tipo de contato, tipo de carregamento, ambiente e temperatura de ensaio, dissipação de calor nos corpos em contato entre outros (HUTCHINGS, 1992). Alguns ensaios são mostrados na Figura 14.



**Figura 14: Desenho esquemático de quatro métodos para determinar as taxas de desgaste abrasivo: (a) Pino sobre disco, (b) Pino sobre placa, (c) pino sobre tambor e (d) roda de borracha (HUTCHINGS, 1992).**



A norma ASTM D5963 (Figura 14 (c) e Figura 15) refere-se à determinação da resistência ao desgaste por abrasão de elastômeros e materiais similares, utilizando cilindro rotativo.

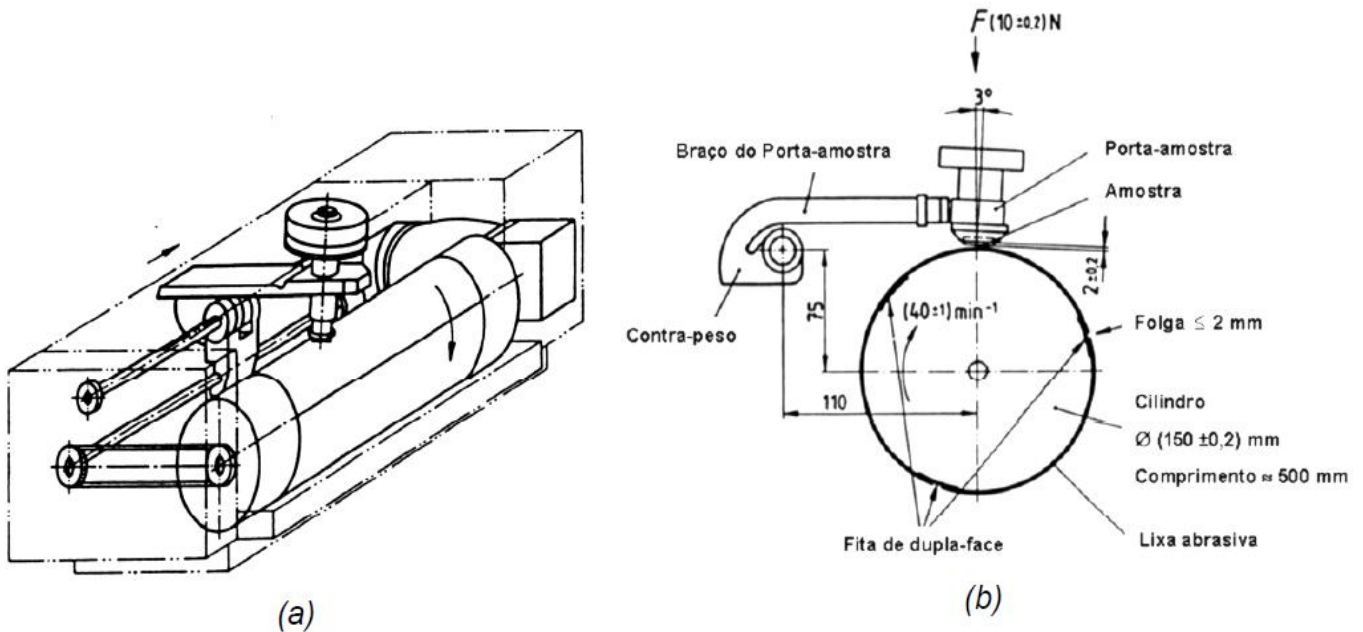
O seu princípio de funcionamento é da seguinte forma: o corpo-de-prova cilíndrico de borracha é deslizado contra um tambor rotativo que possui, em sua superfície, um material abrasivo, sendo este uma lixa (Figura 15 e 16). A carga e a velocidade são mantidas constantes e a resistência ao desgaste é dada pela perda volumétrica ao final do teste, medida indiretamente através da perda de massa do corpo cilíndrico.



**Figura 15: Máquina de ensaio ASTM D 5963.**

Algumas características do ensaio e da máquina são representadas na Figura 16:

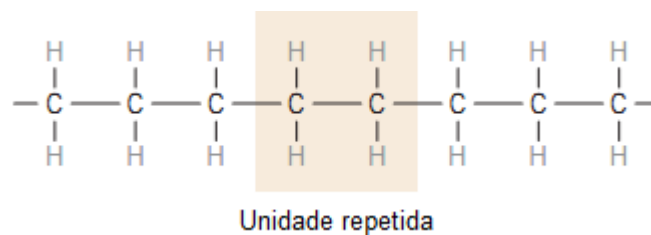
- Velocidade de rotação do tambor: 40 RPM;
- Velocidade tangencial do porta-amostra: 2,8 mm/s;
- Velocidade de deslizamento: 26 cm/s;
- Amostras cilíndricas, com diâmetro de  $16 \pm 0,2$  mm e espessura mínima de 6 mm;
- Lixa de óxido de alumínio.



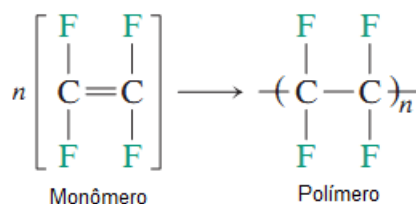
**Figura 16: Representação esquemática do abrasômetro previsto na norma ASTM D 5963: (a) vista geral e (b) detalhes do sistema de aplicação de carga e posicionamento da lixa abrasiva (ASTM D5963).**

## 2 Polímeros

A palavra polímero origina-se do grego *poli* (muitos) e *mero* (unidade de repetição). Logo, um polímero é uma macromolécula de material orgânico ou inorgânico de alta massa molecular composta por várias unidades de repetição (Figura 17), que são unidas por ligações covalentes. A matéria prima para a produção de um polímero é o monômero, uma molécula contendo uma unidade de repetição (Figura 18). As cadeias podem ser compostas por duas ou mais unidades repetidas diferentes, formando um copolímero (CALLISTER, 2012).



**Figura 17: Representação esquemática de uma unidade repetida para um polietileno (CALLISTER, 2012).**



**Figura 18: Monômero tetrafluoretileno sendo polimerizado e formando o politetrafluoretileno (Teflon®) (CALLISTER, 2012).**

O processo de polimerização que produz os polímeros a partir dos monômeros consiste na aplicação de calor, pressão, utilização de processos químicos e aditivos, de modo a resultar estruturas em forma de cadeia (CALLISTER, 2012).

Quando comparados aos metais, são caracteristicamente materiais de baixa densidade, resistentes a corrosão, normalmente isolantes elétricos, alguns com resistência mecânica comparável à dos aços. A sua limitação é a relativa baixa faixa de temperatura de uso.

Atualmente, são usados em uma série de aplicações incluindo brinquedos, aparelhos domésticos, itens estruturais e decorativos, pneus de automóveis, indústria aeroespacial, embalagens e em muitos outros tantos.

Existem várias formas de classificar polímeros.

Quanto às características de fusibilidade, existem duas classes principais:

- São denominados *termoplásticos*, os polímeros que fundem por aquecimento e solidificam no resfriamento, em um processo reversível até uma certa temperatura.
- São denominados *termofixos*, os polímeros que não são capazes de tornarem-se fluidos porque as cadeias macromoleculares estão unidas entre si por ligações químicas covalentes.

Quanto ao comportamento mecânico, existem duas classes principais, que são: plásticos e borrachas ou elastômeros. Plásticos são materiais que se tornam fluidos e moldáveis por ação isolada ou conjunta de calor e pressão. Borrachas ou elastômeros são materiais macromoleculares que exibem elasticidade em longa faixa à temperatura ambiente.

## Elastômeros

Os elastômeros são polímeros que possuem algumas características especiais, tais como alta elasticidade, viscoelasticidade e temperatura de transição vítrea bem abaixo da temperatura ambiente, estrutura amorfa no estado de repouso (CALLISTER, 2012).

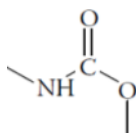
Para apresentar estas características, os elastômeros normalmente possuem cadeias flexíveis presas umas às outras, com uma baixa densidade de ligações cruzadas.

Em comparação com os metais, os elastômeros geralmente apresentam as seguintes características (GUIMARÃES, 2011):

1. Deformação elástica gigantesca, enquanto o módulo de elasticidade é extremamente pequeno. A deformação elástica pode alcançar até 1000% nos elastômeros, 1% na maioria dos materiais poliméricos e menos que 1% na maioria dos metais. O módulo de elasticidade é  $10^6$  vezes menor em comparação com os metais.
2. A deformação elástica de elastômeros não reticulados (com cadeias poliméricas não ligadas por ligações covalentes) apresenta distintas relações tempo-deformação, denominadas propriedades do relaxamento, característica que os metais não possuem.
3. O efeito térmico é mais evidente nos elastômeros. Quando tracionado, um elastômero apresenta aumento de temperatura, rejeitando calor ao ambiente. Além disso, o módulo de elasticidade aumenta com o aumento da temperatura. Ambos os fenômenos são contrários ao comportamento apresentado pela maioria dos metais.

### *Poliuretanos*

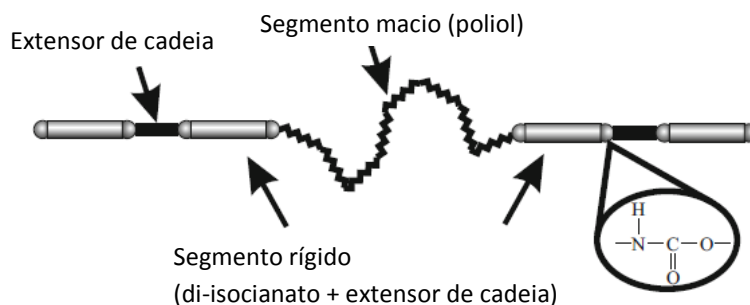
Desenvolvidos por Otto Bayer em 1937, os poliuretanos são compostos poliméricos que possuem cadeias de unidades orgânicas unidas por ligações uretânicas ( $-\text{NH}-\text{CO}-\text{O}-$ ) (Figura 19), sendo classificados como “plásticos” de engenharia. Eles apresentam ótimas características mecânicas como: resiliência, resistência à tração, à compressão, ao rasgamento, à fadiga, ao cisalhamento e à abrasão. Esses polímeros podem se apresentar tanto na forma de um termoplástico ou de um termofixo; de um elastômero ou de uma fibra (CANEVAROLO, 2007).



**Figura 19: representação esquemática da ligação uretânica (PRISACARIU, 2011).**

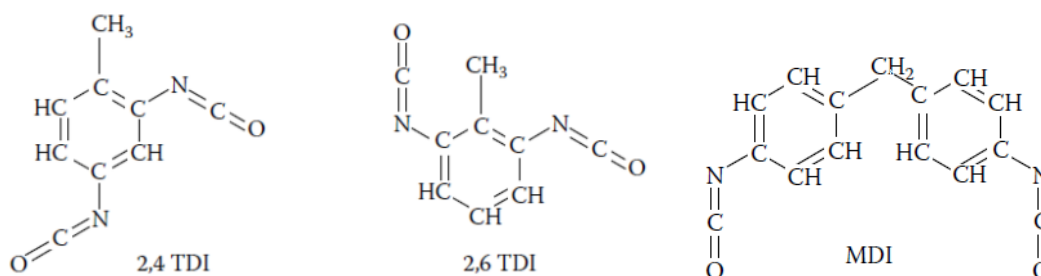
Os poliuretanos elastoméricos são copolímeros (polímero formado por mais de um tipo de monômero) resultantes da polimerização por adição de um isocianato a um composto que

apresente hidroxila, sendo o poliálcool poliéter e o poliálcool poliéster os principais, e um extensor de cadeia, além de outros reagentes como: catalisadores, surfactantes, cargas, agentes anti-envelhecimento, corantes, pigmentos etc (VILAR, 2005) (Figura 20).



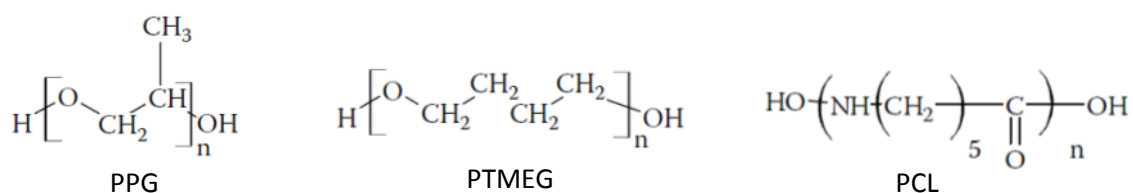
**Figura 20: Representação esquemática dos segmentos macios e rígidos de poliuretanos (PRISCARIU, 2011).**

Sendo responsável pelos segmentos rígidos do poliuretano, o isocianato é o principal reagente na formação de um poliuretano, sendo característico pela sequência de ligações duplas  $R-N=C=O$ , podendo este ser alifático ou aromático. Os isocianatos aromáticos possuem ótimas propriedades mecânicas e menor custo de produção; mas amarelam sobre influência da luz por oxidação (PRISCARIU, 2011). Os principais isocianatos são o tolueno diisocianato (TDI) e o difenil metano diisocianato (MDI) (Figura 21).



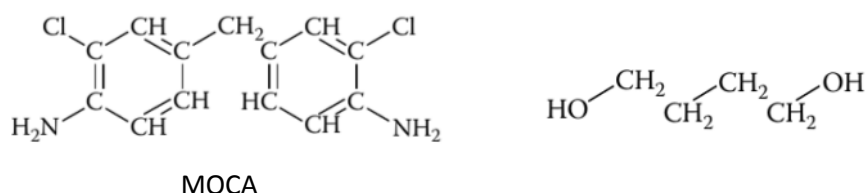
**Figura 21: Representação esquemática das moléculas de TDI e MDI (CLEMITSON, 2008).**

O grupo poliálcool é responsável pelos segmentos flexíveis e macios do poliuretano, e seu tamanho, assim como sua massa molecular, influenciam na flexibilidade do poliuretano. Poliálcoois de cadeia curta e pequena massa molecular produzem poliuretanos rígidos, enquanto poliálcoois de cadeia longa e grande massa molecular produzem poliuretanos flexíveis. Os poliálcoois poliéteres são mais estáveis contra hidrólise, porém menos estáveis contra oxidação que os ésteres, que, por sua vez, apresentam melhores propriedades mecânicas (PRISCARIU, 2011). Os principais poliálcoois são o politetrametileno glicol (PTMEG), o polioxipropileno glicol (PPG) e a policaprolactona (PCL) (Figura 22).



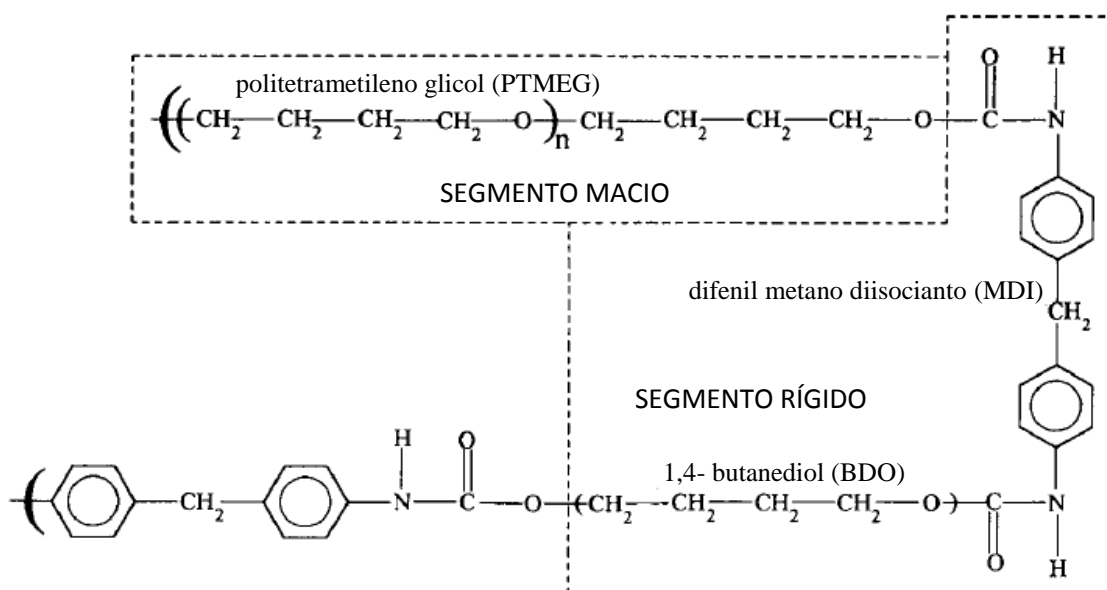
**Figura 22: Representação esquemática dos principais polióis (CLEMITSON, 2008).**

Os extensores de cadeia são poliamidas ou polióis de pequeno peso molecular que reagem com o isocianato para incorporar-se ao segmento duro, proporcionando a separação de fase entre segmento rígido e macio (VILAR, 2005). Os principais extensores de cadeia são o metileno bis-o-cloro-anilina (MOCA) e o 1,4-butanodiol (BDO) (Figura 23).



**Figura 23: Representação esquemática dos principais extensores de cadeia (CLEMITSON, 2008).**

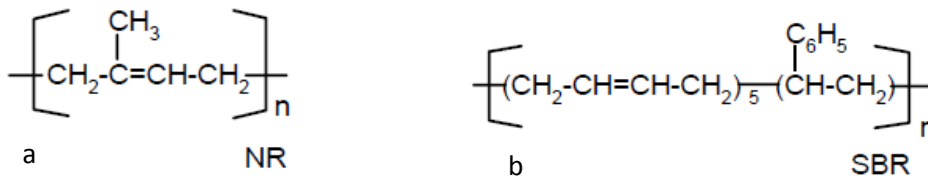
A título de exemplo, a Figura 24 ilustra a estrutura química de uma cadeia básica de um poliuretano composto do poliól PTMEG, do di-isocianato MDI e do extensor de cadeia BDO.



**Figura 24: Representação esquemática de uma cadeia de poliuretano PTMEG/ MDI/ BD (HILL, 1996).**

## Borrachas

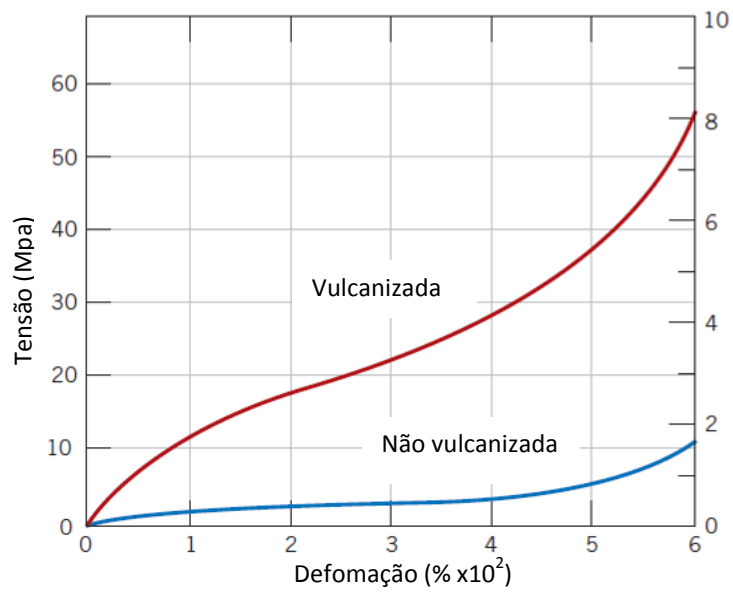
O elastômero de origem natural mais conhecido é a borracha natural, 2-metilbuta-1,3-dieno (NR) (Figura 25a), e os de origem sintética mais utilizados são o Poli (butadieno-co-estireno) (SBR) (Figura 25b), poli (butadieno) (BR), terpolímero de etileno-propileno-dieno (EPDM), poli (metacrilato de metila) (NBR) (CARLI, 2009). Cerca de 35% da borracha utilizada no mundo é borracha natural, obtida principalmente de plantações e pequenas propriedades na Malásia, Indonésia e outros países do Sudeste Asiático, bem como de áreas de cultivo, ainda menores, da África Oriental e das Américas do Sul e Central. Os remanescentes 65% são sintetizados do petróleo. A borracha natural já era conhecida pelos índios antes do descobrimento da América, sendo a seringueira (*Hevea brasiliensis*), o único elastômero extraído de fonte renovável.



**Figura 25: Representação esquemática de uma unidade repetida para (a) o 2-metil-buta-1,3-dieno (NR) e para (b) Poli (butadieno-co-estireno) (SBR) (CIULLO, 1999).**

Quando se considera aplicações de engenharia, as propriedades mecânicas como dureza, resistência à tração, módulo de elasticidade, alongamento na ruptura, resiliência e resistência à abrasão se fazem necessárias. O processo de otimizar um número apreciável de variáveis, de modo a obter o melhor ajuste de uma faixa de propriedades para uma aplicação em particular, é uma prática normal e faz parte do desenvolvimento de uma formulação para um determinado composto elastomérico (ALCANTARA, 2004). Assim, no desenvolvimento de formulações para compostos elastoméricos, utiliza-se um grande número de aditivos tais como cargas (negro de fumo), agentes de proteção, auxiliares de proteção, auxiliares de processo, agentes de vulcanização, aceleradores de vulcanização e, enfim, ativadores de vulcanização entre outros (MORESCO, 2013).

O processo de vulcanização reticula a rede da borracha melhorando o módulo de elasticidade (Figura 26), a tensão de ruptura e a degradação por oxidação. A magnitude do módulo de elasticidade é diretamente proporcional à densidade de ligações cruzadas (CALLISTER, 2012).



**Figura 26: Curva tensão x deformação para uma borracha natural (azul) e vulcanizada (vermelha) (CALLISTER, 2007).**



### III. Materiais e Métodos

#### 1 Materiais

As amostras cilíndricas foram produzidas segundo a ASTM D5963 a partir de componentes utilizados na indústria de beneficiamento de minério utilizando uma ferramenta apropriada.

Três poliuretanos, extraídos de tubulações de polpa de minério (Figura 27), e três borrachas, extraídas de correias transportadoras (Figura 28), foram estudados.

Pu1 foi recebido em estado novo, enquanto Pu2 e Pu3 teriam atingido as suas vidas úteis.



**Figura 27: Vista transversal de seções de tubulações de polpa de minério onde foram extraídos a) Pu1, b) Pu2, c) Pu3.**

Rub1 foi recebido em estado, novo enquanto Rub2 e Rub3 teriam atingido as suas vidas úteis.



**Figura 28: Vista de cima de pedaços de correias transportadoras onde foram extraídos a) Rub1, b) Rub2, c) Rub3.**

## 2 Caracterização das propriedades estruturais e mecânicas

### Espectroscopia no infravermelho (FT-IR)

Esta técnica consiste em incidir radiação eletromagnética correspondente a faixa do infravermelho ( $4000 - 400 \text{ cm}^{-1}$ ) na amostra polimérica. A energia associada a estes comprimentos de onda, uma vez absorvida pela molécula, converte-se em energia de rotação-vibração molecular. Este fenômeno de absorção é altamente dependente dos agrupamentos químicos que estão presentes na amostra. Portanto, a análise e a interpretação de um espectro no infravermelho obtido para um polímero mostram os agrupamentos químicos presentes em sua estrutura e, conseqüentemente, sua estrutura química. Um exemplo de espectro do etanol, com as suas respectivas bandas de absorção, está na Figura 29.

