UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO CENTRO TECNOLÓGICO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROJETO DE GRADUAÇÃO

# ESTUDO DO DESGASTE ABRASIVO DE POLIURETANO EMPREGADO NA INDÚSTRIA MINERAL

MARCO AURÉLIO BROSEGHINI COCCHETTO TIAGO VIANA SANTANA

> VITÓRIA - ES SETEMBRO, 2013

## MARCO AURÉLIO BROSEGHINI COCCHETTO TIAGO VIANA SANTANA

# ESTUDO DO DESGASTE ABRASIVO DE POLIURETANO EMPREGADO NA INDÚSTRIA MIINERAL

Projeto de Graduação apresentado ao Corpo Docente do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Título de Engenheiro Mecânico. Orientador: Prof. Dr. Cherlio Scandian.

VITÓRIA - ES SETEMBRO, 2013

## MARCO AURÉLIO BROSEGHINI COCCHETTO TIAGO VIANA SANTANA

# ESTUDO DO DESGASTE ABRASIVO DE POLIURETANO EMPREGADO NA INDÚSTRIA MINERAL

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

Defesa em 13 de setembro de 2013.

COMISSÃO EXAMINADORA:

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

Prof. Dr. Marcelo Camargo de Macêdo Universidade Federal do Espírito Santo Examinador

Prof. Dr. Antônio Cesar Bozzi Universidade Federal do Espírito Santo Examinador

Vitória – ES Setembro, 2013

#### AGRADECIMENTOS

Primeiramente temos a agradecer muito a Deus, que nos proporcionou força e disciplina para seguir nosso caminho acadêmico, e aos nossos queridos e amados pais que nos formaram e moldaram desde o berço e sempre nos motivaram a seguir em frente.

Também, nesse momento marcante em nossas vidas, temos muito a agradecer a todos que, de alguma forma, contribuíram para a conclusão desse trabalho, mas principalmente aos que nos ajudaram de uma maneira direta, que foram o nosso professor e orientador Cherlio Scandian que nos passou com maestria o conhecimento necessário para a conclusão deste trabalho e das disciplinas de Tribologia, além de incentivar a nossa busca pelo saber. E ao nosso caro amigo Lionel Loïc Limol que nos ofereceu ajuda e conhecimentos fundamentais durante todo o andamento do trabalho.

Agradecemos também a todos os nossos colegas e amigos que de alguma forma contribuíram para o nosso êxito.

#### RESUMO

Este trabalho faz parte de um projeto que visa constituir a caracterização de materiais de desgaste visando o estabelecimento de parâmetros técnicos para o seu fornecimento tendo como objetivo o aumento da vida-útil de componentes utilizados no beneficiamento de minério. É apresentado um estudo dos mecanismos de desgaste desses materiais para a comparação com o desgaste real em serviço e ainda, no final do trabalho, é apresentada uma sugestão de estudo de uma alternativa para melhor caracterizar o desempenho tribológico do poliuretano.

Foram realizados ensaios em amostras de poliuretano que são constituintes do revestimento interno das tubulações que fazem o transporte de polpa de minério na indústria mineradora. Essas amostras são do mesmo tipo de poliuretano, porém estão em condições diferentes, sendo uma parte delas de revestimento novo, outras de revestimento usado e outras de revestimento usado do flange da tubulação.

Essas amostras foram ensaiadas em dois tipos de abrasômetros, que reproduzem o desgaste abrasivo a dois e a três corpos, na qual recolhemos informações sobre perda de massa, correlação da dureza com a perda de massa, análise macroscópica e análise microscópica.

**Palavras-Chave**: Poliuretano; desgaste abrasivo; mineração; mecanismos de desgaste.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação esquemática de uma unidade repetida para um	
polietileno	15
Figura 2: Monômero tetrafluoretileno sendo polimerizado e formando o	
politetrafluoretileno (PTFE, mais conhecido como TeflonTM)	15
Figura 3: Representação esquemática das cadeias macromoleculares	16
Figura 4: Grupo funcional: (a) amida (b) uretano	17
Figura 5: Correlação da taxa de desgaste abrasivo a dois corpos (sendo o carbeto	)
de silício como abrasivo) com a dureza para alguns polímeros e metais	18
Figura 6: Correlação de Ratner-Lancaster entre a taxa de desgaste dos polímeros	i
sob condições predominantemente abrasivas e a relação do produto da tensão e	
deformação na ruptura a tração	19
Figura 7: Tubulação revestida com poliuretano	22
Figura 8: Representação esquemática: a) desgaste abrasivo por deslizamento de	
partícula e b) desgaste abrasivo por rolamento de partículas.	23
Figura 9: Fenômeno físico do microsulcamento.	24
Figura 10: Fenômeno físico do microcorte.	25
Figura 11: Desenho esquemático da propagação de ondas de Schallamach	26
Figura 12: Ilustração esquemática de quatro métodos utilizados na medida das	
taxas de desgaste abrasivo de materiais: (a) pino-disco (b) pino-plano (c) pino-	
tambor (d) roda de borracha	27
Figura 13: Representação esquemática do abrasômetro previsto na norma ISO	
4649: (a) vista geral e (b) detalhes do sistema de aplicação de carga e	
posicionamento da lixa abrasiva [10]	28
Figura 14: Fluxograma das normas complementando a ISO 4649	28
Figura 15: Diagrama esquemático do aparelho de ensaio	30
Figura 16: Desenho esquemático do equipamento roda de borracha com o	
abrasivo areia seca	30
Figura 17: Material RN	31
Figura 18: Material RU	32
Figura 19: Material RUF.	32
Figura 20: Informações do material BP.	33

Figura 21: Equipamento Pino-Tambor	
Figura 22: Ferramenta de corte das amostras do Pino-Tambor35	
Figura 23: Máquina de corte das amostras do Pino-Tambor36	
Figura 24: Amostras cortadas para o ensaio Pino-tambor37	
Figura 25: Balança com uma precisão de 1mg no Lab. TRICORRMAT38	
Figura 26: Cabeçote da máquina	
Figura 27: Orifício aonde a amostra é colocada39	
Figura 28: Mecanismo da máquina de abrasão40	
Figura 29: Parafuso sem fim e guia do cabeçote40	
Figura 30: Ensaio de uma amostra de RN41	
Figura 31: Êmbolo responsável pela ejeção da amostra41	
Figura 32: Componentes da roda de borracha44	
Figura 33: Máquina de corte das amostras do Roda de Borracha46	
Figura 34: Amostras utilizadas para ensaio46	
Figura 35: Roda de borracha48	
Figura 36: Porta-amostra49	
Figura 37: Porta amostra visto por baixo49	
Figura 38: Algumas anilhas50	
Figura 39: Suporte para as anilhas no braço articulado51	
Figura 40: Dispositivo para manter a roda afastada da amostra	
Figura 41: Silo de abrasivo52	
Figura 42: Conjunto motor e caixa de redução53	
Figura 43: Inversor de frequência54	
Figura 44: Sistema de alimentação de abrasivo54	
Figura 45: Durômetro portátil de dureza Shore A56	
Figura 46: Perda de massa individual para cada amostra de material ensaiada em	
conjunto com a perda de massa das borrachas padrões ensaiadas – Pino-Tambor.58	8
Figura 47: Média da perda de massa para os materiais ensaiados – Pino-Tambor.59	
Figura 48: Correlação da média da perda de massa com a dureza Shore A dos	
materiais ensaiados60	
Figura 49: Superfície de RN aumentada em 5,7 vezes – Pino-Tambor61	
Figura 50: Superfície de RN aumentada em 17,0 vezes – Pino-Tambor61	
Figura 51: Superfície de RU aumentada em 5,7 vezes – Pino-Tambor62	
Figura 52: Superfície de RU aumentada em 17,0 vezes – Pino-Tambor62	

Figura 53: Superfície de RUF aumentada em 5,7 vezes – Pino-Tambor63
Figura 54: Superfície de RUF aumentada em 17,0 vezes – Pino-Tambor63
Figura 55: Análise microscópica da superfície do RN antes do ensaio64
Figura 56: Análise microscópica da superfície do RN depois do ensaio, aumentada
200X65
Figura 57: Análise microscópica da superfície do RN depois do ensaio, aumentada
500X65
Figura 58: Análise microscópica da superfície do RU antes do ensaio, aumentada
250X
Figura 59: Análise microscópica da superfície do RU antes do ensaio, aumentada
1000X
Figura 60: Análise microscópica da superfície do RU antes do ensaio, aumentada
1000X – Sinal BSD67
Figura 61: Análise microscópica da superfície do RU depois do ensaio, aumentada
200X
Figura 62: Análise microscópica da superfície do RU depois do ensaio, aumentada
1000X
Figura 63: Análise microscópica da superfície do RUF depois do ensaio,
Figura 63: Análise microscópica da superfície do RUF depois do ensaio, aumentada 200X
Figura 63: Análise microscópica da superfície do RUF depois do ensaio, aumentada 200X
Figura 63: Análise microscópica da superfície do RUF depois do ensaio, aumentada 200X
Figura 63: Análise microscópica da superfície do RUF depois do ensaio, aumentada 200X
Figura 63: Análise microscópica da superfície do RUF depois do ensaio, aumentada 200X
Figura 63: Análise microscópica da superfície do RUF depois do ensaio, aumentada 200X
Figura 63: Análise microscópica da superfície do RUF depois do ensaio, aumentada 200X
Figura 63: Análise microscópica da superfície do RUF depois do ensaio,         aumentada 200X.
Figura 63: Análise microscópica da superfície do RUF depois do ensaio,         aumentada 200X.
Figura 63: Análise microscópica da superfície do RUF depois do ensaio,       69         aumentada 200X.       69         Figura 64: Análise microscópica da superfície do RUF depois do ensaio,       69         aumentada 500X.       69         Figura 65: Análise de composição química das partículas incrustadas na amostra       69         de RU, antes dos ensaios.       70         Figura 66: Perda de massa individual utilizando parâmetros de ensaio segundo a       71         Figura 67: Média da perda de massa utilizando parâmetros de ensaio segundo a       72         Figura 68: Perda de massa individual utilizando parâmetros de ensaio segundo a       72
Figura 63: Análise microscópica da superfície do RUF depois do ensaio,         aumentada 200X.       69         Figura 64: Análise microscópica da superfície do RUF depois do ensaio,         aumentada 500X.       69         Figura 65: Análise de composição química das partículas incrustadas na amostra         de RU, antes dos ensaios.       70         Figura 66: Perda de massa individual utilizando parâmetros de ensaio segundo a       71         Figura 67: Média da perda de massa utilizando parâmetros de ensaio segundo a       72         Figura 68: Perda de massa individual utilizando parâmetros de ensaio segundo a       72         Figura 68: Perda de massa individual utilizando parâmetros de ensaio segundo a       72         Figura 68: Perda de massa individual utilizando parâmetros de ensaio segundo a       72         Figura 68: Perda de massa individual utilizando parâmetros de ensaio segundo a       72         Figura 68: Perda de massa individual utilizando parâmetros de ensaio segundo a       72         Figura 68: Perda de massa individual utilizando parâmetros de ensaio modificados       73
Figura 63: Análise microscópica da superfície do RUF depois do ensaio, aumentada 200X
Figura 63: Análise microscópica da superfície do RUF depois do ensaio,       69         aumentada 200X.       69         Figura 64: Análise microscópica da superfície do RUF depois do ensaio,       69         aumentada 500X.       69         Figura 65: Análise de composição química das partículas incrustadas na amostra       69         de RU, antes dos ensaios.       70         Figura 66: Perda de massa individual utilizando parâmetros de ensaio segundo a       71         Figura 67: Média da perda de massa utilizando parâmetros de ensaio segundo a       72         Figura 68: Perda de massa individual utilizando parâmetros de ensaio segundo a       72         Figura 68: Perda de massa individual utilizando parâmetros de ensaio segundo a       73         Figura 68: Perda de massa individual utilizando parâmetros de ensaio modificados       73         Figura 69: Média da perda de massa utilizando parâmetros de ensaio modificados       73         Figura 69: Média da perda de massa utilizando parâmetros de ensaio modificados       73         Figura 69: Média da perda de massa utilizando parâmetros de ensaio modificados       73         Figura 69: Média da perda de massa utilizando parâmetros de ensaio modificados       73
Figura 63: Análise microscópica da superfície do RUF depois do ensaio,       69         aumentada 200X.       69         Figura 64: Análise microscópica da superfície do RUF depois do ensaio,       69         aumentada 500X.       69         Figura 65: Análise de composição química das partículas incrustadas na amostra       69         de RU, antes dos ensaios.       70         Figura 66: Perda de massa individual utilizando parâmetros de ensaio segundo a       70         Figura 67: Média da perda de massa utilizando parâmetros de ensaio segundo a       71         Figura 68: Perda de massa individual utilizando parâmetros de ensaio segundo a       72         Figura 68: Perda de massa individual utilizando parâmetros de ensaio segundo a       72         Figura 68: Perda de massa individual utilizando parâmetros de ensaio modificados       73         Figura 69: Média da perda de massa utilizando parâmetros de ensaio modificados       73         Figura 69: Média da perda de massa utilizando parâmetros de ensaio modificados       73         Figura 70: Correlação entre a média da perda de massa dos parâmetros da norma       73

