

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

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO REUSO DA AREIA UTILIZADA COMO ABRASIVO EM  
ENSAIO DE DESGASTE DE UM AÇO ASTM A242

por

Francisco de Moraes Bandeira

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 2017



Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Escola de Engenharia  
Departamento de Engenharia Mecânica

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO REUSO DA AREIA UTILIZADA COMO ABRASIVO EM  
ENSAIO DE DESGASTE DE UM AÇO ASTM A242

por

Francisco de Moraes Bandeira

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. Thamy Cristina Hayashi

Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. Cintia C. P. Mazzaferro

Comissão de Avaliação:

Prof. José A. E. Mazzaferro

Prof. Rodrigo Rossi

Prof. Tiago Becker

Porto Alegre, 21 de julho de 2017.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha mãe Ivonete que me deu suporte, amor, e condições para que eu prosseguir nesta jornada e chegar até aqui, sempre me ajudando a lutar pelos meus sonhos.

Ao meu pai, Nestor, que mesmo distante me deu apoio, amor e sempre esteve disponível quando necessário.

À professora e orientadora Cintia P. C. Mazzaferro pela orientação, conhecimento, dedicação e entusiasmo com a engenharia e seus fenômenos.

À mestranda Daniela Giarollo e demais integrantes da equipe do Laboratório de Soldagem pelo conhecimento compartilhado e ajuda na realização dos ensaios.

Aos meus amigos que me acompanharam até aqui.

À empresa ArcelorMittal Tubarão que cedeu o material para este estudo.

Ao Laboratório de Soldagem e Técnicas Conexas (LS&TC) pela infraestrutura, ambiente e equipamentos.

À UFRGS pela infraestrutura, recursos e apoio na elaboração desta dissertação.

BANDEIRA, F. M. **Análise da influência do reuso da areia utilizada como abrasivo em ensaio de desgaste de um aço ASTM A242**. 2017. 14 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

## RESUMO

Dentre os ensaios utilizados para classificar os materiais quanto a sua resistência ao desgaste abrasivo, o ensaio do tipo roda de borracha é bastante utilizado. A norma ASTM G65-16, 2016, abrange os procedimentos de laboratório para determinar a resistência de materiais à abrasão por meio deste ensaio, dentre as condições por ela estabelecidas não é recomendado a reutilização do material abrasivo. Este estudo busca analisar as características do material abrasivo em condições de reutilização e compará-las com o mesmo material sem utilização prévia em ensaio. Cinco amostras foram ensaiadas reutilizando a areia de ensaios anteriores já separada em cinco diferentes faixas granulométricas. São verificados os resultados dos ensaios em volume perdido pelas amostras e taxa de desgaste específico, comparando-os com dados obtidos em teste anterior com areia nova. O fator de forma dos grãos da areia foi medido para a areia antes do primeiro ensaio e após. A superfície desgastada das amostras do segundo ensaio também foi analisada, através de perfilômetro a laser. Foi constatado que no primeiro ensaio todas as amostras tiveram uma maior perda de volume se comparadas ao segundo ensaio, a impossibilidade de concluir o ensaio para a menor faixa granulométrica também indicou uma alteração nas características do material abrasivo. De uma maneira geral, tanto o fator de forma quanto o desvio padrão desta análise foi menor para a areia reutilizada. Os resultados da perfilometria a laser das superfícies desgastadas mostrou uma relação proporcional entre o tamanho dos grãos em cada faixa granulométrica e as dimensões dos picos e vales resultantes das trilhas de desgaste. Foi observado também que a diferença entre as taxas de desgaste para os ensaios, considerando as duas condições da areia (nova e reutilizada), é menor para uma das faixas granulométricas, que coincide com a faixa indicada pela norma ASTM G65-16.

**PALAVRAS-CHAVE:** Desgaste Abrasivo, Desgaste abrasivo a três corpos, ASTM A242.

BANDEIRA, F. M. **Analysis of the influence of sand reuse as an Abrasive in an ASTM A242 Steel wear test.** 2017. N<sup>o</sup> folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

## ABSTRACT

Among the tests used to classify the materials for their resistance to abrasive wear, the rubber wheel test is widely used. Standard ASTM G65-16, 2016, covers laboratory procedures for determining the abrasion resistance of materials, among the conditions established by it a reuse of the abrasive material is not recommended. This study analyzes the characteristics of the abrasive material under conditions of reuse and compares them with the same material without previous test. Five samples were assayed by reusing a sand from previous assays already separated into five different size ranges. The results of the tests in samples volume loss and specific wear rate are verified, comparing them with data obtained in previous test with new sand. The form factor of the grains was measured for the sand before the first test and after. The worn surface of the samples from the second test was also analyzed through the laser profilometer. It was found that at the first test all samples had a greater volume loss compared to the second test, an impossibility of completion for a smaller particle size range also showed one of the changes on the characteristics of the abrasive material. In general, both the form factor and the standard deviation at this analysis were lower for a reused sand. The results of the laser profilometry of the worn surfaces showed a proportional relationship between grain size in each grain size range and the dimensions of the peaks and valleys resulting from the wear tracks. It was also observed that the difference between the wear rates for the tests, considering the two sand conditions (new and reused), is lower for one of the particle size ranges that coincides with the range indicated by the ASTM G65-16 standard.

**KEYWORDS:** Abrasive wear, Three body wear, ASTM A242.

## INDICE

RESUMO .....	iv
ABSTRACT .....	v
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS .....	1
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	1
3.1 Desgaste .....	1
3.2 Desgaste Abrasivo.....	2
3.3 Ensaio a Três Corpos Tipo Roda de Borracha.....	3
3.4 Fator de Forma.....	4
4. MATERIAIS E MÉTODOS .....	5
4.1 Aço ASTM A-242 .....	5
4.2 Material abrasivo .....	5
4.3 Metodologia e equipamentos .....	6
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	8
5.1 Resultados dos ensaios de desgaste abrasivo .....	8
5.2 Resultados da análise do fator de forma da areia. ....	11
5.3 Resultados da análise da superfície com interferômetro a laser .....	12
6. CONCLUSÕES.....	13
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	14







## 1. INTRODUÇÃO

Os impactos causados pelo desgaste de componentes mecânicos tem sido uma grande preocupação da indústria mundial. A manutenção de máquinas gera custos tanto operacionais quanto financeiros significativos, visto que geralmente exigem a parada de equipamentos e possível aquisição de novas peças. Sinatora, 2005, estima entre 1% e 6% do PIB brasileiro, o valor perdido anualmente por desgaste e Jost, 1990, considera que 20% das perdas relacionadas ao desgaste de componentes mecânicos poderiam ser evitadas com a aplicação dos conhecimentos já existentes sobre este assunto.

Esse fator torna a seleção de materiais uma das fases importantes de um projeto, onde a correta realização deste processo seletivo pode gerar economia com a possibilidade de menor utilização de material, assim como aumentar a vida útil dos componentes mecânicos.

Dentre os aços utilizados como materiais de construção mecânica existe uma grande variedade de características que podem ser desenvolvidas através da manipulação dos elementos químicos que os compõem. Para classificar estes materiais quanto a suas características, diversos ensaios foram desenvolvidos, entre eles o ensaio de desgaste abrasivo a três corpos, que visa determinar a resistência ao desgaste de um material utilizando areia como material abrasivo. A norma ASTM G65-16, 2016, abrange os procedimentos de laboratório para determinar a resistência de materiais à abrasão por meio de um ensaio conhecido como roda de borracha. Ela busca classificá-los de maneira reprodutível sob um conjunto específico de condições. Dentre estas condições, a reutilização do material abrasivo não é recomendada, mas as razões para isto não são comentadas pela norma.

