

ARTHUR MONTEIRO BARBOSA DE CARVALHO

**ANÁLISE DA REUTILIZAÇÃO DE ABRASIVO NO
ENSAIO DE DESGASTE RODA DE BORRACHA**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2018

ARTHUR MONTEIRO BARBOSA DE CARVALHO

**ANÁLISE DA REUTILIZAÇÃO DE ABRASIVO NO ENSAIO DE
DESGASTE RODA DE BORRACHA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito de conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia Mecânica pertencente a Universidade Federal de Uberlândia, de Uberlândia, para a obtenção do título de **BACHAREL em ENGENHARIA MECÂNICA**.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Washington Martins da Silva Junior

UBERLÂNDIA - MG

2018

DEDICATÓRIA

À Deus, pela companhia, força, perseverança, conforto e inspiração.

Aos meus pais Marcílio (in memorian) e Sueli por todo o apoio o incentivo a dedicação dados a mim por todos estes anos. A minha irmã Laura por todo o apoio e companheirismo. À minha namorada Izabella pelo amor, carinho, dedicação e companheirismo em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Washington Martins da Silva Júnior pela excelente orientação, atenção e amizade.

Aos colegas de laboratório Carlos Alberto Damião, Vinicius Carvalho Teles e Gabriela Caixeta Alcarria.

Aos técnicos, Ângela Maria Silva Andrade e Jonas Profeta Borges.

Ao laboratório de Tribologia e Materiais pelo apoio material e pela disponibilidade para a realização desse trabalho.

À Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Mecânica, pela oportunidade de realizar este curso.

À toda a minha família pelo incentivo e apoio para a conclusão deste trabalho.

De Carvalho, A. M. B. **Análise da Reutilização de Abrasivo no Ensaio de Desgaste Roda de Borracha**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil.

RESUMO

Abrasão é a perda de material devido à interação entre duas superfícies ou entre duas superfícies e partículas entre elas. Para que ocorra abrasão devem ser considerados alguns parâmetros como rugosidade da superfície, a forma das partículas, o tamanho das partículas e a dureza, estes parâmetros são importantes para a identificação de qual tipo de abrasão está ocorrendo. Todo processo de desgaste abrasivo é um processo evolutivo, iniciando-se pela interação entre os corpos causando pequenos sulcos e pequenos destacamentos de material e então evoluindo para a interação entre os sulcos e aumentando a taxa de remoção do material devido à estas interações. Ao longo do processo de abrasão, os parâmetros dos abrasivos podem variar como, a angulosidade e o tamanho das partículas. Existem vários tipos de testes de abrasão, entre eles, o pino sobre disco, roda de borracha e teste abrasivo alternativo. Este trabalho foi realizado em cima do teste de abrasão a três corpos, roda de borracha que tem por sua norma base a norma ASTM G65. Com o intuito de melhorar o aproveitamento de insumos de pesquisa, este vem apresentar a reutilização da areia abrasiva utilizada no teste roda de borracha, um dos testes mais utilizados para a representação de abrasão em laboratório. A norma ASTM G65, dentre outras definições, descreve que o teste roda de borracha deve ser realizado com areia nova e mais duas reutilizações da mesma, totalizando 3 ciclos de uso. Conforme os resultados obtidos neste trabalho, foi observada a possibilidade de aumentar a reutilização da areia em até 6 ciclos de uso sem alteração na taxa de desgaste. Atendendo assim os parâmetros da norma. Ao aumentar o número de reutilização do material abrasivo, tem-se um ganho de rendimento por saco de areia de 100%, causando assim uma queda no custo de 50%, uma vez que conseguimos realizar mais ciclos de testes com o mesmo material. Estes resultados abrem espaço para análise de reutilização de abrasivos em outros tipos de ensaios de desgaste abrasivo.

De Carvalho, A. M. B. Abrasive Reuse Analysis on the Rubber Wheel Wear Test. 2018. Graduation Project, Federal University of Uberlandia, Uberlandia, Brazil.

ABSTRACT

Abrasion is the material loss due the interaction between two surfaces or between two surfaces and its particles. For abrasion to occur, some parameters such as surface roughness, particle shape, particle size and hardness must be considered. These parameters are important for the identification of the type of abrasion that is occurring. Any wear abrasion is an evolutionary process. Beginning with interaction between elements causing small furrows and small detachments of material, then evolving to the interaction between those furrows and increasing the rate of removal of the material due to these interactions. Throughout the abrasion process some parameters can vary, like angularity and size of the particles. There are several types of abrasion tests, among them, the pin on disc, rubber wheel and reciprocation test. This paper performs the test of abrasion to three bodies, know as the test rubber wheel test, which has the ASTM G65 standard as bases. In order to improve the use of research's supplies, this work presents the reuse of abrasive sand in rubber wheel test, as this sand is one of the most used material for abrasion representation in laboratory. According to ASTM G65 norm, rubber wheel test should be performed with new sand and two more reuses of the same sand, totaling 3 cycles of this supply's use. As per the results accomplished in this work, it was observed that would be possible to increase the number of abrasive sand reuse giving us 6 cycles of test rubber wheel and still maintain the same good results of the tests carried out following the norm. By increasing the number of abrasive material reuse, there is a yield gain per sandbag of 100%, causing a drop of 50% in the test's cost, since we can perform more cycles of tests with the same material. Such results open space for abrasive material reuse analysis in other types of abrasion essays.

Key word: Rubber Wheel test , Abrasion, ASTM G65, Sand.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 : Mecanismos de desgaste	16
Figura 2 : Desgaste abrasivo (a) a dois corpos e (b) a três corpos	18
Figura 3 : (a) Microsulcamento, (b) interação de microsulcos, (c) microcorte e (d) microtrincamento	19
Figura 4: Mecanismo de desgaste abrasivo de microindentação.....	20
Figura 5 : Efeito do tamanho da partícula na abrasão a 2-corpos, abrasão a 3-corpos e na erosão.	21
Figura 6: Taxa de volume desgastado por razão entre dureza do abrasivo e dureza da superfície (Ha/Hs).....	22
Figura 7: Ilustração do contato entre uma partícula abrasiva submetida a uma carga normal e uma superfície plana. (a) se Ha for maior que 1,2 Hs e (b) se Ha for menor 1,2 Hs.....	22
Figura 8: Regime de desgaste em relação à dureza do abrasivo e do material.	23
Figura 9: WILLIAMS E HYNICICA (1992a, b e c). (a) Partícula abrasiva idealizado por WILLIAMS e HYNICICA (1992a, 1992c). Sendo D a diagonal maior, $45^\circ < \beta < 90^\circ$ e h a espessura do filme. (b) Efeito da relação D/h no desgaste abrasivo de um bronze fosforoso .	25
Figura 10: A partícula rola entre as superfícies devido a formação do binário em (a) e (b), causando pequenos danos am ambas as superfícies	26
Figura 11 : (a) a (d) a partícula rola até uma posição de equilíbrio, (e) situação similar ao que ocorre quando as durezas das superfícies são diferentes e (f) a partícula se fixa na superfícies mole riscando a mais dura.	27
Figura 12 : Esquema simplificado do equipamento para ensaio de desgaste abrasivo recomendado pela ASTM G 65-16.....	28
Figura 13: Esquema do abrasômetro roda de borracha a ser utilizado nos ensaios.....	31
Figura 14: Perda total de massa do contra corpo em cada utilização da areia.	34
Figura 15: Perda de Massa do contra corpo no Regime Permanente em cada utilização da areia.....	35
Figura 16: Força Tangencial Média registrada em cada utilização da areia.	35
Figura 17: Força de Atrito registrada em cada utilização da areia.	36
Figura 18: (a) Areia 0, não utilizada nenhuma vez, (b) Areia utilizada 5 vezes, (c) Areia utilizada 12 vezes.....	37

Figura 19: Histograma de distribuição e curva Normal da Areia 0 – sem nenhuma utilização.	38
Figura 20: Frequência Acumulada Areia 0	39
Figura 21: Histograma de distribuição e curva Normal da Areia 1 – utilizada uma vez.....	39
Figura 22: Frequência Acumulada Areia 1.....	40
Figura 23: Histograma de distribuição e curva Normal da Areia 5 – utilizada cinco vezes.....	40
Figura 24: Frequência Acumulada Areia 5.....	41
Figura 25: Histograma de distribuição e curva Normal da Areia 7 – utilizada sete vezes.....	41
Figura 26: Frequência Acumulada Areia 5.....	42
Figura 27: Histograma de distribuição e curva Normal da Areia 10 – utilizada dez vezes.....	42
Figura 28: Frequência Acumulada Areia 7.....	43
Figura 29: Histograma de distribuição e curva Normal da Areia 12 – utilizada doze vezes....	43
Figura 30: Frequência Acumulada Areia 12.....	44
Figura 31: Relação perda de massa por tamanho da partícula.....	45
Figura 32: Fator de arredondamento, areia sem utilização.....	46
Figura 33: Fator de arredondamento, areia utilizada 5 vezes.....	46
Figura 34: Fator de arredondamento, areia utilizada 12 vezes.....	47
Figura 35: Perda de massa x circularidade da partícula.....	48

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Equação para determinar o fator de arredondamento F:

Equação 2: Tamanho crítico da partícula:

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Principais parâmetros de teste, utilizando o tribômetro roda de borracha de acordo com a norma ASTM G65-16 (ASTM, 2004).

Tabela 2: Parâmetros dos testes abrasivos roda de borracha.

Tabela 3: Tamanho médio da partícula em relação à utilização da areia e perda de massa.

Tabela 4: Circularidade média da partícula em relação à utilização da areia e perda de massa.

LISTA DE SIMBOLOS

Ha - Dureza do Abrasivo

Hs - Dureza da Superfície/Material

F - Fator de Arredondamento

A - Área projetada do abrasivo

p - Perímetro da imagem projetada

h - Distância entre as superfícies ou espessura da interface

D - Tamanho do abrasivo

β - Diagonal maior do abrasivo

R - Força sobre o abrasivo

SUMÁRIO

CAPITULO I - INTRODUÇÃO	13
CAPITULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 - TRIBOLOGIA	15
2.2 – DESGASTE ABRASIVO.....	16
2.2.1- Mecanismos de desgaste abrasivo	18
2.3- INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS FÍSICOS SOBRE A TAXA DE DESGASTE ABRASIVO	20
2.3.1 – Tamanho da partícula abrasiva	20
2.3.2 – Dureza da partícula abrasiva	21
2.3.3 – Forma da partícula abrasiva	23
2.3.4 – Dinâmica da partícula abrasiva	24
2.4 ENSAIO DE DESGASTE ABRASIVO RODA DE BORRACHA (TRIBÔMETRO). 27	
CAPITULO III - METODOLOGIA	30
3.1 – O ENSAIO RODA DE BORRACHA.....	30
3.2 – METODOLOGIA DE REUTILIZAÇÃO DA AREIA E AQUISIÇÃO DE IMAGENS	32
CAPITULO IV - RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
4.1 – TAXA DE DESGASTE, FORÇA TANGENCIAL APLICADA e ATRITO	34
4.2 – IMAGENS DAS PARTICULAS DE AREIA	36
4.3 – TAMANHO DAS PARTICULAS DE AREIA	38
4.4 – FATOR DE FORMA.....	45
4.5 – GANHO NA REUTILIZAÇÃO DA AREIA	48
4.6 – DISCUSSÃO.....	48
CAPITULO V - CONCLUSÕES	50
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51
APÊNDICE A – METODO DE ANALISE DE PARTÍCULAS DE AREIA	51

CAPITULO I

INTRODUÇÃO

Abrasão é o desgaste, é a perda de material devido à interação entre duas superfícies ou entre duas superfícies e partículas entre elas.

Para que ocorra abrasão devem ser considerados alguns parâmetros, neste caso entre apenas duas superfícies o parâmetro de rugosidade da superfície é o determinante. Já no caso de interação com partículas os parâmetros a serem considerados são: a forma, se a partícula tem mais cantos vivos ou se é mais próxima de uma esfera; o tamanho, se é uma partícula pequena ou grande; a dureza, se a partícula é mais dura ou mais mole que as superfícies pelo qual ela está cercada.

Todo processo de desgaste é um processo evolutivo, logo o desgaste abrasivo não é diferente. Tal desgaste inicia-se pela interação entre os corpos causando pequenos sulcos e pequenos destacamentos de material e a partir deste estágio evoluindo para a interação entre os sulcos e aumentando a taxa de remoção do material devido à estas interações.

Ao longo do processo de abrasão alguns parâmetros, no caso de uma abrasão envolvendo partículas em meio à duas superfícies, podem variar tais como, a angulosidade, onde as partículas podem se tornar mais arredondadas, e o parâmetro tamanho, pois estas partículas podem se fraturar devido às cargas de interação do meio.

Existem vários tipos de ensaios de abrasão, entre eles, o pino sobre disco, roda de borracha, teste abrasivo alternativo.

Em laboratórios de pesquisa são seguidas muitas normas para a realização dos ensaios, tendo em vista a necessidade de repetibilidade destes para a comprovação, comparação e análise. Tais normas indicam os modos de utilização tanto de produtos químicos como físicos, segurança no uso, frequência de reutilização, modo correto de armazenamento e alguns a forma correta de descarte. Estas normas são formuladas também a partir de pesquisas e comparações.

Devido à necessidade de um melhor aproveitamento de materiais e com o entendimento de que a redução de custo na área de pesquisa é importante. A reutilização de materiais deve

ser recorrente e apresentada aos professores e alunos como uma necessidade, para a viabilidade de execução das pesquisas, e melhor aproveitamento dos recursos recebidos para executá-la. Por exemplo, em um teste completo para o ensaio de roda de borracha, são necessários 20 Kg de areia para sua execução. De acordo com as normas de pesquisa são necessários pelo menos 5 testes completos para que seja possível uma boa análise estatística, ou seja para uma pesquisa simples serão utilizados 100 Kg de areia.

Este trabalho de conclusão de curso apoia-se exatamente no princípio de que a realização de pesquisas com qualidade, tendo embasamento teórico e prático, devem levar em conta além de resultados, o custo e o melhor aproveitamento dos insumos para a sua realização.

CAPITULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - TRIBOLOGIA

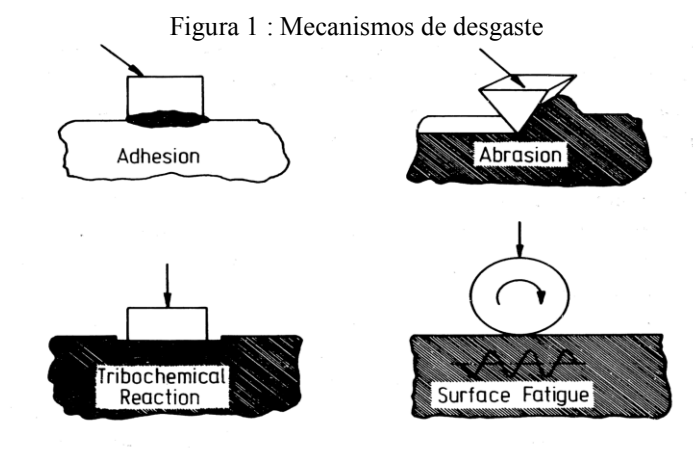
Analisando a origem da palavra tribologia, encontramos o termo “*tribo*” de origem grega significa atritar, esfregar, friccionar. Já o sufixo *logia* vem da expressão “*logos*” que significa estudo, conhecimento, compreensão. Desta forma, a tribologia pode ser interpretada como a “ciência e tecnologia de superfícies que interagem em movimento relativo e assuntos associados” (JOST, 1966).

Trata-se de uma ciência multidisciplinar que utiliza dos fundamentos da física, química, ciência dos materiais e engenharia mecânica. É também uma área de estudos relativamente jovem, com estudos iniciais datados de 1966, tendo como precursor H. Peter Jost (1966). Jost realizou análises de perdas por desgaste no Reino Unido, o que o levou à conclusão que poderiam ser reduzidas em até 20% as perdas geradas por sistemas tribológicos, utilizando o conhecimento obtido nesta ciência. É também dele a análise da década de 90, que por decorrência dos estudos em tribologia, deixariam de ser gastas parcelas de 1,3% a 1,6% do PIB de um país desenvolvido.

Das várias linhas de pesquisa dentro da tribologia, o desgaste, estudado por Zum Gahr (1987), que ocorre principalmente por perda de material ou danos na sua superfície. O desgaste dificilmente se configura como um processo catastrófico, causando, na maioria das vezes, uma redução na performance e na vida do equipamento. Isto pode acarretar em alterações dimensionais ou em danos na superfície dos componentes, causando problemas secundários, como vibrações, desalinhamentos e desbalanceamentos.

O processo de desgaste pode ser melhor conhecido a partir do mecanismo de interações dentro do sistema tribológico. O movimento relativo entre corpo e contra corpo, ou entre corpo – partícula abrasiva – contra corpo, e o desgaste resultante deste movimento, indicam o tipo de desgaste ocorrido; deslizamento, rolamento, oscilação, impacto, erosão, adesão entre outros mecanismos.

O critério mais utilizado na classificação destes mecanismos remete a norma DIN 50320 que conforme a Figura 1, lista o processo em quatro espécies: adesão, abrasão, tribocorrosão e fadiga superficial.



Fonte: Zum Gahr (1987).

De acordo com o autor Zum Gahr (1987), o desgaste adesivo se dá pela transferência de matéria entre duas superfícies, por causa do rompimento das forças de ligação interatômicas, entre irregularidades ou desvios de formas superficiais microscópicas presentes nos planos do corpo e do contra corpo. Já a fadiga superficial, ocorre em função da formação de vazios na região superficial, devido a tensões cíclicas que resultam no destacamento do material. Na tribocorrosão, o desgaste ocorre em meios corrosivos, sólidos, líquidos ou gasosos. Já na abrasão, ocorre a remoção de material por riscamento.

Segundo Eyre (1976), entre os mecanismos citados, a abrasão possui uma maior responsabilidade na cadeia de desgaste, sendo responsável por 50% das falhas, seguida pela adesão 15% e a erosão com 8%. Contudo, apesar das apresentações sobre este tipo de desgaste se focarem mais nos aspectos negativos, ele também possui aspectos positivos, como no caso de usinagem de materiais frágeis e duros e no amaciamento de componentes de sistemas mecânicos (NOGUEIRA; DE MELLO, 1998 b; ZUM GAHR, 1987).

2.2 – DESGASTE ABRASIVO

Pode-se afirmar que, a abrasão tem um papel especialmente relevante entre os mecanismos de desgaste dos materiais. Motivo pelo qual, se encontra facilmente uma ampla literatura sobre o assunto. Com o objetivo de uma melhor compreensão sobre o tema, são apresentadas abaixo três definições clássicas sobre desgaste abrasivo:

Zum Gahr (1987): processo de desgaste que ocorre devido à penetração de partículas duras ou pelas protuberâncias de uma superfície de um contra corpo duro em uma superfície menos dura decorrente de um deslizamento de ambas as superfícies.

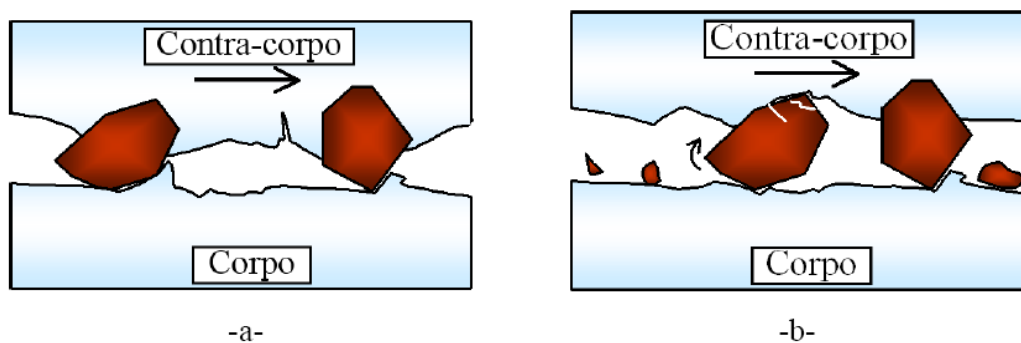
Stachowiak e Batchelor (2001): perda de material pela passagem de partículas duras por uma superfície, podendo ocorrer sempre que a superfície for carregada contra partículas com uma dureza maior ou igual a ela.

Hutchings (1992): remoção ou deslocamento de material da superfície por partículas duras, às vezes por protuberâncias duras no contra corpo sendo forçado e deslizado contra uma superfície.

É importante destacar que em qualquer uma das definições acima, os autores afirmam que, na abrasão o agente responsável pelo desgaste, são as partículas duras presentes nas superfícies de contato. Com isso em mente, entra-se nas relações de dureza entre a partícula abrasiva e o contra corpo. Se a partícula abrasiva for mais dura que a superfície do contra corpo, ocorrerá o desgaste da superfície, já para o caso em que a superfície é mais dura que a partícula abrasiva, está poderá sofrer abaulamentos ou até mesmo uma quebra.

Uma segunda observação que deve ser feita, é de como se apresentarão as partículas abrasivas na interface, corpo - contra corpo. Elas podem se apresentar soltas entre as duas superfícies ou engastadas em uma delas, causando assim diferentes mecanismos de desgaste. Neste contexto, a OECD (Organization for Economic Cooperation and Development, 1969) definiu o desgaste abrasivo como, a perda de matéria devido ao movimento relativo de duas superfícies e decorrente da ação de: asperidades duras em uma das superfícies; partículas abrasivas livres entre as duas superfícies; partículas abrasivas engastadas em uma das superfícies. Esta variação entre partículas presas/engastadas e livres é tão importante em abrasão que, se decidiu dividir o processo em duas categorias. Abrasão a dois corpos (Figura 2 a) e abrasão a três corpos (Figura 2 b), respectivamente.

Figura 2 : Desgaste abrasivo (a) a dois corpos e (b) a três corpos



-a-

-b-

Fonte: (adaptado de Bozzi; de Mello, 1999).

Esta classificação facilita a troca de conhecimento entre pesquisadores de todo o mundo e é útil para servir como caminho de entendimento para não especialistas (GATES, 1998).

As diferenças entre as duas formas de abrasão, a dois e a três corpos, se apresentam da seguinte maneira. Na abrasão a dois corpos, o fato de um dos corpos possuir partículas engastadas em sua superfície, faz com que este abrasivo sempre passe sobre a outra superfície em um movimento de deslizamento. Já no caso da abrasão a três corpos, o abrasivo se encontra solto em meio às duas superfícies, podendo se engastar ou não em alguma delas, caso se engaste, gerará um movimento de deslizamento, porém, a movimentação convencional é a de rolamento da partícula entre as duas superfícies, por não se engastar em nenhuma delas.

Estas diferentes formas de movimentação do abrasivo, são responsáveis por grandes diferenças nas taxas de desgastes, quando em condições comparáveis de testes (força normal aplicada, tamanho do abrasivo, distância percorrida, tempo de teste, etc.). Constata-se que o desgaste abrasivo a dois corpos gera um coeficiente de desgaste de pelo menos uma ordem de grandeza maior em relação à abrasão a três corpos (RABINOWICZ; DUNN; RUSSELL, 1961; HUTCHINGS, 1992).

Sabendo-se que os abrasivos são os mesmos, os abrasivos a três corpos gastam cerca de 90% do tempo rolando, não resultando em um desgaste considerável e cerca de 10% do tempo deslizando, aí sim gerando um desgaste nas superfícies do corpo e do contra corpo (RABINOWICZ; DUNN; RUSSELL, 1961).

2.2.1- Mecanismos de desgaste abrasivo

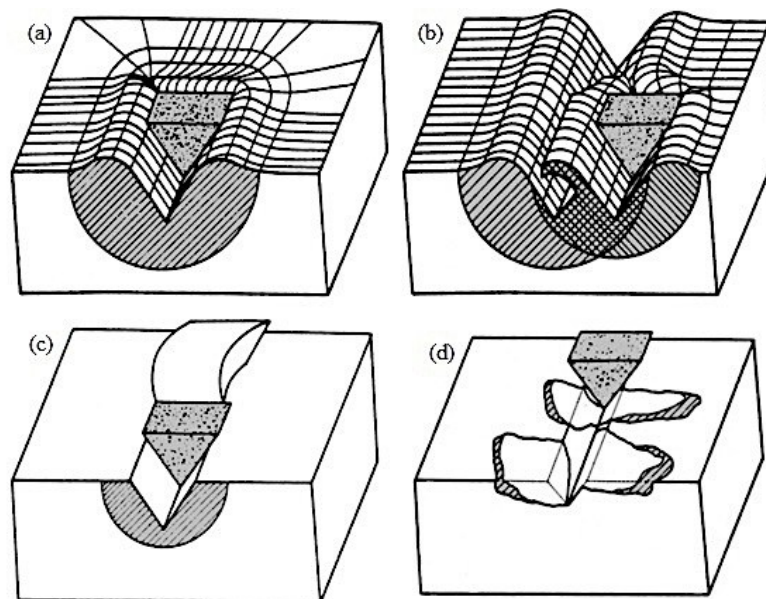
Mecanismo de desgaste é o princípio físico de remoção de matéria de uma superfície. É o princípio da interação das superfícies ou da interação entre partículas e superfícies, que quando entram em contato, em suas asperidades, levam à deformação, riscamento ou destacamento de material.