Figura 71: Correlação entre a média da perda de massa dos parâmetros
modificados com a dureza Shore A dos materiais ensaiados – Roda de Borracha.75
Figura 72: Superfície de RN aumentada em 5,0 vezes – Roda de Borracha
(norma)76
Figura 73: Superfície de RN aumentada em 17,0 vezes – Roda de Borracha
(norma)76
Figura 74: Superfície de RN aumentada em 5,0 vezes – Roda de Borracha
(modificados)77
Figura 75: Superfície de RN aumentada em 17,0 vezes – Roda de Borracha
(modificados)77
Figura 76: Superfície de RU aumentada em 5,0 vezes – Roda de Borracha
(norma)78
Figura 77: Superfície de RU aumentada em 17,0 vezes – Roda de Borracha
(norma)78
Figura 78: Superfície de RU aumentada em 5,0 vezes – Roda de Borracha
(modificados)79
Figura 79: Superfície de RU aumentada em 17,0 vezes – Roda de Borracha
(modificados)79
Figura 80: Superfície de RUF aumentada em 5,0 vezes – Roda de Borracha
(norma)80
Figura 81: Superfície de RUF aumentada em 17,0 vezes – Roda de Borracha
(norma)80
Figura 82: Superfície de RUF aumentada em 5,0 vezes – Roda de Borracha
(modificados)81
Figura 83: Superfície de RUF aumentada em 17,0 vezes – Roda de Borracha
(modificados)81
Figura 84: Análise microscópica da superfície do RN, aumentada 250X (norma)82
Figura 85: Análise microscópica da superfície do RN, aumentada 500X (norma;
BSD)83
Figura 86: Análise microscópica da superfície do RN, aumentada 250X
(modificados)83
Figura 87: Análise microscópica da superfície do RN, aumentada 500X
(modificados; BSD)
Figura 88: Análise microscópica da superfície do RU, aumentada 250X (norma)84

Figura 89: Análise microscópica da superfície do RU, aumentada 500X (norma)8	5
Figura 90: Análise microscópica da superfície do RU, aumentada 250X	
(modificados)8	5
Figura 91: Análise microscópica da superfície do RU, aumentada 500X	
(modificados)80	6
Figura 92: Análise microscópica da superfície do RUF, aumentada 250X (norma).80	6
Figura 93: Análise microscópica da superfície do RUF, aumentada 500X (norma).8	7
Figura 94: Análise microscópica da superfície do RUF, aumentada 250X	
(modificados)8	7
Figura 95: Análise microscópica da superfície do RUF, aumentada 500X	
(modificados)88	8
Figura 96: Média da perda de massa de todos os ensaios89	9

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Legenda dos termos abreviados de identificação dos materiais	
utilizados	31
Tabela 2: Dureza Shore A dos materiais	56
Tabela 3: Parâmetros dos ensaios Pino-Tambor	34
Tabela 4: Amostras utilizadas	35
Tabela 5: Temperatura e umidade relativa preferencial. Erro! Indicador não defin	ido.
Tabela 6: Parâmetros dos ensaios Roda de Borracha	45
Tabela 7: Amostras usadas	45
Tabela 8: Peso das anilhas	50
Tabela 9: Perda de massa média normalizada	90

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas
- BSD Backscatter Detector
- IPT Instituto de pesquisa tecnológica
- PU Poliuretano
- PT Pino-Tambor
- RBN Roda de Borracha Norma
- RBM Roda de Borracha Modificado
- RN Revestimento Novo
- RU Revestimento Usado
- RUF Revestimento Usado Flange
- UFES Universidade Federal do Espírito Santo

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 POLÍMEROS	15
2.1.1 Definição de polímeros	15
2.1.2 Classificação dos polímeros	16
2.1.3 Fatores que influenciam em sua propriedade mecânica	17
2.1.4 Dureza nos polímeros	18
2.2 POLIURETANO	19
2.2.1 Elastômeros de poliuretano	20
2.2.2 Utilização na mineração	20
2.2.3 Tubos revestidos	21
2.3 TRIBOLOGIA	22
2.3.1 Desgaste Abrasivo	22
2.3.1.1 Ondas de Schallamach	25
2.4 ABRASÔMETROS	26
2 4 1 Pino-Tambor	27
2.4.2 Roda de Borracha	27
2.4.2 Roda de Borracha	27
<ul> <li>2.4.2 Roda de Borracha</li></ul>	27 29 31
<ul> <li>2.4.2 Roda de Borracha</li></ul>	<b>29</b> <b>31</b> 31
<ul> <li>2.4.2 Roda de Borracha</li> <li>3 MATERIAIS E MÉTODOS</li> <li>3.1 MATERIAIS POLIMÉRICOS UTILIZADOS</li> <li>3.2 PINO-TAMBOR</li> </ul>	29 31 31 33
<ul> <li>2.4.2 Roda de Borracha</li> <li>3 MATERIAIS E MÉTODOS</li> <li>3.1 MATERIAIS POLIMÉRICOS UTILIZADOS</li> <li>3.2 PINO-TAMBOR</li> <li>3.2.1 Equipamento utilizado</li> </ul>	29 31 31 33 33
<ul> <li>2.4.2 Roda de Borracha</li> <li>3 MATERIAIS E MÉTODOS</li> <li>3.1 MATERIAIS POLIMÉRICOS UTILIZADOS</li> <li>3.2 PINO-TAMBOR</li> <li>3.2.1 Equipamento utilizado</li> <li>3.2.2 Parâmetros de ensaios</li> </ul>	29 31 31 33 33 33 34
<ul> <li>2.4.2 Roda de Borracha</li> <li>3 MATERIAIS E MÉTODOS</li> <li>3.1 MATERIAIS POLIMÉRICOS UTILIZADOS</li> <li>3.2 PINO-TAMBOR</li> <li>3.2.1 Equipamento utilizado</li> <li>3.2.2 Parâmetros de ensaios</li> <li>3.2.3 Amostras</li> </ul>	21 29 31 33 33 34 34 34
<ul> <li>2.4.2 Roda de Borracha</li> <li>3 MATERIAIS E MÉTODOS</li> <li>3.1 MATERIAIS POLIMÉRICOS UTILIZADOS</li> <li>3.2 PINO-TAMBOR</li> <li>3.2.1 Equipamento utilizado</li> <li>3.2.2 Parâmetros de ensaios</li> <li>3.2.3 Amostras</li> <li>3.2.4 Procedimentos de ensaios</li> </ul>	21 29 31 33 33 34 34 34 37
<ul> <li>2.4.2 Roda de Borracha</li></ul>	21 29 31 33 33 34 34 37 37 37
<ul> <li>2.4.2 Roda de Borracha</li> <li>3 MATERIAIS E MÉTODOS</li> <li>3.1 MATERIAIS POLIMÉRICOS UTILIZADOS</li> <li>3.2 PINO-TAMBOR</li> <li>3.2.1 Equipamento utilizado</li> <li>3.2.2 Parâmetros de ensaios</li> <li>3.2.3 Amostras</li> <li>3.2.4 Procedimentos de ensaios</li> <li>3.2.4.1 Medição da massa das amostras antes dos ensaios</li> <li>3.2.4.2 Execução dos ensaios</li> </ul>	
<ul> <li>2.4.2 Roda de Borracha</li> <li>3 MATERIAIS E MÉTODOS</li> <li>3.1 MATERIAIS POLIMÉRICOS UTILIZADOS</li> <li>3.2 PINO-TAMBOR</li> <li>3.2.1 Equipamento utilizado</li> <li>3.2.2 Parâmetros de ensaios</li> <li>3.2.3 Amostras</li> <li>3.2.4 Procedimentos de ensaios</li> <li>3.2.4.1 Medição da massa das amostras antes dos ensaios</li> <li>3.2.4.2 Execução dos ensaios</li> <li>3.2.4.3 Limpeza das amostras após os ensaios</li> </ul>	29 29 31 33 33 33 34 37 37 37 38 38 38
<ul> <li>2.4.2 Roda de Borracha</li> <li>3 MATERIAIS E MÉTODOS</li> <li>3.1 MATERIAIS POLIMÉRICOS UTILIZADOS</li> <li>3.2 PINO-TAMBOR</li> <li>3.2.1 Equipamento utilizado</li> <li>3.2.2 Parâmetros de ensaios</li> <li>3.2.3 Amostras</li> <li>3.2.4 Procedimentos de ensaios</li> <li>3.2.4.1 Medição da massa das amostras antes dos ensaios</li> <li>3.2.4.2 Execução dos ensaios.</li> <li>3.2.4.3 Limpeza das amostras após os ensaios</li> <li>3.2.4.4 Limpeza da lixa durante os ensaios</li> </ul>	29 29 31 31 33 33 34 34 37 37 37 37 38 42 42
<ul> <li>2.4.2 Roda de Borracha</li> <li>3 MATERIAIS E MÉTODOS</li> <li>3.1 MATERIAIS POLIMÉRICOS UTILIZADOS</li> <li>3.2 PINO-TAMBOR</li> <li>3.2.1 Equipamento utilizado</li> <li>3.2.2 Parâmetros de ensaios</li> <li>3.2.3 Amostras</li> <li>3.2.4 Procedimentos de ensaios</li> <li>3.2.4.1 Medição da massa das amostras antes dos ensaios</li> <li>3.2.4.2 Execução dos ensaios</li> <li>3.2.4.3 Limpeza das amostras após os ensaios</li> <li>3.2.4.5 Medição de massa final</li> </ul>	29 29 31 31 33 33 34 34 37 37 37 38 42 42 42 42