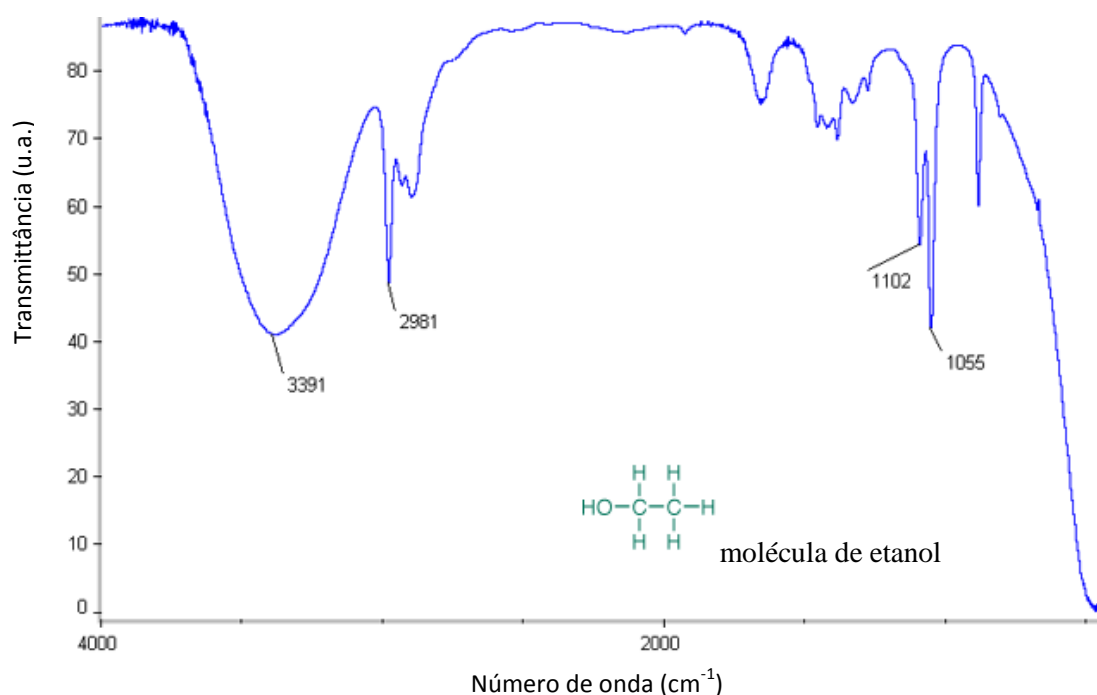


Figura 29: Espectro no infravermelho do etanol (<http://orgchem.colorado.edu>).

Neste trabalho, foi utilizado um espectrofotômetro Bruker Optik GmbH model Vertex 70 (Figura 30). Os espectros foram obtidos com 16 repetições, varredura de  $4000$  a  $400 \text{ cm}^{-1}$ , e resolução igual a  $4 \text{ cm}^{-1}$ . As amostras foram analisadas por método de reflexão, utilizando ATR (Reflexão Total Atenuada) de contato.

Os equipamentos utilizados nesta etapa foram disponibilizados pelo LCC (Laboratório de Combustão e Combustíveis) da UFES.



**Figura 30: Espectrofotômetro Bruker no Laboratório de Combustão e Combustíveis.**

## **Dureza**

O método ASTM D2240 aplica-se a doze tipos de durezas de materiais poliméricos mensuradas em durômetros dos tipos: A, B, C, D, DO, E, M, O, OO, OOO, OOO-S e R. Essa norma apresenta o procedimento para determinação da dureza por indentação de materiais classificadas como elastômeros, termoplásticos, borrachas vulcanizadas, materiais elastoméricos, materiais celulares, materiais em estado de gel e também alguns plásticos. Este método de teste é baseado na penetração de um tipo de indentador específico quando forçado contra um material sob condições específicas. A dureza por indentação depende do módulo elástico e viscoelástico do material de teste.

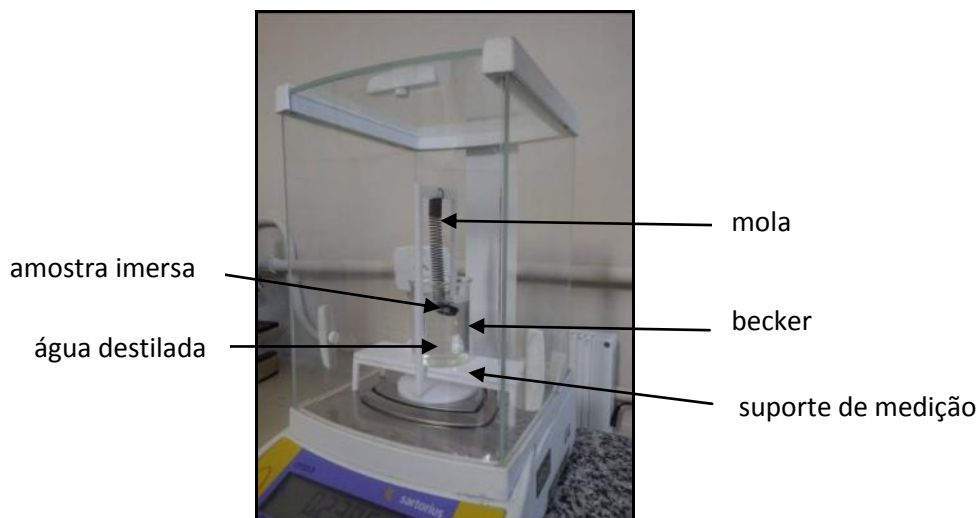
O durômetro empregado neste trabalho foi do tipo Shore A da marca Politerm modelo HT-6510A (Figura 31).



**Figura 31: Durômetro portátil de dureza Shore A.**

## Densidade

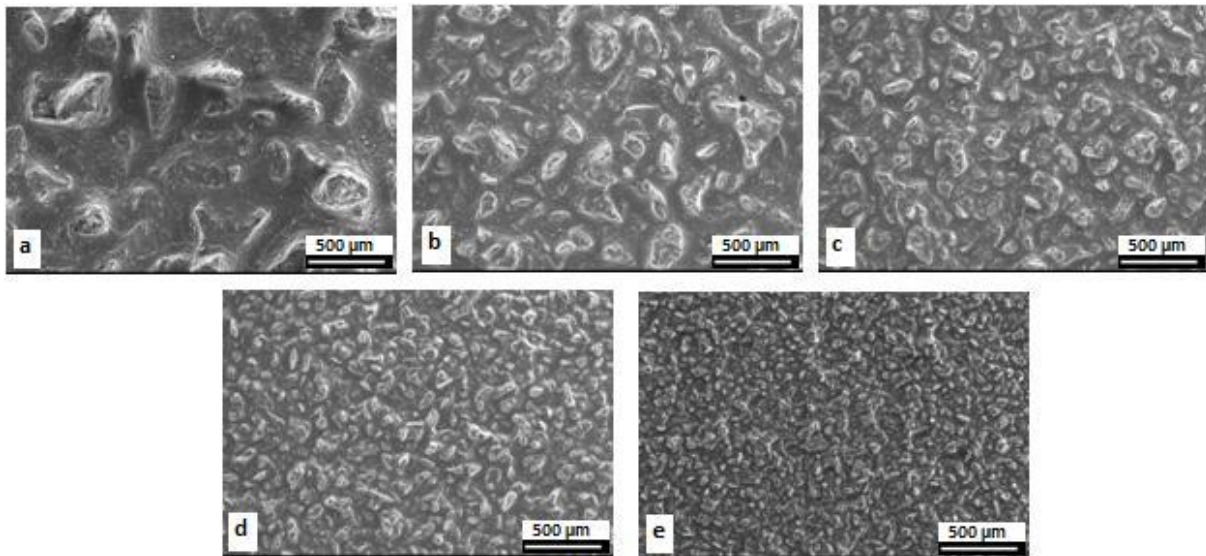
O método ASTM D792 descreve a determinação do peso específico (densidade relativa) e a densidade de borrachas vulcanizadas, elastômeros e termoplásticos na forma de chapa, barra, tubo ou itens moldados. Os corpos de prova podem ser testados em água e em outros líquidos. Para esse ensaio, utilizou-se água destilada e foi realizado em uma balança de marca Sartorius, modelo CP 225D (precisão de 0,01 mg), com dispositivo para determinação da densidade (Figura 32).



**Figura 32: Balança Sartorius com dispositivo para medição de densidade.**

### 3 Caracterização topográfica das lixas abrasivas

As lixas utilizadas neste trabalho são lixas de alumina do tipo resina sobre resina da marca Deerfos, modelo XA167. Os ensaios foram realizados com as lixas de granulometrias P60 (diâmetro médio das partículas de 269  $\mu\text{m}$ ), P120 (diâmetro médio das partículas de 125  $\mu\text{m}$ ), P180 (diâmetro médio das partículas de 82  $\mu\text{m}$ ), P240 (diâmetro médio das partículas de 58,5  $\mu\text{m}$ ) e P400 (diâmetro médio das partículas de 35  $\mu\text{m}$ ) sem cegamento prévio (Figura 33).



**Figura 33: Imagens da microscopia eletrônica de varredura para as granulometrias a) P60, b) P120, c) P180, d) P240 e e) P400.**

A distribuição das alturas das asperidades das lixas foi obtida através do perfilômetro Taylor-Hobson, modelo Talysurf CLI1000.

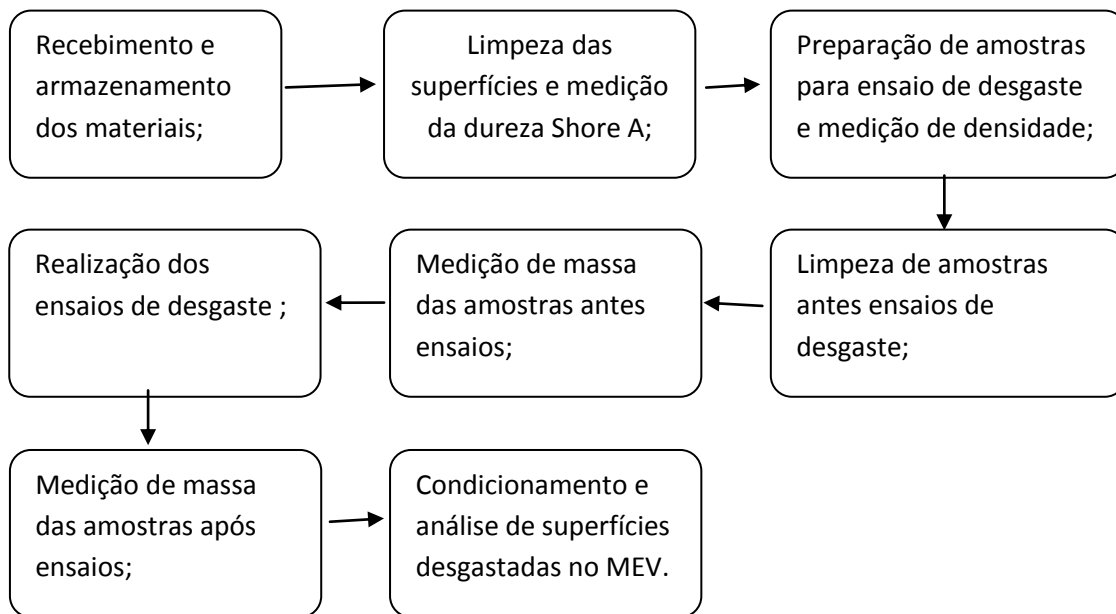
#### **4 Ensaio de desgaste abrasivo**

Os ensaios de desgaste abrasivo foram realizados segundo a norma ASTM D 5963. Foi utilizado um protocolo para a realização dos ensaios. Segundo RODRIGUES, 2013, esse protocolo tem por objetivo atender todas as recomendações relacionadas pela ASTM D 5963 e de minimizar a influência de parâmetros do sistema tribológico como lixa, operador e máquina.

Os ensaios foram realizados a uma velocidade de 26 cm/s, com cargas de 5 N e 10 N. Depois de cada ensaio (40 metros de distância deslizada), a massa do pino foi medida e o ensaio repetido até atingir uma distância deslizada de 120 metros.

Este protocolo se divide em etapas, que serão apresentadas por um fluxograma na Figura 34.

Um termo-higrômetro digital da marca Minipa, modelo MT-240, foi utilizado durante os ensaios de desgaste afim de se assegurar da estabilidade de parâmetros, tais como temperatura e umidade, estabelecidos na norma relativa ao ensaio.



**Figura 34: Fluxograma das etapas do protocolo de ensaio.**

### Recebimento e armazenamento dos materiais

Após o recebimento dos materiais a serem ensaiados, os mesmos foram armazenados em temperatura ambiente, evitando a exposição ao calor, luz ou contaminantes em geral, de acordo com a norma.

### Limpeza e medição de dureza Shore A

Para eliminar contaminantes provenientes do local de extração dos componentes e do processo de corte (sabão, impurezas superficiais e dentre outros), as superfícies foram lavadas em água corrente utilizando detergente líquido neutro. Depois da lavagem, elas permanecem aproximadamente 12 horas ao ar livre nas condições de temperatura e umidade do ensaio para que a água absorvida fosse evaporada.

Para a medição da dureza Shore A foram tomadas as seguintes precauções para atender a norma, tais como:

- Espessura mínima de 6 mm;

- Superfície onde o ensaio será realizado deve ser plana, no mínimo na área em contato com o penetrador;
- As medições devem ser feitas a 12 mm de qualquer borda ou uniformidade do material e estar distante de no mínimo um raio de 6 mm da última medição;
- Mínimo de 5 medições por material.

### Preparação de amostras para ensaio

Os materiais foram cortados a uma velocidade de 650 RPM, a fim de preservar o material e evitar o aquecimento do elastômero. O avanço foi regulado manualmente. Foi utilizado um fluido lubrificante composto de água e sabão neutro. Após o corte, cada amostra foi numerada. Quanto às dimensões, todas as amostras atenderam as exigências de norma (formato cilíndrico, diâmetro de  $16 \pm 0,2$  mm e espessura mínima de 6 mm).

Foram utilizados os seguintes equipamentos para o corte dos materiais no TRICORRMAT – UFES:

- 1- Ferramentas de corte de aço ABNT 4340 (Figura 35).



**Figura 35: Ferramenta de corte utilizada nesse trabalho.**

- 2- Furadeira de coluna da marca Kone, modelo KM 32 (Figura 36), disponibilizada pelo LabTecMec – UFES (Laboratório de Tecnologia Mecânica).

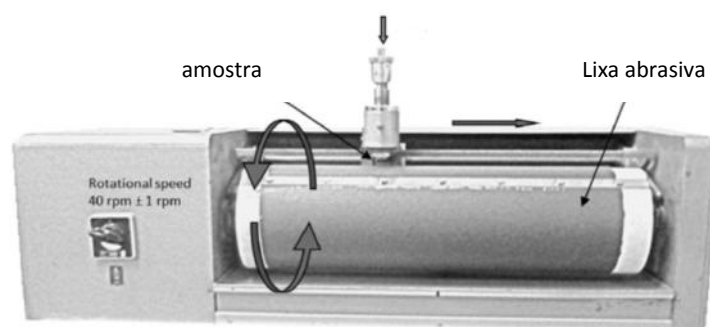


**Figura 36: Máquina de corte.**

Para a viabilidade do corte de amostras cilíndricas, apresentando regularidades geométricas, foi utilizado um calço de madeira para apoio para evitar o contato da ferramenta de corte com a estrutura metálica do equipamento.

### Execução dos ensaios

Primeiramente, as lixas de óxido de alumínio foram recortadas nas medidas do cilindro da máquina de ensaio (Figura 37), fabricada pela Veb Thüringer Industrie werkuensteine, e fixada sobre o tambor da mesma. A lixa deve ser fixada firmemente para interferir o mínimo possível no processo abrasivo. Fitas autocolantes dupla face foram utilizadas em ensaios para ajudar na fixação.



**Figura 37: Máquina de ensaio utilizada.**



Posteriormente, as amostras foram colocadas no cabeçote da máquina, dentro do orifício indicado pela (Figura 38), e foram deslocadas até o fundo do orifício de tal forma que a superfície da amostra estivesse tangente à borda do orifício.

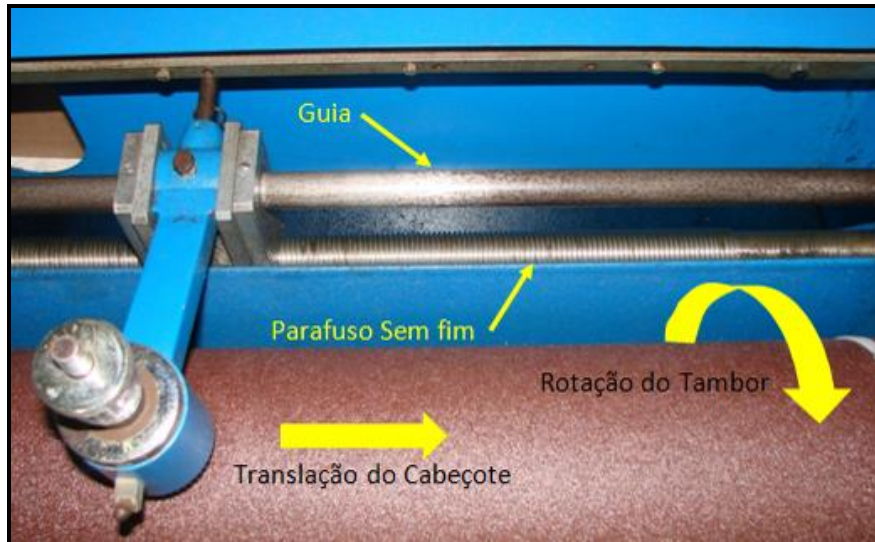


**Figura 38: Orifício aonde a amostra foi colocada.**

Ao ligar a máquina, um motor elétrico acoplado a uma polia gera um torque em um parafuso sem fim (Figura 39). Este parafuso provoca a movimentação de duas engrenagens; a engrenagem 1 é responsável pela movimentação de outro parafuso sem fim, que faz a translação do cabeçote, cuja trajetória é delimitada por um eixo (Figura 39). Já a engrenagem 2 é responsável pelo movimento rotacional do tambor. O movimento do cabeçote e do tambor pode ser observado na Figura 40.



**Figura 39: Mecanismo da máquina de ensaio abrasivo.**



**Figura 40: Parafuso sem fim e guia do cabeçote.**

Três amostras de cada material foram ensaiadas em uma sequência aleatória.

### **Limpeza da lixa durante os ensaios**

Durante os ensaios, foi realizada a limpeza da lixa após cada material ensaiado a fim de evitar a impregnação de debris na lixa. Na hipótese de não realização da limpeza da lixa, a amostra, ao ser ensaiada, poderia não deslizar apenas contra as asperidades da lixa e sim sobre os próprios debris, contribuindo provavelmente para um valor de desgaste alterado para esse tipo de ensaio.

### **Análise em microscopia eletrônica de varredura das superfícies desgastadas**

Para analisar os mecanismos de desgaste, as amostras foram analisadas em um microscópio eletrônico de varredura da marca Carl Zeiss AG, modelo EVO 40 após metalização num metalizador à base de platina da marca Quorum Technologies, modelo K550X. Os equipamentos utilizados nesta etapa foram disponibilizados pelo LCSM (Laboratório de Caracterização de Superfícies de Materiais) da UFES e o LFS (Laboratório de Fenômenos de Superfícies) da USP.

## IV. Resultados e Discussão

### 1 Caracterização das propriedades estruturais e mecânicas

#### Espectroscopia no infravermelho (FT-IR)

Essa caracterização foi realizada com o objetivo de caracterizar as estruturas químicas dos poliuretanos e das borrachas e, também, de avaliar o efeito do envelhecimento dos materiais na escala superficial e subsuperficial.

Os espectros de absorção no infravermelho dos poliuretanos Pu1, Pu2 e Pu3 estão a seguir nas Figuras 41,42 e 43, respectivamente.

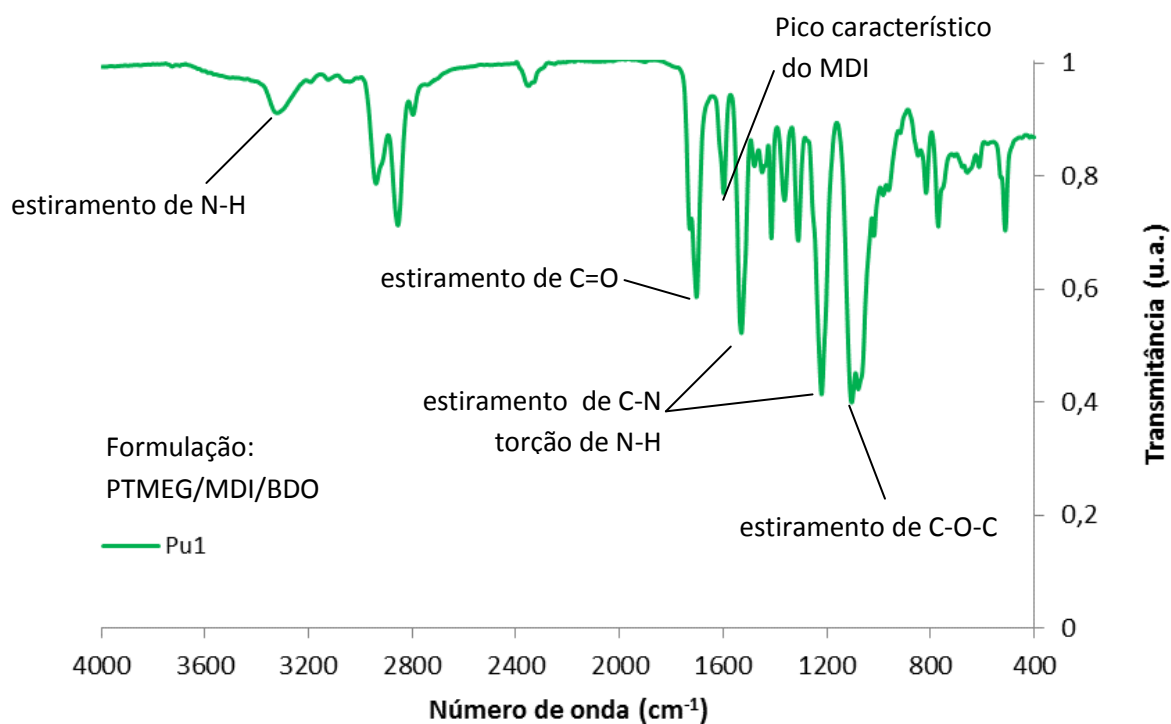


Figura 41: Espectro no infravermelho de Pu1.

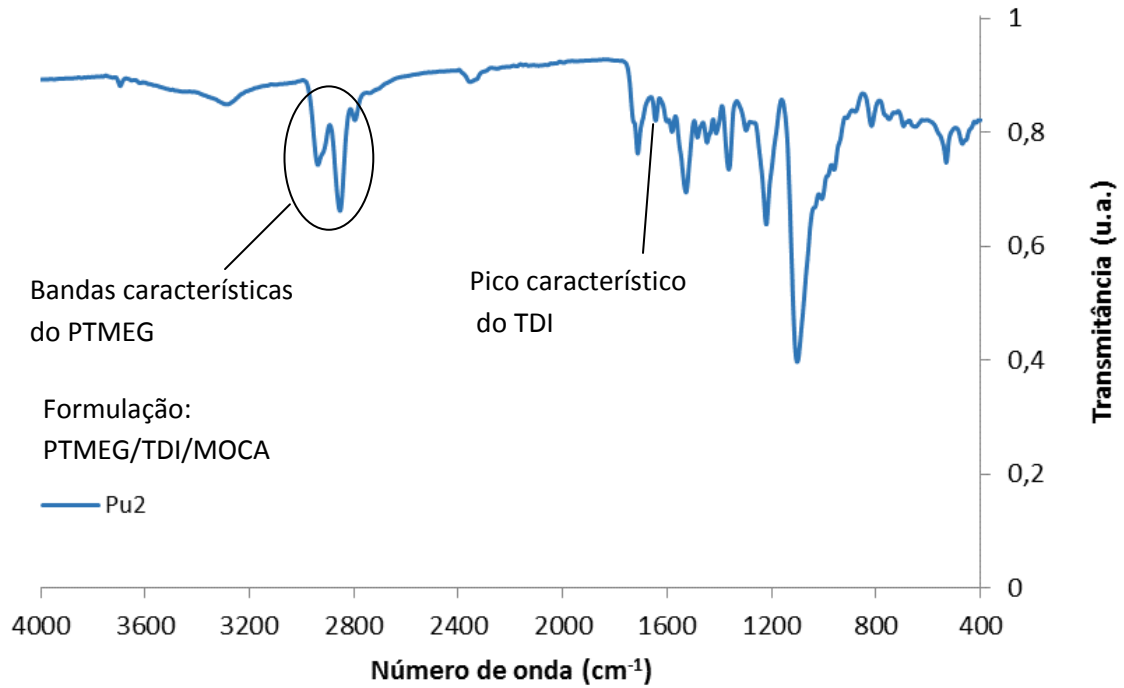


Figura 42: Espectro no infravermelho de Pu2.