Desta forma, um estudo sobre as características do material abrasivo e da consistência dos resultados quando na sua reutilização, se mostra útil no ponto de vista econômico e ecológico, diminuindo a necessidade de aquisição de material assim como evitando um descarte com maior frequência. Este trabalho busca comparar os resultados obtidos em ensaios de desgaste empregando areia nova e essa mesma areia já utilizada, observando se há alteração no seu fator de forma (angularidade) após os ensaios, e como isso pode afetar os resultados de desgaste.

## 2. OBJETIVOS

Realizar ensaios de desgaste abrasivo a três corpos em amostras de um aço estrutural com equipamento do tipo roda de borracha. Cinco amostras serão ensaiadas reutilizando a areia de ensaios anteriores já separada em cinco diferentes faixas granulométricas. A evolução do desgaste executado pelo abrasivo será avaliada, e também verificado se existem diferenças em relação ao fator de forma dos grãos, evidenciando a possibilidade do seu reuso como material abrasivo.

## 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 3.1 Desgaste

A alteração de uma superfície por perda ou deslocamento progressivo de material devido ao movimento relativo entre esta superfície e uma ou mais substâncias de contato é a definição de desgaste pela norma ASTM G40-15, 2015.

Segundo Zum Gahr, 1987, o desgaste em metais significa a deterioração de sua superfície que ocorre no nível microestrutural e topográfico, com ganho ou perda de material na sua camada de superfície, ou apenas quando ocorre mudança de forma, por consequência, por exemplo, de uma deformação plástica. Zum Gahr também os classifica em diversos tipos: desgaste por adesão ou fricção, por reação triboquímica, por fadiga superficial, erosão e por abrasão. Eyre, 1978, observou que cerca de 50% de ocorrências em ambientes industriais são relacionadas ao desgaste abrasivo, o que ressalta a importância desse tipo de desgaste.

### 3.2 Desgaste Abrasivo

A norma ASTM G40-15, 2015, define desgaste abrasivo como o processo em que o movimento relativo de partículas duras forçadas contra uma superfície sólida causa alteração desta.

Zum Gahr, 1987, define desgaste abrasivo como o deslocamento do material causado pela presença de partículas duras, que podem estar entre ou incorporadas em uma ou ambas as duas superfícies em movimento relativo, ou pela presença de protuberâncias rígidas em uma ou ambas as superfícies em movimento relativo. Uma partícula dura pode ser o produto do processamento, por exemplo, um mineral tal como sílica, alumina ou outros minérios, ou um fragmento de desgaste endurecido, também podem surgir de entrada accidental de partículas duras, como sujeira de fora do sistema tribológico.

Zum Gahr também cita uma maneira de classificar desgaste abrasivo como abrasão a dois ou três corpos de acordo com a Figura 3.1. Na abrasão a dois corpos, as partículas abrasivas se movem livremente sobre uma face de material como na areia escorregando por uma calha ou na dragagem de areia ou cascalho. Na abrasão a três corpos, as partículas abrasivas atuam como elementos interfaciais entre o corpo sólido e o contra corpo. Extrusores que processam plásticos com enchimentos abrasivos fechados e trituradores de mandíbula são aplicações comuns de abrasão a três corpos. O desgaste é cerca de uma a duas ordens de grandeza menor na abrasão de três corpos do que na abrasão de dois corpos. Na abrasão de três corpos, apenas uma pequena proporção das partículas abrasivas causa desgaste, devido a variações no ângulo de ataque. As partículas em livre rolamento ou deslizamento causam pouco desgaste.

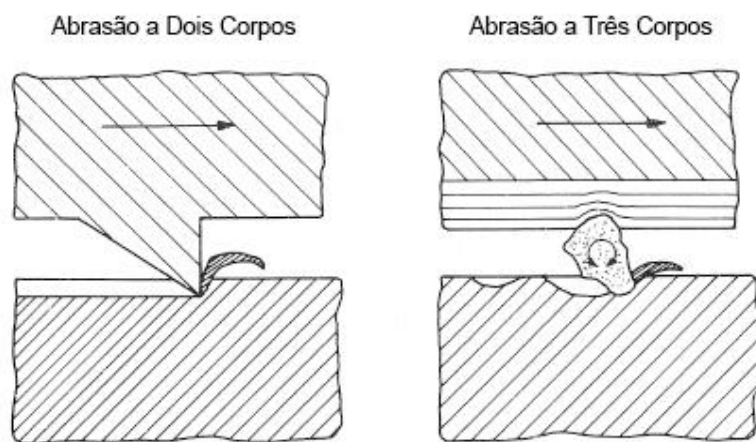


Figura 3.1 – Exemplos de desgaste abrasivo a dois corpos e três corpos [Adaptado de Zum Gahr, 1987].

Na Figura 3.2 Stachowiak, 1993, mostra o possível movimento dos grãos de um material abrasivo entre os corpos que estão em movimento relativo. Nela são caracterizados os movimentos de rotação e deslizamento dos grãos, que podem afetar de maneiras distintas as superfícies com as quais eles interagem neste tipo de desgaste abrasivo. Na figura 3.2 também é destacada uma característica do desgaste a três corpos, onde trilhas do material removido mais curtas são observadas em relação ao desgaste a dois corpos.

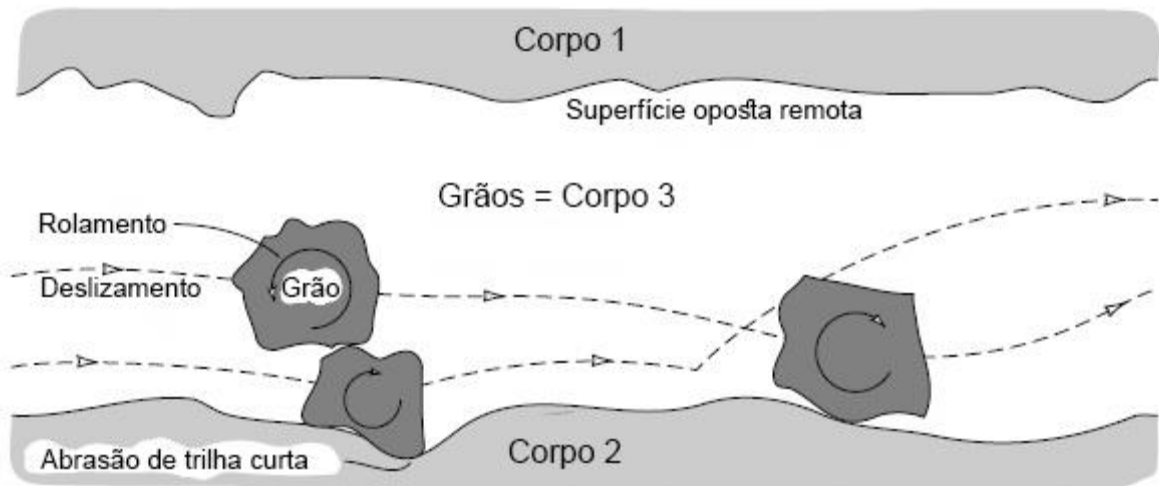


Figura 3.2 – Características do movimento dos grãos no desgaste a três corpos. [Adaptado de Stachowiak, 1993].

