



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

LEANDRO RODRIGUES PINTO DA CUNHA

**COMPARAÇÃO INTERLABORATORIAL DOS RESULTADOS DE ENSAIOS DE
DESGASTE ABRASIVO EM POLÍMEROS, SEGUNDO A NORMA ISO 4649.**

VITÓRIA

2013

LEANDRO RODRIGUES PINTO DA CUNHA

**COMPARAÇÃO INTERLABORATORIAL DOS RESULTADOS DE ENSAIOS DE
DESGASTE ABRASIVO EM POLÍMEROS, SEGUNDO A NORMA ISO 4649.**

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

2013

LEANDRO RODRIGUES PINTO DA CUNHA

**COMPARAÇÃO INTERLABORATORIAL DOS RESULTADOS DE ENSAIOS DE
DESGASTE ABRASIVO EM POLÍMEROS, SEGUNDO A NORMA ISO 4649.**

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 __12 de outubro de 2013.

COMISSÃO EXAMINADORA:

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

Prof. Dr. Amilton Sinatora
Universidade de São Paulo – USP
Coorientador

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

Prof. Dr. José Biasoli de Mello
Universidade Federal de Uberlândia – UFU
Examinador externo

AGRADECIMENTOS

A minha mãe, Celi Rodrigues Pinto da Cunha, ao meu pai, Sebastião Ricciardi da Cunha responsáveis pela formação do meu caráter, ajudando a superar momentos de dificuldade e por ter me dado oportunidade de estudar e conseguir um curso superior e uma pós-graduação em engenharia.

Aos meus irmãos e irmãs, Luiz Felipe, Idavan, Rogério, Débora e Luciana, por acreditarem e por me apoiarem durante toda a minha jornada acadêmica.

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

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

Ao Prof. Dr. Cherlio Scandian pela orientação, amizade, pelos conselhos, pelas colaborações que vieram a enriquecer este trabalho, pela ajuda e pelo conhecimento repassado.

Ao Prof. Dr. Marcelo Camargo Severo de Macêdo pela ajuda com conceitos, diversas colaborações que vieram a enriquecer este trabalho e a amizade por todo tempo como aluno da Universidade Federal do Espírito Santo, tanto como graduando quanto mestrando.

Ao Prof. Dr. Amilton Sinatora, pela oportunidade de trabalhar em conjunto e pela coorientação nesse trabalho.

Ao Prof. Washington Martins da Silva, pelo apoio, ajuda e amizade, tanto no período de graduação quanto no meu início na pós-graduação em engenharia mecânica na UFES.

Aos colegas que me auxiliaram durante todo o curso de pós-graduação, dentre eles, Lionel Limol Loic, Luiz Rafael Rezende da Silva, Fernando Maurício, Ciro Collona, João Vitor, Renato Leão Tauffer, Lucas, Anderson Rouver, Igor Belisário, Erick, Vitor, Marcelo, Amanda Pachito, Bianca Hülle, Fábio-USP, Roberto-USP, Franco-USP e tantos outros.

Ao apoio tecnológico dos laboratórios da UFES, o TRICORRMAT e LFS.

Muito obrigado.

RESUMO

Neste trabalho foi realizado um estudo comparativo da resistência ao desgaste abrasivo de quatro materiais poliméricos utilizados no setor de transporte de minérios nas plantas de produção, sendo um poliuretano (utilizado como raspador) e três elastômeros (camadas de correias e revestimentos de tambores).

Para tal comparação, foram realizados ensaios de desgaste do tipo pino tambor, conforme norma ISO 4649 nos laboratórios TRICORRMAT (Universidade Federal do Espírito Santo) e LFS (Universidade de São Paulo). Um protocolo experimental envolvendo todas as etapas do ensaio, desde a obtenção dos materiais até o armazenamento final, foi elaborado em conjunto pelos dois laboratórios no decorrer desse trabalho. A determinação da repetibilidade e da reprodutibilidade dos resultados de ensaios foi utilizada para a validação do protocolo experimental. A partir da perda de massa de cada material, foram correlacionados alguns parâmetros controláveis de ensaios tais como: lixa, operador e máquina.

Foi observado que dentre os parâmetros citados, a máquina foi o parâmetro que exerceu maior influência nos resultados de comparação entre os laboratórios.

Palavras-Chave: Comparação interlaboratorial, ISO 4649, ASTM E691, desgaste abrasivo, polímero.

ABSTRACT

In this work, we conducted a comparative study of the abrasive wear resistance of four polymeric materials used in ore transport in Vale plants, being a polyurethane (used as a scraper) and three elastomers (belt layers and drums coatings).

To make such a comparison, pin-on-drum type wear tests were performed, according to ISO 4649, between TRICORRMAT (Federal University of Espírito Santo) and LFS (University of São Paulo). An experimental procedure involving all stages of the test, from the procurement of materials to final storage, was developed jointly between the labs during this work. The determination of repeatability and reproducibility from the testing results were used to validate the experimental procedure. From the mass loss of each material were correlated controllable test parameters such as the sandpaper, the operator and the machine.

It was observed that among the mentioned parameters, the machine was the parameter that exerted greater dispersion in the results between laboratories.

Keywords: Interlaboratory comparison, ISO 4649, ASTM E691, polymer abrasive wear.

LISTA DE LEGENDA

- VAMAS – Projeto Versailles em Materiais Avançados e Padrões
- UKWTM – Métodos de Ensaio de Desgaste de Reino Unido
- RTC – Revestimento de Tambor – Centro
- CUC – Correia Utilizada – Centro
- CNC – Correia Nova – Centro
- PU – Poliuretano
- BP – Borracha Padrão
- TRICORRMAT – Tribologia Corrosão e Materiais
- LFS – Laboratório de Fenômenos de Superfícies
- (r) – Repetibilidade em %
- (R) – Reprodutibilidade em %
- IRHD – Grau Internacional de Dureza de Borracha
- ARI – índice de Abrasividade
- ΔV_{rel} – Perda Relativa de Volume
- COV – Coeficiente de Variação
- R^2 - Reta de regressão em função da correlação entre os eixos do plano cartesiano (X ; Y)
- 3M_Maq_C – Lixa 3M na máquina MaqTest com o operador C
- 3M_Veb_C – Lixa 3M na máquina Veb Thüringer com o operador C
- Poli_Maq_C – Lixa Polimat na máquina maqTest com o operador C
- Poli_Veb_C – Lixa Polimat na máquina Veb Thüringer com o operador C
- Operador A – Fernando Maurício
- Operador B – Fábio Nascimento
- Operador C – Leandro Rodrigues

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Perda relativa de volume.....	58
Equação 2: Índice de abrasividade.....	59

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Tribômetros, desenvolvidos por Leonardo da Vinci, para a determinação da força de atrito: (a) em superfícies horizontais e inclinadas; (b) considerando o efeito da área aparente; (c) utilizando uma polia; e (d) considerando o torque no cilindro [10].	17
Figura 2: Diagrama circular de proporção dos tipos de desgaste [26].	18
Figura 3: Parâmetros do desgaste abrasivo.	19
Figura 4: Desgaste abrasivo de múltiplas endentações e riscamento [5].	19
Figura 5: Abrasão a dois corpos de vários materiais em função a dureza por penetração [11].	20
Figura 6: A correlação de Ratner-Lancaster entre as taxas de desgaste de polímeros sobre condições abrasivas e o recíproco do produto da tensão e da deformação a tensão de ruptura [28].	21
Figura 7: Desenho esquemático de 4 métodos para determinar as taxas de desgaste abrasivo: (a) Pino sobre disco abrasivo, (b) Pino sobre placa abrasiva, (c) pino sobre tambor abrasivo e (d) roda de borracha [9].	22
Figura 8: Máquina de ensaio DIN 53516.	22
Figura 9: Representação esquemática do abrasômetro previsto na norma DIN 53516: (a) vista geral e (b) detalhes do sistema de aplicação de carga e posicionamento da lixa abrasiva [23].	23
Figura 10: Fluxograma das normas complementando a DIN 53516.	24
Figura 11: Ensaio de desgaste interlaboratorial ASTM [16].	30
Figura 12: Ensaio realizados antes da criação do protocolo, segundo as séries 1 e 2.	35
Figura 13: Ensaio realizados após a criação do protocolo, segundo as séries 1 e 5.	36
Figura 14: Superfície a ser ensaiada do material CUC.	38
Figura 15: Superfície a ser ensaiada do material RTC	38
Figura 16: Superfície a ser ensaiada do material CNC.	38
Figura 17: Superfície a ser ensaiada do material PU (brilhosa).	39
Figura 18: Parte posterior do material PU (opaca) e não ensaiada.	39
Figura 19: Superfície a ser ensaiada do material Elastômero Padrão.	40
Figura 20: Imagem a) Máquina MaqTest e Imagem b) Máquina Veb Thüringer.	41
Figura 21: a) Sistema de fixação do TRICORRMAT e b) Sistema de fixação do LFS.	42
Figura 22: Imagens da ferramenta de corte utilizada pelo LFS – USP.	43
Figura 23: Comparação entre as ferramentas de corte, LFS – USP e TRICORRMAT – UFES.	43
Figura 24: Fluxograma das etapas do procedimento elaborado.	44
Figura 25: Irregularidades geométricas do material PU.	46
Figura 26: Material CUC curvado.	46

Figura 27: Ferramenta de corte com o prolongamento do rasgo, para facilitar a retirada do corpo de prova.....	47
Figura 28: Amostras de CNC e PU após corte.....	47
Figura 29: Secagem das amostras ao ar livre.	48
Figura 30: Lixa fixada no tambor.	49
Figura 31: Cabeçote da máquina.....	49
Figura 32: Orifício aonde a amostra será colocada.....	50
Figura 33: Mecanismo da máquina de abrasão [28].	50
Figura 34: Parafuso sem fim e guia do cabeçote [28].	51
Figura 35: Ensaio de uma amostra de PU.....	51
Figura 36: Êmbolo responsável pela ejeção da amostra.....	52
Figura 37: Valores de repetibilidade e reprodutibilidade, adaptado da ISO 4649 em função da taxa de desgaste.....	60
Figura 38: Durezas médias e desvio padrão da dureza para cada material [18].	61
Figura 39: Marcação de área para corte	62
Figura 40: Valores de perda de massa da borracha padrão (TRICORRMAT e LFS).	63
Figura 41: Ilustração para cada material da taxa de desgaste.	64
Figura 42: Ilustração para cada material do maior e menor coeficiente de variação.....	65
Figura 43: Ilustração para cada material da taxa de desgaste.	66
Figura 44: Ilustração para cada material do maior e menor coeficiente de variação.....	66
Figura 45: Influência da variável operador. Taxa média de desgaste relativo.....	69
Figura 46: Influência do parâmetro operador. Taxa de desgaste relativo.	70
Figura 47: Influência do parâmetro lixa. Taxa média de desgaste relativo.....	70
Figura 48: Influência do parâmetro lixa. Taxa de desgaste relativo.....	71
Figura 49: Influência do parâmetro máquina. Taxa média de desgaste relativo.....	71
Figura 50: Influência do parâmetro máquina. Taxa de desgaste relativo.....	72
Figura 51: Desenho isométrico da ferramenta de corte utilizada na UFES.	78
Figura 52: Desenho isométrico da ferramenta de corte utilizada na USP.Fonte:.....	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Ensaio de erosão interlaboratorial [15].....	26
Tabela 2: Parâmetros [5].....	27
Tabela 3: Condições de ensaio [5].....	28
Tabela 4: Variação das medidas de desgaste, utilizando métodos de ensaios bem controlados [6]. ...	29
Tabela 5: Séries de ensaios analisados (*ensaio realizado após a defesa da dissertação).....	37
Tabela 6: Legenda dos termos abreviados de identificação dos materiais utilizados.	37
Tabela 7: resultados para a dureza Shore A dos corpos de prova.	62
Tabela 8: Tabela de densidade dos materiais.	63
Tabela 9: Resultados oriundos de uma matriz básica de correlação.	68
Tabela 10: Valores de reprodutibilidade em (%).	72
Tabela 11: Valores da perda de massa da borracha padrão utilizados para comparar a resistência ao desgaste com a dureza Shore A.	77

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	3
RESUMO	4
ABSTRACT	5
LISTA DE LEGENDA	6
LISTA DE EQUAÇÕES.....	7
LISTA DE FIGURAS.....	8
LISTA DE TABELAS.....	10
SUMÁRIO.....	11
1 Introdução.....	13
2 Revisão Bibliográfica.....	15
2.1 Tribologia: Atrito, Desgaste e Lubrificação	15
2.2 Tribômetro	16
2.3 Desgaste	17
2.3.1 Mecanismos de desgaste	18
2.3.2 Métodos de ensaios de desgaste	21
2.4 Ensaios tribológicos multilaboratoriais	24
2.4.1 Revisão Histórica	25
2.4.2 Variabilidade.....	31
i. Parâmetros estatísticos.....	31
ii. Fontes de variabilidade	32
2.4.3 Ensaios tribológicos multilaboratoriais de polímeros	33
3 Materiais e Métodos	35
3.1 Histórico dos ensaios realizados.....	35
3.1.1 Materiais poliméricos utilizados.....	37
3.1.2 Método de ensaios.....	40
3.2 Procedimento de ensaios	44
3.2.1 Recebimento e armazenamento dos materiais	45
3.2.2 Medição de dureza Shore A e marcação para corte dos materiais.....	45
3.2.3 Corte dos materiais	46
3.2.4 Limpeza e armazenamento das amostras antes dos ensaios	47
3.2.5 Medição da massa das amostras.....	48
3.2.6 Execução dos ensaios	49

3.2.7	Limpeza das amostras após os ensaios	52
3.2.8	Limpeza da lixa durante os ensaios	53
3.2.9	Medição de massa final	53
3.2.10	Armazenamento das amostras.....	53
3.2.11	Condicionamento final das amostras.....	53
3.3	Protocolo de ensaios estabelecido entre o TRICORRMAT – UFES e LFS – USP	53
4	Resultados e Discussão.....	61
4.1	Dureza.....	61
4.2	Densidade	63
4.3	Resultados intralaboratoriais	63
4.3.1	Borracha Padrão	63
4.3.2	Resultados da taxa de desgaste obtidos pelo operador C	64
4.3.3	Resultados da taxa de desgaste obtidos pelo operador A	66
4.3.4	Correlação de variáveis do ensaio.....	67
4.4	Resultados interlaboratoriais	72
4.4.1	Reprodutibilidade.....	72
5	Conclusão	74
6	Bibliografia.....	75
7	Anexos	77
	Anexo A – Perda de massa da borracha padrão, para análise da resistência ao desgaste comparado à diferença de dureza Shore A medida.	77
	Anexo C – Desenho Isométrico da ferramenta de corte do TRICORRMAT– UFES.	78
	Anexo D – Desenho isométrico da ferramenta de corte do LFS – USP	79

1 Introdução

O fornecimento de uma estrutura de padrões de medição é essencial, pois, deste modo são obtidos dados confiáveis do desempenho de componentes e materiais para aplicações industriais. Isto é tão verdadeiro para o atrito e desgaste quanto para outras áreas [1].

Há um crescimento no uso de materiais poliméricos nas aplicações de desgaste em indústrias de beneficiamento de minério [2]. Os mais comuns são os poliuretanos, as borrachas naturais e sintéticas. Os Poliuretanos são utilizados porque têm preço moderado, propriedades mecânicas excelentes e alta resistência ao desgaste em comparação a sistemas poliméricos alternativos [3]. Porém, a carência de explicações aceitáveis de alguns aspectos da abrasão de borrachas demonstra uma limitação no entendimento do desgaste desta classe de materiais [4]. Mesmo assim, o futuro dos elastômeros na indústria de beneficiamento de minério é promissor.

Há uma grande convicção entre os países industrializados de que a área de materiais será um dos pivôs do crescimento tecnológico do futuro. Entretanto, a introdução de novos materiais (ou melhorias de materiais existentes) é atrasada devido à ausência de dados confiáveis. Os “tribomateriais”, devido à complexidade dos processos de atrito e desgaste e da escassez de métodos padronizados para a realização de ensaios de desgaste, são caracterizados por esses fenômenos [5].

Assim, esforços crescentes foram aplicados nas últimas décadas em busca de uma padronização para os métodos de ensaios de desgaste. A criação desses padrões tem por objetivo de reduzir a diversidade de sistemas de ensaios de desgaste e entre a maneira de se realizar um ensaio. É esperado que tal padronização fornecerá uma base de dados de desgaste obtidos a través de condições similares de ensaios que, por sua vez, resultam de uma metodologia uniforme de ensaios [6].

Portanto, para que seja criada uma base de dados tribológicos e que ela se torne referência para comparações (criação de materiais avançados), é preciso estabelecer metodologias concisas e uniformes de ensaios.

A partir dessas metodologias, é possível a realização de ensaios intra e interlaboratoriais, possibilitando a comparação de resultados. O conceito da utilização de uma metodologia de ensaio foi adquirido a partir das dificuldades encontradas para efetuar comparações de valores de desgaste entre outros.

Portanto, o objetivo desse trabalho, na tentativa de uniformização dos resultados de ensaios de desgaste entre os laboratórios, foi o de estabelecer um protocolo para procedimentos experimentais a fim de:

- Tentar reduzir a variabilidade de resultados experimentais entre os laboratórios.
- Determinar os parâmetros mais controláveis.
- Obter informações qualitativas sobre a influência de cada parâmetro.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Tribologia: Atrito, Desgaste e Lubrificação

A Tribologia, “ciência e tecnologia da interação de superfícies em movimento relativo” [7], que a partir dos trabalhos de Leonardo Da Vinci, teve o seu conceito formalizado em 1966 no Reino Unido por meio de um estudo que quantificou as perdas econômicas provenientes do desgaste e o quanto poderia ser economizado anualmente [8], se os princípios da tribologia fossem corretamente aplicados.

Dessa forma, a Tribologia, do grego “*tribos*” - “esfregamento” e “*logos*” - estudo, engloba os conceitos de atrito, lubrificação e desgaste e envolve disciplinas outras como física, química e a engenharia mecânica e metalurgia [9].

Segundo HUTCHINGS [9]:

- O *Atrito* é a força gerada no contato entre duas superfícies sólidas em movimento relativo. Em alguns casos, é indispensável ter um baixo atrito, como nas articulações humanas. Em outros casos, é importante ter valores elevados de atrito, como no caso da embreagem.
- A *Lubrificação* é um agente visando a reduzir o atrito gerado na interface do contato de superfícies em movimento relativo.

Um método de reduzir o atrito e frequentemente o desgaste é a lubrificação das superfícies. Componentes da atmosfera (especialmente oxigênio e vapor d’água) têm um importante efeito e precisam ser considerados em qualquer estudo da interação de superfícies.

- O *Desgaste* é o dano causado em uma ou ambas as superfícies, geralmente envolvendo uma perda progressiva de material.

Em muitos casos, o desgaste é prejudicial, levando a um aumento contínuo da folga entre as partes que se movimentam. A perda por desgaste de pequenas quantidades relativas de material pode ser suficiente para causar a completa falha de máquinas grandes e complexas. Entretanto, assim como no atrito, o desgaste se torna desejável em algumas vezes, como em operações de usinagem.

O estudo científico da tribologia de maneira sistêmica data de um longo histórico e tem Leonardo da Vinci (1452 – 1519), como um dos precursores para o entendimento dos fenômenos de atrito e desgaste [10]. Através de seus estudos ele mediu forças de atrito em planos horizontais e inclinados, demonstrou que estas são dependentes da força normal ao deslizamento dos corpos e independentes da área de contato aparente, propôs uma distinção entre atrito de escorregamento e de rolamento e introduziu o coeficiente de atrito como sendo proporcional à força normal [11].

Outros pioneiros da tribologia foram Guillaume Amontons (1663-1705), John Theophilus Desaguliers (1683-1744), Leonard Euler (1707-1783), Charles-Augustin Coulomb (1736 – 1806) e Charles Hatchett (1760-1820), Osborne Reynolds (1842-1919), Heirich Rudolph Hertz (1869 – 1851), George Vogelpohl (1900-1975), Frank Philip Boluden (1903-1968).