Os mecanismos de desgaste são: microcorte, microsulcamento, microtrincamento (MULHEARN; SAMUELS, 1962; ZUM GAHR, 1987) e indentações múltiplas (DA SILVA, 2008; DA SILVA; COSTA; DE MELLO, 2011). A Figura 3 apresenta esquematicamente os micromecanismos de desgastes.

O mecanismo de microsulcamento, Figura 3(a), consiste em causar deformações plásticas através do deslizamento da partícula abrasiva, sem levar necessariamente à perda ou destacamento de material. Neste caso, o material deformado acumula-se na frente da partícula e flui lateralmente. A perda de massa ocorre devido à atuação de várias partículas abrasivas que deformam e encruam a superfície conforme mostrado na Figura 3(b) (MULHEARN; SAMUELS, 1962; ZUM GAHR, 1987).

No microcorte, Figura 3(c), a remoção de material da superfície ocorre devido à formação de microcavacos na frente da partícula. Quando ocorre o microcorte puro, o volume do risco produzido pela partícula abrasiva é igual ao volume de material retirado da amostra (MULHEARN; SAMUELS, 1962; ZUM GAHR, 1987).

Figura 3 : (a) Microsulcamento, (b) interação de microsulos, (c) microcorte e (d) microtrincamento



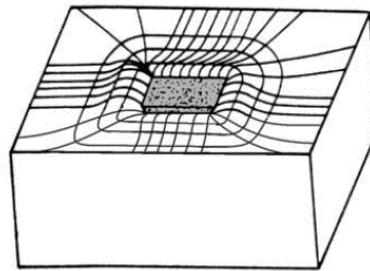
Fonte: Zum Gahr (1987).

No microtrincamento, Figura 3(d), ocorre a formação e propagação de trincas na lateral do risco. Nesse caso, grandes fragmentos são arrancados, uma vez que a propagação das trincas leva à interação entre elas facilitando assim o destacamento de material. Esse mecanismo é restrito a situações onde ocorre a abrasão frágil. Estas propagações de trincas ocorrem em casos

que certas tensões produzidas pelas partículas abrasivas, excedem o limite crítico de ruptura do material (ZUM GAHR, 1987).

Os micromecanismos apresentados acima ocorrem quando a partícula abrasiva desliza entre o corpo e o contra corpo. Quando a partícula abrasiva rola entre os dois corpos, o micromecanismo é o de indentações múltiplas, Figura 4 (DA SILVA, 2008; DA SILVA; COSTA; DE MELLO, 2011).

Figura 4: Mecanismo de desgaste abrasivo de microindentação



Fonte: da Silva, W. M. (2008).

A microindentação ocorre quando a partícula abrasiva toca a superfície com uma determinada carga sem se deslizar, gerando deformação plástica localizada. Desta forma, a perda de massa se dá quando ocorrem várias deformações simultâneas, semelhantes à perda de massa por microsulcamento (DA SILVA, 2008; DA SILVA; COSTA; DE MELLO, 2011).

2.3- INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS FÍSICOS SOBRE A TAXA DE DESGASTE ABRASIVO

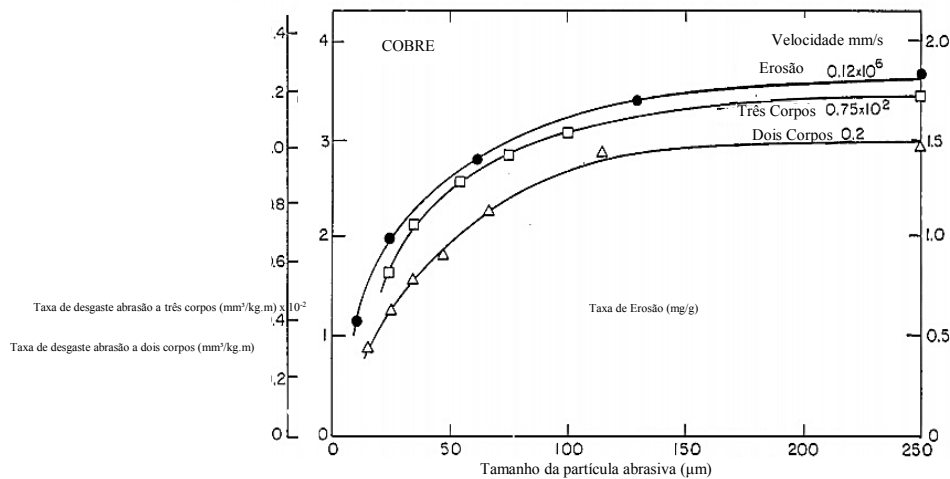
2.3.1 – Tamanho da partícula abrasiva

As dimensões das partículas abrasivas podem variar desde partículas de polimento, de indo 5 a 500 μ m na abrasão rotineira e podendo chegar a centenas ou milhares de milímetros no caso de *gouging abrasion* que é o tipo de abrasão mais severo.

É importante atentar-se no caso da seleção de abrasivos. Para o caso da concentração de abrasivos na interface corpo - contra corpo, uma vez que, para uma mesma força normal aplicada, uma maior concentração de abrasivos na interface levará à uma menor força por abrasivo, pois a força normal estará dividida em muitas partículas, para o caso de abrasão a três corpos, favorecendo o rolamento das mesmas. No caso de uma menor concentração de partículas na interface, a força por partícula será maior, favorecendo assim o deslizamento da partícula sobre a superfície e aumentando a taxa de desgaste.

Tais deduções foram comprovadas experimentalmente por Misra e Finie (1981a), Figura 5, o qual demonstram que a taxa de desgaste apresenta uma tendência de queda com a redução da dimensão das asperidades, ou abrasivos, em testes a dois e três corpos. Observa-se também que partículas com tamanho acima dos 100 μm a taxa de desgaste se estabiliza.

Figura 5 : Efeito do tamanho da partícula na abrasão a 2-corpos, abrasão a 3-corpos e na erosão.

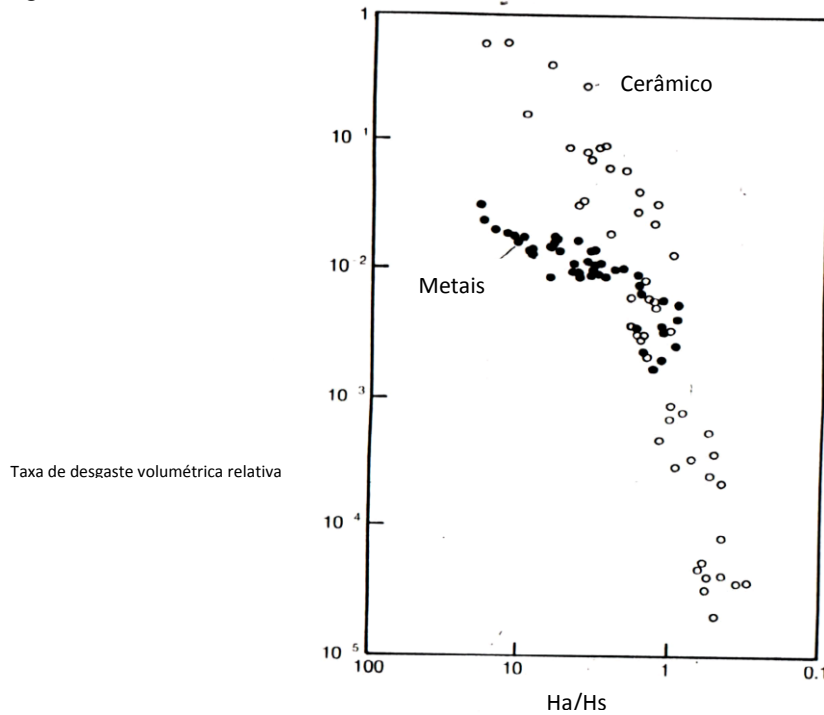


Fonte: Misra; Finnie (1981a).

2.3.2 – Dureza da partícula abrasiva

Conforme já apresentado anteriormente, a dureza da partícula abrasiva é uma propriedade que afeta diretamente a severidade do regime de desgaste. Quando a dureza do abrasivo é menor que a dureza da superfície do contra corpo, o contato permanente e dinâmico, levando à degradação da partícula, o resulta assim em um desgaste suave. Já na situação oposta, isto é, quando a dureza do abrasivo é maior que a dureza da superfície do contra corpo, a tendência é que a partícula engaste na superfície mais mole e, por isso, deslize sobre a superfície mais dura, riscando-a. Este comportamento pode ser visto na Figura 6.

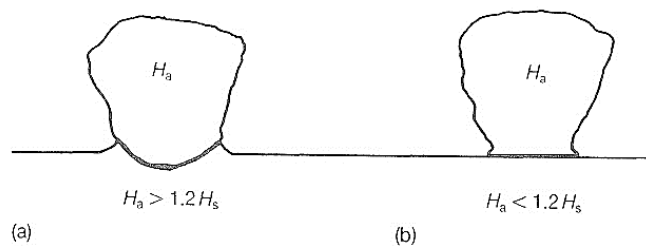
Figura 6: Taxa de volume desgastado por razão entre dureza do abrasivo e dureza da superfície (H_a/H_s).



Fonte: Hutchings (1992).

Observa-se na Figura 6 que, a taxa de desgaste diminui consideravelmente quando a razão de dureza dos abrasivos sobre a da superfície (H_a/H_s) é menor que 1. Devido às pressões de contato existentes na interface, partícula abrasiva – contra corpo. A partícula abrasiva e a superfície do contra corpo podem apresentar diferentes respostas. Se a partícula abrasiva resistir aos esforços, sem se deformar ou fraturar, está causando uma deformação plástica na superfície do contra corpo (indentação), Figura 7, (HUTCHINGS, 1992). Porém se a partícula abrasiva falhar por escoamento ou fratura, o nível de deformação plástica na superfície da amostra é desprezível.

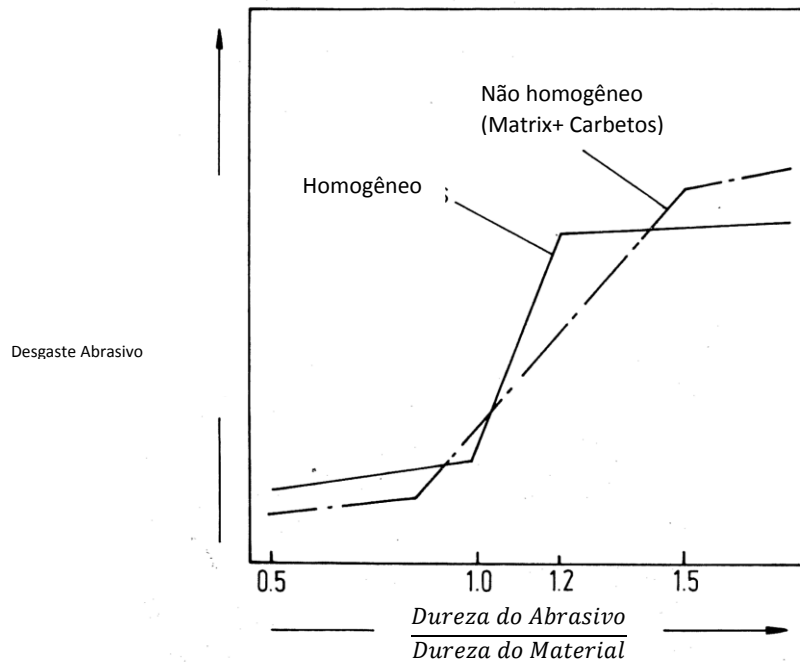
Figura 7: Ilustração do contato entre uma partícula abrasiva submetida a uma carga normal e uma superfície plana. (a) se H_a for maior que $1,2 H_s$ e (b) se H_a for menor $1,2 H_s$



Fonte: Hutchings (1992).

Experimentalmente, identificou-se que, independente da forma da partícula abrasiva, se a relação $H_a/H_s > 1,2$, os riscos ou indentações gerados tem componentes de deformação plástica significativas (HUTCHINGS, 1992). Neste caso a relação a ser utilizada na identificação de regimes de desgaste severos ou suaves é o da relação de durezas, Figura 8, para $H_a/H_s > 1,2$ temos abrasão severa e para $H_a/H_s \leq 1,2$ temos abrasão suave.

Figura 8: Regime de desgaste em relação à dureza do abrasivo e do material.



Fonte: Hutchings (1992).

2.3.3 – Forma da partícula abrasiva

Um dos principais fatores que influenciam na severidade do desgaste abrasivo é o fator forma geométrica. O grau de angulação e a dureza do abrasivo são características importantes, que devem ser levadas em conta. Em casos de abrasão a três corpos, onde as partículas abrasivas podem se engastar em uma das superfícies, a severidade do desgaste muda de acordo com a força normal aplicada e principalmente com a angulosidade do abrasivo. Em um abrasivo menos anguloso tem-se um menor desgaste do que em um abrasivo mais anguloso, uma vez que partículas mais abauladas tendem a primeiro causar o encruamento da superfície (microsulcamento) para depois retirar material, enquanto partículas angulosas tendem a remoção mais direta do material (microcorte).

Segundo Hutchings (1992), a forma da partícula pode modificar a taxa de desgaste em mais de 10 vezes. Contudo, a grande complexidade de se analisar tridimensionalmente a

geometria da partícula, impede o conhecimento mais profundo dos seus efeitos em abrasão. Sobre isso, a literatura apresenta alguns métodos simples e confiáveis que ajudam na compreensão deste assunto.

Um destes métodos é conhecido como fator de arredondamento F . Trata-se de um mecanismo totalmente teórico que por intermédio da equação 1 e que, indica o quanto arredondada é a partícula. A é a área projetada do abrasivo (normalmente em um microscópio ótico) e p é o perímetro da imagem projetada. Quanto mais próximo do valor 1 for F , mais arredondada será a partícula. Por consequência, partículas que possuem valores menores que 1 tendem a ser mais angulosas. O limitante deste cálculo é a obtenção precisa dos parâmetros A e p , pois envolve métodos de leitura de imagem não triviais em microscópio, além de que, mesmo com a alta precisão de microscópios óticos, há ainda erros internos do próprio aparelho e erros de leitura do operador.

Equação 1 – Equação para determinar o fator de arredondamento F :

$$F = \frac{4\pi A}{p^2} \quad (1)$$

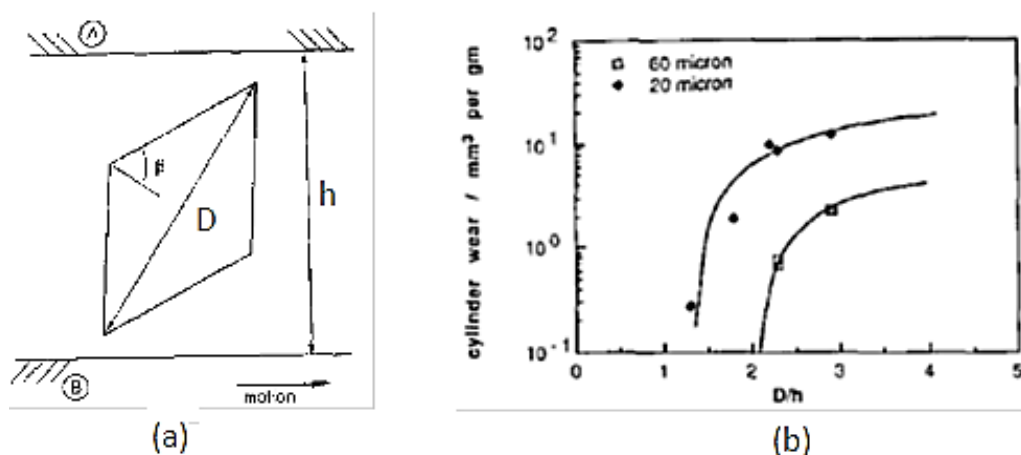
Fonte: Hutchings (1992).

2.3.4 – Dinâmica da partícula abrasiva

Como apresentado acima fatores de forma e tamanho da partícula tem muita importância, não só isoladamente, mas também em conjunto. A interface, no qual o abrasivo pode passar, considerando a abrasão a três corpos, deve ser analisada, para assim se obter um conhecimento total sobre a partícula, ou seja, conhecer toda a dinâmica da partícula abrasiva. Williams e Hyncica (1992b) foram os primeiros a desenvolverem de maneira precisa, um modelo em torno deste assunto.

Ao variar as dimensões das partículas abrasivas em um desgaste com mancais lubrificados, Williams e Hyncica (1992b) observaram que o desgaste se tornou mais severo quando a distância entre as superfícies ou espessura da interface(h), corpo - contra corpo, se tornava pequena quando comparada ao tamanho do abrasivo (D). Enquanto que, quando se diminuía o tamanho dos abrasivos em relação à distância entre as superfícies(h) o desgaste também diminuía. Tais conclusões são mostradas na Figura 9:

Figura 9: WILLIAMS E HYNICICA (1992a, b e c). (a) Partícula abrasiva idealizado por WILLIAMS e HYNICICA (1992a, 1992c). Sendo D a diagonal maior, $45^\circ < \beta < 90^\circ$ e h a espessura do filme. (b) Efeito da relação D/h no desgaste abrasivo de um bronze fosforoso



Fonte : Williams; Hyncica (1992 a).

Além da constatação acima, o gráfico presente na Figura 9 (b) apresenta uma transição de mecanismo de desgaste, determinada pela razão D/h . Para:

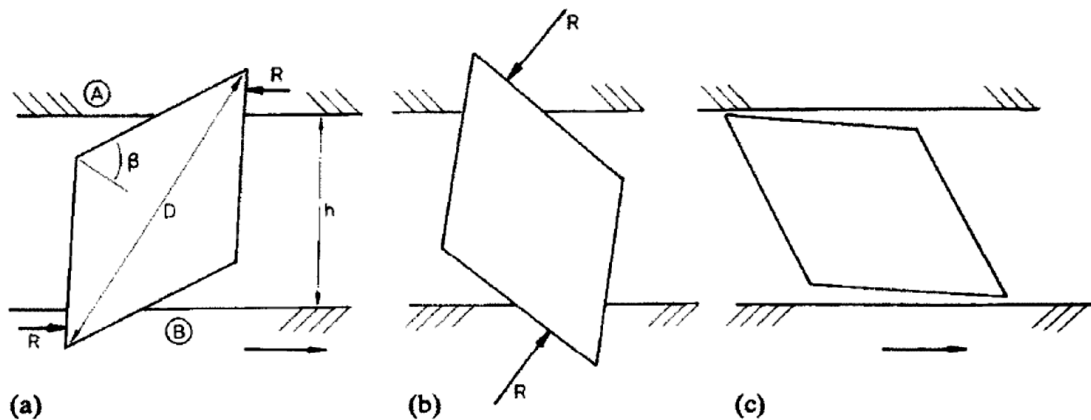
$\frac{D}{h} > 2$. Ocorre uma saturação do desgaste com o aparecimento de riscos e sulcos na superfície da amostra

$\frac{D}{h} < 2$. Há uma queda abrupta do desgaste, evidenciando a atuação de microindentações provocadas pelo rolamento das partículas.

A Figura 10 apresenta a interação de uma partícula com as superfícies móveis, demonstrando o movimento de rotação (WILLIAMS; HYNICICA, 1992b, a).

A força de cada indentação depende da força resultante R (componentes da força normal e da força tangencial). A profundidade da indentação depende das propriedades mecânicas do material e da angulação da partícula abrasiva e da força sobre ela. Comparando com um teste de dureza Vickers, espera-se que a força de indentação R seja igual à multiplicação do valor de dureza pela área projetada, atuando perpendicularmente à superfície indentada, Figura 10(a) e Figura 10(b). Se houver a formação de outra indentação na extremidade oposta da partícula, as duas forças R , podem formar um binário que tende a rotacionar a partícula. E dependendo das dimensões da partícula ela pode entrar em equilíbrio estático causando apenas pequenas deformações plásticas localizadas na Figura 10(c) (WILLIAMS; HYNICICA, 1992b, a).

Figura 10: A partícula rola entre as superfícies devido a formação do binário em (a) e (b), causando pequenos danos am ambas as superfícies



Fonte: Williams, J.A.; Hyncica, A.M., J.Phys.D:Appl.Phys., volume 25, ppA81-A90, 1992a.
Williams, J.A.; Hyncica, A.M., Wear, volume 152, pp57-74, 1992b.

O tamanho crítico da partícula pode ser relacionado com o ângulo β , Equação 2.

Equação 2: Tamanho crítico da partícula:

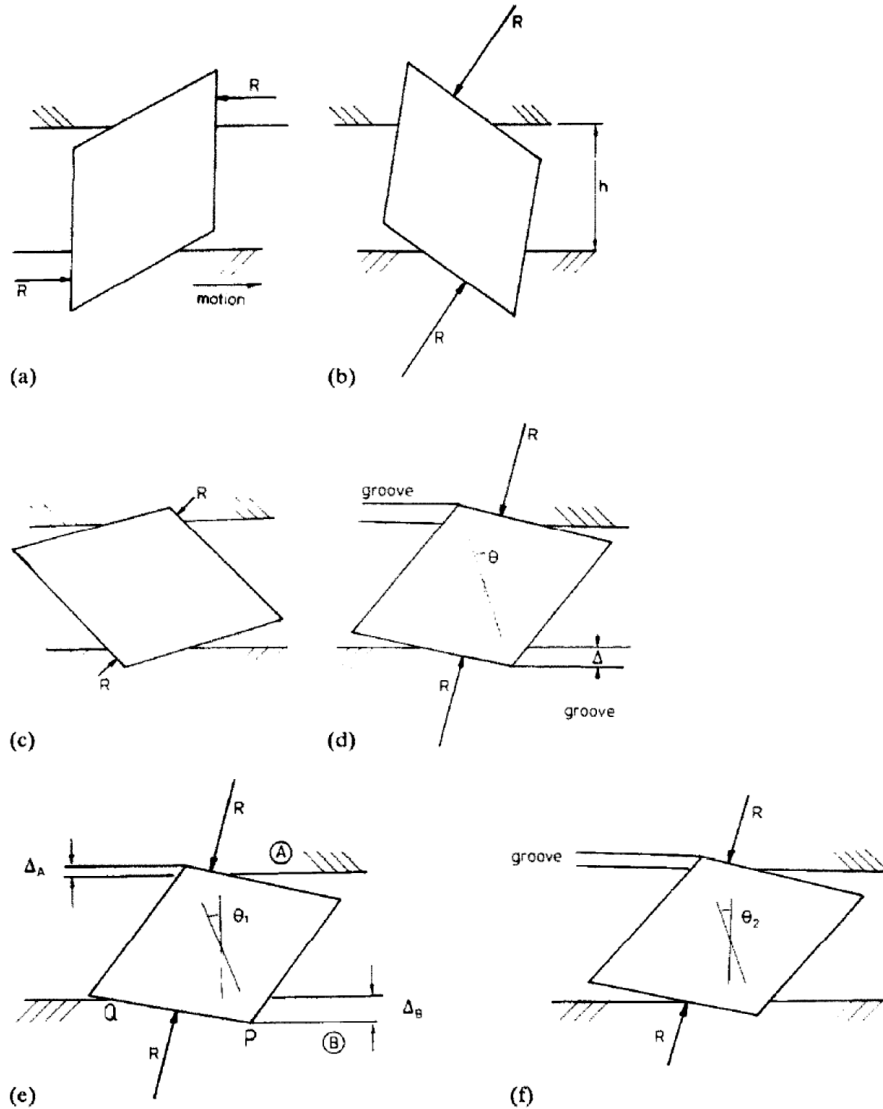
$$\left(\frac{D}{h}\right)_1 = \sec\beta \quad (2)$$

Fonte: Williams; Hyncica (1992 b, a).