3.3 RODA DE BORRACHA	43
3.3.1 Equipamento utilizado	43
3.3.2 Parâmetros de ensaios	44
3.3.3 Amostras	45
3.3.4 Procedimentos de ensaios	47
3.3.4.1 Medição da massa das amostras antes dos ensaios	47
3.3.4.2 Execução dos ensaios	47
3.3.4.3 Inspeção das amostras	55
3.3.4.4 Limpeza das amostras após os ensaios	55
3.3.4.5 Medição de massa final	55
3.3.4.6 Análise das superfícies desgastadas	55
4 RESULTADOS	56
4.1 MEDIÇÃO DE DUREZA NOS MATERIAIS	56
4.2 PINO-TAMBOR	57
4.2.1 Medição de temperatura	57
4.2.2 Análise da perda de massa	57
4.2.3 Correlação entre dureza e desgaste	59
4.2.4 Análise macroscópica da superfície das amostras	60
4.2.5 Análise microscópica da superfície das amostras	64
4.3 RODA DE BORRACHA	71
4.3.1 Análise da perda de massa	71
4.3.2 Correlação entre dureza e desgaste	74
4.3.3 Análise da macroscópica da superfície das amostras	75
4.3.4 Análise microscópica da superfície das amostras	82
4.4 COMPARAÇÃO DA MÉDIA DA PERDA DE MASSA ENTRE OS	3
ENSAIOS	
5 CONCLUSÕES	91
6 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	92
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93

#### 1 INTRODUÇÃO

O Brasil é o segundo maior produtor de Minério de Ferro, conforme o U.S. Geological Survey e a UNCTAD (Conferência das Nações Unidas para o Comércio e o Desenvolvimento). Sua produção em 2012 foi estimada em 380 milhões de toneladas, o que equivale a 16,5% do total mundial (2,3 bilhões de toneladas) nesse mesmo ano. As reservas medidas e indicadas de minério de ferro no Brasil alcançam 29 bilhões de toneladas, situando o país em segundo lugar em relação às reservas mundiais, de 180 bilhões de toneladas [1].

Em consequência dessa produção em larga escala e dos seus processos quase que ininterruptos, a indústria mineradora possui também custos gigantescos com a manutenção de suas máquinas e equipamentos industriais responsáveis pela extração e beneficiamento do minério de ferro, sendo uma grande parte dessa manutenção a troca de peças e componentes devido ao desgaste do material que faz parte direta ou indiretamente dos processos.

Um grande exemplo de componente que sofre desgaste em demasia são as tubulações de aço para o transporte de polpa de minério durante os processos tanto de extração quanto de beneficiamento. A tubulação de aço para esta aplicação apresenta uma vida útil reduzida devido à baixa resistência ao desgaste abrasivo que a polpa de minério transportada oferece aos tubos, ainda mais nas linhas onde a pressão e velocidade do transportado são mais elevadas.

Em vista da necessidade de um aumento da vida útil das tubulações de transporte de polpa de minério dentro da indústria, buscou-se a solução no uso de materiais mais resistentes ao desgaste abrasivo. Com essa motivação vieram os tubos com revestimento interno de materiais poliméricos, como o poliuretano. Os poliuretanos são materiais promissores nessa aplicação e são bastante utilizados porque têm preço moderado, propriedades mecânicas excelentes e alta resistência ao desgaste em comparação a sistemas poliméricos alternativos. Os tubos revestidos com poliuretano, além de possuir vida útil superior à tubulação de aço devido à resistência à abrasão do poliuretano, possuem menor peso devido à redução da espessura da parede de aço, que não precisa mais ter uma espessura avantajada por não sofrer o desgaste promovido pelo contato com a polpa em transporte Essa declínio significativo no peso dos tubos também representa uma redução nos riscos de acidentes na indústria pela maior facilidade em transportar e manusear os componentes da tubulação.

Além do revestimento interno de tubulações de aço, também há um crescimento da utilização dos poliuretanos na indústria de mineração em várias outras aplicações como em raspadores e limpadores de correias transportadoras, calhas e leitos em equipamentos de jigagem e peças diversas nas etapas de peneiramento, ciclonagem, filtragem e flotação.

Nesse trabalho procurou-se buscar informações relativas ao poliuretano que atua nos revestimentos internos das tubulações de polpa de minério, em laboratório, através de ensaios de desgaste por abrasão em amostras cedidas pelo setor mineral. Foram observadas em microscópio as características superficiais e estruturais do revestimento de poliuretano novo, usado e usado no flange de um tubo, antes e após os ensaios, a fim de obter maiores informações sobre esse material em serviço.

### 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1 POLÍMEROS

#### 2.1.1 Definição de polímeros

A palavra polímero origina-se do grego *poli* (muitos) e *mero* (unidade de repetição). Logo, um polímero é uma macromolécula de material orgânico de alta massa molecular composta por várias unidades de repetição (figura 1), 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 2). As cadeias podem ser compostas por duas ou mais unidades repetidas diferentes, formando um copolímero.

Figura 1: Representação esquemática de uma unidade repetida para um polietileno.



Unidade repetida



Figura 2: Monômero tetrafluoretileno sendo polimerizado e formando o politetrafluoretileno (PTFE, mais conhecido como TeflonTM).



Fonte: Callister Jr., 2008 (adaptado).

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 [2].

As forças moleculares que mantêm os elos dos polímeros lineares individuais são forças primárias ou fortes, ao passo que as que mantêm cadeias de polímeros juntas, quando elas se tocam ou se cruzam, são chamadas de secundárias ou ligações tipo van der Waals [3].

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 fraqueza é relativa baixa faixa de temperatura de uso deles.

#### 2.1.2 Classificação dos polímeros

Existem várias formas de classificar polímeros, algumas delas são [2]:

Quanto à forma molecular – existem três formas principais: linear, ramificada e reticulada (Figura 3a, 3b, 3c respectivamente). Os ramos laterais dificultam a aproximação das cadeias poliméricas e, portanto, diminuem as interações moleculares. Os polímeros reticulados têm cadeias mais complexas, com ligações cruzadas. O número de ligações cruzadas pode ser controlado de modo a obter polímeros levemente ou altamente reticulados. A formação de retículos, devido às ligações cruzadas entre as moléculas, "amarra" as cadeias, impedindo seu deslizamento umas sobre as outras, aumentando a resistência mecânica e tornando o polímero infusível.



Figura 3: Representação esquemática das cadeias macromoleculares.

Fonte: Callister Jr., 2008.

 Quanto às características de fusibilidade – são denominados termoplásticos, os polímeros que fundem por aquecimento e solidificam no resfriamento, em um processo reversível até certa temperatura. Os polímeros que não são capazes de tornarem-se fluidos porque as cadeias macromoleculares estão unidas entre si por ligações químicas (reticulação) são denominados termofixos.

- 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.
- Quanto ao grupo funcional os polímeros podem ser classificados em famílias, de acordo com o grupo funcional presente no mero (Figura 4a e 4b).



Figura 4: Grupo funcional: (a) amida (b) uretano.

#### Fonte: Limol, 2011.

#### 2.1.3 Fatores que influenciam em sua propriedade mecânica

As propriedades mecânicas dos polímeros (incluindo o módulo de elasticidade, E) são regidas por três conceitos [3]:

- Grau de cristalinidade é uma medida do grau de empacotamento das cadeias moleculares da matriz para produzir um arranjo atômico ordenado;
- Existência de ligações cruzadas ou seja, se o polímero for reticulado ou não;
- Enrijecimento das cadeias ocorre na junção das cadeias aos grupos pesados de átomos.

O grau de polimerização é também determinante nas propriedades mecânicas dos polímeros.

#### 2.1.4 Dureza nos polímeros

Segundo estudos de Ratner & Lancaster [4], a correlação da taxa de desgaste abrasivo com a dureza é bem pior para os polímeros do que para os metais (Figura 5) e temos duas razões para isso. Primeiramente, nos metais ela reflete com precisão a facilidade de escoamento plástico e está intimamente relacionada com a tensão de escoamento, enquanto que nos polímeros muito do material deslocado com a endentação é acomodado elasticamente e a dureza medida incorpora contribuições de recursos elásticos e plásticos. O segundo motivo para a fraca correlação é que mesmo em deslizamento de polímeros mais duros em superfícies rugosas, ocorre apreciável deformação elástica. Isso causa danos provocados por fadiga, que não são controlados por propriedades plásticas.





Fonte: Evans D. C. e Lancaster J. K. 1979.

Uma correlação muito melhor é encontrada entre taxa de desgaste abrasivo e valores de  $1/\sigma\epsilon$  onde  $\sigma$  é o limite de resistência à tração até a ruptura e  $\epsilon$  é a taxa

de alongamento do polímero até a ruptura, ambos medidos num ensaio de tração convencional.

Embora as condições nas quais essas propriedades são medidas diferem consideravelmente, especialmente em termos de taxa de deformação, daquelas em um contato deslizante, a validade dessa correlação, algumas vezes chamada de correlação de Ratner-Lancaster, é largamente reconhecida e é ilustrada na Figura 6.

Figura 6: Correlação de Ratner-Lancaster entre a taxa de desgaste dos polímeros sob condições predominantemente abrasivas e a relação do produto da tensão e deformação na ruptura a tração.



Fonte: Briscoe B. J. 1981.

#### 2.2 POLIURETANO

Os poliuretanos são compostos poliméricos sintéticos que possuem cadeias de unidades orgânicas unidas por ligações uretânicas. O PU é conhecido por suas excelentes propriedades mecânicas, tais como alta resiliência, resistência mecânica, resistência à abrasão e a óleos contaminantes [5].

Durante a reação de polimerização, há a formação de copolímeros compostos por blocos de segmento flexíveis (responsáveis pela flexibilidade e estiramento) e segmentos rígidos (contribuem no travamento e na ligação das cadeias poliméricas, fornecendo ao material rigidez e resistência mecânica) ligados em compostos de uretano. Logo sua forma elastomérica poderá ser: inelástico, elástico, rígido, semirígido, flexível, integrado, expandido, bi-composto, etc [5].

#### 2.2.1 Elastômeros de poliuretano

Os poliuretanos são uma das mais versáteis classes de materiais poliméricos, razão pela qual são largamente utilizados. Estes materiais compõem produtos desde espumas extremamente flexíveis, passando por tintas e vernizes, até materiais bastante rígidos.

A flexibilidade de escolha dos reagentes, permitindo a obtenção de materiais com diferentes propriedades físicas e químicas, faz com que os PU's ocupem posição importante no mercado mundial de polímeros sintéticos de alto desempenho.