O estudo do desgaste iniciou-se de maneira experimental com a utilização de tribômetros.

2.2 Tribômetro

A palavra tribômetro primeiramente utilizada em 1774 refere-se a um equipamento versátil para medição de propriedades de atrito e desgaste de combinações de materiais e lubrificantes sob condições específicas de carga, velocidade, temperatura e atmosfera [9]. A caracterização tribológica envolve estudos sobre as reais condições de uso do material assim como os estudos sobre o coeficiente de atrito, taxa de desgaste e durabilidade do filme.

A figura 1 mostra vários tribômetros utilizados por Leonardo da Vinci na determinação da força de atrito.

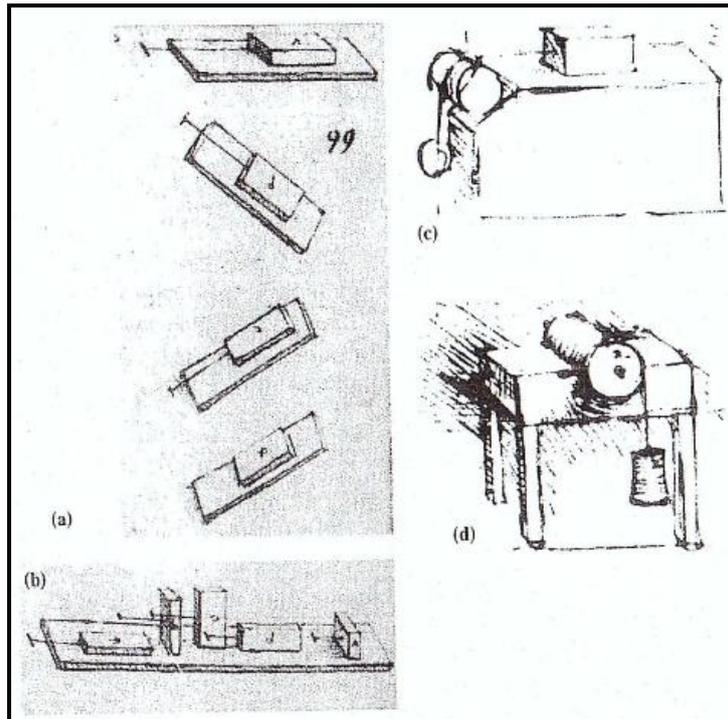


Figura 1: Tribômetros, desenvolvidos por Leonardo da Vinci, para a determinação da força de atrito: (a) em superfícies horizontais e inclinadas; (b) considerando o efeito da área aparente; (c) utilizando uma polia; e (d) considerando o torque no cilindro [10].

Os tribômetros têm importância significativa em aplicações tanto industrial quanto científicas, pois, permitem avaliar o desempenho tribológico de materiais de desgaste.

O desgaste é função de parâmetros variados.

2.3 Desgaste

O desgaste de componentes de máquinas e outros elementos funcionais têm um custo elevado ao redor do mundo, sendo a principal causa de desperdício e perda de desempenho mecânico. Estimativa econômica: cerca de 1 a 6% do PIB dos países desenvolvidos é perdido com desgaste, e ainda: cerca de 20% dessas perdas poderiam ser evitadas com aplicação na indústria dos conhecimentos existentes sobre tribologia [12].

Foi sugerida a seguinte classificação dos tipos de desgaste [13]: desgaste abrasivo, erosivo, corrosivo, por deslizamento e por fadiga de contato (Figura 2). 50 % das falhas por desgaste são atribuídas ao desgaste abrasivo.

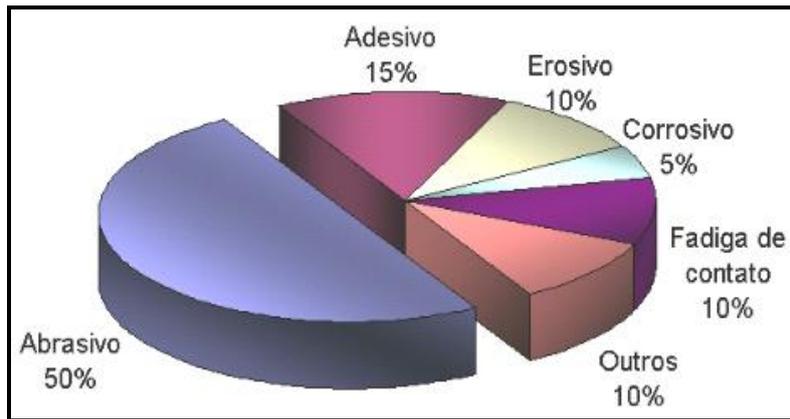


Figura 2: Diagrama circular de proporção dos tipos de desgaste [26].

2.3.1 Mecanismos de desgaste

Nesse item serão abordados os tipos de mecanismos de desgaste.

Os tipos de desgaste podem ser classificados e definidos de acordo com o mecanismo que gera a remoção do material durante o processo. São aceitos quatro modos principais de desgaste descritos abaixo:

- Desgaste adesivo: Ocorre ligação e quebra de ligação adesiva interfacial.
- Desgaste abrasivo: Ocorre a remoção de material por riscamento.
- Desgaste por fadiga superficial: A fadiga gera formação de trinca na região subsuperficial devido a tensões cíclicas tribológicas que resultam na separação de material;
- Desgaste oxidativo: Há a formação de produtos de reação química como um resultado de interações químicas entre os elementos de um sistema tribológico iniciados pela ação tribológica.

i. Desgaste abrasivo

Os parâmetros do desgaste abrasivo são: projeto, tipo de abrasivo, condições de operação e tipos de desgaste (Figura 3).

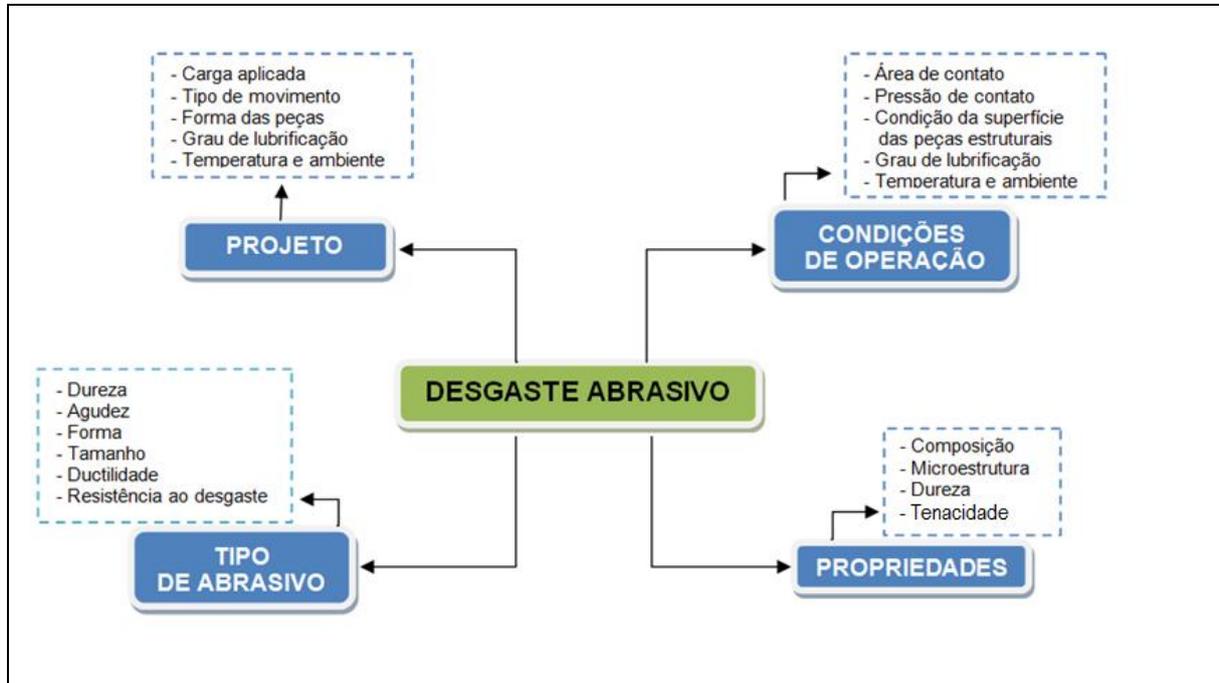


Figura 3: Parâmetros do desgaste abrasivo.
Fonte: Pelo próprio autor, 2012.

O desgaste abrasivo é definido como sendo a remoção de material de uma superfície causada por partículas duras. Tais partículas podem estar soltas entre duas superfícies 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 que a superfície contra atritante. A distinção pode ser feita entre o desgaste abrasivo de riscamento (a dois corpos) ou de múltiplas endentações (a três corpos) [11].

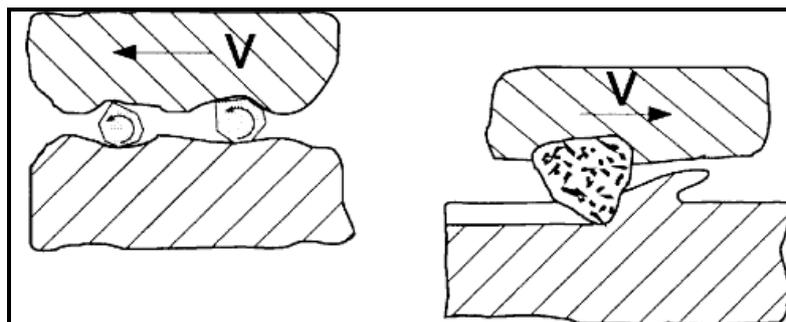


Figura 4: Desgaste abrasivo de múltiplas endentações e riscamento [5].

O desgaste do tipo dois corpos envolve apenas duas superfícies em contato, a superfície mais dura e rugosa desloca material da outra, mais mole. Já o desgaste do tipo três corpos envolve, além das duas superfícies que estão em contato, um terceiro elemento (substância sólida dura) entre as duas superfícies. As taxas de desgaste abrasivo de múltiplas indentações são geralmente menos expressivas que as de riscamento [9].

Na convenção atual a classificação se dá em desgaste com partículas que indentam ou riscam o material. As partículas que rolam causam múltiplas indentações e as que não rolam ou estão engastadas no material mais “macio” promovem um fenômeno de riscamento na amostra. As partículas duras possuem três características que influenciam no desgaste abrasivo [3] sendo:

- Dureza;
- Forma;
- Tamanho.

O comportamento ao desgaste abrasivo de materiais poliméricos é diferente dos metais, pois os mecanismos de deformação plástica e de remoção de material são distintos dos metais.

A dureza por penetração, que envolve plasticidade, é um bom indicador a resistência ao desgaste abrasivo, no entanto não permite estabelecer uma tendência do desgaste para os polímeros (Figura 5 e Figura 6).

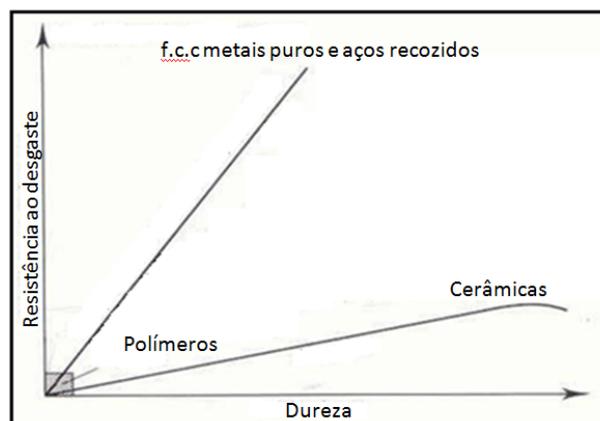


Figura 5: Abrasão a dois corpos de vários materiais em função a dureza por penetração [11].

Nos casos dos polímeros, a resistência ao desgaste abrasivo é correlacionada de maneira linear como produto entre tensão de ruptura e deformação na tensão de ruptura (Figura 6).

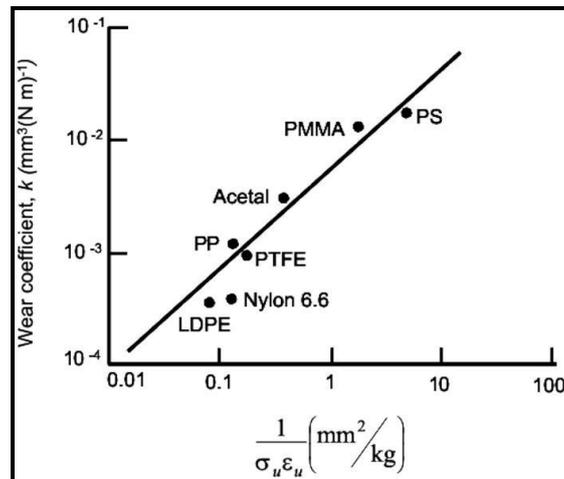


Figura 6: A correlação de Ratner-Lancaster entre as taxas de desgaste de polímeros sobre condições abrasivas e o recíproco do produto da tensão e da deformação a tensão de ruptura [28].

Para avaliar o desempenho tribológico de maneira quantitativa de materiais de desgaste, são realizados ensaios de desgaste padronizados.

2.3.2 Métodos de ensaios de desgaste

Vários arranjos experimentais têm sido utilizados para o estudo do desgaste por deslizamento. As investigações têm por objetivo tanto o entendimento dos mecanismos envolvidos como a simulação de situações reais. Estes ensaios acabam por fornecer 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 [9]. Alguns ensaios são mostrados na figura 7.

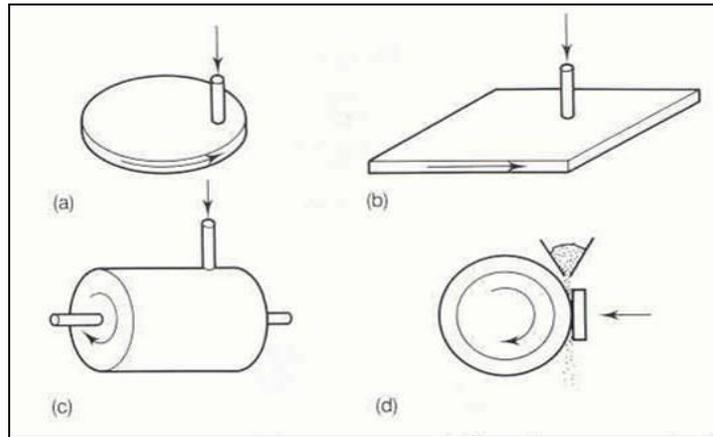


Figura 7: Desenho esquemático de 4 métodos para determinar as taxas de desgaste abrasivo: (a) Pino sobre disco abrasivo, (b) Pino sobre placa abrasiva, (c) pino sobre tambor abrasivo e (d) roda de borracha [9].

i. Método pino-tambor

A norma ISO 4649 (Figura 7 (c)) 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 8 e 9). A pressão de contato 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. 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 8: Máquina de ensaio DIN 53516.

Fonte: Pelo próprio autor, 2012.

As características do ensaio abrasivo ISO 4649 foram citadas abaixo e na exemplificada na (Figura 9).

Algumas características do ensaio são:

- Força aplicada pelo cabeçote de $10 \pm 0,2$ N;
- Distância de deslizamento de $40 \pm 0,2$ metros;
- Velocidade de rotação do tambor, 40 RPM;
- Velocidade tangencial do porta-amostra, 2,8 mm/s;
- Velocidade angular da amostra (método B), $3\pi/20$ rad/s;
- Diâmetro do tambor, 127 mm;
- Comprimento efetivo do tambor, 420 mm.
- Número de rotação no ensaio, 100;
- Amostras cilíndricas, com diâmetro de $16 \pm 0,2$ mm e altura mínima de 6 mm;
- Lixa de alumina, de tamanho médio $265 \mu\text{m}$, granulometria 60;

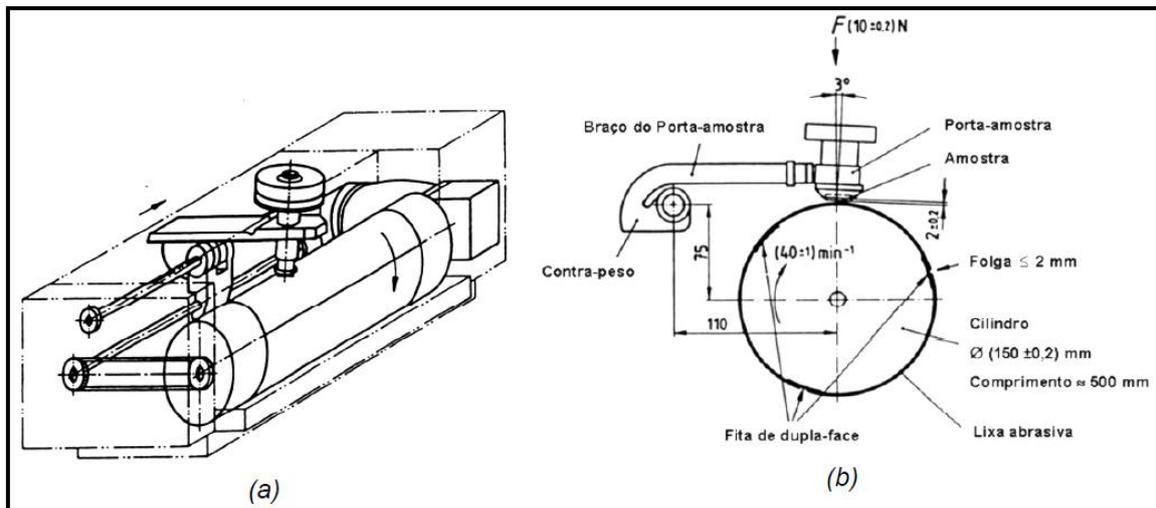


Figura 9: Representação esquemática do abrasômetro previsto na norma DIN 53516: (a) vista geral e (b) detalhes do sistema de aplicação de carga e posicionamento da lixa abrasiva [23].

A norma **ISO 4649** é relacionada com várias normas (Figura 13) que servem de ferramentas complementares a fim de preparar, caracterizar e condicionar as amostras.

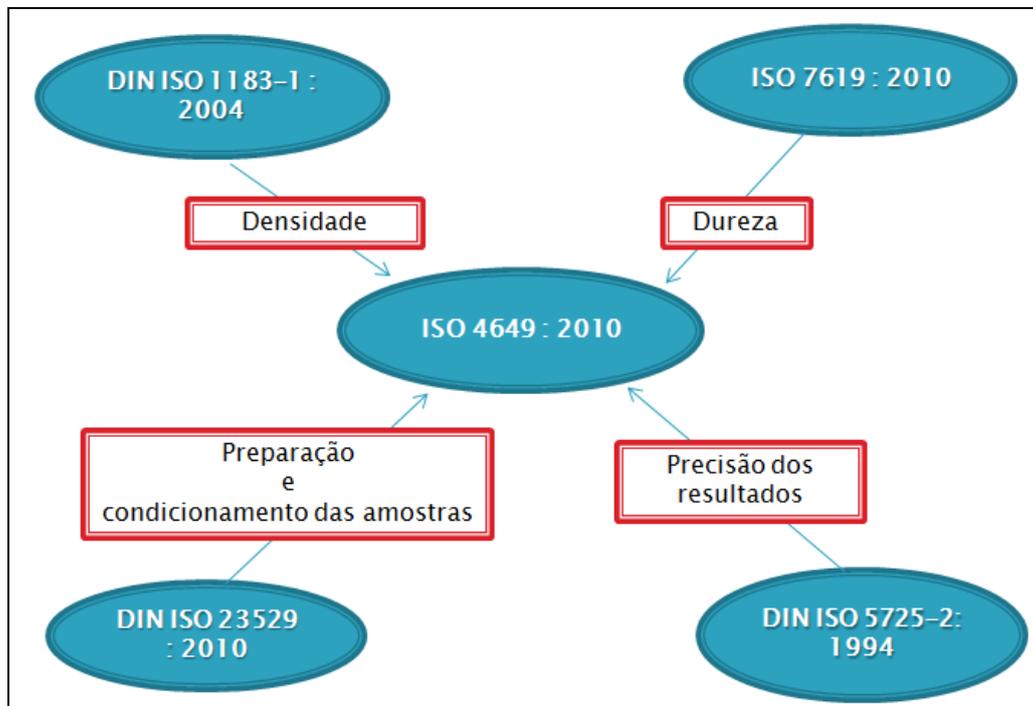


Figura 10: Fluxograma das normas complementando a DIN 53516.
Fonte: Pelo próprio autor, 2012.

