

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

SELEÇÃO DE MATERIAL PARA POLIAS DE ELEVADOR

por

Álvaro da Rosa Cunha

Monografia apresentada ao
Departamento de Engenharia Mecânica da
Escola de Engenharia da Universidade
Federal do Rio Grande do Sul, como parte
dos requisitos para obtenção do diploma de
Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Julho de 2015

SELEÇÃO DE MATERIAL PARA POLIA DE ELEVADOR

por

Álvaro da Rosa Cunha

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA
DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Alcy Rodolfo dos Santos Carrara
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. Ney Ferreira

Comissão de Avaliação:

Prof. Cintia C. Petry Mazzaferro

Prof. Flávio José Lorini

Prof. Tiago Becker

Porto Alegre, 03 de Julho de 2015.

Cunha, A. R. **Seleção de material para polias de elevadores**. 2015. 20 páginas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

RESUMO

Polias são elementos importantes no funcionamento de um elevador e a escolha de um material que apresente baixa resistência ao desgaste para a sua manufatura gera a necessidade de substituição antecipada desses componentes. Este trabalho visa selecionar o melhor material, estudando sua taxa de desgaste quando atritado com esferas de aço, em ensaios de pino sobre disco seguindo a norma ASTM G-99. Os materiais escolhidos para o estudo foram ferro fundido nodular, com e sem tratamento superficial de oxidação negra, ferro fundido cinzento, com e sem tratamento superficial e Nylon 6. O Nylon foi o material que apresentou o melhor desempenho, seguido pelas amostras com oxidação negra, tendo o ferro fundido cinzento apresentando como pior resultado.

PALAVRAS-CHAVE: Taxa de desgaste, Pino sobre disco, Seleção de materiais, Polia.

Cunha, A. R., **Material selection for elevator pulley**. 2015. 20 páginas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

ABSTRACT

Pulleys are very important elements in the operation of an elevator and the choice of a material which has low wear resistance for their manufacture creates the need for early replacement of such components. This work aims to select the best material, studying its wear rate when rubbed with steel balls in pin on disk tests following the ASTM G-99. The materials chosen for the study were nodular graphite cast iron, with and without surface treatment of black oxidation, flake gray cast iron, with and without surface treatment and Nylon 6. Nylon was the material that presented the best performance, followed by samples with black oxidation, and the flake graphite cast iron presented as worst result.

KEYWORDS: Wear rate, Pin on disk, Material selection, Pulley.

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	OBJETIVOS	2
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
4.	METODOLOGIA	5
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	8
5.1.	RUGOSIDADE	8
5.2.	PERFIL DE DUREZA	8
5.3.	MICROESTRUTURA.....	8
5.4.	ENSAIOS DE DESGASTE.....	9
5.5.	AMOSTRAS DE NYLON	11
5.6.	AMOSTRAS DE FERRO FUNDIDO CINZENTO	12
5.7.	AMOSTRAS DE FERRO FUNDIDO NODULAR.....	12
5.8.	OXIDAÇÃO NEGRA	13
6.	CONCLUSÕES	14
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	15
	APÊNDICE I – Ensaio de desgaste dos corpos de prova	16
	APÊNDICE II – Gráficos de coeficiente de atrito por distância percorrida.....	19

1. INTRODUÇÃO

Segundo Janovský, 1999, um elevador é definido como um equipamento permanente de transporte entre dois ou mais pavimentos, incluindo um carro para transporte de passageiros e/ou outras cargas, que se desloca ao menos parcialmente entre guias rígidas, tanto verticalmente quanto de forma inclinada com a vertical, em ângulos menores que 15° . É um dos meios de transporte mais usados, e cada vez mais necessário frente à quantidade de andares dos prédios atuais e crescente apelo por acessibilidade em todos os lugares.

Existem diferentes sistemas de tração, que modificam muito a constituição dos equipamentos que formam o elevador, assim como as medidas e solicitações necessárias dos prédios onde eles serão instalados. O sistema de tração mais frequente é mostrado na Figura 1.1.

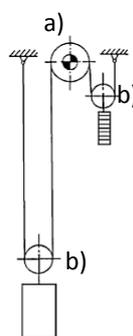


Figura 1.1- Sistema de tração 2:1. Adaptado de Janovský, 1999

Este sistema reduz a potência necessária para a máquina de tração (“a” na Figura 1.1) movimentar o carro sem exigir muito espaço na caixa de corrida ou casa de máquinas do elevador. Utilizando-se de um sistema de polias de desvio no carro e no contrapeso (“b” na Figura 1.1), os cabos de suspensão são fixados direta ou indiretamente na alvenaria do prédio, dividindo a carga necessária para movimentar todo o equipamento. Tendo em vista isso, essas polias tornam-se componentes importantes no elevador, sendo exigidas durante o uso ao longo dos dias. Esses componentes ficam constantemente atritando com os cabos de aço responsáveis pela suspensão do elevador, o que acaba por desgastar o material e pode levar a diversos tipos de falha no equipamento.

O desgaste é especialmente crítico na polia motriz, indicada com a) na Figura 1.1, responsável por transmitir torque e movimento ao elevador. Essa polia possui canais com usinagem diferenciada, como mostrada na Figura 1.2, para aumentar a tração e evitar deslizamentos do cabo. Se esse perfil for desgastado demasiadamente pode haver escorregamento nos cabos tanto na partida quanto na parada do carro.

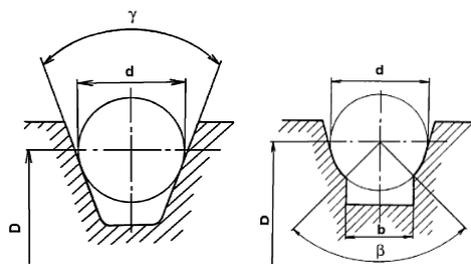


Figura 1.2- Exemplos de perfis de canais de polias motrizes. (Fonte: Janovský, 1999)

Segundo Janovský, 1999, a principal causa de desgaste dos canais das polias é distribuição desigual de tensão entre os cabos, fazendo com que o diâmetro de curvatura dos mesmos seja diverso e ocorra escorregamento, aceleração ou desaceleração na sua passagem pelas polias. Além dessa, outras causas também geram esse desgaste, como os cabos estarem torcidos em excesso, com fios rompidos, etc.

A Figura 1.3 mostra polias onde o desgaste causado pelos cabos não foi uniforme, concentrando a perda de material em alguns canais. É possível perceber o desgaste em uma polia motriz na imagem a) observando como alguns dos cabos, apontados pelas setas, encontram-se dentro do diâmetro externo da polia. Na imagem b) o desgaste de uma polia de desvio é perceptível pelo desalinhamento de um dos cabos (apontado pela seta).

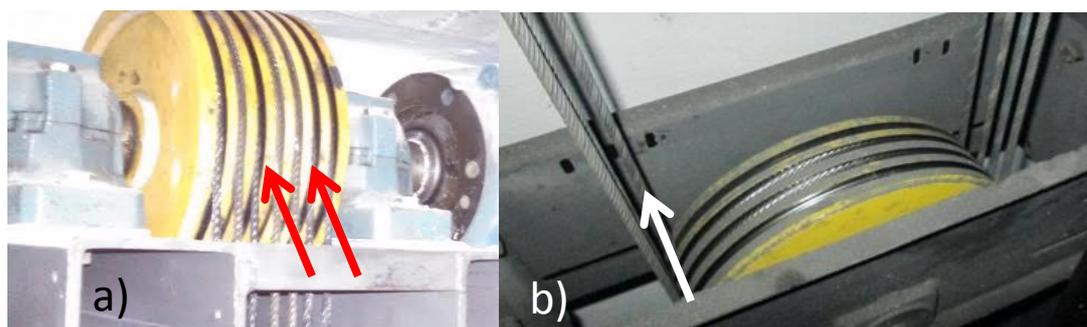


Figura 1.3- Polias com desgaste excessivo

Para monitorar o desgaste dos canais as normas brasileiras para elevadores, ABNT NBR NM 207, 1999, e ABNT NBR 16042, 2012, exigem a fácil verificação dos canais das polias. Dessa forma o estado das polias deve ser inspecionado em toda manutenção periódica dos elevadores.