Os elastômeros de poliuretano são resultantes de uma polimerização por poliadição entre isocianatos e compostos que apresentam hidroxilas. O grupo principal é o poliol, dos tipos: poliéter e poliéster [6].

A reação de poliadição de obtenção dos poliuretanos dá-se entre um poliisocianato (no mínimo bifuncional) e um poliol ou outros reagentes (contendo dois ou mais grupos de hidrogênio reativos), além de agentes de cura. Os compostos contendo hidroxilas podem variar quanto ao peso molecular, natureza química e funcionalidade. Os isocianatos podem ser aromáticos, alifáticos, cicloalifáticos ou policíclicos. Os polióis podem ser poliéteres, poliésteres, ou possuir estrutura hidrocarbônica. A natureza química, bem como a funcionalidade dos reagentes deve ser escolhida de acordo com as propriedades finais desejadas [7].

#### 2.2.2 Utilização na mineração

A princípio, a borracha começou a substituir o aço a fim de minimizar a grande abrasão provocada principalmente pela sílica presente nos minerais além, evidentemente, da dureza natural dos minérios. Fazia-se necessário algo flexível para amortecer, peneirar e transportar os produtos processados e fracionados [6]. A única borracha que realmente se adequou à resistência, ao impacto e à abrasão, foi a borracha natural. Entretanto, em sua forma normal, a borracha natural tem uma dureza Shore A de 40 a 45, considerada como um material de baixa dureza, com resistência ao impacto muito fraca e cujas propriedades físicas limitaram a sua aplicação, além de possuir baixa resistência a óleos e solventes [6].

Através de desenvolvimentos e ensaios comparativos, verificou-se que o elastômero de poliuretano, devido às suas propriedades físicas/químicas, superaram em até 20 vezes a borracha natural, devido à somatória de propriedades físicas que, em conjunto, reuniam o tipo de material adequado a infinitas aplicações, tais propriedades são: Resistência à abrasão, resistência ao impacto, resistência à tração, resistência ao rasgo, baixa deformação permanente, boa resistência à hidrólise, resistência à ação de  $O_2$  e  $O_3$ , flexibilidade em baixa temperatura, resistência à ação de solventes, baixo coeficiente de atrito, boa elasticidade térmica, capacidade de suportar cargas, resistência à quebra e continuidade de rasgo, grande faixa de dureza permitindo maior opção, alta resistência a óleo e graxas [6].

#### 2.2.3 Tubos revestidos

O poliuretano atua como um elemento protetor fundamental contra a ação abrasiva da polpa, principalmente nas curvas, reduções ou conexões, aumentando de forma significativa à durabilidade das tubulações, proporcionando grande redução nos custos de manutenção e eliminando paradas imprevistas (provocadas por vazamentos causados pela abrasão) [6].

As linhas de tubos maciços em poliuretano ou de tubulações de aço com parede fina apresentam além da resistência intensa à abrasão a alguns produtos químicos e solventes, um melhor manuseio (por seu baixo peso), permitindo uma estrutura aérea mais leve. A espessura do revestimento pode variar de 6 a 20 mm, dependendo do grau de abrasão [6].



Figura 7: Tubulação revestida com poliuretano.

Fonte: Autores, 2013.

#### 2.3 TRIBOLOGIA

Tribologia pode ser definida como a ciência e tecnologia de superfícies interagindo em movimento relativo. Na prática, os problemas tribológicos não podem ser separados do seu relativo tribo-sistema. Portanto, a análise do sistema é fundamental para resolver tais problemas [8].

#### 2.3.1 Desgaste Abrasivo

O termo desgaste pode ser definido com a "remoção do material de uma superfície pela ação mecânica de partículas duras em contato com esta superfície" [5].

O desgaste abrasivo é definido como o deslocamento de material causado por partículas ou protuberâncias de elevada dureza, que são forçadas contra e ao longo de uma superfície sólida [5].

Existem dois modos de ensaios desgaste abrasivo: 2 corpos e 3 corpos. No ensaio de desgaste a dois corpos as partículas abrasivas deslizam-se sobre a superfície, como mostrado na Figura 8a, nesse tipo de desgaste a interação entre as partículas abrasivas e a superfície pode ocasionar alguns mecanismos de desgaste, como: microcorte e microsulcamento, que são dominantes em materiais de elevada dureza. Já no ensaio de desgaste a três corpos as partículas rolam e/ou deslizam sobre a

interface corpo - contra corpo, ver Figura 8b, e a interação entre as partículas abrasivas e a superfície pode produzir mecanismos como: microsulcamento, microtrincas e identações, que são dominantes em materiais frágeis [5].

Figura 8: Representação esquemática: a) desgaste abrasivo por deslizamento de partícula e b) desgaste abrasivo por rolamento de partículas.



Fonte: Amaral, 2010.

A taxa de desgaste é normalmente menor nesse último caso. Eventualmente, um processo "por rolamento" pode se transformar num "por deslizamento", se a partícula dura penetrar e ficar engastada em uma das superfícies (usualmente a mais mole) [9].

Os mecanismos desenvolvidos durante o desgaste abrasivo dos polímeros são complexos apresentando diversos mecanismos: filme de transferência, fusão superficial e, num terceiro caso deformação viscoelástica na região de contato.

Como as propriedades dos plásticos são diversificadas, variando desde baixo a elevado módulo de elasticidade, baixa e elevada viscosidade, baixos e elevados pontos de fusão, as características de desgaste são correspondentemente multifacetadas [10].

Briscoe [11], distingue o desgaste de polímeros em duas modalidades: desgaste coesivo e desgaste interfacial. O desgaste coesivo incluiu a abrasão e a fadiga superficial, que são influenciadas pela resistência coesiva ou tenacidade dos polímeros. O desgaste interfacial inclui a adesão (ou desgaste por transferência) e

reação triboquímica, que estão restritos a regiões muito mais finas e adjacentes à superfície.

Assim, os polímeros desgastam-se por abrasão através de dois mecanismos bem distintos: a deformação plástica e o microcorte da superfície. Estes mecanismos ocorrem através de protuberâncias afiadas na superfície abrasiva (particularmente de polímeros rígidos) e a deformação elástica seguida pelo desgaste por fadiga, por asperidades arredondadas, particularmente em elastômeros [12]. No primeiro tipo (abrasivo) sulcos longitudinais no sentido do deslizamento são formados na superfície desgastada. No segundo tipo (deslizamento), formações na forma de escamas, perpendiculares à direção de deslizamento, são observadas. Estes últimos eventos foram descritos primeiramente por Schallamach [13].

A Figura 9 ilustra o modo de microsulcamento. O material é deformado plasticamente e escoado pelas bordas da partícula, não ocorrendo remoção de material.



Figura 9: Fenômeno físico do microsulcamento.

Fonte: Karl Heinz, Zum Gahr, 1987 (adaptado) [14].

A Figura 10 ilustra o modo de microcorte. O material é desviado através de uma zona de cisalhamento e escoa em forma de cavaco para cima, ao longo da partícula. Todo o material deslocado pela partícula é removido no cavaco. Figura 10: Fenômeno físico do microcorte.



Fonte: Karl Heinz, Zum Gahr, 1987 (adaptado) [14].

Uma combinação dos dois tipos de degradação da superfície, deslizamento e abrasivo, e sua interação determina o mecanismo de desgaste do material. A relação do atrito e o desgaste abrasivo dependem da elasticidade do polímero e da geometria das asperidades do agente abrasivo.

#### 2.3.1.1 Ondas de Schallamach

Schallamach [13] 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" (denominadas ondas de Schallamach) que se propagam do início para o final da área de contato, a velocidades superiores ao do movimento deslizante da partícula dura. Um desenho esquemático é apresentado na Figura 11.

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 resulta do gradiente das tensões tangenciais provocadas pela força de atrito entre partícula rígida e elastômero. A adesão na zona de contato foi considerada como a principal razão para a flambagem na superfície do elastômero.



Figura 11: Desenho esquemático da propagação de ondas de Schallamach.

#### 2.4 ABRASÔMETROS

Segundo Hutchings [16] os ensaios mais comuns de desgaste abrasivo realizados em laboratório são com pinos deslizando sobre superfícies com abrasivos fixos, ou um pino rolando sobre uma superfície abrasiva (Figura 12).

A utilização de uma determinada configuração visa à reprodução dos eventos de desgaste desejados e/ou a verificação da influência de parâmetros de ensaios.



Figura 12: Ilustração esquemática de quatro métodos utilizados na medida das taxas de desgaste abrasivo de materiais: (a) pino-disco (b) pino-plano (c) pino-tambor (d) roda de borracha.

Fonte: Hutchings, 1992.

#### 2.4.1 Pino-Tambor

A norma ISO 4649 [17] 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 material abrasivo, sendo usualmente uma folha de lixa (Figura 13). A pressão de contato e a velocidade são mantidas constantes e a resistência ao desgaste é dada pela perda volumétrica ao final do ensaio, medida indiretamente através da perda de massa do corpo cilíndrico. É necessário o uso de um material de referência (borracha padrão) antes e depois de uma bateria de ensaios a fim de medir a variação do grau abrasivo da lixa.



Figura 13: Representação esquemática do abrasômetro previsto na norma ISO 4649: (a) vista geral e (b) detalhes do sistema de aplicação de carga e posicionamento da lixa abrasiva [10].

Fonte: ISO 4649.

A norma ISO 4649 [17] é relacionada com várias normas (Figura 14) que servem de ferramentas complementares a fim de preparar, caracterizar e condicionar as amostras.





Fonte: Limol, 2011.

#### 2.4.2 Roda de Borracha

A primeira versão padronizada do abrasômetro roda de borracha foi publicada pela primeira vez pela norma ASTM G65 [18], e desde então passou por várias modificações (Figura 15). Alterações no equipamento e nos parâmetros de ensaio foram propostas por Hutchings e Stevenson [9]. A principal foi ocorrida no layout do equipamento, sendo que agora as amostras estarão dispostas na posição horizontal (Figura 16).

O ensaio de roda de borracha envolve a abrasão do corpo de prova com areia de tamanho e composição controlada. O abrasivo é introduzido entre a interface do corpo de prova e da roda giratória com uma borda de borracha de clorobutil de dureza específica, este corpo de prova é pressionado contra a roda giratória com uma força específica por um braço de carga enquanto que um fluxo controlado de areia atrita a superfície da amostra. A face de contato da roda gira na direção do fluxo de areia. O pivô axial do braço se apoia dentro de um plano o qual é aproximadamente tangente à superfície da roda de borracha, e normal ao longo do diâmetro horizontal no qual a carga é aplicada.

A duração do ensaio e a força aplicada pelo braço são variáveis conforme procedimento especificado. Os corpos de provas são pesados antes e depois dos ensaios e a perda de massa é registrada.



Figura 15: Diagrama esquemático do aparelho de ensaio.

Fonte: Hutchings & Stevenson, 1996.

•

Figura 16: Desenho esquemático do equipamento roda de borracha com o abrasivo areia seca.



Fonte: Hutchings & Stevenson, 1996 (modificado).

### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

Neste capítulo serão apresentados os materiais e a metodologia utilizados neste trabalho.