2.4 Ensaios tribológicos multilaboratoriais

Nesta seção será realizada uma revisão dos exercícios interlaboratoriais realizados no decorrer da história, descrevendo as melhorias (tais como os parâmetros estatísticos) que surgiram durante o procedimento de desenvolvimento de métodos de comparações.

Esses parâmetros são explicitados em termo da nomenclatura internacional. O uso deles é descrito na determinação da variabilidade de um determinado método de ensaio.

As fontes de variabilidade foram também esclarecidas

2.4.1 Revisão Histórica

A primeira e mais importante atividade de pré-padronização de comparação de ensaios de desgaste foi coordenada pela OECD (Organização para Cooperação Econômica e Desenvolvimento) no Grupo de Desgaste de Engenharia de Materiais em 1966 [14]. O objetivo foi o de obter informações necessárias antes da padronização realizando uma pesquisa de pré-uniformização colaborativa. Uma grande dispersão dos resultados de desgaste e atrito entre os laboratórios participantes foi encontrada [1].

Em seguida, em 1976, uma inspeção do Comitê G2.2 da ASTM “Desgaste e Erosão” foi conduzida para avaliar o grau de similaridade dos equipamentos de erosão a seco. Apesar das diferenças entre eles, foi possível encontrar características básicas comuns [15].

Logo após, em 1979 e 1981 respectivamente, foram criadas a ASTM E691 e de maneira similar a ISO 5725-2 a fim de garantir a produção de informações estatísticas válidas necessárias ao estabelecimento da precisão de um método de ensaio de desgaste [16]. O Comitê G2 da ASTM possui o seu próprio padrão para relatar dados específicos de ensaios de desgaste interlaboratoriais [17]. Dois aspectos de ensaios interlaboratoriais são particularmente importantes:

- 1) Estabelecer a repetibilidade dos resultados dentro de cada laboratório participante.
- 2) Estabelecer a reprodutibilidade dos resultados entre laboratórios participantes.

Em 1985, foi desenvolvida uma análise de resultados de ensaios interlaboratoriais para erosão sólida na qual foi identificada a necessidade do uso de um material de referência e do estabelecimento de um protocolo de ensaios (Tabela 1).

Parâmetros de ensaio	
Espécies	Chapa de aço 1020
Abrasivo	Partícula de Al ₂ O ₃ de tamanho médio de 50µm
Bocal	Diâmetro interno 1,5 mm
Velocidade da partícula	30 m.s ⁻¹
Ângulo de ataque	90°
Gás transportado	Ar
Fluxo de partículas	Aproximadamente 0,15 ± 0,05 g cm ⁻² s ⁻¹
Carregamento de partícula	Aproximadamente 0,3 g (l gás) ⁻¹
Duração do ensaio	10 min
Requisitos para os ensaios	
(1)	Superfícies das amostras lixadas para retirar camadas de óxidos utilizando uma sequência de lixas com granulometria de 100, 200, 400 e 600.
(2)	Fazer dez medições repetidas de erosão;
(3)	Não desviar das condições especificadas em norma.

Tabela 1: Ensaio de erosão interlaboratorial [15].

Foi estabelecido que apenas valores comparativos de desgaste deveriam ser utilizados ao invés dos absolutos [15].

Posteriormente, em 1986, o Projeto Versailles em Materiais Avançados e Padrões (VAMAS) em métodos de ensaios de desgaste, foi criado e teve como objetivos gerais estimular a introdução dos materiais avançados dentro dos produtos de tecnologia e de estruturas de engenharia através de um acordo internacional em códigos de praticas da performance dos padrões.

Este projeto surgiu em 1982 como resultado do encontro dos chefes de estado e governos do Canadá, França, Alemanha, Itália, Japão, Reino Unido, Estados Unidos e representantes da Comissão das Comunidades Europeias [5]. O VAMAS através de pesquisa multilateral forneceu uma base científica e metrológica necessária à realização de um consenso a respeito dos padrões [1].

O resultado do estudo multilaboratorial (Tabela 2) conduziu à adoção de parâmetros básicos para se realizar ensaios de comparação tais como: sistema de ensaio, materiais, ambiente, parâmetros de operação, limpeza superficial e medição das quantidades relevantes. Mesmo após o conhecimento dos parâmetros básicos, foi observado que mais da metade dos laboratórios participantes não conseguiram controlar a umidade relativa do ensaio [5].

Resultados dos ensaios [5] (Aço AISI 52100, cerâmica α -Al₂O₃, F_N = 10 N, v = 0.1 m s⁻¹, T = 23°C, umidade relativa de 12% - 78%).

	Configuração 1	Configuração 2	Configuração 3	Configuração 4
	aço/aço	cerâmico/aço	aço/cerâmico	cerâmico/aço
Coefficiente de atrito	0,60 ± 0,11	0,76 ± 0,14	0,6 ± 0,12	0,41 ± 0,08
Número de dados	109	75	64	76
Número de laboratórios	26	26	23	26
Taxa de desgaste do sistema (μ Km⁻¹)^a	70 ± 20	Muito pequeno	81 ± 29	Muito pequeno
Número de dados	47		29	
Número de laboratórios	11		11	
Diâmetro da marca de desgaste da esfera (mm)	2,11 ± 0,27	c	2,08 ± 0,35	0,3 ± 0,05
Número de dados	102		60	56
Número de laboratórios	23		21	19
Largura da pista de desgaste do disco (mm)	D	0,64 ± 0,13	D	ñ medido
Número de dados		54		ñ medido
Número de laboratórios		19		ñ medido
a- Para 1000 m de distância deslizada				
b- Determinada a partir da curva de desgaste (estado estacionário entre 300 e 1000 m de distância deslizada)				
c- Transferência de material do disco para bola				
d- Transferência de material da bola para o disco				

Tabela 2: Parâmetros [5].

Subsequentemente ao VAMAS, em 1987, uma avaliação da reprodutibilidade e da repetibilidade dos ensaios de desgaste de deslizamento a seco foi iniciada pelo UKWTM (Métodos de Ensaios de Desgaste do Reino Unido) à moda do VAMAS (Tabela 3).

	UKWTM	VAMAS
Velocidade (ms^{-1})	0,1	0,1
Carga (N)	20	10
Distância (m)	1080	1000
Diâmetro da pista desgastada	-	32
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	21 ± 3	21 ± 3
Umidade (%)	50 ± 10	50 ± 10

Tabela 3: Condições de ensaio [5].

A maior diferença entre o VAMAS e UKWTM foi a geometria pino/disco utilizada ao invés de esfera/disco. A avaliação teve por objetivo de organizar ensaios comparativos entre um grande número de laboratórios do Reino Unido. A dispersão dos resultados foi explicada pelas dificuldades de alinhamento das superfícies das amostras e pela diferença, entre os equipamentos de ensaios, da capacidade de resfriamento das amostras e de amortecimento de vibrações (projeto de máquina de ensaios de desgaste diferente) [18].

Em 1989, um estudo dos métodos de ensaios padronizados de desgaste por deslizamento a seco, comparou os dados de desgaste obtidos para vários métodos e geometrias de ensaios. Foram calculados os valores de repetibilidade dos métodos de ensaios de desgaste por deslizamento e estes foram comparados aos valores de repetibilidade dos métodos de ensaios de desgaste abrasivo e erosivo (Tabela 4).

Método de ensaio	Materiais	Condições	(CV's) entre laboratórios; perda volumétrica (%)
Cilindro/Cilindro Norma G-83	Aço M2/Aço M2	Carga 71N	31
		Velocidade 0,26 ms ⁻¹	15
	Aço M4/Aço M4	3190m e lub. Ar	19
		Média	19
Bloco/Anel Norma G - 77	Aço 01/Aço 4620	Carga 134N	67
		Velocidade 0,13 ms ⁻¹	47
	593m e lub. Ar	Média	57
Pino/Disco VAMAS Desgaste de apenas um pino	Aço 52100/Aço 52100	Carga 10N	12
		Velocidade 0,1 ms ⁻¹	6
	1000m e lub. Ar		12
			9
			12
			9
			18
			33
			6
			30
			6
			21
			9
			9
	12		
	33		
	Média	15	
Pino/Disco U.K.	Aço 535A99/Aço 817M40	Carga 20N	58
		Velocidade 0,1 ms ⁻¹	38
	1080m e lub. Ar		26
			6
			21
			33
			88
			Média
Abrasão Norma G - 65	Aço D-2	Carga 130N	
		Velocidade 2,4 ms ⁻¹	
	4309m e lub. Ar		
	Desvio Padrão	5	
Erosão Norma G - 76	Aço 1020	veloc. da partícula 70 ms ⁻¹	
		Al ₂ O ₃ 50µm; 2g min ⁻¹	
	Aço 304	lub. Ar	Desvio Padrão
		Desvio Padrão	5

Tabela 4: Variação das medidas de desgaste, utilizando métodos de ensaios bem controlados [6].

Além disso, a análise dos parâmetros estatísticos relevantes ressaltou a existência de quatro parâmetros críticos e possíveis tais que: uniformidade da morfologia da trilha de desgaste, permanência dos debris de desgaste no contato, rigidez dinâmica do sistema de ensaio e formato da amostra [6]. Foram identificadas em um exercício interlaboratorial, as variáveis importantes e a maneira como elas devem ser tratadas [19].

Em 1999, uma revisão do desenvolvimento e práticas dos padrões ASTM para ensaios de desgaste foi publicada. Essa revisão consistiu em descrever os métodos de desenvolvimento dos padrões ASTM utilizados na resolução de problemas envolvendo desgaste por deslizamento, abrasão, “galling” e erosão [16]. A confiabilidade dos resultados desses padrões foi confirmada após exercícios intra e interlaboratoriais a partir dos valores de coeficiente de variação calculados (Figura 11). Esses coeficientes são obtidos dividindo o desvio padrão pela média.

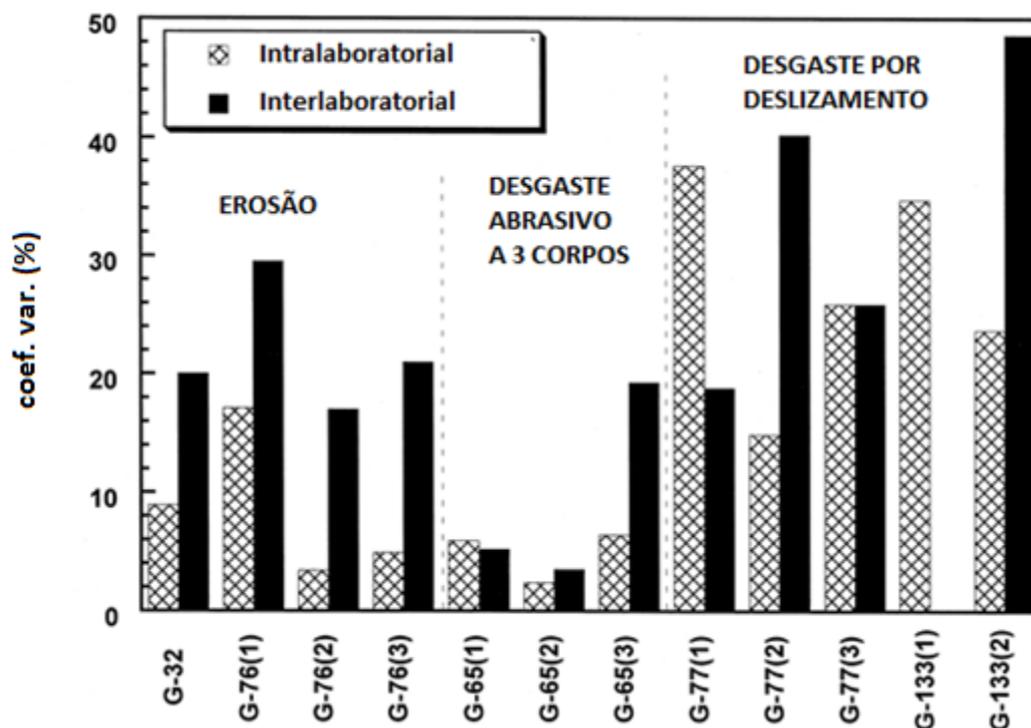


Figura 11: Ensaio de desgaste interlaboratorial ASTM [16].

Os números entre parênteses, no eixo horizontal do gráfico acima, representam as condições do ensaio.

Os parâmetros estatísticos são melhorados a cada cinco anos em revisões de revalidação dos padrões ASTM realizadas pelo Comitê G 2.

Enfim, um exercício interlaboratorial de validação do ensaio de microabrasão foi realizado em 2005 avaliando os valores estatísticos de repetibilidade e de reprodutibilidade. Foi encontrada certa dificuldade em se medir a topografia de desgaste das amostras [20].

Esse método de ensaio em microabrasão, utilizado para avaliar a resistência ao desgaste de revestimentos, foi realizado com condições de perfuração e de não perfuração dos revestimentos. Os valores de repetibilidade e de reprodutibilidade foram entre 2-24% e 3-26% respectivamente.

2.4.2 Variabilidade

Devido à grande quantidade de parâmetros envolvidos na realização de um ensaio de desgaste, os dados de desgaste resultantes de um ensaio podem variar dentro de um laboratório e de um laboratório para o outro.

Serão explicitados aqui os parâmetros estatísticos para caracterizar a variabilidade dos resultados e explicar a mesma.

i. Parâmetros estatísticos

Dois parâmetros estatísticos de importância utilizados nos exercícios interlaboratoriais são a repetibilidade e a reprodutibilidade [16].

O padrão ASTM E 177 [21], que trata a respeito do uso dos termos de precisão nos métodos de ensaio, explicita esses parâmetros:

Condições de repetibilidade: condições cujos resultados de ensaios independentes são obtidos com o mesmo método para os mesmos materiais num só laboratório pelo mesmo operador utilizando a mesma máquina num curto intervalo de tempo.

- **Repetibilidade limite (r):** valor inferior a diferença absoluta entre dois resultados de ensaio individual obtidos sobre condições de repetibilidade (ocorre

aproximadamente com uma probabilidade entre 0,90 e 0,98). Esse valor vale 2,8 vezes o desvio padrão da repetibilidade.

- **Desvio padrão da repetibilidade (s_r):** medida da dispersão da distribuição dos resultados de ensaios realizados sobre condições de repetibilidade.

Condições de reprodutibilidade: condições cujos resultados de ensaios são obtidos com o mesmo método para os mesmos materiais em laboratórios diferentes por operadores diferentes utilizando máquinas diferentes.

- **Reprodutibilidade limite (R):** valor inferior à diferença absoluta entre dois resultados de ensaio individual obtidos sobre condições de reprodutibilidade (ocorre aproximadamente com uma probabilidade entre 0,90 e 0,98). Esse valor vale 2,8 vezes o desvio padrão da reprodutibilidade.
- **Desvio padrão da reprodutibilidade (s_R):** desvio padrão dos resultados de ensaios realizados sobre condições de reprodutibilidade. Ele inclui, além da variabilidade entre laboratórios, o desvio padrão da repetibilidade e a contribuição da interação dos fatores laboratoriais (tais como, diferenças entre operadores, máquinas e ambientes de ensaio) com os fatores materiais (tais como, diferenças entre propriedades dos materiais e outras propriedades de interesse).

A variabilidade dos resultados de ensaio pode ter várias origens.

ii. Fontes de variabilidade

As fontes de variabilidade foram identificadas de maneira ampla nas publicações:

- 1) Técnica do operador, incluindo o julgamento ao executar medições, manuseio e limpeza de amostras, cuidado aos detalhes do protocolo e fadiga durante o trabalho [16];
- 2) Máquina de ensaio, incluindo não somente a calibração e a construção da máquina assim como o alinhamento do corpo de prova também, o resfriamento do mesmo e as possíveis fontes de vibrações [6];
- 3) Ambiente de ensaios cujas características são temperatura, umidade, pressão atmosférica entre outros afetam de maneira significativa o desgaste de materiais [1];

- 4) Preparação de amostras dependendo do cuidado do operador e da homogeneidade dos materiais tem um papel chave nos resultados de desgaste [21].
- 5) Material de calibração (ou de referência) e armazenamento adequado do mesmo (a fim de preservar as suas propriedades tribológicas) [16].

2.4.3 Ensaios tribológicos multilaboratoriais de polímeros

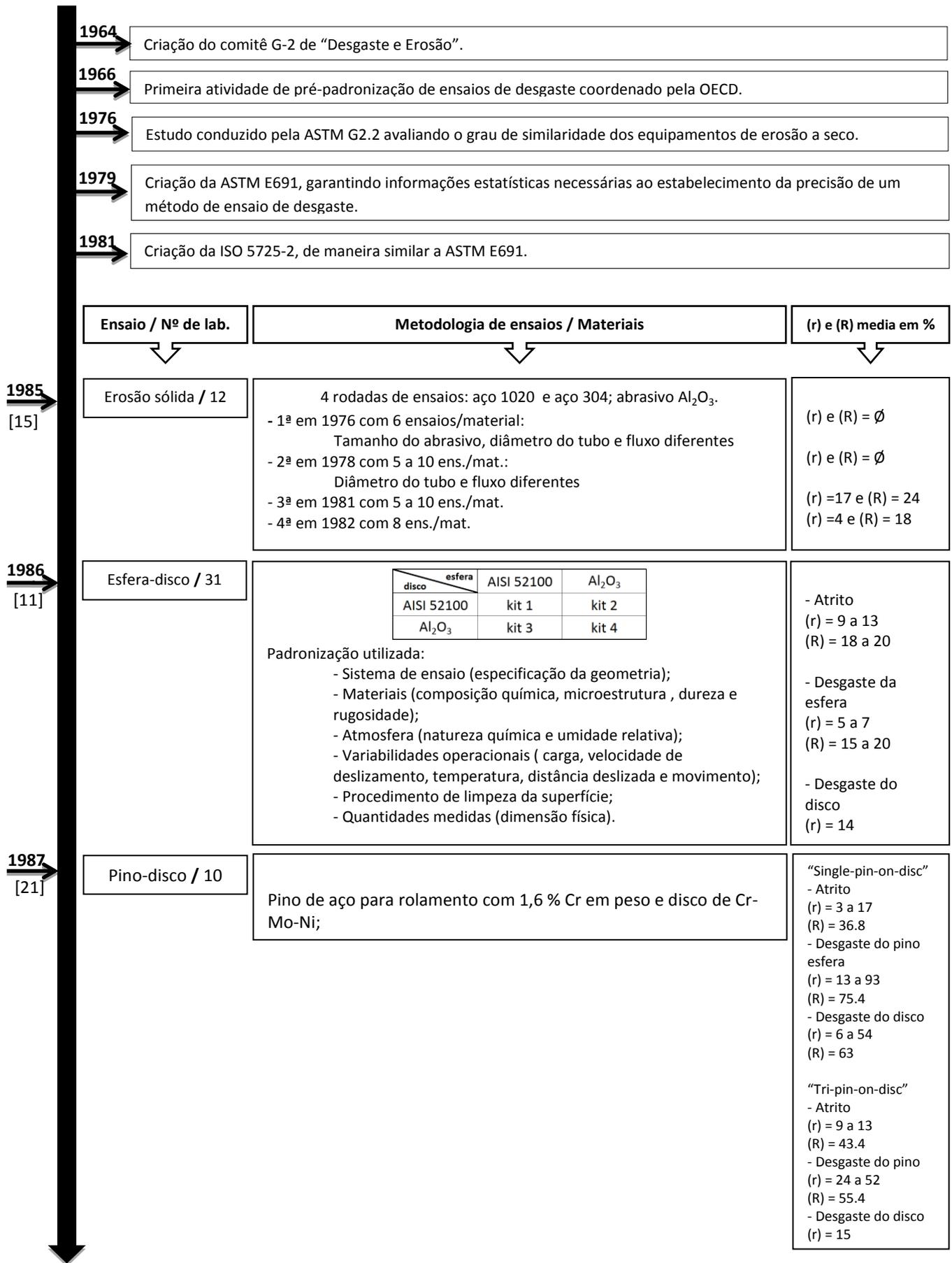
O item 2.4.1 ilustrou a evolução dos métodos e padrões para a realização de exercícios tribológicos multilaboratoriais. Foi visto que todos os estudos nessa área foram realizados para metais e cerâmicas.

