



**PUCRS**

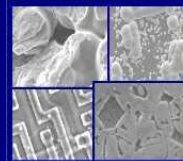
**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E  
TECNOLOGIA DE MATERIAIS**

Faculdade de Engenharia

Faculdade de Física

Faculdade de Química



**PGETEMA**

**DESENVOLVIMENTO DE UMA BANCADA DE TESTE DE DESGASTE  
ABRASIVO PARA BARRAS DE TRILHA DE COLHEITADEIRAS DE  
GRÃO: UM COMPARATIVO DE DESEMPENHO EM AÇOS SAE 1045  
E SAE 1518**

**MARCOS WERNER**

**ENGENHEIRO MECÂNICO**

**DISSERTAÇÃO PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA  
E TECNOLOGIA DE MATERIAIS**

**Porto Alegre**

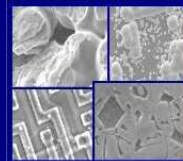
**Janeiro, 2013**



**PUCRS**

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E  
TECNOLOGIA DE MATERIAIS**

Faculdade de Engenharia  
Faculdade de Física  
Faculdade de Química



**PGETEMA**

**DESENVOLVIMENTO DE UMA BANCADA DE TESTE DE DESGASTE  
ABRASIVO PARA BARRAS DE TRILHA DE COLHEITADEIRAS DE  
GRÃO: UM COMPARATIVO DE DESEMPENHO EM AÇOS SAE 1045  
E SAE 1518**

**MARCOS WERNER**

ENGENHEIRO MECÂNICO

ORIENTADOR: Prof. Dr. CARLOS ALEXANDRE DOS SANTOS

CO-ORIENTADOR: Prof. Dra. ELEANI MARIA DA COSTA

Dissertação realizada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais (PGETEMA) da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Tecnologia de Materiais.

**Porto Alegre  
Janeiro, 2013**

*“Um aspecto essencial da  
criatividade é não ter medo de  
fracassar”*

*Dr. .Edwin Land*

## **DEDICATÓRIA**

Primeiramente a Deus por ter iluminado minha vida, e por ter aberto portas em meu caminho para poder realizar meus sonhos e objetivos.

A minha família, a qual me apoiou durante toda de minha vida, principalmente os meus pais, que não pouparam esforços para me apoiar, e sempre me incentivaram a nunca parar de estudar, e em especial a minha noiva, por ainda estar ao meu lado, depois de tantos finais de semana que eu fiquei namorando a dissertação.

A professora Eleani, o meu muitíssimo obrigado por acreditar em mim, e me proporcionar à chance de realizar este sonho em minha vida.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao professor Carlos Alexandre, pela orientação, acompanhamento e companheirismo no desenvolver do projeto, pelas dúvidas respondidas até em seu momento de descanso (intervalinho na entrada da FENG).

A Professora Eleani e Rosane pelo voto de confiança, e por acreditar no meu empenho e dedicação, mesmo que eu trabalhando em tempo integral conseguiria cursar o mestrado.

A CAPES pela bolsa de estudos, e por me propiciar a chance de cursar o mestrado.

A AGCO do Brasil pelo apoio financeiro e por sempre acreditar no desenvolvimento deste estudo, principalmente o grupo do laboratório de testes, em especial a colega Viviane Borin, pelo auxílio e conhecimento nas análises de laboratório.

A MONTEPINO S.A, por ter parado toda a linha de produção para confeccionar especificadamente para mim a amostra de SAE 1518.

Ao engenheiro e agricultor Edemar Zago, por ter cedido a sua colheitadeira como covaia para receber o material alternativo no cilindro de trilha.

A minérios OURO BRANCO, pela doação da sílica em pó utilizada na bancada de testes.

Os meus familiares, pais, irmãos e minha noiva, pelo entendimento, durante o tempo que precisei me ausentar das reuniões de família.

À todos os meus colegas do PGETEMA, em especial á Adriana, Fernanda, Mariani, Jean, Evandro, Gerson, Thalisson, e Antonio, pelos dias de estudo extra que passamos juntos com um mesmo objetivo.

A PUC, pela visão de mundo diferente que dela levarei, e por toda infraestrutura maravilhosa que disponibilizou no desenvolvimento do projeto.

# SUMÁRIO

<b>DEDICATÓRIA</b> .....	<b>4</b>
<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>5</b>
<b>SUMÁRIO</b> .....	<b>6</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>9</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>12</b>
<b>LISTA DE QUADROS</b> .....	<b>13</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>15</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>16</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>17</b>
<b>1.1. Contextualização do Tema</b> .....	<b>17</b>
<b>1.2. Problema</b> .....	<b>20</b>
<b>1.3. Justificativa</b> .....	<b>20</b>
<b>1.4. Estruturação do Estudo</b> .....	<b>22</b>
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	<b>23</b>
<b>2.1. Objetivos Específicos</b> .....	<b>23</b>
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>24</b>
<b>3.1. Aplicações de uma Colheitadeira</b> .....	<b>24</b>
3.1.1. Sistemas de Colheita para Colheitadeiras de Grão .....	<b>26</b>
<b>3.2. Sistema de Trilha de uma Colheitadeira</b> .....	<b>26</b>
3.2.1. Cilindro de Trilha .....	<b>27</b>
<b>3.2.1.1. Barras de Trilha</b> .....	<b>27</b>
3.2.1.2. Côncavo.....	<b>28</b>
<b>3.3. Mecanismos de Desgaste</b> .....	<b>29</b>
3.3.1. Desgaste Abrasivo.....	<b>29</b>
<b>3.3.1.1. Abrasão a Baixas Tensões</b> .....	<b>30</b>
<b>3.3.1.2. Abrasão a Altas Tensões</b> .....	<b>30</b>
<b>3.3.1.3. Gouivadura</b> .....	<b>31</b>
<b>3.3.1.4. Polimento</b> .....	<b>32</b>

3.3.2. Desgaste por adesão.....	32
3.3.3. Desgaste Erosivo.....	33
3.3.4. Desgaste por Corrosão.....	33
3.3.5. Desgaste por Cavitação.....	33
<b>3.4. Ensaio de Desgaste .....</b>	<b>34</b>
3.4.1. Ensaio de Disco de Borracha com Areia .....	34
3.4.2. Ensaio de Erosão de Partículas Sólidas.....	35
3.4.3. Ensaio de Erosão por Cavitação .....	35
3.4.4. Ensaio de Desgaste de Quatro Esferas.....	36
3.4.5. Ensaio de Desgaste Bloco-Disco.....	36
3.4.6. Ensaio de Desgaste Pino-Disco .....	36
<b>3.5. Alguns Materiais Utilizados em Ensaio de Desgaste .....</b>	<b>36</b>
3.5.1. Granalha de Aço.....	37
3.5.2. Sílica em pó .....	38
3.5.3. Aços de Baixo e Médio Carbono utilizado nas Barras de Trilha.....	39
<b>3.6. Fatores que Afetam o Desgaste.....</b>	<b>41</b>
3.6.1. Dureza da Amostra e Tamanho do Abrasivo .....	41
3.6.2. Desgaste e Dureza do Abrasivo .....	43
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>46</b>
<b>4.1. Bancada de Testes.....</b>	<b>46</b>
4.1.1. Modelo Esquemático .....	47
4.1.2. Modo Geral de Funcionamento .....	49
4.1.3. Acionamento .....	50
4.1.4. Côncavo de Atrito .....	51
4.1.5. Cilindro da Bancada .....	52
4.1.5. Fluxo de Matéria .....	52
4.1.6. Regulagem do Espaçamento para o Atrito .....	53
4.1.7. Ensaio Preliminares .....	54
<b>4.2. Materiais Abrasivos.....</b>	<b>54</b>
<b>4.3. Seleção de Materiais .....</b>	<b>56</b>
<b>4.4. Procedimento de Teste e Análise de Desgaste .....</b>	<b>57</b>
4.4.1. Preparação das Amostras.....	57
4.4.2. Análise das Amostras .....	58

<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>60</b>
<b>5.1. Construção e calibração do protótipo .....</b>	<b>60</b>
<b>5.2. Análise de perda de massa .....</b>	<b>65</b>
5.2.1. Abrasivo: Granalha .....	65
5.2.2. Abrasivo: Sílica e granalha .....	68
<b>5.3. Análise de Variações de Dureza Vickers.....</b>	<b>70</b>
<b>5.4. Análise Macroscópica e Microscópica.....</b>	<b>71</b>
5.4.1. Análise das Amostras .....	71
5.4.2. Desgaste e Quebra do abrasivo .....	77
<b>5.5. Análise da Composição Química.....</b>	<b>79</b>
<b>6. CONCLUSÕES.....</b>	<b>81</b>
<b>7. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>82</b>
<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>83</b>



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Comparativo de desgaste em seus diversos modos (ALBERTIN, 2006).	17
Figura 1.2. Cilindro de trilha e côncavo (HÖHER, 2011).	18
Figura 1.3. Gengivas das barras (MONTEPINO, 2011).	19
Figura 1.4. Barras de trilha usadas (O autor).	21
Figura 1.5. Barras de trilha usadas (O autor).	21
Figura 3.1. Vista perspectiva de uma colhedora (AGCO, 2009).	25
Figura 3.2. Vista frontal de uma colheitadeira (AGCO, 2009).	25
Figura 3.3. Sistema de trilha (AGCO, 2009).	26
Figura 3.4. Cilindro de trilha (AGCO, 2009).	27
Figura 3.5. Dimensional da barra de trilha (AGCO, 2009).	28
Figura 3.6. Côncavo do sistema de trilha (AGCO, 2009).	29
Figura 3.7. Representação da abrasão de baixas tensões (RIBEIRO, 2004).	30
Figura 3.8. Representação da abrasão a altas tensões (RIBEIRO, 2004).	31
Figura 3.9. Representação da abrasão por goivagem (RIBEIRO, 2004).	32
Figura 3.10. Ensaio de desgaste com roda de borracha (Adaptado de NAHVI, 2009).	35
Figura 3.11. Granalha de aço angular (SINATORA, 2009).	38
Figura 3.12. Comparação da taxa de desgaste nos materiais com três tipos de abrasivos (SANTANA, 2012).	38
Figura 3.13. Taxa de desgaste (g/g) dos materiais utilizando vidro moído como material abrasivo nos ensaios (AGUDELO, 2011).	40
Figura 3.14. Variação da resistência ao desgaste relativa com a dureza de engenharia (PINTAÚDE, 2002).	42

Figura 3.15. Variação da resistência ao desgaste relativa ( $F_e=1$ ) com a dureza dos materiais. Abrasivo:vidro (RICHARDSON, 1968). .....	42
Figura 3.16. Rotação em relação ao desgaste (POORYA, 2011).....	44
Figura 3.17. Abrasivo no início e final do ensaio (SINATORA, 2009).....	45
Figura 4.1. Vista lateral e frontal da bancada de testes desenvolvida para a análise de desgaste.....	47
Figura 4.2. Vista frontal em corte do sistema funcional da bancada de testes. ....	48
Figura 4.3. Vista do interior do tambor de encapsulamento, com o fechamento esquerdo aberto. ....	49
Figura 4.4. Acionamento da Bancada de testes: Motor com redutor(2), caixa redutora(1), e motor de acionamento da trilha(3). ....	50
Figura 4.5. Vista com o tambor suprimido ilustrando o côncavo estático da bancada de testes.....	51
Figura 4.6. Barras em materiais diferentes no cilindro de trilha da bancada. ....	52
Figura 4.7. Regulagem do espaçamento de atrito da bancada (AGCO, 2012). ....	54
Figura 4.8. Material abrasivo que passa pelo cilindro de trilha (AGCO, 2010).....	56
Figura 4.9. Fluxograma da metodologia utilizada. ....	59
Figura 5.1. Bancada de testes de desgaste desenvolvida.....	60
Figura 5.2. Vedação com cola silicone. ....	61
Figura 5.3. Vigia do tambor de encapsulamento.....	62
Figura 5.4. Amostras após os testes com sílica.....	62
Figura 5.5. Fuga do abrasivo externo a bancada. ....	63
Figura 5.6. Janela de acrílico na lateral do tambor da bancada de testes .....	63
Figura 5.7. Motores de acionamento da bancada de testes. ....	64
Figura 5.8. Perda de massa do aço SAE 1045. ....	66

Figura 5.9. Perda de massa do aço SAE 1518. ....	66
Figura 5.10. Análise de perda de massa média para os aços SAE 1045 e SAE 1518.	67
Figura 5.11. Perda de massa SAE 1045 utilizando sílica como abrasivo. ....	69
Figura 5.12. Perda de massa SAE 1518 utilizando sílica como abrasivo. ....	69
Figura 5.13. Comparativo SAE 1045, com o SAE 1518. ....	70
Figura 5.14. Diferença de coloração (desgaste com granalha). ....	72
Figura 5.15. Diferença de coloração (desgaste com granalha e sílica). ....	73
Figura 5.16. MO centro das amostras, Ataque, Nital, 50X. ....	73
Figura 5.17. MO da seção transversal das amostras, Ataque, Nital, 200X. ....	74
Figura 5.18. MO da seção transversal das amostras, Ataque, Nital, 200x. ....	75
Figura 5.19. MEV das amostras que desgastaram com granalha 100x. ....	76
Figura 5.20. Imagem de MEV da Amostra SAE 1045 que desgastaram com granalha e SiO <sub>2</sub> , 100x. ....	76
Figura 5.21. Imagem de MEV da face da mostra SAE 1045 que desgastaram com granalha e SiO <sub>2</sub> , 24x. ....	77
Figura 5.22. Imagem do MEV da granalha de aço. ....	78
Figura 5.23. Imagem do MEV da sílica antes do ensaio de desgaste, 200x. ....	79

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Composição química típica (% em peso) de um aço SAE 1045 (CASSOLA, 2005). .....	39
Tabela 3.2. Composição química (% em peso) do aço SAE 1518 (LONGHAI, 2011).41	
Tabela 4.1. Fluxo do redimensionamento. ....	53
Tabela 4.2. Composição (% em peso) da granalha de aço G12/G18 (ABNT 2010).56	
Tabela 4.3. Composição (% em peso) da Sílica (MOB, 2012). ....	56
Tabela 5.1. Massa das amostras utilizando granalha como abrasivo.....	65
Tabela 5.2. Massa das amostras utilizando granalha e sílica como abrasivo. ....	68
Tabela 5.3. Dureza Vickers das amostras antes e após o desgaste. ....	70
Tabela 5.4. Dureza dos abrasivos. ....	71
Tabela 5.5. Composição química do SAE 1045.....	80
Tabela 5.6. Composição química do SAE 1518.....	80

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 4.1. Relação de itens da bancada de teste de desgaste. ....	48
--	----

## LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES

AISI	Instituto Americano do Aço e Ferro (Adaptação ao Português)
ASTM	Sociedade Americana de Testes de Materiais (Adaptação ao Português)
CV	Cavalo a vapor
g	Gramas
GPS	Sistema de posicionamento global (Adaptação ao Português)
HV	Dureza VICKERS
Hz	Hertz
L	Largura de plataforma
kg	Kilograma
kg/s	Kilograma por segundo
kg/min	Kilograma por minuto
km/h	Kilômetro por hora
mm	Milímetros
mesh	Tamanho de abertura de peneira
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MO	Microscopia Óptica
MOG	Material, exceto grão ( <i>Material other grain</i> )
Pi	Peso inicial
Qg	Fluxo de material
RPM	Rotação por minuto
SAE	Sociedade de Engenheiros Automotivos (Adaptação ao Português)
Uc	Unidade de comprimento
V	Velocidade

## RESUMO

WERNER, Marcos. **Desenvolvimento de uma Bancada de Teste de Desgaste Abrasivo para Barras de Trilha de Colheitadeiras de Grão: Um Comparativo de Desempenho em Aços SAE 1045 e SAE 1518**. Porto Alegre. 2013. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL.

O presente trabalho tem como objetivo desenvolver um estudo de desgaste abrasivo de um componente específico de uma colheitadeira de grãos, no caso as barras da unidade de trilha da colhedora. Para este estudo foi projetada e construída uma bancada de testes para utilização de dois tipos de materiais, um aço ABNT/SAE 1045 e um aço ABNT/SAE 1518, submetidos ao desgaste forçado de abrasivos que simulem o tamanho e condição mais próxima de um grão em ritmo acelerado. Esta bancada por sua vez foi constituída de peças utilizadas em sistemas de trilha de colheitadeiras, a fim de tornar o teste o mais próximo do real. A condição geral do abrasivo foi comparada com a literatura, a fim de se obter melhores dados em relação ao desgaste nessa condição. A análise de dados posterior teve a finalidade de caracterizar melhor este desgaste, onde foi possível perceber que o aço de médio carbono (SAE 1045) teve um desempenho inicial bom em relação ao desgaste, no entanto a liga com manganês (SAE 1518) apresentou uma resistência ao final dos ensaios melhor quando comparada ao SAE 1045. Por fim nos testes executados, foi realizada a validação da bancada, e a caracterização do desgaste em relação aos abrasivos onde foi possível perceber o aumento do desgaste das amostras quando se realizava a adição de SiO<sub>2</sub> no abrasivo para simular a casca do arroz.

Palavras-Chaves: Desgaste abrasivo, aços ABNT/SAE 1045 e 1518, barras de trilha, colheitadeiras.

## ABSTRACT

WERNER, Marcos. **Development of a Test Bench for Abrasive Wear at Threshing Bars in Grain Harvesters: A Comparative Performance Steels SAE 1045 and SAE 1518.** Porto Alegre. 2013. Master thesis. Graduation Program in Materials Engineering and Technology, PONTIFICAL CATHOLIC UNIVERSITY OF RIO GRANDE DO SUL.

The objective of the present work is to develop a study of abrasive wear a specific component of a grain harvester, the bars of unit threshing the combines. For this study it was designed and built a test bench that simulates two types of materials, an ABNT/SAE 1045 steel and an ABNT/SAE 1518 steel underwent a forced to wear an abrasive that simulates the size and condition of a grain at a accelerated rate. This bench is in turn composed of parts used in systems threshing on harvesters in order to bring the test closer to the real. The general condition of the abrasive was compared with the literature in order to obtain better data with respect to wear on the condition. After the wear test was designed to better characterize this wear, where it is noted that medium carbon steel (SAE 1045) had a good initial performance with respect to wear, however the material with manganese (SAE 1518) showed a better resistance at the end of the tests when compared to SAE 1045. Finally, the tests was conducted to validate the bench, and characterization of abrasive wear in relation to which it was possible to sense the increased wear of the samples was performed when adding the SiO<sub>2</sub> abrasive to simulate rice hull.