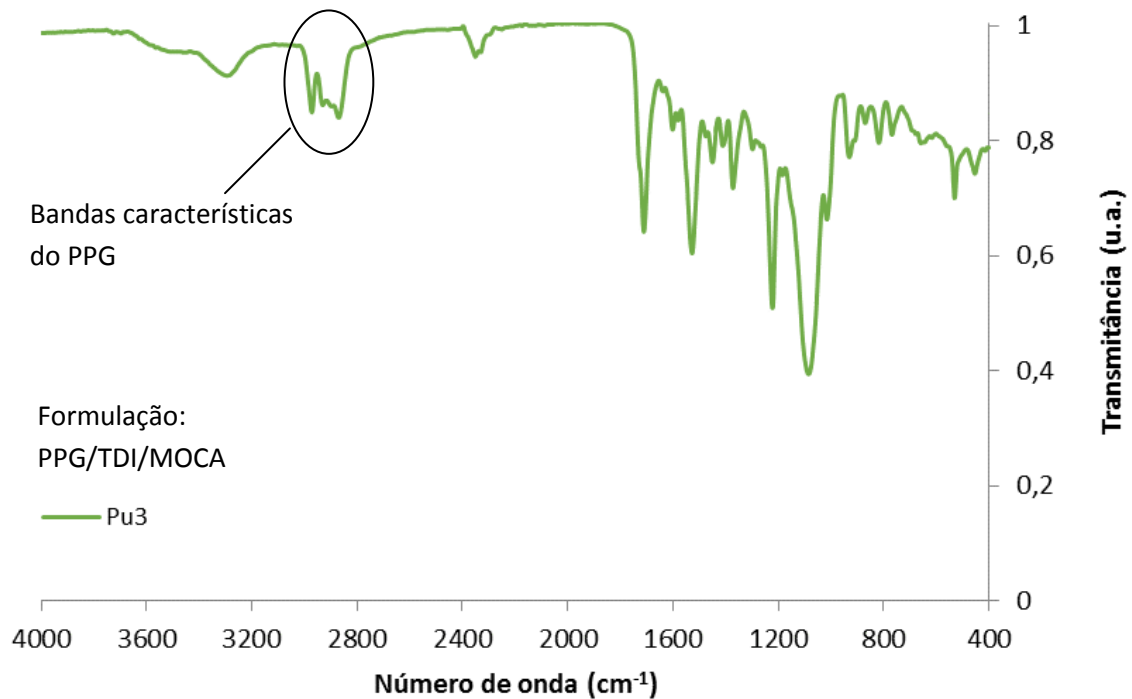


Figura 43: Espectro no infravermelho de Pu3.

Os poliuretanos apresentam bandas de absorção comuns devido à presença de ligações uretânicas ( $-\text{NH}-(\text{C}=\text{O})-\text{O}-$ ):

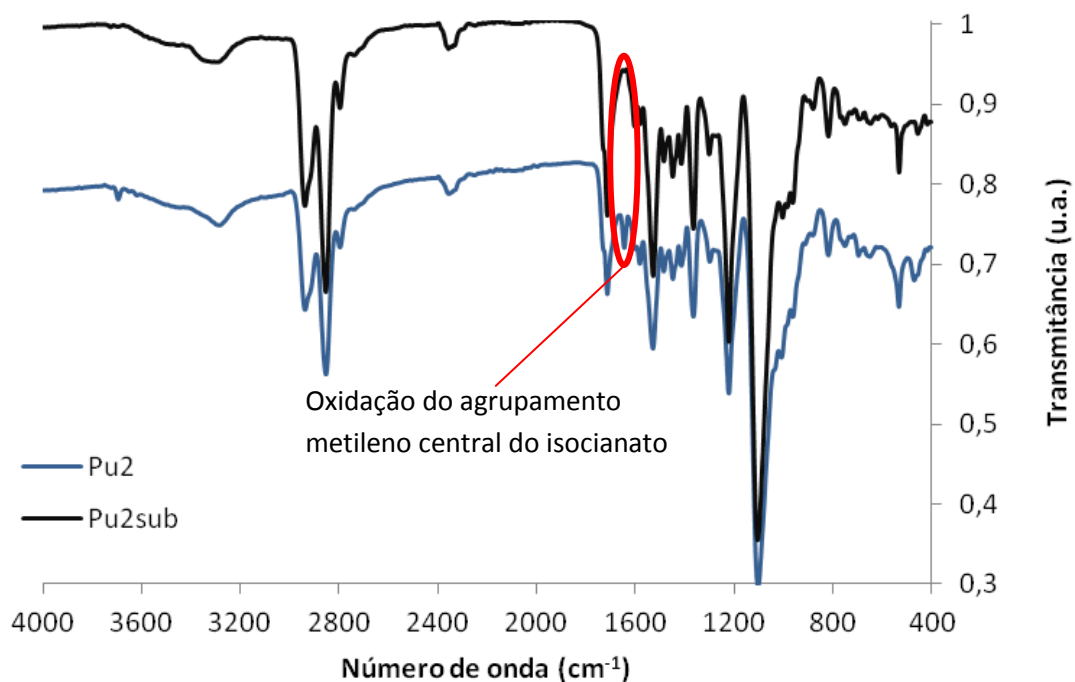
- 1) O estiramento da ligação N-H em associação sob forma de pontes de hidrogênio aparece nos números de onda  $\sim 3321 \text{ cm}^{-1}$ ,  $\sim 3297 \text{ cm}^{-1}$  e  $\sim 3301 \text{ cm}^{-1}$  para Pu1, Pu2 e Pu3, respectivamente.
- 2) O estiramento da ligação C=O em associação sob forma de pontes de hidrogênio aparece nos números de onda  $\sim 1702 \text{ cm}^{-1}$ ,  $\sim 1713 \text{ cm}^{-1}$ ,  $\sim 1711 \text{ cm}^{-1}$  para Pu1, Pu2 e Pu3, respectivamente.
- 3) O estiramento da ligação C-N e a torção da ligação N-H aparecem nos números de onda  $\sim 1530 \text{ cm}^{-1}$ ,  $\sim 1528 \text{ cm}^{-1}$  e  $\sim 1527 \text{ cm}^{-1}$  para Pu1, Pu2 e Pu3, respectivamente.
- 4) O estiramento da ligação C-N e a torção da ligação N-H aparecem nos números de onda  $\sim 1220 \text{ cm}^{-1}$ ,  $\sim 1220 \text{ cm}^{-1}$  e  $\sim 1222 \text{ cm}^{-1}$  para Pu1, Pu2 e Pu3, respectivamente.
- 5) A ausência de banda de absorção a  $\sim 3500 \text{ cm}^{-1}$  indica que todas as ligações N-H estão sob forma de pontes de hidrogênio.

As bandas de absorção aparecendo nos números de onda  $\sim 1104 \text{ cm}^{-1}$ ,  $\sim 1103 \text{ cm}^{-1}$  e  $\sim 1085 \text{ cm}^{-1}$  para Pu1, Pu2 e Pu3, respectivamente, são associadas ao estiramento assimétrico da ligação alifática C-O-C de éter dos poliuretanos. Desta maneira, os três poliuretanos são do tipo poli(éter)uretano (poliuretano tendo como polioliol de base um poliéter).

As bandas de absorção entre  $3000$  e  $2800 \text{ cm}^{-1}$ , presentes no Pu1 e no Pu2, são características do politetrametileno éter glicol (PTMEG). Já as bandas neste mesmo intervalo, no caso do Pu3, são características do polioxipropileno glicol (PPG).

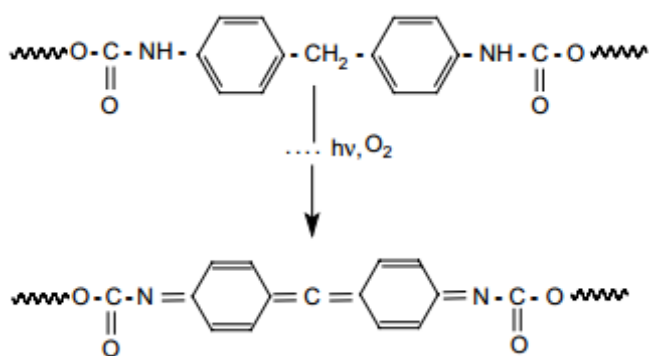
O difenil metano diisocianato (MDI) foi o isocianato utilizado na preparação do Pu1 (forte absorção  $1600 \text{ cm}^{-1}$ , devido à presença de dois anéis aromáticos na molécula de MDI), enquanto o tolueno diisocianato (TDI) foi o isocianato utilizado na preparação do Pu2 e Pu3 (pico de absorção em  $1600 \text{ cm}^{-1}$ , devido à presença de um único anel aromático na molécula de TDI).

A Figura 44 mostra os espectros no infravermelho do Pu2 superficial (em contato com a polpa de minério) e da sua subsuperfície. Esse espectro mostra o efeito da degradação superficial do material.



**Figura 44: Espectro no infravermelho de Pu2 e de sua subsuperfície.**

Assim, a superfície apresenta ligações químicas diferentes do que a subsuperfície (banda de absorção a  $\sim 3695\text{ cm}^{-1}$  e a  $\sim 1644\text{ cm}^{-1}$ ). De fato, os poliuretanos são suscetíveis a termo-oxidação do agrupamento metileno central do isocianato (para os isocianatos aromáticos, ou seja, o MDI e o TDI) provocando o amarelamento e o surgimento de um pico de absorção em torno de  $\sim 1644\text{ cm}^{-1}$  (pico de absorção atribuído ao estiramento do C=C nos alcenos (ROSU, 2009) (Figura 45).

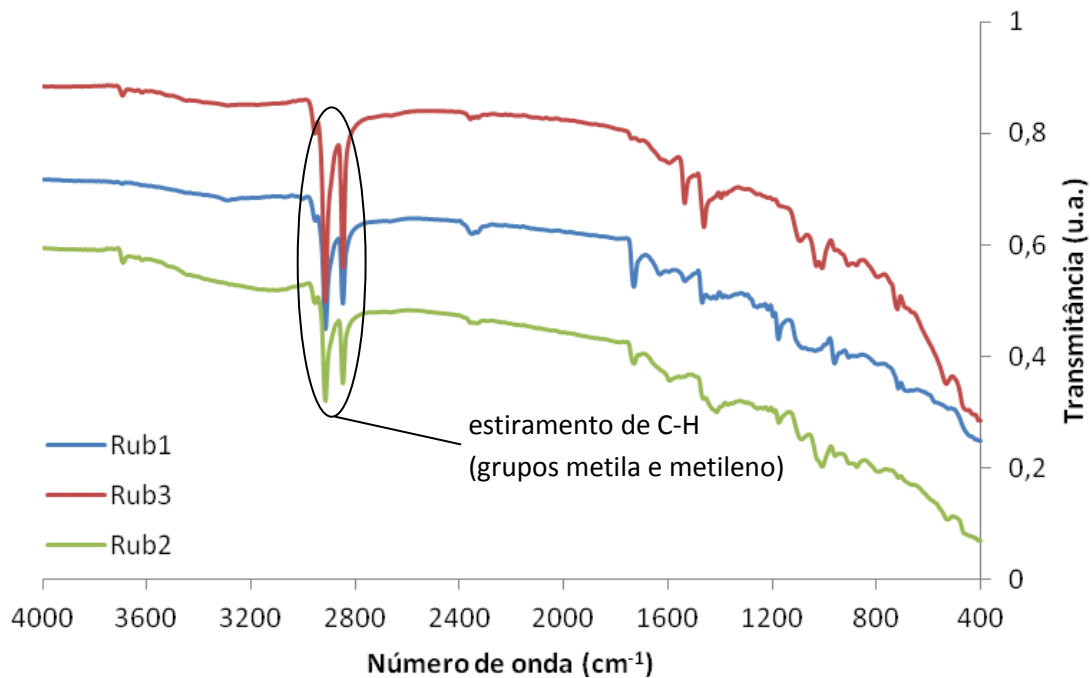


**Figura 45: Oxidação do agrupamento metileno central do isocianato (ROSU, 2009).**

A hidrólise, no caso dos poli(éter)uretanos, é limitada quando comparada aos poli(éster)uretanos (poliuretano tendo como poliálcool de base um poliéster).

Da mesma forma, para as borrachas (Figura 46), apesar de poder identificar modos vibracionais de ligações comuns como a ligação C-H ( $2914\text{ cm}^{-1}$ ) do grupo  $\text{CH}_3$ ,  $>\text{C}=\text{O}$  ( $1730\text{ cm}^{-1}$ ) ou ainda do butadieno ( $960\text{ cm}^{-1}$ ), não foi possível determinar as respectivas misturas. O fato das correias serem produtos acabados com cargas, ativadores e, geralmente, combinação de elastômeros possuindo diversos grupos funcionais dificulta a análise por FT-IR.

Análises complementares serão feitas em trabalhos futuros.



**Figura 46: Espectro no infravermelho de Rub1, Rub2 e Rub3.**

A análise dos espectros de infravermelho foi realizada com informações de LITVINOV (2002); SZYCHER (2013); CORDEIRO (2007) e LAMBA (2000).

### Dureza e Densidade

As propriedades físico-químicas dos materiais estudados estão apresentadas nas Tabelas 1 e 2. Estas propriedades foram fundamentais para dedução do volume desgastado a partir da perda de massa, mas, também, para uma tentativa de estabelecer alguma relação entre volume desgastado e dureza dos materiais.

**Tabela 1: Características dos poliuretanos.**

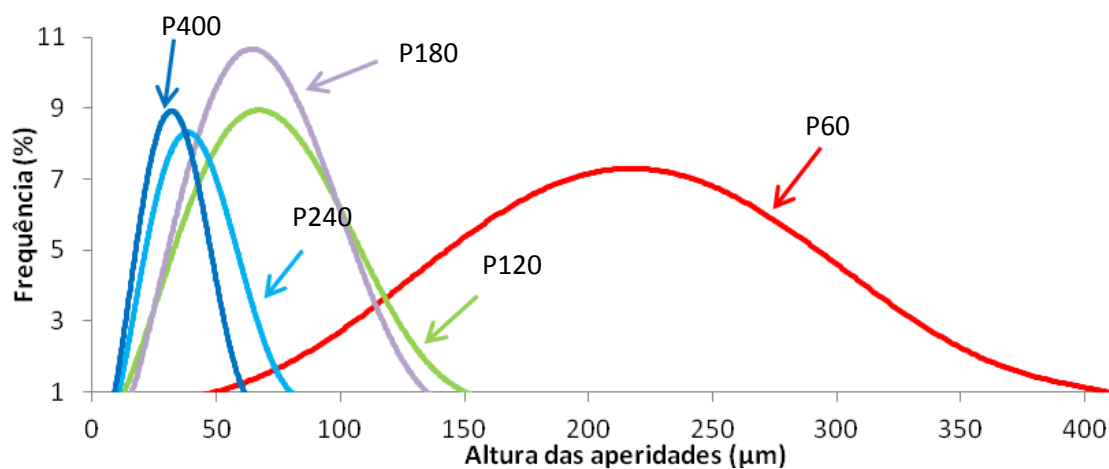
Identificação	Origem	Estado	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Dureza Shore A
PU1	Revestimento interno de tubulação de polpa de minério	novo	1101	79
PU2	Revestimento interno de tubulação de polpa de minério	usado	1063	79
PU3	Revestimento interno de tubulação de polpa de minério	usado	1127	79

**Tabela 2: Características das borrachas.**

Identificação	Origem	Estado	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Duerza Shore A
Rub1	Correia transportadora	novo	1144	74
Rub2	Correia transportadora	usado	1139	76
Rub3	Correia transportadora	usado	1143	79

## 2 Caracterização topográfica das lixas abrasivas

A distribuição das alturas das asperidades das lixas foi obtida através do perfilômetro Taylor-Hobson, modelo Talysurf CLI1000 (Figura 47).



**Figura 47: Distribuição das alturas das asperidades das diferentes lixas.**



Durante o processo de fabricação de lixas, as partículas são recobertas por resina fenólica; desta maneira, o parâmetro topográfico relevante deixa de ser o diâmetro médio das partículas, e sim a altura média das asperidades engastadas na lixa. Assim, a partir da distribuição das alturas das asperidades, a altura média foi calculada para cada lixa (Tabela 3).

**Tabela 3: Altura média das asperidades das lixas abrasivas.**

Granulometria	Altura média das asperidades ( $\mu\text{m}$ )
P400	34
P240	43
P180	72
P120	76
P60	222

### 3 Desgaste abrasivo

Os resultados de perda volumétrica dos materiais em função da distância deslizada são apresentados nas Figuras 48 e 49. Já os resultados de coeficiente de desgaste dos poliuretanos e das borrachas em função da altura média das asperidades são apresentados nas Figuras 50, 51, 52 e 53 (os resultados da perda volumétrica dos poliuretanos e das borrachas em função da altura média das asperidades estão em anexo).

A perda volumétrica é proporcional à distância deslizada independentemente da carga.

Podemos notar que o Pu1 e Pu2 tiveram o mesmo desempenho. Já o Pu3 obteve o pior desempenho de todos os materiais estudados.

As borrachas possuem um volume desgastado parecido entre elas e uma perda volumétrica intermediária entre os poliuretanos Pu2 e Pu3.

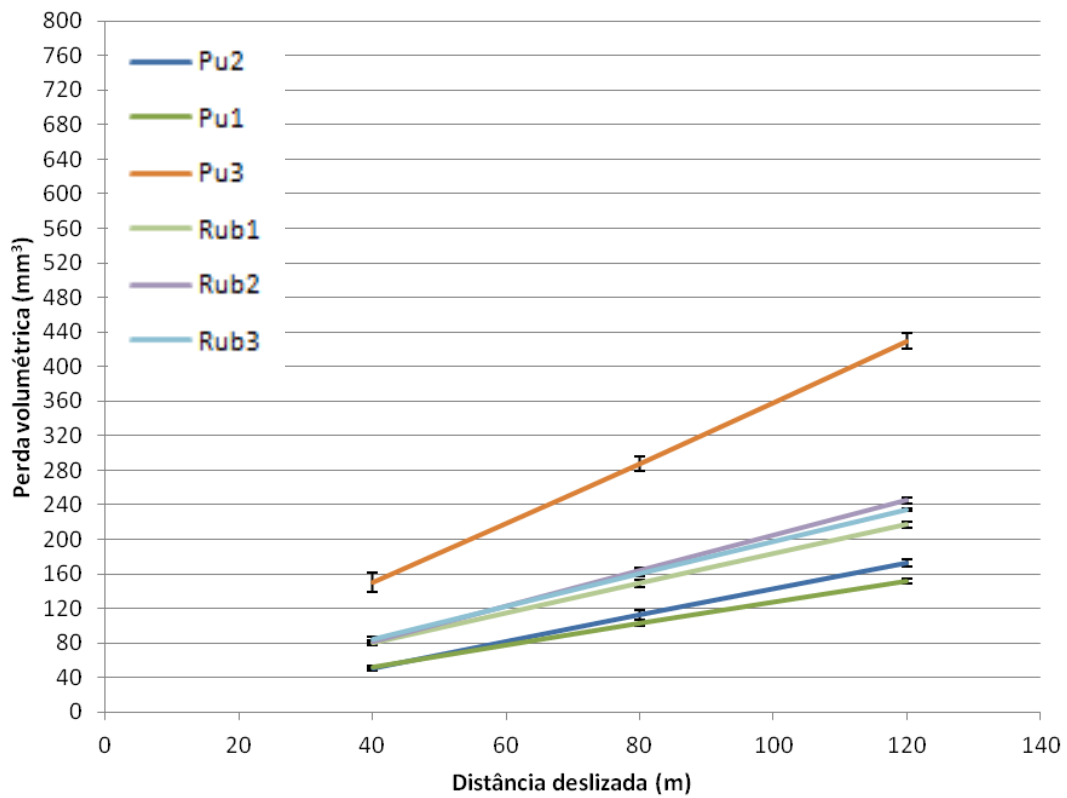


Figura 48: Perda volumétrica para todos os materiais a 5N para a lixa P 60.

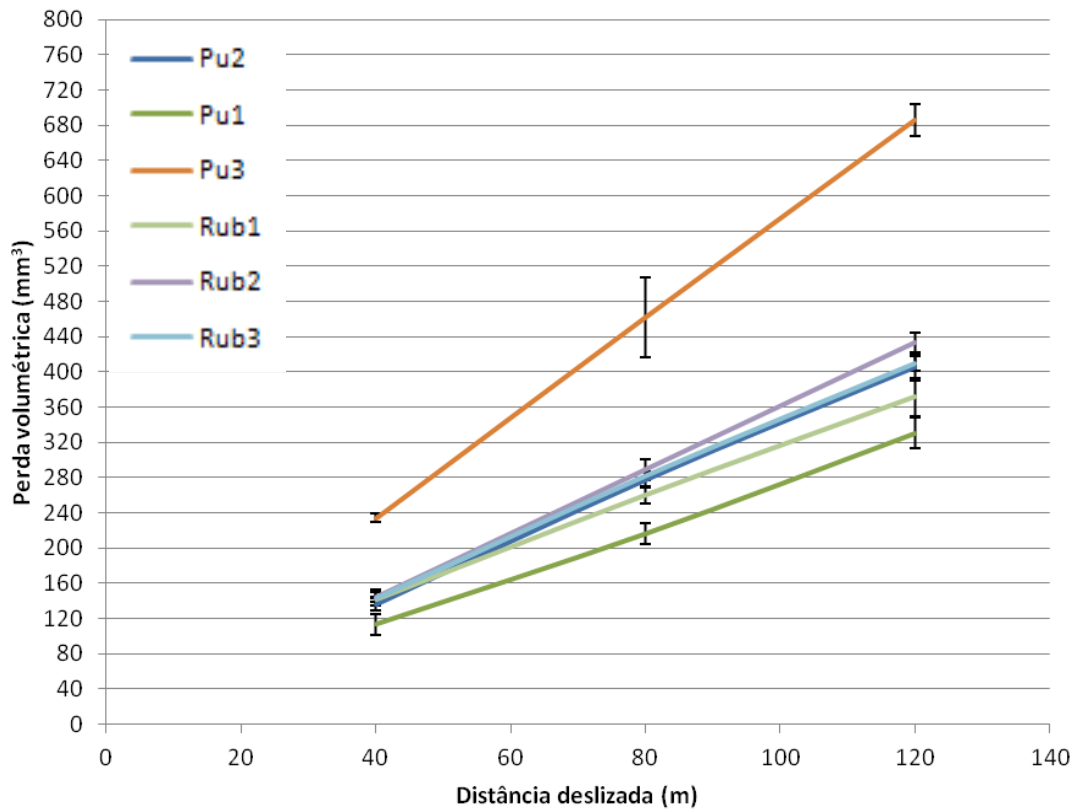


Figura 49: Perda volumétrica para todos os materiais a 10 N para a lixa P 60.