O desgaste contra os cabos torna importante a seleção de materiais para a polia. Estes devem ser resistentes primeiramente ao desgaste, mas também devem possuir boa usinabilidade e resistência ao ambiente da caixa de corrida (como em atmosfera marítima) e óleo dos cabos (usado para diminuir o atrito interno do cabo). Os materiais mais comumente encontrados neste tipo de componente são os ferros fundidos e, recentemente, polímeros de engenharia.

Neste trabalho a taxa de desgaste foi usada como principal argumento para seleção de um material para polias. O desgaste foi realizado em um tribômetro e a taxa foi determinada através de ensaios seguindo a norma ASTM G99, Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus, atritando um pino de aço com ponta esférica contra discos dos materiais estudados.

2. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é selecionar material e tratamento superficial para uso em polias de elevadores através da avaliação de ensaios tribológicos dos materiais.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Desde o início do desenvolvimento dos elevadores de passageiros, os materiais mais utilizados para manufaturar as polias têm sido aços de baixa liga e ferros fundidos, segundo Janovský, 1999. Esses materiais apresentam boa resistência mecânica e média resistência ao desgaste, variando conforme a composição dos mesmos.

Entre os ferros fundidos os mais utilizados são o cinzento, devido ao seu baixo preço em comparação com outros materiais com características mecânicas semelhantes, e o nodular, que apresenta maior dureza e resistência. As diferenças na taxa de desgaste desses dois tipos de

materiais foram estudadas por Eyre et al., 1969. Esse estudo comparou os dois materiais utilizando um ensaio de pino sobre disco em um tribômetro e mostrou que o desgaste aumenta, para ambos os materiais, significativamente a partir de uma determinada carga, como mostra a Figura 3.1. Os autores concluíram que até uma carga de 15 kgf o ferro fundido nodular é mais resistente ao desgaste que o cinzento. Esse estudo levou à escolha da carga aplicada para os ensaios deste trabalho.

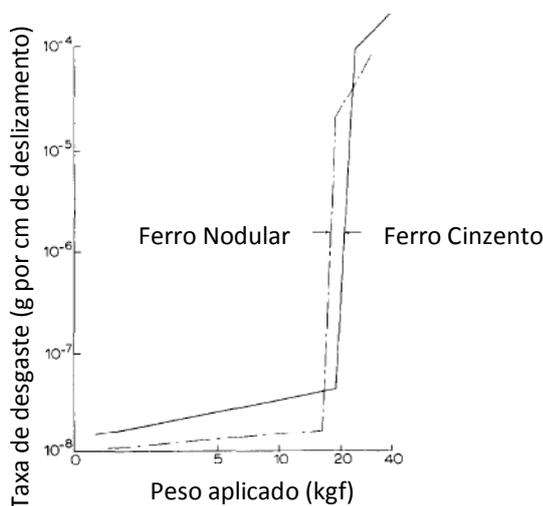


Figura 3.1- Gráfico da taxa de desgaste pela carga aplicada. (Adaptado de: Eyre et al., 1969)

Já Prasad, 2011, realizou um estudo seguindo a norma ASTM G99 sobre os efeitos da variação da carga, velocidade de deslizamento e lubrificação sobre ferro fundido cinzento. O estudo concluiu que o aumento da carga e da velocidade aumentam o desgaste de um material, sendo que a presença de óleo lubrificante diminui esse desgaste, como mostra a Figura 3.2, indicando também que em ensaios não lubrificados desse material a variação da carga é mais significativa que a da velocidade. Este estudo levou a escolha da velocidade dos ensaios deste trabalho.

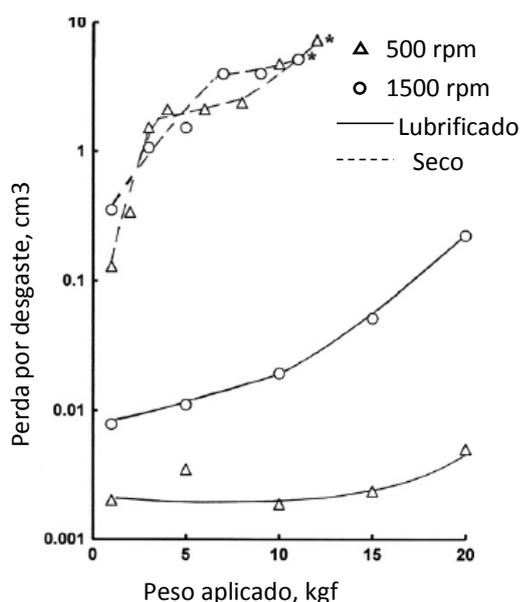


Figura 3.2- Gráfico do desgaste de um ferro fundido cinzento pelo peso aplicado. (Adaptado de: Prasad, 2011)

Kayaba e Iwabuchi, 1981, realizaram um estudo de desgaste em um mesmo material com durezas diferentes e observaram que a presença de oxidação negra na superfície de um material que estava sofrendo desgaste era um fator mais determinante na resistência ao desgaste que a dureza do mesmo. A constatação é que a camada de óxido age como um abrasivo, protegendo o substrato. O mesmo estudo aponta que na ausência dos óxidos, o parâmetro que se mostra mais significativo para a taxa de desgaste passa a ser a dureza.

Posteriormente, também materiais poliméricos passaram a ser estudados para uso em polias. Hamblin e Stachowiak, 1995, mostram o comportamento de diferentes polímeros sendo usados como polias para cabos de aço e os compara com uma polia de aço, chegando à conclusão que Nylon 6 e o Polietileno de ultra alto peso molecular funcionam bem como materiais para polias, pois tanto a taxa de desgaste da polia quanto do cabo diminuem. Como outro fator positivo para o uso desses materiais está o fato dos mesmos não acelerarem a corrosão dos cabos, como detectado em PVC e poliuretano.

A análise da variação dos coeficientes de atrito em função dos mecanismos de desgaste foi realizada por Pantaleón et alii, 2012, em um estudo de ensaios de pino sobre disco. Nesse estudo concluiu-se que a variação da média e do desvio padrão do coeficiente de atrito nesse tipo de ensaio relaciona o tipo de mecanismo atuante. Um mapa de desgaste que divide os mecanismos em três tipos, severo, moderado e adesivo, foi criado e mostra que o aumento da variação do desvio padrão do coeficiente de atrito aumenta a severidade do desgaste, sendo que baixas variações estão mais ligadas a mecanismos de desgaste adesivo, conforme Figura 3.3.

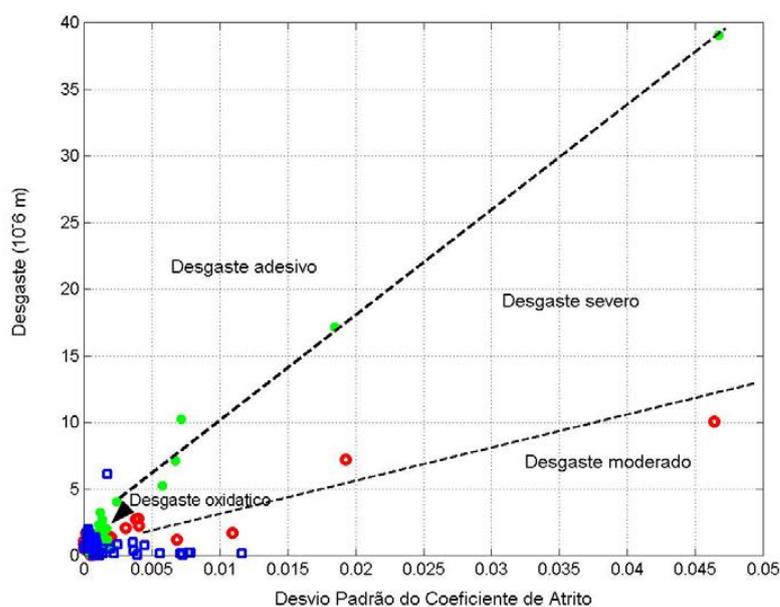


Figura 3.3 – Mapa de desgaste. (Pantaleón et alii, 2012)

As incertezas de ensaios de pino sobre disco foram analisadas por Novak e Polcar, 2014, que demonstraram que a diferença na área de desgaste transversal é o fator mais importante para a incerteza da taxa de desgaste. Também se concluiu que um possível desalinhamento entre pino e disco, assim como a incerteza da carga, distância de ensaio e velocidade, têm uma influência menor sobre a incerteza da taxa de desgaste do que a incerteza da área desgastada, podendo assim serem desconsideradas.