Key Words: Abrasive wear, ABNT/SAE 1045 e 1518 steels, threshing bars, combines.



# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Contextualização do Tema

O avanço da mecanização agrícola vem evoluindo gradativamente nos últimos anos, tornando perceptível o incremento de uma bagagem tecnológica principalmente em colhedoras de grãos. No entanto este avanço tecnológico pouco se aplica à área de materiais, onde se tem uma vasta aplicação dos mais variados tipos, tamanhos e composições de peças e componentes. Estas aplicações variam desde estruturais até funcionais. Dentre as funcionais, o desgaste aparece como o principal problema para os materiais, principalmente o desgaste abrasivo, que pouco se conhece sobre o mesmo para a aplicação em máquinas agrícolas.

Para Albertin (2006), o desgaste abrasivo é o mais prejudicial dentre os demais, como pode ser visto na Figura 1.1, respondendo pela metade dos tipos de desgastes existentes.

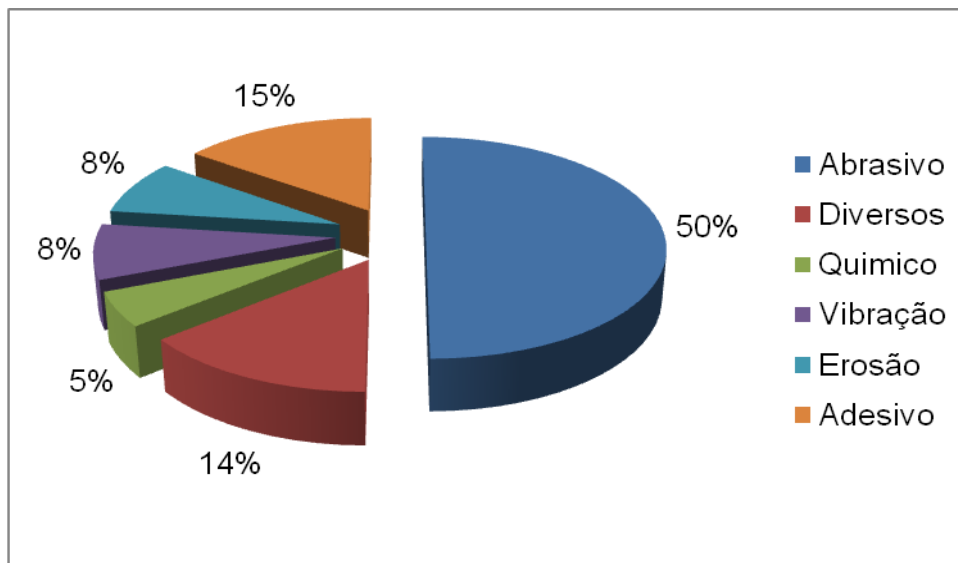


Figura 1.1. Comparativo de desgaste em seus diversos modos (ALBERTIN, 2006).

Para Stachowiak (2001), o desgaste em máquinas agrícolas causado por partículas abrasivas é um grande problema industrial, e um completo entendimento, dos efeitos e das variáveis do sistema, é necessário para entender as medidas necessárias no projeto de máquinas.

Desde a década de 1930, as colheitadeiras apresentam um cilindro em sua parte industrial (que trabalha com as plantas (item 1 da Figura 1.2)) para efetuar a separação do grão para com a planta das culturas passíveis de serem colhidas desta maneira (processo este denominado “trilha”). Este cilindro por sua vez é composto por barras em suas extremidades (item 2 da Figura 1.2) que estão em direto atrito e contato com o grão, e demais detritos contidos na palhada (grão e a planta). Juntamente com este cilindro, a colheitadeira possui uma grelha, denominada “côncavo”, que se trata de um separador primário de grãos (Item 3 da Figura 1.2). Após este sistema denominado trilha, a máquina possui diversos mecanismos que continuam a otimização do processo, como sistema de separação, transporte e armazenamento da cultura (HÖHER, 2011).

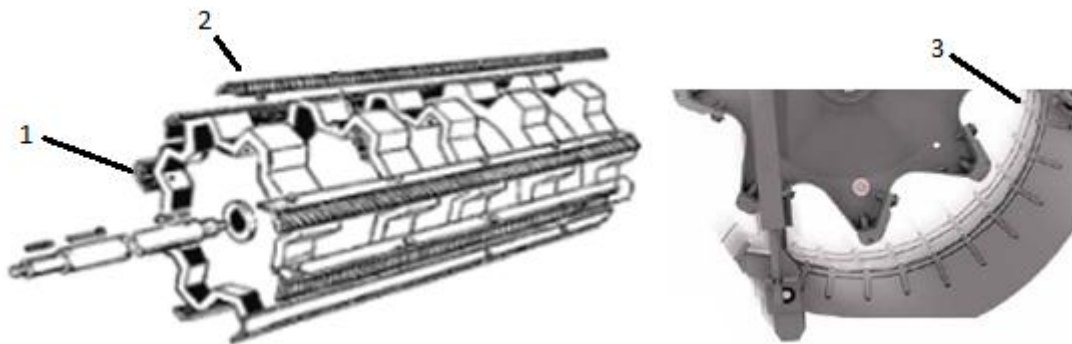


Figura 1.2. Cilindro de trilha e côncavo (HÖHER, 2011).

Estes cilindros de trilha, ou mais especificadamente as barras de sua extremidade, possuem uma vida útil limitada devido ao movimento rotacional de atrito sob o côncavo, que varia de acordo com o uso do equipamento, ou seja, de quantas horas de trilha a colheitadeira efetuará. Dependendo disto, estas barras apresentarão um desgaste em suas gengivas demonstrado na Figura 1.2 (possuem esta geometria específica para fazer a abertura do invólucro dos grãos, em sua grande maioria, denominada “abertura da vagem”). Este desgaste por sua vez, não permitirá que continue sendo efetuada a trilha sem a manutenção/troca destas

barras, pois existe uma dificuldade em sua substituição por se encontrarem enclausuradas no interior da colheitadeira.



Figura 1.3. Gengivas das barras (MONTEPINO, 2011).

No que diz respeito ao impacto econômico, o item não tem uma processabilidade com preço elevado, porém o custo da peça final no cliente acaba tornando o item caro de efetuar a troca/manutenção, até pelo fato de o cilindro de trilha possuir oito barras em sua periferia, o que acaba multiplicando por um fator maior o custo final para a troca das mesmas. Esse fator pode aumentar muito mais, caso o cliente seja um frotista, por exemplo, se ele tiver 10 máquinas em sua frota, com 8 barras cada máquina, acabará tendo que trocar 80 barras de trilha, e se cada barra tiver o custo unitário de R\$ 300,00, o frotista terá um gasto equivalente a R\$ 24 mil reais a cada um ano e meio.

Como citado anteriormente, este desgaste normalmente é causado pelo contato direto do grão e da planta no côncavo prensados pelas gengivas das barras de trilha, onde se tem pouco conhecimento sobre o desgaste desta interação. Para Goneli et. al.(2005), o conhecimento das propriedades físicas dos produtos agrícolas não tem uso restrito à engenharia, podendo as informações ser de grande utilidade em outros ramos da ciência ou tecnologia relacionada com o comportamento físico e processamento de frutos e vegetais, de um modo geral.

As principais aplicações desses conhecimentos se destinam ao dimensionamento adequado de máquinas utilizadas no processamento e melhor

caracterização do produto. Outros fatores que podem aumentar o desgaste são o enrijecimento das vagens, e a sua dificuldade de colheita, citado por Shanowski (2011), fato esse ocorrido pelo aumento da aplicação de defensivos agrícolas, cujo uso vem aumentando cada dia mais desde o início do cultivo de plantas geneticamente modificadas.

## **1.2. Problema**

Este desgaste apresentado pelas barras do cilindro é frequente, no entanto também é de certa forma aceitável pelo comprador do equipamento, por não haver alternativa para este caso, sendo que todos os fabricantes de colheitadeiras utilizam destas barras, apresentando o mesmo desgaste.

Considerando o uso normal de uma colheitadeira de em média 400h/ano, a partir de 600h (aproximadamente um ano e meio), as barras do cilindro começam a apresentar desgaste muito perceptível, tornando mais difícil a trilha de uma colheitadeira, tendo que assim tomar providências funcionais para poder continuar o uso do equipamento de maneira provisória até a troca destas barras. As providências funcionais para continuar o uso do equipamento nada mais são que tornar a trilha mais agressiva, por meio do aumento da rotação do cilindro e/ou; reduzir o espaçamento entre cilindro e côncavo. No entanto, o fato de tornar a trilha mais agressiva, impacta em vários aspectos negativos relativos à colheita, como por exemplo, quebra de grãos e perda de grãos não trilhados em função da velocidade, dependendo do mecanismo de separação.

## **1.3. Justificativa**

O cilindro de trilha com barras dentadas vem sendo usado desde o início da mecanização agrícola, e mesmo com a evolução dos sistemas de colheita as barras dentadas não perderam sua função no sistema. Então, para estudar melhor o desgaste das mesmas, foram recolhidas em campo algumas barras já sem uso funcional devido ao desgaste (Figura 1.4 e 1.5), e a partir de uma análise criteriosa,

foi definido um material alternativo com custo similar, e um plano de validação para testar este material em laboratório.



Figura 1.4. Barras de trilha usadas (O autor).



Figura 1.5. Barras de trilha usadas (O autor).

#### **1.4. Estruturação do Estudo**

No presente estudo será apresentado inicialmente no Capítulo 2 os principais objetivos, e no Capítulo 3 será apresentada a fundamentação teórica do produto colheitadeira. Serão abordados também os mecanismos de desgaste e tipos de ensaios de desgaste e uma conceitualização dos materiais usados. No capítulo 4 será apresentado o projeto da bancada de testes, bem como o dimensionamento da mesma e de seus componentes e o seu modo de funcionamento. Como finalização do capítulo 4 serão apresentadas as características específicas dos materiais usados, bem como o embasamento de suas quantidades. No capítulo 5 serão apresentados os resultados das análises após os testes de bancada, bem como a sua discussão com base nos resultados encontrados comparados com os fatores que afetam o desgaste citados na literatura. Finalizando o trabalho, o capítulo 6 apresenta as conclusões e o capítulo 7 algumas sugestões para trabalhos futuros.

## **2. OBJETIVOS**

O presente estudo tem por objetivo projetar e construir uma bancada de testes de desgaste que permita executar uma análise comparativa entre dois materiais diferentes, simulando o mais próximo do real o funcionamento do cilindro de trilha de uma colheitadeira de grãos. A partir deste dispositivo, estudar o desgaste apresentado pelas barras do cilindro em contato com material abrasivo, de forma que represente de alguma maneira o material que entra para ser processado no sistema industrial da colheitadeira.

### **2.1. Objetivos Específicos**

- Projetar e construir uma bancada de testes para estudar e comparar o desgaste de dois tipos de materiais (SAE 1045 e SAE 1518) sob as mesmas condições;
- Executar ensaios para calibrar a bancada e poder roteirizar um procedimento de teste para a mesma;
- Estudar as variações e comportamentos que os dois materiais tiveram durante o ensaio de desgaste;
- Estudar a presença do manganês em substituição ao carbono como componente para melhorar a resistência ao desgaste abrasivo;
- Estudar o desgaste dos materiais na presença de sílica como abrasivo secundário, simulando a sílica contida na casca do arroz, e a granalha simulando o grão;
- Analisar o comportamento dos abrasivos (granalha de aço e sílica), e as propriedades dos mesmos que possam afetar o desgaste.

### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Neste capítulo são abordados os fenômenos de desgaste dos materiais e ensaios de desgaste, onde serão apresentados os tipos mais importantes dando ênfase ao desgaste abrasivo que é um dos pilares do trabalho, e ao ensaio de desgaste da roda de borracha que foi utilizado como base de elaboração da bancada de testes.

É apresentada também uma breve fundamentação teórica do produto colheitadeira e seus diferentes sistemas, focando principalmente o sistema de trilha que é o alvo deste estudo.

Por último será abordado os materiais que serão testados na bancada de testes desenvolvida, bem como a razão de sua escolha, e os fatores que afetam esse tipo de desgaste.

#### **3.1. Aplicações de uma Colheitadeira**

As máquinas colheitadeiras (Figuras 3.1 e 3.2) são ferramentas básicas para qualquer produtor rural de pequeno, médio e de grande porte de produção para executar a função de colheita para determinadas culturas passíveis de serem colhidas e processadas em nível de corte e separação com este tipo de equipamento. Segundo AGCO (apud ANFAVEA, 2008), hoje as colheitadeiras são responsáveis pela colheita de aproximadamente 85% da produção mundial de grãos, sendo máquinas dotadas de alta tecnologia, guiadas ou não por sistema GPS (Global Position System) e com computadores de bordo capazes de determinar a qualidade do grão colhido, além de demarcar as áreas onde a cultura é mais bem desenvolvida.





Figura 3.1. Vista perspectiva de uma colhedora (AGCO, 2009).



Figura 3.2. Vista frontal de uma colheitadeira (AGCO, 2009).

### 3.1.1. Sistemas de Colheita para Colheitadeiras de Grão

Os três sistemas que abrangem quase que a totalidade da produção de colheitadeiras são o sistema Convencional, sistema Axial Longitudinal e o sistema Híbrido. O número de máquinas convencionais no mercado ainda é maior, mas a produção de máquinas axiais vem despontando a cada dia e superará o número de máquinas convencionais em breve. Já as máquinas híbridas, por utilizarem uma nova tecnologia, não podem ser comparadas quanto à superação dos números de convencionais e axiais, mas tudo indica que terão uma ótima aceitação no mercado (HÖHER, 2011). Vale ressaltar que todos os sistemas de colheita apresentam barras de trilha em seu sistema funcional

### 3.2. Sistema de Trilha de uma Colheitadeira

Em se tratando de sistema de trilha, a colheitadeira possui em seu sistema industrial um cilindro de trilha (dinâmico, item 1) e um côncavo (estático, item 2), localizados logo após a plataforma de corte e sistema de transporte, como exemplificado na Figura 3.3.

O sistema de trilha é onde os grãos começam a ser separados dos demais materiais, MOG, que fazem parte da planta. A partir deste ponto uma perfeita regulagem da máquina define quanto de perda existirá na lavoura ou a qualidade que os grãos terão (HÖHER, 2011).

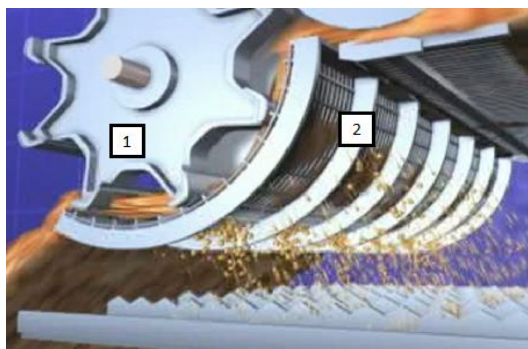


Figura 3.3. Sistema de trilha (AGCO, 2009).

### 3.2.1. Cilindro de Trilha

O cilindro de trilha (Figura 3.4) já vem sendo usado há décadas em dispositivos de colheita não somente de grãos, mas como de outras culturas. Basicamente, este é constituído de suportes centrais (denominados margaridas), um eixo de transmissão, e de barras de aço (barras de trilha) em sua extremidade.

A rotação do cilindro varia entre 150 e 1800 RPM, mas a gama de rotações aplicadas está entre 200 e 1200 RPM. Esta variação está diretamente relacionada com a capacidade de trilha do material. Quanto mais fácil de ser trilhado o material, menor é a rotação necessária para trilhá-lo.

Para Höher (2011), o cilindro pode ser construído de maneiras distintas dependendo da aplicação a que se destina. O cilindro de barras que está presente na maioria das colheitadeiras, e é utilizado para as lavouras de grão, possui barras estriadas paralelas, que facilitam a separação dos grãos e das vagens.

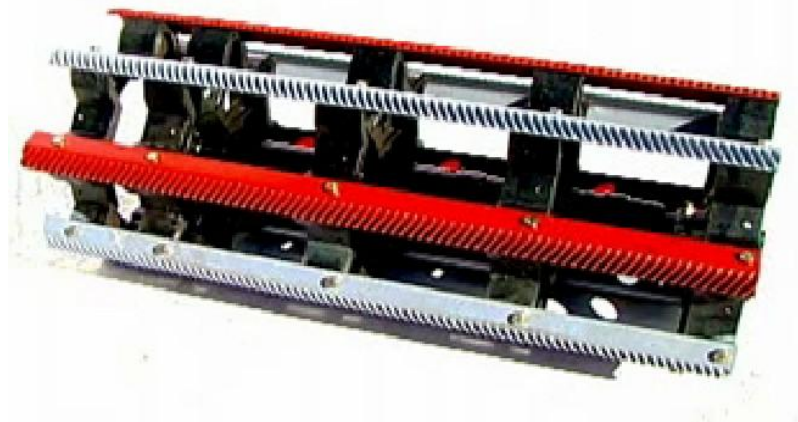


Figura 3.4. Cilindro de trilha (AGCO, 2009).

#### 3.2.1.1. Barras de Trilha

As barras de trilha são basicamente um tarugo laminado e forjado, composto por gengivas que facilitam a separação das vagens (Figura 1.1), e é o desgaste destas gengivas que são o objeto deste estudo. Na figura 3.5 é apresentado o dimensional transversal da barra de trilha.

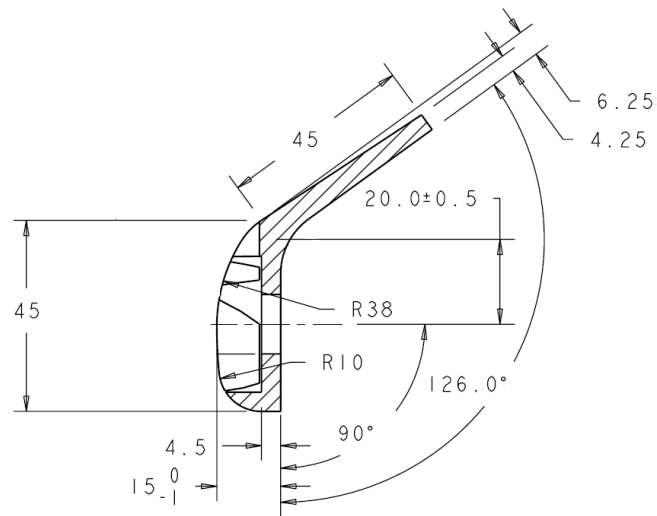


Figura 3.5. Dimensional da barra de trilha (AGCO, 2009).