Ainda segundo Stachowiak, 1993, uma abordagem mais completa em relação ao desgaste a três corpos leva em conta a fragilidade do abrasivo. Se os grãos são muito frágeis, então eles podem se dividir em partículas finas, minimizando assim o desgaste. Se o abrasivo for muito resistente, então o grão pode não se fraturar para fornecer as novas faces de corte necessárias para causar desgaste rápido, então faces afiadas dos grãos irão gradualmente arredondar e os grãos se tornarão agentes abrasivos menos eficientes do que partículas angulares como ilustrado na Figura 3.3

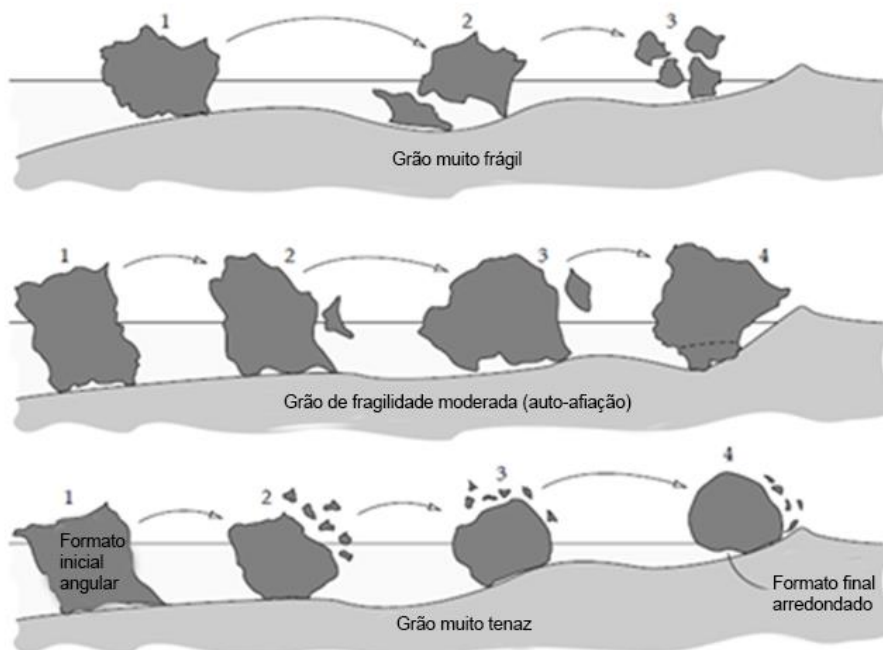


Figura 3.3 – Fraturas nos grãos abrasivos de acordo com suas características/propriedades [Adaptado de Stachowiak, 1993]

### 3.3 Ensaio a Três Corpos Tipo Roda de Borracha

No ensaio previsto na norma ASTM G65-16, 2016, como mostra a Figura 3.4 através de um esquema simplificado dos componentes da máquina, ela é construída de maneira

que a carga exerce uma força normal à superfície no contato entre a amostra e a roda de borracha, e uma cortina uniforme de material abrasivo (areia) seja formada e passe através da amostra e a roda de borracha para garantir as características de desgaste abrasivo a três corpos. A rotação da roda de borracha faz com que a sua face de contato se mova no mesmo sentido do fluxo de material abrasivo. Diversos autores citam fatores neste ensaio que influenciam no resultado, são eles: material testado; dureza da borracha; distância percorrida no ensaio; carga aplicada; velocidade de rotação da roda de borracha; dureza, tamanho e forma do material abrasivo. [Xiu –lin et al., 2015; Misra et al., 1982; Woldman et al., 2012; Chacon-Nava et al., 2009; Rabinowicz et al. 1961].

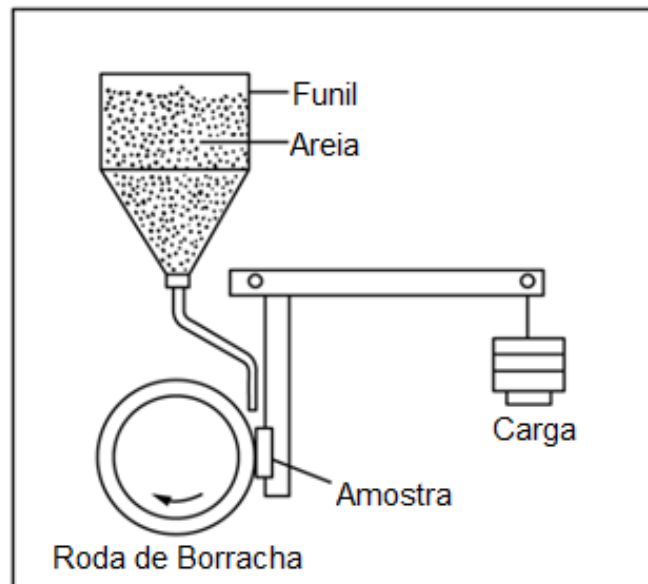


Figura 3.4 - Esquema simplificado da máquina utilizada [Adaptado de ASTM G65-16, 2016].

A norma ASTM G65-16, 2016, recomenda cinco procedimentos, que são apropriados para graus específicos de resistência ao desgaste ou espessuras do material de teste. A duração do teste varia para estes procedimentos sendo de 30 minutos para os Procedimentos A e D, 10 minutos para o Procedimento B, 5 minutos para o Procedimento E e 30 segundos para o Procedimento C.

### 3.4 Fator de Forma

Al-Rousan et al., 2007, propõe diversos métodos para classificar a forma de partículas através de análise de imagens. Dentre eles é citado Masad et al., 2001, sua proposta é utilizar a variação de raio medido na partícula a partir de mudanças incrementais no ângulo de medição. A equação a seguir expressa o fator de forma descrito por Masad:

$$Fator\ de\ Forma = \sum_{\theta=0}^{\theta=360-\Delta\theta} \frac{|R_{\theta+\Delta\theta} - R_{\theta}|}{R_{\theta}} \quad (3.1)$$

Onde  $\theta$  é o ângulo direcional e  $R_{\theta}$  é o raio em diferentes direções. É possível observar que caso a partícula seja um círculo perfeito os raios para cada incremento serão de mesmo valor e o fator de forma é igual a zero. Este método traz uma maneira viável de realizar esta análise utilizando softwares simples e mesmo com uma quantidade reduzida de incrementos, caracterizar variações na forma dos grãos. Um exemplo desse tipo de medição é mostrado na Figura 3.4.

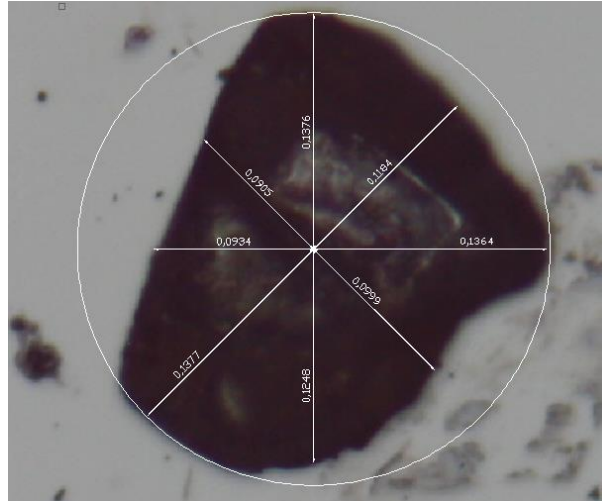


Figura 3.4 - Exemplo de medidas de raio para um grão de areia, utilizando o método de Masad et al., 2001.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Aço ASTM A-242

Um aço ASTM A-242 foi utilizado no presente trabalho, sob a forma de chapas com espessura de 4,75 mm. Esse tipo de aço foi desenvolvido originalmente para a fabricação de vagões de carga e é classificado como aço patinável devido a sua capacidade de desenvolver uma camada de óxidos em sua superfície que funciona como barreira de proteção contra corrosão, com esta característica aliada a boa tenacidade, soldabilidade e alta resistência mecânica se comparado a aços-carbono, se tornou amplamente utilizado na construção civil [Dutra et al., 2013]. A microestrutura do aço empregado é composta por ferrita e perlita, e a sua dureza é de aproximadamente 170 HV.