Considerando os poliuretanos, o coeficiente de desgaste para a carga aplicada de 5 N foi ligeiramente inferior (ou igual) ao coeficiente de desgaste para a carga aplicada de 10 N para as lixas P120, P240 e P400. Já para a lixa P60, o Pu3, ao contrário do Pu1 e Pu3, apresentou um coeficiente de desgaste menor para a carga de 5 N do que para a carga de 10 N.

A maior diferença de taxa de desgaste entre as duas cargas, tanto para os poliuretanos quanto para as borrachas, ocorre para a lixa P180 (altura média das asperidades de 72  $\mu\text{m}$ ): a 10 N, o desgaste é aproximadamente 20 a 50% maior do que a 5 N.

As borrachas, para a lixa P60, apresentaram um coeficiente de desgaste menor para a carga de 5 N do que para a carga de 10 N. Para as lixas P120, P240 e P400, o comportamento observado é similar ao dos poliuretanos.

O comportamento do desgaste, em função da altura média das asperidades, foi bem diferente a 5 N e a 10 N:

- A 5 N, o coeficiente de desgaste aumenta rapidamente e se mantém quase constante entre as lixas P240 e P180. Logo depois, o coeficiente de desgaste sobe abruptamente entre a lixa P180 a P120, para continuar a aumentar de maneira mais suave de P120 a P60. Assim, observou-se duas transições, uma a P240 (altura média das asperidades de 43  $\mu\text{m}$ ) e a outra a P120 (altura média das asperidades de 76  $\mu\text{m}$ ).
- A 10 N, o coeficiente de desgaste aumenta rapidamente de P400 a P120 para, enfim, continuar a aumentar de maneira mais suave. Assim observou-se uma transição entre P180 e P120 (altura média das asperidades entre 72 e 76  $\mu\text{m}$ ).

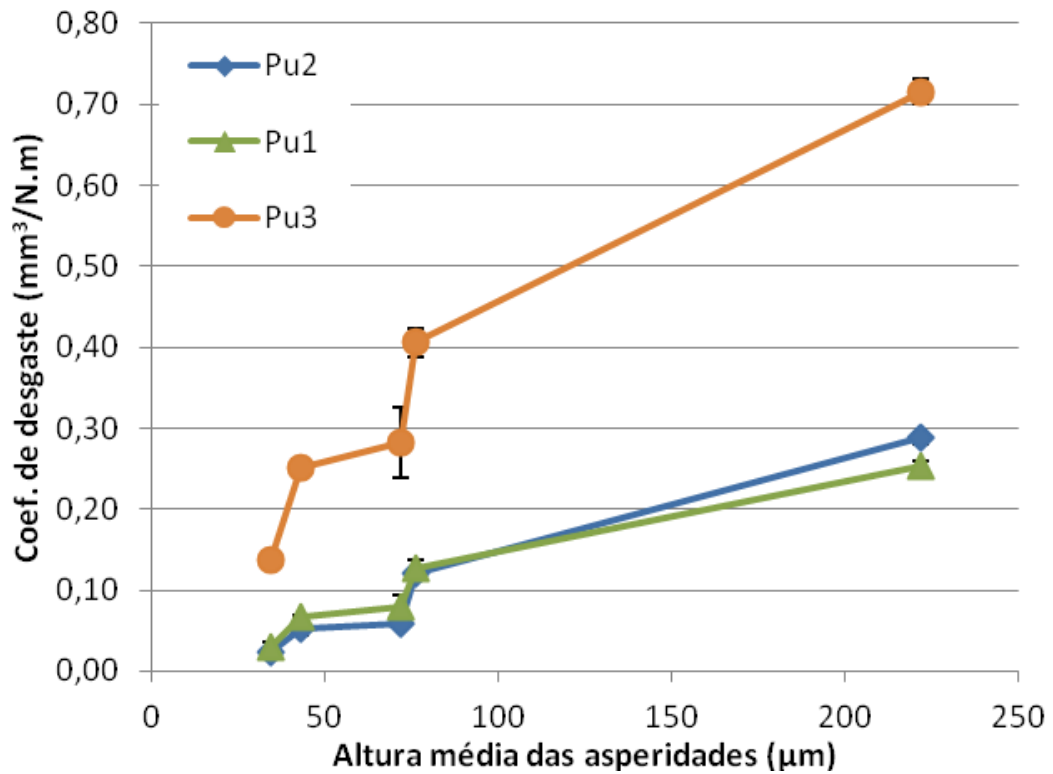


Figura 50: Coeficiente de desgaste em função da altura média das asperidades para os poliuretanos a 5 N.

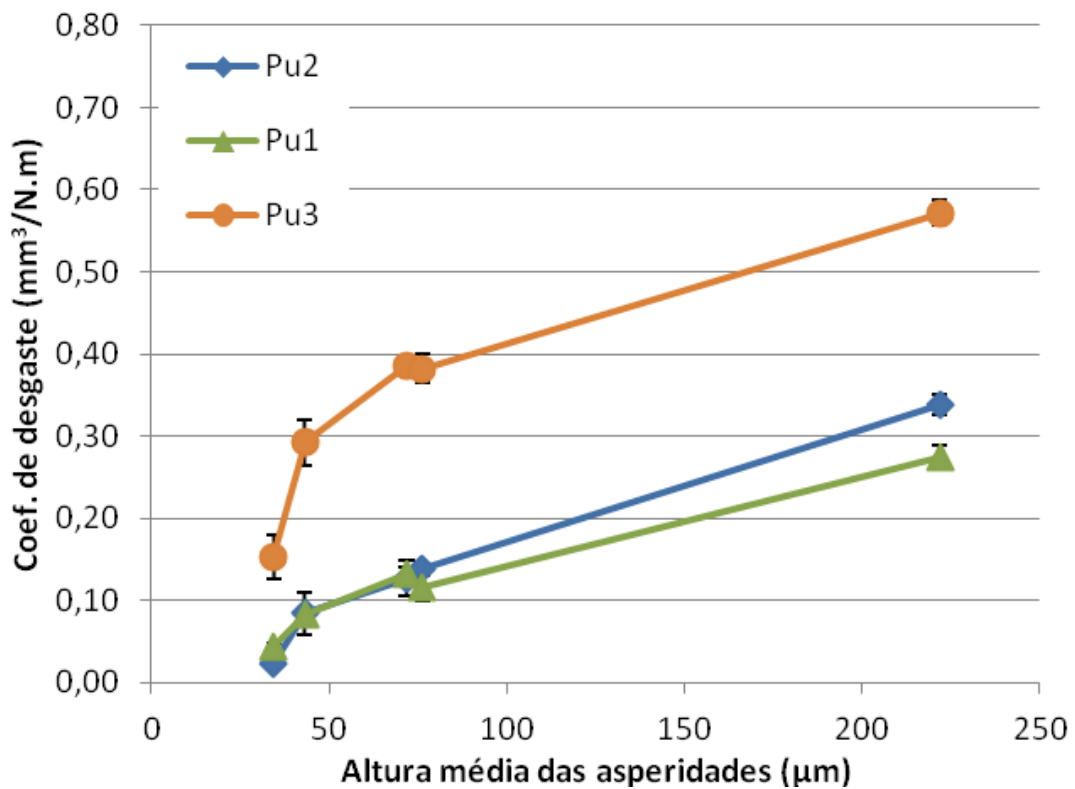


Figura 51: Coeficiente de desgaste em função da altura média das asperidades para os poliuretanos a 10 N.

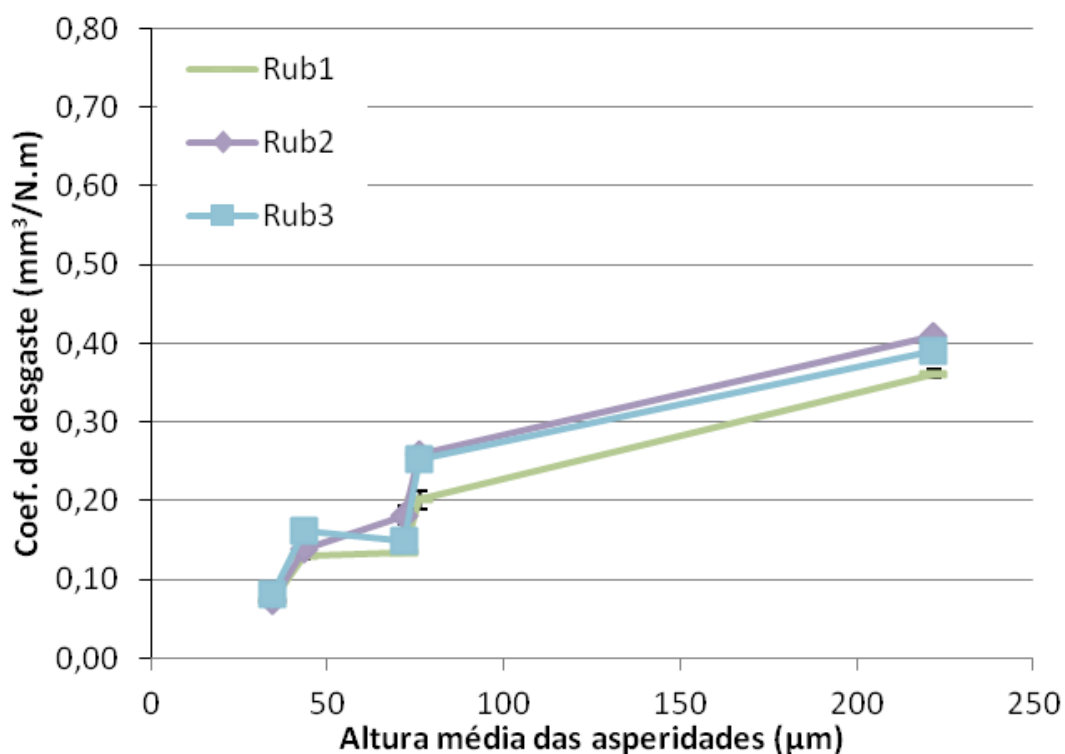


Figura 52: Coeficiente de desgaste em função da altura média das asperidades para as borrachas a 5 N.

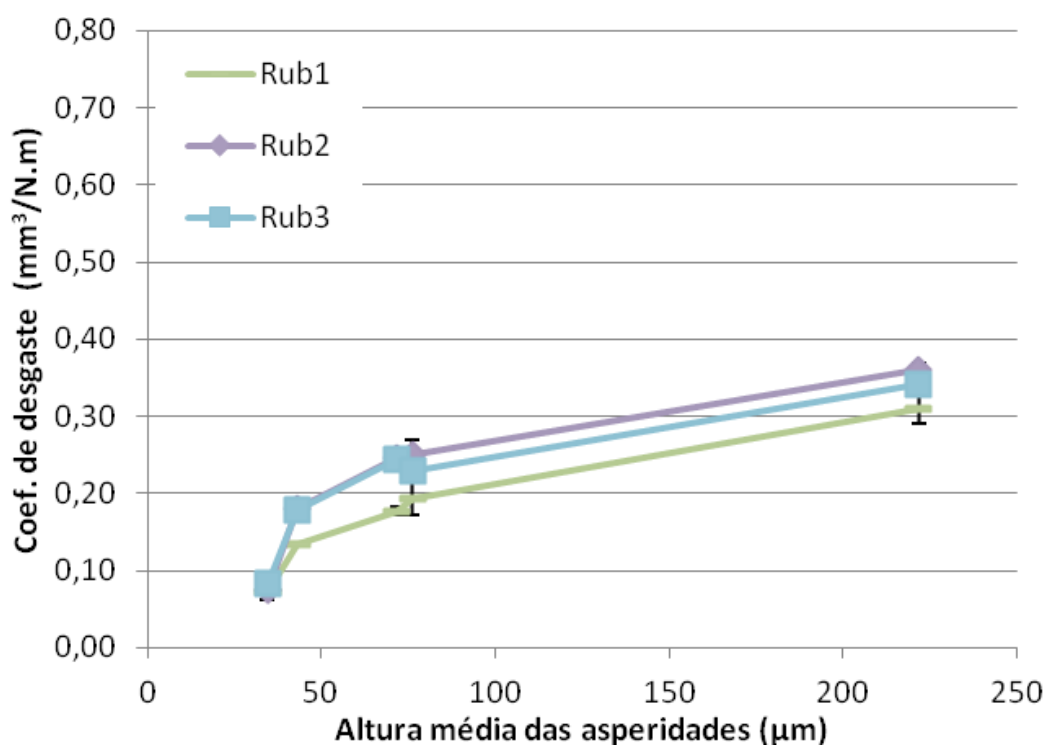


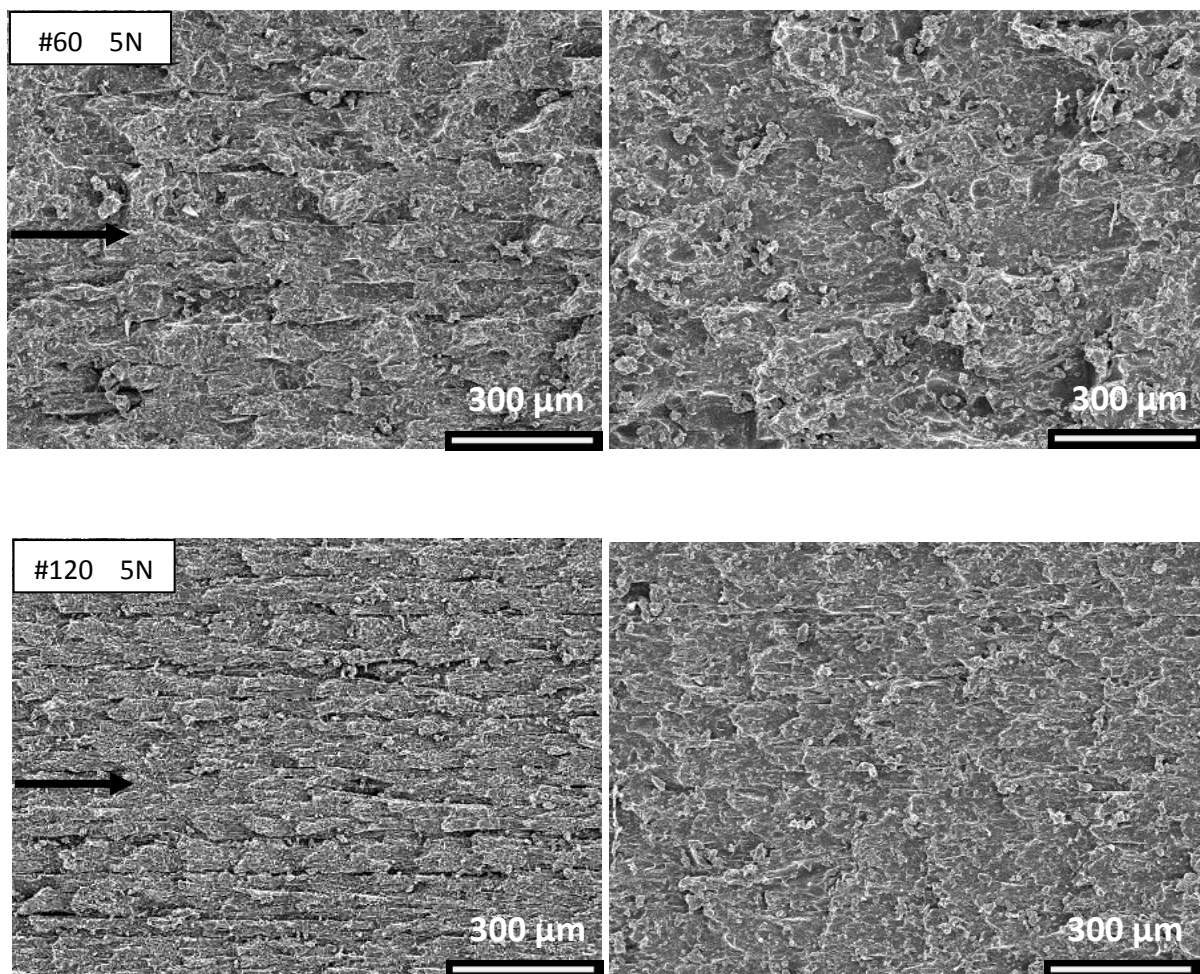
Figura 53: Coeficiente de desgaste em função da altura média das asperidades para as borrachas a 10 N.

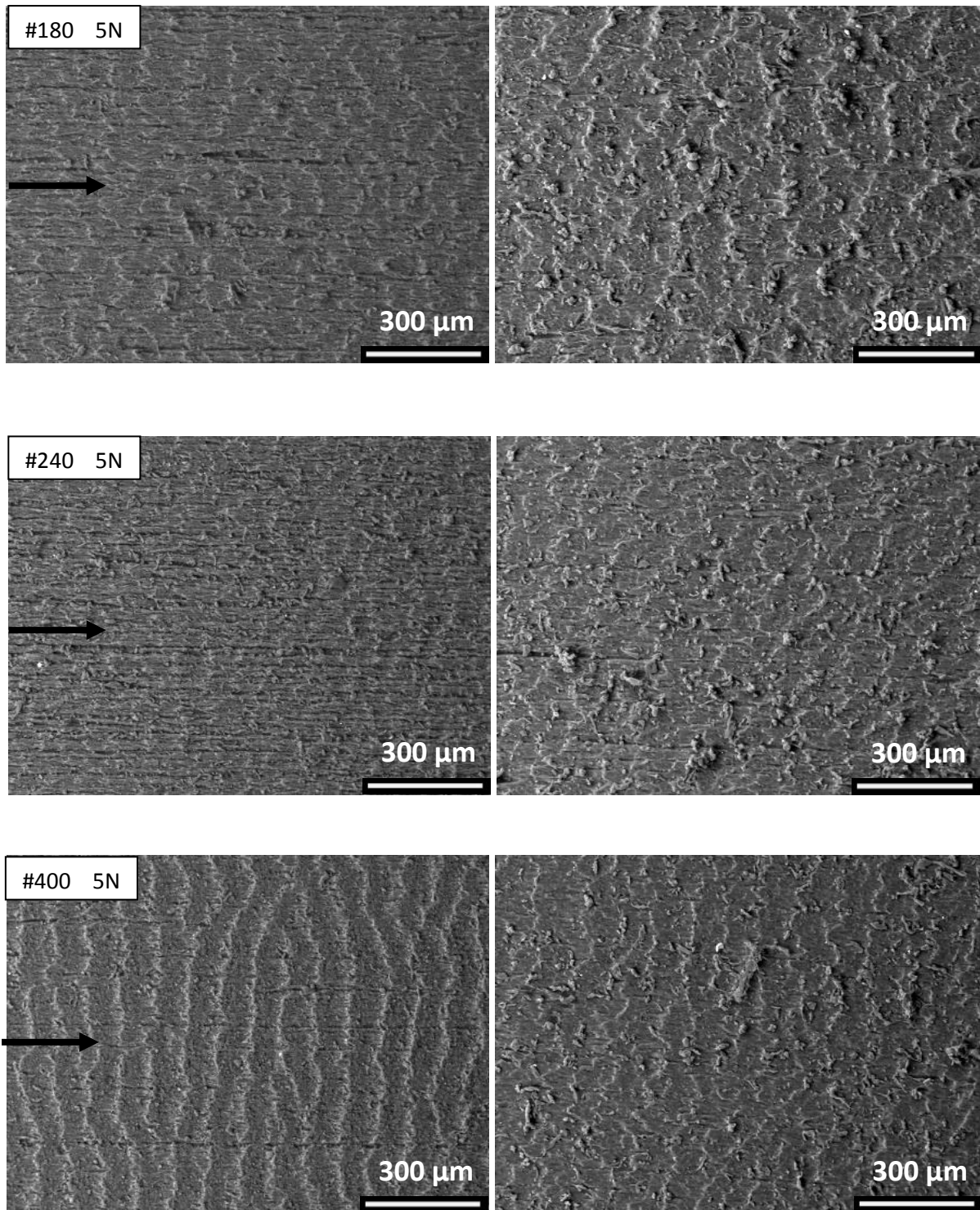
Observa-se que os poliuretanos, tendo como polioli o politetrametileno éter glicol (PTMEG) (Pu1 e Pu2), tiveram um desempenho melhor do que o poliuretano tendo como polioli o polipropileno glicol (PPG) (Pu3).

Através das imagens do microscópio eletrônico de varredura, foi correlacionada a mudança no coeficiente de desgaste com a morfologia da superfície desgastada.

O padrão de desgaste, conhecido como ondas de Schallamach, é visível na maioria das imagens, somente a amplitude deste fenômeno varia de acordo com a carga e, sobretudo, a granulometria: quanto menor a altura média das asperidades menor a amplitude e a distância entre as ondas.

No caso do Pu3, observa-se que a amplitude e distância entre as ondas são maiores do que do Pu1 e Pu2 para ambas as cargas e para todas as lixas (Figura 54).