A diminuição da distância entre as superfícies, ou o aumento do tamanho da partícula, acarreta em um aumento na relação D/h . Algumas possíveis variações do comportamento do abrasivo são mostradas na Figura 11.

Em um caso de formação de um binário, o abrasivo se comportará como mostrado nas Figuras 11(a) e Figura 11(b). A partícula continuará a rolar até que as forças do binário sejam colineares, Figura 11(d), fazendo com que a partícula fique posicionada em uma determinada inclinação. Caso o abrasivo encontre uma das superfícies com menor dureza que ele, este engastará na superfície de menor dureza e deslizará sobre a superfície mais dura, causando riscos e sulcos (WILLIAMS; HYNICICA, 1992b, a)

Figura 11 : (a) a (d) a partícula rola até uma posição de equilíbrio, (e) situação similar ao que ocorre quando as durezas das superfícies são diferentes e (f) a partícula se fixa na superfícies mole riscando a mais dura.

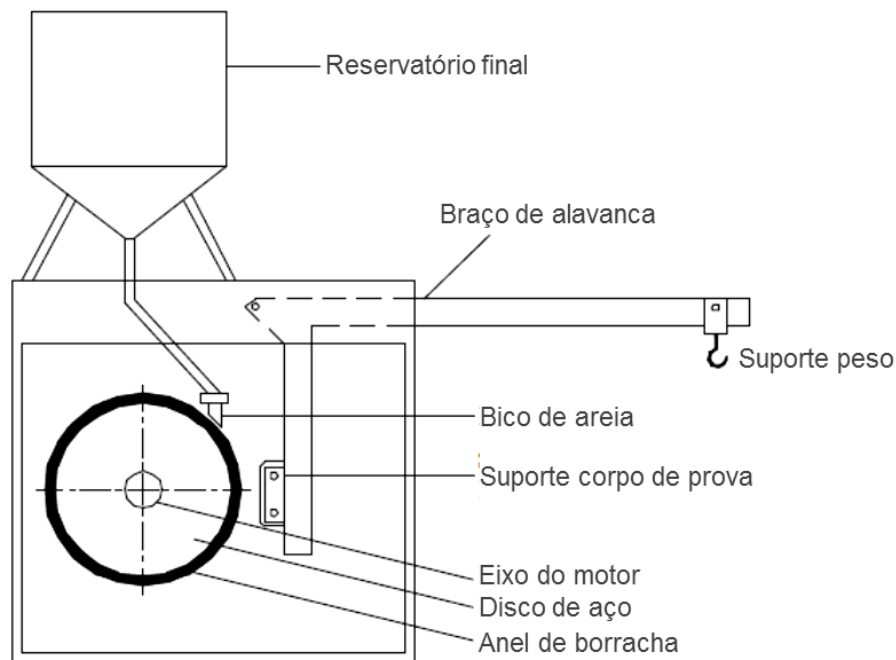


Fonte: Williams, J.A.; Hyncica, A.M., J.Phys.D:Appl.Phys., volume 25, ppA81-A90, 1992a.
Williams, J.A.; Hyncica, A.M., Wear, volume 152, pp57-74, 1992b.

2.4 ENSAIO DE DESGASTE ABRASIVO RODA DE BORRACHA (TRIBÔMETRO)

O princípio de funcionamento deste tribômetro, consiste em desgaste padronizado de um corpo de prova com areia de composição e tamanho de grão controlada. O abrasivo é introduzido entre o corpo de prova e um anel de borracha de dureza especificada, provocando riscamentos, conforme a Figura 12.

Figura 12 : Esquema simplificado do equipamento para ensaio de desgaste abrasivo recomendado pela ASTM G 65-16



Fonte: ASTM (2004).

De acordo com a norma ASTM G65-16 (ASTM, 2004) existem cinco tipos de procedimentos (A, B, C, D e E) para a execução do teste no tribômetro roda de borracha. Os principais parâmetros de teste para cada procedimento estão indicados na Tabela 1. Estes procedimentos devem ser realizados previamente para a calibração do equipamento, podendo-se assim, após a calibração realizar os testes da forma mais representativa possível.

Tabela 1: Principais parâmetros de teste, utilizando o tribômetro roda de borracha de acordo com a norma ASTM G65-16 (ASTM, 2004).

Procedimento tipo	Força Normal (N)	Velocidade do anel (rpm)	Distância (m)
A	130	6000	4309
B	130	2000	1436
C	130	100	71,8
D	45	6000	4309
E	130	1000	718

Fonte: ASTM (2004).

Neste ensaio, o corpo de prova é pressionado, com uma resultante de momento especificado, através de um braço de alavanca, contra a roda de borracha está girando enquanto que o fluxo de areia na interface, borracha - corpo de prova, é controlado a uma vazão de 300 a 400 g/min. Os corpos de provas são pesados antes e após o ensaio e a perda de massa é

determinada. Para possibilitar a comparação entre vários metais, é necessária a conversão da perda de massa, para perda de volume em milímetros cúbicos, devido à grande diferença de densidades dos materiais.

Neste método de ensaio em roda de borracha, essas condições, normalmente, são padronizadas para desenvolver uma condição uniforme de desgaste. A perda de massa pode ser utilizada em ensaios de laboratórios para comparar materiais de densidade equivalente (ASTM, 2004).

CAPITULO III

METODOLOGIA

Este capítulo apresenta em detalhes o tipo de teste realizado, o modo de funcionamento do teste e a forma de utilização dos insumos, no caso a areia.

3.1 – O ENSAIO RODA DE BORRACHA

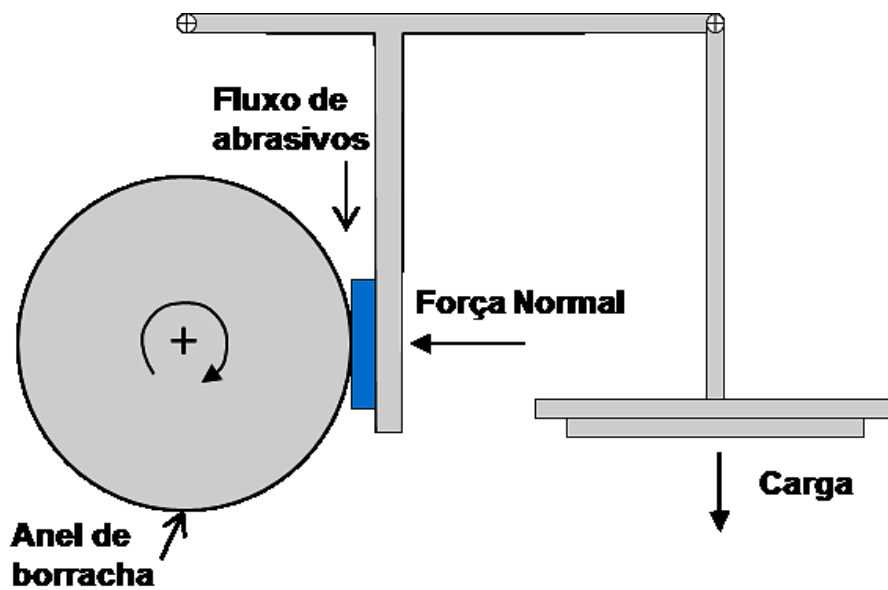
Para a análise de reutilização de abrasivos em testes a três corpos, foi selecionado dentro do laboratório um dos equipamentos mais utilizados pela tribologia para representação de mecanismos de desgaste de campo (HUTCHINGS, 1992), e amplamente referenciado na literatura por; HUTCHINGS, 1992; STEVENSON; HUTCHINGS, 1996; DUBE; HUTCHINGS, 1999; WIROJANUPATUMP; SHIPWAY, 1999; 2000, e outros), o ensaio roda de borracha,

O tribômetro de produção do laboratório de tribologia e materiais LTM-UFU, foi calibrado segundo a NORMA ASTM-G65, procedimento A.

Ele é constituído por um motor de corrente contínua, o qual aciona um eixo que possui em sua extremidade uma roda de aço ABNT 1020, de 228,6 mm de diâmetro nominal e com um anel de borracha clorobutílica de dureza 60 ± 2 Shore A. A borracha possui uma seção 10 x 10 mm e é colada no perímetro da roda.

Para melhor representatividade o equipamento foi ajustado de acordo com as configurações do trabalho de DAMIÃO; DA SILVA (2018). A roda gira à uma velocidade constante de 200 RPM. A carga aplicada sobre o contra corpo foi de 7,75 kgf. O contra corpo é posicionado dentro de um porta amostra, refrigerado por água e fixado por um sistema de parafusos. O braço do porta amostra é fixado por um sistema de alavancas que permite a determinação da força normal a ser aplicada a partir de cálculos encontrados nos procedimentos de utilização do equipamento (DA SILVA; COSTA; DE MELLO, 2001; ASTM, 2004). O esquema do tribômetro é apresentado pela Figura 13:

Figura 13: Esquema do abrasômetro roda de borracha a ser utilizado nos ensaios



Fonte: da Silva; de Mello, 2009).

O sistema ainda conta com um bico de fluxo mássico de abrasivo entre 300 e 400 gramas por minuto.

A instrumentação do equipamento é composta por um sensor de rotação e um torquímetro. Os instrumentos enviam os sinais recebidos para um programa desenvolvido na linguagem LabView® através de uma placa de aquisição. O programa converte os dados e fornece as forças tangencial média, máxima e mínima, e também coeficiente de atrito e desvio padrão.

Os parâmetros de ensaios foram definidos com base no procedimento “A” da norma ASTM G65-04 (ASTM, 2004). Os principais parâmetros do teste são apresentados na Tabela 2. Os ensaios tiveram uma duração total de 30 minutos. A cada 5 minutos, o ensaio foi interrompido para a realização dos procedimentos de medida de massa do contra corpo com balança eletrônica de precisão, Ohaus Adventure, com sensibilidade de 10^{-3} g e para o acondicionamento da borracha. Para a realização de cada medição da massa, as amostras foram limpas com ultrassom em recipiente com acetona PA.

Tabela 2: Parâmetros dos testes abrasivos roda de borracha.

Parâmetros	
Procedimento	Norma ASTM G 65-04 A
Fluxo de abrasivo	300-400 [g/min]
Tempo	30 [minutos]
Rotação	200 [RPM]
Carga normal	77,5 [N]
Tempo para coleta dados	A cada 5 minutos de teste

Fonte: Damião, da Silva (2018)

A areia utilizada foi a areia com especificação nº 30 (IPT - peneira de 0,6 mm e granulometria entre 0,6 e 1,2 mm), (DAMIÃO; DA SILVA, 2018). Os testes foram realizados sobre um contra corpo de aço, ABNT 1045, sem nenhum tipo de tratamento térmico, nas dimensões 60x20x10. Durante a realização dos testes foram retiradas amostras de areia exatamente na saída do contato da roda com o contra corpo.

Após a coleta as areias foram lançadas sobre uma superfície preta, para garantia de aleatoriedade do espaço amostral, e então orientadas para serem fotografadas e a dispersão analisada. Para as fotos foi utilizada a câmera Aven Mighty Scope e o programa aberto ImageJ, no qual foram obtidos os seguintes dados; área, perímetro fator de circularidade, onde 1 é o círculo perfeito e quanto mais próximo de 0 menos se parece um círculo, e número de abrasivos. De posse destes dados pôde-se obter o diâmetro de cada partícula de areia.

A perda de massa em cada intervalo de 5 minutos foi calculada pela diferença entre as medições das massas inicial e final. Assim, foi determinada a massa total de desgaste, massa média desgastada, massa desgastada no regime permanente, e o desvio padrão entre os intervalos de desgaste.

3.2 – METODOLOGIA DE REUTILIZAÇÃO DA AREIA E AQUISIÇÃO DE IMAGENS

A areia é no início de cada teste colocada em um silo de armazenamento para que flua por gravidade até o contato. Abaixo do dreno do sistema é colocado um balde para a retenção da areia utilizada. Esta areia é retornada ao silo pelo operador do teste para ser reutilizada. Com o intuito de evitar a presença de contaminantes, como a borracha, nos momentos de condicionamento das rodas o balde é retirado para que a borracha retirada da roda não caia sobre o abrasivo armazenado no balde.

Para a aquisição das imagens e obtenção dos dados das partículas de areia foram feitos os processos descritos no Apêndice A.

CAPITULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÃO

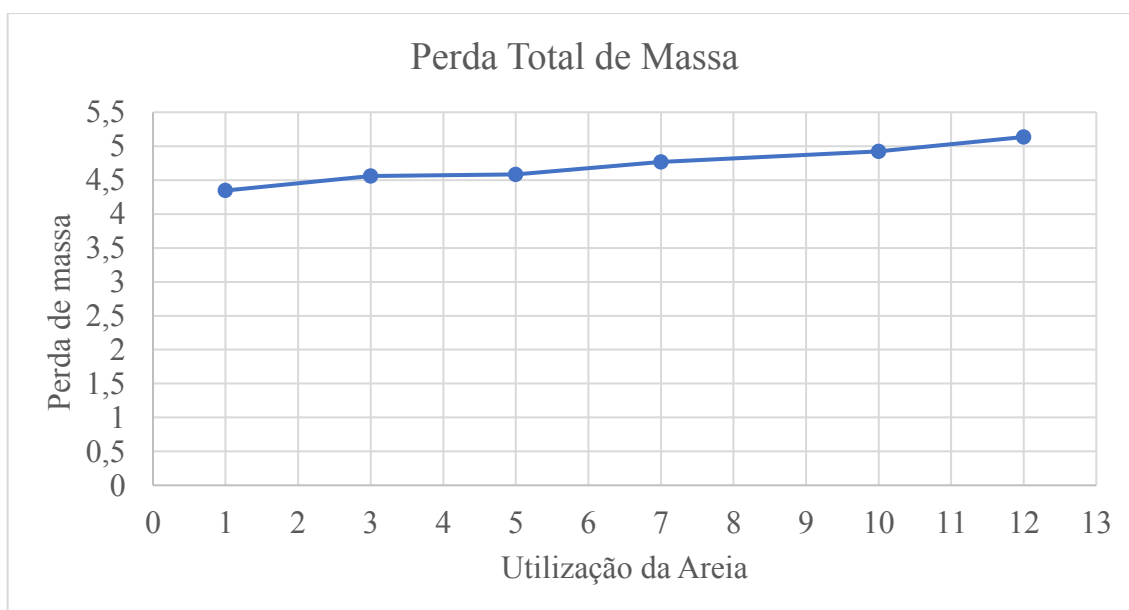
As taxas de desgaste, tamanho e circularidade das partículas, parâmetros importantes em abrasão, serão apresentados a seguir para discussão e obtenção das relações para a maior reutilização das areias no teste roda de borracha.

4.1 – TAXA DE DESGASTE, FORÇA TANGENCIAL APLICADA e ATRITO

Análises estatísticas foram realizadas para a obtenção de gráficos de; perda de massa total e perda de massa no regime permanente do contra corpo, nos fornecendo gráficos de taxa de desgaste. Temos também os gráficos de força tangencial aplicada e força de atrito.

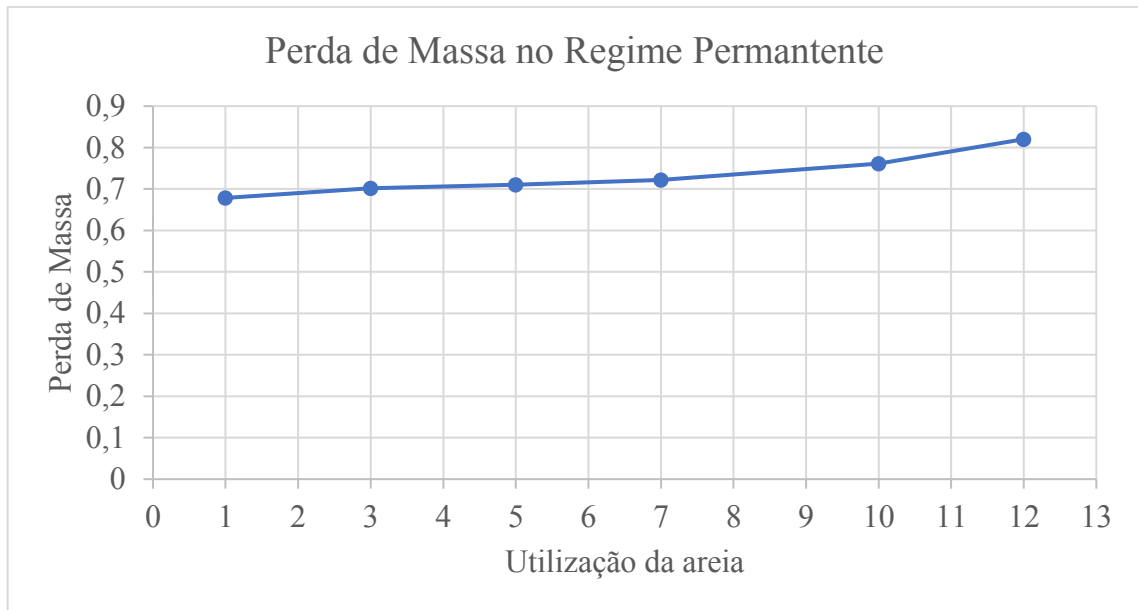
Observa-se na Figura 14 e Figura 15 que tanto o desgaste total como o desgaste em regime permanente do contra corpo, há uma tendência ao aumento do desgaste a partir da quinta utilização da areia.

Figura 14: Perda total de massa do contra corpo em cada utilização da areia.



Fonte: Próprio Autor

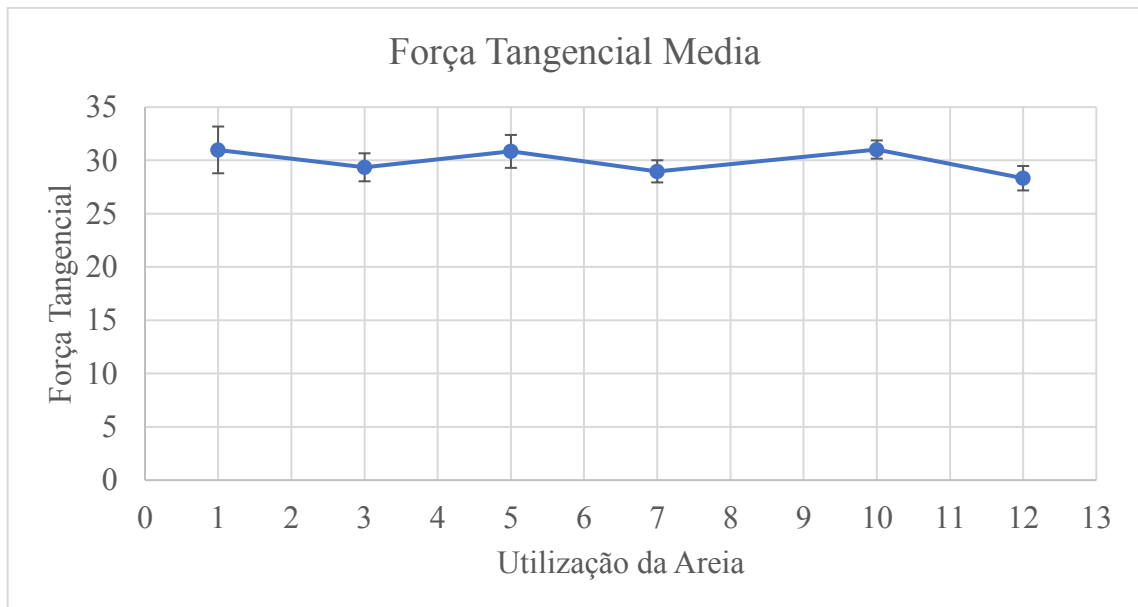
Figura 15: Perda de Massa do contra corpo no Regime Permanente em cada utilização da areia.



Fonte: Próprio Autor

Pode-se observar pela Figura 16 que a força tangencial média lida pelo torquímetro em cada reutilização da areia tende a uma constante.

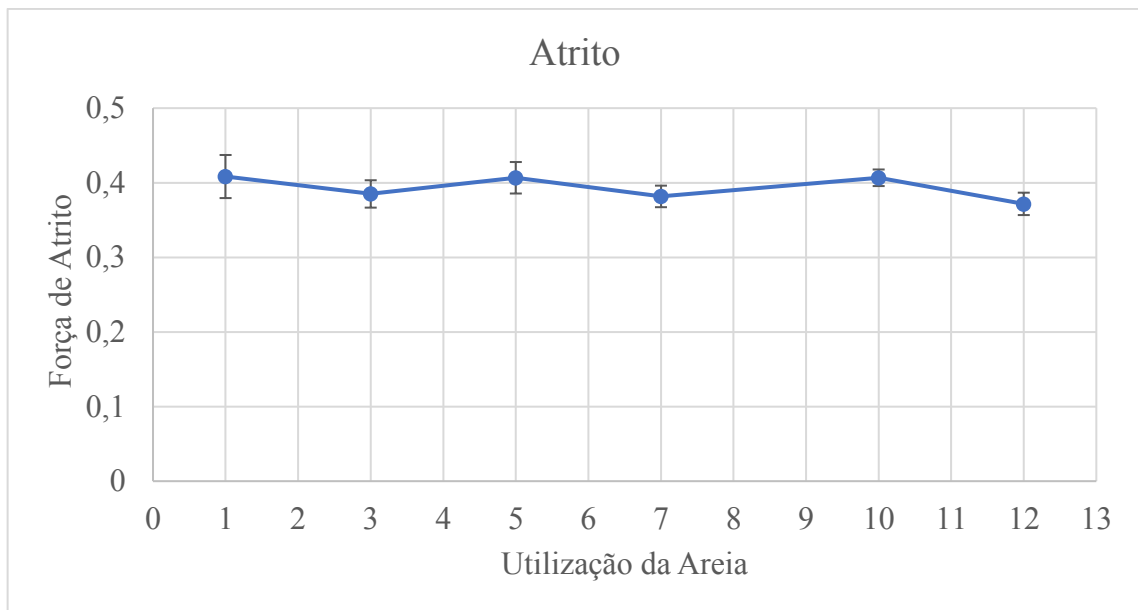
Figura 16: Força Tangencial Média registrada em cada utilização da areia.



Fonte: Próprio Autor

Na Figura 17, a força de atrito se apresenta também como uma constante independente de qual seja a repetição na utilização da areia.

Figura 17: Força de Atrito registrada em cada utilização da areia.



Fonte: Próprio Autor

Para obter uma diferença perceptível na taxa de desgaste do contra corpo, foram necessárias 12 reutilização da areia.

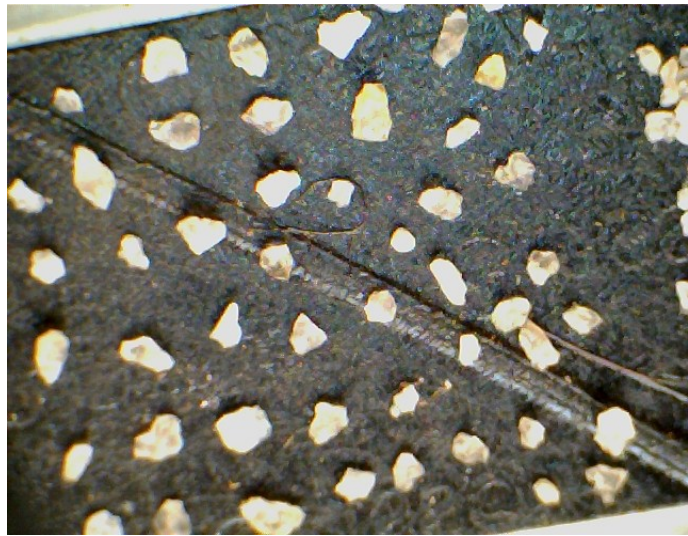
4.2 – IMAGENS DAS PARTICULAS DE AREIA

As Figuras 18 (a, b e c) apresentadas abaixo, foram utilizadas para visualização do tamanho e da forma das partículas de areia com ampliação favorável à análise de imagens.