### 3.2.1.2. Côncavo

Basicamente o côncavo é o elemento filtrante do sistema de trilha, se trata de um separador grão/palha, onde a mesma se atrita com o cilindro de trilha. Para este estudo será desconsiderado o seu desgaste, pois este elemento é fixo (estático), ao contrário do cilindro de trilha que trabalha de forma dinâmica.

O côncavo é um conjunto de barras planas onde são fixadas perpendicularmente barras circulares ou arames (Figura 3.6) que podem variar de 3 a 6 mm de diâmetro. O espaçamento e o diâmetro das barras circulares são determinados pelo tamanho do grão que será colhido. Esta variação pode ser exemplificada na colheita do trigo, que por ser um grão onde a casca é muito resistente e o tamanho do grão é pequeno, é necessária a utilização de um côncavo com arames finos e com o espaçamento menor com relação ao côncavo utilizado para as demais lavouras (HÖHER, 2011).

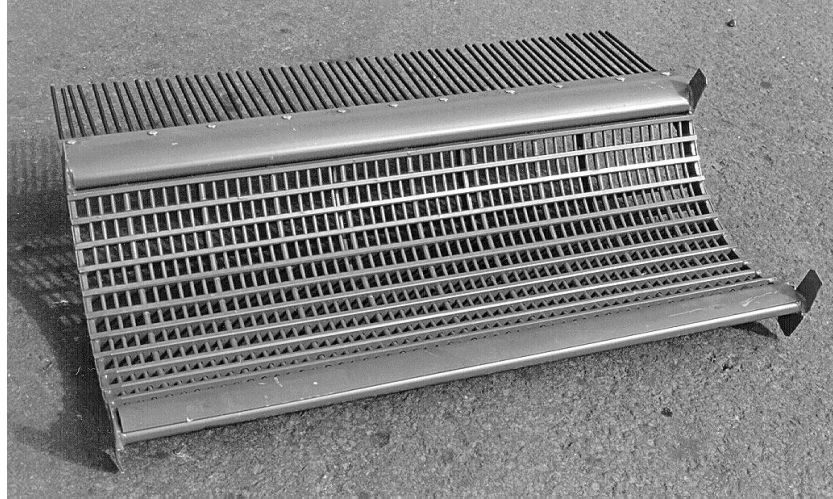


Figura 3.6. Côncavo do sistema de trilha (AGCO, 2009).

### **3.3. Mecanismos de Desgaste**

O desgaste é um dano em uma superfície sólida, usualmente com perda progressiva de material, envolvendo o movimento relativo entre aquela superfície e alguma substância contatante (MORAES, 2008). Já a ASTM G40-01 (ASTM, 2001) define desgaste abrasivo como “a perda de massa resultante da interação entre as partículas ou asperezas duras que são forçadas contra a superfície, ao longo da qual se movem”.

As formas de desgastes mais comuns são o desgaste abrasivo, desgaste adesivo, desgaste erosivo, desgaste corrosivo e a cavitação (BUCKLEY, 1981).

#### **3.3.1. Desgaste Abrasivo**

O desgaste abrasivo é causado por partículas abrasivas aderidas ao material ou presentes entre duas superfícies. A proporção do desgaste depende muito de

aspectos como tamanho, dureza, pressão de contato e velocidade das partículas (BAYER, 2004).

O desgaste abrasivo é subdividido em quatro tipos, a seguir descritos.

### 3.3.1.1. Abrasão a Baixas Tensões

Esta modalidade de abrasão apresenta-se com a superfície ranhurada, sendo que as forças devem ser baixas o suficiente para não causarem trituração do abrasivo (MORAES, 2008). Exemplos: Partículas deslizando em um transportador tipo calha (Figura 3.7), peças que deslizam em sistemas de eixos ou guias, aragem de solo arenoso, corte de materiais que possuem substâncias abrasivas, etc.

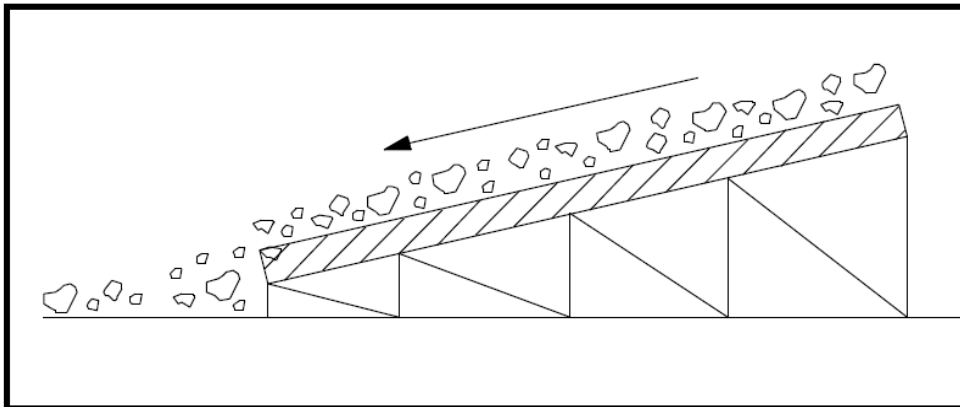


Figura 3.7. Representação da abrasão de baixas tensões (RIBEIRO, 2004).

### 3.3.1.2. Abrasão a Altas Tensões

Neste caso, a resistência à compressão da superfície deve ser maior que aquela do abrasivo. Para o mesmo ocorre à deformação plástica, e ranhuras profundas na direção do movimento, ocasionando o esmagamento do abrasivo ou não (RIBEIRO, 2004). Exemplos: Fresamento de minerais (Figura 3.8),

equipamentos de movimentação de terra, uso de implementos agrícolas em solos duros, etc.

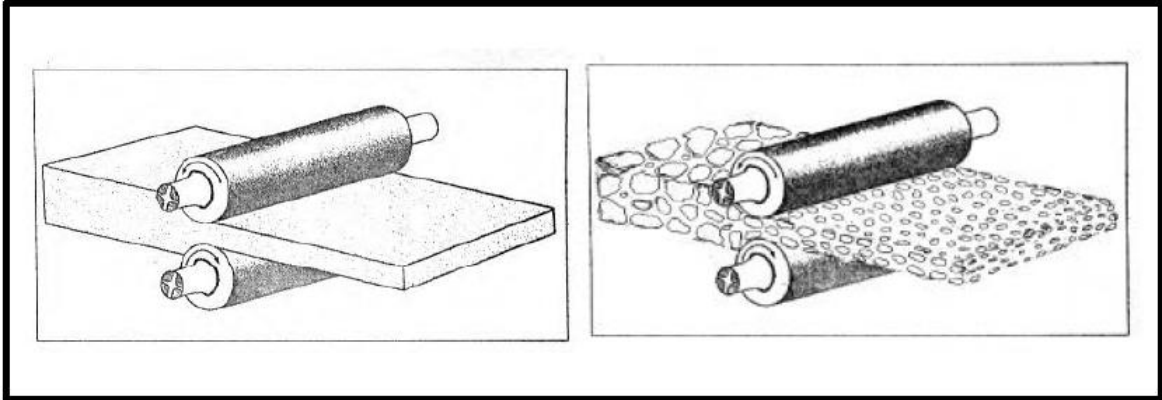


Figura 3.8. Representação da abrasão a altas tensões (RIBEIRO, 2004).

### 3.3.1.3. Gouivadura

Para Ribeiro (2004), este tipo de desgaste ocorre quando partículas abrasivas grosseiras e de grandes dimensões, principalmente dotadas de regiões pontiagudas cortantes com dureza maior do que a parte metálica que está sendo desgastada é impactada com pressões mais ou menos violentas e repetitivas contra o componente (Figura 3.9), causando o corte da superfície desgastada pelo abrasivo, produzindo grandes sulcos e ranhuras visíveis a olho nú. Exemplos: componentes de moedores giratórios, moinhos de rolos, equipamentos agrícolas em solos rochosos, etc.

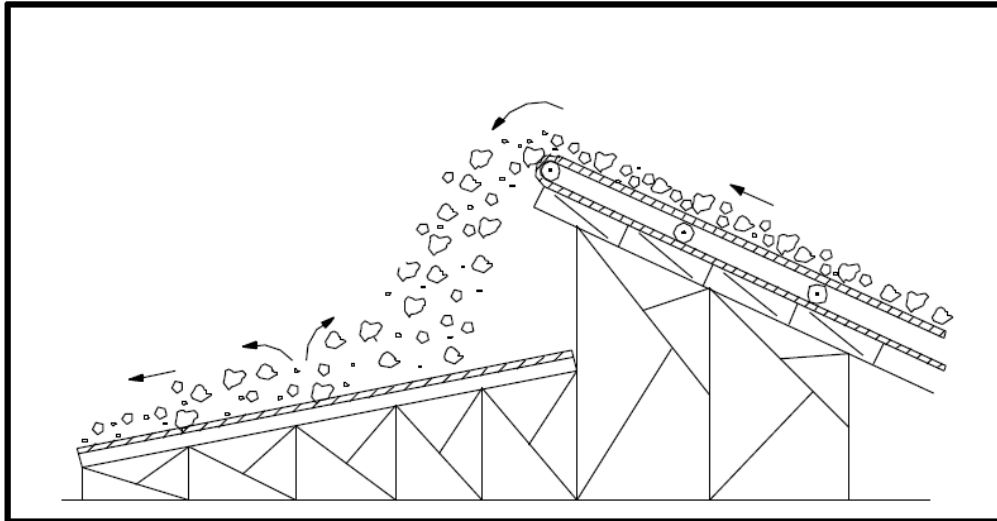


Figura 3.9. Representação da abrasão por goivagem (RIBEIRO, 2004).

#### 3.3.1.4. Polimento

O material é removido por ação de esfregamento, sem a evidência visual de ranhuras, fratura ou deformação plástica. A superfície apresenta-se lisa e brilhante, mas pode perder sua função e ter mudanças dimensionais (MORAES, 2008). Os mecanismos envolveriam a remoção de micro-cavacos para abrasivos maiores que três micrômetros. Exemplos: Equipamentos para retificação de lentes, exaustores de partículas finas, corrimões de escada, etc.

#### 3.3.2. Desgaste por adesão

Na maioria dos casos o desgaste por adesão acontece quando um sólido irá aderir ao entrar em contato com outro sólido. A adesão entre dois objetos casualmente colocados juntos não é observada porque há uma interação entre as camadas contaminantes de oxigênio, água e óleo, que estão geralmente presentes (STACHOWIAK, 2005).



### **3.3.3. Desgaste Erosivo**

No desgaste erosivo, as partículas não são pressionadas contra a superfície como no desgaste abrasivo, mas sofrem choque mecânico contra as superfícies. Os principais parâmetros deste fenômeno são o ângulo de incidência da partícula na superfície do material, a velocidade da partícula, o tamanho da partícula e a dureza da superfície (BAYER, 2004).

### **3.3.4. Desgaste por Corrosão**

O desgaste corrosivo acontece quando a superfície do material reage com o meio em que se encontra. O meio pode ser o oxigênio do ar, gás, lubrificante, líquido ou até mesmo outro material sólido (BUCKLEY, 1981).

O primeiro fator que determinará a magnitude da oxidação será o grau de interação entre a superfície e o meio. Parâmetros como composição, reatividade do óxido com o meio, espessura, porosidade e fragilidade do óxido irão determinar as características do processo de corrosão (BUCKLEY, 1981).

### **3.3.5. Desgaste por Cavitação**

Máquinas que trabalham com fluidos, se mal ajustadas, acabam sendo degradadas pelo processo de cavitação. Pontos de baixa pressão podem vaporizar o líquido, que leva as bolhas até um ponto de pressão mais elevada, aonde ocorre a condensação das bolhas e o colapso destas com a superfície do material, ocasionando a remoção de material nas regiões (TORREIRA, 2002).

Mesmo que a cavitação tenha um processo similar ao desgaste erosivo, existem algumas diferenças significativas. A cavitação é um processo muito mais leve do que o processo erosivo. Um desgaste por cavitação acontece com o efeito de milhões de partículas, enquanto no processo de erosão algumas centenas de partículas já são suficientes para provocar o desgaste (STACHOWIAK, 2005).

### **3.4. Ensaios de Desgaste**

Os ensaios de desgaste se dividem em dois grupos. O primeiro grupo são os testes fenomenológicos que focam em alguma situação particular de desgaste como erosão, abrasão ou oxidação. O segundo grupo são os testes operacionais, que focam mais na aplicação do dispositivo como um todo, como por exemplo, a análise de durabilidade de uma caixa de câmbio (BAYER, 2004). Por se tratar de uma particularidade de desgaste abrasivo, o teste da bancada proposto neste trabalho é baseado na divisão fenomenológica, em um dos ensaios descritos a seguir.

#### **3.4.1. Ensaio de Disco de Borracha com Areia**

Consiste em um teste para determinar o desgaste abrasivo com baixo estresse. Um disco de borracha gira sobre a superfície em análise com baixa força de atuação, enquanto a superfície de contato é exposta a material arenoso, conforme ilustração da Figura 3.10. A ASTM normatizou este ensaio como ASTM G65 (ASTM G65, 2010) com uso de areia seca e ASTM G105 (ASTM G105, 2010) com uso de areia molhada, e nestas normas pode-se encontrar os parâmetros para a execução deste (BAYER, 2004).

O teste do disco de borracha tem sido empregado para examinar o comportamento à abrasão de uma vasta gama de materiais. Em muitos testes, o mesmo é usado simplesmente para proporcionar um quantitativo *ranking* da resistência à abrasão de diferentes materiais (NAHVI et.al., 2009).

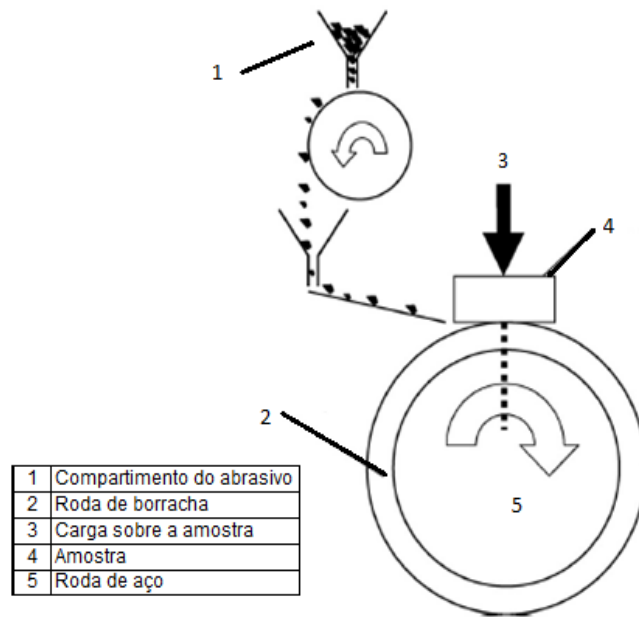


Figura 3.10. Ensaio de desgaste com roda de borracha (Adaptado de NAHVI, 2009).

O teste da roda de borracha será usado como base da elaboração da bancada, unindo o conceito do teste a uma condição de operação da unidade de trilha de uma colheitadeira.

### 3.4.2. Ensaio de Erosão de Partículas Sólidas

Encontrada na literatura como ASTM G76 (ASTM G76, 2010), este teste consiste na projeção de partículas sólidas contra uma superfície usando jatos de ar comprimido. Exemplo típico da aplicação da norma seria a simulação de uma superfície sendo atacada pela areia soprada pelo vento. A perda de massa é utilizada para determinar a quantidade de desgaste.

### 3.4.3. Ensaio de Erosão por Cavitação

Este teste foi desenvolvido para simular o colapso das bolhas dos líquidos em alta pressão contra as paredes de sistemas hidráulicos, e tem sido usado com

eficácia em testes de turbinas, bombas e tubos e na seleção de materiais com maior resistência a este tipo de desgaste (BAYER, 2004). A norma ASTM G32 (ASTM G32, 2010) pode ser usada para conduzir este teste.

#### **3.4.4. Ensaio de Desgaste de Quatro Esferas**

O teste de desgaste com esferas segue os procedimentos estabelecidos na norma ASTM D4172(2010). Este teste tem o objetivo de determinar as propriedades dos fluídos lubrificantes em superfícies que deslizam em determinadas condições.

#### **3.4.5. Ensaio de Desgaste Bloco-Disco**

Esta técnica de ensaio é aplicada para determinar o desgaste provocado pelo deslizamento de contatos lineares. É um teste bastante flexível, pois pode utilizar qualquer tipo de material, lubrificante, atmosfera e variáveis de processo. A norma ASTM G77 (ASTM G77, 2010) procedimenta este teste.

#### **3.4.6. Ensaio de Desgaste Pino-Disco**

Esta técnica de ensaio é aplicada para determinar o desgaste provocado pelo deslizamento de contatos com áreas reduzidas. A máquina ou dispositivo de teste consiste em rotacionar o disco ou fazer movimentos circulares com o pino para que haja um movimento discordante entre o pino e o disco. O resultado do ensaio é um risco circular no disco. A norma ASTM G99, (2004) procedimenta este teste.

### **3.5. Alguns Materiais Utilizados em Ensaio de Desgaste**

Nesta seção será abordado o material abrasivo utilizado na bancada, bem como os materiais que serão utilizados como teste na bancada a ser construída.

### 3.5.1. Granalha de Aço

A granalha de aço é um abrasivo que se obtém através do processo de fusão do aço com composição química controlada. No processo primário de fabricação se obtém partículas arredondadas que constituem as granalhas esféricas (*Shot*). As de maior diâmetro são trituradas formando assim as granalhas angulares (*Grit*), como pode ser visto na Figura 3.11 (CYM, 2011).

Para aqueles trabalhos onde se utilizavam areia, se utiliza geralmente granalha de aço angular e, em alguns casos, estas são misturadas com alguma porcentagem de granalha de aço esférica.

Uma partícula de granalha angular apresenta arestas e pontas, e ao ser projetada sobre a superfície, trabalha como se fosse uma ferramenta que crava e arrasta na superfície, criando rugosidade (CYM, 2011).

Este abrasivo pode ser selecionado de acordo com o trabalho a ser realizado, não somente pelo tamanho dos grãos uniformes e sim pela dureza em determinado trabalho. É altamente reciclável, podendo ser reaproveitada de 700 a 5.000 vezes, de acordo com o tipo, diâmetro e dureza. Por se tratar de partículas de aço temperado e revenido, não provoca nenhum problema de contaminação da superfície (CYM, 2011).

O pó gerado na operação de jateamento é somente aquele gerado pelos materiais removidos da superfície. A granalha não absorve umidade, não requer secagem prévia e as partículas possuem uma granulometria similar, produzindo um jateamento totalmente uniforme (CYM, 2011).