## 3.1 MATERIAIS POLIMÉRICOS UTILIZADOS

Foram ensaiados no laboratório três tipos de poliuretano da mesma fonte e natureza, fornecidos pela área de manutenção da Mina de Cauê (empresa VALE). As amostras são diferenciadas em revestimento novo, revestimento usado e revestimento usado específico do flange da tubulação.

A Tabela 1 contém a legenda das abreviaturas dos materiais utilizados nos ensaios.

Tabela 1: Legenda dos termos abreviados de identificação dos materiais utilizados.

REFERÊNCIA	DESCRIÇÃO
RN	Revestimento Novo
RU	Revestimento Usado
RUF	Revestimento Usado no Flange
BP	Borracha Padrão

Fonte: Autores, 2013.

• RN;

Figura 17: Material RN.



Fonte: Autores, 2013.

RU;

Figura 18: Material RU.



Fonte: Autores, 2013.

• RUF;

Figura 19: Material RUF.



Fonte: Autor, 2013.

- BP (Utilizada somente nos ensaios com o pino-tambor).
  - Material de referência CETEPO MR 3-AB-1-2010b (Placa 07).
  - Certificado número 846/11.
  - Validade: Agosto 2013.
  - Fabricante: Centro Tecnológico de Polímeros SENAI CETEPO.
  - Fabricação conforme [17].

Figura 20: Informações do material BP.



Fonte: Autores, 2013.

#### 3.2 PINO-TAMBOR

Primeiramente foram realizados os ensaios no equipamento pino-tambor, conforme é descrito a seguir.

#### 3.2.1 Equipamento utilizado

A Figura 21 apresenta o equipamento Pino-Tambor utilizado para realização dos ensaios. O mesmo pertence e está localizado no Laboratório de Tribologia e Corrosão dos Materiais (TRICORRMAT) da Universidade Federal do Espírito Santo.



Figura 21: Equipamento Pino-Tambor.

Fonte: Autores, 2013.

#### 3.2.2 Parâmetros de ensaios

Todos os ensaios foram realizados conforme a norma [17] (sem rotação da amostra, utilizando o método A). As características do ensaio abrasivo são citadas Tabela 3.

Parâmetros	Norma
Carga aplicada (N)	10
Diâmetro do tambor (mm)	127
Distância de deslizamento (m)	39,9
Número de rotações por ensaio	100
Partícula abrasiva da lixa de Al2O3 (µm)	265
Comprimento efetivo do tambor (mm)	402
Rotação do tambor (rpm)	40
Velocidade tangencial (m/s)	0,266

Tabela 2: Parâmetros dos ensaios Pino-Tambor.

Fonte: Autores, 2013.

#### 3.2.3 Amostras

Foram usadas nos ensaios cinco amostras de cada material, sendo duas descartadas posteriormente, como esquematizado na Tabela 4. As amostras são cilíndricas e devem possuir diâmetro de  $16 \pm 0,2$  mm e espessura mínima de 6 mm.
Amostras	RN	RU	RUF
Ensaiadas	5	5	5
Descartadas	2	2	2

Tabela 3: Amostras utilizadas.

Fonte: Autores, 2013.

Os materiais foram cortados de acordo com a norma [17]. A velocidade de corte utilizada foi de 350 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 em pedra neutro dissolvido. Após o corte, cada amostra foi numerada e relacionada com a dureza superficial do quadrado a qual foi retirada. Quanto ao dimensional, todas as amostras atenderam as exigências da 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.

 Ferramentas de corte de aço ABNT 4340, fabricadas pela SEISA Metal mecânica LTDA. Foi aberto um rasgo na lateral da ferramenta, para facilitar a extração da amostra cortada (Figura 22).

Figura 22: Ferramenta de corte das amostras do Pino-Tambor.



Fonte: Autores, 2013.

2- Furadeira de coluna da marca Kone (Figura 23), modelo KM 32, disponibilizada pelo LabTecMec (Laboratório de Tecnologia Mecânica).



Figura 23: Máquina de corte das amostras do Pino-Tambor.

Fonte: Autores, 2013.

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. Mesmo com o material apoiado, foi necessário aplicar uma pressão manual sobre o material na região de corte a fim de evitar a movimentação da placa e da amostra no momento do corte.



Figura 24: Amostras cortadas para o ensaio Pino-tambor.

Fonte: Autores, 2013.

As amostras (Figura 24) foram devidamente lavadas com água e sabão neutro após o procedimento de corte.

### 3.2.4 Procedimentos de ensaios

3.2.4.1 Medição da massa das amostras antes dos ensaios

Antes da realização dos ensaios, cada amostra foi medida em uma balança, da marca Sartorius, modelo CP225D, com precisão de 0,001 g, presente no laboratório TRICORRMAT – UFES. Foram realizadas três medições para cada amostra e calculada uma média.



Figura 25: Balança com uma precisão de 1mg no Lab. TRICORRMAT.

Fonte: Autores, 2013.

### 3.2.4.2 Execução dos ensaios

Os ensaios foram realizados de forma aleatória com as amostras, a fim de não viciar a lixa com um tipo de material.

As amostras foram colocadas no cabeçote da máquina (Figura 26), dentro do orifício indicado pela (Figura 27), e foram deslocadas até o fundo do orifício de tal forma que a superfície da amostra estivesse tangente à borda do orifício.



Figura 26: Cabeçote da máquina.

#### Fonte: Autores, 2013.



Figura 27: Orifício aonde a amostra é colocada.

Fonte: Autores, 2013.

Girando o tambor representado pela (Figura 29), o fuso existente no interior do cabeçote se movimenta e consequentemente movendo a amostra. Realizando duas voltas completas, a amostra é deslocada em 2 mm, em relação à borda do orifício. O ensaio já pode ser executado.

Ao ligar a máquina, um motor elétrico acoplado a uma polia gera um torque em um parafuso sem fim (Figura 28). Este parafuso provoca a movimentação de duas engrenagens. A engrenagem número 1 é responsável pela movimentação de outro parafuso sem fim, que faz a translação do cabeçote, cuja trajetória é delimitada por um eixo (Figura 29). Já a engrenagem número 2 é responsável pelo movimento rotacional do tambor. O movimento do cabeçote e do tambor pode ser observado na (Figura 29).



Figura 28: Mecanismo da máquina de abrasão.

Fonte: Autores, 2013.

Figura 29: Parafuso sem fim e guia do cabeçote.



Fonte: Autores, 2013.

Durante o ensaio, qualquer peculiaridade apresentada é registrada. Algumas amostras do elastômero padrão apresentaram trepidação ao iniciar o contato com o abrasivo. Um ensaio com RN foi fotografado (Figura 30).

Figura 30: Ensaio de uma amostra de RN.



Fonte: Autores, 2013.

Após a execução do ensaio, a amostra foi retirada sem danificar a superfície ensaiada. Um pino acima do tambor regula um êmbolo na parte interna do cabeçote (Figura 31). Ao ser pressionado, a amostra é impulsionada pelo êmbolo e ejetada do cabeçote.



Figura 31: Êmbolo responsável pela ejeção da amostra.

Fonte: Autores, 2013.

Três amostras de borracha padrão são preparadas para ensaio. Os ensaios das amostras de poliuretano só podem ser realizados se a perda média de massa das amostras de borracha padrão estiver entre 180 e 220 mg. Se a perda de massa estiver acima do permitido pela norma, então é feito o cegamento da lixa com uma amostra cilíndrica de aço ABNT 1020. Em caso contrário, se a perda de massa

estiver abaixo do permitido pela norma, a lixa é trocada. Uma vez que a perda de massa da borracha padrão estiver de acordo com a norma, os ensaios podem ser iniciados:

Cinco amostras de cada material são ensaiadas de forma aleatória (total de 15 amostras), sendo que no décimo ensaio é verificada a abrasividade da lixa, ensaiando as 3 amostras de borracha padrão, como no procedimento inicial.

3.2.4.3 Limpeza das amostras após os ensaios

Imediatamente antes da medição de massa, após o ensaio, a amostra deve ser limpa com escova de cerdas macias na presença de um jato de ar. Toda a sujeira ou materiais estranhos devem ser removidos da superfície da amostra.

3.2.4.4 Limpeza da lixa durante os ensaios

Durante os ensaios no TRICORRMAT – UFES (Polimate) foi realizado a limpeza da lixa após cada material ensaiado a fim de evitar a impregnação de debris na lixa. Na hipótese da não realização de limpeza da lixa, poderia ocorrer que a amostra ao ser ensaiada 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.

3.2.4.5 Medição de massa final

A medição da massa final foi feita seguindo o mesmo procedimento adotado pelo item 3.2.4.1.

3.2.4.6 Análise das superfícies desgastadas

As superfícies desgastadas das amostras foram analisadas por Microscopia eletrônica de varredura, (MEV – fabricante: Zeiss; modelo: EVO 40 XVP) do LCSM da UFES e na lupa estereoscópica (Fabricante: Zeiss; modelo: Discovery V12).

## 3.3 RODA DE BORRACHA

Posteriormente aos ensaios Pino-Tambor, foram realizados os ensaios no Roda de Borracha, onde seguimos parâmetros (carga normal, rotação da roda e vazão de material abrasivo) conforme a norma ASTM G65 [18] e parâmetros modificados baseados em dissertações e artigos publicadas para o mesmo tipo de ensaio em poliuretanos.

# 3.3.1 Equipamento utilizado

O equipamento Roda de Borracha modificado do Laboratório de Tribologia e Corrosão dos Materiais (TRICORRMAT) da Universidade Federal do Espírito Santo pode ser visto por meio da Figura 32.



Figura 32: Componentes da roda de borracha.

Fonte: Autores, 2013.

# 3.3.2 Parâmetros de ensaios

A primeira parte dos ensaios foi realizada conforme o procedimento E da norma [18]. E, posteriormente, numa segunda sequência de ensaios, foi feito conforme parâmetros modificados, baseados em artigos e disssertações acadêmicas publicadas [5;19;20]. As características dos ensaios abrasivos são citadas na Tabela 6.

Parâmetros	Norma	Modificados
Carga aplicada (N)	129,65	65,65
Diâmetro da roda (mm)	228	228
Distância de deslizamento (m)	702	702
Tempo de teste (s)	300	595
Partícula abrasiva da areia (µm)	150 <x<300< td=""><td>150<x<300< td=""></x<300<></td></x<300<>	150 <x<300< td=""></x<300<>
Fluxo abrasivo (g/min)	381	277
Rotação da roda (rpm)	196	99
Velocidade tangencial (m/s)	2,34	1,18

Tabela 4: Parâmetros dos ensaios no equipamento Roda de Borracha.

Fonte: Autores, 2013.

### 3.3.3 Amostras

Foram usadas nos ensaios quatro amostras de cada material, sendo uma descartada posteriormente, tanto para parâmetros da norma quanto para os parâmetros do artigo, como esquematizado na Tabela 7. De acordo com a norma as amostras devem ser retangulares e ter, tipicamente, dimensões de 2,5 cm de largura por 7,6 cm de comprimento, além de uma espessura entre 0,32 e 1,27 cm. As amostras utilizadas tinham dimensões de 2,5 cm de largura por 5,5 cm de comprimento devido à limitação da seção de tubulação recebida. As espessuras estavam em torno de 0,7 cm.