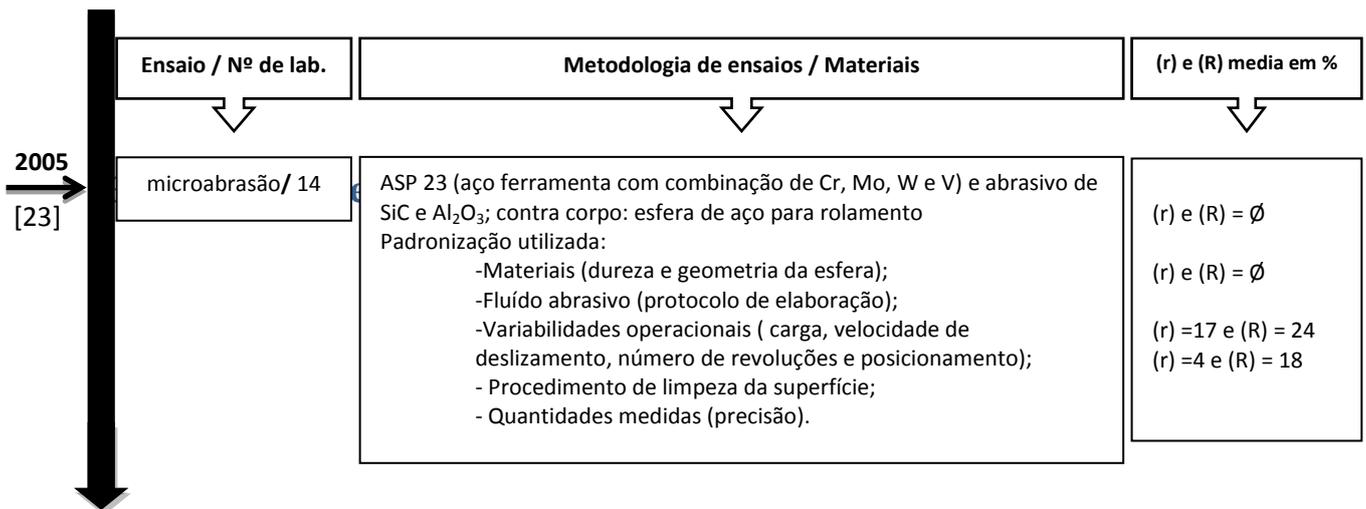
O item 2.4.2 demonstrou como avaliar a variabilidade dos resultados de ensaios e como esta última está ligada aos parâmetros de ensaios tais como: operador, máquina, ambiente de ensaios e materiais.

Enquanto metais e cerâmicas são materiais de desgaste chamados de “tradicionais”, uma nova classe de materiais baseada em polímeros surgiu nas últimas décadas. Foi também ressaltada a complexidade da interação entre as partículas desgaste e a superfície dos materiais poliméricos [2].

Portanto, é possível observar que as dificuldades de entendimento das fontes de variabilidade são devidas à complexidade e o conhecimento limitado a respeito do desgaste de materiais poliméricos, e inclusive, em nível de comparação interlaboratorial em desgaste abrasivo.

Fluxograma histórico dos métodos e trabalhos publicados academicamente.





No fluxograma acima, foram representados os valores de (r) e (R) para alguns ensaios da seguinte forma, (r) e (R) = ∅. Isso significa que esses valores estatísticos não foram calculados durante os ensaios ou em determinadas condições de ensaios.

3.1 Histórico dos ensaios realizados

Esse trabalho é uma continuidade do projeto de graduação [22], tendo como objetivo o estudo de desgaste em polímeros na linha de mineração, sendo realizada uma comparação dos resultados de desgaste entre os laboratórios entre as séries 1 e 2 conforme a tabela 5. A partir dessa comparação de resultados, foram identificados os parâmetros de variabilidade e a necessidade da criação de um protocolo comum de execução de ensaios.

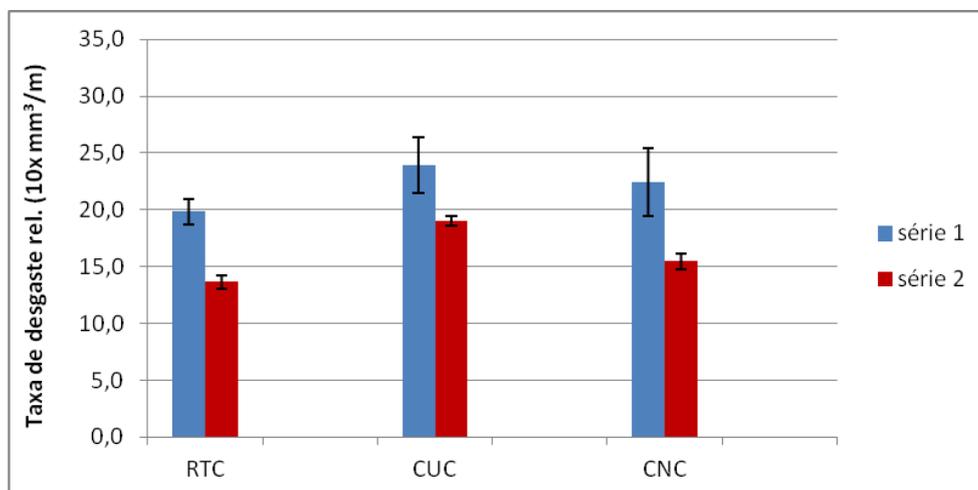


Figura 12: Ensaios realizados antes da criação do protocolo, segundo as séries 1 e 2.

Após essa comparação foi possível observar que a máquina Veb Thüringer possuía maior coeficiente de variação dos resultados em relação a Maqtest.

Na tentativa de unificar os resultados, o desenvolvimento do protocolo foi iniciado e continuado até os últimos resultados obtidos. Esse protocolo possui o objetivo de reduzir da influência dos parâmetros controláveis e do coeficiente de variação dos resultados de ensaios (Figura 13).

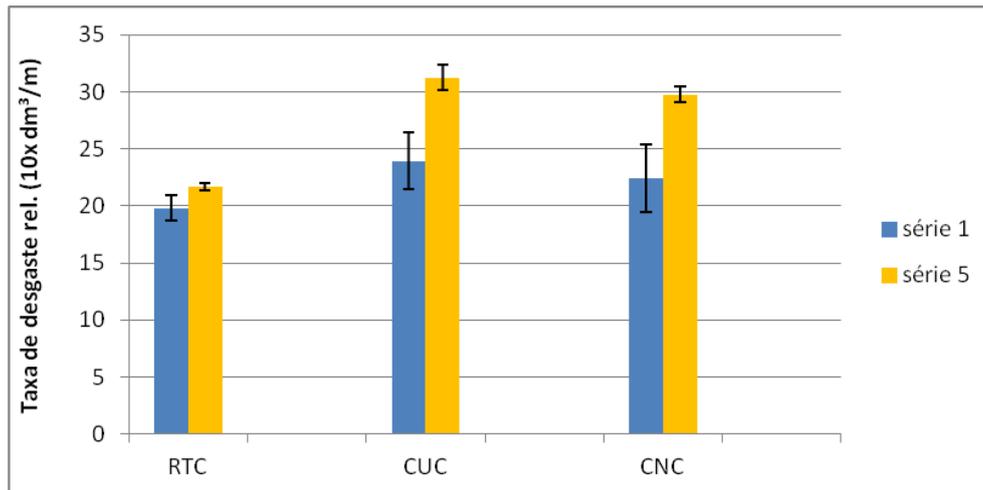


Figura 13: Ensaios realizados após a criação do protocolo, segundo as séries 1 e 5.

Para o presente trabalho foram considerados os resultados de cinco ensaios realizados em cada amostra utilizando corpos de prova retirados de correias transportadoras, revestimento de tambor e raspador recebidos da Vale (Tubarão), e da Protecote. Conforme indicações da Tabela 5 a seguir, os ensaios envolveram dois laboratórios de instituições distintas, TRICORRMAT – UFES e LFS – USP. Foram utilizados lixas de fornecedores diferentes, borracha padrão do mesmo fornecedor, porém de lotes diferentes, operadores distintos e máquinas de ensaios de fabricantes distintos, apresentando algumas diferenças de funcionamento e estruturas físicas entre elas.

Série	Período	Local	Equipamento	Lixa	Operador
1	09/11	TRICORRMAT	Veb Thüringer	3M	B
2	12/11	LFS	Maqtest	Polimate	A
3	04/12	LFS	Maqtest	3M	C
4	05/12	TRICORRMAT	Veb Thüringer	Polimate	C
5	05/12	TRICORRMAT	Veb Thüringer	3M	C
6	06/12	LFS	Maqtest	Polimate	A
7	06/12	LFS	Maqtest	3M	A
8	07/12	TRICORRMAT	Veb Thüringer	3M	A
9	07/12	TRICORRMAT	Veb Thüringer	Polimat	A
10	04/13*	LFS	Maqtest	Polimat	C

Tabela 5: Séries de ensaios analisados (*ensaio realizado após a defesa da dissertação).

3.1.1 Materiais poliméricos utilizados

Foram ensaiados pelos laboratórios quatro tipos de materiais de mesma fonte e natureza, enviados do porto de Tubarão pela VALE.

Os materiais recebidos são: três elastômeros (CUC, CNC, RTC) utilizados na composição das correias transportadoras e um poliuretano (PU) utilizando como raspador de correias, retirando o excesso de material impregnado na superfície da correia, contribuindo para o aumento da vida útil.

Na tabela abaixo, segue a legenda das abreviaturas dos materiais utilizados nos ensaios.

REFERÊNCIA	DESCRIÇÃO
CNC	Correia Transportadora Nova - Centro
CUC	Correia Transportadora Utilizada - Centro
RTC	Revestimento de Tambor - Centro
PU	Poliuretano
BP	Borracha Padrão

Tabela 6: Legenda dos termos abreviados de identificação dos materiais utilizados.

CUC

- Correia utilizada Centro.
- Dureza: 75 a 78 Shore A.



Figura 14: Superfície a ser ensaiada do material CUC.
Fonte: Pelo próprio autor, 2012.

RTC

- Revestimento do Tambor Centro.
- Dureza: 65 Shore A.



Figura 15: Superfície a ser ensaiada do material RTC
Fonte: Pelo próprio autor, 2012.

CNC

- Correia nova Centro.
- Dureza: 75 a 78 Shore A.



Figura 16: Superfície a ser ensaiada do material CNC.
Fonte: Pelo próprio autor, 2012.

PU

- Nenhuma informação encontrada; sabe-se apenas que é um poliuretano.



Figura 17: Superfície a ser ensaiada do material PU (brilhosa).
Fonte: Pelo próprio autor, 2012.



Figura 18: Parte posterior do material PU (opaca) e não ensaiada.
Fonte: Pelo próprio autor, 2012.

Dependendo das condições de fabricação, o poliuretano pode ser um polímero elastômero, termoplástico ou termofixo. Já as outras 4 amostras (CNC, CUC, RTC e Borracha padrão) são borrachas vulcanizadas, pertencentes à classe dos elastômeros

Borracha Padrão

- 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 [23].



Figura 19: Superfície a ser ensaiada do material Elastômero Padrão.
Fonte: Pelo próprio autor, 2012.

3.1.2 Método de ensaios

Todos os ensaios foram realizados conforme a norma [23] (sem rotação do corpo de prova, utilizando o método A), obedecendo a um protocolo de ensaios desenvolvido em conjunto com o LFS – USP e o TRICORRMAT – UFES (Item 3.3). No início da série de ensaios, alguns itens desse protocolo ainda estavam em discussão, o que pode ter ocasionado pequenas variações deste último.

Cada corpo de prova foi pesado antes e depois do ensaio, gerando resultados de perda de massa expressos em miligramas. A massa inicial e a massa final do corpo de prova foram determinadas por média de cinco pesagens, conforme o ítem 3.3.8 – iii.

A exceção da Série 2 (Tabela 5), em que foram ensaiados dez corpos de prova de cada material, nas demais séries foram apenas cinco corpos de prova ensaiados. Na série 1 não foram ensaiados corpos de prova de poliuretano. Os ensaios, realizados em ambos os laboratórios participantes, seguiram ordem aleatória aplicada ao conjunto de corpos de prova de todos os materiais.

Foram observadas diferenças no método de ensaio e de corte entre laboratórios em relação à máquina, a lixa, o operador e a ferramenta de corte.

i. Comparação entre máquinas Veb Thüringer e MaqTest

Os equipamentos utilizados para a realização dos ensaios de desgaste abrasivo em polímeros, mesmo que normatizados, divergem em pequenos itens, tais como:

1) Diâmetro do tambor do equipamento:

O da Veb Thüringer é inferior ao MaqTest, porém a distância total percorrida pela amostra se mantém inalterada entre os dois tipos de equipamentos.

2) Dinâmica do ensaio:

Na máquina Maqtest, o contato da amostra com a pista de deslizamento é permanente, sem ressaltos ou interferências no contato entre a lixa e o corpo de prova, enquanto que no equipamento de ensaio Veb Thüringer, a amostra dá um salto sobre uma barra metálica localizada no sentido longitudinal do tambor, utilizada para fixar a lixa, (Figura 20).

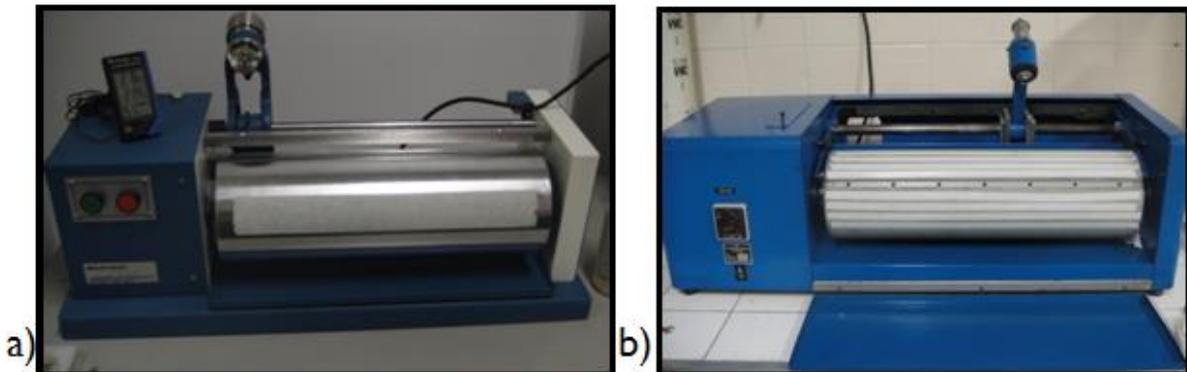


Figura 20: Imagem a) Máquina MaqTest e Imagem b) Máquina Veb Thüringer.
Fonte: Pelo próprio autor, 2012.

3) Método de fixação da amostra:

No equipamento de ensaios MaqTest, a fixação faz-se por um dispositivo do tipo “mandril”, evitando vibrações ou quaisquer movimentos das amostras durante ensaio. Já na máquina Veb Thüringer, a permanência da amostra no fixador faz-se por simples pressão do dispositivo sobre as suas bordas cilíndricas sem que haja qualquer tipo de influencia no aperto. De fato, o diâmetro interno do fixador é igual ao externo tolerável pela norma de ensaio (i.e. 15,8 mm), conforme o procedimento descrito no item 3.4.3.

No equipamento de ensaios Veb Thüringer, a fixação faz-se por contato de interferência sobre pressão. Este fato, combinado a um salto que o cabeçote de fixação realiza em cada volta dada pelo tambor, provoca em alguns casos certa trepidação. Assim o corpo de prova, ao invés de deslizar sobre a lixa acaba, realiza pequenos saltos. Tal comportamento interfere provavelmente nos mecanismos de desgaste.

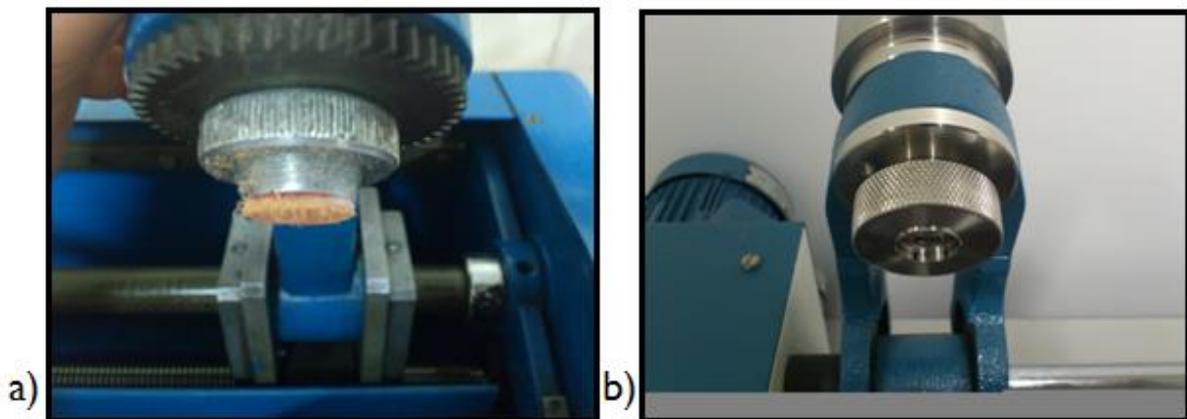


Figura 21: a) Sistema de fixação do TRICORMAT e b) Sistema de fixação do LFS.
Fonte: Pelo próprio autor, 2012.

ii. Comparação entre lixas 3M e Polimate

De maneira similar aos equipamentos, às lixas utilizadas para a realização dos ensaios, apesar de ambas possuírem as características de granulométrica especificadas na norma, foram adquiridas de fornecedores distintos.

O LFS utilizou lixas da Polimate (distribuidor de uma lixa fabricada pela empresa alemã Vitek) e o TRICORMAT utiliza lixas 3M.

Há também diferenças na resina para fixação dos abrasivos das lixas:

Na lixa Polimate é utilizada uma resina branca, enquanto, na 3M resina marrom. Nenhuma das duas foi caracterizada quimicamente.

A influência sobre o desgaste de parâmetros tais como, a distribuição de tamanho dos abrasivos, a dureza dos abrasivos, por exemplo, pode diferir entre as lixas. Assim esses

fatores foram considerados para reduzir a dispersão dos resultados entre o TRICORRMAT – UFES e LFS – USP.

iii. Comparação entre as ferramentas de corte

Apesar das diferenças em sua geometria externa quando comparada ao do TRICORRMAT, a ferramenta utilizada pelo LFS possui as mesmas tolerâncias, ângulo de corte e diâmetro interno para a confecção das amostras de acordo com a norma (Figura 22 e 23).



Figura 22: Imagens da ferramenta de corte utilizada pelo LFS – USP.
Fonte: Pelo próprio autor, 2012.



Figura 23: Comparação entre as ferramentas de corte, LFS – USP e TRICORRMAT – UFES.
Fonte: Pelo próprio autor, 2012.

Uma furadeira de bancada, modelo FB 13, foi disponibilizada pelo LFS - USP (Laboratório de Fenômenos de superfície), para o corte das amostras a serem ensaiadas.

Independentemente das diferenças existentes entre as máquinas de corte utilizadas em ambos os laboratórios, o procedimento para o corte foi o mesmo, tanto no LFS – USP quanto no TRICORRMAT – UFES, de acordo com as recomendações de corte em norma (seção 5.3 da ISO 4649).