As diferenças na morfologia do desgaste entre disco e esfera foram analisadas por Kucharski e Mróz, 2010, onde se concluiu que a rugosidade da esfera no ponto ensaiado é menor na direção do movimento do que na transversal e que a rugosidade tanto da esfera quanto do disco aumenta

durante o processo de desgaste. Também foi constatado que os resultados de desgaste de esfera obtidos pelas fórmulas presentes na norma de ensaio de pino sobre disco não apresentam resultados precisos, sendo necessários para sua correta avaliação outros métodos, como o uso de um perfilômetro.

4. METODOLOGIA

Confeccionaram-se 15 corpos de prova para serem submetidos a ensaios de desgaste segundo a norma de ensaios de pino sobre disco. Os corpos de prova são discos de 50 mm de diâmetro e 10 mm de espessura, tendo seus materiais e tratamentos superficiais apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Corpos de prova

Material	Tratamento Superficial	Número de Amostras
Nylon 6	-	3
Ferro Fundido Nodular DIN 1693 GGG-50	-	3
	Oxidação Negra	3
Ferro Fundido Cinzento DIN 1961 GG-25	-	3
	Oxidação Negra	3

As amostras tiveram a rugosidade média medida, foram ensaiadas conforme norma de pino sobre disco, e as peças metálicas tiveram seu perfil de dureza traçado e sua microestrutura analisada. As medições de rugosidade se deram em 5 regiões igualmente espaçadas, das bordas das faces planas dos discos em direção ao seu centro.

Para a determinação do perfil de dureza usou-se um durômetro Brinell, com esfera de 10 mm e carga de 186,5 kgf durante 30 segundos. Um exemplo de amostra onde foram realizadas medições é ilustrado na Figura 4.1.

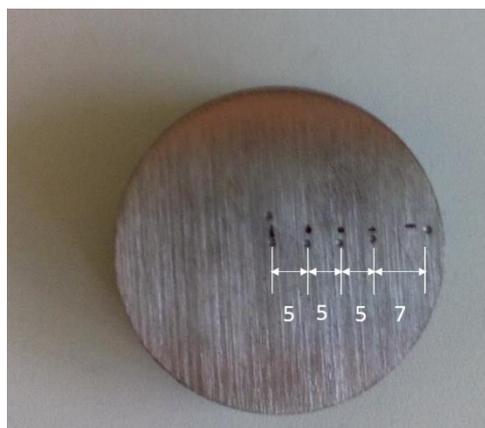


Figura 4.1 - Pontos de medição do perfil de dureza em corpo de prova de ferro fundido cinzento, distância em mm

Nas medições realizadas na peça da Figura 4.1, assim como nas outras amostras medidas, se respeitou uma distância mínima de $2,5x$ o diâmetro da indentação entre uma medição e outra, resultando em 5 pontos de medida do núcleo até a borda das peças.

Os ensaios de pino sobre disco foram realizados em um tribômetro CSM, mostrado na Figura 4.2, seguindo a ASTM G99. Esse tribômetro fornece os valores do coeficiente de atrito durante o ensaio, dado importante para demonstrar o comportamento do material.

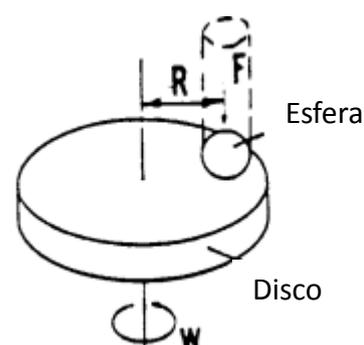


Figura 4.2 - Elementos de um ensaio seguindo a norma ASTM G99. (Fonte ASTM G99, 2000)

O ensaio consiste em atritar o disco do material estudado contra uma esfera de aço AISI 52100, mais dura que os corpos de prova, com uma carga aplicada sobre a mesma (F da Figura 4.2). Os ensaios foram separados em dois grupos como mostra a Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Parâmetros dos ensaios

Procedimento	Materiais	Carga (N)	Velocidade (m/s)	Raio (mm)	Nº de voltas	Distância (m)
1	Todos	20	1	18	8842	1000
				22	7234	1000
2	Apenas metálicos	20	1	18	3000	339,3
				22	3000	414,7

No primeiro procedimento os ensaios dos corpos de prova de ferro fundido cinzento com oxidação negra, ferro fundido nodular com e sem tratamento de oxidação negra e nylon foram realizados durante todo o deslocamento determinado, enquanto os corpos de prova de ferro fundido cinzento sem tratamento tiveram de ser interrompidos devido à vibração durante os ensaios.

Tendo em vista isso o segundo procedimento foi criado, visando que a esfera passe o mesmo número de vezes sobre o mesmo ponto do disco, diferentemente do procedimento 1, e em um percurso menor. Nesse segundo grupo de ensaios as amostras poliméricas não foram ensaiadas, pois apresentaram um desgaste muito inferior às metálicas no primeiro procedimento, assim como um comportamento mais constante.

Após cada ensaio o corpo de prova foi retirado do tribômetro, assim como a esfera contra o qual foi atritado, para serem analisados. Essa análise constitui-se de dez fotos na lupa com aumento de 6,7x da pista atritada para medição da largura da mesma, assim como fotografia da região da esfera de aço. Essas fotografias foram analisadas com auxílio do software Image J, como mostra a Figura 4.2.

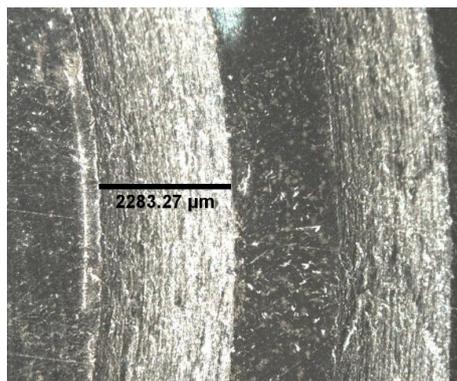


Figura 4.3 - Medição da marca de desgaste

Essas medidas encontradas foram usadas para determinar a perda volumétrica de material por desgaste, assim como a taxa de desgaste do mesmo, conforme Equações 4.1, 4.2 e 4.3, retiradas da norma de desgaste de pino sobre disco.

$$V_{esfera} = \frac{\pi \cdot d^4}{64D} \quad (4.1)$$

$$V_{disco} = \frac{\pi \cdot (R) \cdot (wd)^3}{6D} \quad (4.2)$$

$$W_r = \frac{V}{F \cdot x} \quad (4.3)$$

Onde: V é o volume de material da esfera de aço perdido devido ao desgaste, em mm³; d é o diâmetro do desgaste na esfera; D é o diâmetro da esfera de aço, em mm; R é o raio do disco onde o ensaio é realizado, em mm; wd é a largura da marca de desgaste no disco, em mm; W_r é a taxa de desgaste, em mm³/N/m; F é a carga aplicada sobre a esfera estática e x é a distância percorrida no ensaio.

A equação 4.1 é usada quando o desgaste da esfera é muito superior ao desgaste do disco, enquanto a equação 4.2 é usada quando o desgaste do disco é superior ao da esfera e ambas tem sua incerteza determinada pela norma, conforme Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Incerteza das equações 4.1 e 4.2

Equação	Diâmetro do desgaste / diâmetro da esfera	Largura do desgaste / diâmetro da esfera	Incerteza
4-1	<0,3	-	1%
	<0,7	-	5%
4-2	-	<0,3	1%
	-	<0,8	5%

Após os ensaios tribológicos, quatro amostras, de ferro fundido cinzento e nodular com e sem oxidação, foram cortadas, embutidas em baquelite, lixadas e polidas. Essas amostras, então, sofreram ataque químico com nital 5% para revelar sua microestrutura.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. RUGOSIDADE

A Figura 5.1 mostra a rugosidade média, em μm , e a barra de erros correspondente a dois desvios padrão. O ferro fundido cinzento com oxidação negra apresenta a maior rugosidade e o ferro fundido nodular sem oxidação apresenta a menor.