### 4.2 Material abrasivo

A areia utilizada como material abrasivo neste estudo é comumente empregada na construção civil, comercializada em sacos de 25 kg. A partir da sua aquisição, ela foi secada ao sol, apresentando no final da secagem um teor de umidade menor do que 0,5%. Quando seca, ela foi peneirada utilizando peneiras com aberturas de malha entre 425  $\mu\text{m}$  e 150  $\mu\text{m}$  conforme a Tabela 4.1. Na Tabela 4.2 pode-se observar as faixas granulométricas utilizadas na realização dos ensaios de desgaste abrasivo roda de borracha; foi utilizada uma faixa para cada amostra de aço. Essas faixas diferem daquela citada na norma ASTM G65-16, 2016, que prevê a utilização do abrasivo classificado como AFS (*American Foundry Society*) 50/70, que corresponde a faixa granulométrica entre 212  $\mu\text{m}$  e 300  $\mu\text{m}$ , faixa das amostras 2 e 3, conforme a Tabela 4.2.

Tabela 4.1- Aberturas de malha das peneiras utilizadas na classificação granulométrica da areia.

Mesh	40	50	60	70	100
Abertura da malha ( $\mu\text{m}$ )	425	300	250	212	150

Tabela 4.2 - Faixas granulométricas de areia utilizadas em cada amostra.

Amostra	1	2	3	4	5
Faixas granulométricas ( $\mu\text{m}$ )	425 - 300	300 - 250	250 - 212	212 - 150	150 - 0

### 4.3 Metodologia e equipamentos

Para a realização deste trabalho foram utilizadas 5 amostras de aço ASTM A242 para o ensaio de desgaste abrasivo a 3 corpos, uma para cada faixa de granulometria da areia. Cada amostra possuía dimensões de 75 mm por 25 mm, e aproximadamente 4,0 mm de espessura. As amostras foram fresadas e em cada uma, a superfície que seria desgastada passou por lixamento com lixas com granulometria dos abrasivos de 80 mesh até 600 mesh.

O interior do equipamento utilizado no ensaio pode ser visto na Figura 4.1, o funil onde é colocado o material abrasivo fica posicionado na parte externa, porém é possível observar o tubo e o bocal que direciona o material abrasivo entre a roda de borracha e a amostra presa no porta-amostra. Na Figura 4.1 o braço está posicionado evitando o contato com a roda de borracha e não na posição de ensaio.



- 1 - Roda de borracha
- 2 - Porta-amostra
- 3 - Bocal
- 4 - Braço
- 5 - Trava do braço
- 6 - Massa

Figura 4.1 - Equipamento de ensaio tipo roda de borracha.

Antes dos ensaios, a vazão do material abrasivo, em  $g/min$ , foi verificada medindo a massa de material que passa pelo bocal em três minutos. A velocidade de rotação da roda de borracha foi conferida utilizando um contador de voltas acoplado na máquina e o diâmetro da roda de borracha era medido. A massa da amostra foi medida antes e depois do ensaio utilizando uma balança de precisão da marca Shimadzu modelo AY 220 com resolução de 0,0001 g.

Com a amostra devidamente fixada, o fluxo de material abrasivo era liberado e o braço interno da máquina era posicionado, colocando a peça em contato com o abrasivo e a roda de borracha já em movimento, com uma força resultante de 130 N. A partir deste contato foram cronometrados cinco minutos e com quatro minutos de ensaio um termopar era colocado na parte superior da amostra para verificar sua temperatura.

No final dos cinco minutos a carga era retirada, e a temperatura e o diâmetro da roda de borracha eram novamente medidos. A peça era removida e passava por um processo de remoção de resíduos acumulados na região do desgaste, utilizando algodão e acetona. Em seguida, a sua massa era verificada novamente.

Após, a amostra era posicionada novamente no porta-amostras, e desgastada por mais cinco minutos. Todo o processo era repetido até que fossem totalizados 30 minutos de ensaio para cada faixa granulométrica da areia. A Tabela 4.3 mostra os parâmetros utilizados no teste.

Tabela 4.3 - Parâmetros utilizados no ensaio a três corpos tipo roda de borracha.

Parâmetros do Ensaio		
Dureza da Roda de Borracha	74	Shore A
Carga Aplicada	130	N
Duração Total do Ensaio	30	minutos
Velocidade de Rotação da Roda	216,5	RPM
Distância Percorrida pela Roda (Média)	771,61	m

A norma ASTM G65-16 define que os resultados do teste de desgaste devem ser reportados em perda volumétrica de material, como mostra a equação 4.1.

$$P_v = \frac{P_m}{D} \times 1000 \quad (4.1)$$

Onde  $P_v$  é a perda de volume em  $\text{mm}^3$ ,  $P_m$  é a perda de massa em gramas e  $D$  é a densidade em  $\text{g/cm}^3$ .

Para compensar um possível desgaste da roda de borracha, o que alteraria o seu diâmetro e poderia produzir uma medição imprecisa, a norma ASTM G65-16 estabelece uma compensação, a perda volumétrica ajustada utilizando os diâmetros medidos antes e depois de cada ensaio, conforme a equação 4.2.

$$P_{va} = P_v \times \frac{D_i}{D_f} \quad (4.2)$$

Onde  $P_{va}$  é a perda de volume ajustada, em  $\text{mm}^3$ ,  $P_v$  é a perda de volume em  $\text{mm}^3$ ,  $D_i$  é o diâmetro inicial da roda de borracha, em mm e  $D_f$  é o diâmetro final da roda de borracha, em mm.

A taxa de desgaste específico  $k$  das amostras de aço é calculada de acordo com a equação de desgaste descrita por Archard, 1953, mostrada na equação 4.3.

$$k = \frac{P_{va}}{N_s} \quad (4.3)$$

Onde  $k$  é a taxa de desgaste específico em  $\text{mm}^3/\text{Nm}$ ,  $P_{va}$  é a perda de volume ajustada, em  $\text{mm}^3$ ,  $N$  é a força normal aplicada, em Newton e  $s$  é a distância de deslizamento em metros. Esta equação é bastante utilizada para expressar resultados para este tipo de ensaio, com isso é possível encontrar valores de taxa de desgaste específico de diversos materiais em trabalhos já publicados

Percentuais de variação entre os resultados da taxa de desgaste específico para o segundo ensaio em relação ao primeiro foram calculados para efeito de comparação conforme a equação 4.4.

$$V = 1 - \left( \frac{k_2}{k_1} \right) \quad (4.4)$$

Onde  $V$  é o percentual de variação,  $k_1$  é a taxa de desgaste específico para o primeiro ensaio e  $k_2$  é a taxa de desgaste específico no segundo ensaio. Foram detalhados os resultados deste percentual de variação para as medidas no minuto 10 e no minuto 30 dos ensaios, estes períodos de tempo correspondem a duração de três dos cinco procedimentos de ensaios previstos na norma ASTM G65-16, 2016.

Antes e depois dos ensaios, a areia foi analisada através de microscópio ótico Zeiss Axio Lab e software CAD para as medidas dos raios em cada incremento angular e a determinação do fator de forma em suas diferentes faixas granulométricas pelo método proposto por Masad et al., citado no item 3.5. Foram analisados dez grãos para cada uma das cinco faixas granulométricas em cada um dos ensaios de desgaste: areia sem uso no primeiro e areia com uma utilização no segundo. Em cada grão o incremento  $\Delta\theta$  foi de  $45^\circ$ , totalizando 8 medidas de raio por grão.

A perfilometria a laser da superfície das amostras foi realizada utilizando um equipamento da marca Brucker uma área de aproximadamente  $1,17 \text{ mm}^2$ , centralizada na superfície desgastada, foi analisada em cada amostra, fornecendo uma imagem 3d mostrando as variações de altura para a região analisada e um gráfico representando o perfil de um corte transversal. As escalas do eixo que representa a altura variam de acordo com a amostra.

A Figura 4.2 mostra os ensaios em que foi utilizada a areia e os dados obtidos em cada uma delas.