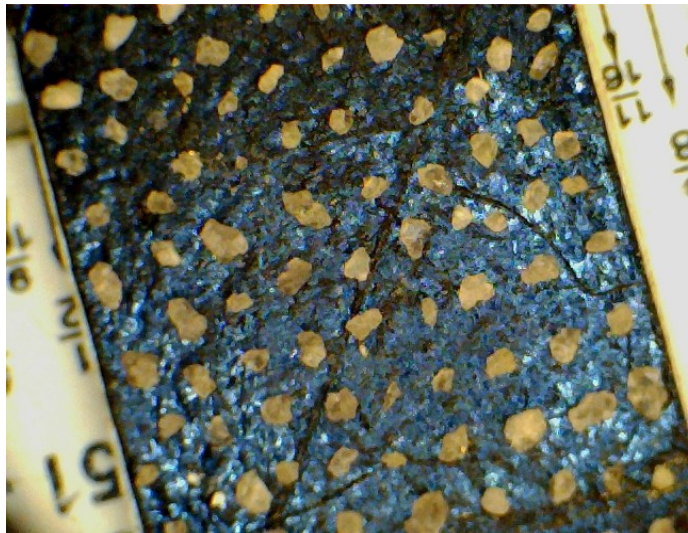
Estas figuras também contribuem para a discussão final de como as partículas se fragmentaram, mas não tendem ao arredondamento, podendo ser constatado visualmente sem o histograma de distribuição de forma.

A Figura 18(a) apresenta a imagem da areia que vem de fábrica sem nenhuma utilização. A Figura 18(b) apresenta a imagem da areia após a quinta utilização. A Figura 18(c) apresenta a imagem da areia após a décima segunda utilização.

Figura 18: (a) Areia 0, não utilizada nenhuma vez, (b) Areia utilizada 5 vezes, (c) Areia utilizada 12 vezes.



(a)



(b)



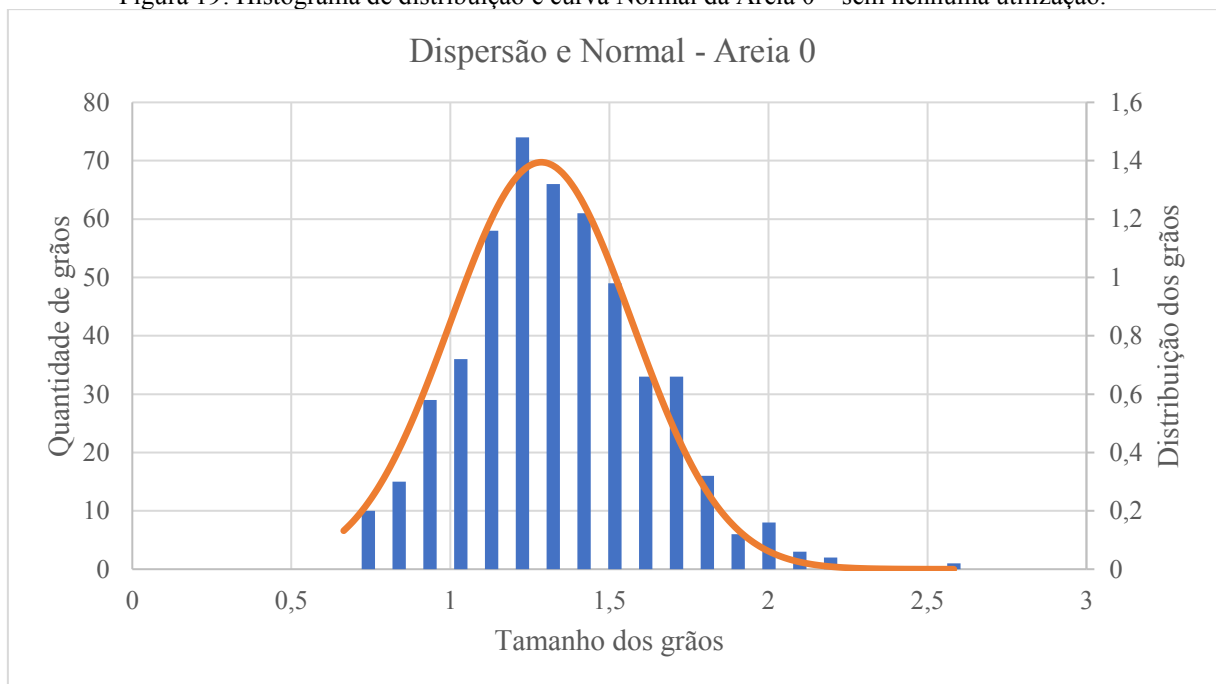
(c)

Fonte: Próprio Autor

4.3 – TAMANHO DAS PARTICULAS DE AREIA

Foram realizadas análises estatísticas sobre a areia para determinação de tamanho, concentração e forma. Para isto, foram feitos histogramas com curvas de distribuição normal, para a visualização da quantidade de grãos, seus tamanhos e como estão distribuídos dentro do espaço amostral. Além disso foram feitos gráficos de frequência acumulada, onde apresentam a proporção de grãos dentro do espaço amostral, estes gráficos também proporcionam a definição do tamanho médio da partícula, que neste caso não é determinado pela moda ou pela média calculada, mas pelo tamanho do grão compreendido na porcentagem de 50% do espaço amostral.

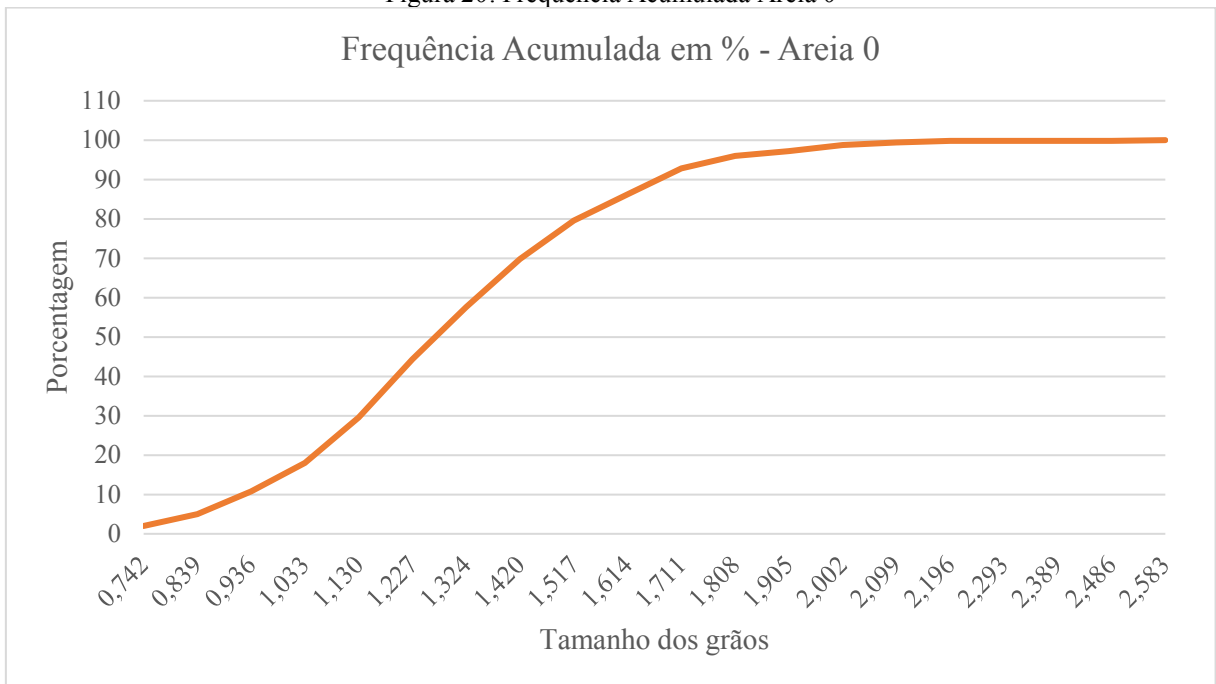
Figura 19: Histograma de distribuição e curva Normal da Areia 0 – sem nenhuma utilização.



Fonte: Próprio Autor

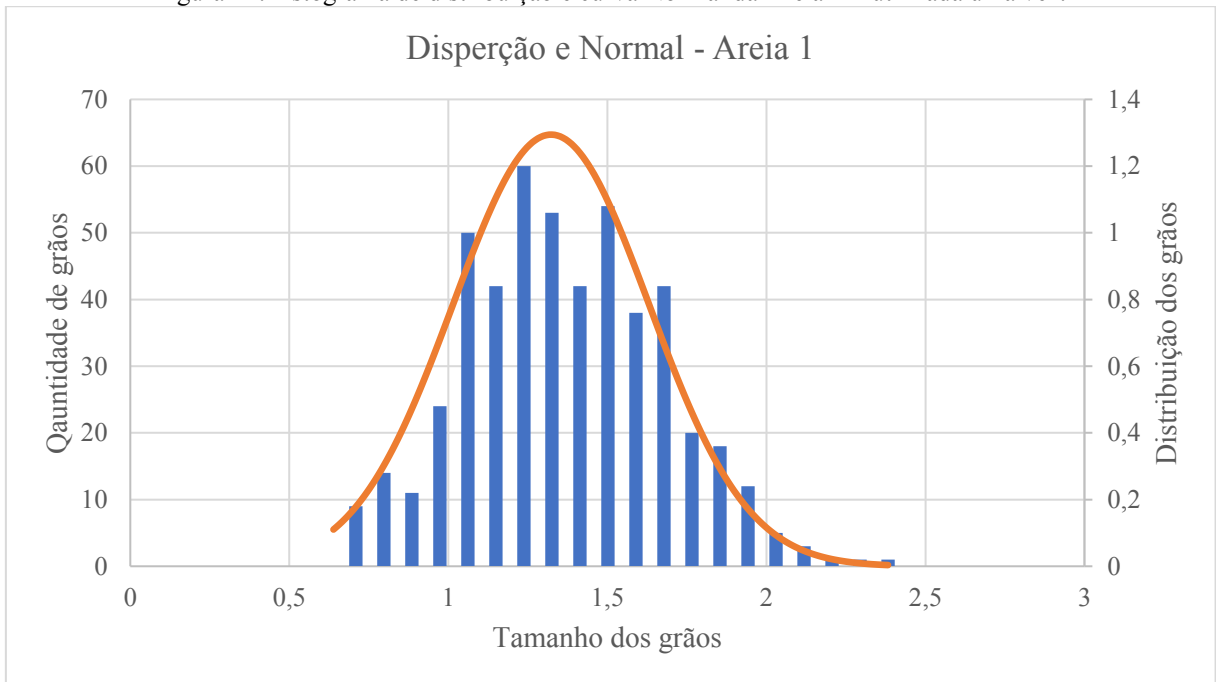
Para o caso da Areia 0, temos que pelo histograma o tamanho da partícula que representa a moda são as partículas de tamanho de 1,226 mm, pela curva normal o pico se encontra em 1,304 mm, e pelo gráfico de distribuição acumulada o valor do tamanho médio da partícula que se encontra no valor de 50% é de 1,324 mm.

Figura 20: Frequência Acumulada Areia 0



Fonte: Próprio Autor

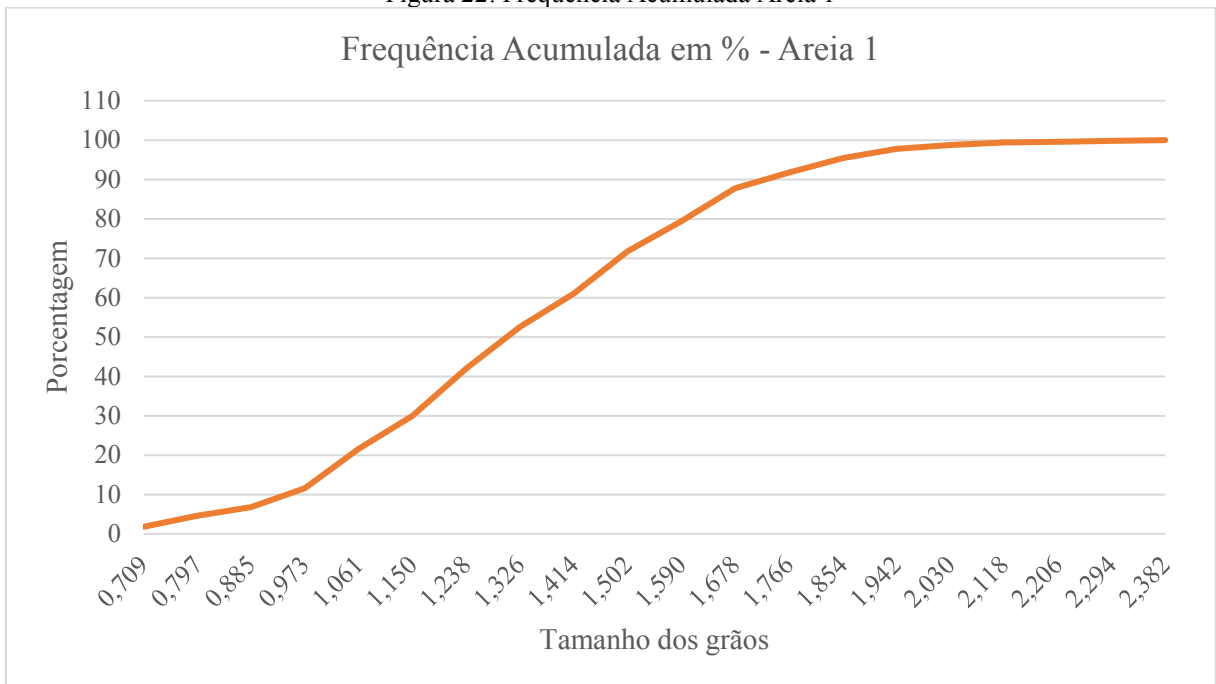
Figura 21: Histograma de distribuição e curva Normal da Areia 1 – utilizada uma vez.



Fonte: Próprio Autor

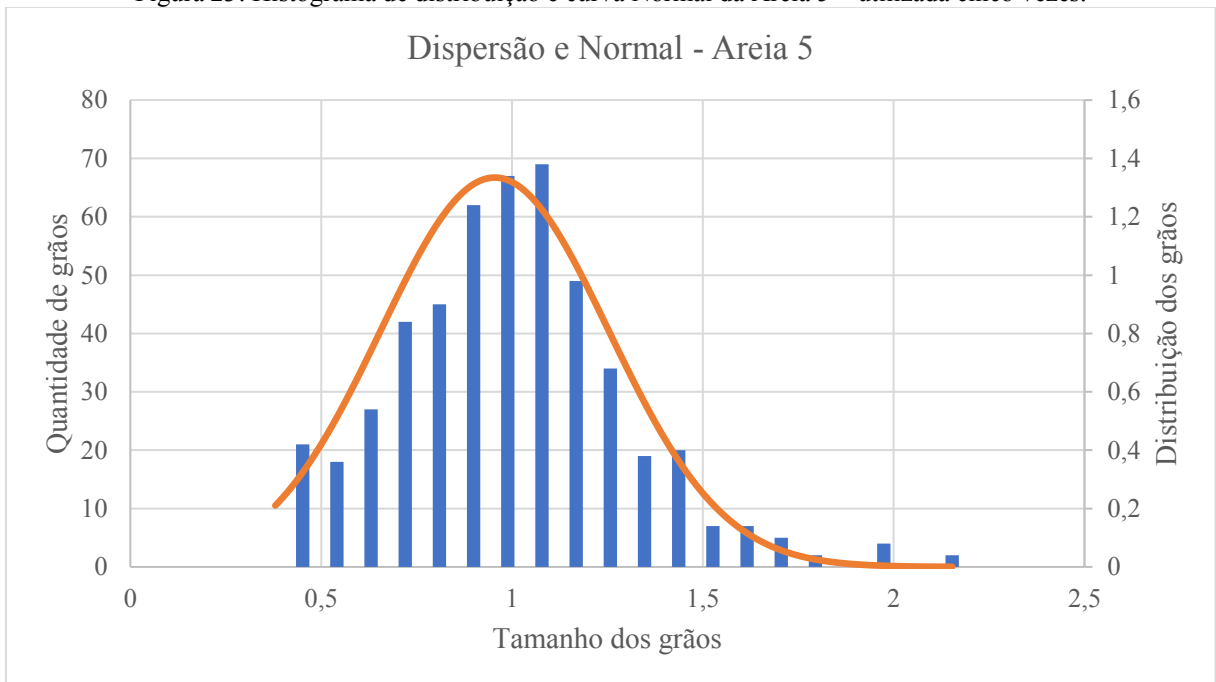
Para o caso da Areia 1, temos que pelo histograma o tamanho da partícula que representa a moda são as partículas de tamanho de 1,219 mm, pela curva normal o pico se encontra em 1,324 mm, e pelo gráfico de distribuição acumulada o valor do tamanho médio da partícula que se encontra no valor de 50% é de 1,326 mm.

Figura 22: Frequência Acumulada Areia 1



Fonte: Próprio Autor

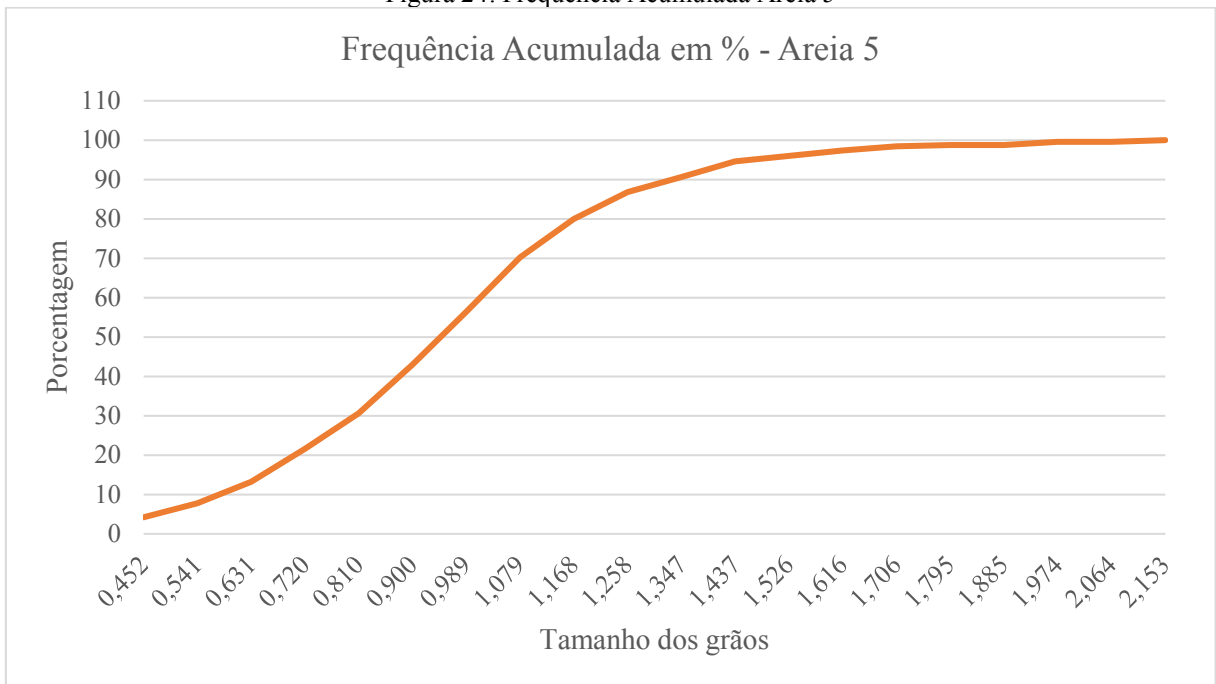
Figura 23: Histograma de distribuição e curva Normal da Areia 5 – utilizada cinco vezes.



Fonte: Próprio Autor

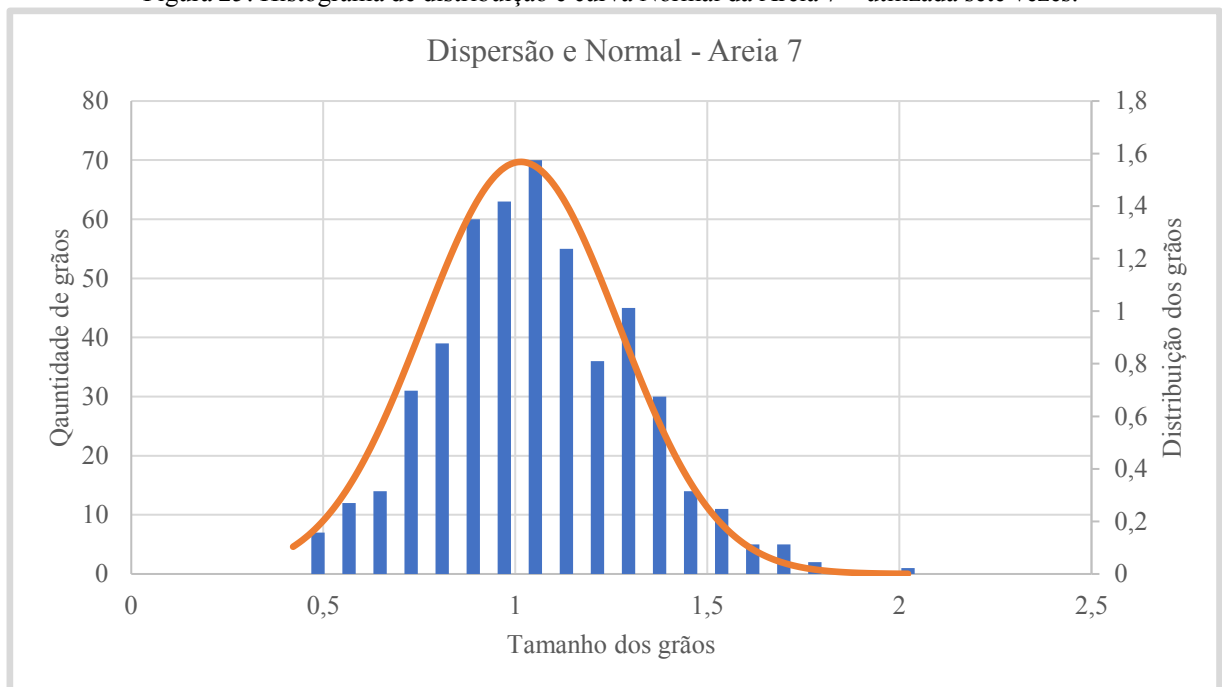
Para o caso da Areia 5, temos que pelo histograma o tamanho da partícula que representa a moda são as partículas de tamanho de 1,078 mm, pela curva normal o pico se encontra em 0,971 mm, e pelo gráfico de distribuição acumulada o valor do tamanho médio da partícula que se encontra no valor de 50% é de 0,989 mm.

Figura 24: Frequência Acumulada Areia 5



Fonte: Próprio Autor

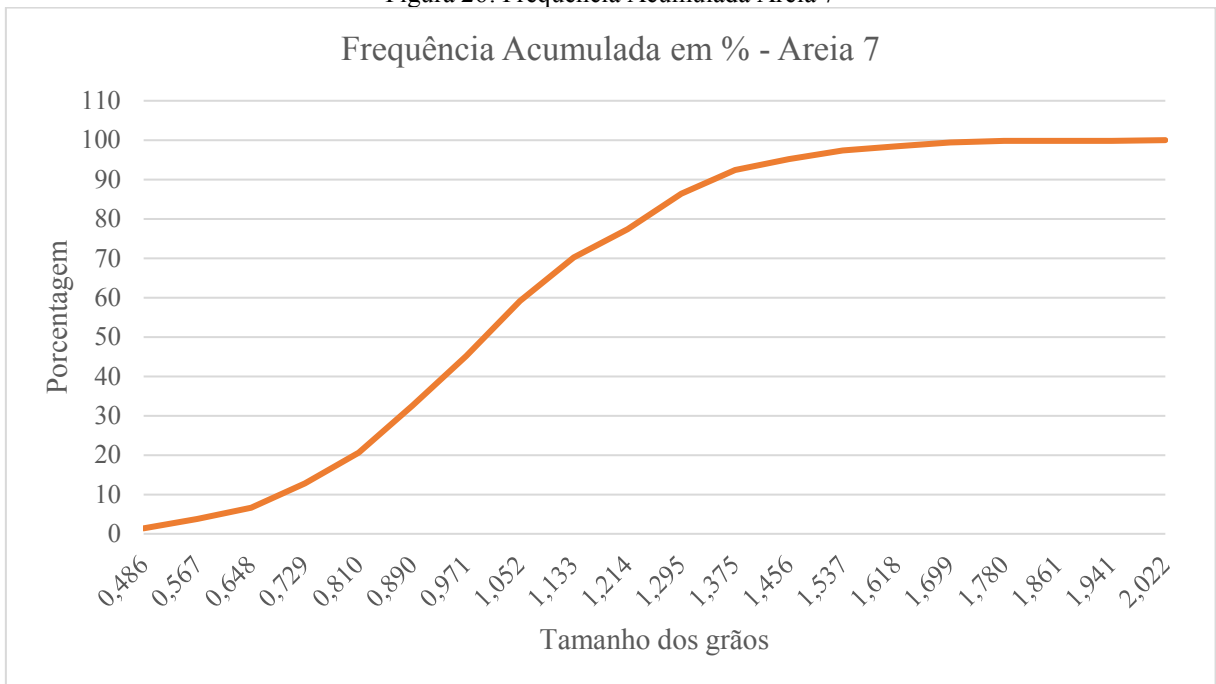
Figura 25: Histograma de distribuição e curva Normal da Areia 7 – utilizada sete vezes.