De acordo com Fernandez et. al. (2003), o tamanho dos grãos exerce maior efeito sobre as taxas de desgaste abrasivo. Com este intuito neste trabalho se buscará a granalha que mais se aproxime em tamanho de um grão.



Figura 3.11. Granalha de aço angular (SINATORA, 2009).

### 3.5.2. Sílica em pó

Para Silva (2007), a sílica é um abrasivo muito aplicado em testes de desgaste quando a peça é de material muito duro e pode apresentar altas taxas de desgaste quando comparadas com outros abrasivos. Comparada com o óxido de alumínio, a sílica apresentou 30% a mais de taxa de remoção de material. Os ensaios propostos por Santana (2012) mostraram também altas taxas de desgaste comparado com vidro moído e vidro esférico como pode ser visto na Figura 3.12.

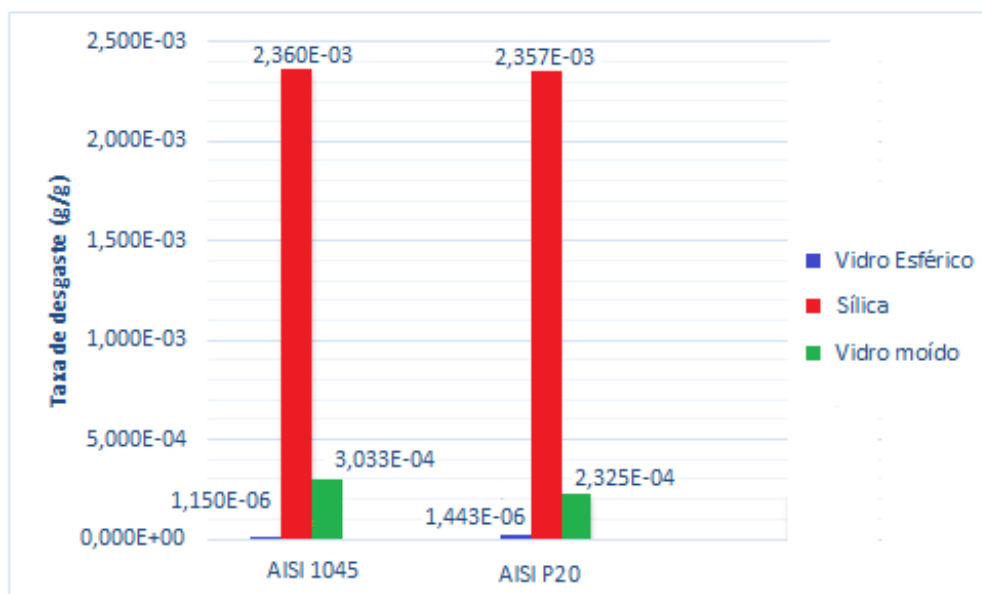


Figura 3.12. Comparação da taxa de desgaste nos materiais com três tipos de abrasivos (SANTANA, 2012).

A Figura 3.12 relata o desgaste abrasivo comparativo de um AISI 1045 (equivalente ao SAE 1045) e de um AISI P20 que é um aço considerado de médio carbono, ambos submetidos a três diferentes condições de desgaste.

### 3.5.3. Aços de Baixo e Médio Carbono utilizado nas Barras de Trilha

Atualmente utiliza-se o uso de um aço SAE 1045 nas barras do cilindro de trilha, e não se tem registro algum das razões da escolha deste material, a não ser da lógica da resistência mecânica pelo maior teor de carbono. De acordo com Krauss (2005), os aços de médio carbono, como no caso do SAE 1045, possuem alta resistência à tração e fadiga, e tradicionalmente são endurecidos por têmpera e revenimento. Quando é requerida alta resistência à tração e média tenacidade, o mesmo pode sofrer um revenido em baixa temperatura, aproximadamente 200°C, e quando se deseja média resistência a tração e alta tenacidade, o mesmo é revenido em alta temperatura, aproximadamente 500°C. De acordo com Cassola et.al. (2005), a composição básica média de um SAE 1045 é a apresentada na Tabela 3.1. Para Modi et. al. (2007), o teor de carbono contido nas fases determinará sua dureza e resistência ao desgaste, ou seja, quanto mais carbono, mais resistente é o material.

Tabela 3.1. Composição química típica (% em peso) de um aço SAE 1045 (CASSOLA, 2005).

C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo	Al	Ti
0,46	0,68	0,012	0,008	0,2	0,01	0,02	0,02	0,002

Os ensaios de desgaste abrasivo propostos por Agudelo (2011) apresentaram uma alta taxa de desgaste do aço AISI 1045 (Figura 3.13) quando comparado com outros aços como o AISI P20, levando em consideração que estes

ensaios foram realizados utilizando vidro moído como material abrasivo, durante um tempo pré-estabelecido para os testes.

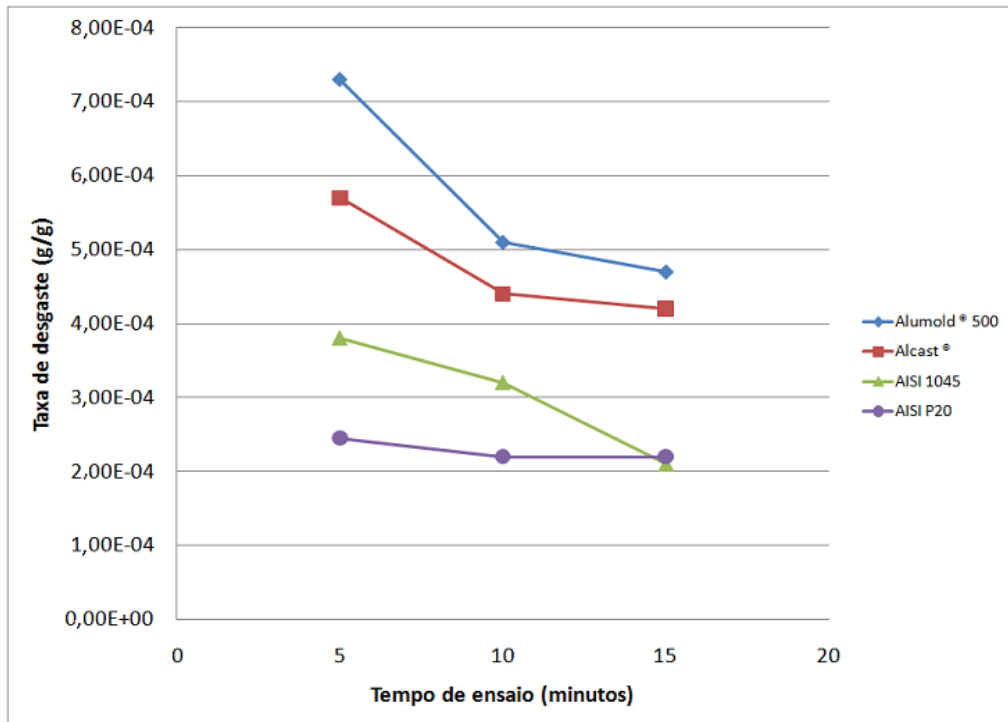


Figura 3.13. Taxa de desgaste (g/g) dos materiais utilizando vidro moído como material abrasivo nos ensaios (AGUDELO, 2011).

Os testes de desgaste comparativo realizados por Santana (2011), os quais foram realizados utilizando areia de sílica como abrasivo, mostraram um resultado muito semelhante do AISI 1045 quando comparado com o AISI P20 o qual também é considerado um aço de médio carbono.

Como material alternativo neste trabalho foi selecionado por questões de custo e processo de fabricação o aço SAE 1518, onde na Tabela 3.2 consta a composição química média aproximada. Para Jincheng (2002), o baixo teor de carbono, aliado com um médio teor de manganês, pode aumentar relativamente à resistência ao desgaste abrasivo.



Tabela 3.2. Composição química (% em peso) do aço SAE 1518 (LONGHAI, 2011).

C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo	Al	Ti
0,18	1,25	0,04	0,05	---	---	---	---	---

A literatura não apresenta nenhum dado relativo ao desgaste do aço ABNT/SAE 1518, este estudo irá apresentar os primeiros resultados sobre o comportamento desse material no regime de desgaste abrasivo.

### **3.6. Fatores que Afetam o Desgaste**

Esta seção busca focar nos principais fatores que podem afetar o desgaste abrasivo, bem como as condições e resultados que a literatura nos apresenta sobre o assunto.

#### **3.6.1. Dureza da Amostra e Tamanho do Abrasivo**

As taxas de desgaste apresentadas na Figura 3.13 foram calculadas em função da taxa de desgaste do aço AISI 52100, denominando-se valor resistência do desgaste relativa (PINTAÚDE, 2002).

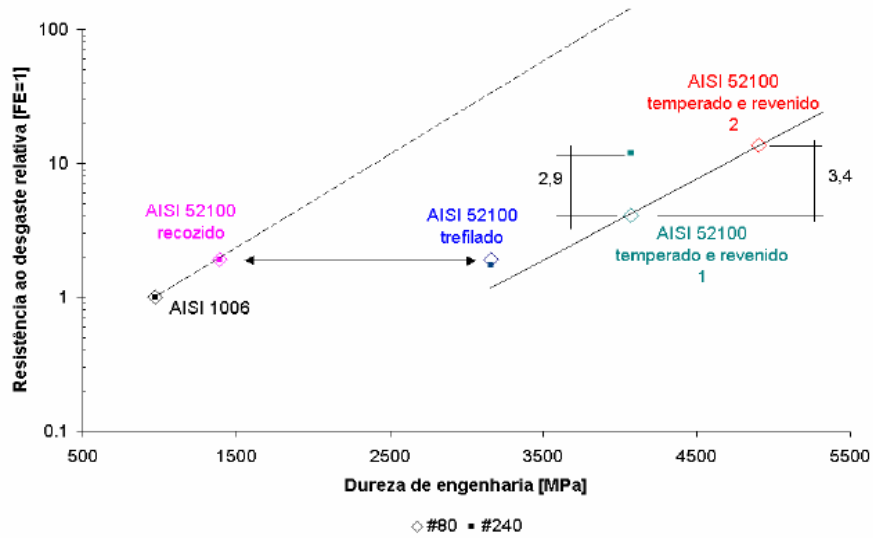


Figura 3.14. Variação da resistência ao desgaste relativa com a dureza de engenharia (PINTAÚDE, 2002).

Os resultados apresentados na Figura 3.14 indicam que a resistência ao desgaste relativa observada para o aço AISI 52100 recozido é semelhante à observada para o aço AISI 52100 trefilado, apesar da diferença de dureza entre esses materiais (PINTAÚDE, 2002).

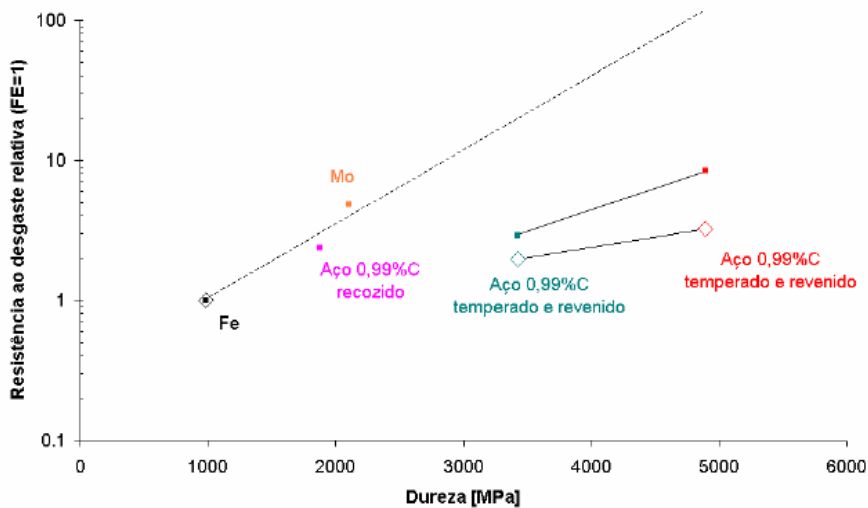


Figura 3.15. Variação da resistência ao desgaste relativa (Fe=1) com a dureza dos materiais. Abrasivo: vidro (RICHARDSON, 1968).

Na Figura 3.14 estes grupos de tratamentos da Figura 3.15 já haviam sido identificados, e foi percebido que o tamanho do abrasivo afeta os valores de resistência ao desgaste dos aços temperados e revenidos, mas não afeta no caso de metais puros e aços recozidos. Além disso, os resultados obtidos por Richardson(1968) conclui que, quanto maior a dureza do aço temperado e revenido, maior é o efeito que o tamanho do abrasivo exerce sobre a resistência ao desgaste relativa(Figura 3.15), e que todas as características lineares do processo de desgaste, tais como a profundidade dos riscos, são proporcionais ao diâmetro de grão, ao passo que o volume de desgaste é independente do tamanho do grão

Para Pintaúde (2002), a resistência ao desgaste relativa não varia de forma proporcional com a dureza, por exemplo, aumenta 3,4 vezes para uma variação de dureza de apenas 20%.

Para Ribeiro (2004), não existe boa relação entre o desgaste abrasivo e o tamanho da partícula abrasiva. O que se observa em geral é que o volume de material removido aumenta com o tamanho da partícula. Para Wainer et al., (1992), o volume removido no desgaste aumenta linearmente com o tamanho da partícula abrasiva, sendo que esta variação é bastante acentuada até um tamanho crítico da partícula (relação entre tamanho da amostra e abrasivo), e a partir dele a variação é menos sensível. Para Pintaúde (2002), o tamanho do abrasivo não determina a intensidade do encruamento superficial.

### **3.6.2. Desgaste e Dureza do Abrasivo**

De acordo com Poorya et .al. (2011), a quantidade de ruptura (quebra) do abrasivo é semelhante à taxa de desgaste, ou seja, aumenta até certo nível e depois começa a diminuir com o aumento da força aplicada. De acordo com este autor, a degradação do abrasivo para partículas muito pequenas, juntamente com grandes forças aplicadas, têm o potencial de incorporar as partículas na superfície do material. Este encaixe na peça de teste reduz a rugosidade da superfície,

preenchendo as asperezas da superfície, podendo posteriormente agir para reduzir a taxa de desgaste observado pelo endurecimento da superfície.

No que diz respeito a variação de rotação, para Poorya et. al. (2011) nada foi identificado em relação a variação da mesma quanto à taxa de desgaste, como pode ser visto na Figura 3.16.

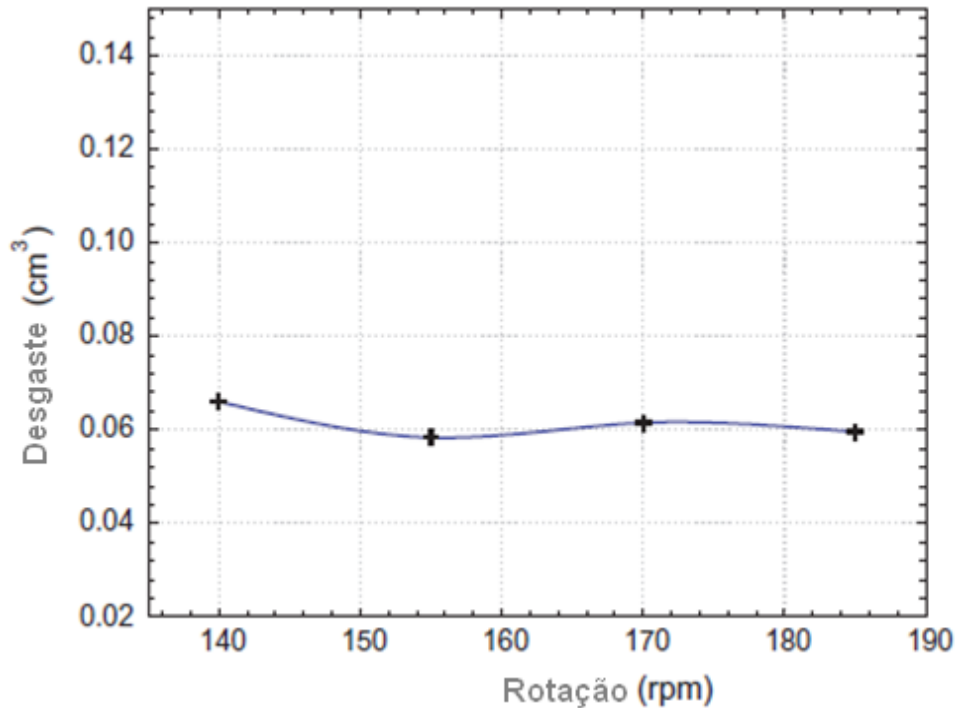
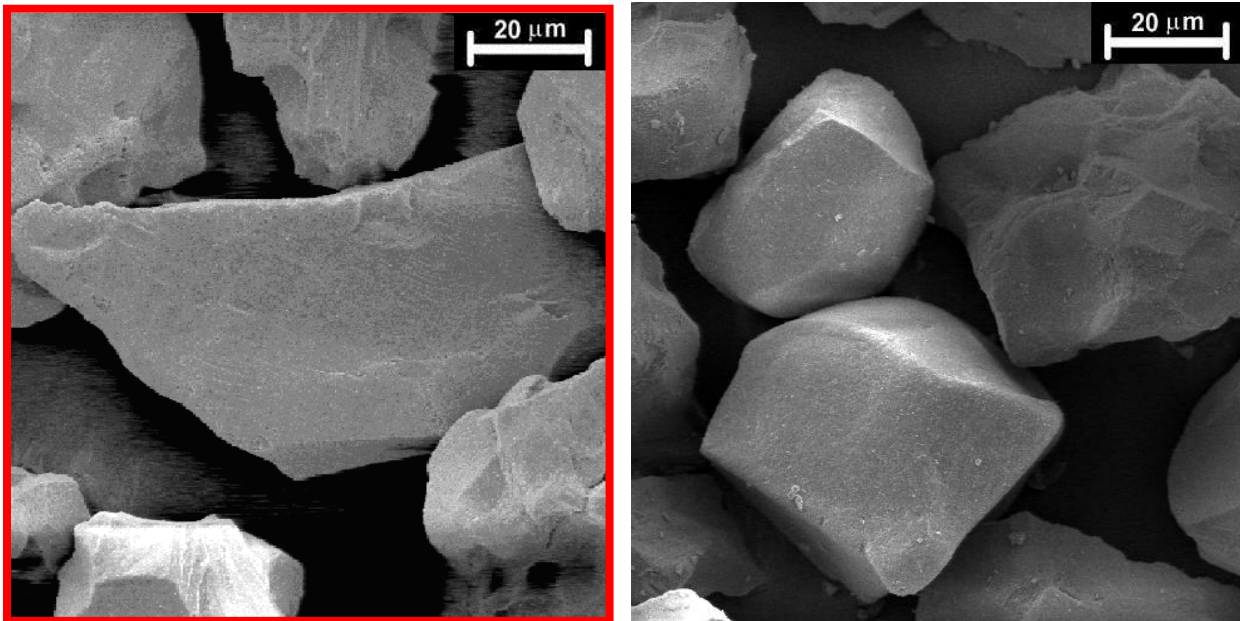


Figura 3.16. Rotação em relação ao desgaste (POORYA, 2011).