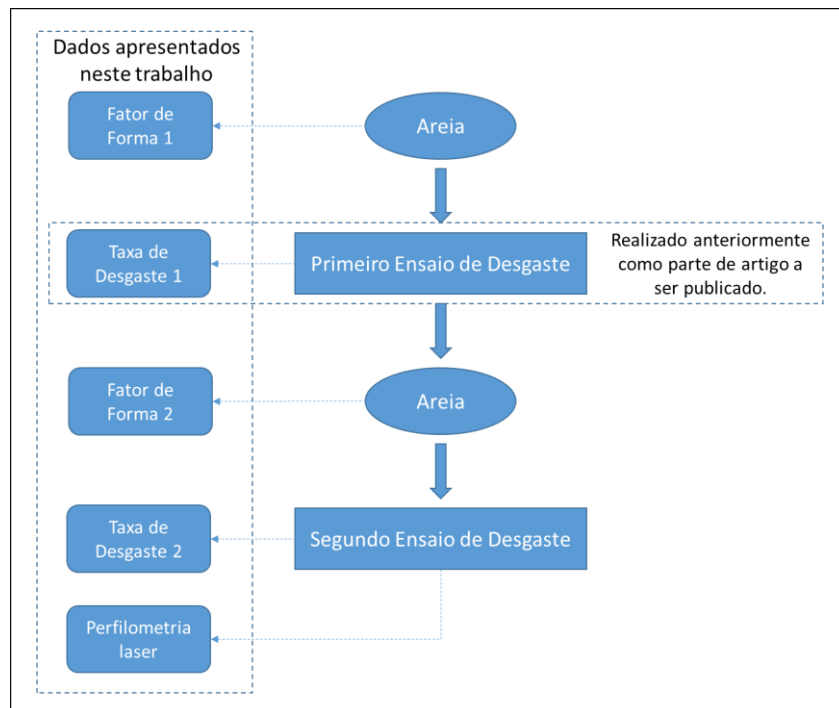


Figura 4.2 – Esquema com as etapas realizadas.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Considerando os dados obtidos experimentalmente, foram verificados inicialmente os resultados de desgaste abrasivo das amostras, com dados de variação de massa das peças analisados convertidos em perda de volume em função do tempo e em função de distância linear percorrida pela roda de borracha.

Em seguida foi verificada a condição dos grãos antes do ensaio, com resultados de análise microscópica, definindo variações em seu fator de forma em comparação entre a areia utilizada para o primeiro e para o segundo ensaio.

Finalmente foram analisados os resultados da perfilometria a laser para verificar alterações na superfície do metal em cada granulometria utilizada.

### 5.1 Resultados dos ensaios de desgaste abrasivo

As superfícies desgastadas das amostras são mostradas na figura 5.1, para cada faixa granulométrica de areia já utilizada em ensaios anteriores. Para as amostras onde foram utilizadas as menores faixas granulométricas é possível observar um pequeno acúmulo de abrasivo na parte superior da trilha (região escura no topo das superfícies das amostras 3 e 4), onde não foi possível remover toda a areia da região apenas com o procedimento de limpeza utilizado. Não há dados finais relativos à amostra de menor faixa granulométrica (150 µm) pois durante a execução do ensaio desta faixa não foi possível garantir uma cortina de material abrasivo uniforme, o que ocasionou o contato direto da borracha com o metal. Quando foram verificadas temperaturas em torno de 50°C na amostra, o ensaio foi interrompido e a amostra retirada. Na Figura 5.1 é possível observar o depósito de borracha na superfície do metal desgastado na amostra 5.



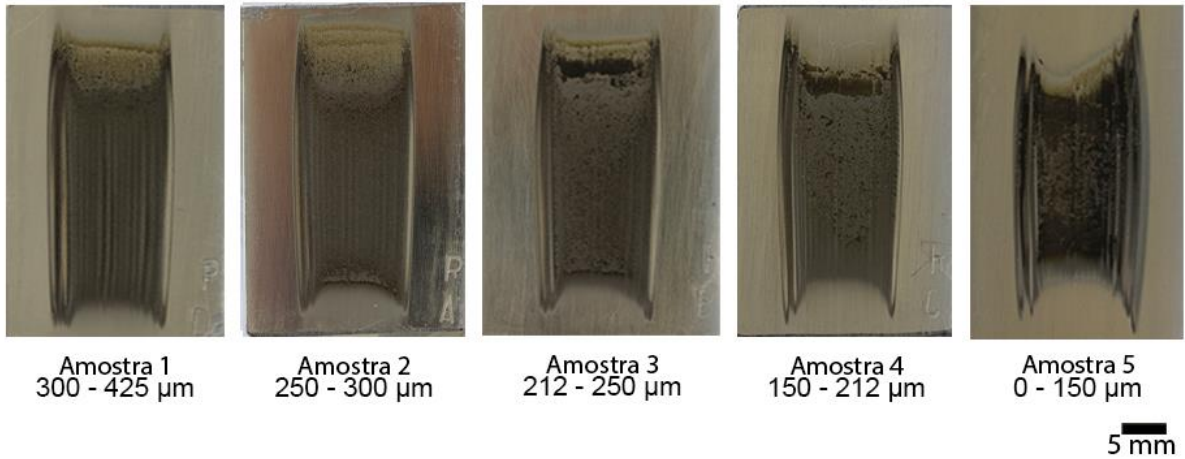


Figura 5.1 - Amostras após o ensaio de desgaste abrasivo empregando a areia já utilizada em ensaio anterior.

Os resultados dos ensaios de desgaste abrasivo, empregando areia nova (primeiro ensaio), e já utilizada (segundo ensaio), são apresentados em termos de perda de volume por tempo na Figura 5.2, e na Figura 5.3 são mostrados os dados de taxa de desgaste específico em relação ao tempo de ensaio.

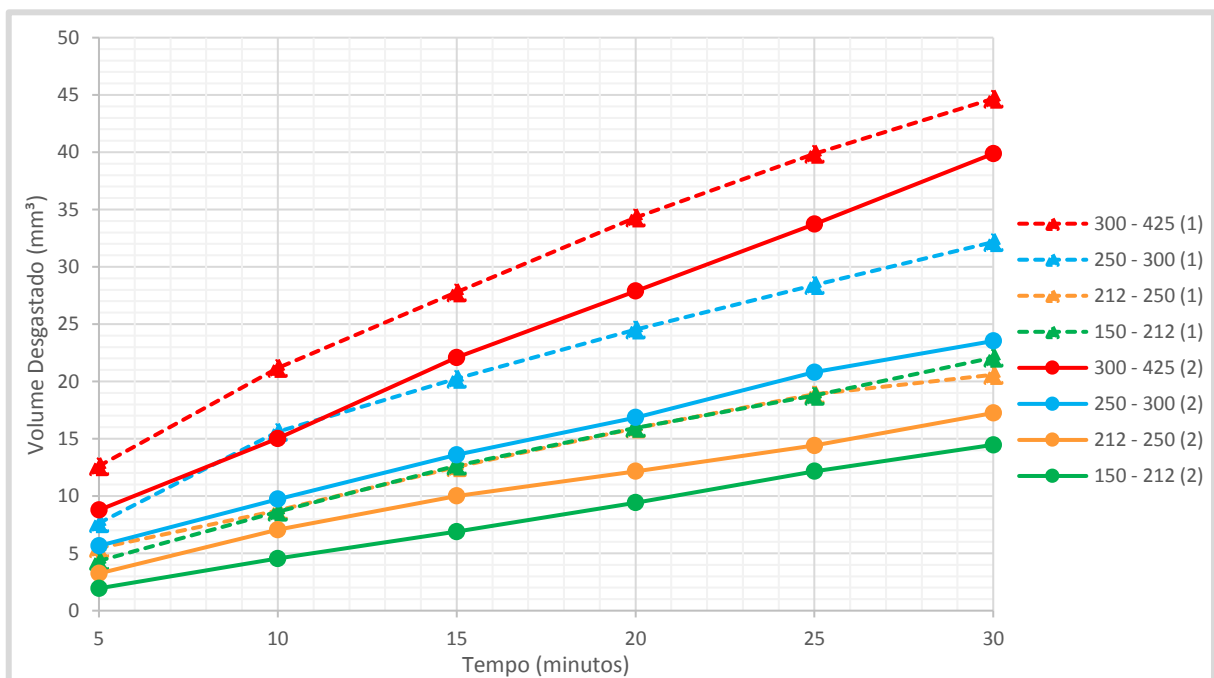


Figura 5.2 - Perda de volume por tempo de ensaio. 1: primeiro ensaio, com areia nova; 2: segundo ensaio, com areia já utilizada no ensaio anterior.