3.2 Procedimento de ensaios

Foi elaborado um procedimento para a realização dos ensaios, objetivando atender todas as normas e recomendações relacionadas pela ISO 4649. O procedimento foi dividido em etapas, que serão apresentadas por um fluxograma a seguir (Figura 24):

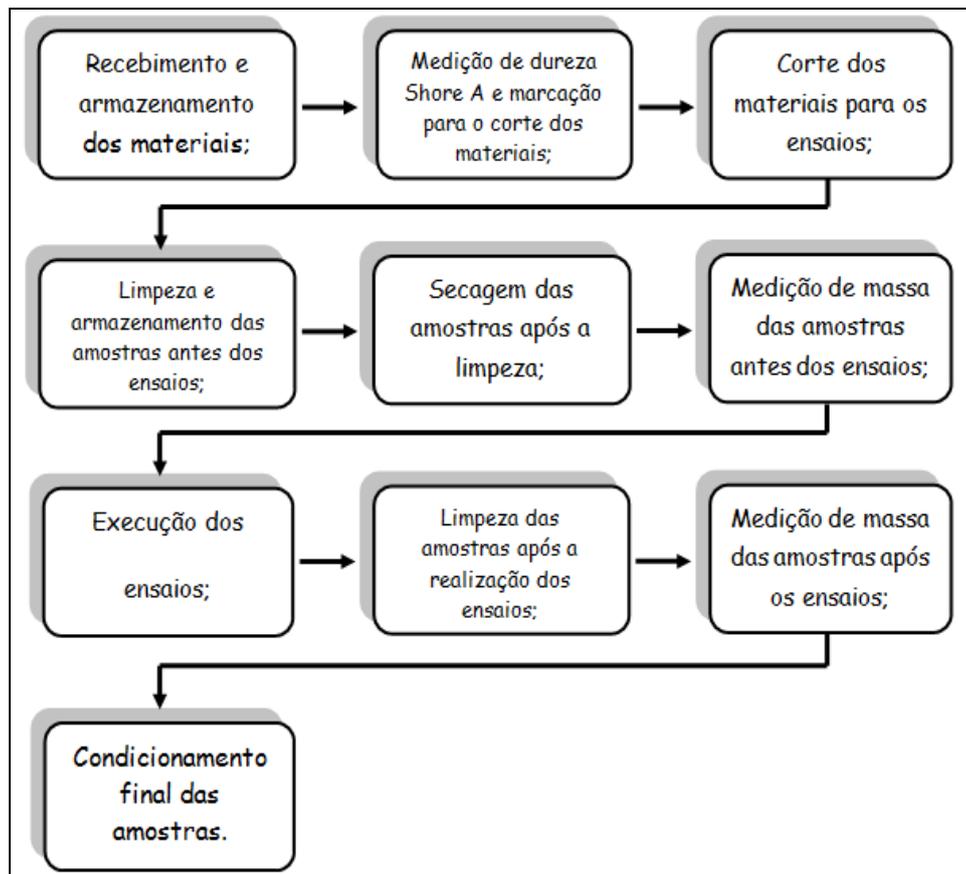


Figura 24: Fluxograma das etapas do procedimento elaborado.
Fonte: Pelo próprio autor, 2012.

No fluxo de ensaios acima demonstrado, a etapa de medição de dureza foi realizada apenas na borracha padrão, sendo que para os outros materiais utilizados no presente estudo, a dureza destes já foram medidas em um trabalho anterior em um projeto de graduação, conforme o que foi descrito na tabela 5 na série 2 [22].

Na etapa de limpeza das amostras, após a realização dos ensaios, foi identificado que a limpeza, com água corrente e a utilização de um desengordurante (detergente neutro), não era mais necessária, pois a variação da perda de massa com e sem limpeza apresentou uma variação a partir da quarta casa decimal após a vírgula.

3.2.1 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 [24].

3.2.2 Medição de dureza Shore A e marcação para corte dos materiais

Para a medição da dureza Shore A, foram tomadas as seguintes precauções para atender a norma [20] tais como:

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

As durezas foram medidas nas seguintes condições:

- Temperatura média da medição: $23,8 \pm 1$ °C;
- Umidade Relativa: 67 ± 5 % de umidade relativa.

Foram utilizados os seguintes equipamentos para a medição (disponibilizados pelo TRICORRMAT):

- Durômetro Digital para borracha Shore A da marca Politerm, modelo HT-6510[®];
- Termohigrômetro Digital da marca Minipa, modelo MT-240;
- Paquímetro Analógico da marca Starrett, modelo 125 MEB.

Além disso, a superfície a ser ensaiada foi marcada com uma caneta apropriada, sendo dividida em quadrados de 20 x 20 mm, com afastamento de bordas e imperfeições, de acordo com a norma. A dureza do centro de cada quadrado foi medida e armazenada [22].

i. Fatores que podem interferir na medição de dureza

Irregularidade no PU, com variações de espessura ao longo do comprimento e falta de paralelismo entre as superfícies do material (Figura 25).



Figura 25: Irregularidades geométricas do material PU.
Fonte: Pelo próprio autor, 2012.

Amostras CUC e CNC curvadas, apresentando falta de paralelismo entre a superfície ensaiada e o plano de apoio (Figura 26).



Figura 26: Material CUC curvado.
Fonte: Pelo próprio autor, 2012.

3.2.3 Corte dos materiais

Os materiais foram cortados de acordo com a norma [24]. 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.

- 1- 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 27). As dimensões da ferramenta de corte são apresentadas em desenho isométrico no anexo C.



Figura 27: Ferramenta de corte com o prolongamento do rasgo, para facilitar a retirada do corpo de prova.
Fonte: Pelo próprio autor, 2012.

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

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.

As amostras apresentaram boa cilíndricidade, conforme (Figuras 28).



Figura 28: Amostras de CNC e PU após corte.
Fonte: Pelo próprio autor, 2012.

3.2.4 Limpeza e armazenamento das amostras antes dos ensaios

Para eliminar contaminantes provenientes do processo de corte (sabão, impurezas superficiais e dentre outros) e preservar as propriedades dos polímeros, foi executado um plano de limpeza e armazenamento que consiste das seguintes ações:

- 1 Lavagem das amostras em água corrente utilizando detergente líquido neutro;
- 2 Limpeza das amostras durante 15 minutos em uma lavadora ultrassônica, modelo USC 1400, (as amostras foram imersas em um béquer de vidro contendo água destilada);
- 3 Secagem das amostras durante 30 segundos no soprador;
- 4 Permanência de 24 horas ao ar livre para evaporar o restante da água absorvida, vide (Figura 29).



Figura 29: Secagem das amostras ao ar livre.
Fonte: Pelo próprio autor, 2012.

- 5 As amostras permaneceram cerca de 20 horas num dessecador, modelo DCV040, para remover a umidade restante (após esta etapa, as amostras só foram retiradas do dessecador para a realização do ensaio).

A hipótese de secamento forçado com a utilização de um secador ou em estufa foi descartada, uma vez que a alta temperatura poderia acelerar o processo de degradação dos polímeros, alterar suas propriedades mecânicas e alterar os resultados dos ensaios.

Após o processo de limpeza, todas as amostras foram manuseadas com luva cirúrgica descartável ou com uma pinça de aço inoxidável. As amostras permaneceram fora do dessecador o menor tempo possível.

3.2.5 Medição da massa das amostras

Antes da realização dos ensaios, cada amostra foi medida em uma balança, da marca Sartorius, modelo CP225D, com precisão de 0,00001 g, presente no laboratório TRICORRMAT – UFES.

3.2.6 Execução dos ensaios

Primeiramente, a lixa de alumina com granulometria 60 da marca 3M, modelo 251 U, foi recortada nas medidas do cilindro da máquina de ensaio existente (Figura 30), 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. Foram utilizadas em ensaios iniciais braçadeiras de plástico para ajudar na fixação, que mais tarde foram substituídas de maneira satisfatória por fitas autocolantes dupla face.



Figura 30: Lixa fixada no tambor.
Fonte: Pelo próprio autor, 2012.

Posteriormente, as amostras foram colocadas no cabeçote da máquina (Figura 31), dentro do orifício indicado pela (Figura 32), e foram deslocadas até o fundo do orifício de tal forma que a superfície da amostra estivesse tangente à borda do orifício.



Figura 31: Cabeçote da máquina.
Fonte: Pelo próprio autor, 2012.



Figura 32: Orifício aonde a amostra será colocada.
Fonte: Pelo próprio autor, 2012.

Girando o tambor no sentido horário representado pela (Figura 31), o fuso existente no interior do cabeçote se movimenta e conseqüentemente movendo a amostra. A amostra é colocada de tal forma que a sua superfície a ser ensaiada esteja alinhada com a borda do orifício sem sobressair e ao realizar duas voltas completas, a amostra será deslocada em 2 mm, em relação à borda do orifício e o ensaio estará pronto para ser executado.

Ao ligar a máquina, um motor elétrico acoplado a uma polia gera um torque em um parafuso de rosca sem fim (Figura 33). 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 36). Já a engrenagem número 2 é responsável pelo movimento rotacional do tambor. O movimento do cabeçote e do tambor pode ser observado na (Figura 34).

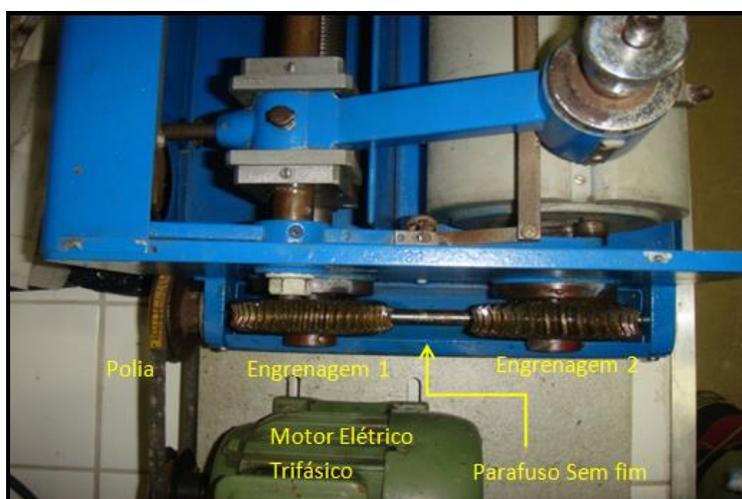


Figura 33: Mecanismo da máquina de abrasão [28].

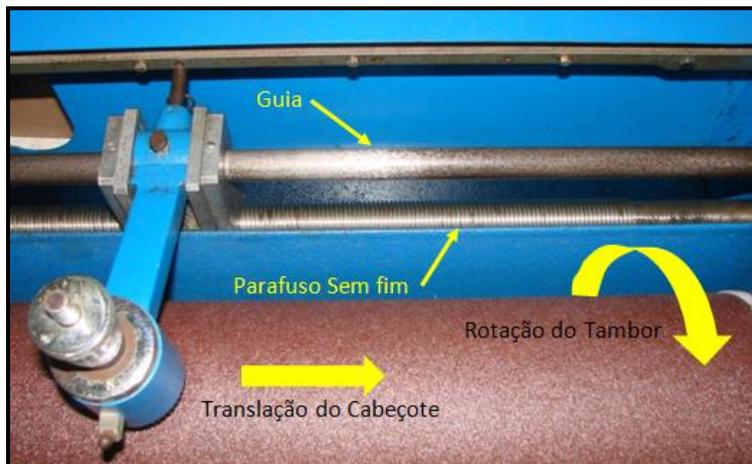


Figura 34: Parafuso sem fim e guia do cabeçote [28].

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 PU foi fotografado (Figura 35).

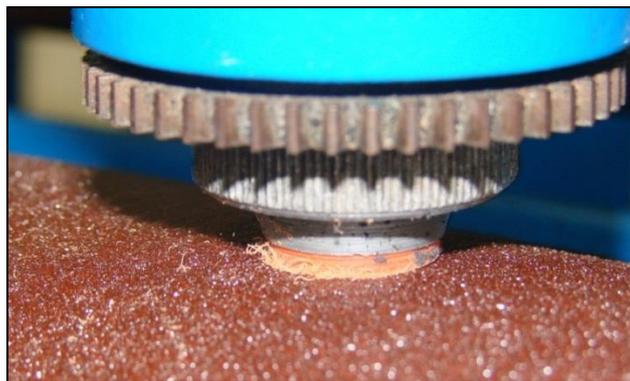


Figura 35: Ensaio de uma amostra de PU.
Fonte: Pelo próprio autor, 2012.

Após a execução do ensaio, a amostra deve ser retirada sem danificar a superfície ensaiada. Um pino acima do tambor (Figura 31) regula um êmbolo na parte interna do cabeçote (Figura 36). Ao ser pressionado, a amostra é impulsionada pelo êmbolo e ejetada do cabeçote.

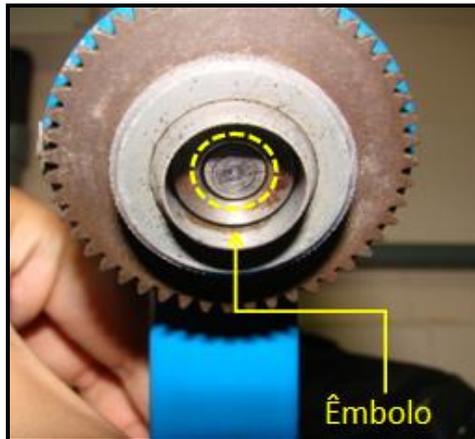


Figura 36: Êmbolo responsável pela ejeção da amostra.
Fonte: Pelo próprio autor, 2012.

Três amostras de borracha padrão são retiradas do dessecador e ensaiadas. Os ensaios dos polímeros de teste só podem ser realizados se a perda de massa de cada amostra do elastômero padrão nos três ensaios for 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 20 amostras), lembrando que a cada 10 ensaios é verificado a abrasividade da lixa com 3 amostras de borracha padrão.

3.2.7 Limpeza das amostras após os ensaios

A limpeza das amostras após o ensaio seguiu o mesmo procedimento adotado no item 3.4.4, com cautela para não danificar a superfície desgastada.

3.2.8 Limpeza da lixa durante os ensaios

Durante os ensaios, tanto no TRICORRMAT – UFES (com a lixa 3M) quanto no LFS – USP (com a lixa Polimat), foi realizado a limpeza da lixa, com o auxílio de uma escova com cerdas de nylon, após cada material ensaiado a fim de evitar a impregnação de debris na lixa. Admitindo a hipótese da não realização de limpeza da lixa, as amostras ao serem ensaiadas poderiam deslizar tanto contra as asperidades da lixa, quanto sobre os próprios debris, contribuindo provavelmente para um valor de desgaste alterado para esse tipo de ensaio.

3.2.9 Medição de massa final

A medição da massa final foi feita seguindo o mesmo procedimento adotado pelo item 3.2.5.

3.2.10 Armazenamento das amostras

As amostras foram armazenadas conforme procedimento adotado no item 3.2.4.

3.2.11 Condicionamento final das amostras

As amostras de cada material foram colocadas em sacolas plásticas e armazenadas conforme procedimento item 3.2.4.

3.3 Protocolo de ensaios estabelecido entre o TRICORRMAT – UFES e LFS – USP

O presente item descreverá todos os procedimentos adotados em protocolo para a obtenção dos resultados, após vários ensaios inter e intralaboratoriais, estabelecido em comum acordo entre os laboratórios TRICORRMAT – UFES e LFS – USP, com o intuito de reduzir a dispersão dos resultados por influências das variáveis controláveis identificadas no processo de ensaio.

3.3.1 Escopo

O presente Protocolo complementa procedimentos definidos pela Norma ISO 4649 para a execução do ensaio de abrasão de polímeros, também conhecido como "Ensaio DIN".

Este Protocolo foi estabelecido de comum acordo pelo Laboratório de Fenômenos de Superfície da Escola Politécnica da USP e pelo TRICORRMAT da UFES e os operadores de ambas as instituições foram guiados pelo mesmo na execução do ensaio em questão. O detalhamento de procedimentos aqui apresentado tem por objetivo a redução de dispersão de resultados interlaboratoriais.

3.3.2 Caracterização do material

i. Identificação de origem (códigos)

Ao receber ou dividir as amostras recebidas, as mesmas devem ser identificadas conforme sua origem e tipo de material, de preferência de maneira permanente.

ii. Posição de extração de Corpos de prova em relação à amostra como um todo (borda, centro etc.)

A retirada do material deve ser feita preferencialmente nas extremidades dos materiais (por conveniência) para evitar diferenças significativas das propriedades físicas e mecânicas das amostras.

3.3.3 Propriedades

A medição da densidade deve ser feita segundo uns dos métodos da norma **ISO 1183**. A medição da dureza deve ser feita segundo a norma **ASTM D2240**.

A medição da tensão de ruptura pode ser feita segundo a norma **ASTM D412**. A análise química do material pode ser feita segundo a norma **ASTM D297**.

As condições de armazenamento e de ensaios devem seguir a norma **ISO 23529**.

3.3.4 Posição de ensaio (identificação de extremidade testada)

Uma das extremidades do corpo de prova será submetida aos mecanismos de desgaste enquanto que a outra deve ser marcada, de preferência com um método permanente, para não ocorrer equívocos.

3.3.5 Método de extração de corpos de prova

i. Corte dos Corpos de Prova: lubrificação, velocidade, força aplicada;

O corte do Corpo de Prova deve ser feito com lubrificação, velocidade, avanço e força de corte constante.

A lubrificação deve ser feita com água, em quantidade suficiente para o não aquecimento do material cortado e da ferramenta de corte.

A velocidade de corte dependerá do material cortado, devendo ser selecionada entre 300 e 600 rpm através de testes.

Avanço e força de corte dependem do operador, que deverá procurar mantê-los o mais constante possível para evitar a deformação das amostras.

ii. Ferramenta utilizada: afiação e ângulo de corte

A ferramenta de corte deve ser de aço ABNT 4340, com afiação e ângulo de corte definidos pela norma ISO 4649 e conforme desenho anexo C. Durante o corte, e em função do avanço, levantar a ferramenta a intervalos periódicos para promover o seu resfriamento.

iii. Dimensões

Os corpos de prova devem possuir dimensões constantes requeridas pela norma sobre uma altura mínima de 2mm.

3.3.6 Preparação dos Corpos de Prova

i. Limpeza

A limpeza das superfícies dos corpos de prova deve ser feita mecanicamente com água e sabão, seguida de enxágue com água corrente. Não remover partes do corpo de prova que, embora com aparência de debris, estejam solidárias ao mesmo.

ii. Secagem

Após a limpeza da amostra, retirar um pouco do excesso da água balançando-a. Colocar a amostra em ambiente aberto ao ar livre (laboratório), com a face a ser ensaiada disposta contra uma folha de papel absorvente. Com o auxílio de um secador de ar frio, secar durante 30 segundos cada face da amostra.

iii. Retirada de pelos e/ou materiais aderidos

A retirada dos materiais aderidos deve ser feita com cuidado, de preferência com uma pinça livre de materiais que possam interferir nos resultados, a fim de não retirar parte ou pedaços do material a ser ensaiado.

iv. Tempo de estabilização antes dos ensaios

Após a secagem, deixar as amostras expostas ao ambiente do laboratório durante um período de 24 horas. Após esse tempo foi verificado que não houve variação da massa devido à umidade presente nas amostras.

3.3.7 Execução do ensaio

i. Lixa: fornecedor padrão, colocação, espaçamento do tambor sem lixa ("gap")

O fornecedor da lixa deve ser o mesmo em todos os ensaios, para minimizar erros decorrentes do material abrasivo. Se possível usar sempre lixas do mesmo lote. A colocação e o espaçamento do tambor dependem do tipo de equipamento utilizado, devendo ser respeitado o procedimento mais adequado a cada equipamento.

ii. Verificação de rotação do motor/frequência da rede

Antes do início dos ensaios fazer um teste para verificar a velocidade de rotação do motor, uma vez que todo o ensaio depende dessa velocidade. Uma alteração nesse parâmetro pode trazer alterações nos resultados do ensaio.

iii. Condições da sala de ensaios: temperatura, umidade relativa

A temperatura e a umidade relativa do ambiente em que é realizado o ensaio devem ser registradas, quando não for possível controlar tais condições. Sempre que possível executar séries de ensaios em sequência e em períodos de tempo curtos para minimizar os efeitos das variáveis temperatura e umidade relativa.

iv. Força normal aplicada aos Corpos de Prova durante o ensaio

Uso de 5 N para borrachas com (Grau Internacional de Dureza da Borracha) IRHD<40.