Para Silva et. al. (2011), a dureza do abrasivo é muito importante, mas não é o único fator a contribuir para o desgaste, e quando se aumenta o tamanho da partícula do abrasivo o desgaste é maior, não dependendo somente da dureza. Já para Jacobson et. al. (1994), a taxa de desgaste pode aumentar com o aumento da dureza do abrasivo.

O desgaste do abrasivo em ensaios pode ser visto na Figura 3.17 de acordo com Sinatora (2009).



A) Abrasivo antes do ensaio

B) Abrasivo após o ensaio

Figura 3.17. Abrasivo no início e final do ensaio (SINATORA, 2009).

Com as imagens realizadas em um microscópio eletrônico de varredura é possível ver que o abrasivo angular início do ensaio, e no final, onde o mesmo toma forma mais arredondada em algumas geometrias após o ensaio de desgaste.

## **4. MATERIAIS E MÉTODOS**

Para avaliar comparativamente o desempenho dos materiais (SAE 1045 e SAE 1518) em uma mesma condição, o principal objetivo deste estudo foi desenvolver um dispositivo, onde a partir do mesmo se tornasse possível simular os dois materiais em condições idênticas de funcionamento.

Para esse dispositivo foi redimensionado o cilindro de trilha da colheitadeira e o côncavo (redimensionado transversalmente, mantendo o restante das dimensões), para ser possível obter um desgaste mais localizado e também visando principalmente à redução de custo, tanto do dispositivo, quanto para o funcionamento do mesmo.

Na sequência será exemplificado o projeto da bancada de testes e o dimensionamento de seus componentes, o material abrasivo, e a seleção dos materiais, abordando o modo de teste.

A bancada foi construída no laboratório de testes da AGCO do Brasil unidade Canoas-RS e lá também foram realizados os testes. Posteriormente as amostras foram analisadas no Núcleo de Engenharia de Materiais Metálicos (NUCLEMAT) da PUCRS.

### **4.1. Bancada de Testes**

Para se obter resultados mais satisfatórios e aproximar o máximo da condição real, optou-se inicialmente em projetar uma bancada como um sistema retroalimentado e para a mesma seria possível fazer uso de algumas peças originais da parte industrial da colheitadeira de grão. No entanto, constatou-se que ao usar um sistema retroalimentado automaticamente, vários componentes da

bancada seriam submetidos ao desgaste acelerado (por usar um abrasivo de alta dureza).

Em vista disto, optou-se por uma concepção totalmente diferente, com as barras de trilha enclausuradas em um tambor carregado de abrasivo, onde as barras teriam o seu movimento dinâmico normal de trabalho e o côncavo fica preso estaticamente (este dispositivo está sob o pedido de patente provisório nº PI-P182165).

Como mencionado no item 3.1, todos os sistemas de colheita apresentam as barras de trilha em alguma parte do sistema, mas, para fins de projeto da bancada, foi usado como base para redimensionamento, o cilindro de trilha de uma colheitadeira marca Massey Ferguson, modelo MF 5650. Vale salientar que não foi alterado o diâmetro e geometria do cilindro, a alteração foi apenas na dimensão transversal.

#### 4.1.1. Modelo Esquemático

Na Figura 4.1 é apresentado o modelo esquemático da bancada de testes desenvolvida.

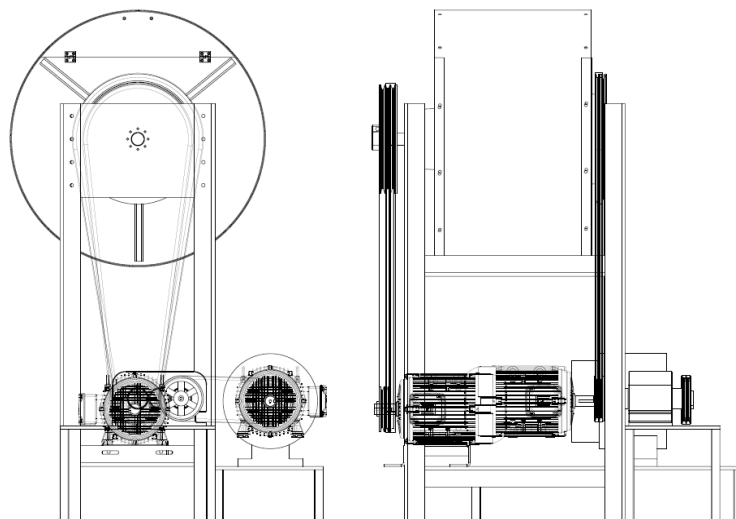


Figura 4.1. Vista lateral e frontal da bancada de testes desenvolvida para a análise de desgaste.

Na sequencia é apresentada uma vista em corte (Figura 4.2) dos principais componentes da bancada de testes, numericamente discriminados no Quadro 4.1.

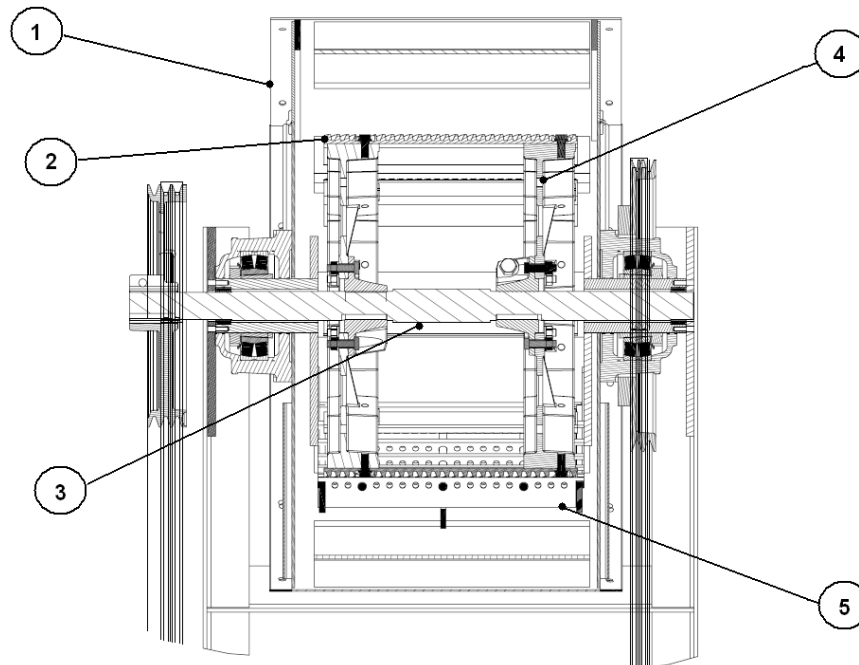


Figura 4.2. Vista frontal em corte do sistema funcional da bancada de testes.

Quadro 4.1. Relação de itens da bancada de teste de desgaste.

1	Tambor de encapsulamento
2	Barras de trilha
3	Eixo de acionamento interno
4	Cilindro de trilha redimensionado
5	Côncavo estático



#### 4.1.2. Modo Geral de Funcionamento

A bancada foi tracionada através de dois motores elétricos posicionados paralelamente, sendo um responsável pela tração do cilindro de trilha, e outro pelo tambor externo carregado com o material abrasivo. O interior deste tambor possui aletas divididos em suas extremidades, como pode ser visto na Figura 4.3, por onde o material abrasivo é carregado até que a volta do mesmo complete e descarregue o abrasivo na entrada do côncavo estático.

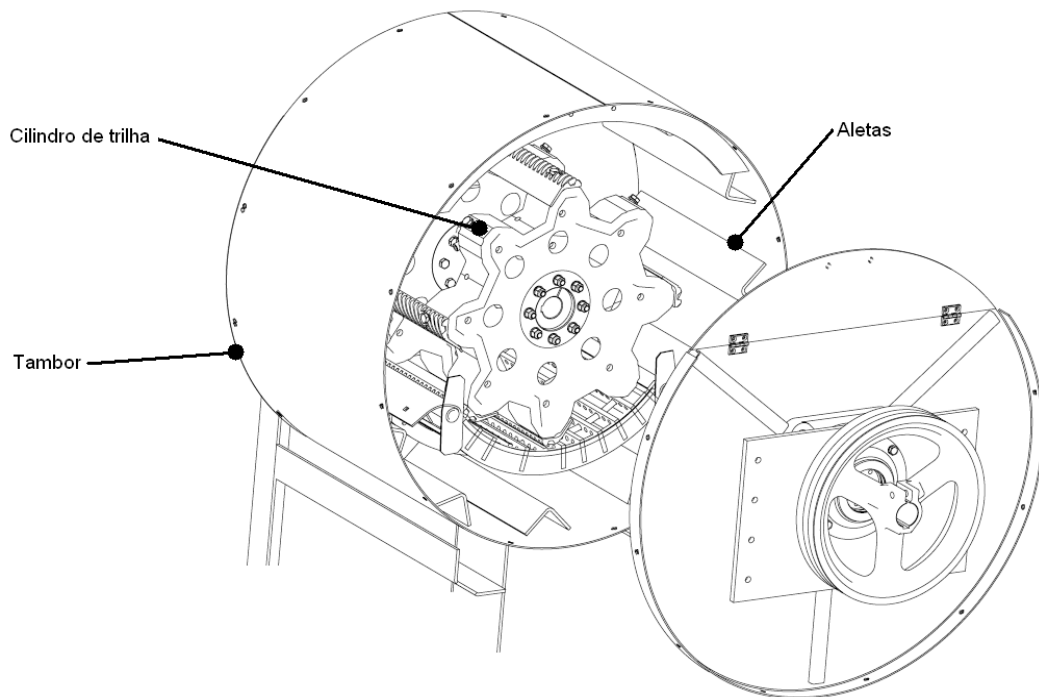


Figura 4.3. Vista do interior do tambor de encapsulamento, com o fechamento esquerdo aberto.

Na sequência são descritos os principais itens funcionais da bancada.

### 4.1.3. Acionamento

A tração do dispositivo é feita através de dois motores elétricos em sentidos opostos. O primeiro motor traciona uma polia de duplo canal com o uso de duas correias, onde a polia está travada ao eixo do cilindro de trilha (item 3 da Figura 4.4), sendo responsável pela tração do mesmo na rotação de trabalho da colhedora pré-definida e ajustada por um inversor de frequência acoplada a caixa elétrica do motor. Já o segundo motor traciona o tambor carregado de abrasivo, e pelo fato desse carregamento ser feito a uma baixa rotação comparada à rotação nominal do motor, o mesmo possui um redutor na tomada de força (item 2 da Figura 4.4), acoplada por meio de uma correia a outra caixa redutora (item 1 da Figura 4.4), com o objetivo de reduzir drasticamente a rotação e permitir regulagem da mesma de acordo com o abrasivo a ser utilizado.

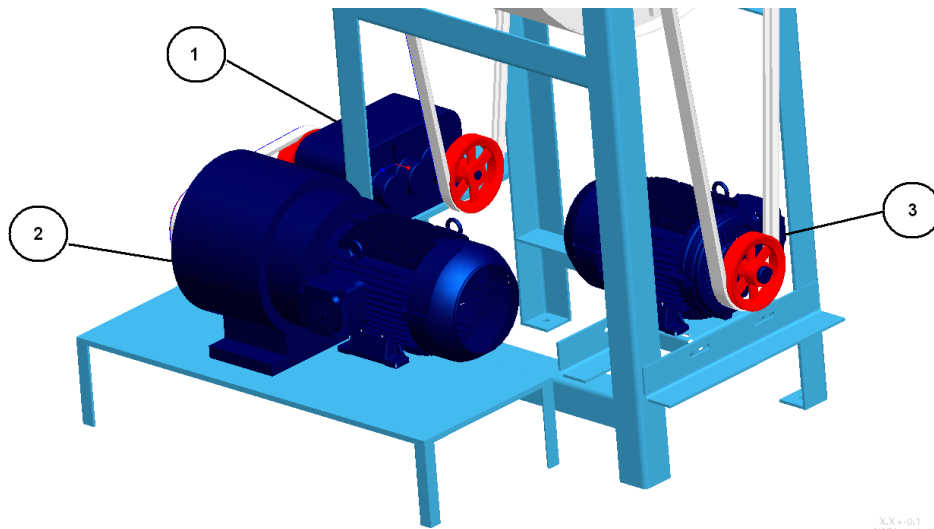


Figura 4.4. Acionamento da Bancada de testes: Motor com redutor(2), caixa redutora(1), e motor de acionamento da trilha(3).

Quanto à potência dos motores, a mesma foi ajustada de acordo com o mínimo necessário para promover o funcionamento da bancada por meio de um equilíbrio de potência com a requerida pela trilha da colheitadeira tomada como base para elaboração da bancada, que possui um motor de 120 CV. Desta potência total, 25% é destinada para a trilha (aproximadamente 30 CV), então como o cilindro

foi redimensionado em  $\frac{1}{4}$  do tamanho original, o mínimo de potência necessária seria de 7,5 CV. Então foram usados dois motores de 10 CV's cada, tanto para a trilha quanto para o tambor.

#### 4.1.4. Côncavo de Atrito

O côncavo é uma peça estática na colheitadeira, e foi fixado por uma placa que, por sua vez é fixada em um semi-eixo e fixada na estrutura da bancada como pode ser visto da Figura 4.5.

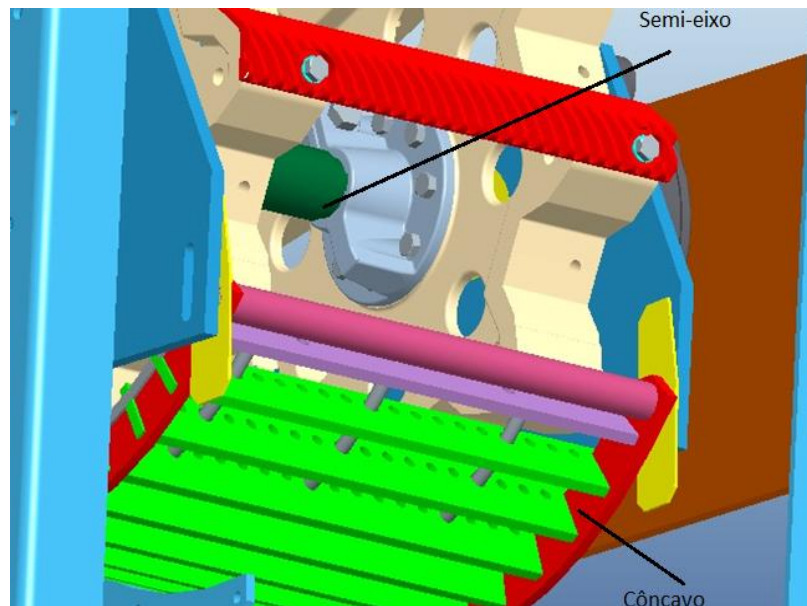


Figura 4.5. Vista com o tambor suprimido ilustrando o côncavo estático da bancada de testes.

O côncavo está preso à placa lateral por meio de furos oblongos, o que permite uma regulação próxima do real em relação à condição de espaçamento cilindro-côncavo na hora da colheita. O mesmo também foi redimensionado em  $\frac{1}{4}$  do seu tamanho original.

#### 4.1.5. Cilindro da Bancada

As barras de trilha, que são o objeto deste estudo, foram presas nas margaridas centrais do cilindro de trilha, as quais são as mesmas que são usadas nas colheitadeiras, sem qualquer redimensionamento.

A unidade de trilha atual de uma colhedora de grãos possui oito barras de trilha ao redor do seu cilindro. Para poder elaborar uma análise comparativa, teve-se como opção ciclar com dois materiais em um mesmo teste, sob as mesmas condições, o atual que é um SAE 1045 (material original da colhedora) e o material alternativo que é um SAE 1518. A bancada foi adaptada com quatro barras de cada tipo, como pode ser visto nas cores diferenciadas da Figura 4.6, para posteriormente poder analisar os as amostras na mesma condição de trabalho.

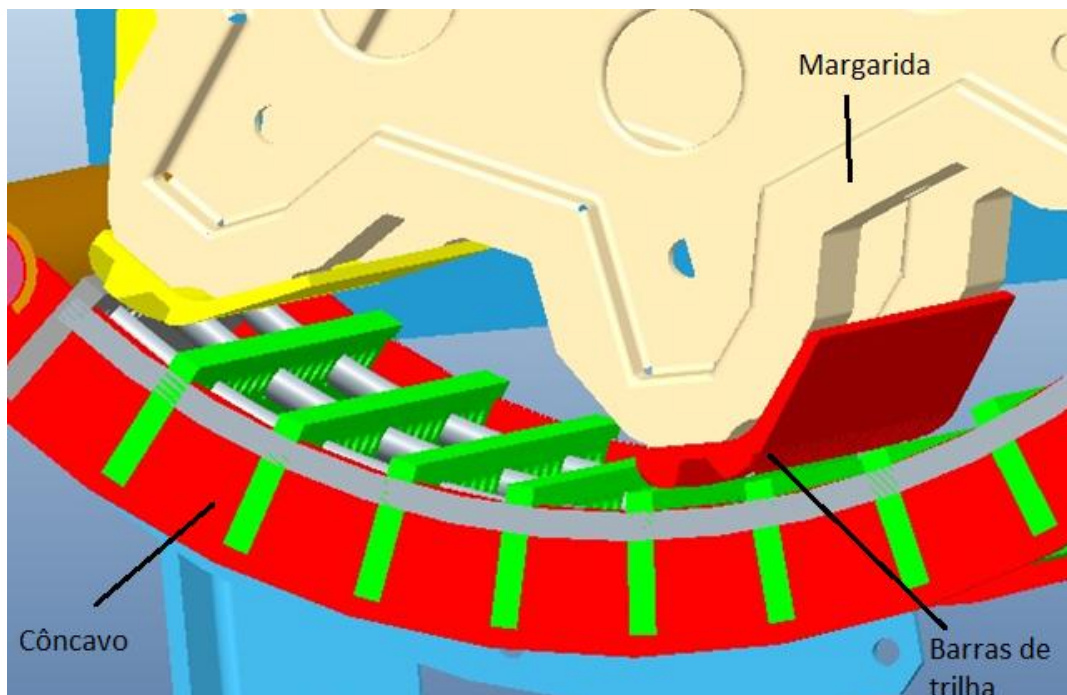


Figura 4.6. Barras em materiais diferentes no cilindro de trilha da bancada.