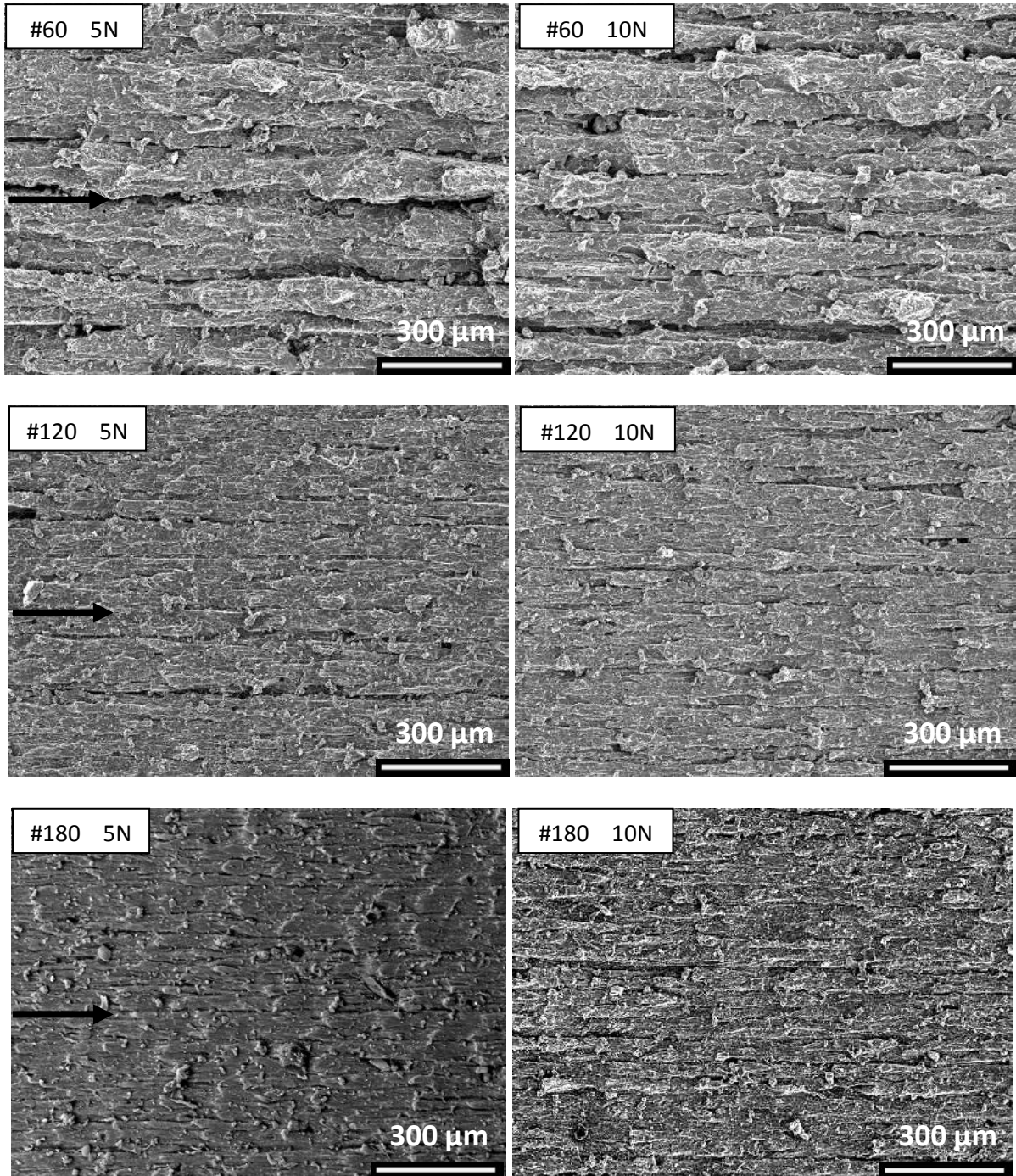




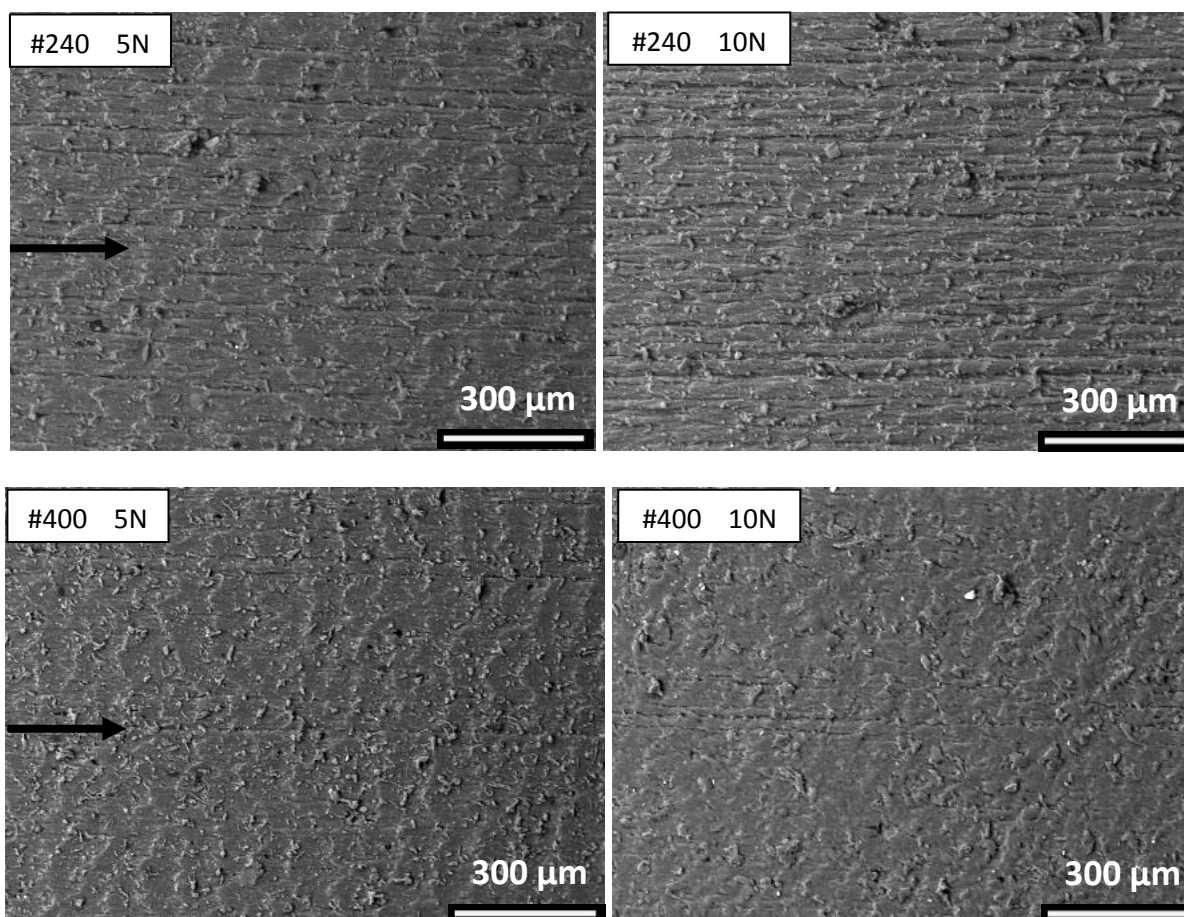
**Figura 54: Imagens de microscopia eletrônica após ensaio de Pu1 (esquerda) e de Pu3 (direita) para todas as lixas com carga aplicada de 5 N. A seta indica o sentido do deslizamento.**

No caso das borrachas, a morfologia do desgaste é caracterizada pela presença de sulcos e linguetas. O padrão de desgaste abrasivo de materiais elastoméricos ainda está presente. Percebe-se, ao comparar imagens do MEV de Rub3 (Figura 55), que para a lixa P60, as

superfícies desgastadas a 5 N apresentam sulcos maiores do que as superfícies desgastadas a 10 N. Já, para a lixa P180, da mesma maneira do que os outros elastômeros, as superfícies desgastadas a 5 N possuem ondas e sulcos, enquanto, a 10 N, apresentam sulcos de maneira predominante.







**Figura 55: Imagens de microscopia eletrônica após ensaio da Rub3 para todas as lixas com cargas aplicada de 5 N (esquerda) e a 10 N (direita). A seta indica o sentido do deslizamento.**

Observa-se uma transição na predominância do mecanismo de desgaste em função da granulometria para os elastômeros (a exceção do Pu3) (Figura 54 e 55).

Para a carga aplicada de 5 N, nas lixas P60 a P180, tem-se a presença de ondas de Schallmach abundantes associadas a sulcos. Depois, de P180 a P240, percebe-se uma diminuição das ondas e um aumento da quantidade de sulcos. Enfim, a P400, tem-se ondas de Schallmach (Pu1 na Figura 54 e Rub3 na Figura 55) de maneira predominante.

Para o Pu3, as ondas de Schallmach parecem ser o mecanismo de desgaste principal, independentemente da granulometria e da carga aplicada.

Considerando a relação entre dureza do material e o desgaste para todas as cargas e lixas, do mesmo modo que a literatura, um consenso não foi atingido (Figuras 56, 57, 58 e 59). Porém, considerando o grupo de borrachas, pode-se dizer que para essa faixa de dureza, o desgaste não depende dessa propriedade mecânica. Já para os poliuretanos, com durezas semelhantes,

comportamentos extremos são observados: o Pu1 e Pu2 possuem o melhor desempenho de todos os materiais enquanto o Pu3 possui o pior desempenho de todos eles.

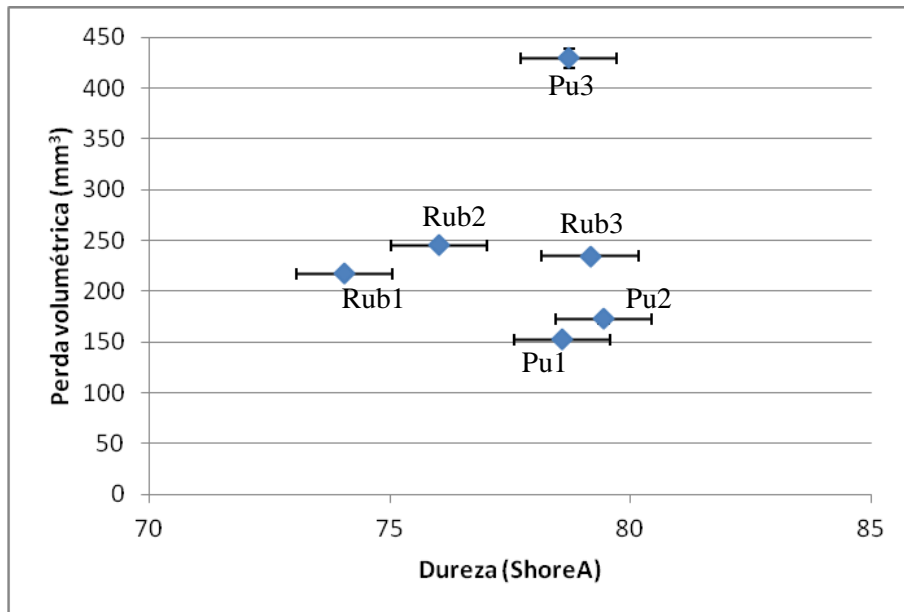


Figura 56: Perda volumétrica em função da dureza Shore A para ensaios a 5 N com a lixa P60.

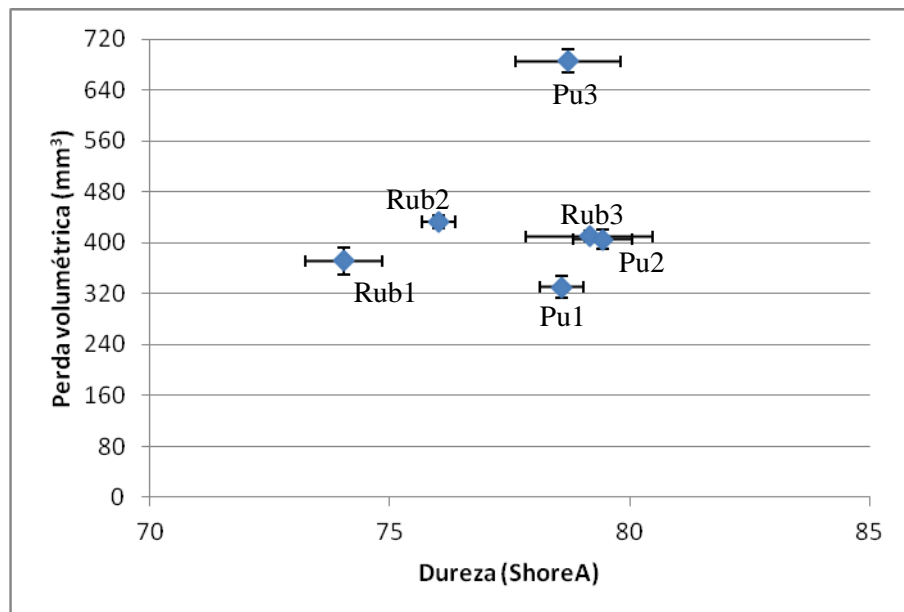


Figura 57: Perda volumétrica em função da dureza Shore A para ensaios a 10 N com a lixa P60.

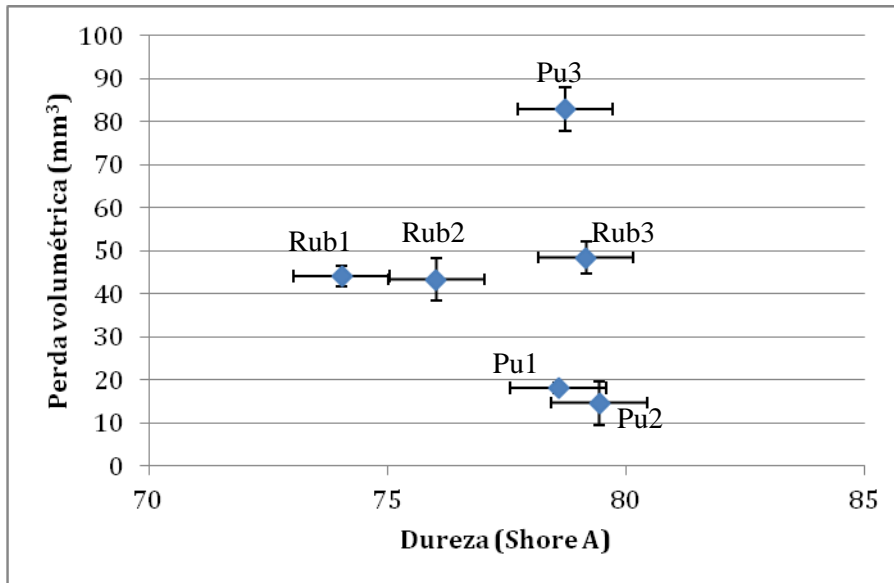


Figura 58: Perda volumétrica em função da dureza Shore A para ensaios a 5 N com a lixa P400.

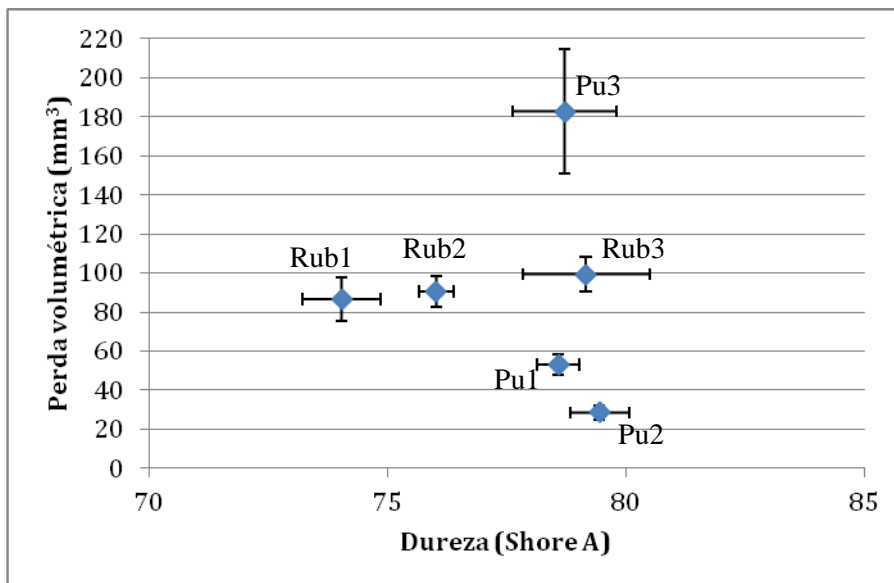


Figura 59: Perda volumétrica em função da dureza Shore A para ensaios a 10 N com a lixa P400.

## V. Conclusão

O efeito do tamanho da partícula e da carga no desgaste abrasivo de diversos elastômeros utilizados na indústria de beneficiamento de minério foi estudado segundo o abrasômetro pino-tambor utilizando cinco granulometrias e duas cargas. Os poliuretanos demonstraram ser mais resistentes à abrasão do que as borrachas, a exceção do Pu3.

Uma transição nítida no regime de desgaste foi observada para todos os materiais entre as lixas P120 e P180 correspondente a uma altura média das asperidades entre 72 e 76  $\mu\text{m}$ . Mecanismos diversos, como ondas de Schallamach e sulcos associados a linguetas, atuaram ao mesmo tempo no desgaste.

A morfologia das ondas de Schallamach depende da granulometria: quanto maior o tamanho da partícula abrasiva, maior as ondas e o espaçamento entre elas.

O comportamento em nível de desgaste foi diferente para as duas cargas de 5 N e 10 N. A forma da curva desgaste em função da granulometria mostra ser altamente dependente da carga, especialmente para a lixa P180. O aumento da carga é acompanhado pelo aumento do desgaste enquanto a classificação dos materiais fica inalterada.

Os poliuretanos, tendo como polioliol o politetrametileno éter glicol (PTMEG), tiveram um desempenho melhor do que o poliuretano tendo como polioliol o polipropileno glicol (PPG). Desta maneira, o tipo de isocianato não parece afetar tanto o comportamento abrasivo das formulações.

Uma investigação sobre a relação entre a degradação química dos elastômeros e o desgaste se faz necessária.

## VI. Trabalhos futuros

A partir dos resultados obtidos nos ensaios, pode-se tirar as seguintes conclusões:

Durante a elaboração desse trabalho e a partir de artigos de referências bibliográficas, foi possível identificar alguns pontos de análise para os trabalhos futuros no desgaste de materiais elastoméricos empregados na indústria de beneficiamento de minério.

Com base nas limitações encontradas neste trabalho, os seguintes estudos são sugeridos para trabalhos futuros:

- Obter um histórico completo do uso *in-situ* dos materiais a fim de saber quais mecanismos de degradação poderiam ter sido ativados;
- Aprimorar a caracterização estrutural e mecânica a fim de caracterizar o efeito do envelhecimento com o desempenho tribológico e mecânico dos materiais;
- Executar ensaios de desgaste abrasivos complementares como roda-de-borracha e erosão com baixo ângulo (abrasão-erosão).

## VII. Referências bibliográficas

**Alcantara, A. F.; Nunes, R. C. R.; Visconte, L. L. Y., 2004**, “Misturas BR/SBR: Propriedades mecânicas em função do modo de preparo”, *Polímeros: Ciência e Tecnologia*.14 : 279-282.

**ASTM D 2240** – “Standard test method for rubber property – Durometer Hardness”.

**ASTM D 5963** – “Standard Test Method for Rubber Property—Abrasion Resistance (Rotary Drum Abrader)”.

**ASTM D 792** – “Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of lastics by Displacement”.

**Barquins, M., 1983**, “Energy dissipation in Schallamach waves”, *Wear*. 160: 1-11.

**Best, B., Meijers, P., Savkoor, A. R., 1981**, “The Formation of Schallamach Waves” , *Wear*. 65: 385-396.

**Blau, P.J., 2009**, “Embedding wear models into friction models”, *Tribology letters*. 34; 75-79.

**Callister, W.D.J., 2012**, “Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução”. 8 ed. Rio de Janeiro : LTC –Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.

**Canevarolo, S.V., 2002**, “Ciência dos polímeros”. São Paulo, Artliber.

**Carli, L. N., Boniati, R., Teixeira, C., Nunes, R. C. R., Crespo, J. S., 2009**, “ Development and characterization of composites with ground elastomeric vulcanized scraps as filler”, *Materials Science and Engineering*. 29: 383-386.

**Ciullo, P.A., Hewitt, N., 1999**, “The rubber formulary”, Noyes publications, Norwich, New York.

**Clemitson, I.R., 2008**, “Castable Polyurethane Elastomers”, CRC Press, Boca Raton FL, 274 pg.

**Coronado, J.J., Sinatora, A., 2011**, “Effect of abrasive size on wear of metallic materials and its relationship with microchips morphology and wear micromechanisms: Part 2”, *Wear*. 271: 1804-1812.

**Cordeiro dos Santos, F., 2007**, “Otimização de Poliuretanos para Protetores de Linhas Flexíveis Sujeitos ao Desgaste Abrasivo”, PPGEM, Uberlândia.

**Czichos, H. and Habig, K. H., 1992**, “Tribologie Handbuch – Reibung und Verschleiß”, Vieweg Verlag, Braunschweig, 560 pg.

**Dubberstein Tozetti, K., 2013**, “Efeito da carga e do tamanho do grão abrasivo no desgaste do ferro fundido branco 19,9% cromo e 2.9% carbono”, UFES.

**Evans, D.C. and Lancaster J.K., 1979**, “Treatise on Materials Science and Technology”. *Wear*. 13: 85-139.

**Eyre, T.S., 1978**, “The mechanisms of wear“, *Tribology international*. 11: 91-96.

**Gent, A. N., 1989**, “A hypothetical mechanism for rubber abrasion”, *Rubber chemistry and Technology*. 62: 750-756.

**Gent, A. N. and Pulford, C. T. R., 1983**, “Mechanisms of rubber abrasion”, *Journal of Applied*

Polymer Science. 28: 943-960.

**Guimarães, F.M., 2011**, “Estudo do desgaste abrasivo de polímeros empregados na mineração”, UFES.

**Harsha, A.P., 2011**, “An investigation on low stress abrasive wear characteristics of high performance engineering thermoplastic polymers”, Wear. 271: 942-951.

**Hill, D.J.T., Killen, M.I., O’ Donnell, J.H., Pomery, P.J., St John, D., Whittaker, A.K., 1996**, “Development of wear-resistant thermoplastic polyurethanes by blending with poly(dimethyl siloxane). I. Physical Properties”, Journal of Applied Polymer Science. 61: 1757-1766.

**Hill, D.J.T., Killen, M.I., O’ Donnell, J.H., Pomery, P.J., St John, D., Whittaker, A.K., 1997**, “Laboratory wear testing of polyurethane elastomers”, Wear. 208: 155-160.

**Hutchings, I. M., 1992**, “Tribology: friction and wear of engineering materials“. Oxford : Butterworth Heinemann.

**International Steel Statistics Bureau, 2014**. Disponível em: <<http://www.issb.co.uk/global.html>>. Acesso em: 15/09/2014.

**IR Spectroscopy Tutorial: Alcohols**, Disponível em: <<http://orgchem.colorado.edu/Spectroscopy/irtutor/alcoholsir.html>>. Acesso em: 10/11/2014.

**Iwai, Y. and Nambu, K., 1997**, “Slurry wear properties of pump lining materials”, Wear. 210: 211-219.

**Jost, H.P., 1966**, “Lubrication (Tribology) – A Reporter of the Present Position and Industry’s Needs”, Jost Rep., department of Education and Science, HMSO, London.

**Lamba, N. M. K., Woodhouse K.A., Cooper, S.L., 2000**, “Polyurethanes in biomedical applications”. CRC Press, Boca Raton FL, 281 pg.

**Larsen-Badse, J., 1972**, “Some effects of specimen size on abrasive wear”, Wear. 19: 27-35.

**Litvinov, V.M., and De, P.P., 2002**, “Spectroscopy of rubbers and rubbery materials”. Rapra technology ltd, Shawbury, 656 pg.

**Ludema, K. C., 1996**, “Friction, Wear, Lubrication - A Textbook in Tribology”. CRC Press, Boca Raton FL, 257 pg.

**Misra A. and Finnie I., 1981**, “On the size effect in abrasive and erosive wear”, Wear. 65: 359-373.

**Moresco, S., 2013**, “Desenvolvimento de bandas de rodagem para pneus de automóvel com aditivos alternativos”, PPECM, UCS.

**Nathan, G.W. e Jones, J.D., 1966**, “The empirical relationship between abrasive wear and applied conditions”, Wear. 9: 300-309.

**Prisacariu, C., 2011**, “Polyurethane Elastomers”. New York: Springer.

**Srinath, G. and Gnanamoorthy, R., 2006**, “ Two-body abrasive wear characteristics of Nylon clay nanocomposites –effect of grit size, load, and sliding velocity”, Materials Science and Engineering. 435-436: 181-186.

- Roberts, A. D. and Thomas, A. G., 1975**, “The adhesion and friction of smooth rubber surface”, *Wear*. 33: 45-64.
- Rodrigues, L., 2013**, “Comparação interlaboratorial dos resultados dos ensaios de desgaste abrasivo em polímeros, segundo a norma ISO 4649”, PPGEM, UFES.
- Rosu, D., Rosu, L., Cascaval C.N., 1994**, “IR-change and yellowing of polyurethane as a results of UV irradiation”, *Polymer degradation and stability*, 94: 591-596.
- Sare, I.R., Mardel, J.I, Hill, A.J, 2001**, “Wear-resistant metallic and elastomeric materials in the mining and mineral processing industries – an overview”, *Wear*, 250: 1-10.
- Schallamach, A., 1958**, “Friction and abrasion of rubber”, *Wear*. 1: 384-417.
- Schallamach, A., 1971**, “How does rubber slide?”. *Wear*, 17: 301-312.
- Sin, H., Saka, N. and Suh, N.P., 1979**, “Abrasive wear mechanisms and the grit size effect”, *Wear*, 55: 163-190.
- Szycher, M., 2013**, “Szycher’s handbook of polyurethanes”. CRC Press, Boca Raton FL, 1112 pg.
- Unal, H., Sen, U., Mimaroglu, A., 2005**, “Abrasive behavior of polymeric materials”, *Materials&Design*. 26: 705-710.
- Valadão, G.E.S., Araujo, A.C., 2007**, “Introdução ao tratamento de minérios”, Belo Horizonte, UFMG, 234 pg.
- Vilar, W.D., 2005**, “Química e Tecnologia de Poliuretanos”. 3. ed. Rio de Janeiro: Vilar Poliuretanos Ltda.
- Zaamout M.S., 2004**, “Comparison of the Abrasive Wear Rate of Polymeric Materials Examined under Dry Condition”, *Journal of science, medicine, engineering*. 16: 49-65.
- Zum-Gahr, K-H., 1987**, “Microstructure and Wear of Materials”, *Tribology Series*, Elsevier, 560 pg.