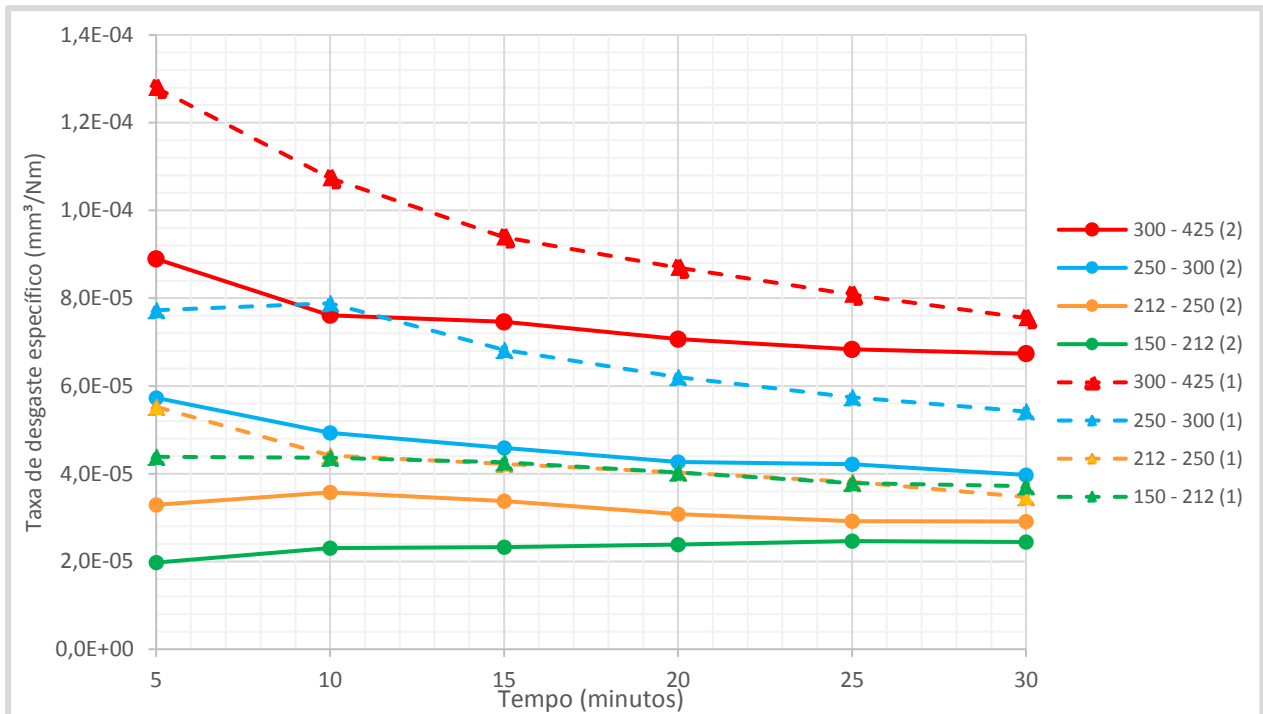


Figura 5.3 - Taxa de desgaste específico por tempo de ensaio. 1: primeiro ensaio, com areia nova; 2: segundo ensaio, com areia já utilizada no ensaio anterior.

É possível observar que o material removido de cada peça foi proporcional ao tamanho dos grãos utilizados em cada ensaio e a amostra onde foi utilizada a areia da faixa de 300 um a 425 um teve uma maior taxa de desgaste. É visível também que a diferença de taxas de desgaste entre as faixas granulométricas vai ficando menor para as areias mais finas.

Em comparação com o primeiro ensaio, onde foi utilizada a areia nova, nota-se uma menor perda de volume em todas as faixas para a areia em sua segunda utilização, que é o segundo ensaio. A Figura 5.4 mostra a variação da taxa de desgaste comparando os dois ensaios, a faixa de areia entre 212 e 250  $\mu\text{m}$  mostra uma menor variação entre o segundo ensaio com o primeiro ensaio, que utilizou a areia nova, ficando numa faixa de aproximadamente 15% a 20% maior para a taxa de desgaste específico nos minutos 10 e 30.

Para todas as faixas de tamanho dos grãos esta variação tende a diminuir com o decorrer dos ensaios. Na segunda utilização as taxas de desgaste específico apresentam valores mais constantes principalmente para as faixas de menor granulometria. A faixa granulométrica que teve a menor variação nestas taxas está dentro da faixa recomendada pela norma ASTM G65-16, 2016.

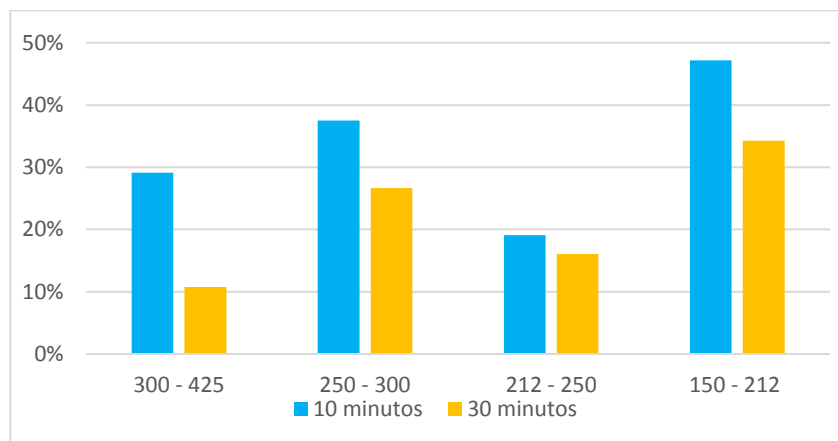


Figura 5.4 – Percentuais de variação nas taxas de desgaste específico entre o primeiro e o segundo ensaio verificados em 10 minutos e 30 minutos.

## 5.2 Resultados da análise do fator de forma da areia.

A Figura 5.5 e a Figura 5.6 mostram o resultado médio dos fatores de forma para cada granulometria, para a areia sem e com utilização. É possível observar que a areia depois do processo ficou com resultados próximos em suas três maiores faixas (o processo pode ter deixado os grãos mais arredondados para estas faixas), assim como se tem um menor desvio padrão nas três faixas intermediárias (grãos com formatos mais uniformes).