#### 4.1.5. Fluxo de Matéria

Para Huynh et al. (1982), o fluxo de massa no sistema de uma colhedora é determinado a partir do produto da velocidade de deslocamento da máquina e a

largura de colheita da mesma, pela razão 10. Este valor é o fluxo máximo de material considerando uma perda aceitável para a colheitadeira MF5650 utilizada como base no desenvolvimento da bancada. Na especificação técnica da máquina tem-se um fluxo de 2,29kg/s para a máxima velocidade (5 km/h com perdas abaixo de 2%), e com a maior plataforma de corte acoplada(5,48m).

Considerando que o sistema da bancada foi redimensionado para 1/4 do tamanho original, então tem-se que o sistema deverá receber uma carga máxima de 34,37 kg de material abrasivo por minuto na entrada do côncavo, demonstrado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Fluxo do redimensionamento.

Tamanho do cilindro (mm)	Fluxo de grãos (kg/s)	Fluxo de grãos (kg/min)
1300	2,29	137,4
325	0,57	34,3

#### 4.1.6. Regulagem do Espaçamento para o Atrito

O espaço disponível para o atrito entre o abrasivo e as barras do cilindro é o mesmo utilizado em uma regulagem básica de uma colhedora de grãos. Esta regulagem é feita com base no diâmetro médio de um grão, como pode ser visto na Figura 4.7, que no caso da bancada será feita com base no diâmetro médio de um grão da granalha de aço.

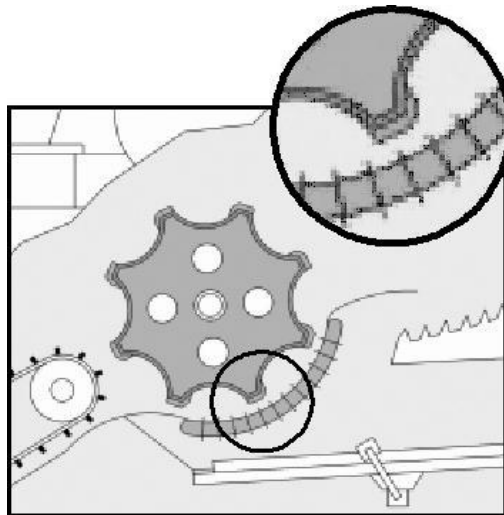


Figura 4.7. Regulagem do espaçamento de atrito da bancada (AGCO, 2012).

#### 4.1.7. Ensaios Preliminares

Por se tratar de um conceito diferente de bancada de testes, foram realizados testes preliminares do dispositivo para acertar a rotação correta do tambor de encapsulamento, a ponto de conhecer que rotação o mesmo carregará o abrasivo na entrada do côncavo a ponto de atritar com as barras de trilha. Para o acerto desta rotação foi utilizado um motor com polia variadora acoplada, permitindo assim baixas rotações e uma fácil regulagem da mesma ao tambor na rotação intermediária para que o abrasivo seja carregado em giro para o côncavo e que não fique suspenso por gravidade. Já para o motor que traciona o cilindro de trilha foi utilizado um inversor de frequência, onde por meio da redução da frequência da rede elétrica e do jogo de polias fosse possível atingir a rotação do cilindro de trilha com 365 RPM que é a nominal de trabalho.

#### 4.2. Materiais Abrasivos

Como o desgaste é na maioria das vezes causado pelo grão e também pelos seus detritos, como pode ser visto na Figura 4.8, foram analisados dentre alguns possíveis abrasivos, o que melhor se encaixasse na relação custo benefício e

semelhança. Foi optado pela granalha de aço e a sílica ( $\text{SiO}_2$ ). Com a granalha pode-se simular o tamanho do grão de uma determinada cultura e acelerar o processo de desgaste. Já a sílica foi escolhida, pois está presente em grande quantidade na casca do arroz.

Para Huston (1972), Bartha e Huppertz (1974) e Metha (1992) apud Netto (2006), a casca do arroz é formada por uma capa lenhosa, dura e altamente silicosa. É composta por 50% de celulose, 30% de lignina e 20% de resíduos inorgânicos.

O resíduo inorgânico contém, em média, 95 a 98% em peso, de sílica, na forma amorfa hidratada, perfazendo 13 a 29% do total da casca (Huston (1972) apud Pouey (2006)).

Esta variação do percentual de sílica na casca de arroz depende da safra, ou seja, da variedade plantada, do clima e das condições do solo, além da localização geográfica (Amick, 1982; Gonvidarao, 1980; Houston, 1972; apud Pouey, 2006).

Com base nestes dados foi utilizado o percentual acima citado (20%) de sílica na mistura com a granalha a fim de levantar o percentual de desgaste comparativo com a carga do abrasivo com e sem sílica. Foi utilizado sílica com granulometria de 200mesh(80 $\mu\text{m}$ ) visando simular o tamanho da sílica da casca do arroz.

Para aperfeiçoar o processo de simulação mais próximo da condição real foi utilizada uma mistura de dois tamanhos de granalhas, a comercialmente chamada de G12, que possui um diâmetro granulométrico médio de 1,679mm, e a granalha G18, que possui um diâmetro médio de 1,001mm, uma para simular o grão e outra para simular os detritos (vagens, talos, grãos quebrados, e etc) como podem ser vistos na Figura 4.8. A proporção usada foi sempre 70% da G12 e 30% da G18, tanto nos testes somente com granalha, quanto na mistura com sílica.



Figura 4.8. Material abrasivo que passa pelo cilindro de trilha (AGCO, 2010).

As características dos abrasivos utilizados, como a composição, são apresentadas nas Tabelas 4.2 e 4.3.

Tabela 4.2. Composição (% em peso) da granalha de aço G12/G18 (ABNT 2010)

C (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Si (%)
1,0	0,8	0,05	0,05	0,4

Tabela 4.3. Composição (% em peso) da Sílica (MOB, 2012).

SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)
98,0	0,2	0,15

### 4.3. Seleção de Materiais

Em uma pesquisa realizada recentemente com os principais fabricantes de colheitadeiras, se observou que o uso do SAE 1045 é o mesmo em termos de composição química e processo de fabricação para colheitadeiras de pequeno e



médio porte e até uma centralização de fornecedor foi identificada. Somente se observou que, para máquinas mais modernas e de maior capacidade tem-se usado o mesmo material somente com um banho de cromo em sua superfície, para aumentar essa resistência ao desgaste. No entanto, essas barras banhadas ao cromo têm um custo relativamente maior que as convencionais, sem contar que este banho de cromo já é proibido em alguns países da Europa para componentes que tenham contato com alimentos, caso típico das barras de trilha.

Como a intenção do estudo é melhorar a especificação do item sem alterar o custo, o SAE 1518 pode ser uma alternativa atrativa em relação ao benefício que o mesmo pode trazer para o sistema de colheita, além de poder analisar a presença do Manganês como fator positivo ou não para resistência ao desgaste abrasivo.

#### **4.4. Procedimento de Teste e Análise de Desgaste**

Os testes foram realizados com intervalos de 15 minutos, prevalecendo o somatório de minutos como tempo de teste (o roteiro de teste, bem como os parâmetros controlados serão descritos no próximo capítulo). Estes intervalos foram realizados visando um melhor funcionamento da bancada, sendo que o ambiente de trabalho das amostras é de certa forma crítico tanto para as amostras, quanto para o restante da bancada, pois o abrasivo pode interagir com outros componentes do dispositivo.

##### **4.4.1. Preparação das Amostras**

Comparando com as peças originais da colheitadeira, as amostras tem apenas uma dimensão menor, que é o comprimento das mesmas, como pode ser

visto na Tabela 4.1, ambas amostras tem o comprimento de 325mm, 3/4 a menos que as originais. Todas as amostras passaram por um processo de limpeza com álcool etílico e, posteriormente, uma secagem com corrente de ar forçada sob a superfície. Esse procedimento de limpeza foi realizado sempre após os ensaios de bancada, antes de se realizar cada pesagem. As amostras foram pesadas em uma balança analítica da marca C&F modelo C15E2 para determinar a massa das mesmas e posteriormente foram fixadas na bancada de testes para início dos mesmos.

#### **4.4.2. Análise das Amostras**

As análises das amostras foram feitas em três etapas. A primeira foi a análise da variação de massa das amostras, onde para os testes de granalha foram realizadas cinco pesagens no total, visando analisar uma variação mais detalhada da perda de massa e, nos testes usando sílica misturada com a granalha, foram realizadas três pesagens no total, visando neste teste observar a abrasividade da sílica contida na casca do arroz.

As etapas subsequentes das análises foram basicamente uma análise de dureza Vickers tanto da superfície inicial ao teste, bem como ao término dos mesmos, discriminando as amostras utilizadas com diferentes abrasivos a fim verificar se a variação da dureza tem influência nas taxas de desgaste. Finalizando as análises foram realizadas microscopias ópticas e eletrônicas para caracterizar o desgaste sofrido pelas amostras e, por fim, foi realizada uma análise composicional através de uma espectroscopia de emissão óptica a fim de afirmar a composição química das amostras submetidas ao teste de bancada. Na Figura 4.9 é apresentado um fluxograma das etapas que foram seguidas do decorrer desde estudo.

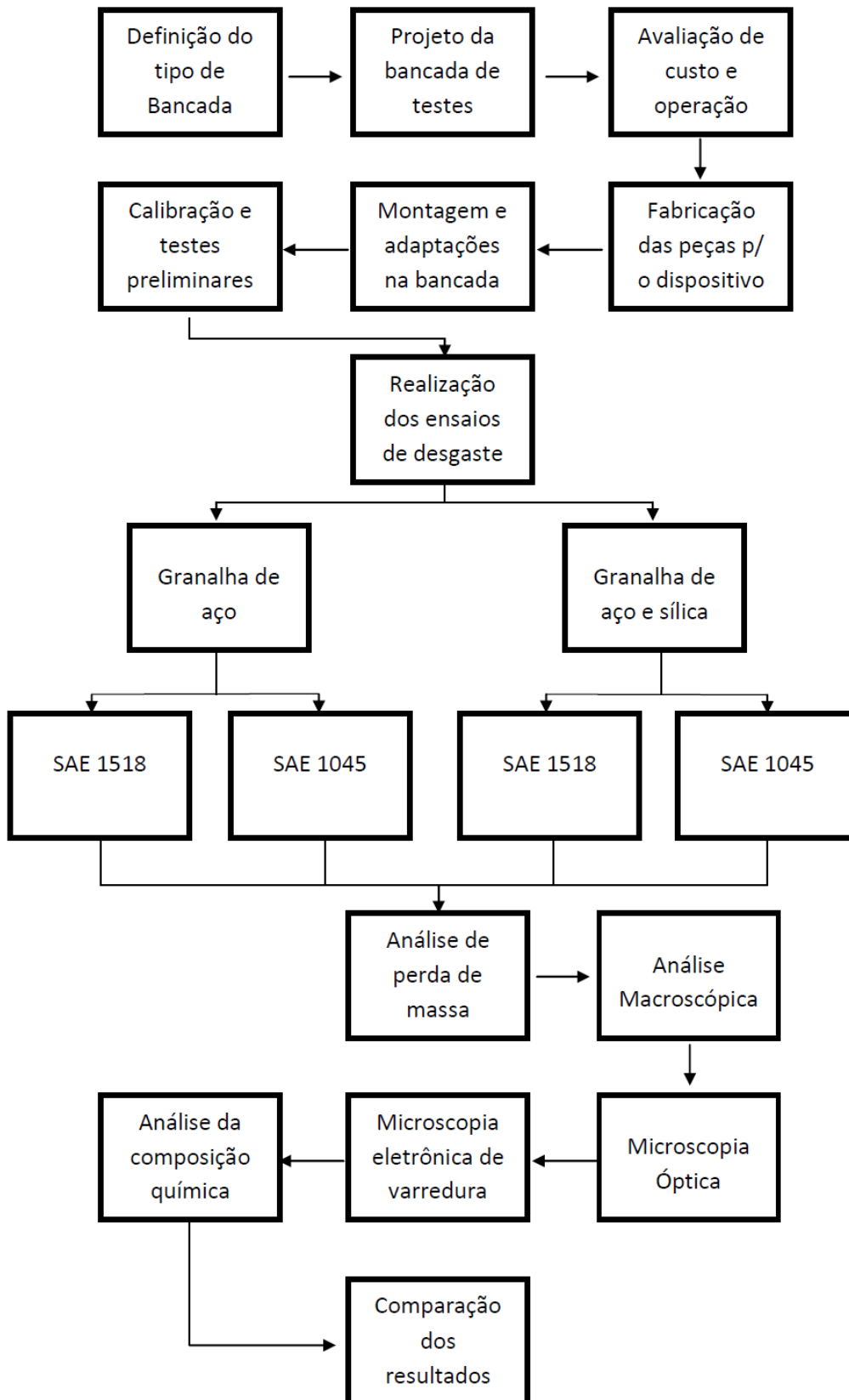


Figura 4.9. Fluxograma da metodologia utilizada.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1. Construção e calibração do protótipo

Por se tratar de um conceito novo de bancada de desgaste, apesar de ter sido baseado na ASTM G65(2010) e por procurar uma aproximação com o sistema de trilha da colhedora, foram utilizadas peças novas confeccionadas exclusivamente para a bancada e peças já utilizadas nas colhedoras de grãos. Essa interface entre componentes teve vários ajustes de montagem, principalmente no acionamento da bancada e na mancalização. Nos 10 primeiros minutos de funcionamento quebrou o anel trava do rolamento do cilindro de trilha fazendo com que a mesma precisasse ser retrabalhada para voltar a funcionar. Foram realizados aproximadamente 30 minutos de ensaios preliminares, com amostras não especificadas para o teste, apenas para testar a capacidade de desgaste. A Figura 5.1 mostra o protótipo após a finalização dos testes utilizando  $\text{SiO}_2$ .



Figura 5.1. Bancada de testes de desgaste desenvolvida.

Após a execução dos testes utilizando granalha de aço, os quais rodaram por 16h, a bancada foi desmontada a fim de verificar possíveis avarias que a mesma pudesse apresentar, tendo em vista o ambiente extremamente agressivo que a mesma trabalha, e também, porque era possível escutar um alto nível de ruídos durante o seu funcionamento não sendo possível identificar se era do processo de abrasão ou da própria bancada.

Após a desmontagem foi possível verificar que a granalha de aço estava adentrando por um espaço vazio no mancal e chegando até o rolamento, o que poderia danificá-lo, porém o mesmo foi vedado provisoriamente antes do início dos testes com sílica.

Com o início dos testes utilizando sílica, teve-se de vedar o tambor de encapsulamento com cola de silicone líquida (Figura 5.2), pois a sílica utilizada tem granulometria muito pequena (200 mesh), o que fazia com que a mesma escapasse por qualquer fresta ou orifício. Durante os *setup* (intervalo de manutenção) de pesagem das amostras se observou também uma impregnação da sílica na superfície das amostras como pode ser visto na Figura 5.3, onde mostra o vigia do tambor de encapsulamento e na Figura 5.4, as amostras após a retirada para pesagem, todas totalmente cobertas com  $\text{SiO}_2$ .

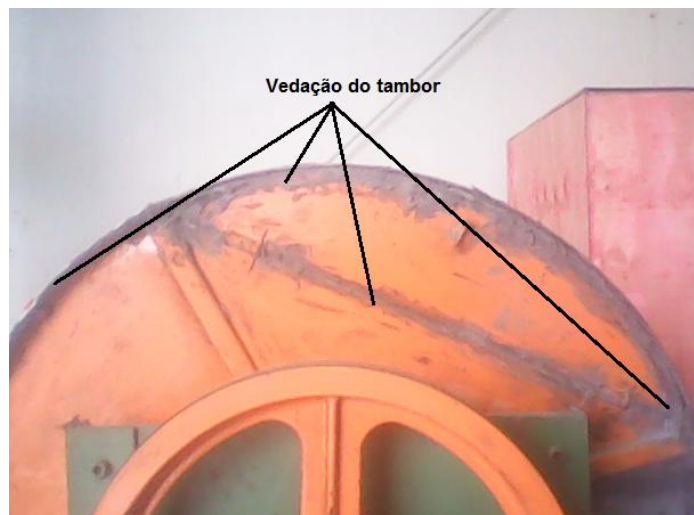


Figura 5.2. Vedação com cola silicone.



Figura 5.3. Vigia do tambor de encapsulamento.



Figura 5.4. Amostras após os testes com sílica.

Outro fato ocorrido com a sílica foi à repetição do que aconteceu com a granalha, porém com uma severidade maior, pois a sua pequena granulometria venceu a vedação imposta ante ao rolamento adentrando no mesmo, tendo que fazer a sua substituição.

Durante a execução dos ensaios controlaram-se as variáveis como frequência do inversor, a ponto de não variar a rotação, tempo de execução de cada intervalo de teste, fuga do abrasivo tanto da sílica quanto da granalha, como pode ser visto na Figura 5.5. Esta fuga de abrasivo foi controlada, pois não houve perda significativa ao final do teste.



Figura 5.5. Fuga do abrasivo externo a bancada.

Ainda durante os ensaios preliminares foi realizada uma melhoria no tambor da bancada de testes, onde foi criada uma janela de acrílico para a visualização da queda do abrasivo na entrada do côncavo (Figura 5.6). No entanto quando foi utilizado sílica na mistura do abrasivo, a mesma impregnava na superfície do acrílico, tornando difícil a visualização a partir dela.



Figura 5.6. Janela de acrílico na lateral do tambor da bancada de testes

Quanto ao acionamento proposto no início do projeto percebeu-se que o mesmo teve um ótimo desempenho em relação a potência requerida, e a transmissão de tração da bancada (Figura 5.7), pois não houve problema durante a execução dos testes.



Figura 5.7. Motores de acionamento da bancada de testes.

Os ensaios foram então roteirizados em intervalos de 15 em 15 minutos para verificação da condição de funcionamento da bancada, prevalecendo o somatório total como tempo, controlando as variáveis acima citadas, efetuando a troca dos abrasivos em intervalos de 8 horas para não afetar a confiabilidade dos testes, mesmo não havendo perda de propriedades físicas. Por questões de segurança as amostras dos testes realizados com a mistura de sílica no abrasivo foram ensaiadas por menos tempo na bancada de testes (não houve troca da sílica).