Uso de 10 N para os outros materiais.

v. Cegamento: material do pino

Para o cegamento da lixa padrão devem ser usados pinos de Aço 1010-1020 com as mesmas dimensões dos corpos de prova, com uma carga não superior a 5N.

vi. Ensaio com borracha padrão intercalado a com outros ensaios (cf. Norma)

A cada 10 ensaios deve ser feito um teste com a borracha padrão e verificar se a perda de massa está dentro do previsto. Caso necessário diminuir a abrasividade da lixa ou trocá-la por outra. Deverão ser executados três ensaios com a mesma borracha padrão, assegurando que a amostra seja colocada de maneira idêntica em cada um deles. Se a redução de perda de massa da borracha padrão for superior a 10%, o método não é validado.

vii. Aleatorização

Fazer ensaios escolhendo aleatoriamente o tipo de material do corpo de prova, para diminuir possíveis efeitos de perda de abrasividade da lixa pelo uso seguido de um dado material nos resultados.

viii. Limpeza da lixa

Não usar aspirador, pois há ineficiência na limpeza dos materiais aderidos na lixa.

Não usar ar comprimido, pois os materiais eventualmente contidos no ar (água, debris, pós, etc.) podem interferir no ensaio. Usar uma escova, de preferência com cerdas de piaçava, para limpar (retirar materiais aderidos) a lixa após o ensaio e verificar que todos os debris tenham sido eliminados da superfície da lixa. Após ensaios de materiais com tendência a “entupir” os espaços entre grãos de abrasivo (“smearing”), fazer um ensaio com borracha padrão logo em seguida para limpar a lixa.

3.3.8 Retirada dos Corpos de Prova

i. Uso de luva/pinça

Usar luvas e/ou pinças para manipular as amostras, para evitar contaminações com corpos estranhos e/ou gorduras.

ii. Limpeza de debris aderidos às amostras

Os debris soltos deverão ser removidos apenas com o uso de pincel.

iii. Pesagem

A pesagem deve ser feita em balança analítica com precisão de 0,1 mg, com pelo menos 5 repetições de uma mesma medida de massa, para fornecer uma base estatística sólida.

3.3.9 Apresentação de resultados/Relatório

i. Índice de abrasividade: perda de massa x volume

Os resultados devem ser apresentados no formato: volume desgastado ou perda de volume e índice de abrasividade.

A perda relativa de Volume (ΔV_{rel}) é definida como:

$$\Delta V_{rel} = \frac{\Delta m_t \times \Delta m_{const}}{\rho_t \times \Delta m_r}$$

Equação 1: Perda relativa de volume.
Fonte: ISO 4649

Onde:

Δm_r = perda média do material de referência.

Δm_t = perda média de massa do material ensaiado;

Δm_{const} = definido como 200mg para o método A;

ρ_t = densidade do material ensaiado;

Índice de abrasividade (ARI): é uma comparação entre as resistências à abrasão de um material de referência e de uma borracha, e é obtido conforme método A da norma ASTM D 5963. Ele é definido como:

$$ARI = \frac{\Delta m_r \times \rho_t}{\Delta m_t \times \rho_r} \times 100$$

Equação 2: Índice de abrasividade.

Fonte: ISO 4649

ρ_r = densidade do material de referência.

ii. Medição de densidade

A medição deve ser feita com um pequeno corpo de prova pelo método de Arquimedes, com seu respectivo erro associado. O método geométrico pode ser empregado a título de comparação.

iii. Valores numéricos (algarismos significativos)

Os valores e algarismos significativos dependem da precisão de equipamentos que possuem a capacidade de medir ou aferir tais valores e eventuais erros aleatórios e sistemáticos. Os resultados deverão ser apresentados de forma que reflita tais observações.

iv. Parâmetros estatísticos (repetições, média, desvio padrão)

No mínimo 5 repetições das medidas das massas, com cálculo de médias e desvios padrões. Cálculo do erro na densidade e cálculo do erro total das medidas.

v. Fotografias

Apresentar fotografias com boa resolução da superfície do polímero, antes e depois da realização do ensaio.

3.3.10 Repetibilidade e Reprodutibilidade

A fim de ter uma base de comparação dos resultados inter e intralaboratório, usaremos os valores dos parâmetros estatísticos da norma:

Taxa de desgaste ($10 \times \text{mm}^3/\text{m}$)	Interlaboratorial	Intralaboratorial
	(r)	(R)
17	9,6	27,6
26,5	10,2	20,2
40	14,5	19,0
64,3	11,8	22,4
86,3	11,5	24,1

Figura 37: Valores de repetibilidade e reprodutibilidade, adaptado da ISO 4649 em função da taxa de desgaste.

Onde:

(r) - é a repetibilidade em %;

(R) - é a reprodutibilidade em %.

4 Resultados e Discussão

Após a identificação dos parâmetros de variabilidade dos ensaios, foram correlacionados os valores de taxa de desgaste com cada uma das variáveis identificadas como sendo:

- Máquina
- Lixa
- Operador

Nessa seção serão abordados os resultados intra e interlaboratoriais além da medição de alguma das propriedades dos materiais.

4.1 Dureza

As durezas foram medidas conforme procedimento descrito no item 3.3.2. Os resultados obtidos podem ser verificados na (Figura 38).

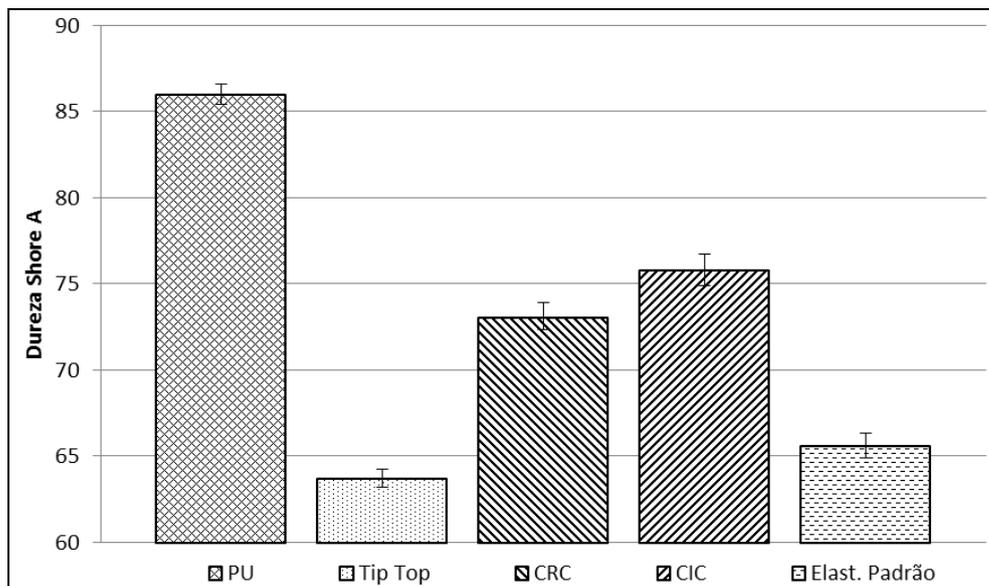


Figura 38: Durezas médias e desvio padrão da dureza para cada material [18].

Medições adicionais de dureza da borracha padrão foram efetuadas, nos lotes do TRICORRMAT e LFS, para:

- Conferir as informações do fornecedor com as especificações de dureza fornecida pela norma ISO 4649 (60 Shore A \pm 3);

- Reduzir dúvidas de correlação entre a variação da dureza superficial da borracha padrão com o desgaste (Figura 39).

Foram utilizados corpos de prova retirados de duas mantas de borracha padrão utilizadas pelo LFS (USP) – Lote CETEPO MR3-AB-1-2010A Certificado No. 771/10 – e pelo TRICORRMAT (UFES) – Lote CETEPO MR3-AB-1-2010B - ambas fornecidas por: CETEPO – Centro Tecnológico de Polímeros.

As mantas foram marcadas com linhas para definir posições dos corpos de prova, posteriormente selecionados de forma aleatória (Figura 39).

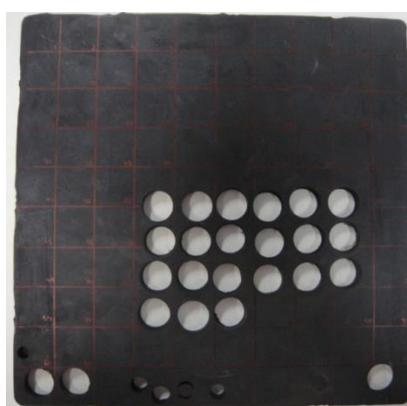


Figura 39: Marcação de área para corte

Todos os corpos de prova tiveram sua dureza medida com medidor Kori Seiki No. De Série 033117.

Foram obtidos os seguintes resultados para a dureza Shore A dos corpos de prova de borracha padrão do lote utilizado no TRICORRMAT e do lote utilizado no LFS, conforme a tabela 7 abaixo.

Borracha padrão LFS		Borracha padrão TRICORRMAT	
Identificação do CP	Dureza Shore A	Identificação do CP	Dureza Shore A
BP01	58	BPT01	65
BP03	62	BPT02	64
BP33	64	BPT03	65
BP34	64	BPT04	65
BP47	62	BPT05	65

Tabela 7: resultados para a dureza Shore A dos corpos de prova.

Os valores médios obtidos nos laboratórios TRICORRMAT e LFS foram respectivamente 65 Shore A e 62 Shore A \pm 2.

4.2 Densidade

Os valores de densidade dos materiais utilizados foram medidos e apresentados na tabela 8, utilizando o princípio de Arquimedes, conforme ISO 1183-1.

DENSIDADES	[g/cm ³]
CUC	1,1447
CNC	1,1331
PU	1,0965
RTC	1,1541

Tabela 8: Tabela de densidade dos materiais.

4.3 Resultados intralaboratoriais

Os resultados foram correlacionados apenas com as variáveis, lixas e operadores, já que a máquina não foi item de variação para os ensaios intralaboratoriais.

4.3.1 Borracha Padrão

Na série 3 da tabela 5, a borracha padrão foi ensaiada várias vezes (Figura 40), com os dois lotes fornecidos pelo mesmo fabricante, a fim de verificar se a variação de dureza possuía influência na taxa de desgaste.

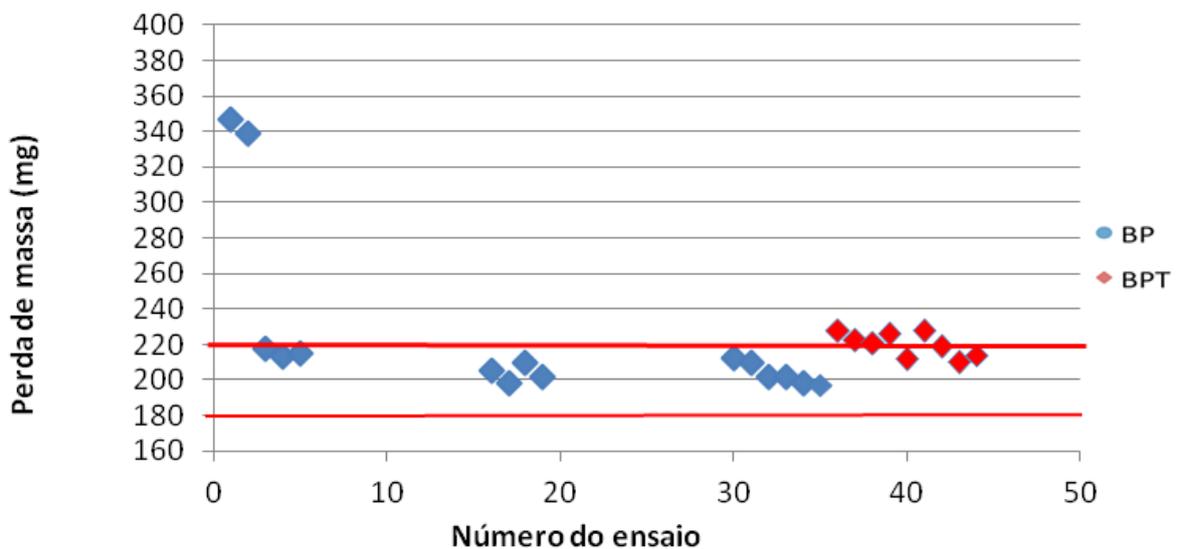


Figura 40: Valores de perda de massa da borracha padrão (TRICORRMAT e LFS).

É possível identificar que os resultados dos ensaios realizados com o lote do LFS (pontos azuis) permaneceram dentro do intervalo já os do TRICORRMAT (pontos vermelhos) oscilaram entre o valor máximo do intervalo admissível pela ISO 4649 para validação dos ensaios. Os dois pontos extremos à esquerda (Figura 40) de maior perda de massa representam os ensaios de verificação do grau de abrasividade da lixa antes do procedimento de cegamento.

A diferença de desgaste entre as borrachas padrão do TRICORRMAT e LFS pode ser proveniente da diferença dos lotes de borracha padrão. Essa variação pode ser mais um elemento de dispersão nos resultados, dificultando a comparação dos resultados entre os laboratórios que utilizam lotes diferentes.

4.3.2 Resultados da taxa de desgaste obtidos pelo operador C

O gráfico abaixo apresenta a taxa de desgaste em função da variação dos parâmetros máquina e lixa e mantendo fixo o operador C.

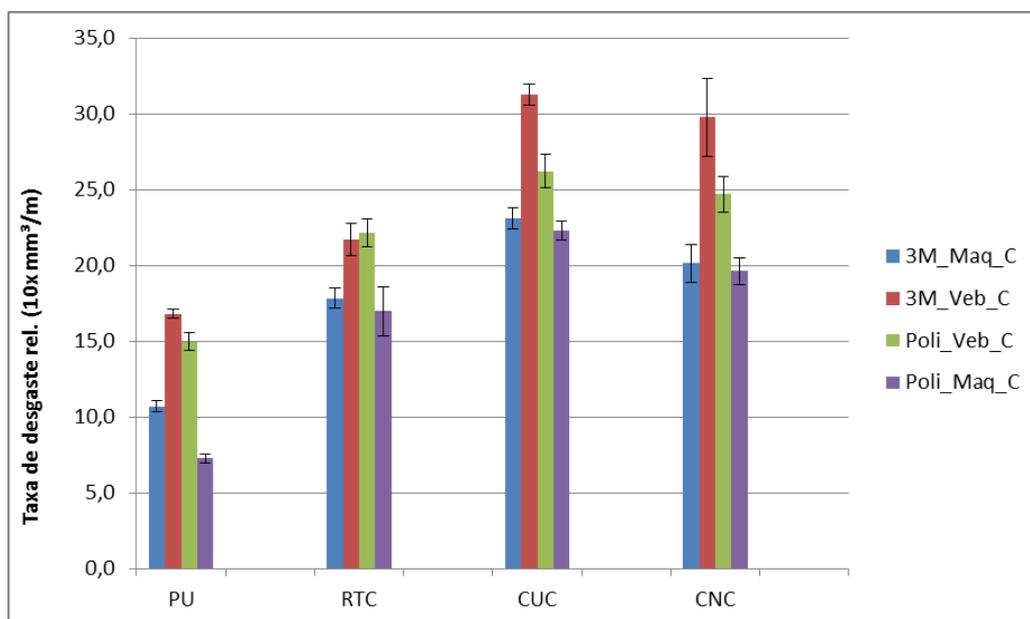


Figura 41: Ilustração para cada material da taxa de desgaste.

Os valores de taxa de desgaste levaram em consideração as diferenças de abrasividade da lixa entre as séries de ensaios, conforme o item 3.3.9 do protocolo estabelecido em comum acordo entre os laboratórios.

A partir do gráfico é possível observar que:

- A tendência de desgaste se mantém para todas as séries de ensaios;
- A lixa possui grande influência nos valores absolutos dos resultados (3M-Veb / Poli – Veb);
- A máquina Veb possui caráter mais severo que a Maq;
- Os valores de coeficiente de variação foram similares para todas as séries de ensaios (Figura 42).

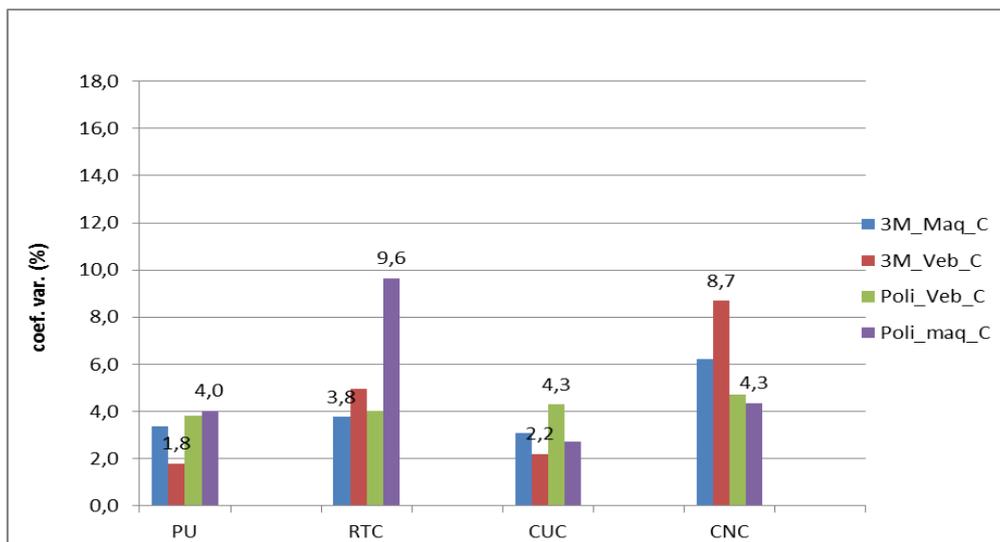


Figura 42: Ilustração para cada material do maior e menor coeficiente de variação.

4.3.3 Resultados da taxa de desgaste obtidos pelo operador A

A seguir serão apresentados os resultados obtidos no LFS – USP.

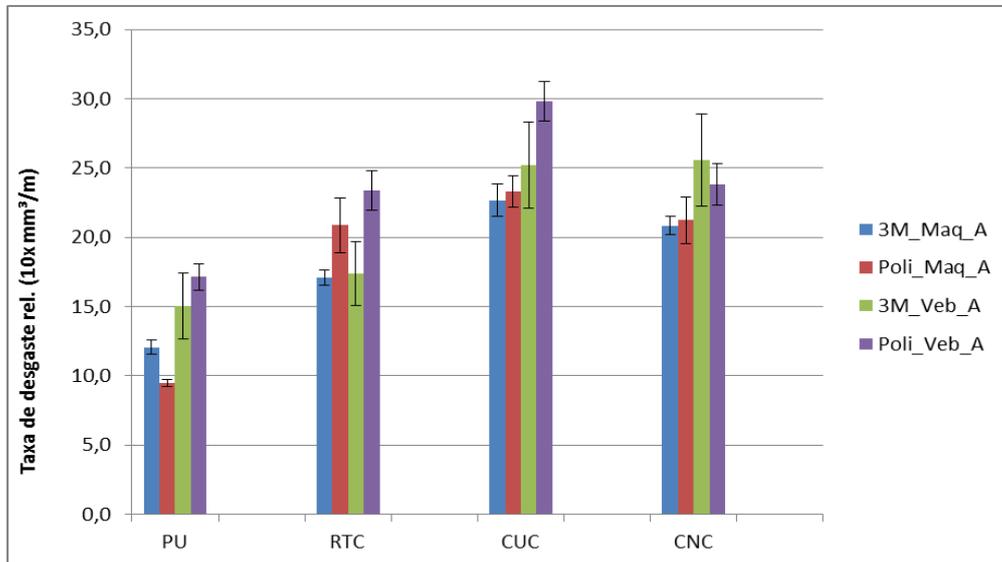


Figura 43: Ilustração para cada material da taxa de desgaste.