## VIII. Anexos

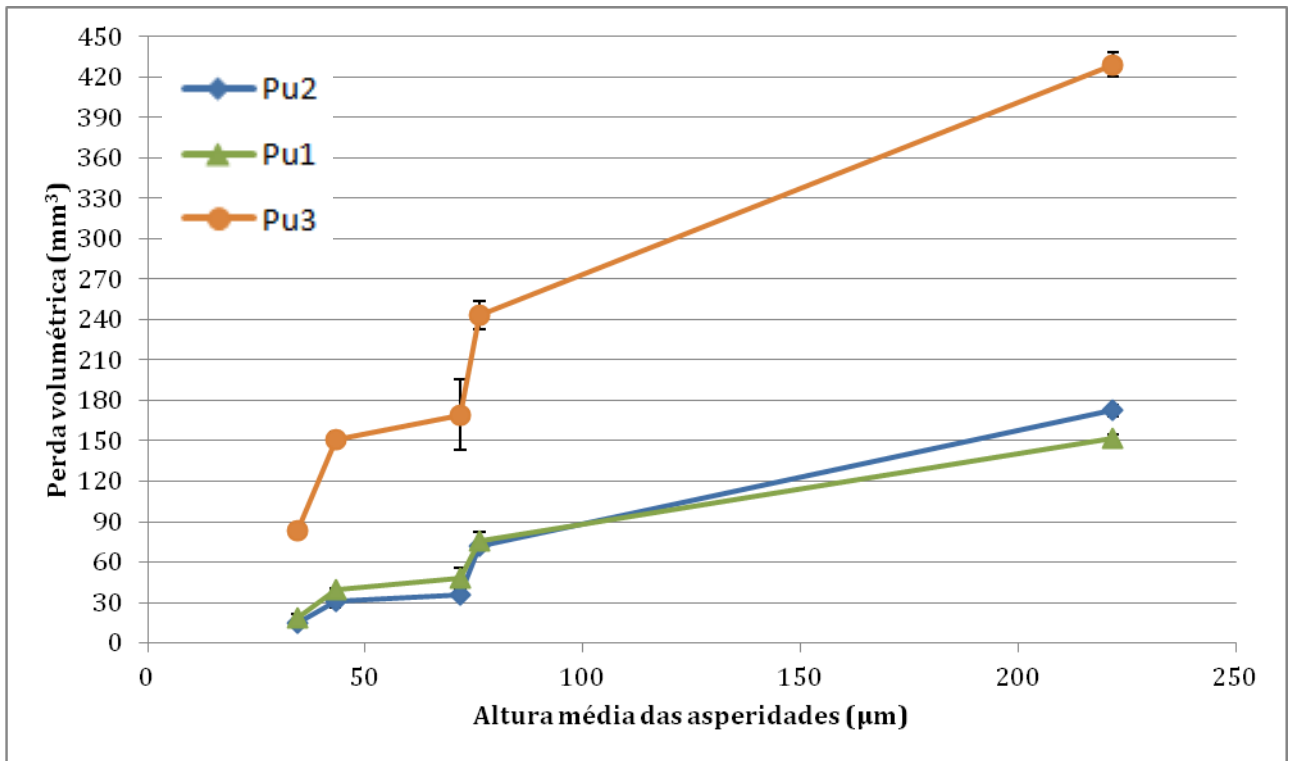


Figura 60: Perda volumétrica para todos os materiais a 5 N para a lixa P 60.

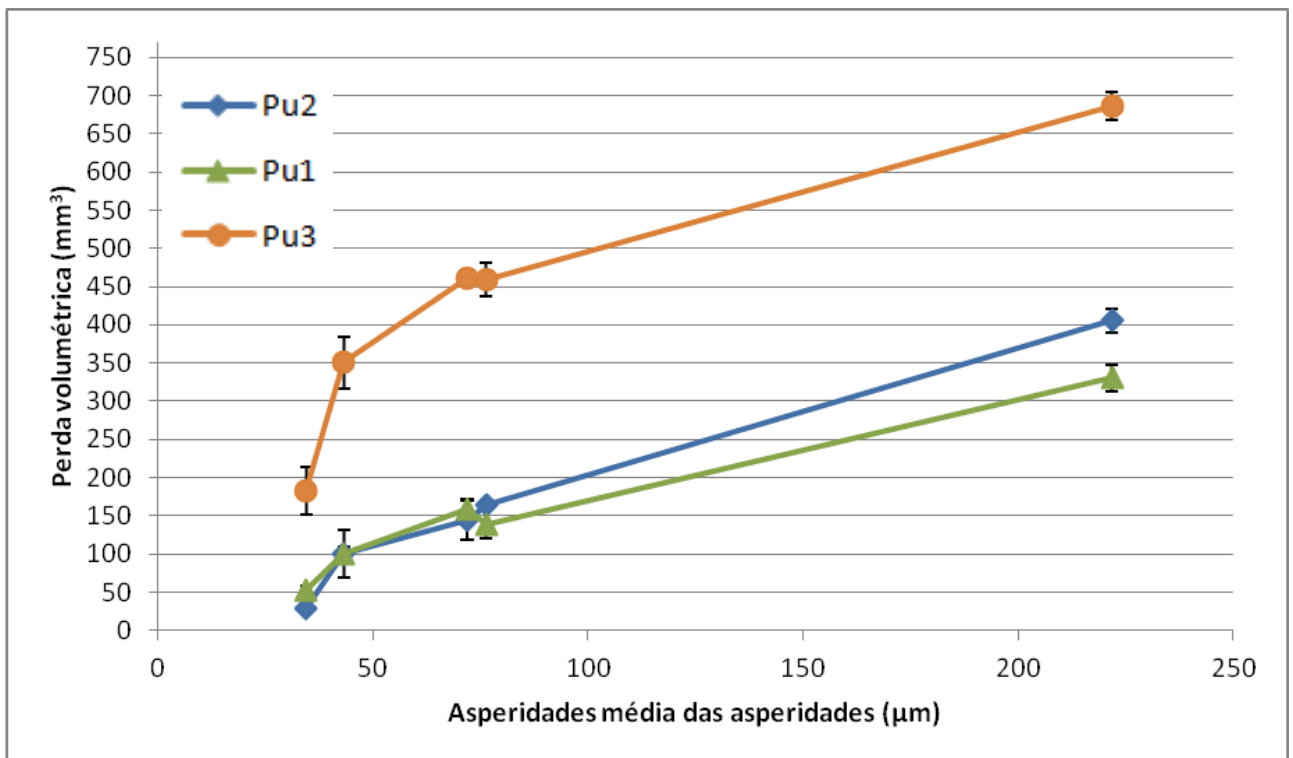


Figura 61: Perda volumétrica para todos os materiais a 5 N para a lixa P 60.

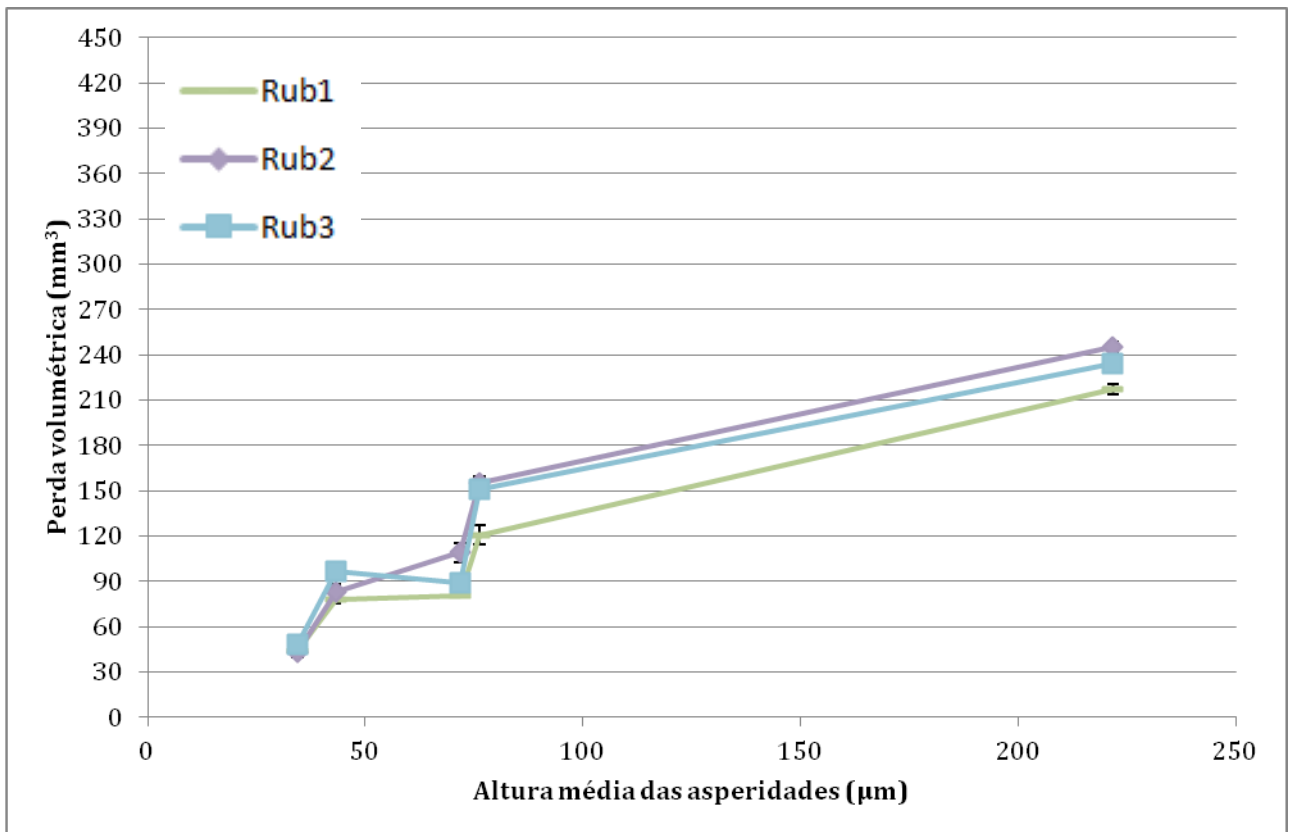


Figura 62: Perda volumétrica para todos os materiais a 5 N para a lixa P 60.

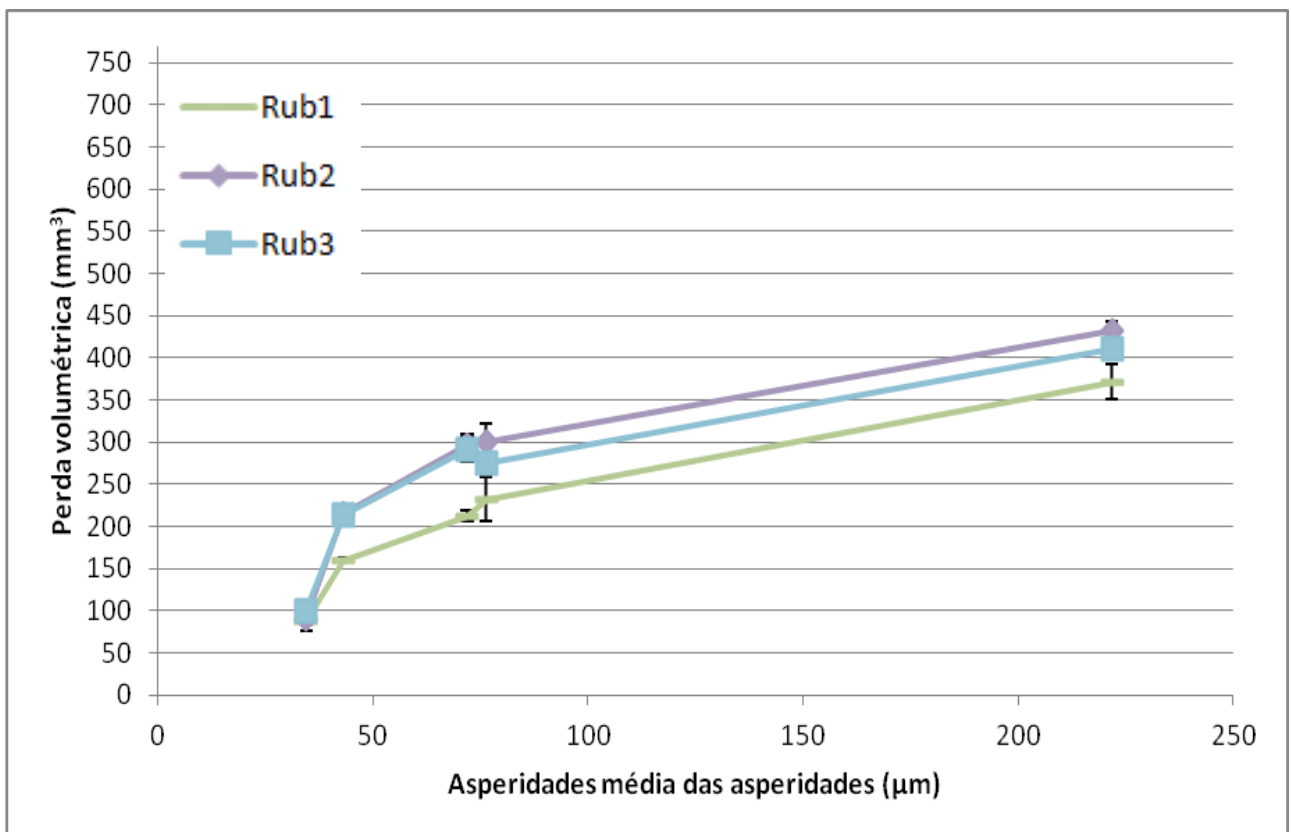


Figura 63: Perda volumétrica para todos os materiais a 5 N para a lixa P 60.

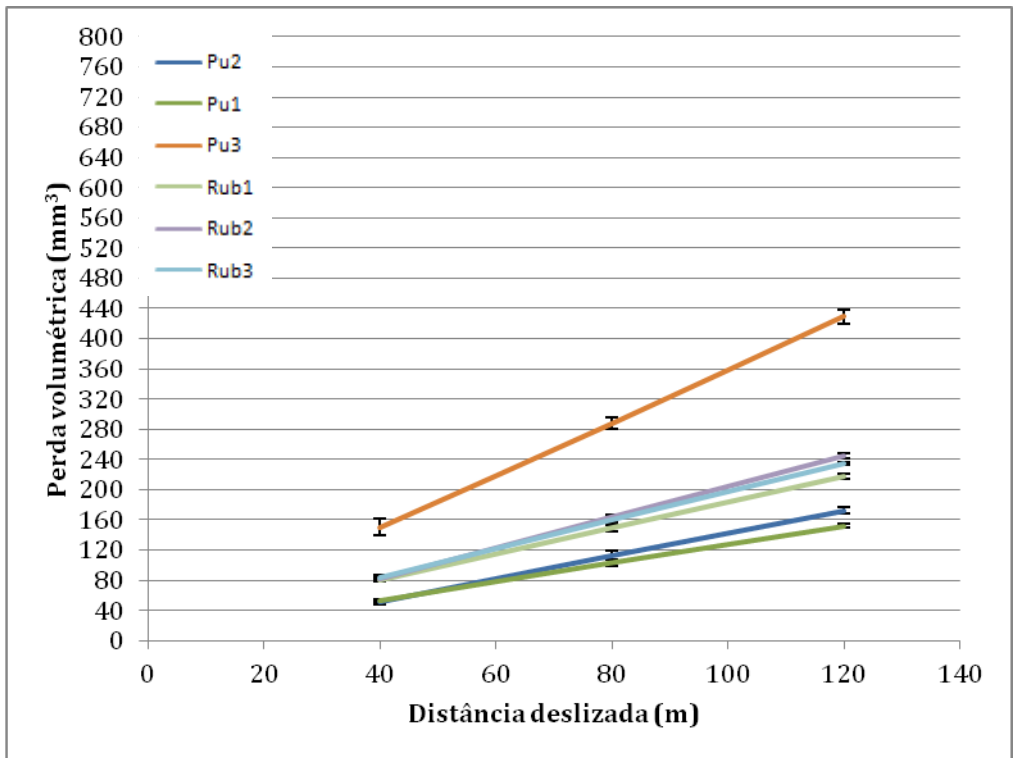


Figura 64: Perda volumétrica para todos os materiais a 5 N para a lixa P 60.

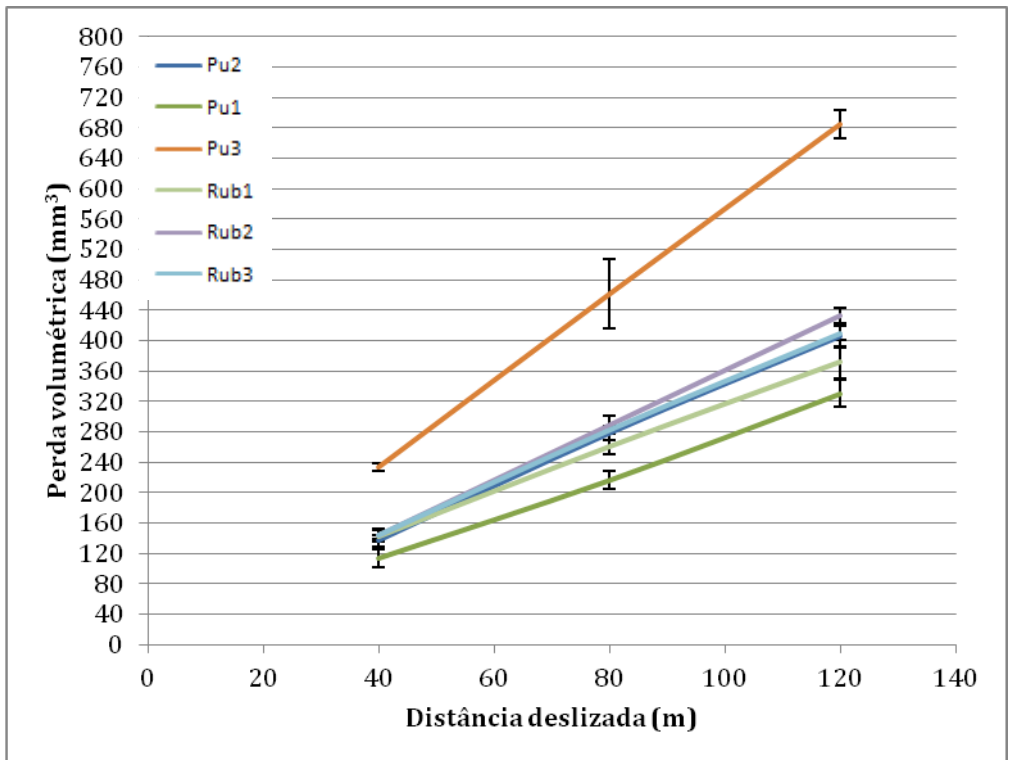


Figura 65: Perda volumétrica para todos os materiais a 10 N para a lixa P 60.

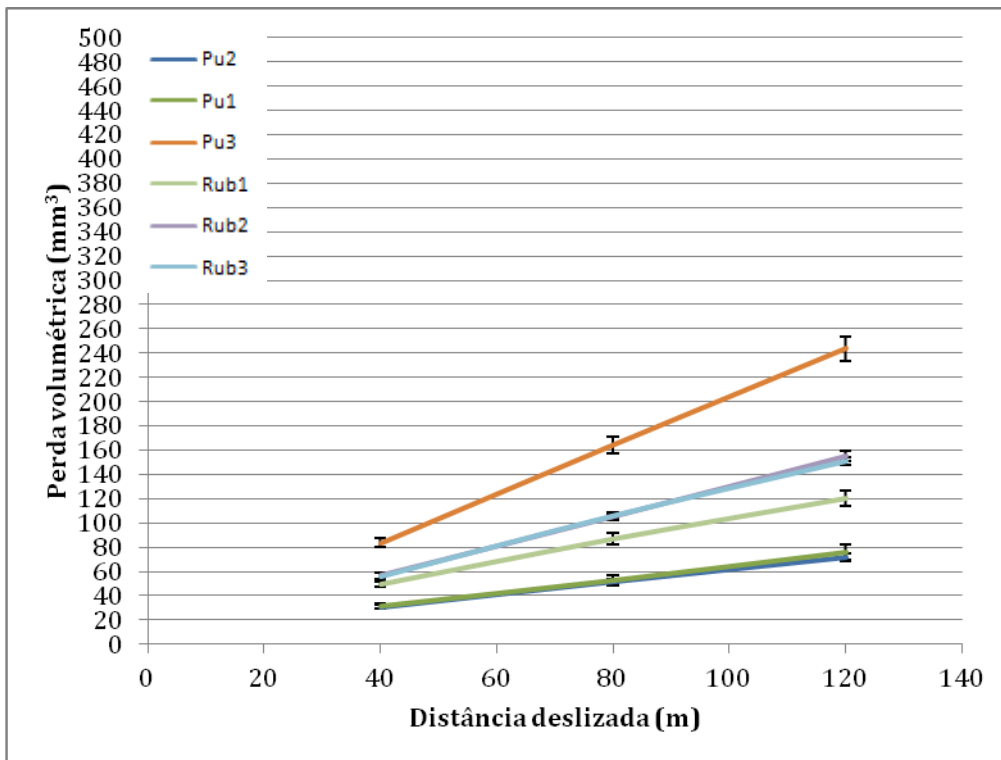


Figura 66: Perda volumétrica para todos os materiais a 5 N para a lixa P 120.

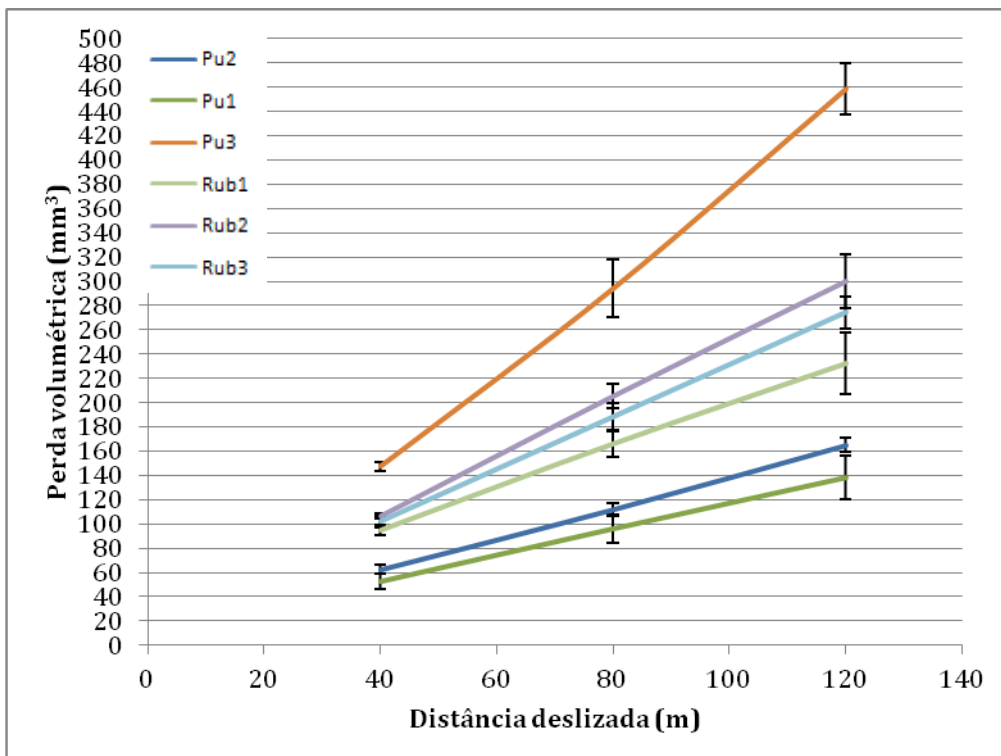


Figura 67: Perda volumétrica para todos os materiais a 10 N para a lixa P 120.