Fonte: Próprio Autor

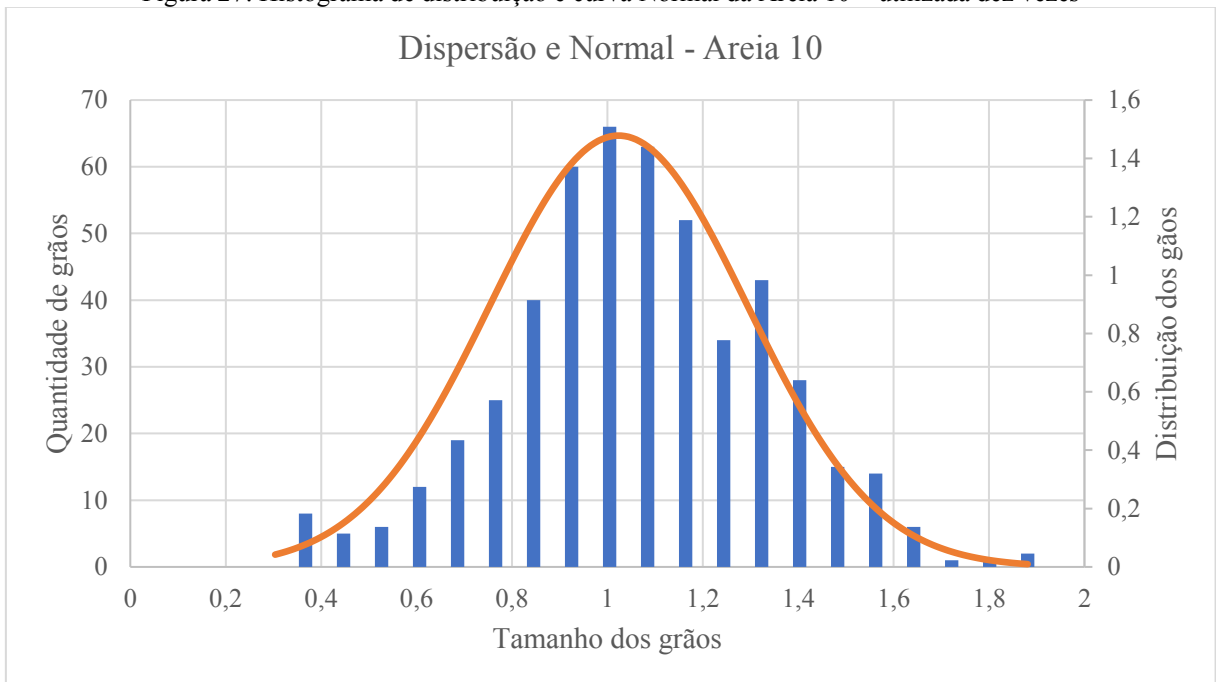
Para o caso da Areia 7, temos que pelo histograma o tamanho da partícula que representa a moda são as partículas de tamanho de 1,052 mm, pela curva normal o pico se encontra em 1,019 mm, e pelo gráfico de distribuição acumulada o valor do tamanho médio da partícula que se encontra no valor de 50% é de 1,052 mm, e para este caso temos que o tamanho médio da partícula é igual à moda.

Figura 26: Frequência Acumulada Areia 7



Fonte: Próprio Autor

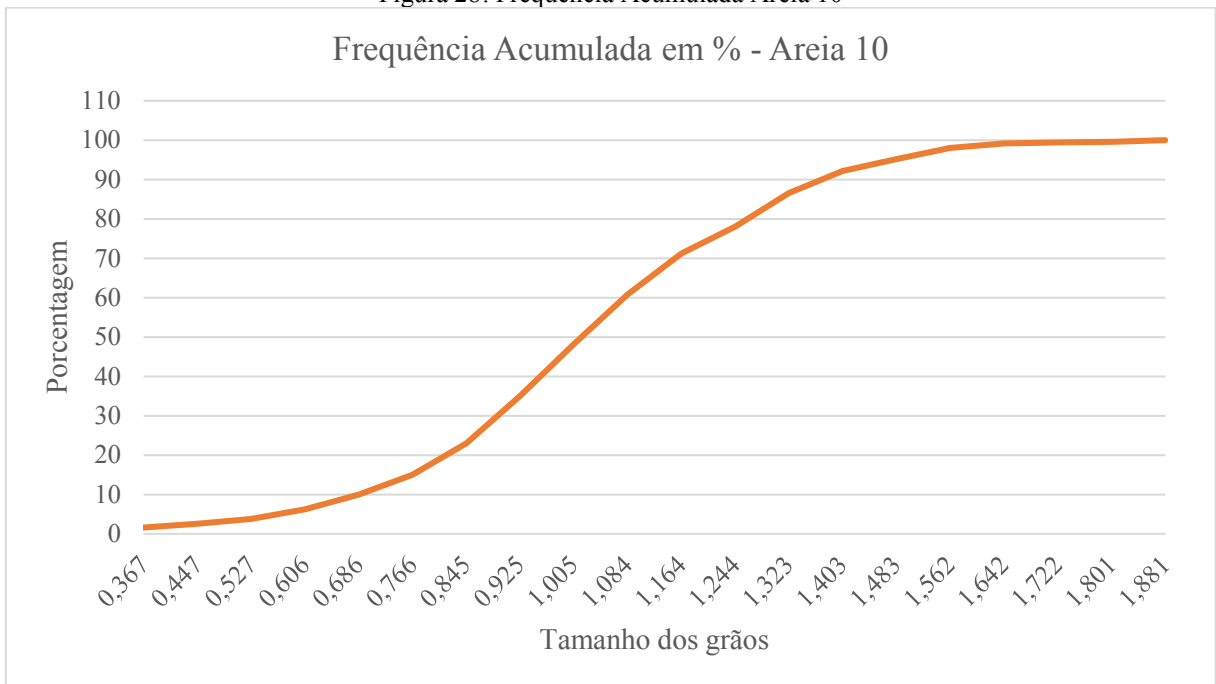
Figura 27: Histograma de distribuição e curva Normal da Areia 10 – utilizada dez vezes



Fonte: Próprio Autor

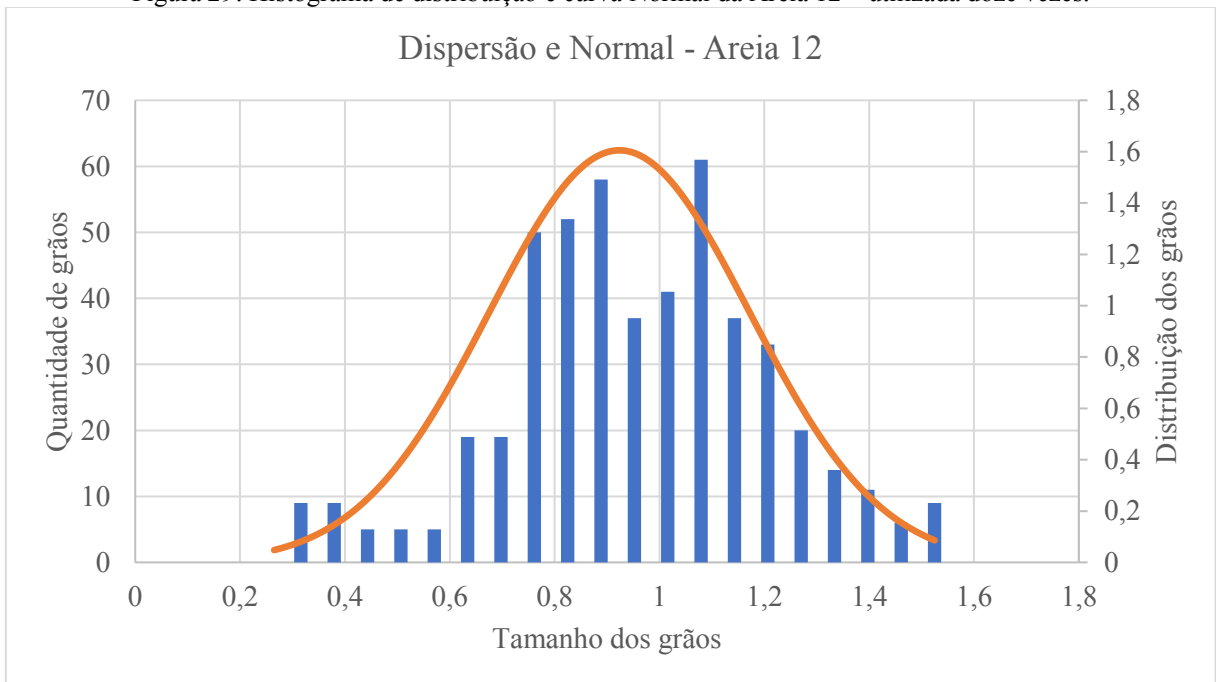
Para o caso da Areia 10, temos que pelo histograma o tamanho da partícula que representa a moda são as partículas de tamanho de 1,020 mm, pela curva normal o pico se encontra em 1,036 mm, e pelo gráfico de distribuição acumulada o valor do tamanho médio da partícula que se encontra no valor de 50% é de 1,084 mm.

Figura 28: Frequência Acumulada Areia 10



Fonte: Próprio Autor

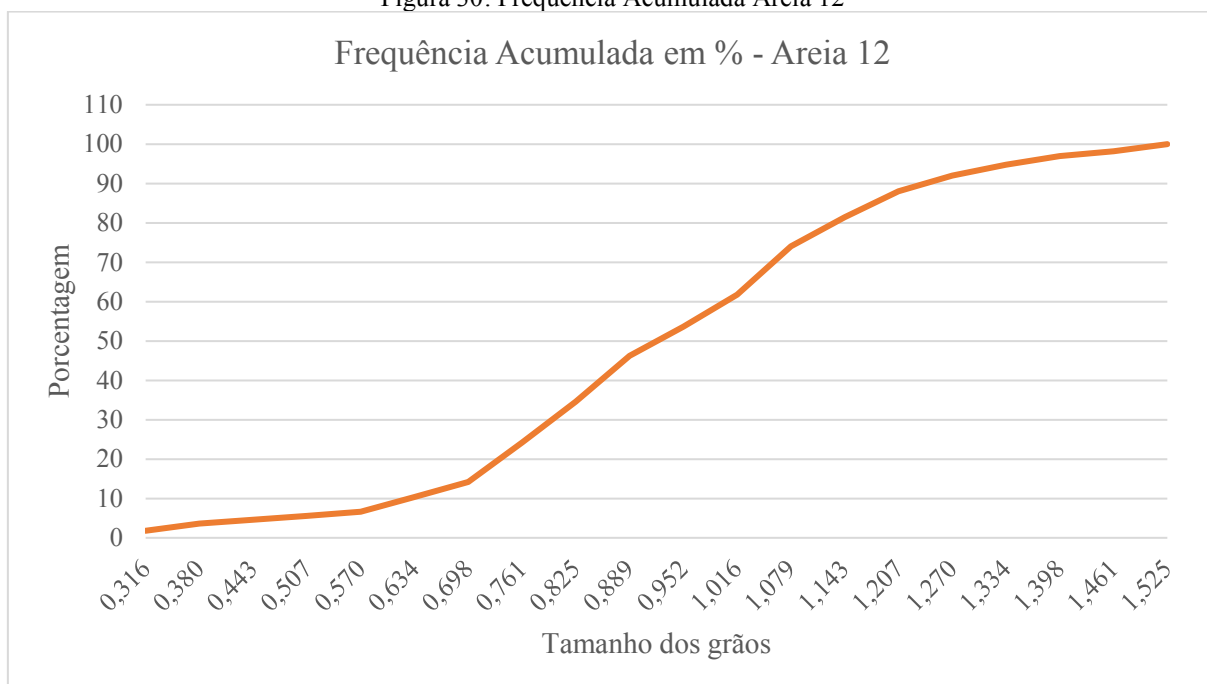
Figura 29: Histograma de distribuição e curva Normal da Areia 12 – utilizada doze vezes.



Fonte: Próprio Autor

Para o caso da Areia 12, temos que pelo histograma o tamanho da partícula que representa a moda são as partículas de tamanho de 1,079 mm, pela curva normal o pico se encontra em 0,926 mm, e pelo gráfico de distribuição acumulada o valor do tamanho médio da partícula que se encontra no valor de 50% é de 0,952 mm.

Figura 30: Frequência Acumulada Areia 12



Fonte: Próprio Autor

Como pôde-se constatar nas análises acima, sem o devido tratamento estatísticos incorre-se no erro de considerar o valor médio calculado ou o valor da moda, como sendo o tamanho médio das partículas, o que se mostra um tanto diferente quanto pegamos os valores dentro da frequência acumulada.

Através dos gráficos acima é possível então fazer a correlação entre o tamanho médio das partículas e a perda de massa, como apresentado na Tabela 3.

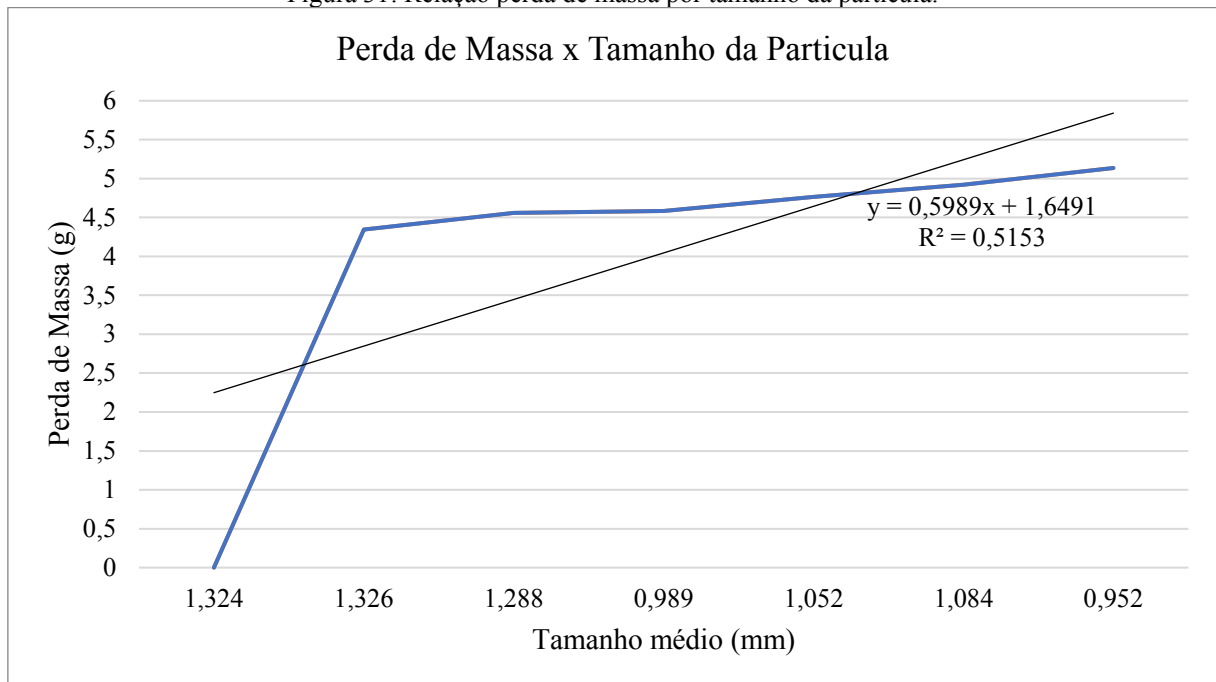
Tabela 3: Tamanho médio da partícula em relação à utilização da areia e perda de massa.

Utilização da Areia	Perda de Massa (g)	Tamanho Médio (mm)
0	0	1,324
1	4,346	1,326
3	4,559	1,288
5	4,582	0,989
7	4,767	1,052
10	4,923	1,084
12	5,136	0,952

Fonte: Próprio Autor

31. Com posse do tamanho médio pode-se relaciona ao desgaste, como mostrado na Figura

Figura 31: Relação perda de massa por tamanho da partícula.



Fonte: Próprio Autor

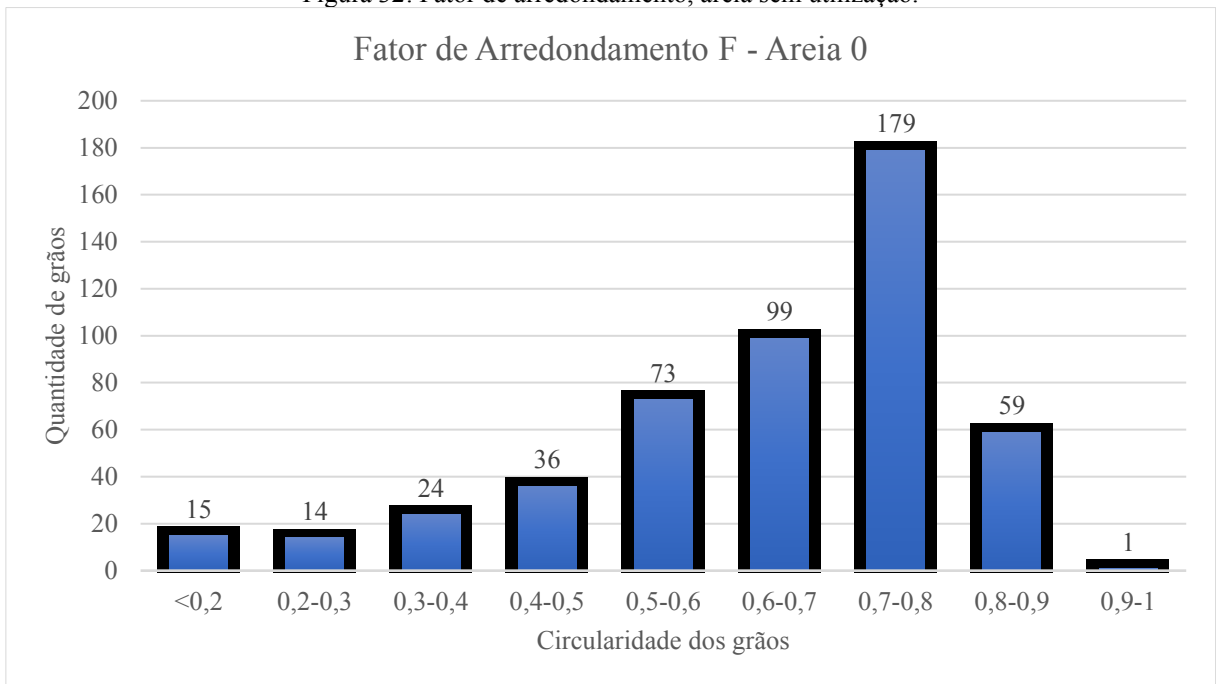
Com colocação da linha de regressão linear apresentando a tendência de decréscimo do tamanho do abrasivo com o aumento do desgaste, podemos também calcular o fator R^2 , que é uma avaliação da variabilidade dos dados do gráfico. R^2 avalia a variabilidade do eixo x, que no caso é o eixo da perda de massa, por apresentar um valor pequeno, indica uma pequena variabilidade nos valores do eixo x, o que pode ser bem observado quando se olha para os valores presentes no eixo, uma amplitude menor que 1 entre o primeiro e o último valor.

4.4 – FATOR DE FORMA

Em relação ao fator de forma, fator de arredondamento F, foram obtidos histogramas que apresentam o desvio de circularidade, onde quando um abrasivo apresenta circularidade igual a 1 ele é um círculo perfeito, e quanto menor o valor em relação a 1 ele é mais anguloso.

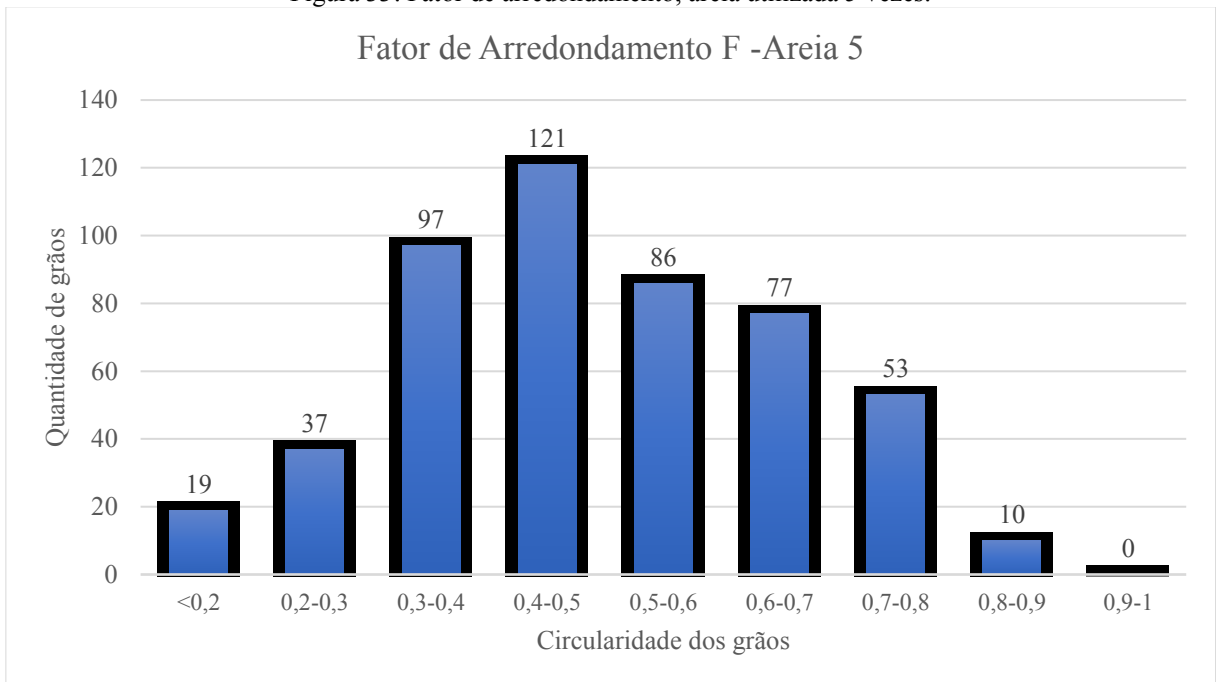
As Figuras 32, 33 e 34 apresentam os histogramas de fator de arredondamento F, das areias, sem utilização, utilizada cinco e doze vezes.

Figura 32: Fator de arredondamento, areia sem utilização.



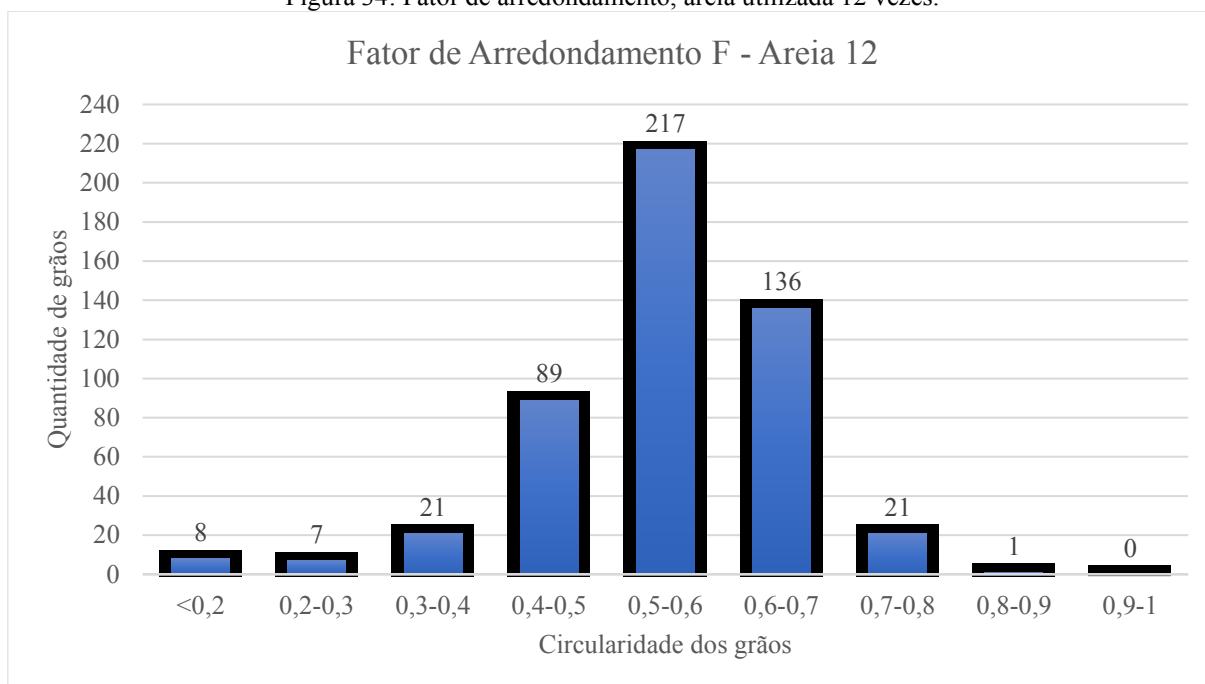
Fonte: Próprio Autor

Figura 33: Fator de arredondamento, areia utilizada 5 vezes.