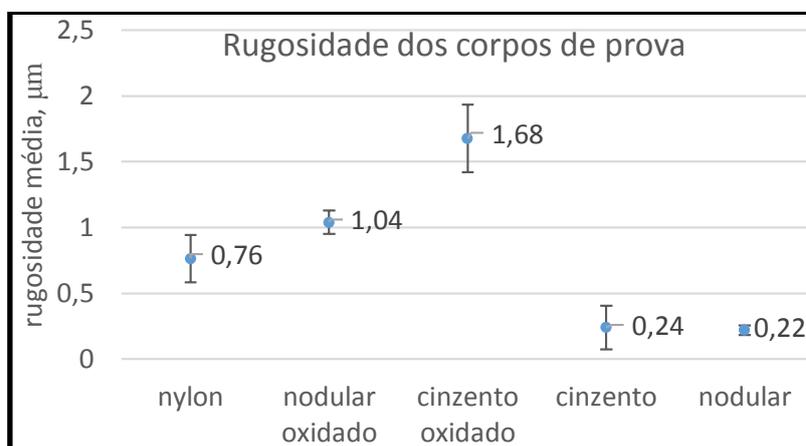


Figura 5.1 - Rugosidade média dos corpos de prova

5.2. PERFIL DE DUREZA

Os resultados dos perfis de dureza ilustrados na Figura 5.2 correspondem a valores medidos em HB, variando do centro para a borda da amostra, da esquerda para a direita.

Constata-se que não há variação na dureza das amostras do seu núcleo para a sua borda, fato que poderia ocorrer devido à usinagem, o que poderia interferir com os resultados de desgaste.

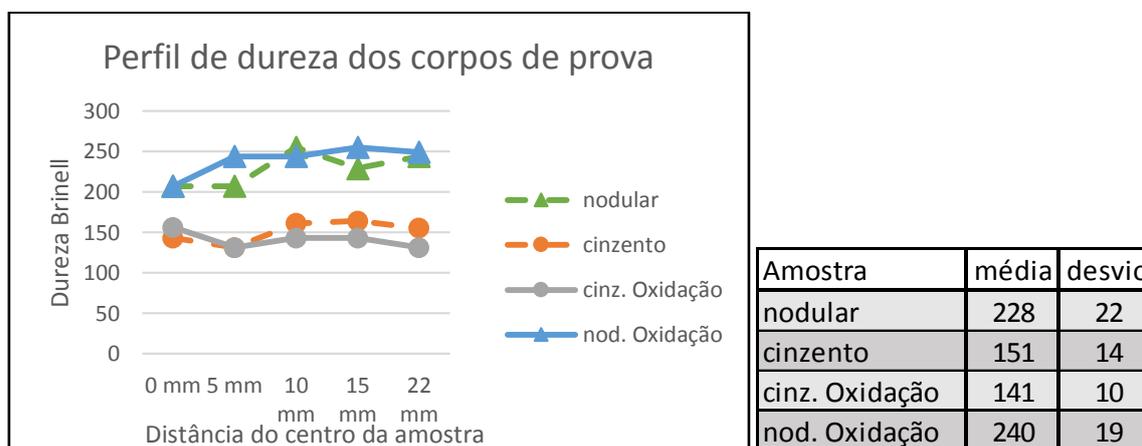


Figura 5.2- Perfil de dureza

5.3. MICROESTRUTURA

As imagens das amostras atacadas dos ferros fundidos cinzento e nodular, com aumento de 100x, podem ser vistas na Figura 5.3. O ferro fundido cinzento apresenta matriz perlítica com veios de grafita grau 2, tanto no núcleo quanto na borda, enquanto o ferro fundido nodular apresenta matriz perlítica com ferrita no contorno dos nódulos com grau de nodularização 25, tanto no núcleo quanto na borda. Essa análise apresenta uma estrutura mais refinada na borda do ferro

fundido cinzento que em seu núcleo e um número menor de nódulos na borda do ferro fundido nodular que em seu núcleo.

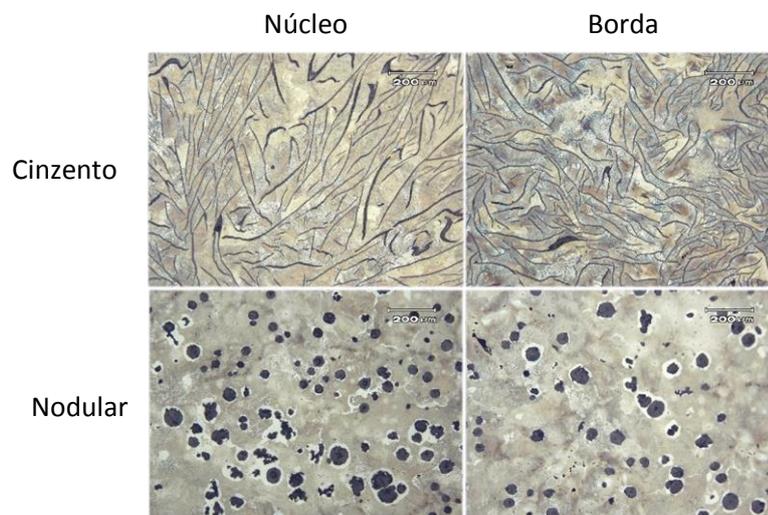


Figura 5.3 - Análise microestrutural dos ferros fundidos estudados

5.4. ENSAIOS DE DESGASTE

Os corpos de prova metálicos pós ensaios são mostrados na Figura 5.4, onde percebe-se a diferença de desgaste entre as amostras metálicas que passaram pelo ensaio de 3000 voltas (procedimento 2) e aquelas que passaram pelo ensaio de 1000 m (procedimento 1). Primeiramente percebe-se como a pista interna das amostras com oxidação negra apresentam maior desgaste no ensaio de 1000 m que no de 3000 voltas. Isso se dá pelo maior número de vezes que o mesmo ponto do disco passa sob a esfera de aço, chegando a desgastar toda a camada de oxidação negra.



Figura 5.4 - Corpos de prova metálicos pós ensaio

A Figura 5.5 mostra os corpos de prova de nylon após ensaios no tribômetro, onde percebe-se que as amostras sofreram pouco desgaste, principalmente quando comparadas com as amostras metálicas sem tratamento superficial (a direita da Figura 5.4).



Figura 5.5 - Amostras de nylon 6

Os resultados da taxa de desgaste dos ensaios de 1000 m e de 3000 voltas encontram-se no Apêndice A, e os valores médios são apresentados nos gráficos da Figura 5.6. O ferro fundido cinzento sem tratamento foi o material que apresentou a maior taxa de desgaste, seguido pelo ferro fundido nodular sem tratamento. Os ferros fundidos com oxidação negra apresentaram praticamente a mesma taxa de desgaste nos ensaios de 1000 m, porém taxa bem inferior nos ensaios de 3000 voltas. Isso se dá porque no ensaio de 3000 voltas não há desgaste suficientemente grande para romper a camada de oxidação que protege o substrato. Também se percebe no procedimento mais longo, que o nylon apresenta uma taxa de desgaste bem inferior aos outros materiais.