## 5.2. Análise de perda de massa

A análise de perda de massa foi realizada em duas etapas apresentadas a seguir, uma utilizando somente granalha e outra utilizando a mistura de granalha e sílica.

### 5.2.1. Abrasivo: Granalha

Para o teste de granalha foram realizadas quatro pesagens no intervalo de quatro horas cada (Tabela 5.1), passando a cada pesagem pelo processo de limpeza citado no tópico 4.1.1.

Tabela 5.1. Massa das amostras utilizando granalha como abrasivo.

ID Amostra	Material Amostra	Peso Inicial (g)	4 horas (g)	8 horas (g)	12 horas (g)	16 horas (g)
1	<b>SAE 1045</b>	1760,0	1750,0	1745,0	1745,0	1725,0
2	<b>SAE 1045</b>	1770,0	1760,0	1740,0	1735,0	1715,0
3	<b>SAE 1045</b>	1765,0	1750,0	1725,0	1725,0	1710,0
4	<b>SAE 1045</b>	1785,0	1775,0	1750,0	1750,0	1730,0
9	<b>SAE 1518</b>	1785,0	1755,0	1750,0	1750,0	1750,0
10	<b>SAE 1518</b>	1770,0	1740,0	1735,0	1735,0	1730,0
11	<b>SAE 1518</b>	1730,0	1705,0	1695,0	1695,0	1690,0
12	<b>SAE 1518</b>	1750,0	1720,0	1715,0	1715,0	1710,0

Para as amostras de SAE 1045 se observou uma menor perda de massa inicial entre o primeiro e segundo teste em relação às amostras de SAE 1518 (Figura 5.8).

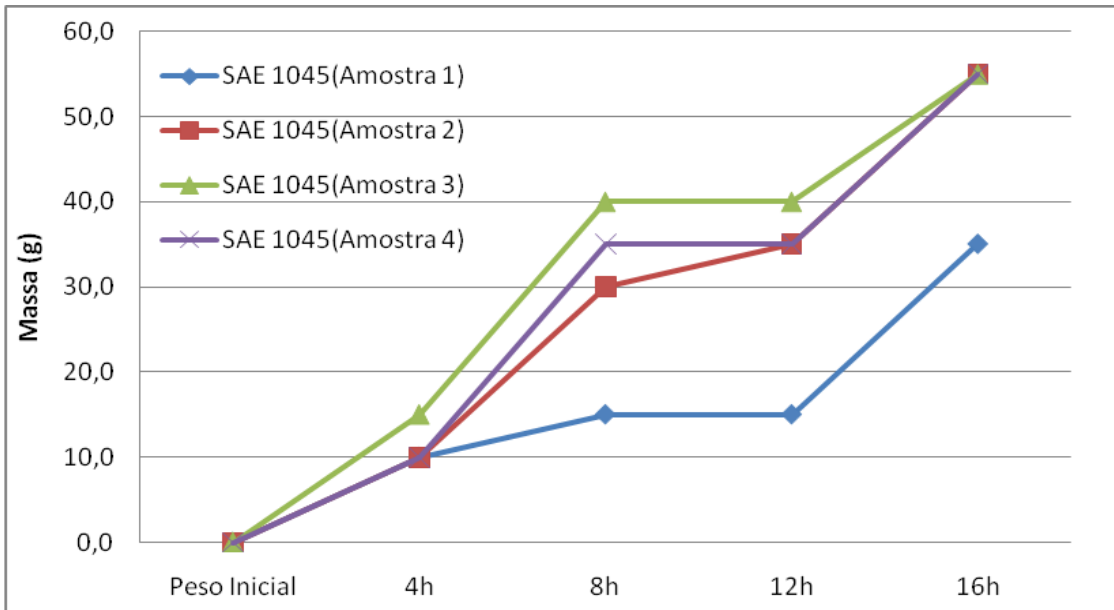


Figura 5.8. Perda de massa do aço SAE 1045.

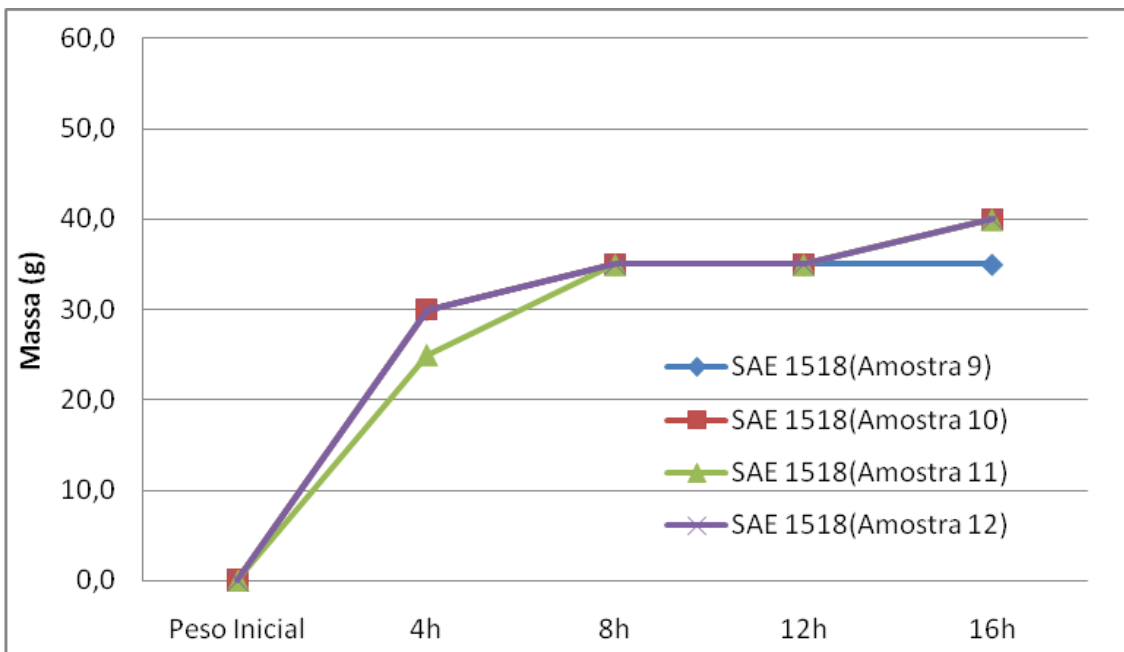


Figura 5.9. Perda de massa do aço SAE 1518.

Na Figura 5.10 foram expostas as médias de perda de massa das amostras de aço SAE 1518 e SAE 1045, e seus respectivos desvios padrões, e colocadas sobrepostas a fim de se observar as diferenças nessa análise de perda de massa.

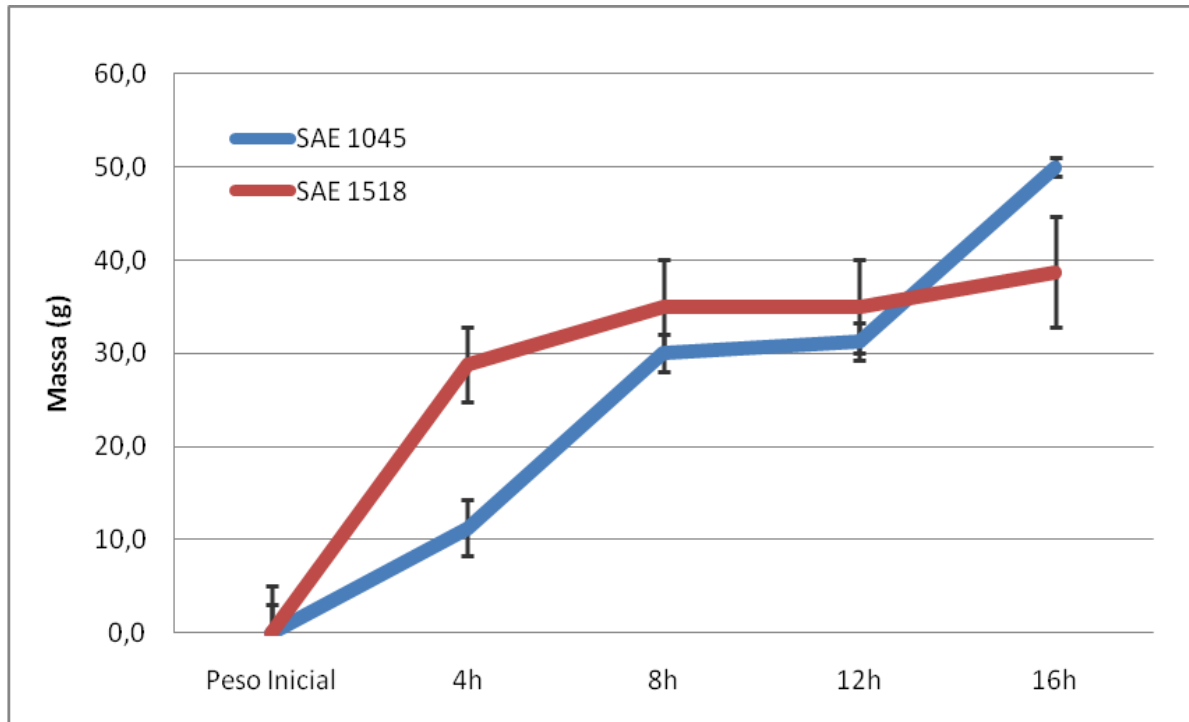


Figura 5.10. Análise de perda de massa média para os aços SAE 1045 e SAE 1518.

Já para as amostras de SAE 1518 percebeu-se uma perda de massa inicial maior que a do SAE 1045, no entanto elas mostraram-se mais resistentes após este desgaste inicial, equivalendo-se em perda de massa ao SAE 1045 nessa condição, como pode ser visto na Figura 5.10. Fato esse que afirma o resultado dos ensaios propostos por Jincheng (2002), onde o mesmo observou que o baixo teor de carbono aliado ao alto teor de manganês pode melhorar significativamente a resistência ao desgaste.

### 5.2.2. Abrasivo: Sílica e granalha

Para os testes com sílica misturada com granalha foram realizadas duas pesagens no intervalo de quatro horas cada (exemplificadas em 4 e 8h na Tabela 5.2), passando a cada pesagem pelo processo de limpeza citado no tópico 4.1.1.

Tabela 5.2. Massa das amostras utilizando granalha e sílica como abrasivo.

ID da Amostra	Material Amostra	Peso Inicial (g)	4 horas (g)	8 horas (g)
5	SAE 1045	1755,0	1725,0	1705,0
6	SAE 1045	1775,0	1745,0	1725,0
7	SAE 1045	1790,0	1755,0	1740,0
8	SAE 1045	1770,0	1735,0	1715,0
13	SAE 1518	1760,0	1735,0	1725,0
14	SAE 1518	1765,0	1740,0	1725,0
15	SAE 1518	1785,0	1755,0	1745,0
16	SAE 1518	1795,0	1770,0	1760,0

Para ambos os materiais observou-se um desgaste inicial alto comparado ao primeiro teste que foi utilizado somente granalha, fato este já esperado, de acordo com a literatura, devido a alta dureza da sílica, como pode ser visto na Figura 5.11 para o SAE 1045 e Figura 5.12 para o SAE 1518.

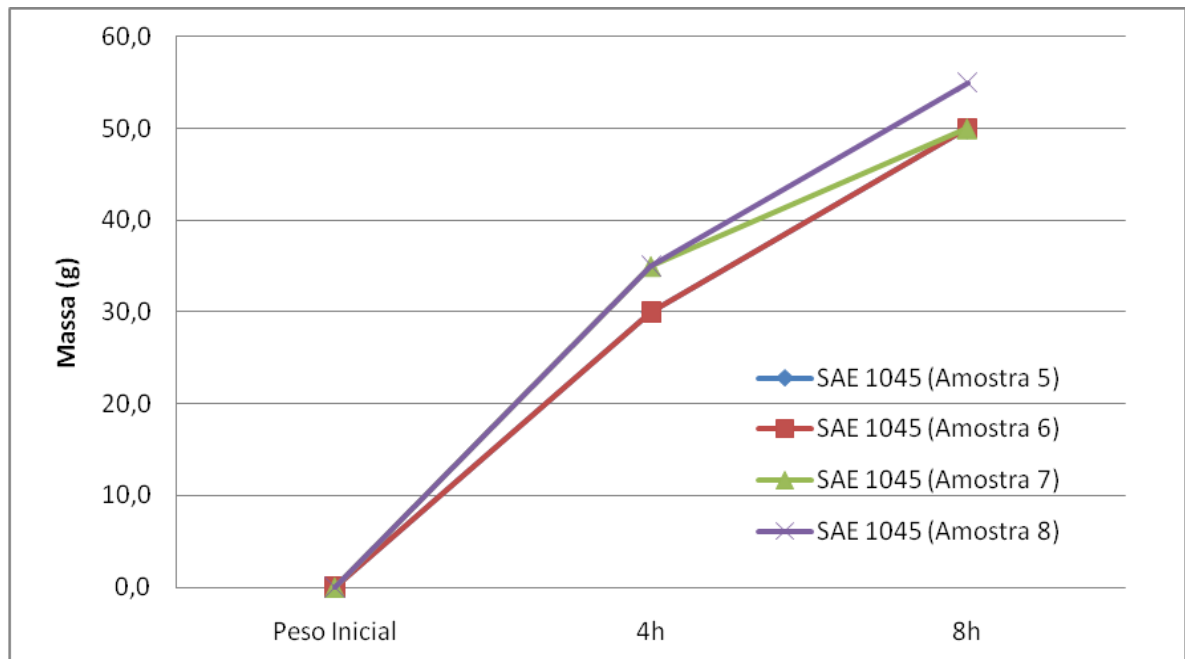


Figura 5.11. Perda de massa SAE 1045 utilizando sílica como abrasivo.

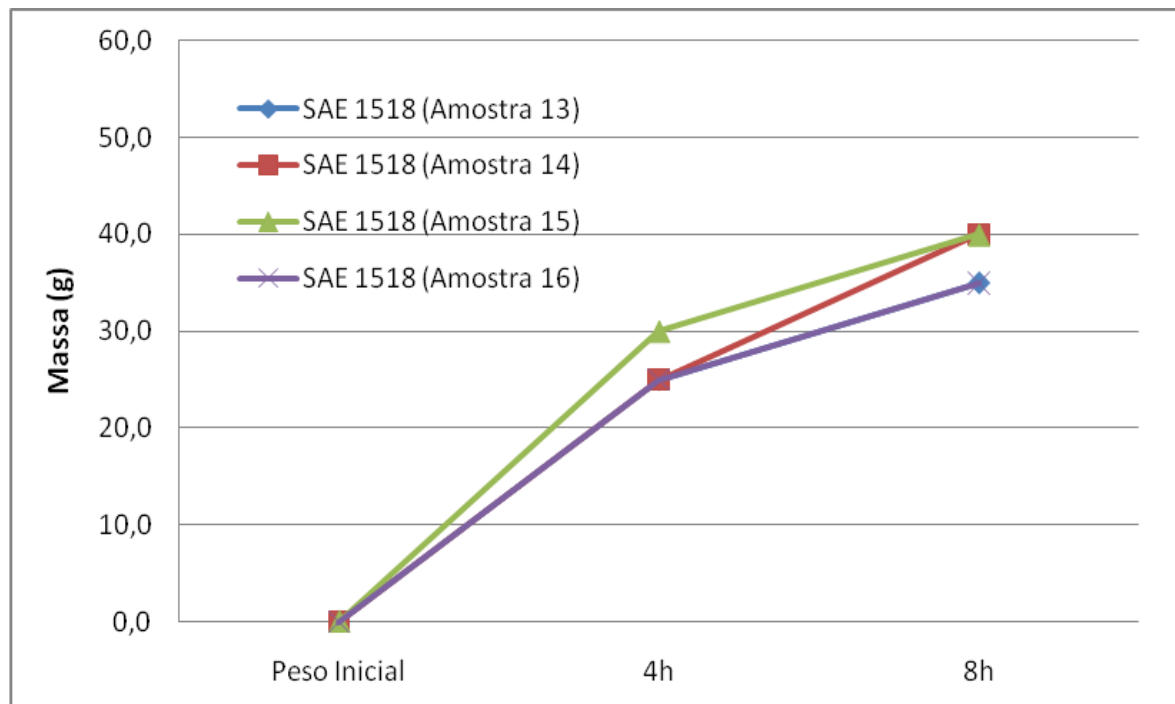


Figura 5.12. Perda de massa SAE 1518 utilizando sílica como abrasivo.

Na Figura 5.13 é possível visualizar as médias e o desvio padrão de desgaste dos dois materiais comparando-os nos intervalos de pesagens.

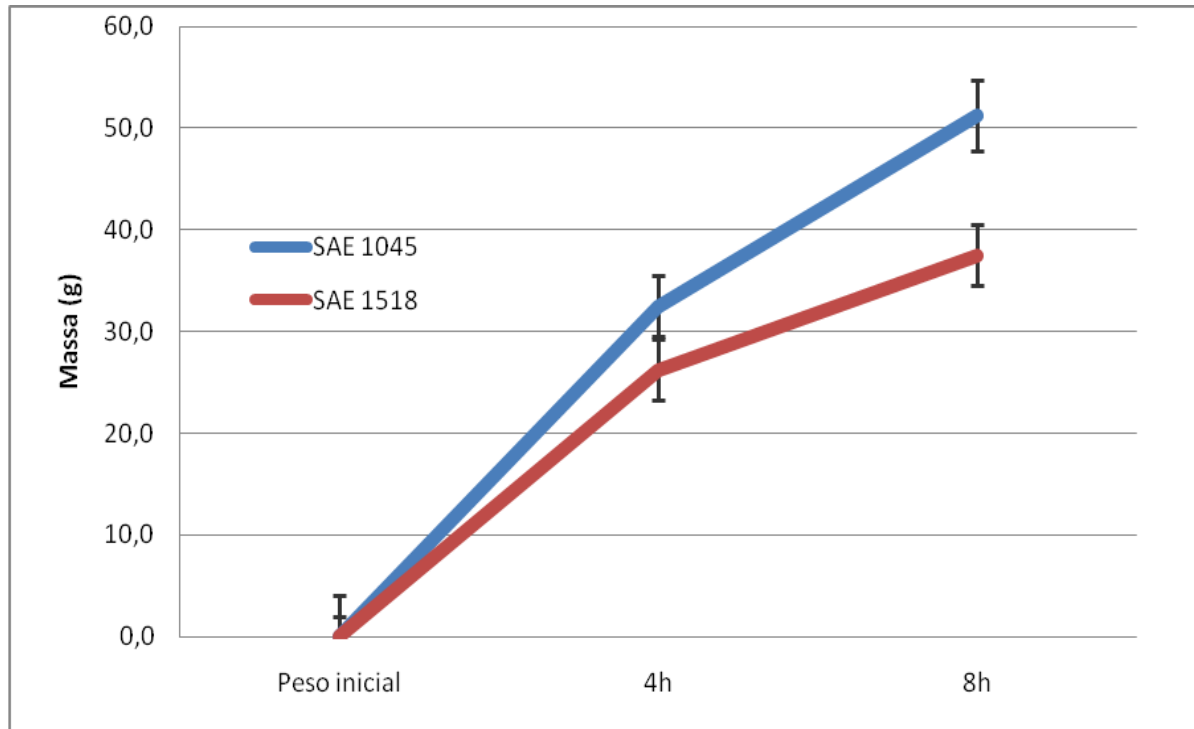


Figura 5.13. Comparativo SAE 1045, com o SAE 1518.