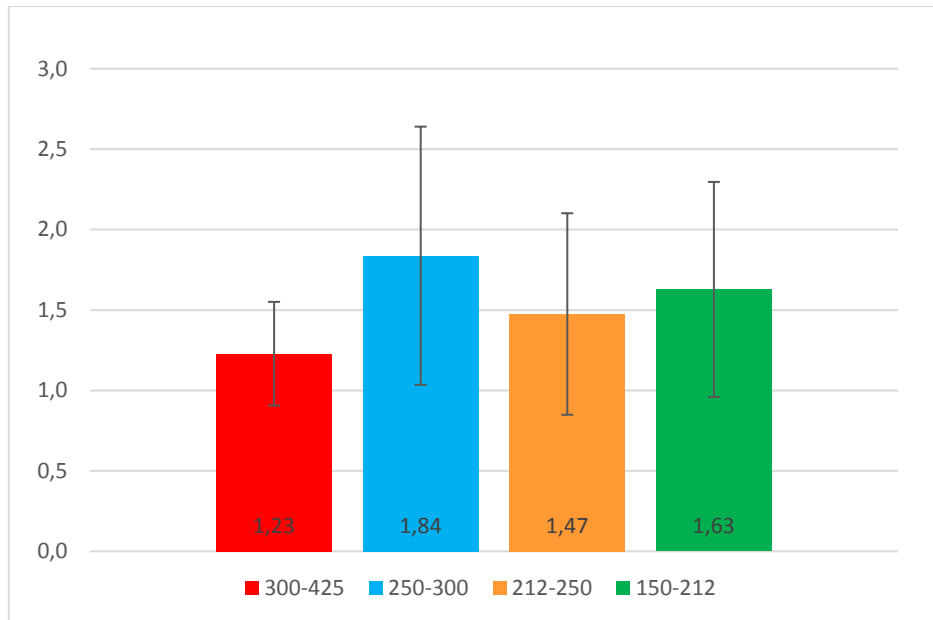


Figura 5.5 – Médias dos fatores de forma dos grãos da areia para o primeiro ensaio de desgaste, empregando areia nova.

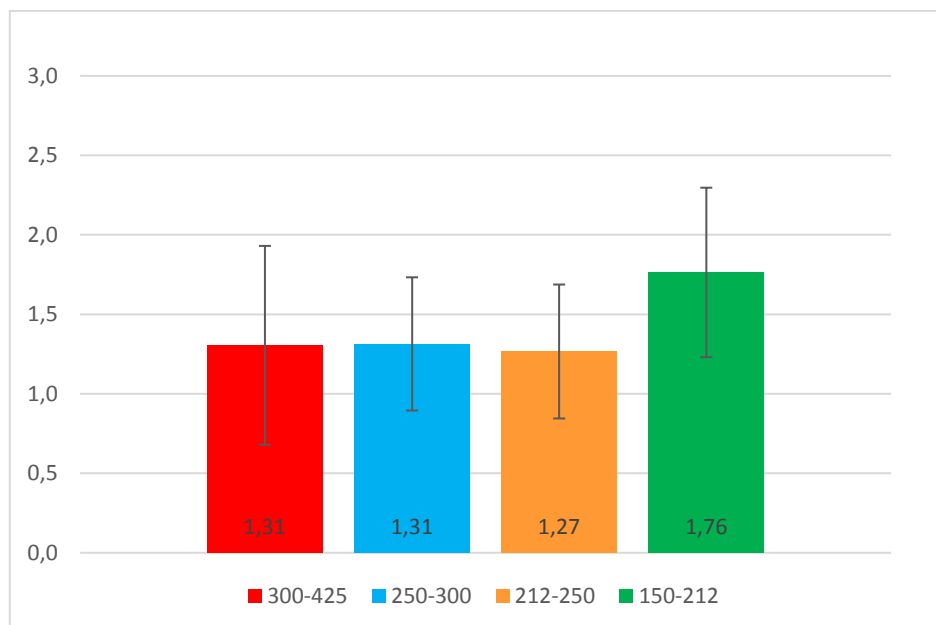


Figura 5.6 - Médias dos fatores de forma dos grãos da areia para o segundo ensaio de desgaste, reutilizando a areia do primeiro ensaio.

Considerando cada um dos dois grupos, o fator de forma médio, para todos os grãos analisados da areia nova, de 1,54 com desvio padrão de 0,67 e, para a areia reutilizada, a média do mesmo número de grãos é de 1,48 com o desvio padrão sendo igual a 0,63.

### 5.3 Resultados da análise da superfície com interferômetro a laser

Com esta análise foi possível gerar um perfil de variações na altura de uma área de cada superfície desgastada, sempre analisada na região central da trilha, para cada amostra ensaiada. A Figura 5.7, Figura 5.8 e Figura 5.9 mostram os resultados para cada amostra com uma projeção da superfície e as variações de altura em um corte transversal ao sentido das trilhas.

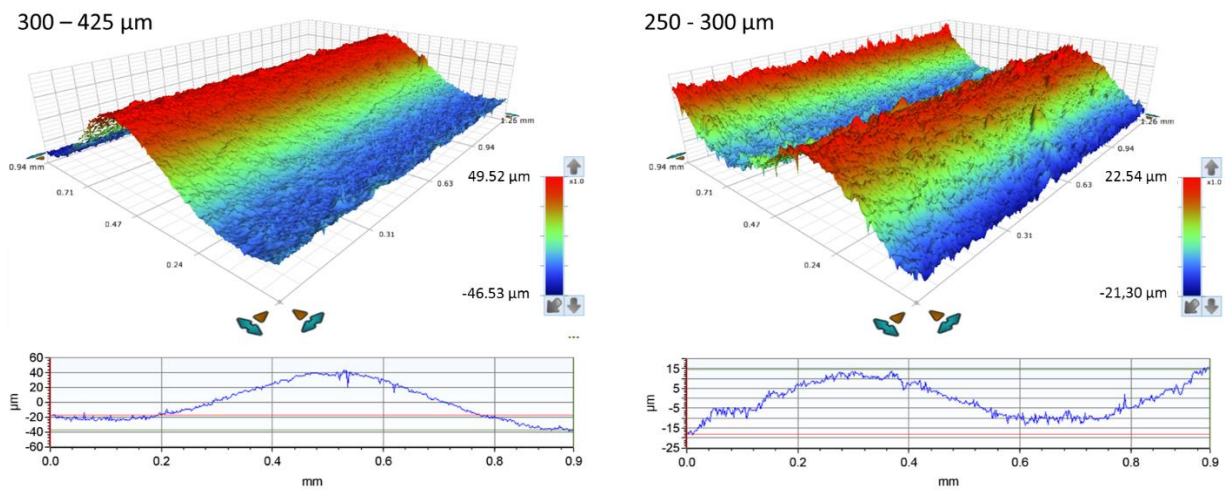


Figura 5.7 – Superfície da amostra 1 (300 – 425  $\mu\text{m}$ ) e amostra 2 (250 – 300  $\mu\text{m}$ ) após o ensaio.

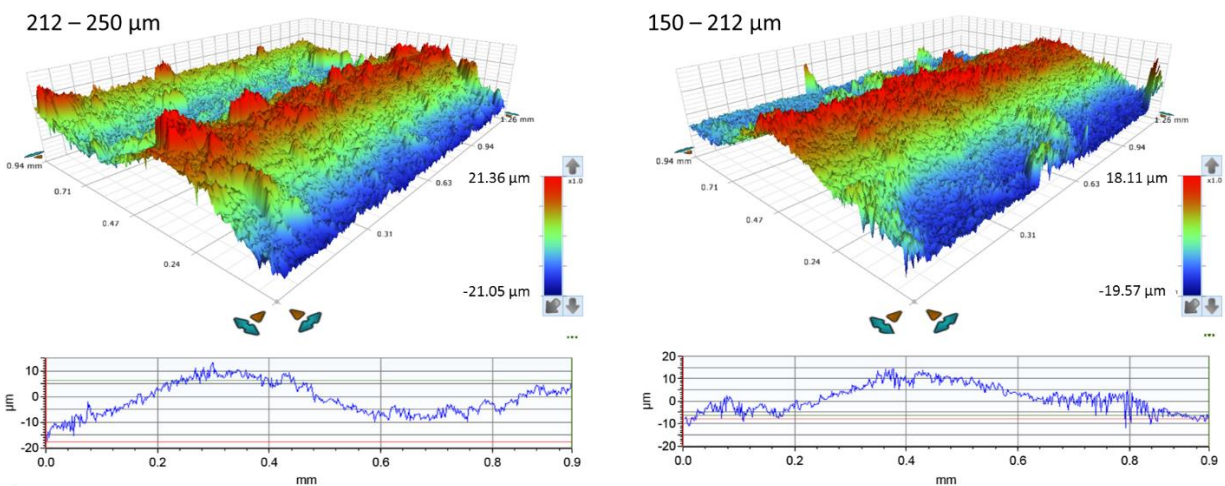


Figura 5.8 - Superfície da amostra 3 (212 - 250  $\mu\text{m}$ ) e amostra 4 (150 - 212  $\mu\text{m}$ ) após o ensaio.