Tabela 5: Numero de amostras ensaladas	Tabela	5: Número	o de amos	tras ensa	iadas.
--	--------	-----------	-----------	-----------	--------

Amostras	RN	RU	RUF
Norma	4	4	4
Artigo	4	4	4
Descarte	2	2	2

Fonte: Autores, 2013.

A irregularidade na geometria das amostras, mostradas na figura 34, é consequência da imprecisão da máquina de corte (figura 33) onde foram feitas, que foi uma serrafita operada manualmente por um funcionário da UFES na carpintaria da universidade, e também devido ao formato cilíndrico do material, que é um revestimento interno de tubulação de aço. As amostras foram limpas, após o corte, da mesma forma como foi feito nos ensaios com o pino-tambor, limpas com água corrente e sabão neutro e devidamente secadas ao ar por mais de 24 horas.



Figura 33: Máquina de corte das amostras do Roda de Borracha.

Fonte: Autores, 2013.

Figura 34: Amostras utilizadas para ensaio.



Fonte: Autores, 2013.

### 3.3.4 Procedimentos de ensaios

3.3.4.1 Medição da massa das amostras antes dos ensaios

Esta etapa é feita como já descrito no item 3.2.4.1.

3.3.4.2 Execução dos ensaios

No recinto onde se localiza o equipamento, a temperatura e umidade relativa do ambiente foram controladas com dois aparelhos de ar condicionado que eram regulados a fim de manterem as mesmas constantes. Ambas foram medidas por um termohigrômetro digital, cujo mesmo foi usado nos ensaios Pino-Tambor. Registros das temperaturas foram feitos imediatamente antes de começar o ensaio de cada amostra.

Antes de começar os ensaios devem-se tomar alguns cuidados em relação à roda de borracha (Figura 35) a ser usada. De acordo com a norma [18], o disco de aço deve ser revestido de borracha e essa borracha deve estar concêntrica em relação ao furo central do disco, a tolerância aceitável para essa concentricidade é de 0,05 mm medido no diâmetro da roda. A intenção de se produzir uma superfície uniforme é garantir que a roda gire tangenciando o corpo-de-prova sem causar vibrações no braço de alavanca. A superfície desgastada deve ser retangular em sua forma e com uma profundidade uniforme em qualquer parte de sua largura. A roda de borracha pode ser usada até um diâmetro de 215,9 mm.

Nesse trabalho foi usada uma roda de borracha nova, a qual estava com a superfície da borracha ainda ranhurada, em consequência de sua fabricação. Foi feito um procedimento de desgaste da superfície com a utilização de uma amostra de aço que foi ensaiada durante um tempo de trinta minutos, porém não foi adquirida uma uniformidade total da superfície da roda. Quanto às outras exigências da norma, a roda se enquadrava sem desvios.

Figura 35: Roda de borracha.



Fonte: Autores, 2013.

Inspecionada a roda de borracha, é colocada a amostra no porta-amostra (Figura 36 e 37), de tal forma que o mesmo fique alinhado com a roda de borracha e com a garantia de que o contato ocorra totalmente dentro dos limites da amostra.

Figura 36: Porta-amostra.



Fonte: Autores, 2013.



Figura 37: Porta amostra visto por baixo.

Fonte: Autores, 2013.

Após a fixação da amostra é adicionado anilhas com pesos específicos (Figura 38) ao braço de alavanca para que a carga normal de compressão desejada seja desenvolvida sobre a amostra. O braço articulado também tem um peso determinado e este deve incluir nos cálculo do peso total. A Tabela 8 lista todas essas anilhas e suas respectivas cargas normais correspondentes.

Número da Anilha	Massa(Kg)	Peso(N)
1	4,737	47,37
2	2,024	20,24
3	1,962	19,62
4	1,499	14,99
5	1,157	11,57
6	0,919	9,19
7	0,775	7,75
8	0,607	6,07
9	0,471	4,71
10	0,305	3,05
Braço Articulado	4,4	44

Tabela 6: Massa e peso das anilhas.

Fonte: Autores, 2013.



Figura 38: Algumas anilhas.

Fonte: Autores, 2013.



Figura 39: Suporte para as anilhas no braço articulado.

Fonte: Autores, 2013.

Para atingir a carga desejada nos ensaios, usamos as anilhas 1, 2, 4 e 10 para parâmetros da norma e as anilhas 3 e 10 para os parâmetros modificados.

Para manter o braço de alavanca longe da roda antes do inicio dos ensaios foi usada uma solução apresentada na Figura 40.



Figura 40: Dispositivo para manter a roda afastada da amostra.

Fonte: Autores, 2013.

Com todos os procedimentos acima concluídos podem-se iniciar os ensaios. Primeiramente deve-se carregar o silo (Figura 41) com material abrasivo. Em todos os ensaios foram utilizados como abrasivo a Areia Normal Brasileira do IPT (Instituto de Pesquisa Tecnológica), NBR-7214 de fração média fina. A granulometria usada foi de tamanho médio entre 0,15-0,30mm e a densidade da areia é de aproximadamente 2,6g/cm<sup>2</sup>.



Figura 41: Silo de abrasivo.

Fonte: Autores, 2013.

Posteriormente o motor (Figura 42) deve ser ligado e a rotação da roda ajustada. O motor é conectado a um inversor de frequência (Figura 43) que é utilizado para controlar a velocidade de rotação da roda. O motor é de corrente contínua e possui potência de 0,7 kW (1 HP) que deve ser acoplado a uma caixa de redução com a relação de transmissão de 10/1 para garantir que todo o torque do motor seja passado ao eixo da roda durante o ensaio.



Figura 42: Conjunto motor e caixa de redução.

Fonte: Autores, 2013.



Figura 43: Inversor de frequência.

Fonte: Autores, 2013.

Com a roda de borracha já em rotação, é acionado um motor que gira um cilindro (tambor) ranhurado que controla a vazão de abrasivo que cai numa calha, na qual é direcionado o fluxo à roda de borracha (Figura 44).



Figura 44: Sistema de alimentação de abrasivo.

Fonte: Autores, 2013.

Espera-se o fluxo de abrasivo entrar em contato com a roda e estabilizar, para garantir que a amostra não entre em contato com a mesma diretamente. Após isso, o braço articulado deve ser cuidadosamente abaixado sobre a roda em movimento. Quando o contato é estabelecido, é dado partida em um cronômetro para controlar o tempo do ensaio.

Quando o tempo atingir o valor pré-estabelecido, o braço de alavanca deve ser afastado da roda e tanto a rotação da roda quanto o fluxo abrasivo na calha devem ser interrompidos. O fluxo de areia total deve ser medido depois dos ensaios, como forma de verificar se o fluxo manteve-se como estabelecido previamente. Por fim a amostra é retirada do porta-amostra.

3.3.4.3 Inspeção das amostras

Deve-se observar a uniformidade das marcas de desgaste de cada amostra. As marcas devem se apresentar de tal forma que os riscos formem uma região retangular. Marcas não uniformes indicam alinhamento deficiente da roda em relação à superfície da amostra ou o desgaste desigual da superfície da borracha.

3.3.4.4 Limpeza das amostras após os ensaios

A limpeza das amostras após os ensaios foi feita seguindo o mesmo procedimento do item 3.2.4.3.

3.3.4.5 Medição de massa final

A medição da massa final foi feita seguindo o mesmo procedimento do item 3.3.4.1.

3.3.4.6 Análise das superfícies desgastadas

A análise da superfície desgastada foi feita seguindo o mesmo procedimento adotado pelo item 3.2.4.6.

# 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

# 4.1 MEDIÇÃO DE DUREZA NOS MATERIAIS

A dureza Shore A (dureza por indentação de material polimérico) foi calculada por alguns materiais utilizando um durômetro portátil (Figura 45) segundo a norma ISO 7619-1 [21].



Figura 45: Durômetro portátil de dureza Shore A.

Fonte: Autores, 2013.

Foram realizadas cinco medições em cada material em diferentes pontos do mesmo a fim de conseguir uma média. A Tabela 2 mostra os resultados encontrados.

Material	RN	RU	RUF
1ª	85,5	83,9	86,5
2ª	86,1	82,6	84,8
3ª	86,3	82,4	84,3
<b>4</b> ª	85,5	82,4	84,3
5ª	86,3	83,5	83,4
Média	85,94	82,96	84,66

Tabela 7: Dureza Shore A dos materiai
---------------------------------------

Fonte: Autores, 2013.

### 4.2 PINO-TAMBOR

Neste item serão apresentados os resultados obtidos após a realização dos ensaios de abrasão para os três materiais (segundo o protocolo que atende as especificações da norma ISO 4649) e a análise das superfícies de desgaste.

### 4.2.1 Medição de temperatura

Primeiramente, antes do primeiro ensaio, foi registada a temperatura e umidade relativa do ambiente e assim sucessivamente a cada amostra ensaiada. Com os registros destes dados, foi feito uma média para cada parâmetro e comparado com os limites exigidos em norma relacionada, ISO 23529 [22]. De acordo com esta, a temperatura e umidade do ambiente devem estar condizentes com as seguintes condições:

Tabela 8: Temperatura e umidade relativa preferencial.

Clima	Temperatura (°C)	Umidade Relativa (%)
Temperado	23±2	50±10
Tropical e subtropical	27±2	65±10

Fonte: Autores, 2013.

Os dados registrados tiveram como média uma temperatura de 24,9±1°C e umidade relativa de 57±5%, sendo aceitáveis para o clima tropical.

### 4.2.2 Análise da perda de massa

São mostrados na Figura 46 os resultados de uma série de ensaios com ordem aleatória de amostras, no qual é apresentada a perda de massa individual de cada amostra, inclusive para as borrachas padrão que foram usadas, de acordo com a norma, para testar a abrasividade da lixa como já explicado no item 3.2.4.2. A ordem vista na Figura 46 é apenas para facilitar a visualização no gráfico, não sendo a ordem real dos ensaios.



Figura 46: Perda de massa individual para cada amostra de material ensaiada em conjunto com a perda de massa das borrachas padrões ensaiadas – Pino-Tambor.

O gráfico de análise a perda de massa média de cada amostra de poliuretano (Figura 47) a fim de comparar o comportamento em desgaste abrasivo do material novo, usado e usado no flange da tubulação.

Fonte: Autores, 2013.



Figura 47: Média da perda de massa para os materiais ensaiados – Pino-Tambor.

Fonte: Autores, 2013.

Os gráficos de perda de massa das amostras não nos apresenta um resultado conclusivo quanto ao ranqueamento dos materiais em relação à resistência ao desgaste abrasivo. Na Figura 47 os desvios padrão se conflitam, o que nos permite fazer essa ressalva.

### 4.2.3 Correlação entre dureza e desgaste

Analisando a média da perda de massa em função da dureza Shore A dos materiais ensaiados é representada na figura 48, na qual observa-se uma tendência à queda no desgaste com o aumento da dureza.



Figura 48: Correlação da média da perda de massa com a dureza Shore A dos materiais ensaiados.

Fonte: Autores, 2013.