Fonte: Próprio Autor

Figura 34: Fator de arredondamento, areia utilizada 12 vezes.



Fonte: Próprio Autor

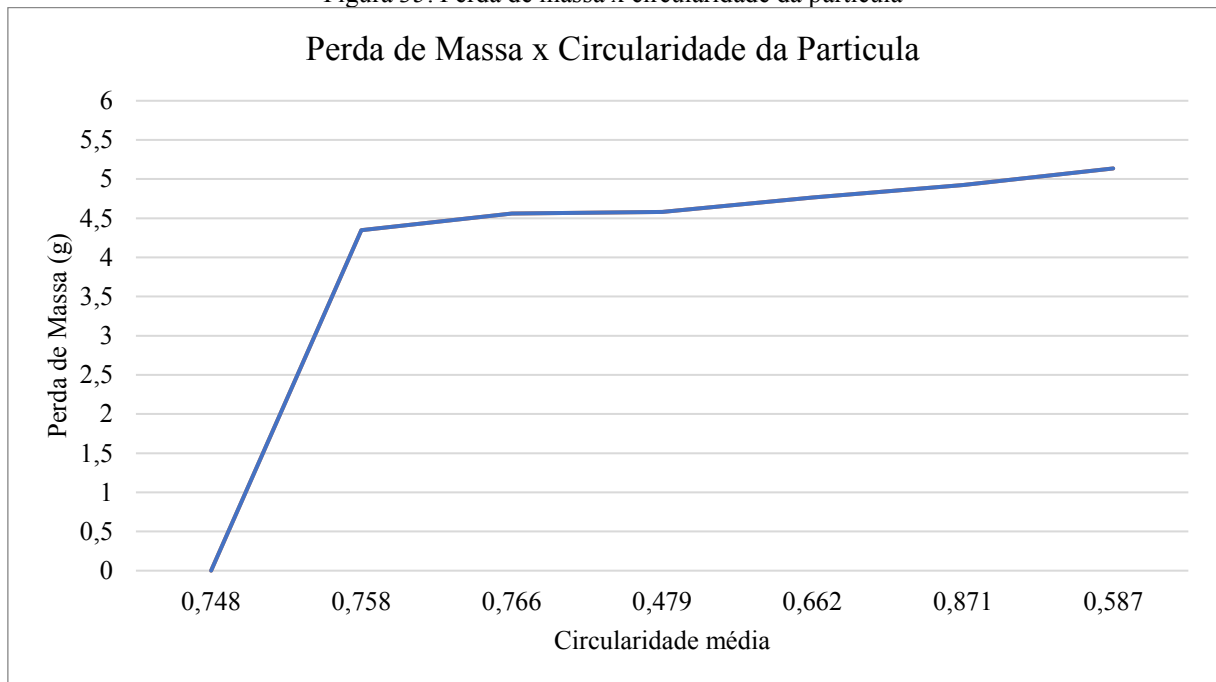
Como é possível visualizar no decorrer dos gráficos apresentados nas Figuras 32 a 34, as partículas não tendem à esferoidização, mas à uma forma mais disforme.

Tabela 4: Circularidade média da partícula em relação à utilização da areia e perda de massa.

Utilização da Areia	Perda de Massa (g)	Circularidade Média
0	0	0,748
1	4,346	0,758
3	4,559	0,766
5	4,582	0,479
7	4,767	0,662
10	4,923	0,871
12	5,136	0,587

Fonte: Próprio Autor

Figura 35: Perda de massa x circularidade da partícula



Fonte: Próprio Autor

Através da Figura 35 e da Tabela 4 podemos perceber a tendência de as partículas se manterem em um fator de forma entre 0,6 e 0,8, esta variação de forma não influencia o desgaste uma vez que é um evento muito pequeno quando relacionado à interação das partículas.

4.5 – GANHO NA REUTILIZAÇÃO DA AREIA

Foi obtido também um aumento no número de utilizações do abrasivo, que era o principal objetivo deste trabalho. Este aumento no número de utilizações do abrasivo representa uma redução de custos significativa e ajuda tanto a nível econômico como a nível de armazenamento. Do ponto de vista econômico, com um saco de areia, de acordo com a norma, é possível realizar 1,5 testes de 30 minutos e levando em conta sua reutilização, proporcionaria a realização de 4,5 testes no total. Já, com o presente trabalho, podem ser feitos 9 testes. Representando um ganho de 100% na utilização da areia e uma redução de custo de 50%. E neste caso, uma grande economia pois cada saco de areia tem o valor unitário de R\$ 120,00.

4.6 – DISCUSSÃO

De acordo com as Figuras 14 e 15, observa-se que tanto o desgaste total como o desgaste em regime permanente do contra corpo, tendem a subir a partir do quinto ensaio. Além disso, o esperado era que com a diminuição das partículas, como mostrado nas Figuras de 19 a 24, a

força por partícula fosse diminuir, de acordo com Misra e Finie (1981a), porém este efeito não ocorreu, como observado na Figura 16.

Pelas relações de dureza abrasivo/contra corpo, apresentadas por Hutchings, Stachowiak e Batchelor e Zum Gahr, pôde-se observar uma alta taxa de fixação de abrasivos sobre a superfície mais mole, no caso a borracha. Gerando assim riscamentos no contra corpo metálico como já era esperado. Além disso, pode-se classificar o desgaste como severo de acordo também com a relação de durezas onde a dureza do abrasivo é de 5600 HV e o aço 1045 com 170 HV, gerando uma relação bem maior que 1,2.

Com relação à mudança de forma, o que poderia alterar as taxas de desgaste, podemos ver pelas Figuras 25 a 27, que a alteração não é muito expressiva, e que a areia não tende a se tornar uma esfera.

Como foi observado na Figura 14 e relacionando com as figuras que apresentam os histogramas de distribuição das partículas, o aumento da taxa de desgaste com a diminuição do tamanho das partículas é uma consequência não esperada inicialmente.

Ao pesquisar sobre possíveis fatores que responderiam à este resultado foi encontrado em Ardila M. A. N. (2017) e em Bozzi; de Mello,(1999), caso de aumento no desgaste em detrimento de aumento do número de eventos e análises baseadas nos aspectos de fragmentação das partículas , respectivamente, onde se apresentou coerente com os resultados encontrados neste trabalho.

Também apoiada na análise das postulações de Adachi e Hutchings (2003), o qual modelam a zona de contato pelo fundamento de contato hertziano inicial entre o corpo e contra corpo e a área de interação inicial das partículas. E ainda complementando pela superposição de eventos levando à um maior desgaste (DA SILVA; DE MELLO, 2009; DA SILVA; COSTA; DE MELLO, 2011).

O autor Ardila chegou à conclusão que uma maior participação de partículas gera um maior número de eventos na interface e assim causando um maior desgaste, sobrepujando para este caso a relação de quantidade de partículas na interface, que resultaria em menor força por partícula e por isso gerando menor desgaste Misra e Finie (1981).

Em consideração à reutilização da areia, obteve-se um resultado bastante satisfatório como já apresentado. Este resultado nos leva ainda a considerar a questão do armazenamento do material para pesquisas, o espaço físico exigido para a estocagem seria menor já que seriam necessárias quantidades reduzidas de sacos de areia. Proporcionando também, redução de custos com o estoque de material.

CAPITULO V

CONCLUSÕES

Conclui-se que, em resposta ao aumento do desgaste, o presente trabalho obteve resultados consistentes e embasados teoricamente. Considerando que o número de eventos sobrepõe a divisão da força por partículas, causando maior dano à superfície do contra corpo.

Assim, o objetivo deste trabalho foi atingido com êxito, uma vez que segundo a NORMA ASTM G65, a utilização deveria ser no máximo de três vezes para o teste e pelo pleiteado pôde-se concluir que podem ser feitas até 6 utilizações da mesma areia, sem que seja perdida a qualidade nos testes de roda de borracha.

E este resultado também abre portas para indagações e pesquisa de reutilização de outros insumos, pelo menos na área de abrasão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADACHI, K.; HUTCHINGS, I. M. **Wear-mode mapping for the micro-scale abrasion test.** *Wear*, v. 255, n. 1–6, p. 23-29, 2003. ISSN 0043-1648.

ARDILA, M. A. N., **Influência da natureza e topografia da superfície na microabrasão e micro-abrasão-corrosão**, 2017.

ASTM. **Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus: ASTM G5-16 2004.**

DA SILVA, W. M. D. **Simulação do desgaste abrasivo via interações múltiplas..** 177 f. Doutorado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.

DA SILVA, W. M.; DE MELLO, J. D. B. **Using parallel scratches to simulate abrasive wear.** *Wear*, v. 267, p. 1987-1997, 2009.

DA SILVA, W. M.; COSTA, H. L.; DE MELLO, J. D. B. **Transitions in abrasive wear mechanisms: Effect of the superimposition of interactions.** *Wear*, v. 271, p. 977 - 986, 2011.

DAMIÃO, C. A., **Efeito da textura metalúrgica na resistência a abrasão de aços ao manganês**, 2018. 73 f.

DE BOZZI, A.C.; DE MELLO, J.D.B. **Wear resistance and wear mechanisms of WC–12%CO thermal sprayed coatings in three-body abrasion.** *Wear*, v.233-235, p.575-587, 1999.

DIN 50320: **Verschlei – Begriffe, Analyse von Verschlei.**

DUBE, N. B.; HUTCHINGS, I. M. **Influence of particle fracture in the high-stress and low-stress abrasive wear of steel.** *Wear*, v. 233, n. Supplement C, p. 246-256, 1999/12/01/ 1999. ISSN 0043-1648.

EYRE, T. S. **Wear characteristics of metals.** Tribology International, v. 9, p. 203-212, 1976.

EYRE, T. S. **The mechanisms of wear.** Tribology International, v. 11, p. 91-96, 1978.

GATES, J. D. **Two-body and three-body abrasion: A critical discussion.** Wear, v. 214, p. 139-146, 1998.

HUTCHINGS, I. M. **Tribology: Friction and wear of engineering materials.** Boca Raton, USA: CRC Press Inc., 1992. p.

JOST, H.P, 1960, **“Lubrication (tribology) education and research,** Jost Rep., Department of Education and Science, HMSO, London, 1966, p.4. Citado em: SINATORA, A., 2005, **“Tribologia: um resgate histórico e o estado da arte”**, Prova de Erudição, São Paulo.

JOST, H. P. Tribology — Origin and future. Wear, v. 136, p. 1-17, 1990.

MISRA, A.; FINNIE, I. **On the size effect in abrasive and erosive wear.** Wear, v. 65, p. 359-373, 1981a.

MISRA, A.; FINNIE, I. **Some observations on two-body abrasive wear.** Wear, v. 68, p. 41-56, 1981b.

MULHEARN, T. O.; SAMUELS, L. E. **The abrasion of metals: A model of the process,** v. 5, p. 478 - 498, 1962.

NOGUEIRA, R. E. F. Q.; DE MELLO, J. D. B. **Esclerometria aplicada ao estudo do desgaste abrasivo: Potencialidades da técnica, construção e avaliação de esclerômetro retilíneo.** 43º Congresso anual da ABM - Associação Brasileira de Metalurgia, 1988b. Belo Horizonte. p.281-300. OECD Research Group on Wear of Engineering Materials: Friction, Wear and Lubrication - Tribology -Glossary of Terms and Definitions. OECD, Paris 1969.

RABINOWICZ, E.; DUNN, L. A.; RUSSELL, P. G. **A study of abrasive wear under three-body conditions.** Wear, v. 4, p. 345-355, 1961.

STACHOWIAK, G. W.; BATCHELOR, A. W. **Engineering tribology**. 2001. p.

STEVENSON, A. N. J.; HUTCHINGS, I. M. **Development of the dry sand/rubber wheel abrasion test**. *Wear*, v. 195, n. 1, p. 232-240, 1996/07/01/ 1996. ISSN 0043-1648.

WILLIAMS, J. A.; HYNICICA, A. M. **ABRASIVE WEAR IN LUBRICATED CONTACTS**. *Journal of Physics D-Applied Physics*, v. 25, p. A81-A90, Jan 1992a.

WILLIAMS, J. A.; HYNICICA, A. M. **Mechanisms of abrasive wear in lubricated contacts**. *Wear*, v. 152, p. 57-74, 1992b.

WIROJANUPATUMP, S.; SHIPWAY, P. H. **A direct comparison of wet and dry abrasion behaviour of mild steel**. *Wear*, v. 233, n. Supplement C, p. 655-665, 1999/12/01/ 1999. ISSN 0043-1648.

ZUM GAHR, K. H. **Microestruure and wear of materials**. Amsterdã: Elsevier, 1987.

<https://www.youtube.com/watch?v=3xBpPoWAXTA&t=740s> – Acessado em 20/11/2018

<https://www.youtube.com/watch?v=2YItzdzFHjU> – Acessado em 24/11/2018

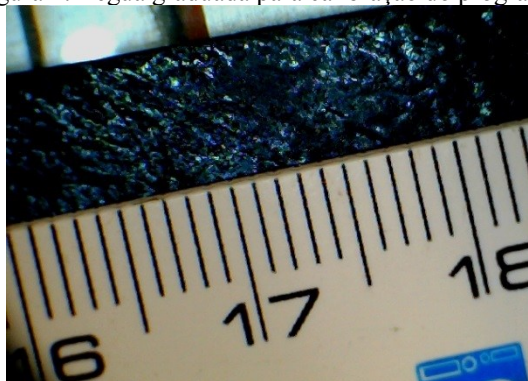
<https://www.somatematica.com.br/estat/basica/normal.php> - Acessado em 24/11/2018

APÊNDICE A

METODO DE ANALISE DE PARTÍCULAS DE AREIA

Primeiramente para a aquisição das fotos as amostras têm de estar preferencialmente sobre um fundo escuro, preto por exemplo. Após a definição de fundo e a da melhor visualização na câmera deve-se utilizar um método de calibração do programa Image J, para que se possa mensurar as partículas. No caso foi utilizada uma régua simples, figura 1. A régua deve ser colocada sobre a superfície que serão lançadas as amostras de areia.

Figura 1: Régua graduada para calibração do programa.



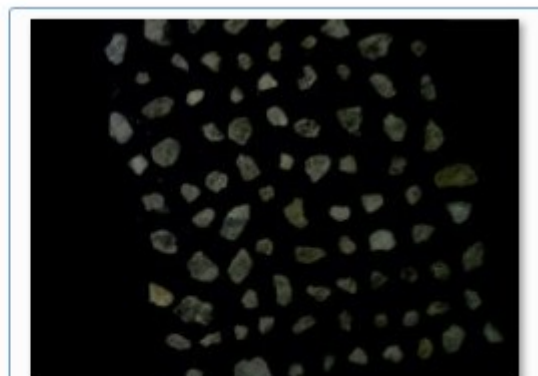
Fonte: Próprio Autor

Para iniciarmos a análise primeiramente devemos copiar a imagem para editarmos a cópia, completando qualquer parte da imagem que não seja preto e não seja de areia seja pintado de preto como mostrado na Figura 2 (a) e (b).

Figura 2: (a) Imagem inicial. (b) Imagem copiada e editada com fundo preto.



Areia 12

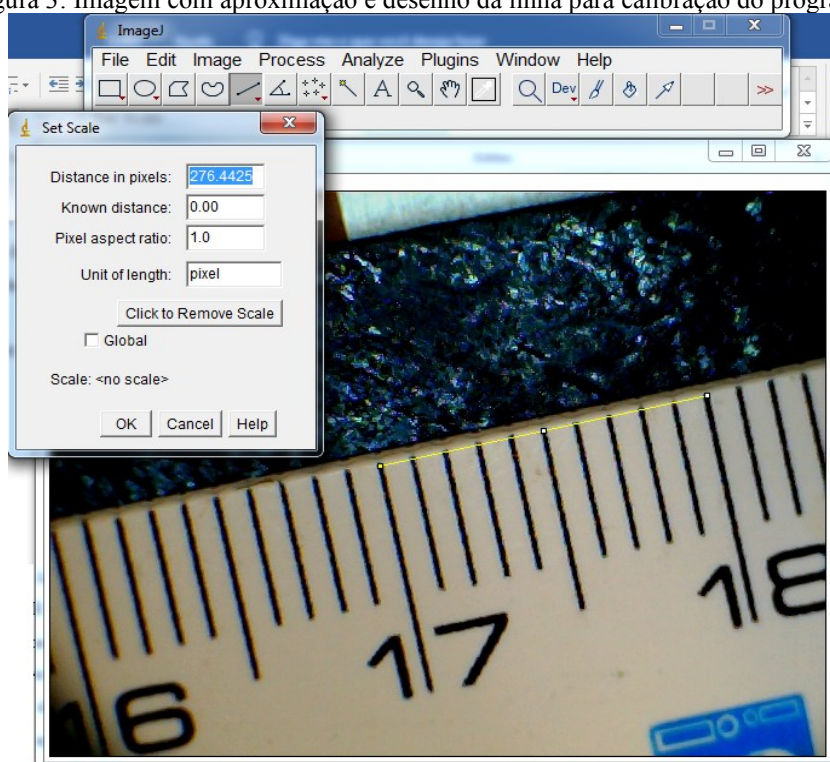


Areia 12 - Cópia

Fonte: Próprio Autor

Inicia-se o programa Image J e a primeira parte é a calibração do programa. A calibração é importante para informar ao programa a razão comprimento x número de pixels, para que quando ele fizer o processamento de imagem ele meça corretamente as partículas. Para criar a escala, estando com ImageJ aberto, vamos em FILE > OPEN e abrimos a imagem com a régua. Com a imagem aberta vamos na figura de linha, selecionamos ela, e damos um zoom, com os sinais de + e -, na imagem para melhor seleção da distância, figura 3. No caso da calibração foi feita em 10 mm e para que ela seja feita com perfeição a linha deve estar a mais reta possível.

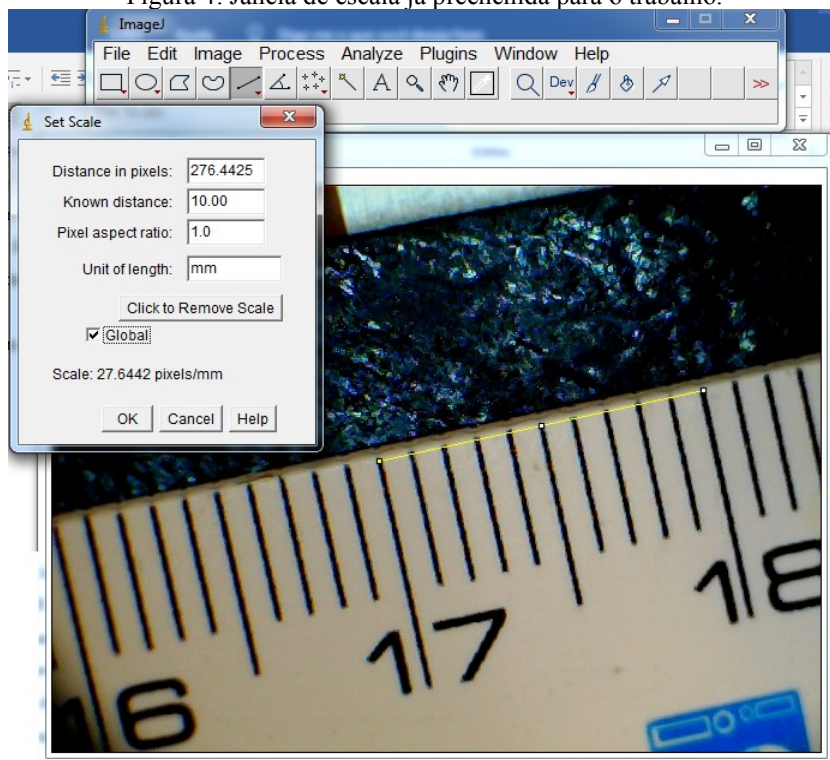
Figura 3: Imagem com aproximação e desenho da linha para calibração do programa.



Fonte: Próprio Autor

Após o desenho da linha, configurou-se o programa para utilizar a escala desenhada da seguinte forma. ANALYSE>SET SCALE, após clicar no segundo, irá abrir uma janela para o preenchimento com informações de calibração, figura 4. No primeiro retângulo o programa apresenta o comprimento da linha em número de pixels. No segundo retângulo ele pede a distância conhecida. E no quarto retângulo ele pede a unidade da distância conhecida. Também se marcou a caixa de GLOBAL, para que a calibração seja aplicada a todas as imagens a serem analisadas após o momento da calibração. E para confirmar tudo OK.

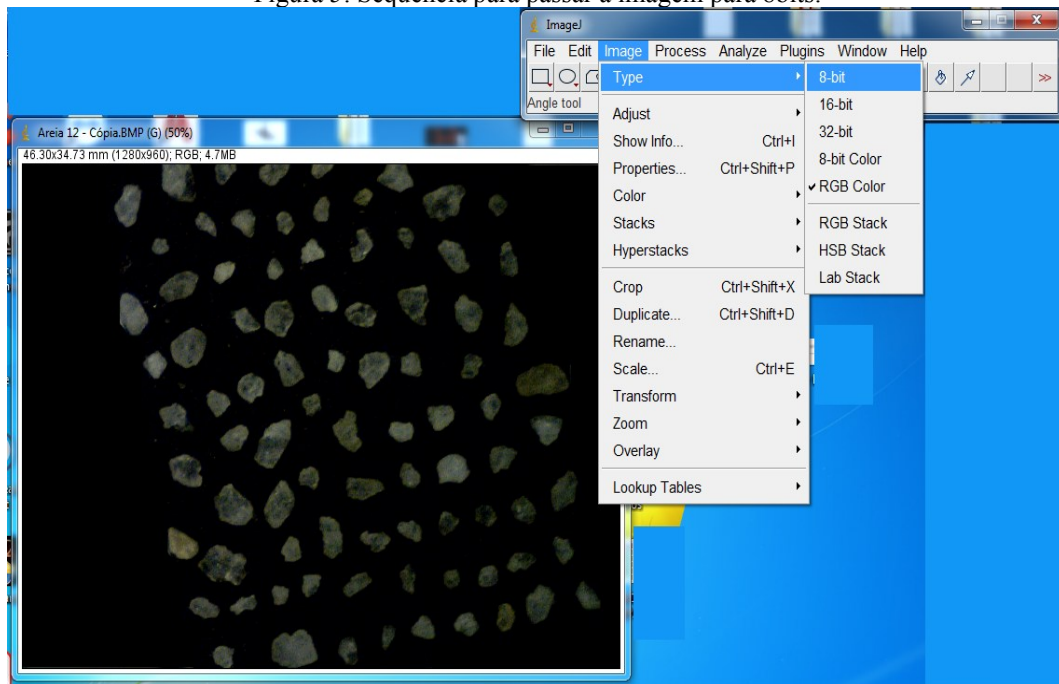
Figura 4: Janela de escala já preenchida para o trabalho.