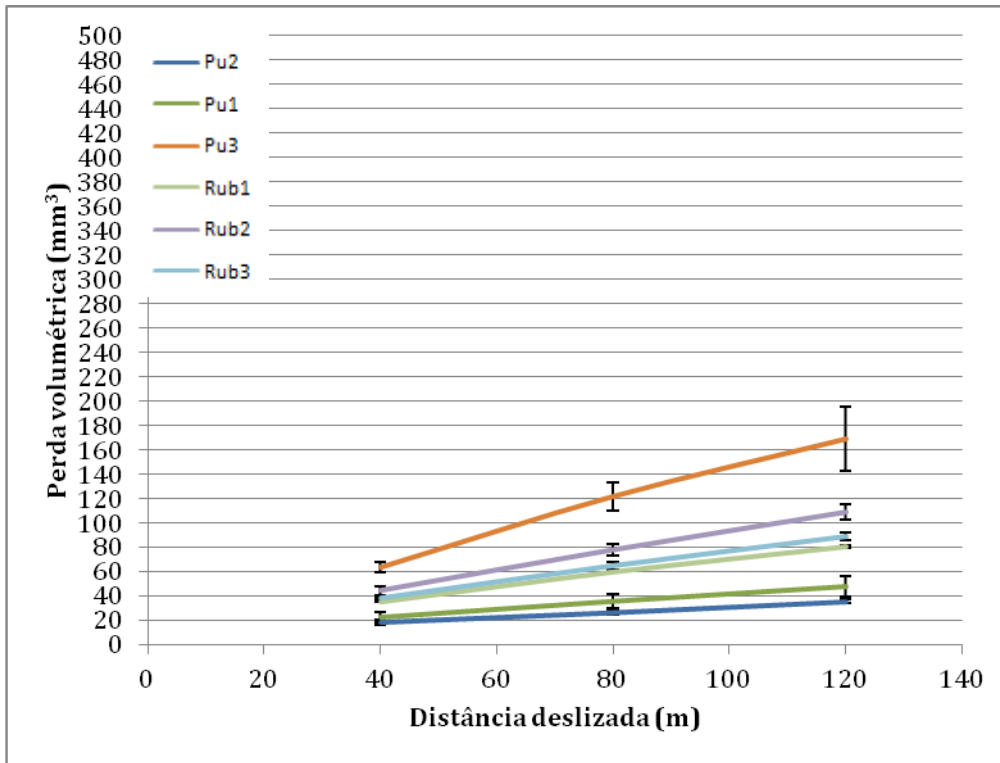


Figura 68: Perda volumétrica para todos os materiais a 5 N para a lixa P 180.

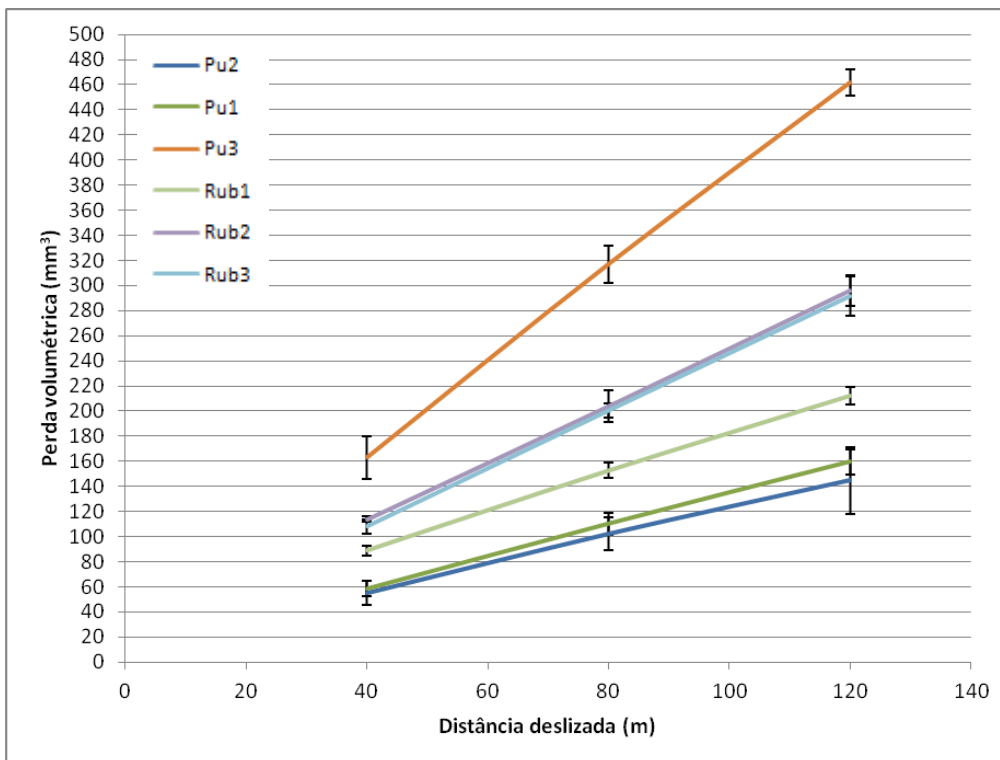


Figura 69: Perda volumétrica para todos os materiais a 10 N para a lixa P 180.

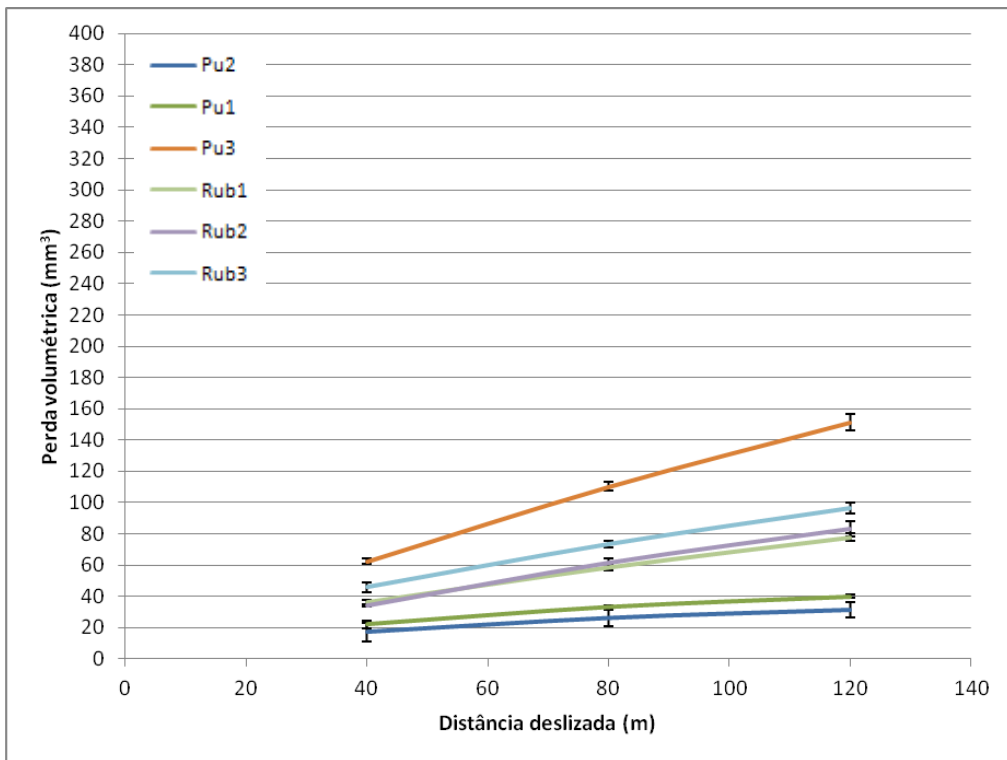


Figura 70: Perda volumétrica para todos os materiais a 5 N para a lixa P 240.

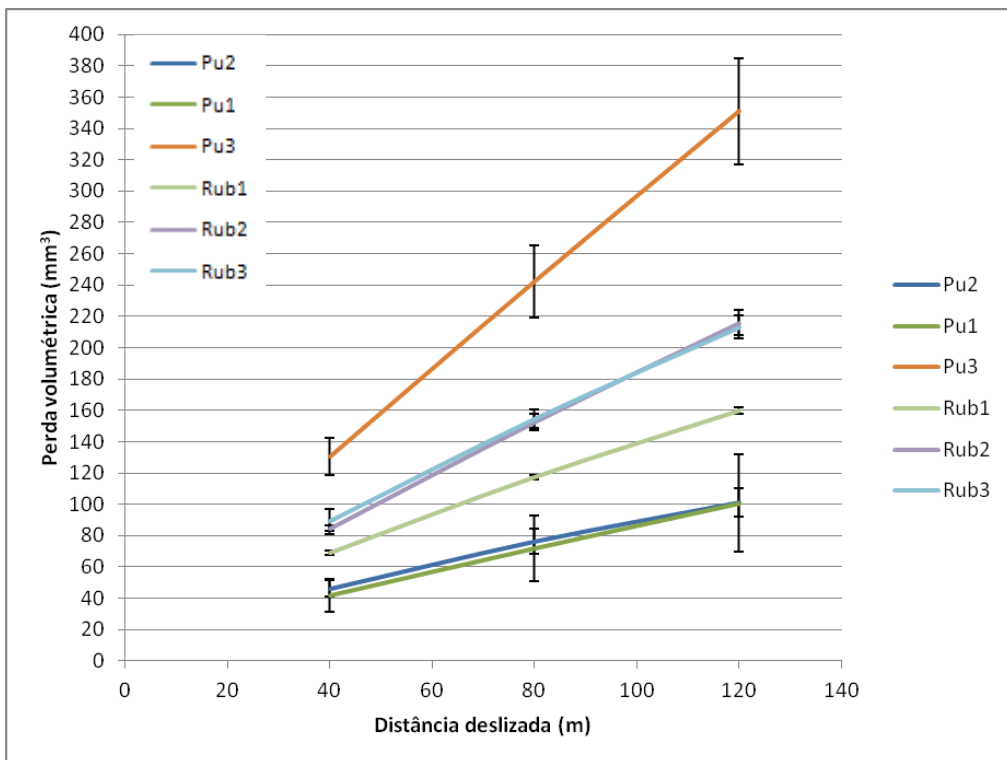


Figura 71: Perda volumétrica para todos os materiais a 10 N para a lixa P 240.

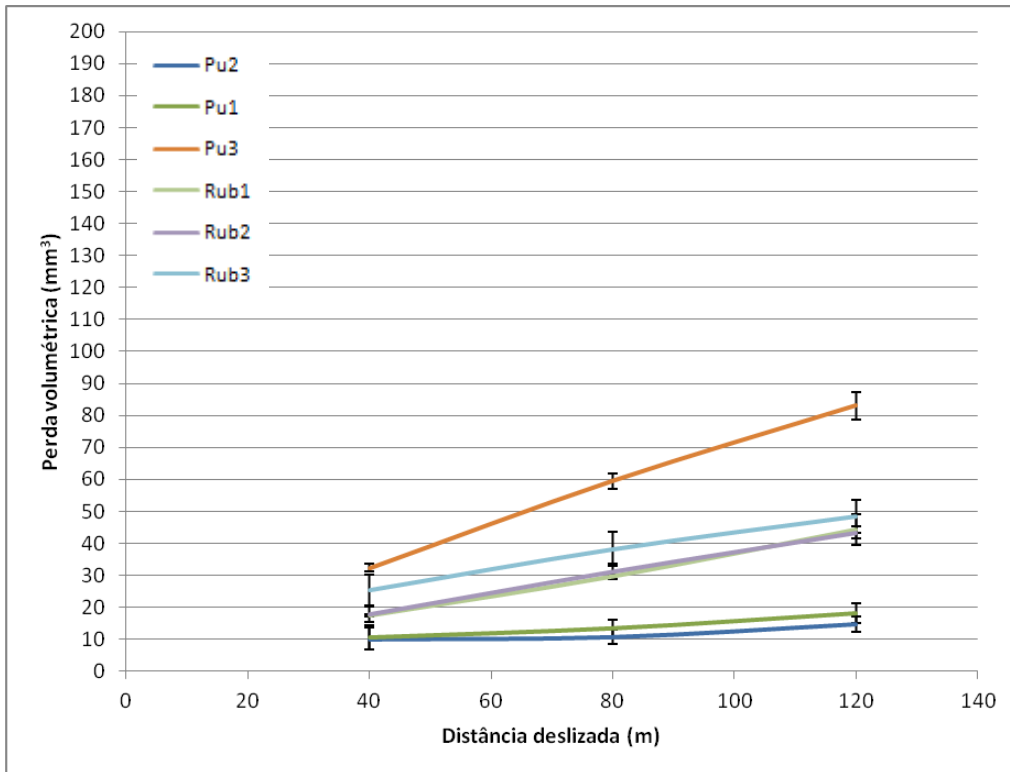


Figura 72: Perda volumétrica para todos os materiais a 5 N para a lixa P 400.

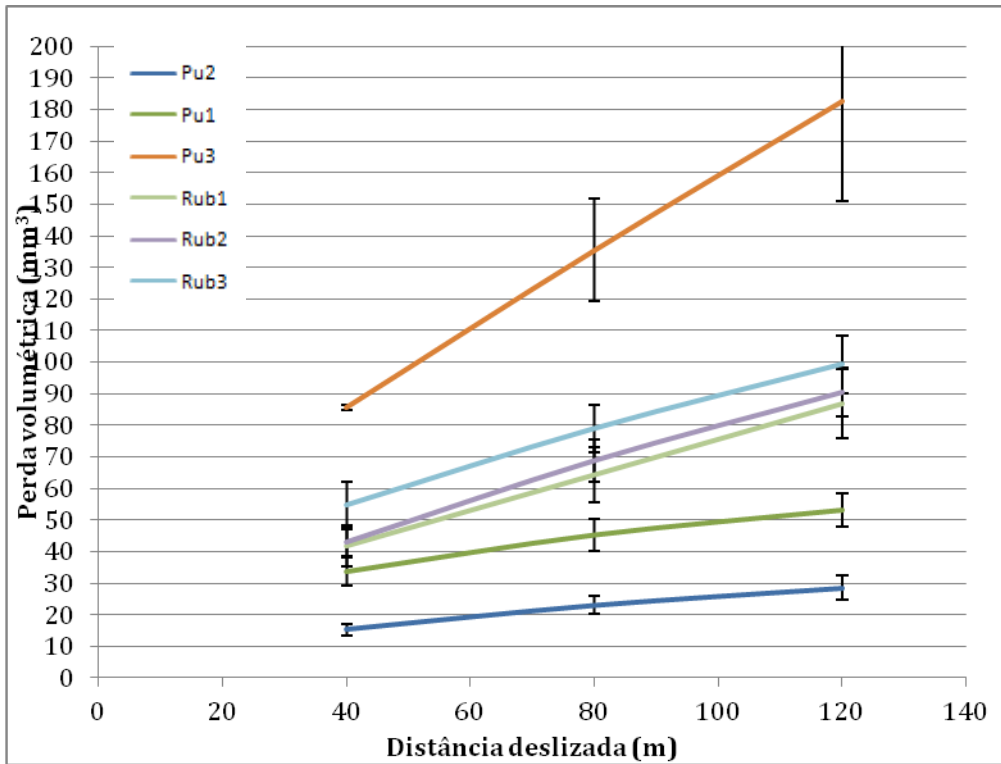


Figura 73: Perda volumétrica para todos os materiais a 10 N para a lixa P 400.

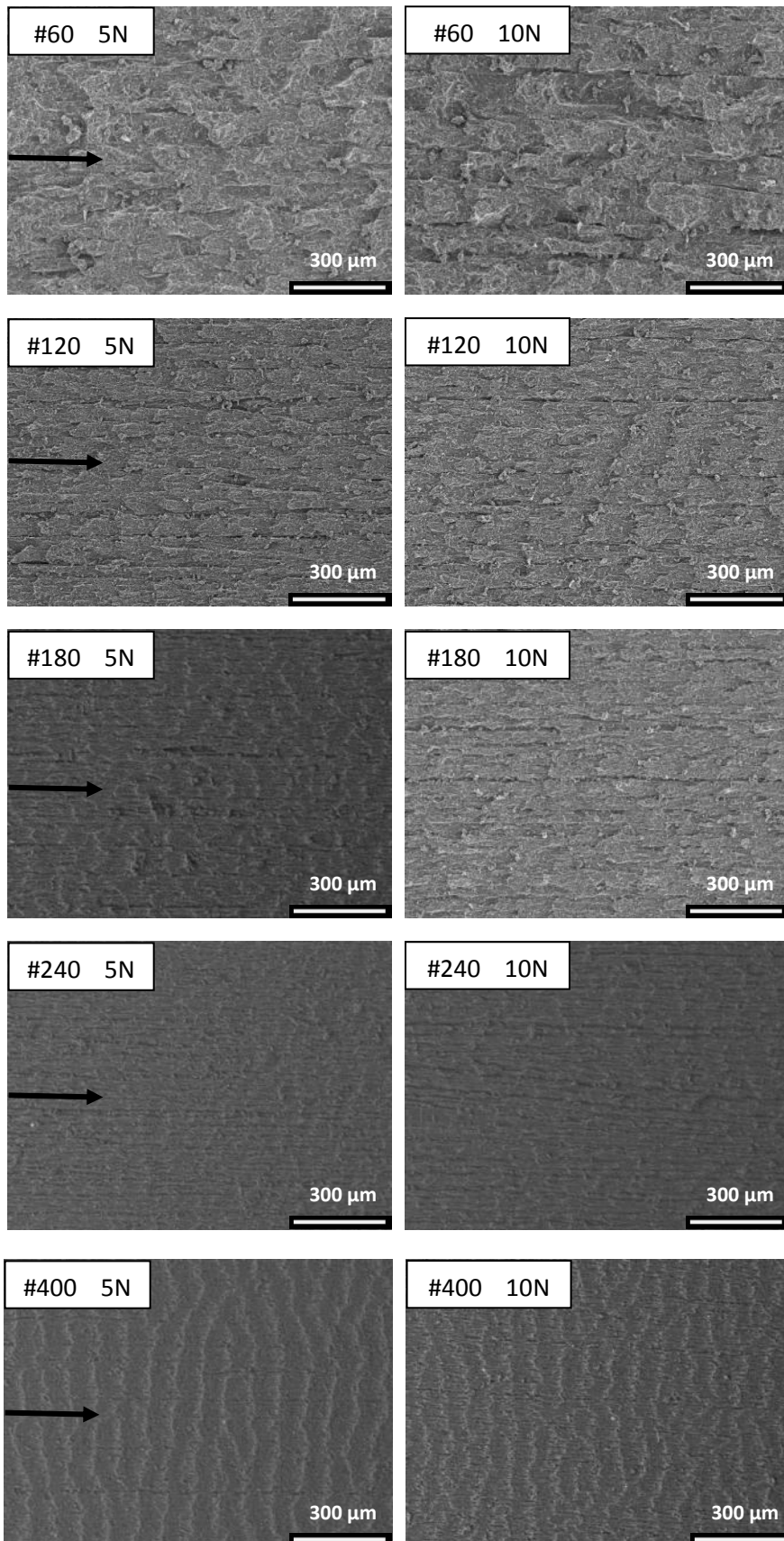


Figura 74: Imagens de microscopia eletrônica após ensaio de Pu1.



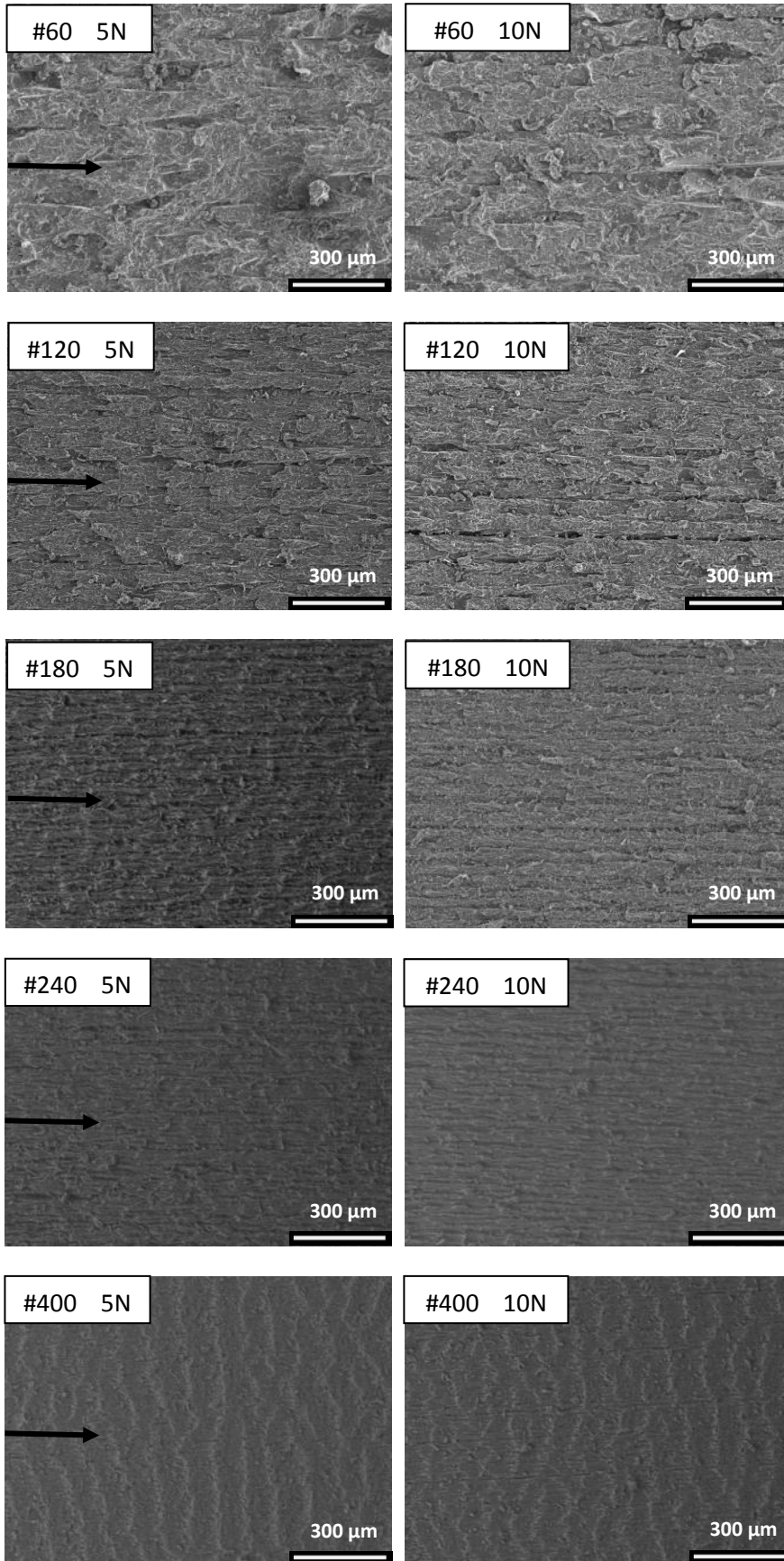


Figura 75: Imagens de microscopia eletrônica após ensaio de Pu2.