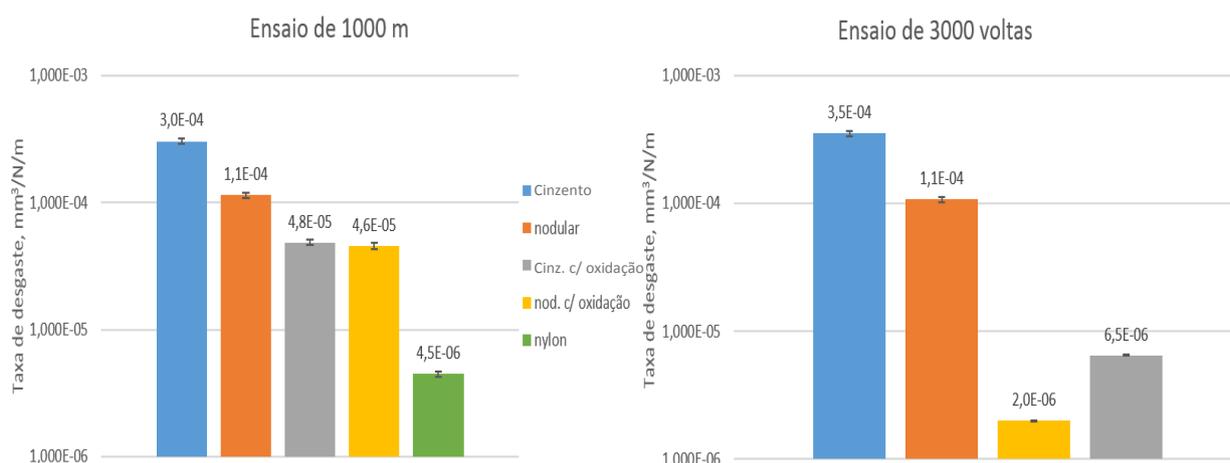


Figura 5.6- Taxa de desgaste das amostras

Gráficos do coeficiente de atrito das amostras ensaiadas pela distância percorrida para ensaios de 1000 m com raio do disco de 18 mm encontram-se no Apêndice B, separados pelos materiais estudados. O gráfico do coeficiente de atrito pela distância de ensaio que compara todos os tipos de materiais estudados se encontra na Figura 5.7. O gráfico resulta do coeficiente de atrito de um corpo de prova de cada um dos materiais estudados, em ensaios de 1000 m, usando de média móvel para melhor demonstrar os resultados.

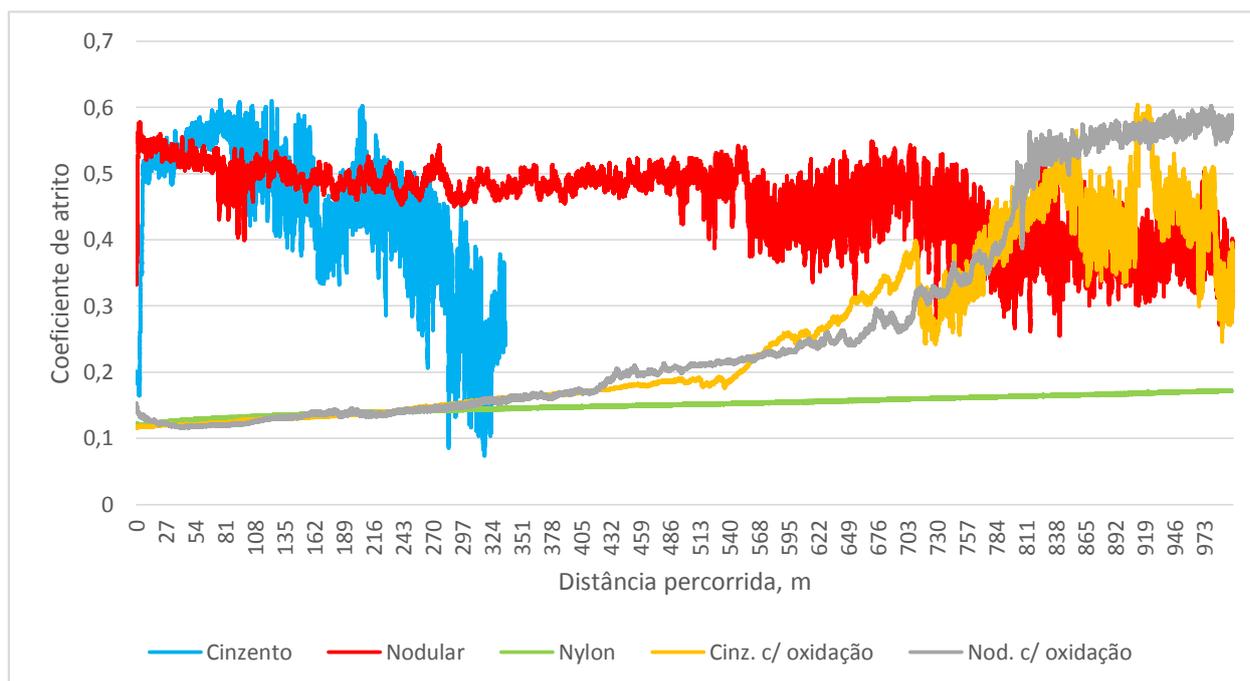


Figura 5.7- Gráfico do coeficiente de atrito pela distância percorrida, procedimento 1 com raio de 18 mm

A excessiva vibração fez com que os ensaios nos corpos de prova de ferro fundido cinzento sem tratamento superficial fossem encerrados prematuramente, como mostra a Figura 5.7. A vibração percebida durante o ensaio de todos os corpos de prova foi proporcional a variação do coeficiente de atrito das amostras, sendo que o nylon apresentou o menor nível.

5.5. AMOSTRAS DE NYLON

Os ensaios nas amostras de nylon demonstraram baixo desgaste e baixo coeficiente de atrito, conforme esperado para esse tipo de material. Além disso, o nylon apresentou um baixo nível de ruído durante o ensaio assim como baixa vibração, grandeza essa não medida, mas percebida pelo operador durante os ensaios. Esses aspectos, somados coeficiente de atrito estável, são importantes para a aplicação desejada desses materiais, pois refletem diretamente no conforto dos passageiros.

Também foi possível verificar pouco desgaste na esfera de aço, como mostra a Figura 5.8 e a Tabela I.6 do Apêndice I. O desgaste se apresentou como um círculo perfeito, o que está relacionado ao baixo desgaste do disco de nylon.

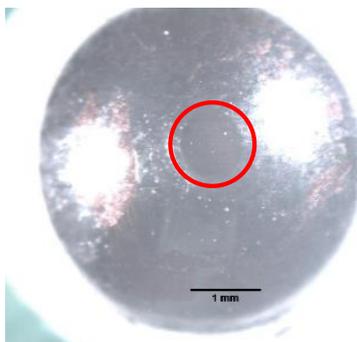


Figura 5.8 – Aspecto da esfera após ensaio contra disco de nylon

5.6. AMOSTRAS DE FERRO FUNDIDO CINZENTO

Estes ensaios apresentaram ruído e vibração superiores aos outros materiais, ao ponto de não poderem concluir a distância predeterminada de 1000 m do procedimento 1. O desgaste nessas amostras foi bastante acentuado e irregular, tendo regiões no disco com a largura do desgaste inferior a outras.

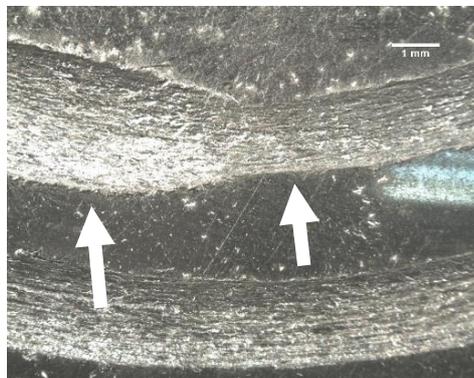


Figura 5.9 - Diferença no desgaste na amostra

A Figura 5.9 mostra uma região com desgaste mais marcante, apontado pela seta da esquerda, e uma região de desgaste menor, apontando pela seta da direita. Isso se dá pela esfera de aço tocando mais alguns pontos do que outros, criando vales onde ela acaba saltando sem tocar a região imediatamente seguinte.

Nesses ensaios também é relevante mencionar o baixo desgaste na esfera estática, como mostra a Figura 5.10. A seta aponta para a direção onde o disco girava, evidenciando que o desgaste foi muito maior no disco sendo a esfera levemente marcada.

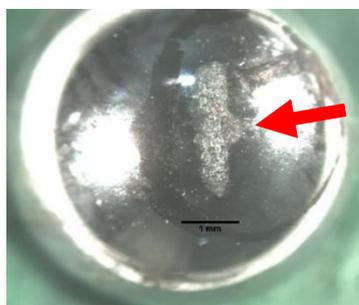


Figura 5.10 – Aspecto da esfera após ensaio contra disco de ferro fundido cinzento sem tratamento superficial

5.7. AMOSTRAS DE FERRO FUNDIDO NODULAR

As amostras de ferro fundido nodular apresentaram maior resistência ao desgaste do que as de ferro fundido cinzento, como identificado por Eyre et al., 1969, assim como menor vibração durante os ensaios. Ao contrário do que se apresentou nas amostras de ferro fundido cinzento, a largura das pistas de desgaste foi mais constante.