Quanto à relação da dureza com o desgaste abrasivo dos polímeros mostrados na Figura 48, apesar de aparecer uma tendência da queda do desgaste com o aumento da dureza, não é possível dizer algo concreto. A correlação da dureza com o desgaste abrasivo dos polímeros, segundo a correlação de Ratner & Lancaster [4], é muito pobre e de pouca credibilidade.

### 4.2.4 Análise macroscópica da superfície das amostras

Foram feitas imagens ampliadas 5,7 e 17,0 vezes das superfícies das amostras ensaiadas a fim de buscar identificar os mecanismos de desgaste atuantes. As imagens foram feitas em uma lupa estereoscópica.

• Revestimento Novo (RN).

Figura 49: Superfície de RN aumentada em 5,7 vezes - Pino-Tambor.



Fonte: Autores, 2013.



Figura 50: Superfície de RN aumentada em 17,0 vezes - Pino-Tambor.

Fonte: Autores, 2013.

• Revestimento Usado (RU).

Figura 51: Superfície de RU aumentada em 5,7 vezes - Pino-Tambor.



Fonte: Autores, 2013.



Figura 52: Superfície de RU aumentada em 17,0 vezes - Pino-Tambor.

Fonte: Autores, 2013.

• Revestimento Usado Flange (RUF).

Figura 53: Superfície de RUF aumentada em 5,7 vezes – Pino-Tambor.



Fonte: Autores, 2013.



Figura 54: Superfície de RUF aumentada em 17,0 vezes – Pino-Tambor.

Fonte: Autores, 2013.

Na análise macroscópica é notória a similaridade das superfícies. Em todos os três materiais pode-se observar em toda a superfície das amostras a presença de vários riscos provenientes do desgaste abrasivo. Pela lupa estereoscópica não podemos ver com clareza o que as imagens com o MEV nos mostra. A análise microscópica nos permite enxergar melhor os mecanismos de desgaste envolvidos no desgaste do polímero.

# 4.2.5 Análise microscópica da superfície das amostras

Foram analisadas também, por meio de um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), as superfícies das amostras a nível microscópico, antes e depois dos ensaios, para podermos identificar os micromecanismos de desgaste atuantes.

- Revestimento Novo (RN).
  - → Material antes de ser ensaiado.

Figura 55: Análise microscópica da superfície do RN antes do ensaio.



Fonte: Autores, 2013.

# → Material depois do ensaio.

Figura 56: Análise microscópica da superfície do RN depois do ensaio, aumentada 200X.



Fonte: Autores, 2013.



Figura 57: Análise microscópica da superfície do RN depois do ensaio, aumentada 500X.

Fonte: Autores, 2013.

• Revestimento Usado (RU).

→ Material antes de ser ensaiado.

Figura 58: Análise microscópica da superfície do RU antes do ensaio, aumentada 250X.



Fonte: Autores, 2013.

Figura 59: Análise microscópica da superfície do RU antes do ensaio, aumentada 1000X.



Fonte: Autores, 2013.



Figura 60: Análise microscópica da superfície do RU antes do ensaio, aumentada 1000X – Sinal BSD.

Fonte: Autores, 2013.

➔ Material depois do ensaio.

Figura 61: Análise microscópica da superfície do RU depois do ensaio, aumentada 200X.



Fonte: Autores, 2013.



Figura 62: Análise microscópica da superfície do RU depois do ensaio, aumentada 1000X.

Fonte: Autores, 2013.

- Revestimento Usado Flange (RUF).
  - → Material depois do ensaio.



Figura 63: Análise microscópica da superfície do RUF depois do ensaio, aumentada 200X.

Fonte: Autores, 2013.



Figura 64: Análise microscópica da superfície do RUF depois do ensaio, aumentada 500X.

Fonte: Autores, 2013.

Na imagem do RN antes dos ensaios (Figura 55) podemos ver a uniformidade da superfície que está livre de marcas de desgaste ou deformação plástica. Já nas imagens do material ensaiado (Figura 56), percebe-se a presença de ondas de Schallamach com certa clareza, o que é característica de materiais elastoméricos, além de riscos e alguns sulcos de baixa proporção na direção o movimento, que é perpendicular às ondas de Schallamach. Com a ampliação da imagem (Figura 57), pode-se ver que há uma tendência à formação de protuberâncias criadas pelo riscamento, mas que continuam aderidas à superfície do material.

Para o material RU antes dos ensaios vemos mecanismos típicos do desgaste abrasivo em materiais com grande elasticidade, onde predomina o processo de formação de proas, um fenômeno intermediário entre o microcorte e o sulcamento. E na imagem mais ampliada (Figura 59) podemos ver um sulco bem definido. Esses mecanismos devem ser provenientes do desgaste em serviço do material, que é comprovada com a mudança no sinal do equipamento para BSD (backscatter detector; Figura 60) e na análise de composição química feita da amostra, que é descrita na Figura 65, mostrando o teor de ferro, o que indica a presença de minério de ferro incrustado no revestimento.

Figura 65: Análise de composição química das partícu	Ilas incrustadas na amostra de RU, antes dos
--	--

Elt.	Line	Conc	Units	
Na	Ka	0,318	wt.%	
Mg	Ka	2,000	wt.%	
A1	Ka	3,389	wt.%	
Si	Ka	6,431	wt.%	
Ρ	Ka	3,661	wt.%	
C1	Ka	0,853	wt.%	
Ca	Ka	0,596	wt.%	
Mn	Ka	0,034	wt.%	
Fe	Ka	82,718	wt.%	
		100,000	wt.%	Total
kV		20.	.0	
Take	off An	igle 35.	0°	
Elap	sed Liv	vetime 50,	.0	

ensaios.

Fonte: Autores, 2013.
Após o ensaio das amostras de RU (Figura 61 e 62) também nota-se a presença de ondas de Schallamach, porém com menos definição que às da amostra de RN, além de riscos e sulcos de maiores proporções em relação ao RN, sugerindo maior severidade no mecanismo de desgaste.

Quanto às amostras ensaiadas de RUF (Figura 63 e 64) nota-se a grande similaridade com o que se vê para as amostras de RU.

# 4.3 RODA DE BORRACHA

Como já dito anteriormente, foram realizadas duas séries de ensaios no abrasômetro Roda de Borracha. Um baseava-se em seguir a norma [18] e o outro em procedimentos de parâmetros modificados. Fizemos uma análise na perda de massa de cada amostra de poliuretano a fim de comparar o comportamento em desgaste abrasivo do material novo, usado e usado no flange da tubulação. Os resultados são descritos nos tópicos a seguir.

#### 4.3.1 Análise da perda de massa

• Parâmetros da norma.



Figura 66: Perda de massa individual utilizando parâmetros de ensaio segundo a norma – Roda de Borracha (norma).



Figura 67: Média da perda de massa utilizando parâmetros de ensaio segundo a norma – Roda de Borracha (norma).

Fazendo uma análise dos gráficos das figuras 66 e 67, foi visto que nos ensaios usando os parâmetros da norma há uma tendência ao aumento do desgaste à medida que a localização do material se aproxima do flange da tubulação. No caso, as amostras de RUF tiveram uma média de perda de massa muito superior aos outros materiais, sendo que o desvio padrão está completamente fora de conflito com os limites das outras amostras. Já numa comparação entre a média de perda de massa das amostras de RN e RU, não podemos concluir nada de maneira concreta, pois a perda de massa se torna muito similar.

Fonte: Autores, 2013.

• Parâmetros modificados.



Figura 68: Perda de massa individual utilizando parâmetros de ensaio modificados – Roda de Borracha (modificados).

Fonte: Autores, 2013.

Figura 69: Média da perda de massa utilizando parâmetros de ensaio modificados – Roda de Borracha (modificados).



Fonte: Autores, 2013.

Nos ensaios com parâmetros modificados observa-se similaridade no desgaste dos três materiais, que é muito menor em massa do que quando se usa os parâmetros

da norma. Isso pode ser resultado de uma menor magnitude de parâmetros como a carga normal, a velocidade de rotação da roda e o fluxo de partículas abrasivas.

#### 4.3.2 Correlação entre dureza e desgaste

Analisando a média da perda de massa em função a dureza Shore A dos materiais ensaiados (Figura 70), observamos que não aparece uma correlação óbvia ou conclusiva entre o desgaste e a dureza dos materiais ensaiados sob os parâmetros da norma, mas aparece, nos materiais ensaiados sob os parâmetros modificados, uma tendência à queda no desgaste com o aumento da dureza.



Figura 70: Correlação entre a média da perda de massa dos parâmetros da norma com a dureza Shore A dos materiais ensaiados – Roda de Borracha.

Fonte: Autores, 2013.



Figura 71: Correlação entre a média da perda de massa dos parâmetros modificados com a dureza Shore A dos materiais ensaiados – Roda de Borracha.

Fonte: Autores, 2013.

Na Figura 70 e 71 vemos que a correlação da dureza com o desgaste abrasivo em ambos os procedimentos (norma e parâmetros modificados) não possuem nenhuma relação particular e nítida, assim como nos resultados do Pino-Tambor.

## 4.3.3 Análise macroscópica da superfície das amostras

Para as imagens das amostras dos ensaios de Roda de Borracha utilizamos o aumento de 5,0 e 17,0 vezes, com a mesma luta estereoscópica usada para fazer as imagens das amostras dos ensaios de Pino-Tambor.

• Revestimento Novo (RN) – Parâmetros da norma.

Figura 72: Superfície de RN aumentada em 5,0 vezes - Roda de Borracha (norma).



Fonte: Autores, 2013.



Figura 73: Superfície de RN aumentada em 17,0 vezes - Roda de Borracha (norma).

Fonte: Autores, 2013.

• Revestimento Novo (RN) – Parâmetros modificados.

Figura 74: Superfície de RN aumentada em 5,0 vezes - Roda de Borracha (modificados).



Fonte: Autores, 2013.



Figura 75: Superfície de RN aumentada em 17,0 vezes - Roda de Borracha (modificados).

Fonte: Autor, 2013.

• Revestimento Usado (RU) – Parâmetros da norma.

Figura 76: Superfície de RU aumentada em 5,0 vezes - Roda de Borracha (norma).



Fonte: Autores, 2013.



Figura 77: Superfície de RU aumentada em 17,0 vezes - Roda de Borracha (norma).

Fonte: Autores, 2013.

• Revestimento Usado (RU) - Parâmetros modificados.

Figura 78: Superfície de RU aumentada em 5,0 vezes - Roda de Borracha (modificados).



Fonte: Autores, 2013.



Figura 79: Superfície de RU aumentada em 17,0 vezes - Roda de Borracha (modificados).

Fonte: Autores, 2013.

Revestimento Usado Flange (RUF) – Parâmetros da norma.
Figura 80: Superfície de RUF aumentada em 5,0 vezes – Roda de Borracha (norma).



Fonte: Autores, 2013.



Figura 81: Superfície de RUF aumentada em 17,0 vezes – Roda de Borracha (norma).

Fonte: Autores, 2013.

• Revestimento Usado Flange (RUF) – Parâmetros modificados.

Figura 82: Superfície de RUF aumentada em 5,0 vezes - Roda de Borracha (modificados).



Fonte: Autores, 2013.



Figura 83: Superfície de RUF aumentada em 17,0 vezes - Roda de Borracha (modificados).