Fonte: Próprio Autor

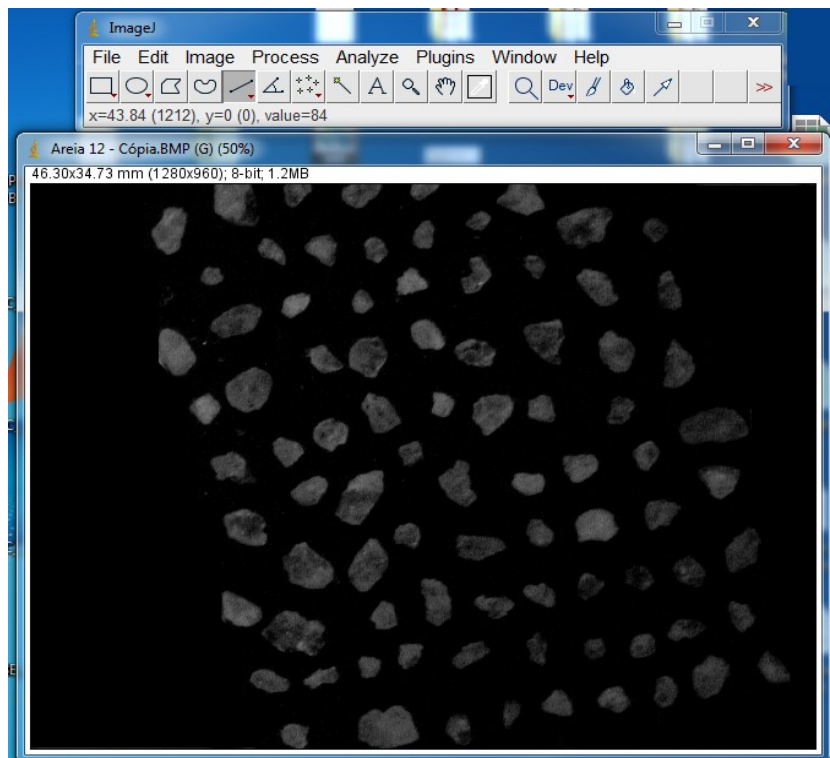
É importante salientar que após a calibração a imagem de calibração não deve ser fechada, mas sim minimizada. A partir deste momento pode-se iniciar o processamento da imagem que será analisada. Inicia-se com o melhoramento de contraste, mexendo no fundo da imagem. Abrimos a imagem já editada e vamos convertê-la de uma imagem colorida para uma imagem em tons de cinza, com os seguintes passos. IMAGE>TYPE>8bits.

Figura 5: Sequencia para passar a imagem para 8bits.



Fonte: Próprio Autor

Figura 6: Imagem em 8 bits

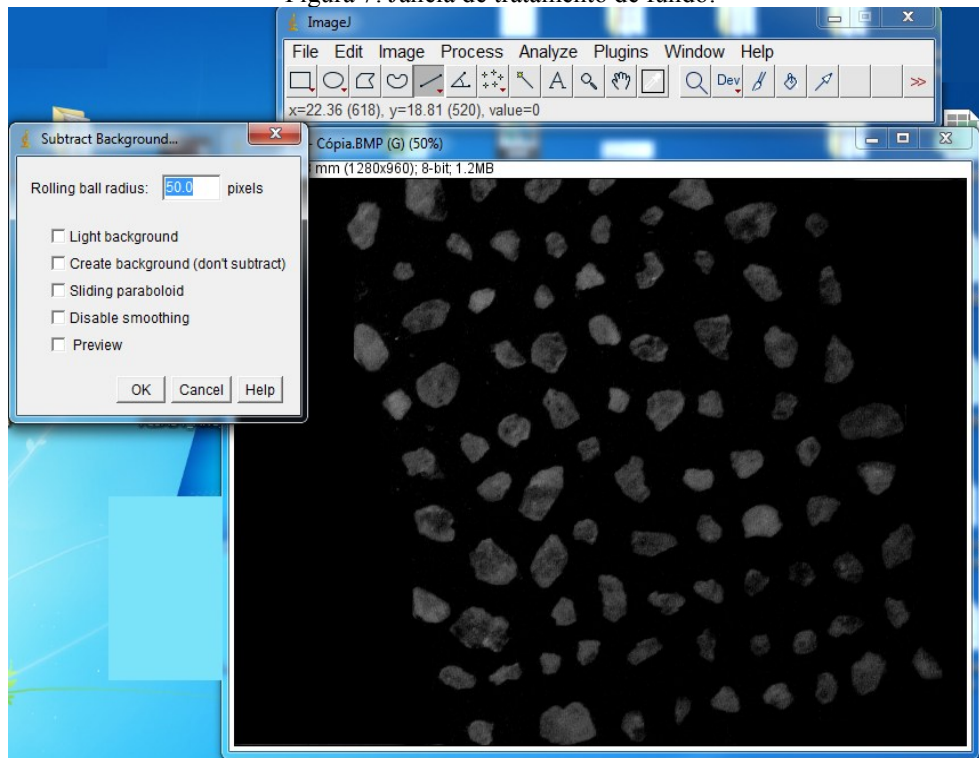


Fonte: Próprio Autor

Seguindo, homogeneizou-se o fundo, indo em PROCESS>SUBTRACT BACKGROUND, testou-se vários valores para o raio das esperas em pixels e o melhor no caso foi o de 50 pixels. Este valor deve ser testado para ver qual o melhor resultado no fundo da

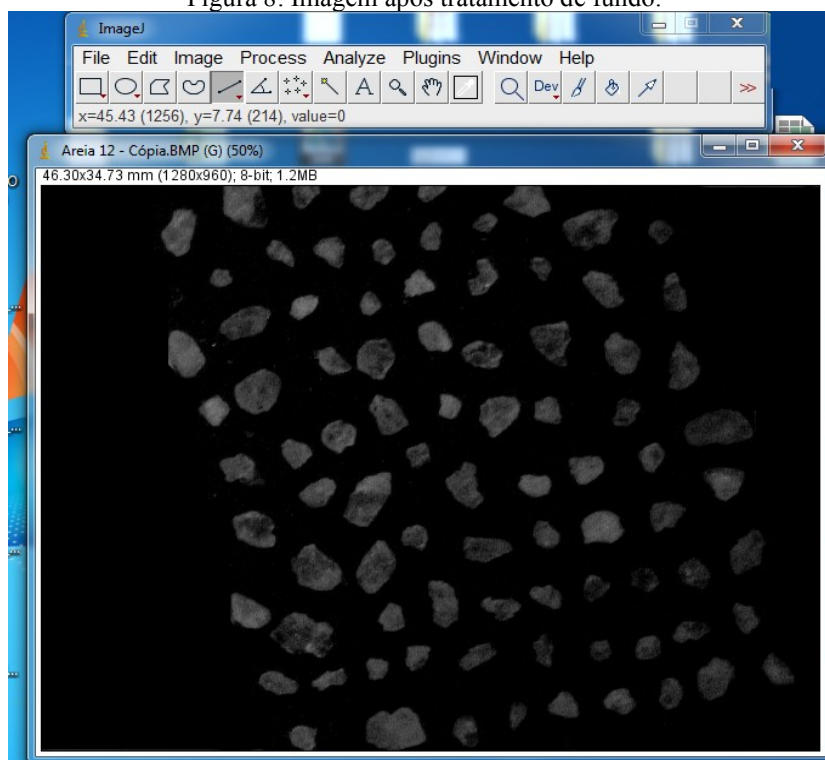
imagem, selecionando a caixa PREVIEW pode-se ver a mudança que será feita na imagem. Não foi marcado mais nenhum dos itens da caixa de mensagem.

Figura 7: Janela de tratamento de fundo:



Fonte: Próprio Autor.

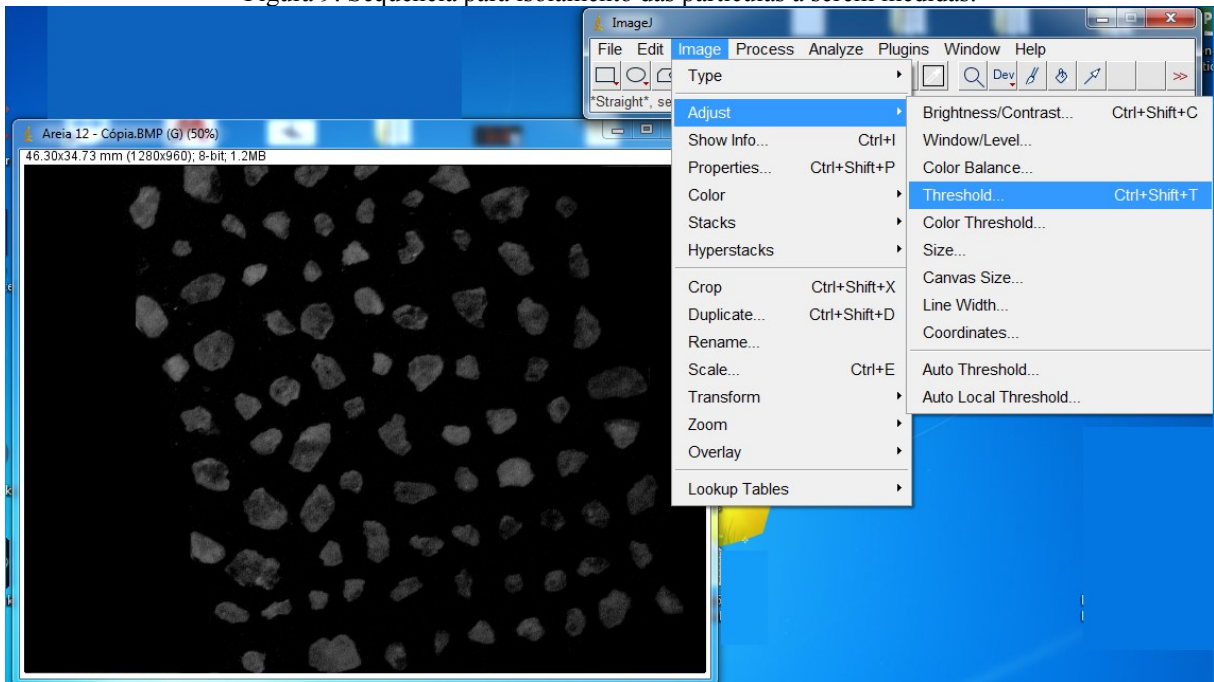
Figura 8: Imagem após tratamento de fundo:



Fonte: Próprio Autor

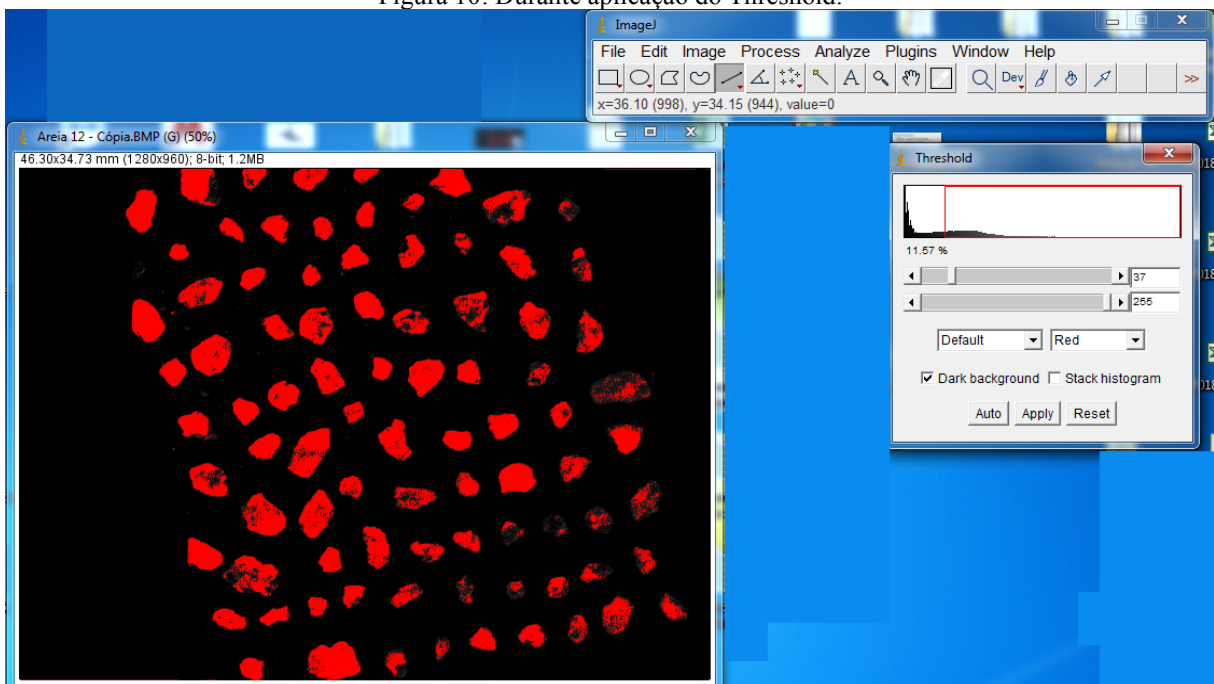
A partir deste momento, inicia-se o destacamento das partículas na imagem. IMAGE>ADJUST>TRESHOLD. Abrindo uma nova janela onde movimentando a barra abaixo do gráfico ajustamos o melhor destaque das partículas, após encontrar o melhor ajuste clica-se em APPLY e fecho a janela.

Figura 9: Sequência para isolamento das partículas a serem medidas.



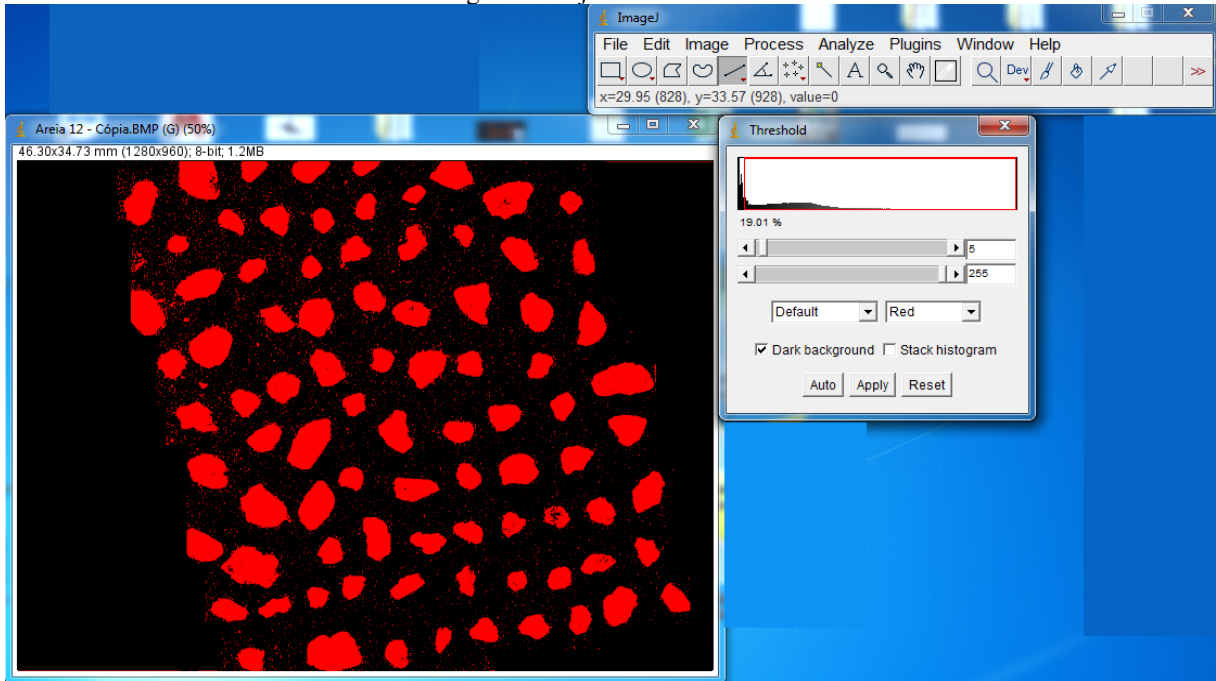
Fonte: Próprio Autor

Figura 10: Durante aplicação do Threshold.



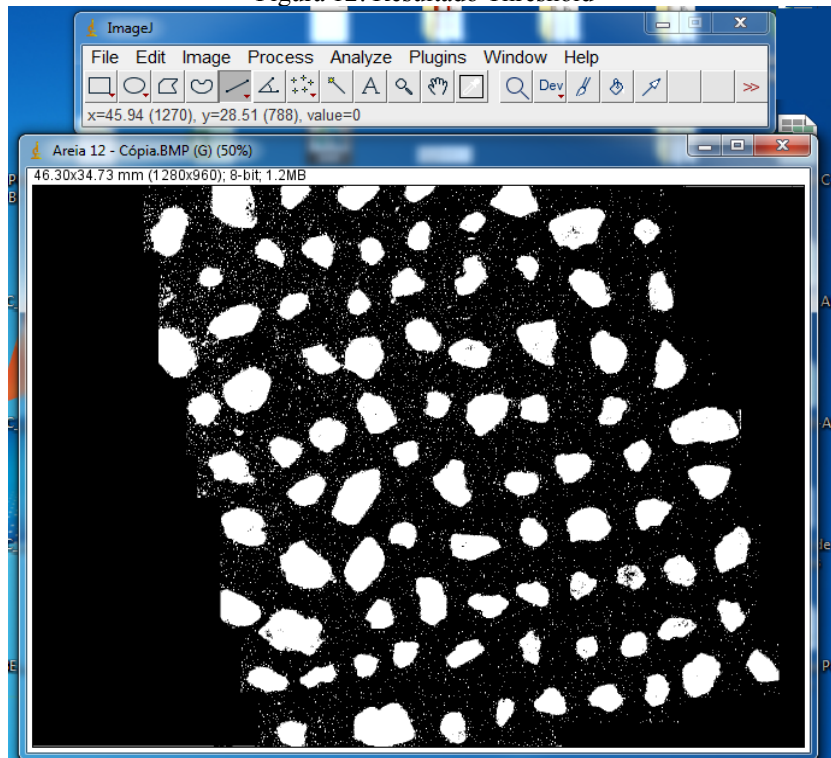
Fonte: Próprio Autor

Figura 11: Ajuste de Threshold



Fonte: Próprio Autor

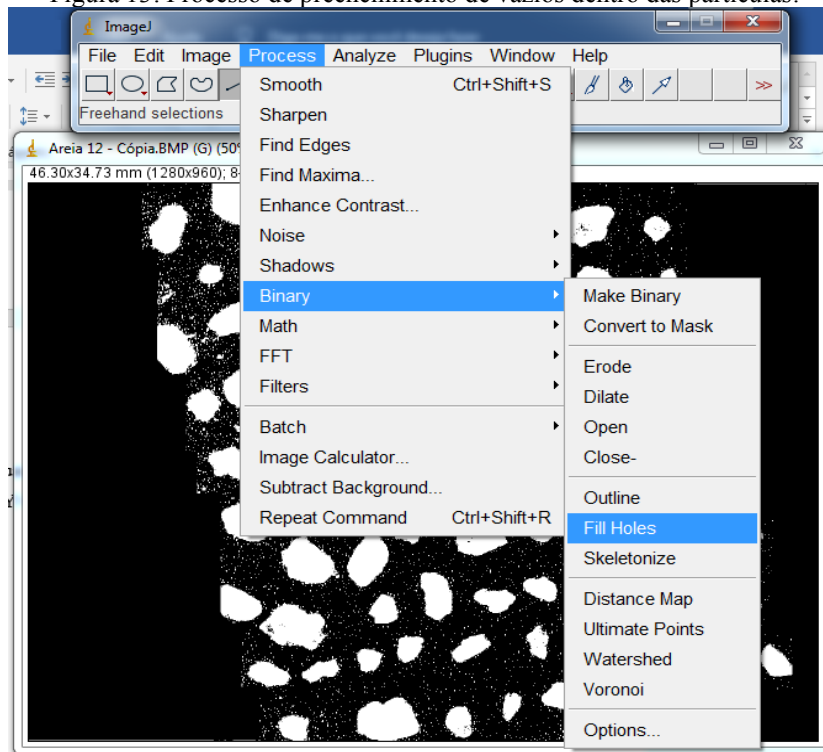
Figura 12: Resultado Threshold



Fonte: Próprio Autor

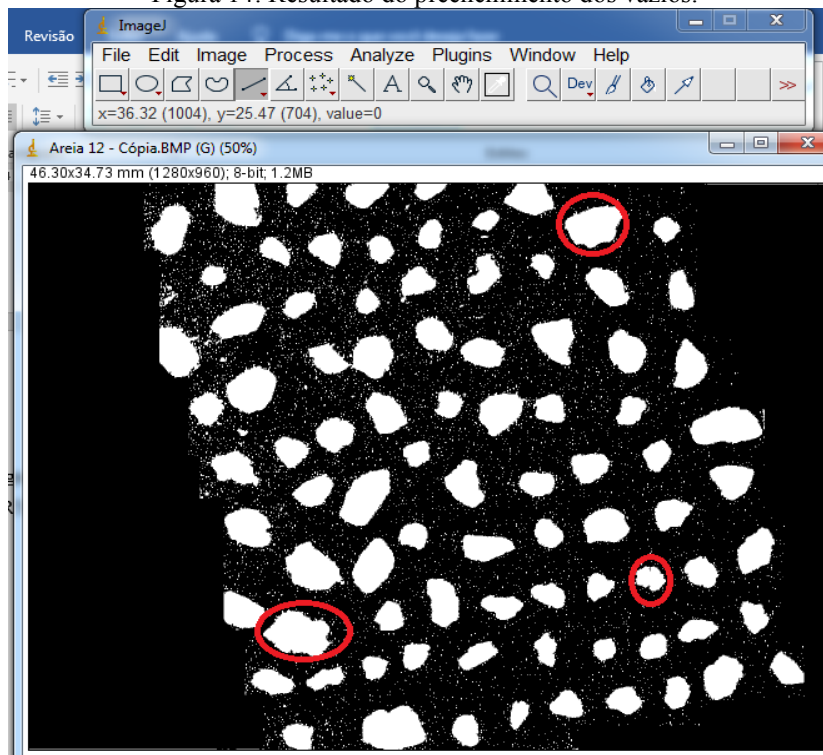
Após isso caso tenha algum espaço dentro das partículas que não esteja preenchido podemos ir em: PROCESS>BINARY>FILL HOLES, para tentar preencher todos os buracos no meio das partículas.

Figura 13: Processo de preenchimento de vazios dentro das partículas:



Fonte: Próprio Autor

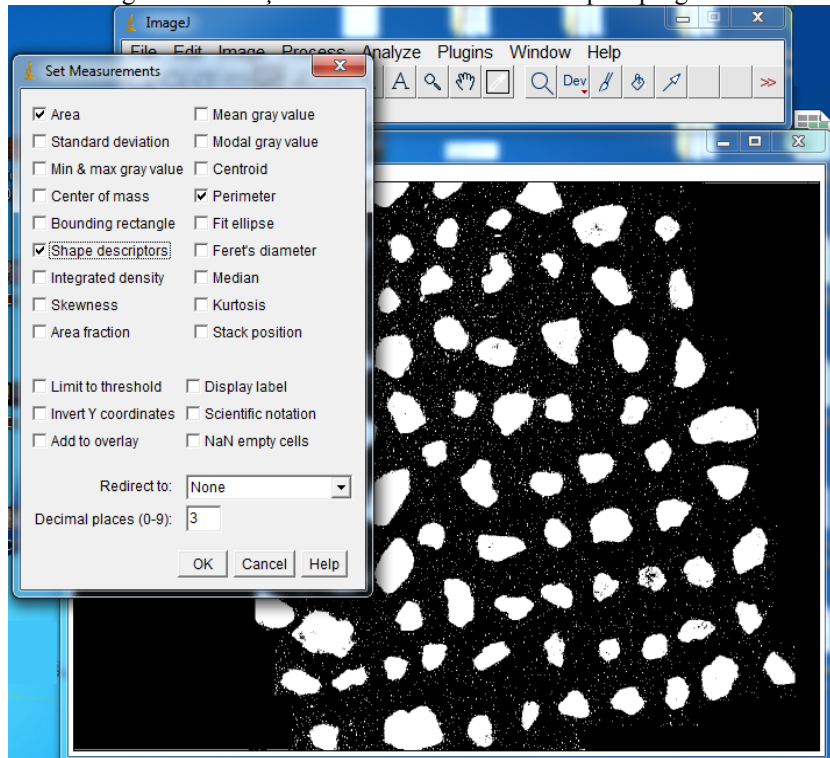
Figura 14: Resultado do preenchimento dos vazios.



Fonte: Próprio Autor

Com as partículas destacadas faz-se a análise, ANALYSE>SET MESURES, para selecionar as medidas que queremos que apareça no relatório final da análise. Para o presente trabalho deseja-se Área, descrição de forma, que me da a circularidade e o perímetro e OK.