O ensaio dessas amostras se caracterizou também pelo maior desgaste das esferas de aço. Esse desgaste se deu de maneira irregular, como mostra a Figura 5.11. A seta aponta o sentido em que o ensaio foi realizado e o tamanho da elipse, comparada à elipse do ensaio com ferro fundido cinzento (Figura 5.10), foi maior. Os resultados do desgaste da esfera encontram-se na Tabela I.7 no Apêndice I.

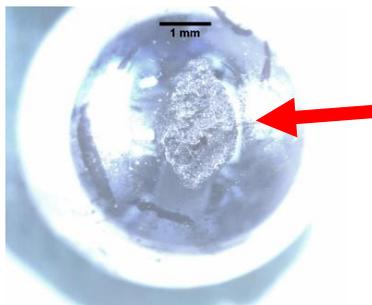


Figura 5.11 – Aspecto do desgaste na esfera após ensaio atritando contra ferro fundido nodular

5.8. OXIDAÇÃO NEGRA

As amostras com tratamento superficial de oxidação negra obtiveram melhores resultados quando comparados com seus substratos sem tratamento algum. Essa diferença é perceptível enquanto a camada de óxido não é totalmente desgastada, pois a mesma funciona como um lubrificante sólido protegendo o substrato e reduzindo o atrito, como identificado por Kayaba e Iwabuchi, 1981. Esse comportamento também é perceptível na Figura 5.12. A camada de oxidação resistiu de maneira semelhante nas amostras, com um desgaste mais acentuado iniciando em 400 m até que em 800 metros as amostras passam a apresentar comportamento idêntico ao do substrato sem tratamento.

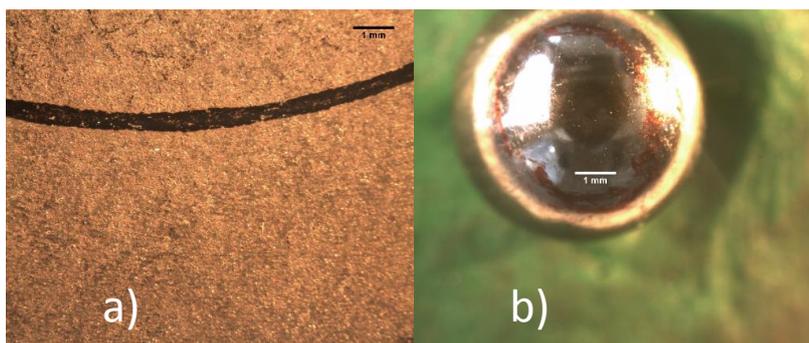


Figura 5.12 - Disco de ferro fundido nodular com oxidação (a) e esfera (b) após ensaio de 3000 voltas (procedimento 2)

A Figura 5.12 mostra o estado do disco e da esfera de aço após um ensaio de 3000 voltas. Nela é possível ver a camada lubrificante na imagem a) e a ausência de desgaste na esfera presente na imagem b). Essa diferença de comportamento com relação a outras amostras se mostra mais evidente quando se compara a Figura 5.12 com a Figura 5.13, onde o mesmo material é ensaiado por uma distância muito maior.

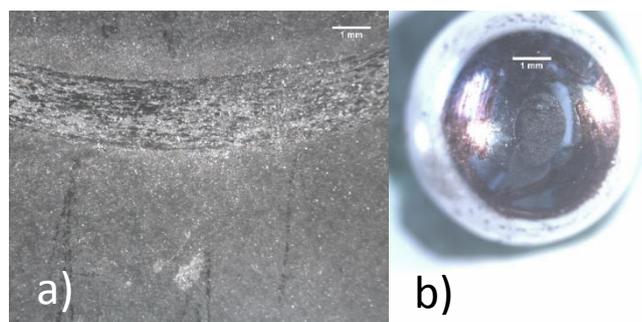


Figura 5.13 - Disco de ferro fundido nodular com oxidação (a) e esfera (b) após ensaio de 1000 metros (procedimento 1)

Um comportamento semelhante ao apresentado nas amostras de ferro fundido nodular com oxidação negra foi percebido nas amostras de ferro fundido cinzento com oxidação negra, Figura 5.14 e Figura 5.15. A presença da oxidação negra tornou possível o ensaio desse ferro fundido durante todo o percurso seguindo o procedimento 1. Devido a camada lubrificante que se forma entre o substrato de ferro fundido e a esfera estática. Esse comportamento diminui o desgaste em ambos, como se pode perceber na Figura 5.14.

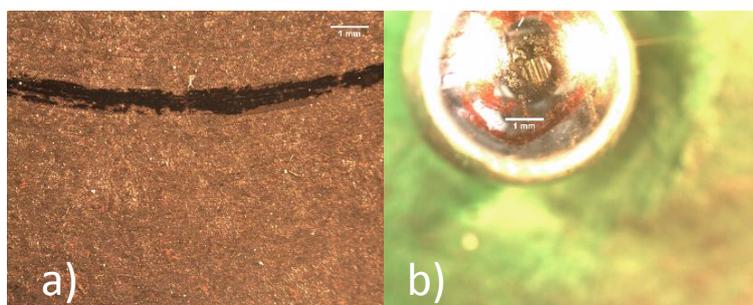


Figura 5.14 – Disco de ferro fundido cinzento com oxidação (a) e esfera (b) após ensaio de 3000 voltas (procedimento 2)

A Figura 5.15 mostra esfera de aço e disco de ferro fundido cinzento após ensaio segundo procedimento 1 em raio de 18 mm. Nota-se um sulco de desgaste bem marcado no disco (a) e uma região de desgaste menor na esfera. Esse tipo de marcação é uma mistura da que se apresenta na imagem b) da Figura 5.14 no centro da esfera, que ocorre enquanto a camada de óxidos ainda está presente, com a que se apresenta na Figura 5.10, resultante do ensaio do material sem oxidação negra.

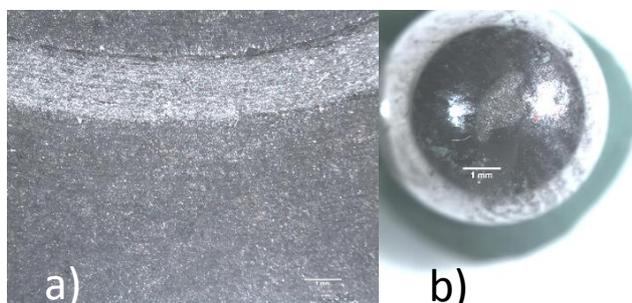


Figura 5.15 – Disco de ferro fundido cinzento com oxidação (a) e esfera (b) após ensaio de 1000 metros (procedimento 1)

6. CONCLUSÕES

Tendo em vista os resultados apresentados pode-se constatar que o nylon apresentou o melhor desempenho, sendo o mais indicado para resistir ao desgaste imposto. Sua baixa taxa de desgaste, comparado com os outros materiais, somada a baixa vibração apresentada durante os ensaios fazem desse material o mais indicado para resistir ao desgaste do uso em polias de elevador. Ainda é necessário julgar outros aspectos como custo, resistência a tração e processos de fabricação dos componentes para determinar o melhor material.

As amostras que receberam tratamento de oxidação negra também apresentaram baixas taxas de desgaste, sendo boas alternativas ao nylon. A oxidação negra possibilita que mesmo as amostras que apresentaram o pior desempenho quanto ao desgaste, o ferro fundido cinzento, possam ser usados como uma alternativa ao ferro fundido nodular. Como contrapartida, uma vez que a camada de óxidos se desgasta, o comportamento passa a ser o mesmo do substrato. Assim sendo, a

utilização desses materiais em polias exige mais cuidado nas atividades de manutenção, que deverá estar sempre atenta ao estado da camada de oxidação.

O uso do ferro fundido cinzento sem a presença da oxidação negra é desaconselhado, pois uma vez que o mesmo começa a se desgastar esse processo tende a deteriorar o material muito rapidamente, aumentando a vibração e o ruído. Isso afetaria diretamente o conforto dos passageiros dentro da cabina do elevador.