Fonte: Autores, 2013.

Na análise macroscópica de todas as amostras observa-se que nas laterais da marca retangular de desgaste tem um desgaste mais profundo devido à curvatura

das amostras que são provenientes de um tubo, além das marcas das ranhuras da roda de borracha, como citado no item 3.3.4.2. Percebe-se que também em todas as amostras, mesmo com uma baixa ampliação, já aparecem as ondas de Schallamach. Outro ponto é a questão da profundidade em geral do desgaste nos materiais, sendo que para as amostras ensaiadas sob os parâmetros da norma estão mais profundamente desgastadas que as outras.

## 4.3.4 Análise microscópica da superfície das amostras

Assim como feito nas amostras dos ensaios com o Pino-Tambor, fizemos uma análise detalhada da superfície das amostras ensaiadas no Roda de Borracha. As imagens são da parte central da marca da roda na amostra. Imagens de material não ensaiado são exibidas nos resultados do Pino-Tambor nas Figuras 55 e 58 e, como é o mesmo material, também servem para uma comparação com as figuras a seguir.

Revestimento Novo (RN) – Parâmetros da norma.

Figura 84: Análise microscópica da superfície do RN, aumentada 250X (norma).



Fonte: Autores, 2013.



Figura 85: Análise microscópica da superfície do RN, aumentada 500X (norma; BSD).

Fonte: Autores, 2013.

• Revestimento Novo (RN) – Parâmetros modificados.

Figura 86: Análise microscópica da superfície do RN, aumentada 250X (modificados).



Fonte: Autores, 2013.



Figura 87: Análise microscópica da superfície do RN, aumentada 500X (modificados; BSD).

Fonte: Autores, 2013.

• Revestimento Usado (RU) – Parâmetros da norma.

Figura 88: Análise microscópica da superfície do RU, aumentada 250X (norma).



Fonte: Autores, 2013.



Figura 89: Análise microscópica da superfície do RU, aumentada 500X (norma).

Fonte: Autores, 2013.

• Revestimento Usado (RU) – Parâmetros modificados.

Figura 90: Análise microscópica da superfície do RU, aumentada 250X (modificados).



Fonte: Autores, 2013.



Figura 91: Análise microscópica da superfície do RU, aumentada 500X (modificados).

Fonte: Autores, 2013.

• Revestimento Usado Flange (RUF) – Parâmetros da norma.

Figura 92: Análise microscópica da superfície do RUF, aumentada 250X (norma).



Fonte: Autores, 2013.



Figura 93: Análise microscópica da superfície do RUF, aumentada 500X (norma).

Fonte: Autores, 2013.

• Revestimento Usado Flange (RUF) – Parâmetros modificados.

Figura 94: Análise microscópica da superfície do RUF, aumentada 250X (modificados).



Fonte: Autores, 2013.



Figura 95: Análise microscópica da superfície do RUF, aumentada 500X (modificados).

Fonte: Autores, 2013.

Na análise microscópica pode-se notar com certa facilidade a presença das ondas de Schallamach em todas as amostras, porém nas que foram ensaiadas sob os parâmetros da norma estão com um espaçamento entre as ondas levemente maior que as outras, provavelmente, devido à velocidade tangencial no ensaio ter sido maior. Nas amostras de RU e RUF é notado que as cristas das ondas de Schallamach são menos acentuadas, diferentemente das amostras de RN.

Observamos mais incrustações e debris nos materiais ensaiados sob os parâmetros da norma, o que indica que com maior carga, rotação e fluxo abrasivo esse fenômeno ocorra com maior frequência. Nos materiais já usados, RU e RUF, os debris aparecem em maior abundância em relação ao RN, o que nos sugere uma maior facilidade no desprendimento de material nos revestimentos usados. Isso pode ser resultado de um processo de fadiga em serviço nesses materiais.

Outro aspecto importante é que, na ampliação apresentada, não se observa a presença de mecanismos de desgaste como o microsulcamento, microcorte e formação de cunhas, como foi observado nos ensaios do Pino-Tambor.

Para melhor ilustrar a diferença de severidade entre os ensaios Pino-Tambor e Roda de Borracha a figura 96 mostra um gráfico comparativo entre a média da perda de massa de cada material em todos os ensaios.



Figura 96: Média da perda de massa de todos os ensaios.

Fonte: Autores, 2013.

Os ensaios têm parâmetros distintos entre si, e para ter uma melhor ideia da proporção da perda de massa com estes, foi normalizada a massa perdida dividindo a mesma com parâmetros comuns e altamente relevantes no atrito dos ensaios dos dois equipamentos, que são a carga normal aplicada, a velocidade tangencial e a distância total deslizada a fim de encontrar uma unidade comum que ponderasse a perda de massa. Parâmetros como a granulometria da partícula abrasiva e o fluxo abrasivo, no caso do Roda de Borracha, foram considerados razoavelmente similares. Sendo a média da granulometria da areia é de 225 µm e a lixa tem como média de granulometria de 265 µm, e o fluxo abrasivo efetivo (que passa na interface roda-amostra) bem menor que o fluxo abrasivo que cai na calha.

A tabela 9 mostra essa perda de massa normalizada sendo mostrada como a perda de massa em miligramas durante um segundo de deslizamento, sendo aplicada uma carga de um Newton em uma área de um metro quadrado de material.

(mg)s/Nm <sup>2</sup>	РТ	RBN	RBM
RN	0,70665	0,00039	0,00037
RU	0,78203	0,00041	0,00042
RUF	0,72550	0,00058	0,00037

Tabela 9: Perda de massa média normalizada.

Fonte:	Autores,	2013.
--------	----------	-------

#### 5 CONCLUSÕES

- 1- Analisando as figuras 56, 58, 84 e 86, percebe-se que os mecanismos de desgaste existentes no revestimento usado antes dos ensaios não condizem com os mecanismos de desgaste encontrados no revestimento novo após os ensaios em ambos os equipamentos (Roda de Borracha e Pino-Tambor).
- 2- O revestimento novo apresenta uma tendência a maior resistência ao desgaste abrasivo nos dois tipos de ensaios, a dois e três corpos (Pino-Tambor e Roda de Borracha, respectivamente).
- 3- Para o abrasômetro Roda de Borracha, é visto que com a redução dos parâmetros de carga normal, rotação (distância percorrida) e fluxo abrasivo, da norma para os modificados, a perda de massa se torna semelhante para todos os materiais.
- 4- Os elastômeros de poliuretanos ensaiados sob ambos os parâmetros dos ensaios no abrasômetro Roda de Borracha não apresentam mecanismos de desgaste como o riscamento, fomação de cunhas e microsulcamento.
- 5- Os ensaios no abrasômetro Pino-Tambor melhor representam o desgaste em serviço do revestimento de poliuretano, visto que os mecanismos encontrados nestes possuem, em parte, alguma semelhança com os observados nas amostras de RU antes dos ensaios (figuras 58, 59 e 60).
- 6- Levando em conta os resultados obtidos nos ensaios realizados não foi possível estabelecer uma correlação entre a dureza dos poliuretanos e o desgaste abrasivo.
- 7- Apesar dos resultados obtidos nos ensaios, não podemos afirmar que estes serão válidos durante o desgaste abrasivo do material no serviço. Além dos tribosistemas do laboratório e de uma planta de mineração serem diferentes, vários fatores que afetam as propriedades dos polímeros não foram considerados neste ensaio, tais como degradação do polímero, temperaturas elevadas, umidade, impacto, tensão aplicada, tempo de carregamento, dentre outros.

## 6 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Temos como sugestão para um trabalho futuro os ensaios do revestimento novo para saber se suas especificações pedidas pela indústria são atendidas pelo fabricante, como as propriedades de dureza (ASTM A 2240), resistência à tração (ASTM D 412), alongamento (ASTM D 412), resistência ao rasgo (ASTM D 624) e resistência à abrasão (DIN 53516) e também conferir a sua densidade especificada pelo método de Arquimedes com um dinamômetro adequado.

# 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Sinferbase/USGS/DNPM. 2013.

[2] CALLISTER., WILLIAM D. 2008. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. Rio de Janeiro : LTC, 2008.

[3] FERRANTE, M. Seleção de Materiais. Universidade Federal de São Carlos, EdUFSCar, 2002.

[4] Evans DC and Lancaster J K, in Scott. 1979. (Ed .) Treatise on Materials Sciellce and Technology, Academic Press. 13,85- 139 , 1979.

[5] AMARAL, Gustavo Henrique Barreto. 2010. Efeito da Formulação no Comportamento em Abrasão de Poliuretano. 2010.

[6] MAIA, Gilson Batista. Plásticos de Engenharia. Empresa AKAFLEX INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA.

[7] RAMOS NETO, F. F. Desgaste Abrasivo em Materiais Poliméricos Utilizados na Proteção de Linhas Flexíveis de Condução de Petróleo. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, UFU, Uberlândia, MG, Brasil, 160 p, 2003.

[8] DE OLIVEIRA, Fernando Maurício Guimarães. 2013. Estudo do Desgaste Abrasivo Polímeros Empregados na Mineração. Vitória : s.n., 2013.

[9] HUTCHINGS, I.M; Stevenson A.N.J. **Development Of The Dry Sand/Rubber** Wheel Abrasion Test, Wear. N.195, 1996, Pp. 232-240.

[10] STEIJN, R. P., "Characteristics Of Polymer Wear," Wear Tests For Plastics: Selection And Use, Astm Stp 701, R. G. Bayer, Ed., American Society For Testing And Materials. 1979.

[11] BRISCOE, B. 1981. Wear of polymers: an essay on fundamental aspects. Londres : s.n., 1981.

[12] THORP, J. M., 1982, "Abrasive Wear Of Some Commercial Polymers", Trib. Int., 59-68. 1982.

[13] A. Schallamach, Wear 17,1971. 301. 1971.

[14] KARL HEINZ, Zum Gahr. 1987. Microstructure and wear of materials. Siegen : Elsevier. 1987.

[15] Liang, Hancheng. 2007. Investigating the Mechanism of Elastomer Abrasion. Londres : s.n., 2007.

[16] HUTCHINGS, Ian M. 1992. Tribology : friction and wear of engineering materials. Oxford : Butterworth Heinemann. 1992.

[17] ISO 4649. 2006. Rubber, vulcanized or thermoplastic - Determination of abrasion resistance using a rotating cylindrical drum device. 2006.

[18] G65, ASTM. Reapproved 2010. Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus. 2010.

[19] HILL, D.J.T., M.I. Killeen a, J.H. O'Donnell. Laboratory wear testing of polyurethane elastomers. 1996.

[20] SHIPWAY, P.H.; NGAON, K. 2003. Microscale abrasive wear of polymeric materials. 2003.

[21] ISO 7619-1. 2004. Rubber, vulcanized or thermoplastic - Determination of indentation hardness - Part 1: Durometer Method (Shore Hardness). 2004.

[22] ISO 23529. 2004. Rubber - General procedures for preparing and conditioning teste pieces for physical test methods. 2004.

[23] LIMOL, Lionel Loïc. 2011. Sobre o desgaste abrasivo de polímeros ensaiados segundo a norma DIN 53516. Vitória : s.n., 2011.