A partir do gráfico é possível observar que:

- A tendência de desgaste se mantém para todas as séries de ensaios;
- A série de ensaio 3M – Veb apresentou um alto coeficiente de variação dos resultados (Figura 44).

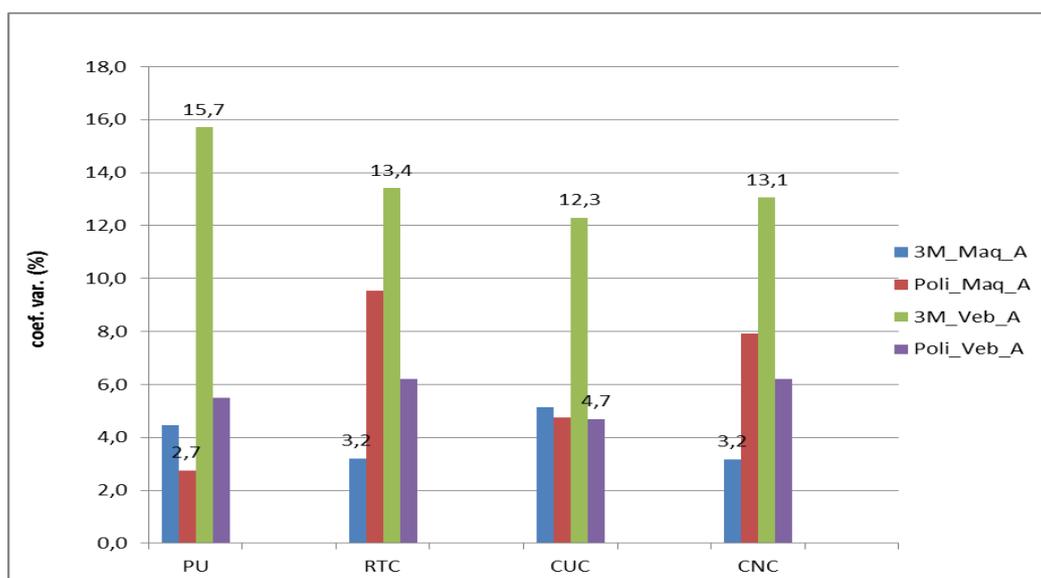


Figura 44: Ilustração para cada material do maior e menor coeficiente de variação.

Uma das hipóteses para esse alto coeficiente de variação pode ser devido à falta de prática na utilização do equipamento Veb Thüringer, devido a sua complexidade de operação, combinado a utilização da lixa 3M que possui um comportamento mais abrasivo do que a Polimat.

A partir dessas observações, os parâmetros dos ensaios citados no início do item 4 serão correlacionados a seguir.

4.3.4 Correlação de variáveis do ensaio

A tabela abaixo apresenta os resultados oriundos de uma matriz básica de correlação obtida por um software de estatística (Estatistic 7). Nesta matriz, foram alocados nas linhas os valores das variáveis estudadas e o respectivo valor da taxa média de desgaste relativo, por exemplo, para o polímero CUC ensaiado na máquina Maqtest com a lixa 3M pelo operador A, o resultado de taxa média de desgaste relativo foi aproximadamente 20,8.

Este valor de desgaste é correlacionado com os demais 31 valores (a matriz tem 32 linhas e 5 colunas) e os seus respectivos conjunto de variáveis e, como resultado, tem-se o grau de correlação entre uma variável e as demais. Assim, para a variável média, a correlação com a máquina foi de 0,4259, com o operador foi de 0,0968, com a lixa foi de 0,1134 e negativa com o material.

Na mesma tabela são indicados os valores do nível de significância p , medem. Quanto maior o nível p , menos se pode acreditar que a relação observada entre as variáveis na amostra seja um indicador confiável da relação entre as respectivas variáveis na população. Especificamente, o nível p representa a probabilidade de erro que está envolvida em aceitar os resultados observados como válidos, isto é, como "representativos da população." Por exemplo, o nível p de 0,05 (i.e., 1/20) indica que existe 5% de probabilidade de que a relação entre as variáveis encontrada em nossa amostra seja um "acaso".

Para os resultados observados na tabela 9, apenas a variável máquina tem uma correlação com a variável média com significância estatística. Em outras palavras.

As variações observadas nos valores de taxa média de desgaste relativo são mais influenciadas pelo tipo de máquina com 95% de confiabilidades.

	MEDIA	MAQUINA	OPERADOR	LIXA	MATERIAL
MEDIA	1.0000 p= ---	0.4259 p=.024	0.0968 p=.624	0.1134 p=.565	-0.2906 p=.134
MAQUINA	0.4259 p=.024	1.0000 p= ---	0.1667 p=.397	0.1667 p=.397	-0.0000 p=1.00
OPERADOR	0.0968 p=.624	0.1667 p=.397	1.0000 p= ---	-0.1667 0	0 p=1.00
LIXA	0.1134 p=.565	0 p=.397	-0.1667 0	1.0000 p= ---	0.0000 p=1.00
MATERIAL	-0.2906 p=.134	-0.0000 p=1.00	-0.0000 p=1.00	0.0000 p=1.00	1.0000 p= ---

Tabela 9: Resultados oriundos de uma matriz básica de correlação.

A partir deste resultado, será realizada uma avaliação de o quanto cada variável se afasta do comportamento teórico. Deste modo, as linhas de tendência foram forçadas a passar pela origem e, neste caso, se o coeficiente angular for igual a unidade, os dados experimentais estariam sendo explicados pela condição teórica, reta de regressão $y = x$, onde nenhum dos fatores teria efeito na taxa de desgaste.

O valor de R^2 indica a linearidade entre os pontos cartesianos de ordenada e abscissa quaisquer. Quando o r^2 tende para 1, esses pontos cartesianos perfazem a linearidade absoluta. Quando o r^2 tende à zero, não há linearidade entre as quantidades que representam a abscissa e a ordenada.

i. Operador

A figura a seguir mostra a influência do operador, cada ponto corresponde a um valor médio obtido para um tipo de material desgastado pela mesma lixa na mesma máquina.

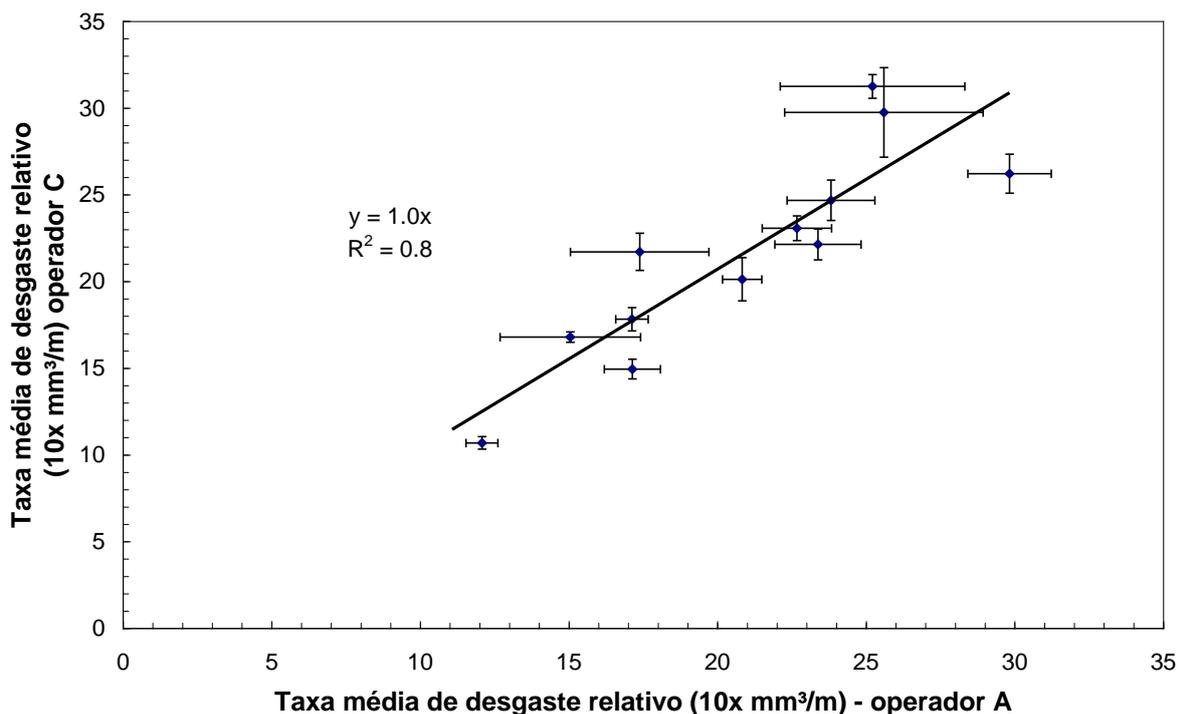


Figura 45: Influência da variável operador. Taxa média de desgaste relativo.

A partir dos valores do coeficiente de determinação e da equação da reta, foi possível observar que os valores medidos de taxa média de desgaste pelos diferentes operadores A e C apresentam a mesma tendência de variação e que cerca de 80% dos valores médios seriam explicados pela reta teórica. A partir desses valores, pode ser concluído que o parâmetro operador não exerceu influência significativa nos valores de desgaste.

No entanto, é sempre razoável representar os mesmos resultados através de uma nuvem de pontos para avaliar se a tendência é a mesma, ou se a utilização de valores médios implicou num acaso. A equação da reta mostra que o coeficiente angular é próximo de um, porém o coeficiente de determinação diminuiu. De qualquer modo o parâmetro operador apresenta a mesma tendência de variação e entre 70 e 80% dos dados experimentais seriam explicados pela reta teórica, ou seja, 20 a 30% são aleatórios.

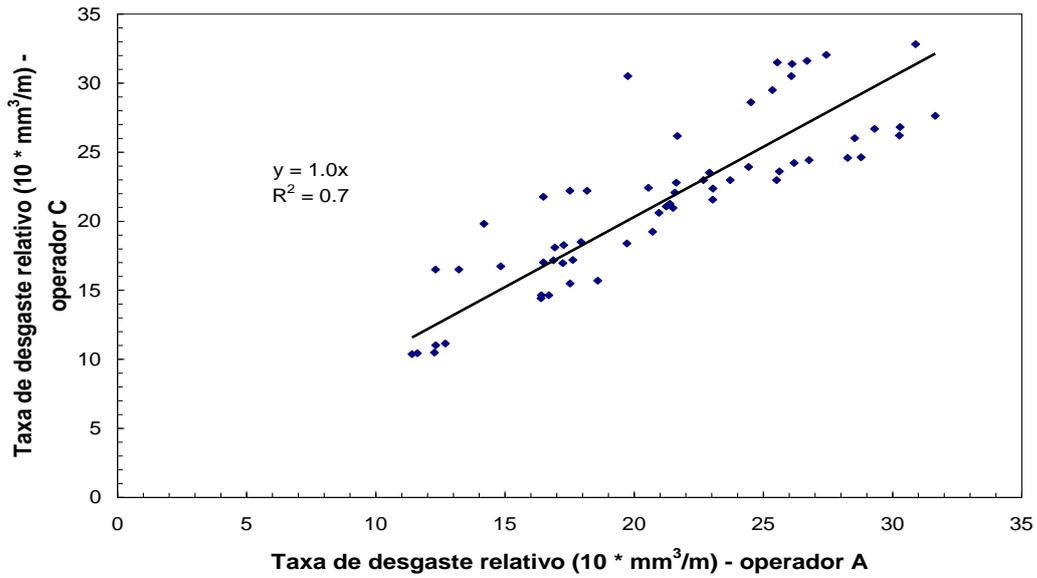


Figura 46: Influência do parâmetro operador. Taxa de desgaste relativo.

ii. *Lixa*

A figura 47 a seguir mostra a influência do tipo de lixa, onde cada ponto corresponde a um valor médio obtido para um tipo de material desgastado na mesma máquina manuseada pelo mesmo operador.

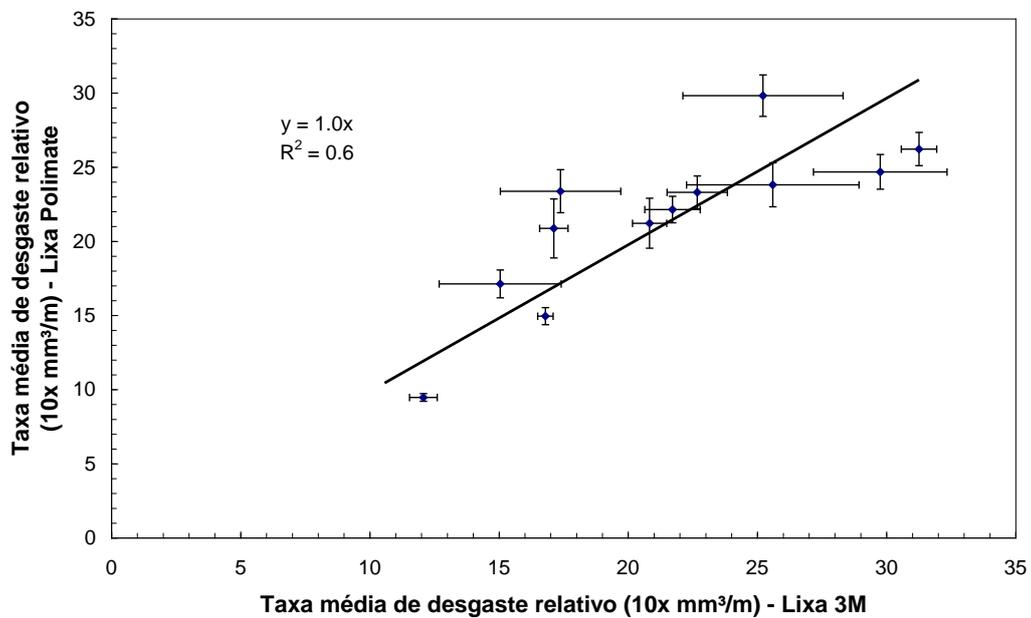


Figura 47: Influência do parâmetro lixa. Taxa média de desgaste relativo

Também para o parâmetro lixa, os dados médios se aproximam da reta teórica, no entanto o percentual de dados explicados é de 60%, (Figura 47). O mesmo resultado é obtido quando se utiliza os dados individualmente, (Figura 48).

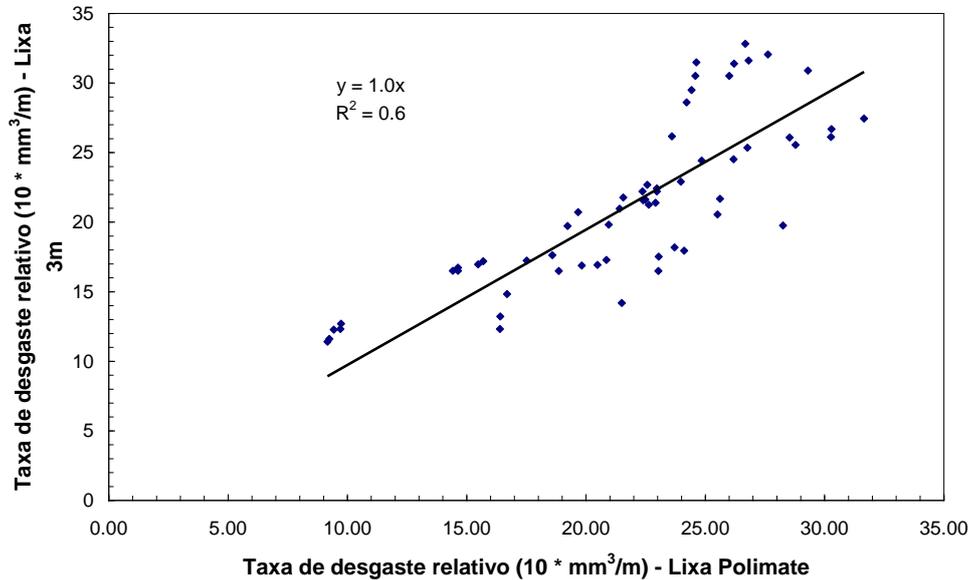


Figura 48: Influência do parâmetro lixa. Taxa de desgaste relativo.

iii. Máquina

A figura 49 a seguir mostra a influência da variável máquina, cada ponto corresponde a um valor médio obtido para um tipo de material desgastado pela mesma lixa sendo a máquina manuseada pelo mesmo operador.

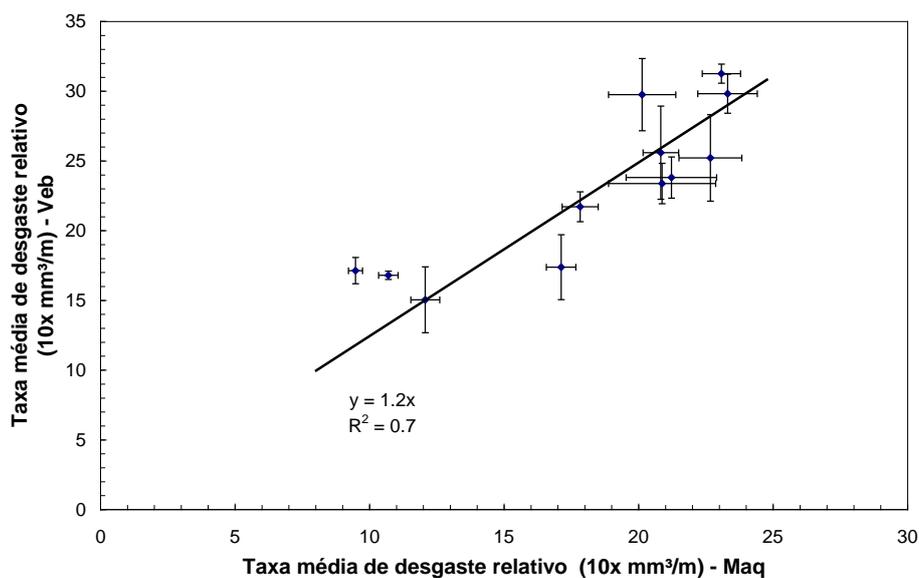


Figura 49: Influência do parâmetro máquina. Taxa média de desgaste relativo.

O fato do coeficiente angular da reta obtida para os valores médios ser diferente da unidade indica que a tendência de variação dos pontos não segue a reta teórica, $y = x$, isto também é observado quando se utiliza uma dispersão com todos os pontos (Figura 50).

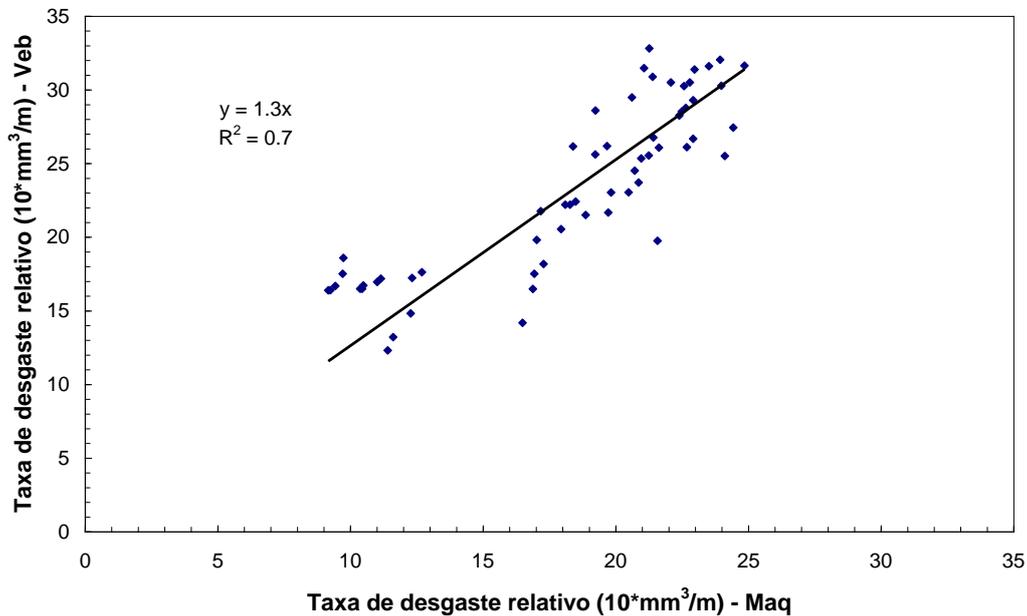


Figura 50: Influência do parâmetro máquina. Taxa de desgaste relativo.