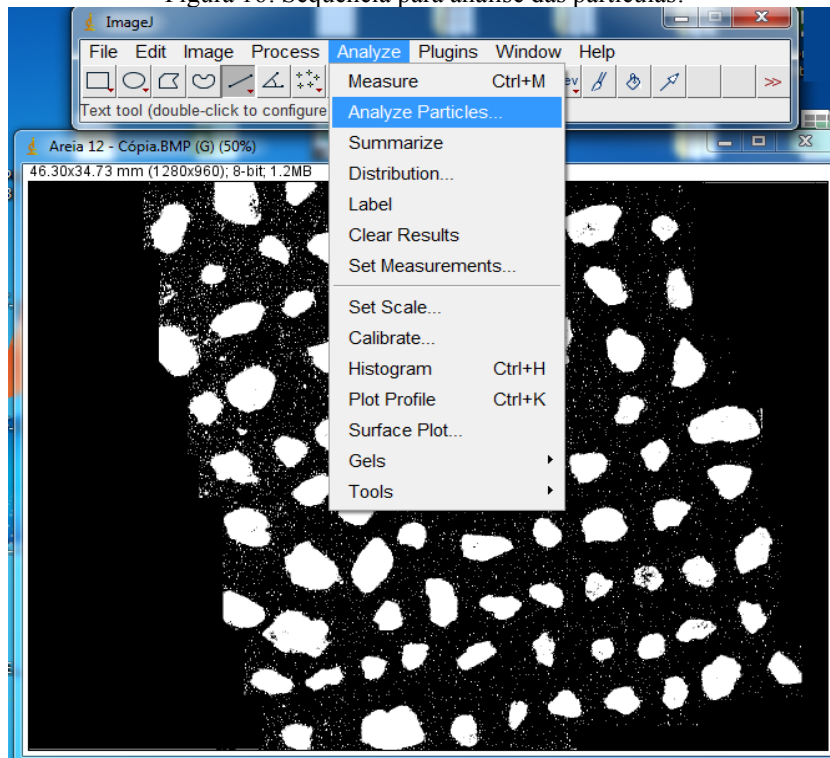
Figura 15: Seleção de medidas a serem feitas pelo programa:



Fonte: Próprio Autor

Assim para análise vamos em; ANALYSE>ANALYSE PARTICLES. Na janela que aparece o primeiro retângulo é para a definição de quais áreas de partículas deseja-se que ele analise, o primeiro valor é a menor área e o valor após o – é a maior área, figura 16. A circularidade segue o princípio do fator de forma, quanto mais próximo de 1 mais próximo de um círculo perfeito.

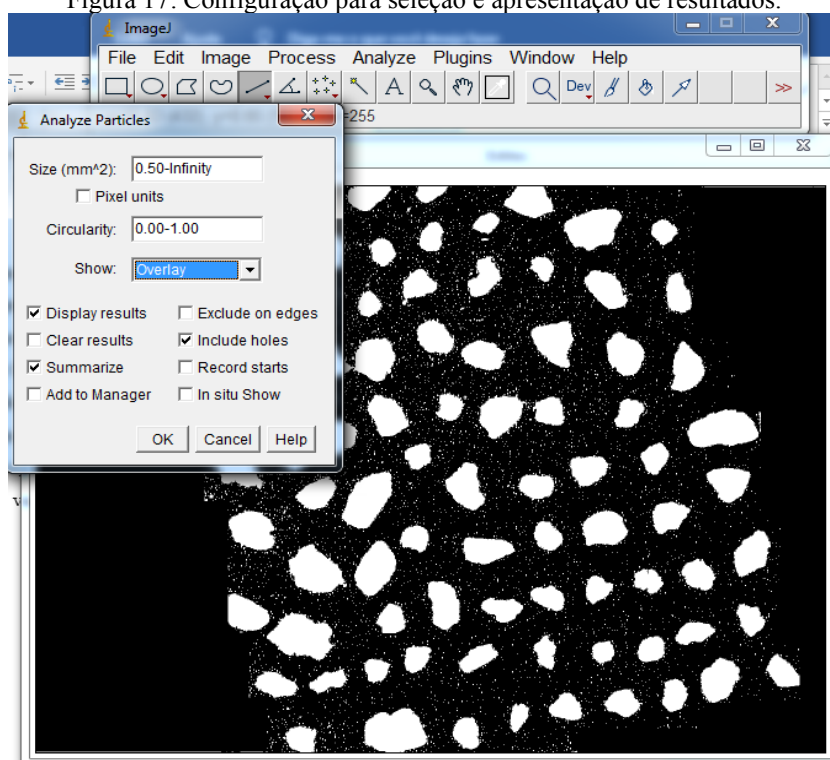
Figura 16: Sequencia para análise das partículas:



Fonte: Próprio Autor

Em SHOW foi marcado OVERLAY para que apareça as marcas em volta da partícula que o programa medir. Foram marcadas também as caixas de DISPLAY RESULTS, SUMMARIZE e INCLUDE HOLES, o primeiro para apresentar os resultados na tela, o segundo para organizar e o ultimo para incluir vazios em casos de no meio da partícula ter ficado muito escuro e seja detectado um vazio.

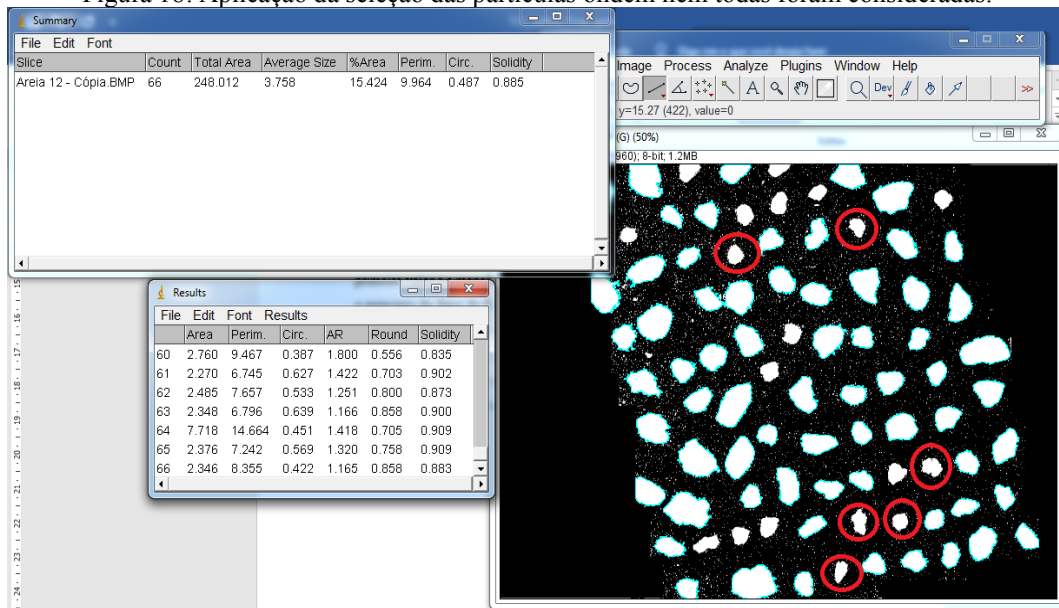
Figura 17: Configuração para seleção e apresentação de resultados.



Fonte: Próprio Autor

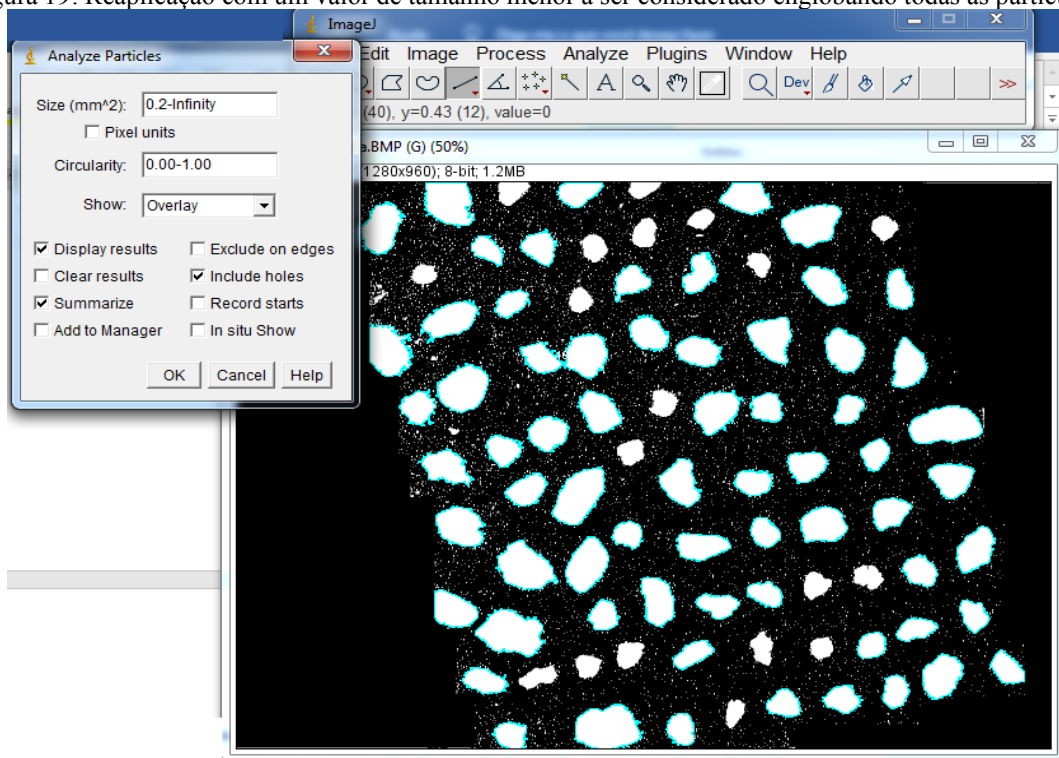
Junto com a imagem mostrando quais as partículas selecionadas, aparecem também duas janelas, uma que é a do sumario e outra que é a dos resultados, a do sumario pode ser fechada, mas a dos resultados já apresenta todos os dados que foi pedido ao programa e deve ser salvo como um arquivo .csv, que será um arquivo de texto separado por virgula. Este parâmetro deve ser modificado até que todas as partículas tenham sido identificadas. Por não possuir previsão de como ficará a imagem, este procedimento pode ser realizado repetidas vezes sem a necessidade de reabertura da imagem.

Figura 18: Aplicação da seleção das partículas onde nem todas foram consideradas.



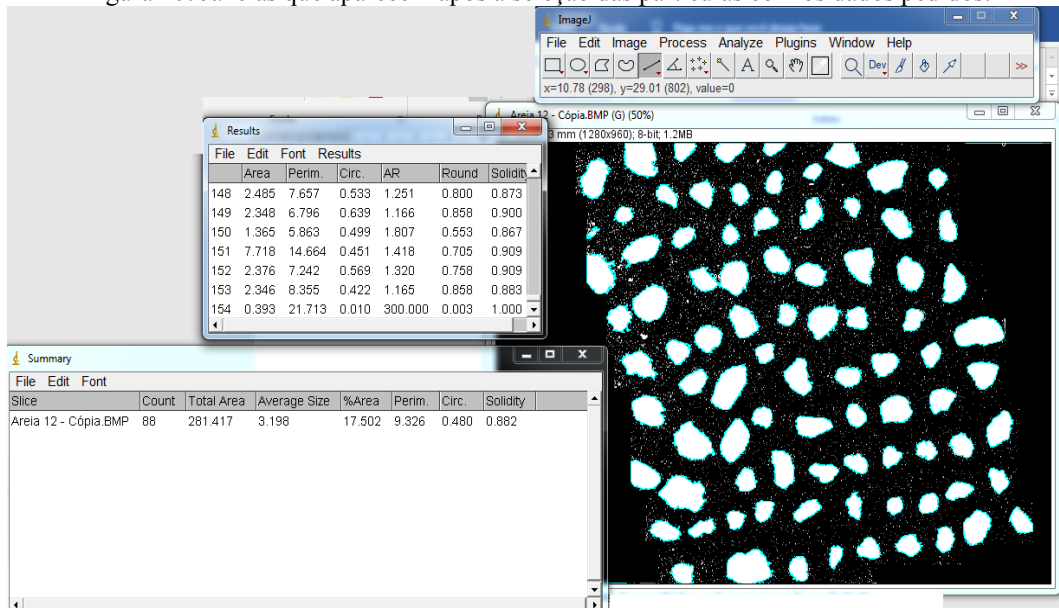
Fonte: Próprio Autor

Figura 19: Reaplicação com um valor de tamanho menor a ser considerado englobando todas as partículas.



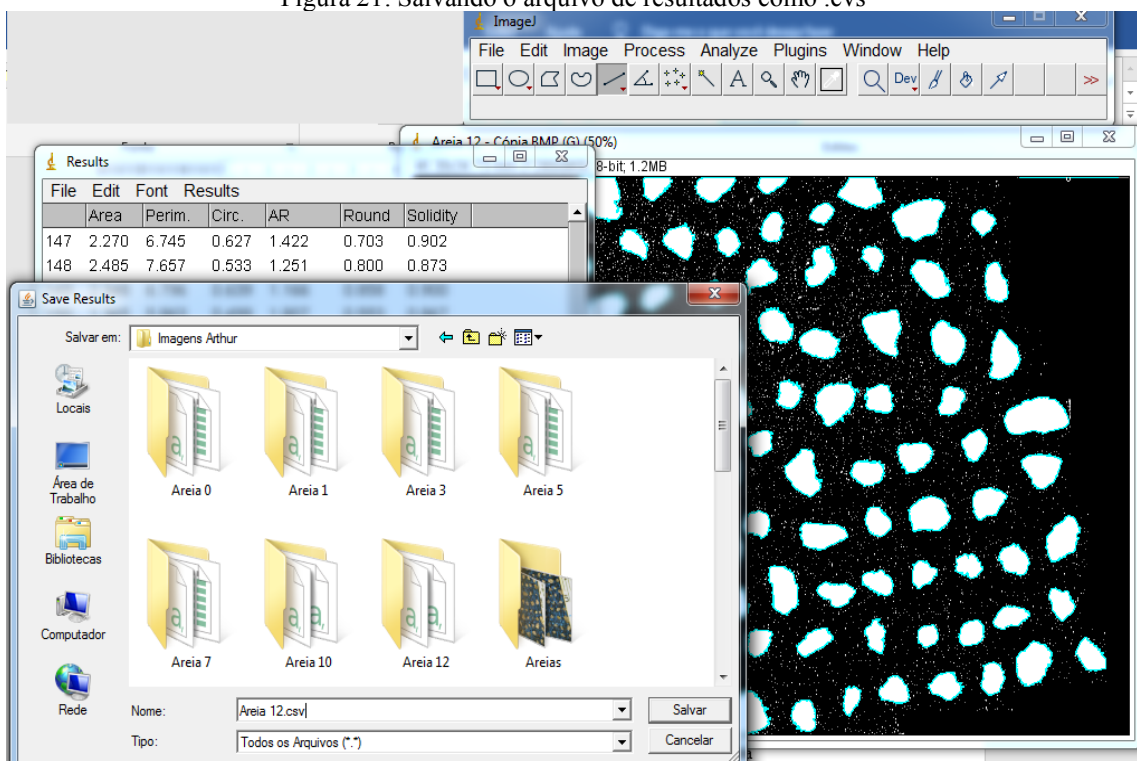
Fonte: Próprio Autor

Figura 20: Janelas que aparecem após a seleção das partículas com os dados pedidos.



Fonte: Próprio Autor

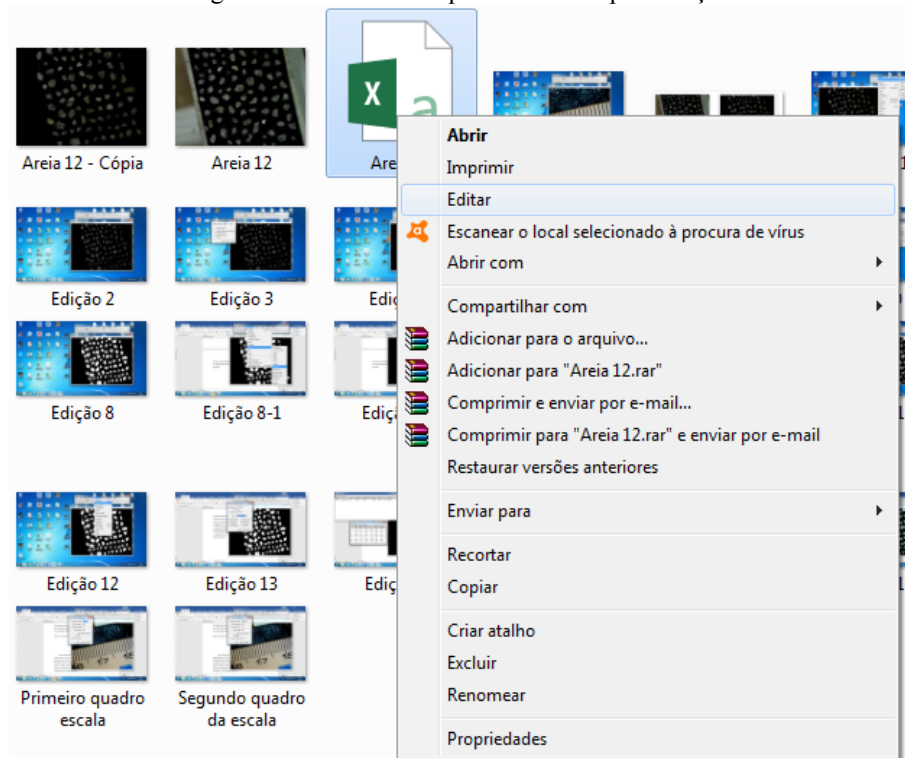
Figura 21: Salvando o arquivo de resultados como .csv



Fonte: Próprio Autor

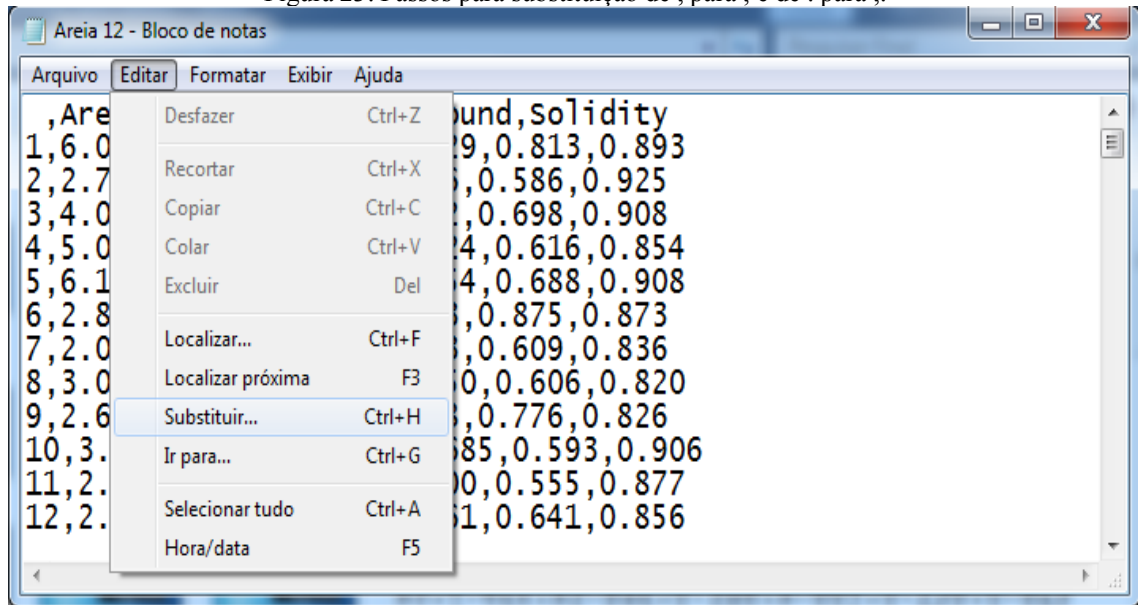
Após salvar abrimos o arquivo em modo edição, que abra em um bloco de notas. Substituímos todas as vírgulas por ponto e vírgula para separar cada item e após isso todos os pontos de separação decimal por vírgula, pois o excel utiliza vírgula como separador de decimais.

Figura 22: Abrindo o arquivo como txt para edição.



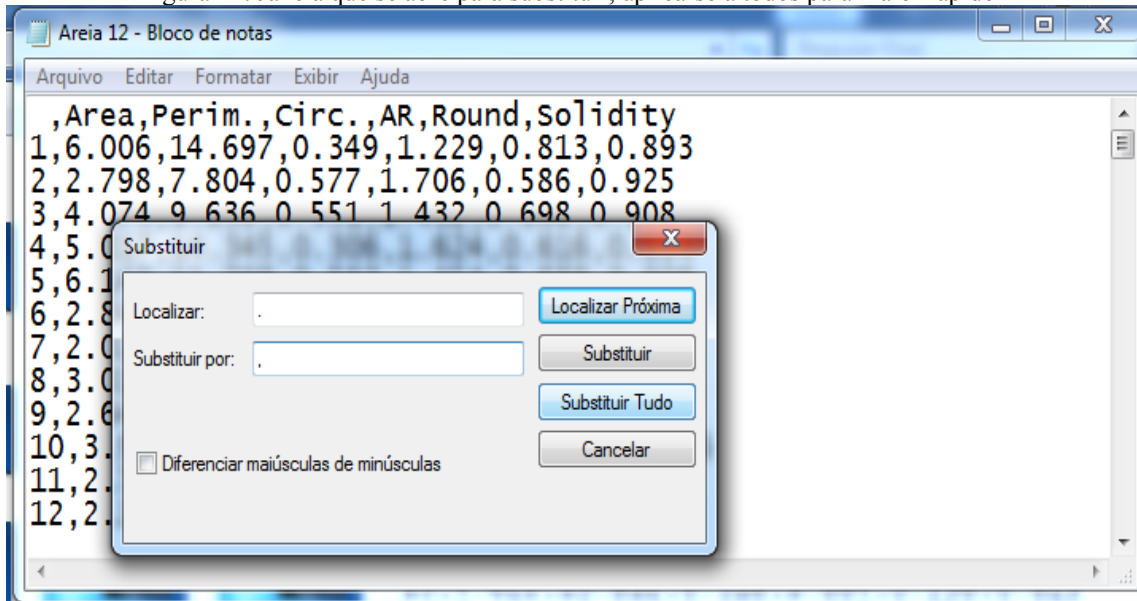
Fonte: Próprio Autor

Figura 23: Passos para substituição de , para ; e de . para ,.



Fonte: Próprio Autor

Figura 24: Janela que se abre para substituir, aplica-se a todos para maior rapidez



Fonte: Próprio Autor

Depois disso salvamos e abrimos o arquivo excel normalmente. Para obter o diâmetro das partículas é só adicionar uma coluna e utilizar a fórmula de área para encontra-lo.

Figura 25: Abertura do arquivo já editado como arquivo Excel.

The image shows an Excel spreadsheet with the following data:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1		Area	Perim,	Circ,	AR	Round	Solidity		
2	1	6,006	14,697	0,349	1,229	0,813	0,893		
3	2	2,798	7,804	0,577	1,706	0,586	0,925		
4	3	4,074	9,636	0,551	1,432	0,698	0,908		
5	4	5,017	14,345	0,306	1,624	0,616	0,854		
6	5	6,14	11,708	0,563	1,454	0,688	0,908		
7	6	2,842	8,606	0,482	1,143	0,875	0,873		
8	7	2,023	7,558	0,445	1,643	0,609	0,836		
9	8	3,011	11,346	0,294	1,65	0,606	0,82		
10	9	2,643	9,144	0,397	1,288	0,776	0,826		
11	10	3,937	10,337	0,463	1,685	0,593	0,906		
12	11	2,745	9,079	0,419	1,8	0,555	0,877		
13	12	2,167	7,981	0,427	1,561	0,641	0,856		
14	13	4,822	13,812	0,318	1,864	0,536	0,829		
15	14	3,401	10,52	0,386	1,325	0,755	0,875		
16	15	4,881	11,392	0,473	1,225	0,817	0,884		
17	16	5,691	16,392	0,266	1,425	0,702	0,854		
18	17	4,3	9,518	0,596	1,296	0,772	0,926		
19	18	7,685	22,986	0,183	2,318	0,431	0,733		
20	19	3,483	9,276	0,509	1,478	0,676	0,89		
21	20	4,128	9,647	0,557	1,575	0,635	0,899		
22	21	6,115	12,803	0,469	1,22	0,82	0,902		
23	22	2,9	10,929	0,305	1,071	0,934	0,789		

Fonte: Próprio Autor