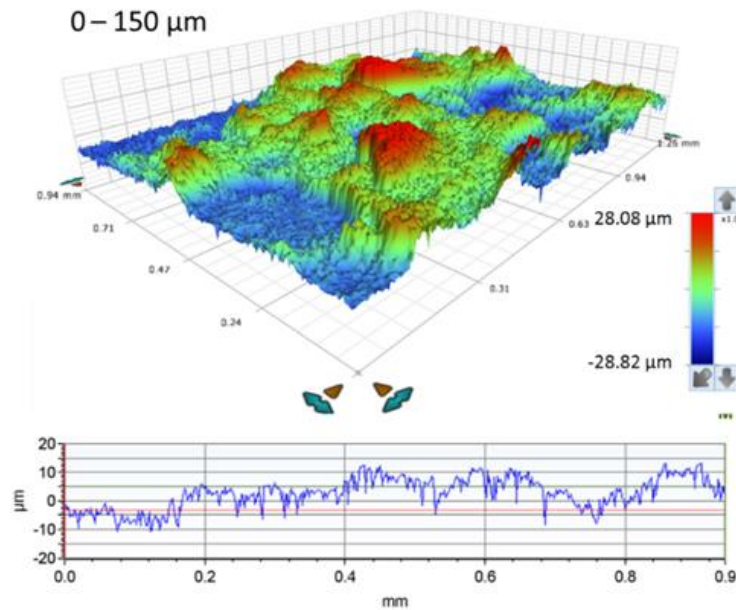


Figura 5.9 - Superfície da amostra 5 (0 - 150  $\mu\text{m}$ ).

Se observa os vales gerados pela interação dos grãos com a superfície, e a variação de rugosidade entre as diferentes faixas granulométricas da areia utilizada para cada amostra. É possível observar nas imagens da Figura 5.8 que tanto a amplitude quanto a profundidade dos vales varia de acordo com a faixa granulométrica utilizada. Na amostra 5 representada na Figura 5.9, onde não se formou a cortina uniforme durante o ensaio, não foi possível observar claramente os picos e vales gerados pelas trilhas de desgaste.

## 6. CONCLUSÕES

Baseado nos resultados utilizando este aço e os procedimentos citados, é concluído que os ensaios mostram diferenças entre o primeiro, realizado utilizando a areia nova, e o segundo, que reutiliza a areia do primeiro ensaio. No primeiro ensaio todas as amostras tiveram uma maior perda de volume se comparadas ao segundo ensaio, com exceção da amostra para a menor faixa, que não pode ter o ensaio concluído. A impossibilidade de concluir o ensaio para a menor faixa granulométrica também pode evidenciar um alteração nas características do material abrasivo, já que quando realizado com a areia nova o ensaio ocorreu com uma cortina uniforme de material abrasivo.

Observando as variações percentuais das taxas de desgaste entre os dois ensaios é possível notar que para os grãos entre 212  $\mu\text{m}$  e 250  $\mu\text{m}$  aconteceu a menor variação, e esta faixa coincide com a indicada pela norma ASTM G65-16, 2016, para a realização dos ensaios.

É observada uma tendência de a forma dos grãos ser uniformizada entre as três maiores faixas granulométricas, com valores médios muito próximos para o fator de forma. Parece existir a possibilidade de a maneira como os grãos fraturam, citada por Stachowiak como dependente da tendência do material ser mais ou menos frágil, também ser dependente do tamanho dos grãos.

De uma maneira geral, tanto o fator de forma quanto o desvio padrão foi menor para a areia reutilizada; isso também leva a uma possível uniformização da forma dos grãos após passar pelo primeiro ensaio.

Nas imagens da perfilometria a laser, é possível observar a variação nas características da superfície de acordo com a faixa granulométrica utilizada. Os vales mais profundos vistos nas imagens dos desgastes com maiores grãos podem ser relacionados a maior perda volumétrica de material observada nos resultados dos ensaios de desgaste. Novamente a influência da alteração da areia de menor granulometria foi observada, não foi possível identificar picos e vales nos resultados da perfilometria a laser para esta faixa, neste caso o desgaste

abrasivo se aproximou mais da condição de desgaste a dois corpos, já que não foi possível estabelecer um fluxo de areia contínuo entre a superfície da amostra e a roda de borracha.

Considerando todos os fatores analisados neste trabalho, com a alteração das características do material abrasivo utilizado, a sua reutilização possui influência nos resultados dos ensaios de desgaste, diminuindo o volume desgastado e a taxa de desgaste específica.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Al-Rousan, T.; Masad, E.; Tutumluer, E.; Pan, T.; **“Evaluation of Image Analysis Techniques for Quantifying Aggregate Shape Characteristics”**, Construction and Building Materials, vol. 21, pp 978–990, 2007.

Archard, J.; **“Contact And Rubbing Of Flat Surfaces”**, Journal of Applied Physics, vol. 24, pp 981–988.

ASTM: American Society for Testing and Materials. **“Standard Terminology Relating to Wear and Erosion”**, ASTM G40-15, 2015.

ASTM: American Society for Testing and Materials. **“Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus”**, ASTM G65-16, 2016.

Chacon-Nava, J.; Martinez-Villafan, A.; Almeraya-Calderon, F.; Cabral-Miramontes, J.; Stack, M.; **“Some Remarks on Particle Size Effects on The Abrasion of a Range of Fe Based Alloys”**, Tribology International, vol 43, pp 1307-1317, 2010.

Eyre, T.; **“Wear Characteristic of Metals, Source Book on Wear Control Tecnology”**, Tribology International, vol. 9, pp 203-212, 1976.

Jost, H. P.; **“Tribology – origin and future”**, Wear, vol. 136, pp 1-17, 1990.

Misra, A.; **“An Experimental Study of Three-Body Abrasive Wear”**, Wear, vol. 85, pp 57-68, 1982.

Rabinowicz, E.; Dunn, L.; Russell, p.; **“A Study of Abrasive Wear Under Three-Body Conditions”**, Wear, vol. 4, pp 345–355 1961.

Sinatora, A.; **“Tribologia: Um Resgate Histórico e o Estado da Arte”**, Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005

Stachowiak, G.; Batchelor, A.; **“Engineering Tribology”**, 4<sup>th</sup> Edition, Elsevier, 2014.

Woldmann M.; van der Heide, E.; Schipper, D.; Tinga, T.; Masen, M.; **“Investigating the Influence of Sand Particle Properties on Abrasive Wear Behaviour”**, Wear, vol. 294–295, pp 419-426, 2012.

Xiu-lin, J.; Ju-yi, W.; Cui, J.; Jian-hua, Z.; **“Abrasive Wear Resistance of Dual Phase Steels DP 980 and DP 600, Journal of Iron and Steel Research, International”**, pp 317-323, 2005.

Zum Gahr, K.; **“Microstructure and Wear of Materials”**, Tribology series, Elsevier, vol. 10, 1987.