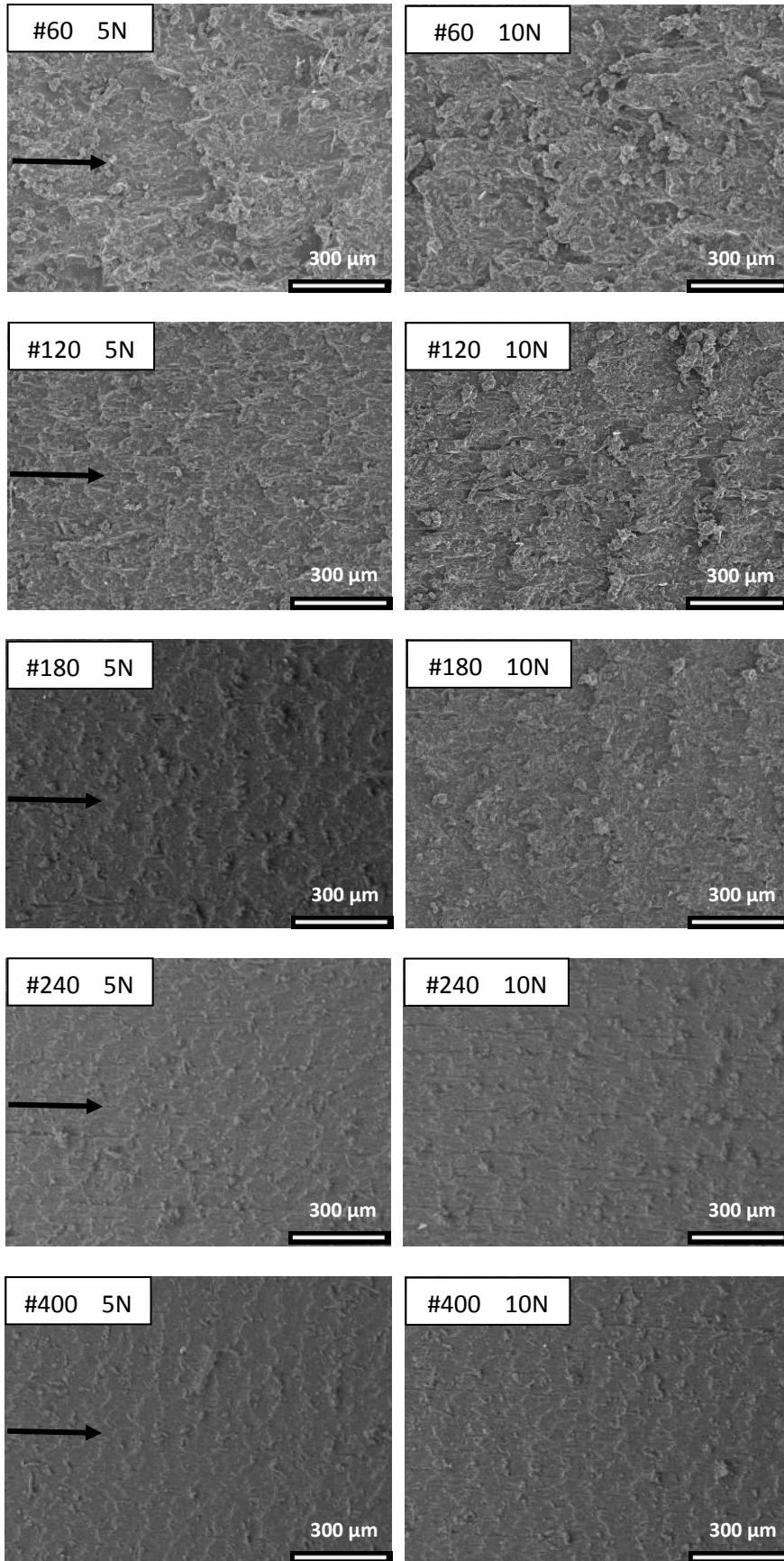


Figura 76: Imagens de microscopia eletrônica após ensaio de Pu3.

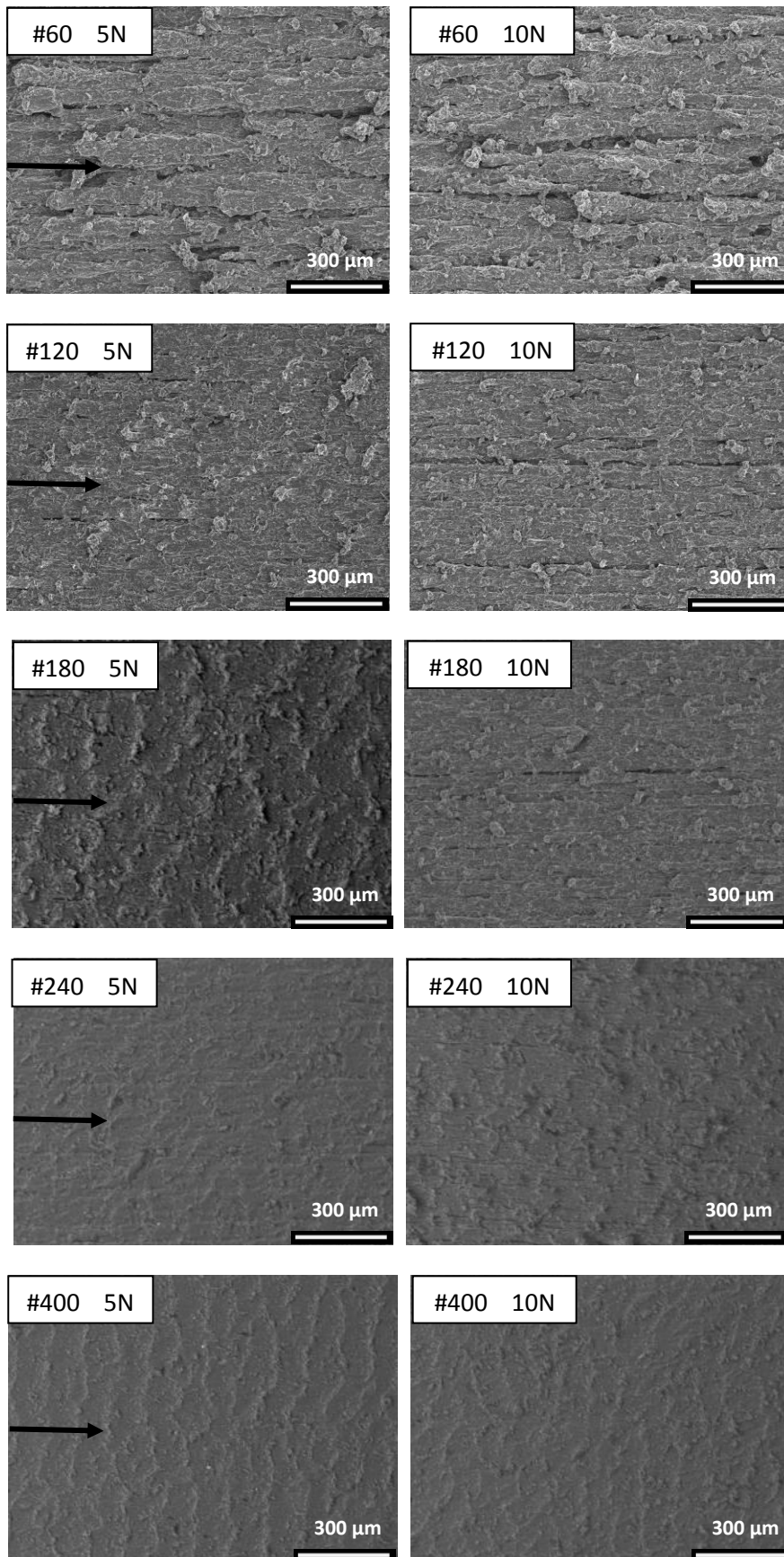


Figura 77: Imagens de microscopia eletrônica após ensaio de Rub1.

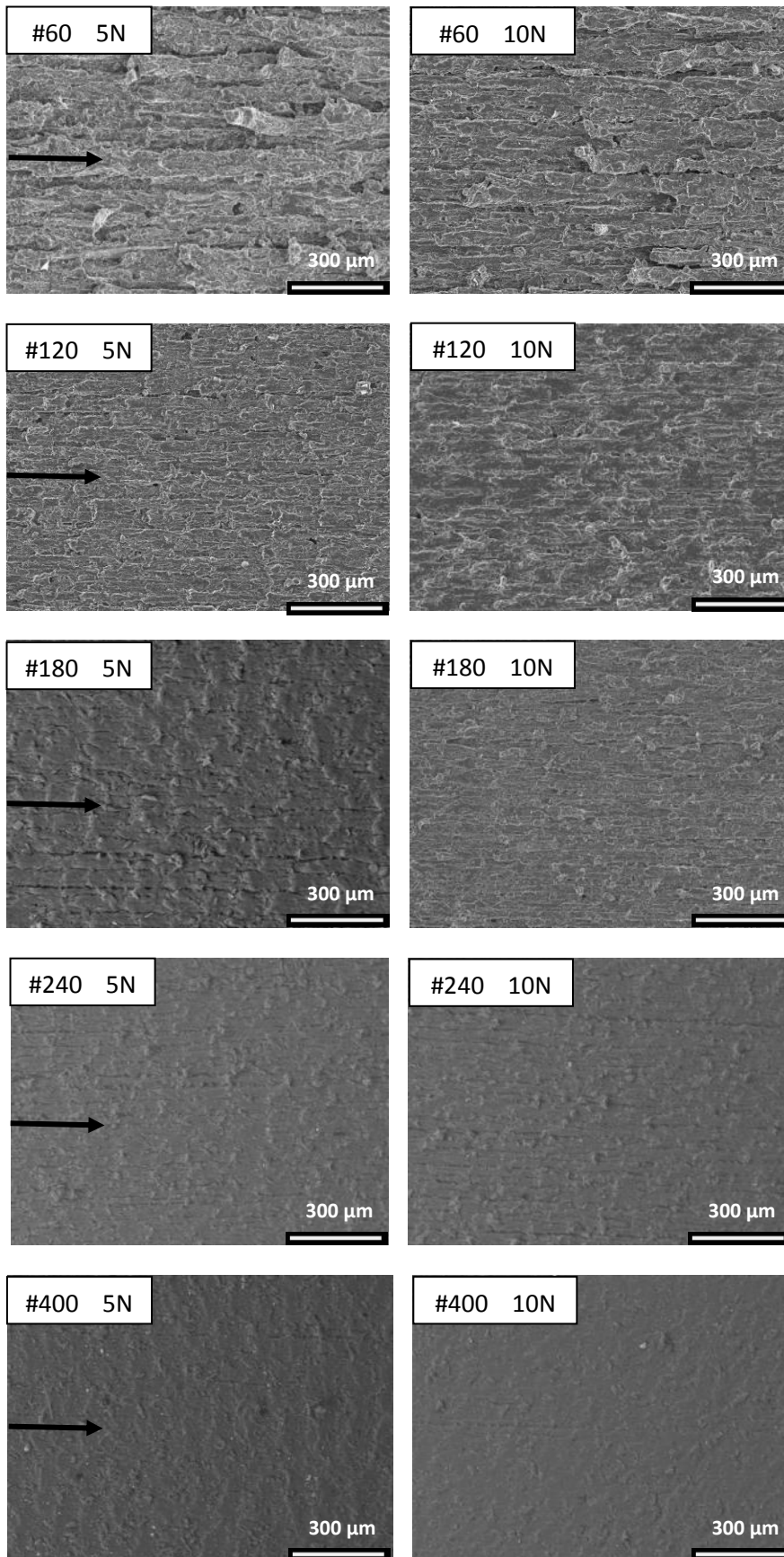


Figura 78: Imagens de microscopia eletrônica após ensaio de Rub2.

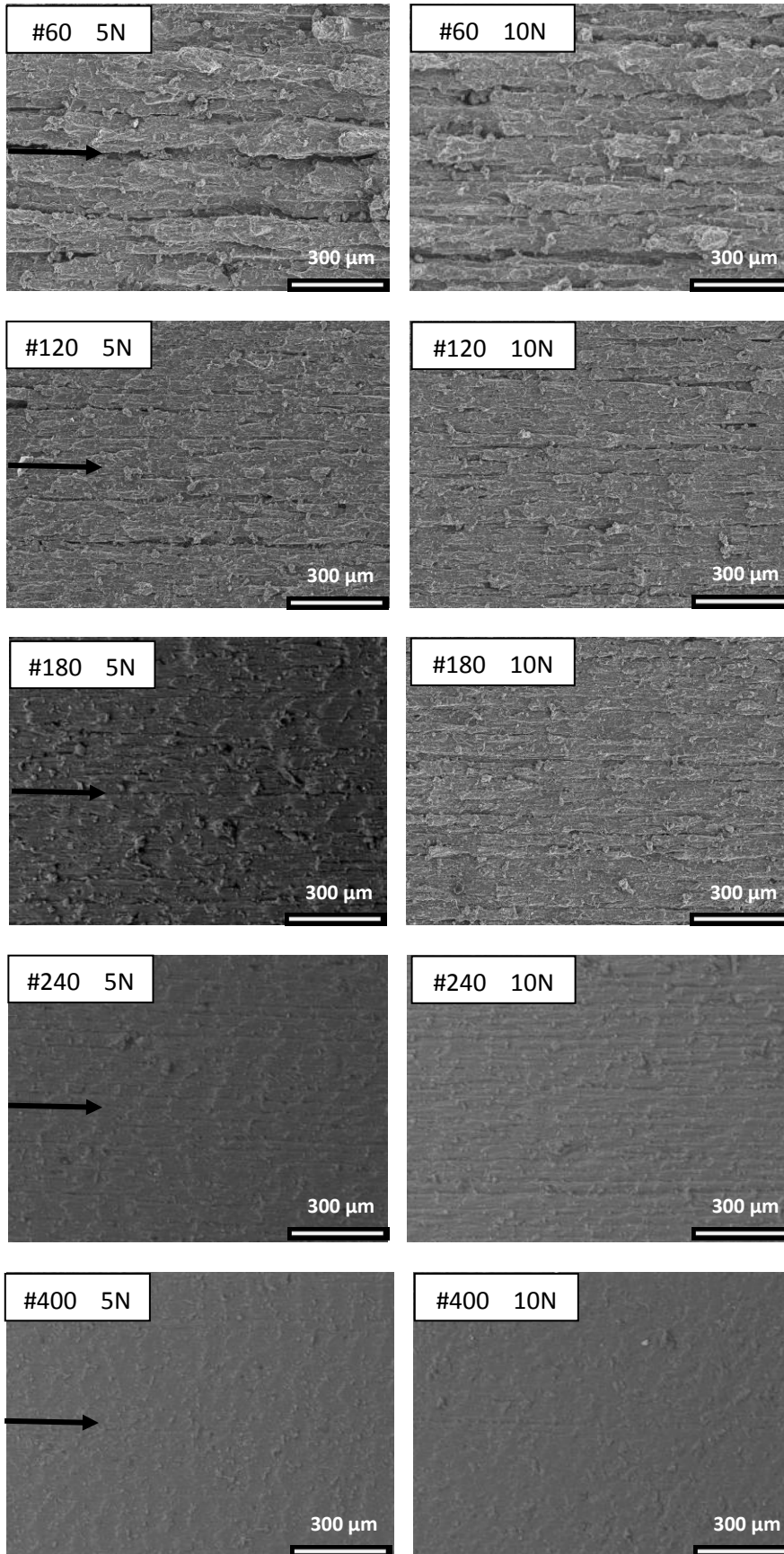
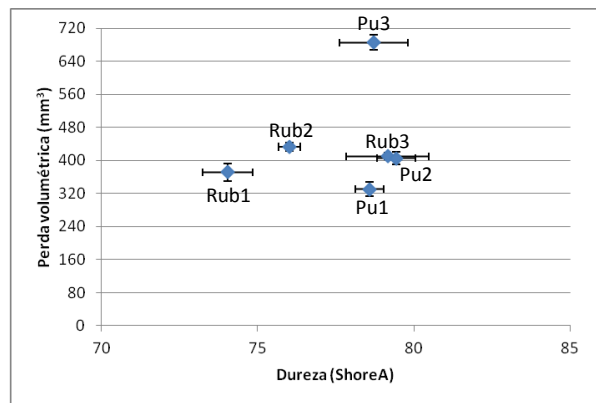
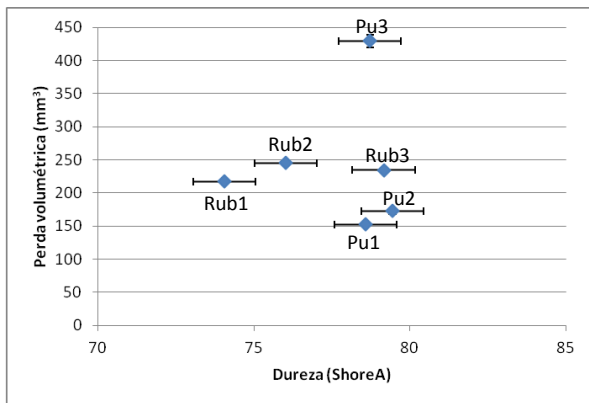
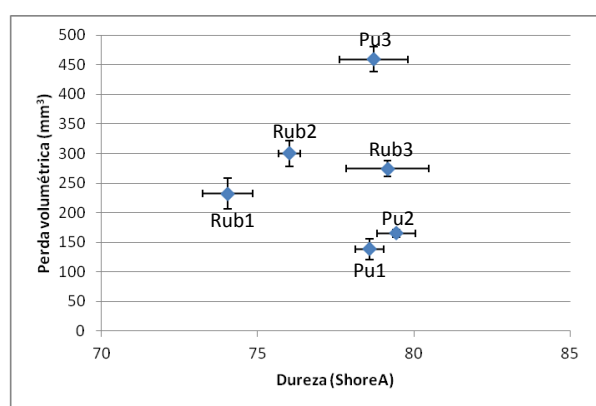
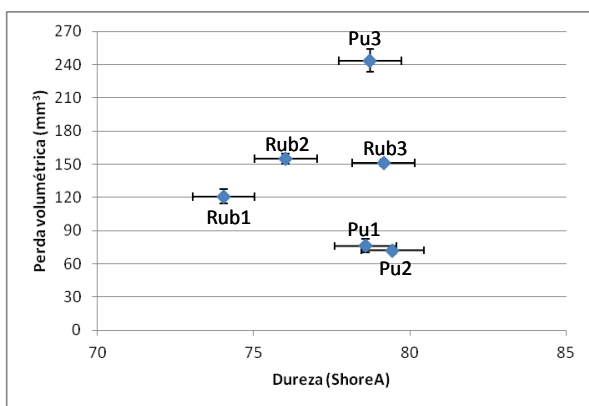


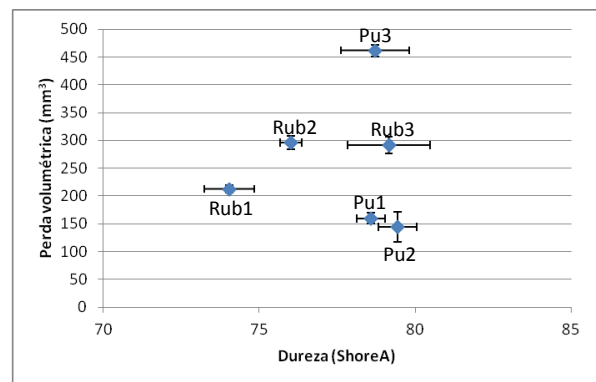
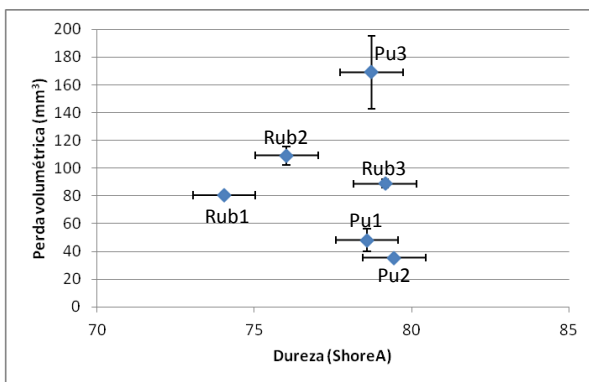
Figura 79: Imagens de microscopia eletrônica após ensaio de Rub3.



**Figura 80: Perda volumétrica em função da dureza ShoreA para ensaios a 5 N (esquerda) e 10 N (direita) com a lixa P60.**



**Figura 81: Perda volumétrica em função da dureza ShoreA para ensaios a 5 N (esquerda) e 10 N (direita) com a lixa P120.**



**Figura 82: Perda volumétrica em função da dureza ShoreA para ensaios a 5 N (esquerda) e 10 N (direita) com a lixa P180.**

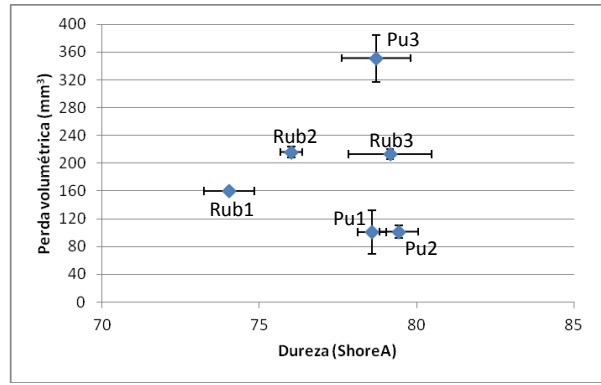
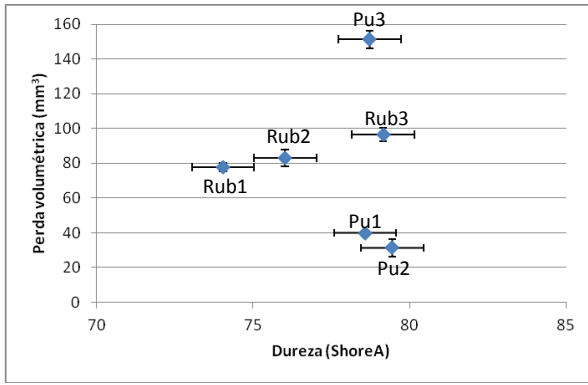


Figura 83: Perda volumétrica em função da dureza ShoreA para ensaios a 5 N (esquerda) e 10 N (direita) com a lixa P240.

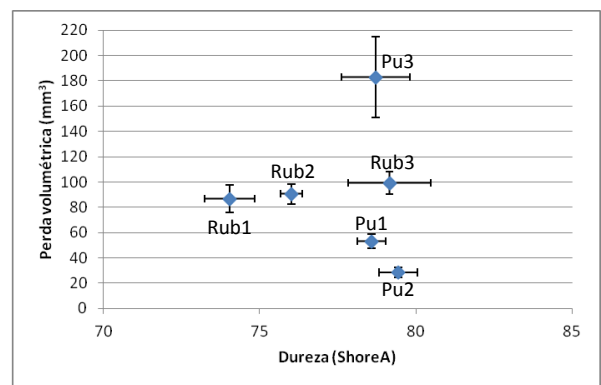
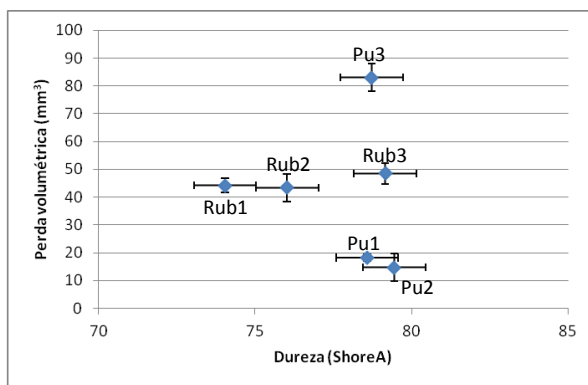


Figura 84: Perda volumétrica em função da dureza ShoreA para ensaios a 5 N (esquerda) e 10 N (direita) com a lixa P400.