4.4 Resultados interlaboratoriais

Os resultados desse item estão correlacionados apenas com a máquina, como sendo o principal parâmetro de variação.

4.4.1 Reprodutibilidade

Os valores de reprodutibilidade abaixo foram calculados de acordo com a referência [25], do item 3.

Taxa média de desgaste rel. (10x mm³/m)	PU	RTC	CUC	CNC
(R)min	13,7	20,1	25,9	23,7
(R)max	15,5	8,9	9,2	11,6
(R) limite ISO 4649	39,4	19,7	22,7	25,8
	∅	24,6	21,0	22,0

Tabela 10: Valores de reprodutibilidade em (%).

Os valores limites correspondentes às taxas de desgaste médias relativas foram calculados interpolando os valores limites disponíveis pela norma.

O valor representado por (\emptyset) para o material PU, é devido ao fato de que em norma ASTM não há nada especificado para valores de taxa de desgaste médio inferiores a 17 ($10 \times \text{mm}^3/\text{m}$), portanto, não se pode afirmar nada a respeito de valores inferiores.

5 Conclusão

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

- A variação de dureza da borracha padrão não apresentou correlação com a taxa de desgaste, e foi constatado que a borracha padrão utilizada como material de referência atendia às especificações para os ensaios segundo a ISO 4649;
- O protocolo estabelecido em comum acordo entre os laboratórios contribuiu para reduzir a influência dos parâmetros nos resultados de desgaste;
- O parâmetro tipo de máquina dentre os outros parâmetros foi o que exerceu maior influência nos resultados dos ensaios;
- A repetibilidade (r) ou coeficiente de variação encontrado de forma intralaboratorial, foi individual para cada série de ensaios conforme a tabela 5 e não entre as mesmas condições em séries distintas;
- Os valores calculados de reprodutibilidade, comparados com os da norma ISO 4649, para os materiais CNC e CUC ficaram um pouco acima dos valores críticos máximos da norma e o RTC ficou abaixo do valor crítico.

Para o caso do PU, não é possível correlacionar o valor de reprodutibilidade encontrado, pois em norma não há nada especificado para valores inferiores a 17 ($10 \times \text{mm}^3/\text{m}$) de taxa de desgaste.

6 Bibliografia

- [1] **M.G.GEE**; "VAMAS Report: Towards standartization for friction and wear testing"; Tribology international; **1993**.
- [2] **I.R. SARE, J.I. MARDEL and A.J. HILL**; "Wear-resistant metallic and elastomeric materials in the mining and mineral processing industries—an overview" **2001**.
- [3] **D.J.T. HILL, U. M.I. KILLEEN, J.H. O'DONNELL, P.J. POMERY, D. St JOHN, A.K. WHITTAKER**, "Laboratory wear testing of polyurethane elastomers", **1997**.
- [4] **S. W. ZHANG**, "State-of-the-art of polymer Tribology", **1998**.
- [5] **H.O.R.S.T CZICHOS**; "Multilaboratory tribotesting: Results from the VAMAS program of wear methods"; **1986**.
- [6] **A.W.RUFF**; "Comparision of test methods for non-lubricated sliding wear"; **1989**.
- [7] **Jost, H. P.**, "Tribology-origin and future", Wear, v.136, pp.1-17. **1990**.
- [8] **Jost, H.P.**, "Lubrication (tribology) education and research, Jost Rep., department of Education and Science, HMSO, London, 1966, p.4. **1960**.
- [9] **Hutchings, I. M.**, "Tribology: friction and wear of engineering materials". Oxford : Butterworth Heinemann, **1992**.
- [10] **Dowson, D.**, "History of tribology", London: Longman, 677 pp, **1979**.
- [11] **Zum-Gahr, K-H.**, "Microstructure and Wear of Materials", Tribology Series, 10, Elsevier, pp. 1-6, 1987.
- [12] **KLEIN et al.** "Materiais avançados". Centro de gestão e estudos estratégicos, Cap. 8, Brasilia, DF, **2010**.
- [13] **Eyre, T.S.**, "The mechanisms os wear", Tribology international, vol. 11, issue 2, abril 1978.
- [14] **A. Begelinger and A. W. J. de Gee**, "Synopsis of the results from an international cooperative wear program, Lubr. Eng., 26 56 – 63"; **1970**.
- [15] **A.W. RUFF**; "Analysis of interlaboratory test results of solid particle impigement erosion"; **1985**.
- [16] **PETER J. BLAU**; "Development and use of ASTM standars of wear testing"; **1999**.
- [17] **ASTM Standard G-117**, "Guide for calculating and reporting measures of precision using data from interlaboratory wear or erosion tests, ASTM, West Conshohocken, PA", **1993**.

- [18] **E.A.ALMOND e M.G.GEE**; “Results from a U.K interlaboratory project on dry sliding wear”; **1987**.
- [19] **R. C. Paule**, “Ruggedness tests and interlaboratory studies, Standardization News”, 56 - 58. **1988**.
- [20] **HUTCHINGS; M. G. GEE; P. HATTO; G; PLINT; K. SCHIFFMAN; K. VAN ACKER; Y. KUSANO; S. POULAT; Y. GACHON; J. VON STEBUT**; “Results from an interlaboratory exercise to validate the micro-scale abrasion test”; **2005**.
- [21] **ASTM E 177**, “Standard practice for use of the terms precision and bias in ASTM test methods”, **2010**.
- [22] **Maurício, Fernando Guimarães de Oliveira**. Sobre o desgaste abrasivo de polímeros ensaiados segundo a norma DIN 53516. Vitória : s.n., **2011**.
- [23] **ISO 4649**. “Rubber, vulcanized or thermoplastic - Determination of abrasion resistance using a rotating cylindrical drum device“, **2006**.
- [24] **ISO 23529**. “Rubber - General procedures for preparing and conditioning teste pieces for physical test methods”. **2004**.
- [24] **ISO 5725-2**, “Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results — Part 2 : Basic method for the determination of repeatability and reproducibility of a standard measurement method Warning”, **1994**.
- [25] **Rabinowicz. E.**, “The least wear. Wear“, v. 100, p. 533-541, **1984**.
- [26] **Kato, K. Adachi, K.**, “Wear Mechanisms”, MODERN TRIBOLOGY HANDBOOK, Ed. CRC Press LLC Vol.2 Cap 22, **2001**.
- [27] **Briscoe B. J.**, “Wear of polymers: an essay on fundamental aspects“, Tribology International, Volume 14, Issue 4, Pages 231–243, August **1981**.
- [29] **ISO 7619-1**. “Rubber, vulcanized or thermoplastic” - Determination of indentation hardness - Part 1: Durometer Method (Shore Hardness). **2004**.
- [30] **H. BÖHM, S. BETZ and A. BALL**; The wear resistance of polymers,**1990**.

7 Anexos

Anexo A - Perda de massa da borracha padrão, para análise da resistência ao desgaste comparado à diferença de dureza Shore A medida.

ENSAIOS DIN COM BORRACHA PADRÃO																
Ensaio No.	CP	MASSA INICIAL (g)					MASSA FINAL (g)					PERDA (mg)				
		1	2	3	4	5	MÉDIA	1	2	3	4	5	MÉDIA			
1	BP 43/c	2,3165	2,3164	2,3164	2,3163	2,3164	2,3164	1,9698	1,9698	1,9699	1,9698	1,9697	1,9698	1,9698	346,6	
2	BP 43/c2	1,9698	1,9698	1,9699	1,9698	1,9697	1,9698	1,6313	1,6314	1,6313	1,6313	1,6314	1,6313	1,6313	338,5	
3	BP 03/1	2,2924	2,2924	2,2925	2,2925	2,2924	2,2924	2,0751	2,0751	2,0751	2,0751	2,0751	2,0751	2,0751	217,3	
4	BP 03/2	2,0751	2,0751	2,0751	2,0752	2,0751	2,0751	1,8622	1,8622	1,8622	1,8622	1,8622	1,8622	1,8622	212,9	
5	BP 03/3	1,8622	1,8622	1,8622	1,8622	1,8622	1,8622	1,6471	1,6470	1,6471	1,6471	1,6471	1,6471	1,6471	215,1	
16	BP 33	2,3077	2,3076	2,3076	2,3077	2,3077	2,3077	2,1023	2,1027	2,1025	2,1026	2,1026	2,1025	2,1025	205,1	
17	BP 33/2	2,1023	2,1027	2,1025	2,1026	2,1026	2,1025	1,9047	1,9048	1,9046	1,9047	1,9046	1,9047	1,9047	197,9	
18	BP 01	2,2927	2,2927	2,2925	2,2926	2,2926	2,2926	2,0833	2,0832	2,0833	2,0833	2,0832	2,0833	2,0833	209,4	
19	BP 01/2	2,0833	2,0832	2,0833	2,0833	2,0832	2,0833	1,8813	1,8813	1,8815	1,8814	1,8814	1,8814	1,8814	201,9	
30	BP 47	2,3077	2,3076	2,3075	2,3076	2,3076	2,3076	2,0949	2,0950	2,0949	2,0948	2,0949	2,0949	2,0949	212,7	
31	BP 34	2,3040	2,3039	2,3040	2,3039	2,3040	2,3040	2,0943	2,0943	2,0943	2,0943	2,0943	2,0943	2,0943	209,7	
32	BP 47/1	2,1944	2,1944	2,1944	2,1944	2,1944	2,1944	1,8941	1,8941	1,8941	1,8941	1,8941	1,8941	1,8941	201,9	
33	BP 34/2	2,0943	2,0943	2,0943	2,0943	2,0943	2,0943	1,8924	1,8924	1,8924	1,8924	1,8923	1,8924	1,8924	201,9	
34	BP 47/3	1,8930	1,8931	1,8930	1,8930	1,8931	1,8930	1,6952	1,6952	1,6953	1,6952	1,6952	1,6952	1,6952	197,8	
35	BP 34/3	1,8923	1,8924	1,8924	1,8924	1,8923	1,8924	1,6951	1,6950	1,6950	1,6951	1,6951	1,6951	1,6951	197,3	
36	BPT 01	2,2947	2,2944	2,2944	2,2944	2,2944	2,2944	2,0667	2,0667	2,0668	2,0668	2,0669	2,0668	2,0668	222,1	
37	BPT 01/2	2,0669	2,0667	2,0668	2,0668	2,0669	2,0668	1,8450	1,8447	1,8447	1,8447	1,8447	1,8447	1,8448	222,1	
38	BPT 01/3	1,8450	1,8447	1,8447	1,8447	1,8447	1,8447	1,6241	1,6244	1,6242	1,6243	1,6241	1,6242	1,6242	220,5	
39	BPT 02	2,2518	2,2517	2,2516	2,2517	2,2518	2,2517	2,0260	2,0260	2,0260	2,0259	2,0260	2,0260	2,0260	225,7	
40	BPT 03	2,1669	2,1669	2,1667	2,1667	2,1669	2,1668	1,9547	1,9548	1,9550	1,9550	1,9551	1,9550	1,9550	211,9	
41	BPT 04	2,2870	2,2869	2,2869	2,2870	2,2868	2,2869	2,0592	2,0591	2,0592	2,0591	2,0590	2,0591	2,0591	227,8	
42	BPT 05	2,2355	2,2353	2,2353	2,2355	2,2355	2,2354	2,0166	2,0166	2,0166	2,0166	2,0166	2,0166	2,0166	218,8	
43	BPT 05/2	2,0166	2,0166	2,0166	2,0166	2,0166	2,0166	1,8067	1,8067	1,8067	1,8067	1,8066	1,8067	1,8067	209,9	
44	BPT 05/3	1,8066	1,8067	1,8067	1,8067	1,8066	1,8067	1,5928	1,5927	1,5930	1,5930	1,5929	1,5929	1,5929	213,8	

Tabela 11: Valores da perda de massa da borracha padrão utilizados para comparar a resistência ao desgaste com a dureza Shore A.

Fonte: produzido pelo próprio autor, 2012.

Anexo C - Desenho Isométrico da ferramenta de corte do TRICORRMAT-UFES.

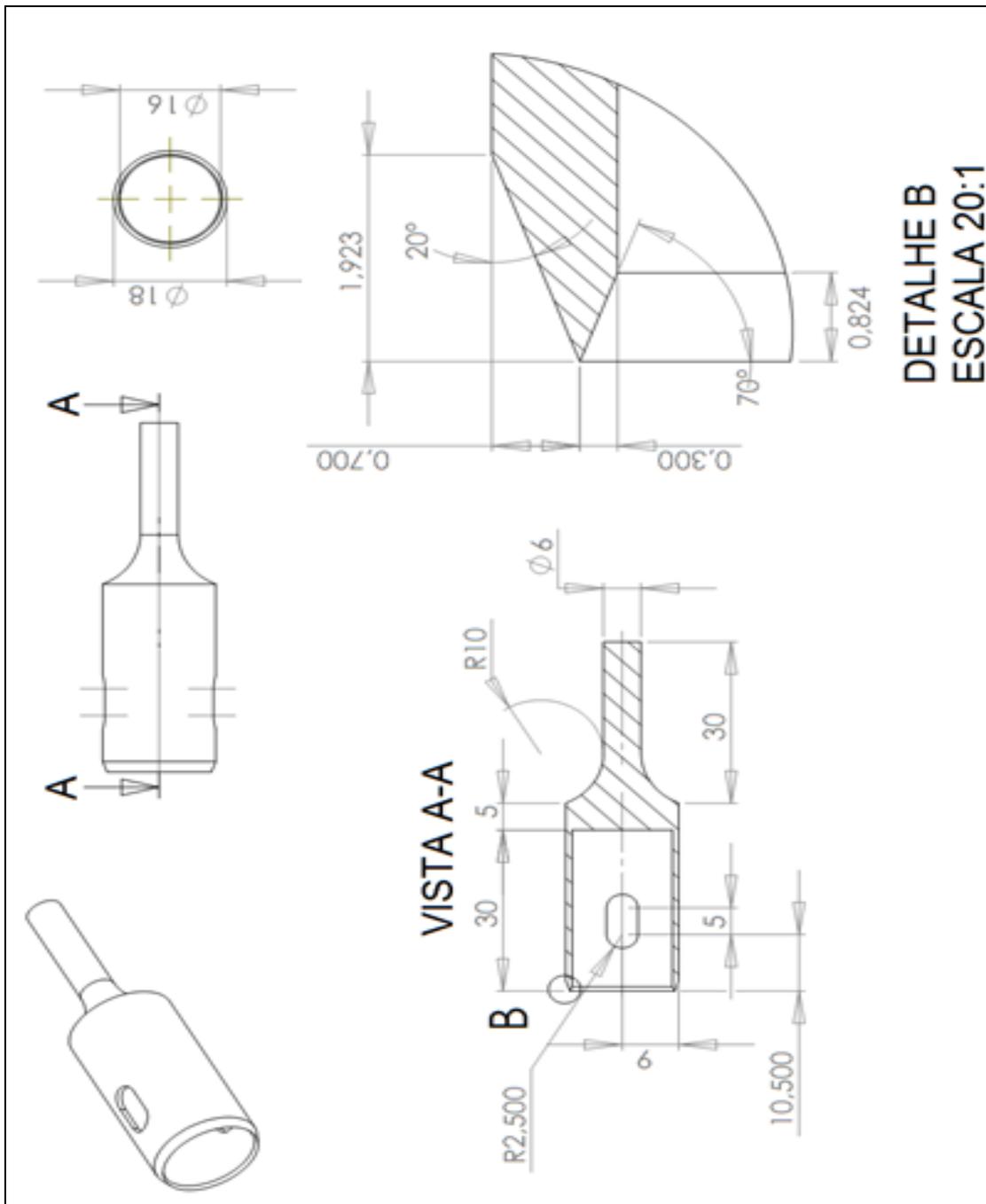


Figura 51: Desenho isométrico da ferramenta de corte utilizada na UFES.
Fonte: produzido pelo próprio autor, 2012.

Anexo D – Desenho isométrico da ferramenta de corte do LFS – USP

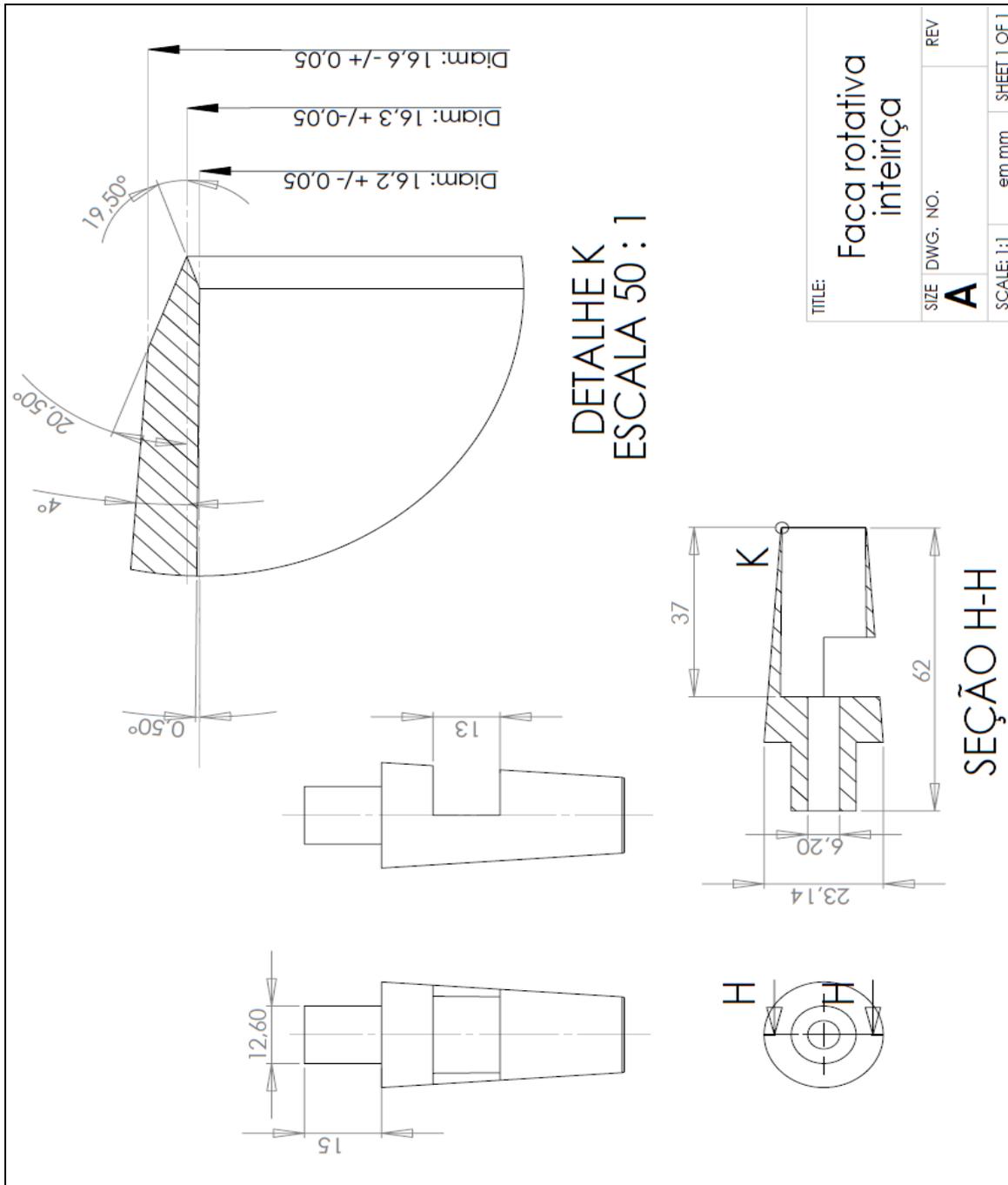


Figura 52: Desenho isométrico da ferramenta de corte utilizada na USP. Fonte: Fábio Nascimento, USP, 2012.