As amostras de ferro fundido nodular sem oxidação demonstraram uma boa resistência ao desgaste, sem apresentar uma mudança de comportamento mais brusca ao longo dos ensaios tribológicos. Usar o material sem a presença do tratamento de oxidação é possível pois o mesmo suporta um desgaste bastante agressivo sem aumentar muito a vibração. Seu uso, porém, deve ser analisado com cuidado pois o desgaste na esfera foi maior para esse material do que para os outros, podendo diminuir a vida útil dos cabos de um elevador em situação de uso.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G99: Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus**. Pensilvânia, 2000. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16042: Elevadores elétricos de passageiros — Requisitos de segurança para construção e instalação de elevadores sem casa de máquinas**. Rio de Janeiro, 2012. 173 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 207: Elevadores elétricos de passageiros - Requisitos de segurança para construção e instalação**. Rio de Janeiro, 1999. 140 p.

Eyre, T. S., Iles, R. F., Gasson, D. W., “**Wear characteristics of flake and nodular graphite cast iron**”, *Wear*, 1969

Hamblin, M. G., Stachowiak, G. W., “**Environmental and sheave material effects on the wear of roping wire and sheave**”, *Tribology International*, Vol. 28, No. 5, pp. 307-315, 1995

Janovský, L. “**Elevator mechanical design**”, Elevator World Inc., 3rd edition, 1999.

Kayaba, T., Iwabuchi, A., “**Effect of hardness of hardened steels and the action of oxides on fretting wear**”, *Wear*, 1981

Kucharski, S., Mróz, Z., “**Identification of wear process parameters in reciprocating ball-on-disc tests**”, *Tribology International*, 2010

Novak, R., Polcar, T., “**Tribological analysis of thin films by pin-on-disc: Evaluation of friction and wear measurement uncertainty**”, *Tribology International*, 2014

Pantaleón, E. M., Tanaka, D. K., Bernardes, F. G., “**Análise das variações do coeficiente de atrito e as correlações com os mecanismos de desgaste**”, *Holos*, 2012

Prasad, B. K., “**Sliding wear response of a grey cast iron: Effects of some experimental parameters**”, *Tribology International*, 2011

APÊNDICE I – Ensaio de desgaste dos corpos de prova

Tabela I.1: Ensaio das amostras de nylon

Amostra	Raio (mm)	Largura média (μm)	Desvio padrão (μm)	Percurso (m)	Desgaste volumétrico (mm^3)	Taxa de desgaste ($\text{mm}^3/\text{N}/\text{m}$)
1	18	893	27,17	1000	0,1243	6,217E-06
	22	832	26,60	1000	0,0821	4,105E-06
2	18	785	57,12	1000	0,0843	4,213E-06
	22	713	34,54	1000	0,0518	2,592E-06
3	16	822	38,77	1000	0,1092	5,461E-06
	18	784	45,27	1000	0,0842	4,212E-06

Tabela I.2: Ensaio de ferro fundido cinzento sem tratamento superficial

Amostra	Raio (mm)	Largura média (μm)	Desvio padrão (μm)	Percurso (m)	Desgaste volumétrico (mm^3)	Taxa de desgaste ($\text{mm}^3/\text{N}/\text{m}$)
1	18	2.197	285,66	155,6	1,8511	5,948E-04
	22	1.834	207,24	350	0,8802	1,257E-04
2	18	2.813	127,52	336,5	3,8829	5,770E-04
	22	1.770	466,02	350	0,7920	1,131E-04
3	18	2.361	286,48	301,2	2,2964	3,812E-04
	22	937	88,53	211,7	0,1176	2,777E-05
Procedimento 2	18	2.455	356,47	339,3	2,5818	3,805E-04
	22	2.651	455,34	414,7	2,6602	3,207E-04

Tabela I.3: Ensaio de ferro fundido nodular sem tratamento superficial

Amostra	Raio (mm)	Largura média (μm)	Desvio padrão (μm)	Percurso (m)	Desgaste volumétrico (mm^3)	Taxa de desgaste ($\text{mm}^3/\text{N}/\text{m}$)
1	18	2.479	267,45	1000	2,6580	1,329E-04
	22	2.295	208,34	1000	1,7252	8,626E-05
2	18	2.559	277,50	1000	2,9247	1,462E-04
	22	2.533	157,27	1000	2,3205	1,160E-04
3	18	2.435	268,78	1000	2,5195	1,260E-04
	22	2.243	206,40	1000	1,6114	8,057E-05
Procedimento 2	18	1.789	161,55	339,3	0,9992	1,472E-04
	22	1.577	95,27	414,7	0,5596	6,747E-05

Tabela I.4: Ensaio de ferro fundido nodular com oxidação negra

Amostra	Raio (mm)	Largura média (μm)	Desvio padrão (μm)	Percurso (m)	Desgaste volumétrico (mm^3)	Taxa de desgaste ($\text{mm}^3/\text{N}/\text{m}$)
1	18	1.702	151,20	1000	0,8602	4,301E-05
	22	1.392	81,70	1000	0,3847	1,924E-05
2	18	2.117	279,27	1000	1,6555	8,277E-05
	22	1.538	104,75	1000	0,5193	2,597E-05
3	18	1.869	166,88	1000	1,1400	5,700E-05
Procedimento 2	18	462	40,79	339,3	0,0173	2,543E-06
	22	437	23,78	414,7	0,0119	1,432E-06

Tabela I.5: Ensaio de ferro fundido cinzento com oxidação negra

Amostra	Raio (mm)	Largura média (μm)	Desvio padrão (μm)	Percurso (m)	Desgaste volumétrico (mm^3)	Taxa de desgaste ($\text{mm}^3/\text{N}/\text{m}$)
1	18	1.935	127,80	1000	1,2653	6,326E-05
	22	1.482	114,51	1000	0,4652	2,326E-05
2	18	2.495	324,77	1000	2,7111	1,356E-04
	22	1.107	75,02	1000	0,1939	9,696E-06
3	18	1.358	99,43	1000	0,4372	2,186E-05
	22	1.133	92,91	1000	0,2079	1,039E-05
Procedimento 2	18	613	66,99	339,3	0,0401	5,913E-06
	22	741	72,91	414,7	0,0581	7,002E-06

Tabela I.6: Desgaste das esferas atritadas contra as amostras de nylon

Esfera Amostra	Raio (mm)	Diâmetro médio (μm)	Desvio padrão (μm)	Percurso (m)	Desgaste volumétrico (mm^3)	Taxa de desgaste ($\text{mm}^3/\text{N}/\text{m}$)
1	18	902	53,15	1000	0,0054	2,705E-07
	22	787	83,86	1000	0,0031	1,571E-07
2	18	748	99,46	1000	0,0026	1,277E-07
	22	638	31,31	1000	0,0014	6,788E-08
3	16	737	55,08	1000	0,0024	1,204E-07
	18	873	53,75	1000	0,0048	2,379E-07

Tabela I.7: Desgaste nas esferas atritadas contra amostras de ferro fundido nodular

Esfera amostra	Raio (mm)	Diâmetro médio (μm)	Percurso (m)	Desgaste volumétrico (mm^3)	Taxa de desgaste ($\text{mm}^3/\text{N}/\text{m}$)
1	18	2.172	1000	0,1819	9,096E-06
	22	1.875	1000	0,1011	5,056E-06
2	18	2.142	1000	0,1722	8,611E-06
	22	2.153	1000	0,1756	8,781E-06
3	18	2.034	1000	0,1400	7,002E-06
	22	1.874	1000	0,1008	5,040E-06
Procedimento 2	18	1.475	339,3	0,0387	5,707E-06
	22	1.524	414,7	0,0441	5,321E-06

APÊNDICE II – Gráficos de coeficiente de atrito por distância percorrida

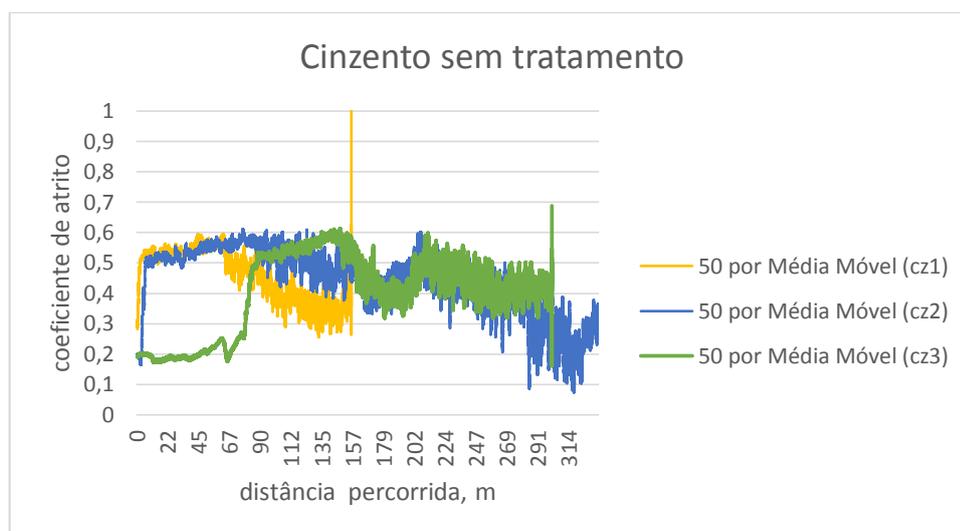


Figura II.0.1 - Ensaio procedimento 1 com raio 18mm em ferro cinzento

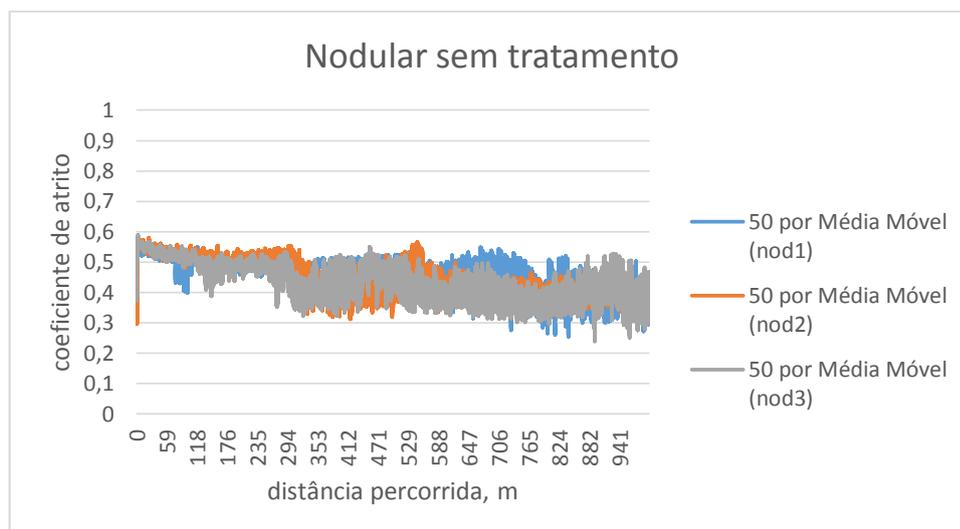


Figura II.0.2 - Ensaio procedimento 1 com raio 18mm em ferro nodular

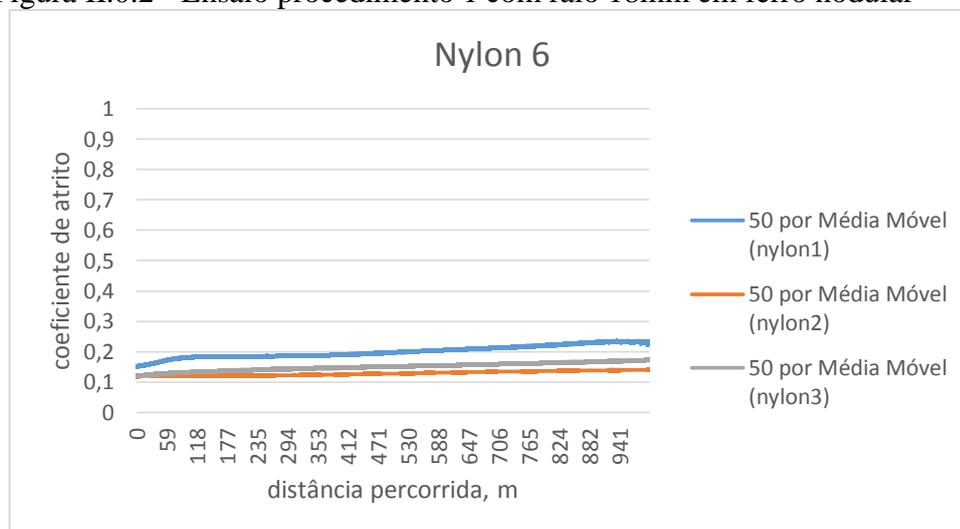


Figura II.0.3 - Ensaio procedimento 1 com raio 18mm em nylon

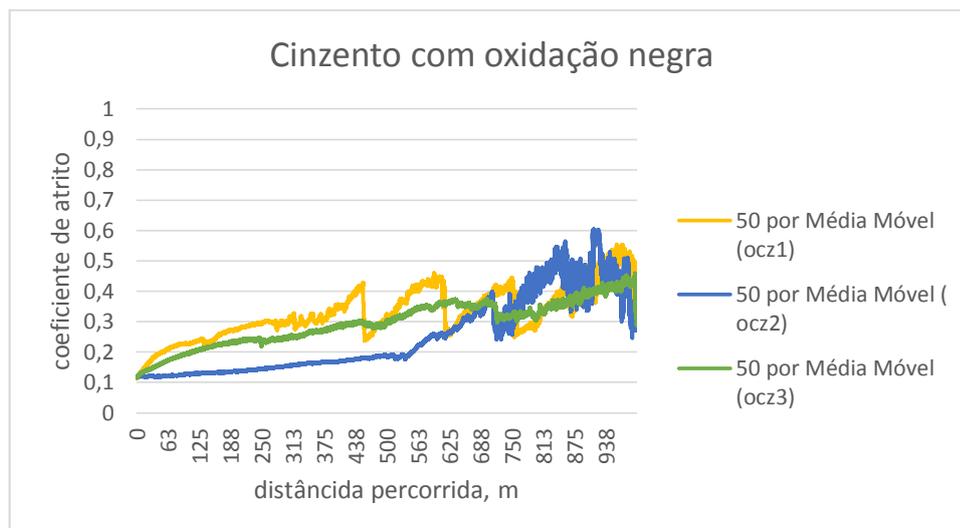


Figura II.0.4 - Ensaio procedimento 1 com raio 18mm em ferro cinzento com oxidação

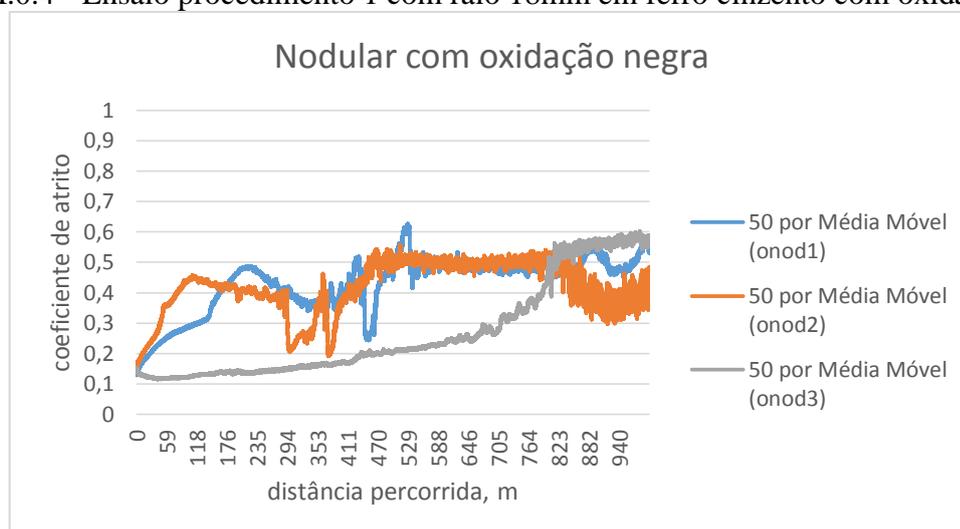


Figura II.0.5 - Ensaio procedimento 1 com raio 18mm em ferro nodular com oxidação