### 5.3. Análise de Variações de Dureza Vickers

Para a medida de dureza foi utilizado um durômetro Vickers da marca E. Leitz (Wetzlar, Alemanha). Foram realizadas cinco identificações em cada amostra, aplicando-se uma carga de 500g. As medidas foram feitas antes e após o ensaio de desgaste, os resultados estão apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3. Dureza Vickers das amostras antes e após o desgaste.

Amostra	Antes (HV)	Após (HV)	Condição
<b>2 (SAE 1045)</b>	250	271	Granalha
<b>5 (SAE 1045)</b>	258	294	Granalha+SiO <sub>2</sub>
<b>10 (SAE 1518)</b>	246	266	Granalha
<b>14 (SAE 1518)</b>	232	285	Granalha+SiO <sub>2</sub>

De acordo com os resultados de dureza Vickers, não foi encontrada uma variação proporcional da mesma com a perda de massa, o que afirma os ensaios propostos por Pintaúde (2002), pois se observou um comportamento diferente, comparando com as durezas. Apesar de ter dureza inferior o SAE 1518 apresentou uma resistência levemente melhor comparada ao SAE 1045.

No que diz respeito à dureza dos abrasivos (Tabela 5.4), a mesma foi analisada para a granalha de aço, no mesmo durômetro e procedimento citado acima, no entanto para a sílica não foi possível fazer a medida devido a sua pequena granulometria (200mesh), então o dado apresentado na tabela é indicado pelo fornecedor da mesma, com base em granulometrias maiores.

Tabela 5.4. Dureza dos abrasivos.

Granalha de aço (Hv/.5)	SiO <sub>2</sub> (Hv)
610	2100-2600

Perante os resultados apresentados, tanto de dureza quanto em tamanho do abrasivo, foi observado que os mesmos resultados propostos por Santana (2012), e Jacobson et.al.(1994), quanto a dureza do abrasivo no desgaste, e parcialmente evidenciando os resultados encontrados por Silva et.al.(2011), onde neste estudo prevaleceu a dureza do abrasivo como fator contribuinte para o desgaste, não o tamanho do abrasivo como o citado em seu artigo.

## **5.4. Análise Macroscópica e Microscópica**

### **5.4.1. Análise das Amostras**

Para a caracterização das microestruturas foi realizada uma preparação metalográfica tradicional, com lixamento e polimento. Para a mesma foi necessário realizar o embutimento das amostras, visando caracterizar melhor a face desgastada e suas interações.

Após os testes de desgaste utilizando granalha como abrasivo foi observado uma diferença na coloração da peça na área de atrito com o abrasivo (Figura 5.14), fato esse que foi visualizado devido à deformação plástica sofrida na região (encruamento).

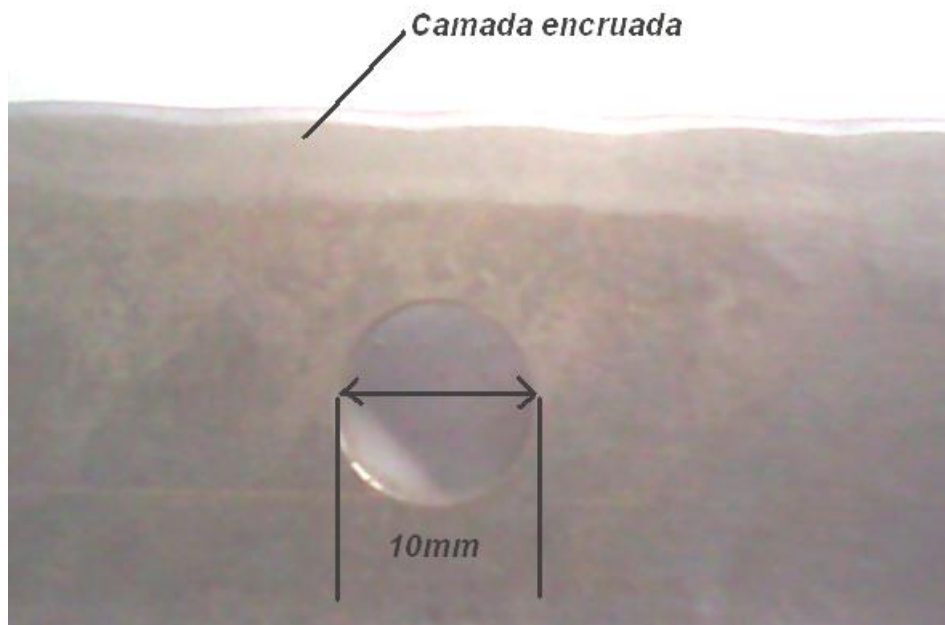


Figura 5.14. Diferença de coloração (desgaste com granalha).

A mesma diferença de coloração foi visualizada nas amostras onde foi usada a mistura de sílica, porém com uma profundidade aproximadamente 50% menor (Figura 5.15). Nesta condição não foi possível afirmar o evidenciado por Pintaúde (2002) onde o tamanho do grão do abrasivo não determina a intensidade do encruamento superficial, pois houve menos intervalos nos testes com sílica, não podendo comparar com a granalha pura.



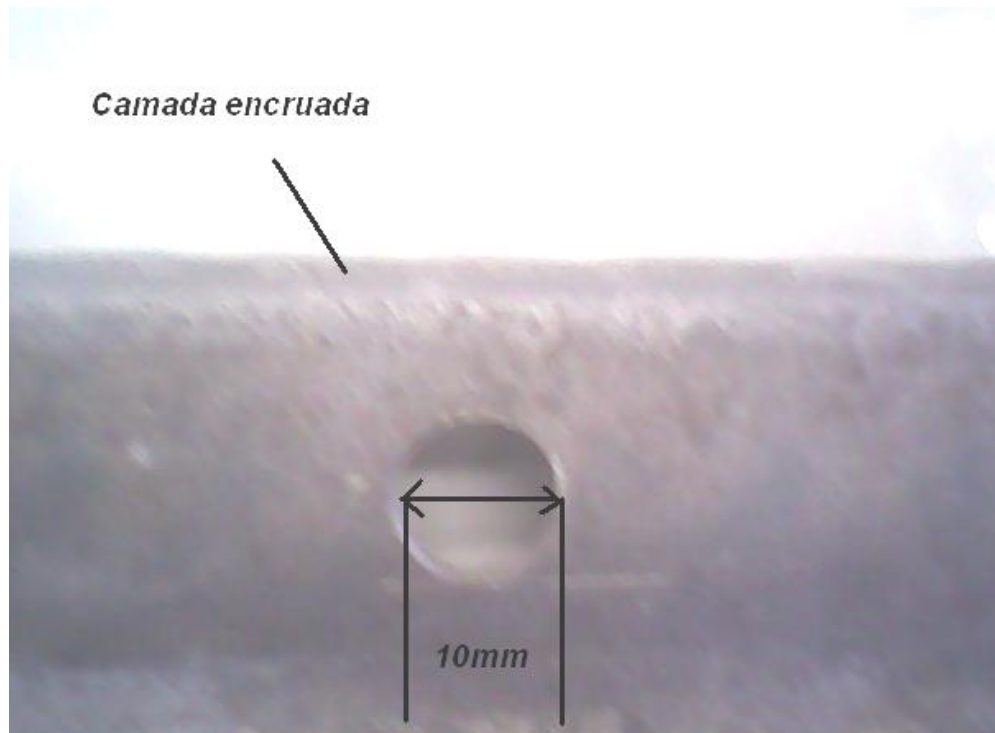
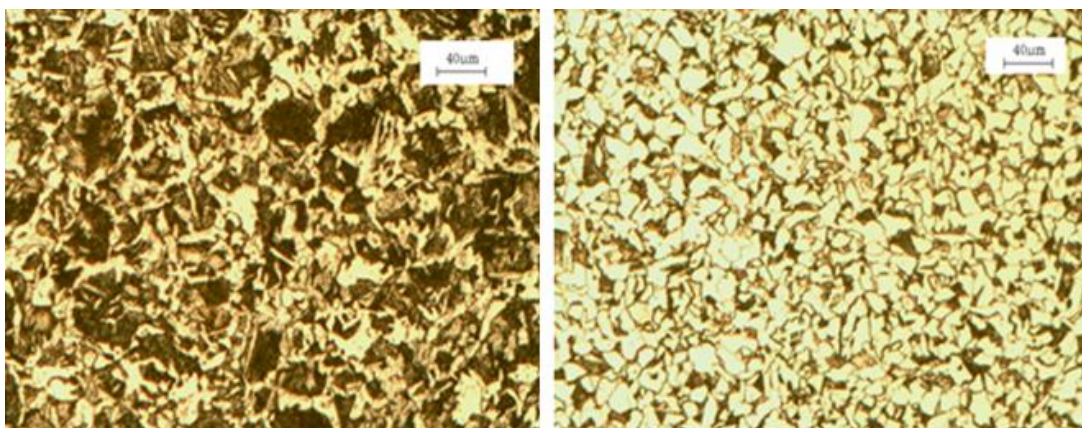


Figura 5.15. Diferença de coloração (desgaste com granalha e sílica).

As análises microscópicas foram feitas por um microscópio óptico (MO) da marca Olympus com câmara digital Sony acoplada. Na Figura 5.16 B é possível visualizar a microestrutura da amostra de SAE 1518, e na Figura 5.16 A a microestrutura da amostra de SAE 1045.



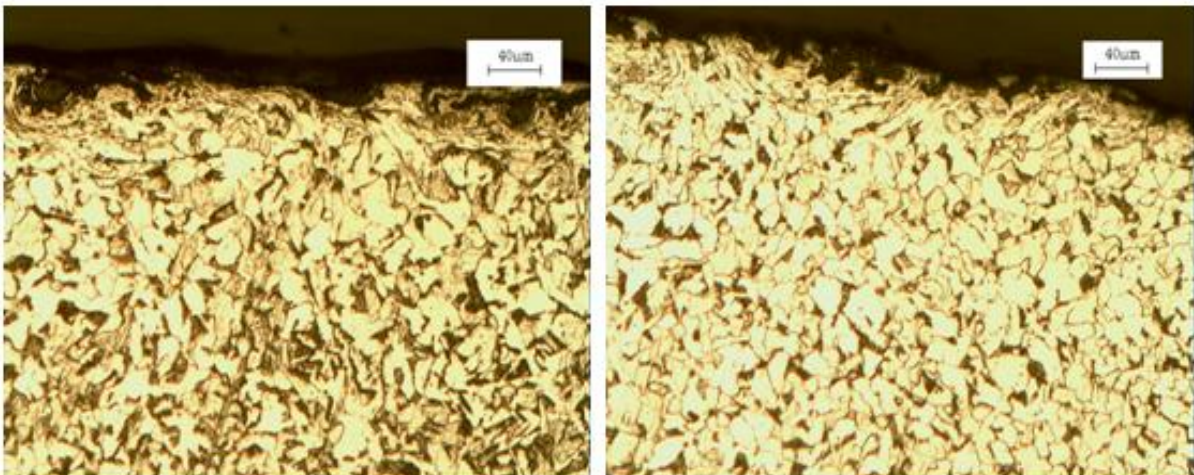
A) Imagem de MO do SAE 1045

B) Imagem de MO do SAE 1518

Figura 5.16. MO centro das amostras, Ataque, Nital, 50X.

Na Figura 5.16. A é possível ver alguns bolsões de perlita (parte escura da imagem, grãos de tamanho demasiado), fato esse que se deve a taxa de resfriamento não controlado para o processo de fabricação da amostra (forjamento) o que levou a recristalização de alguns grãos de perlita, fato típico de um SAE 1045. Já na figura 5.16 B é possível ver a redução drástica de carbono na sua microestrutura, perceptível pela diminuição de perlita formada. Porém não é possível identificar o manganês, pois o mesmo está presente dissolvido na ferrita. Quanto a tamanho de grão é possível visualizar um refino de grão maior na amostra de SAE 1518, o que pode melhorar a sua resistência ao desgaste.

A Figura 5.17 mostra a face desgastada dos dois materiais submetidos ao desgaste da sílica com granalha. Em ambas micrografias é percebida uma deformação plástica em alguns pontos, devido a granalha de aço, pois a baixa granulometria da sílica não chega a deformar tanto o aço, ela causa pequenos riscamentos na superfície (microcorte, ou pistas de desgaste), pois a maior deformação que pode haver é a da amostra, não a do abrasivo. Foi visualizado uma certa descarbonetação da amostra de SAE 1045, fato esse que pode influenciar na sua resistência ao desgaste.

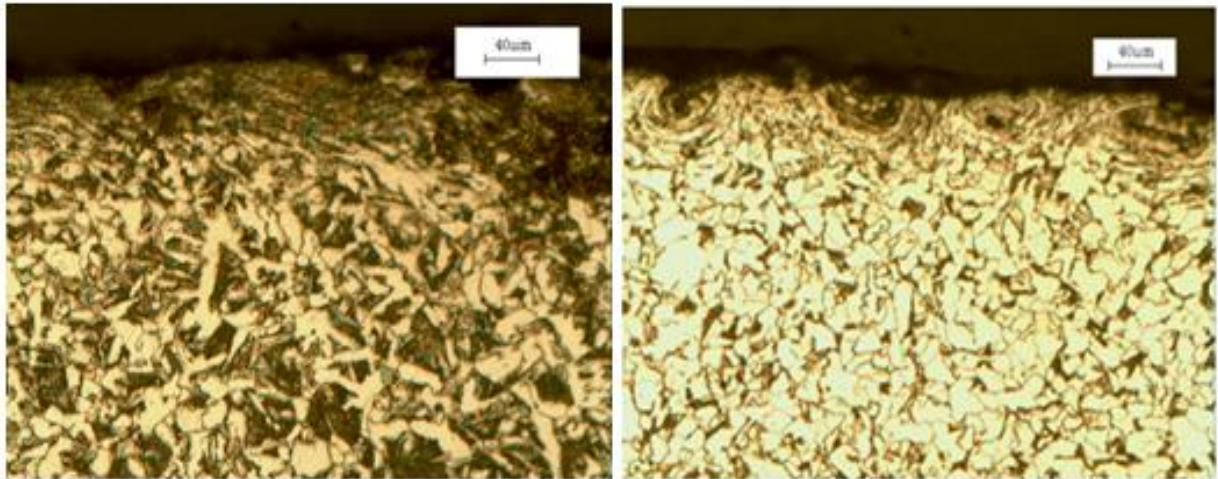


A) Imagem de MO do SAE 1045

B) Imagem de MO do SAE 1518

Figura 5.17. MO da seção transversal das amostras, Ataque, Nital, 200X.

A Figura 5.18 apresenta as amostras submetidas ao desgaste somente da granalha, onde é possível observar uma deformação plástica maior, pois há uma deformação dos dois meios metal-metal, causando um encruamento mais acentuado.



A) Imagem de MO da Amostra SAE 1045

B) Imagem de MO da Amostra SAE 1518

Figura 5.18. MO da seção transversal das amostras, Ataque, Nital, 200x.

Como complemento das micrografias, foram realizadas análises com um microscópio eletrônico de varredura a fim de identificar o mecanismo de desgaste, bem como, as pistas de desgaste que os abrasivos causaram nas amostras. As análises foram feitas com o microscópio eletrônico de varredura da marca Philips, Modelo XL30.

Na Figura 5.19 é possível visualizar a pista de desgaste causada pelo abrasivo nas amostras do SAE 1045, no caso desta imagem foi somente utilizada granalha como abrasivo. Foi possível observar na mesma que houve deformação plástica no sentido de rolamento do abrasivo, e também uma deformação uniforme na superfície submetida ao desgaste, fato este que caracteriza o processo de desgaste por microsulcamento.

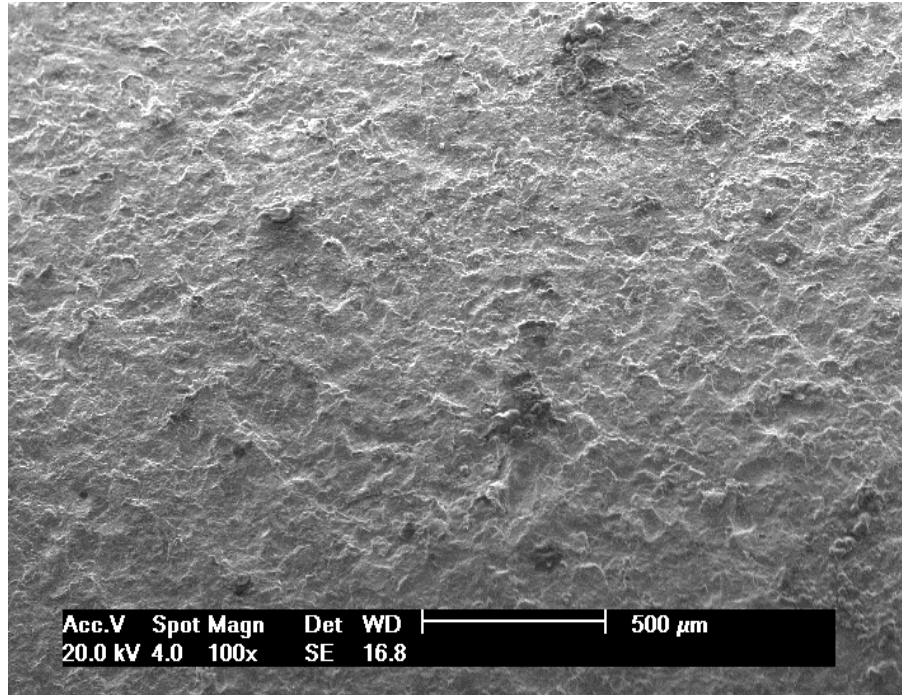


Figura 5.19. MEV das amostras que desgastaram com granalha 100x.

Na Figura 5.20 e 5.21 ilustra o desgaste causado pela mistura de sílica com granalha.

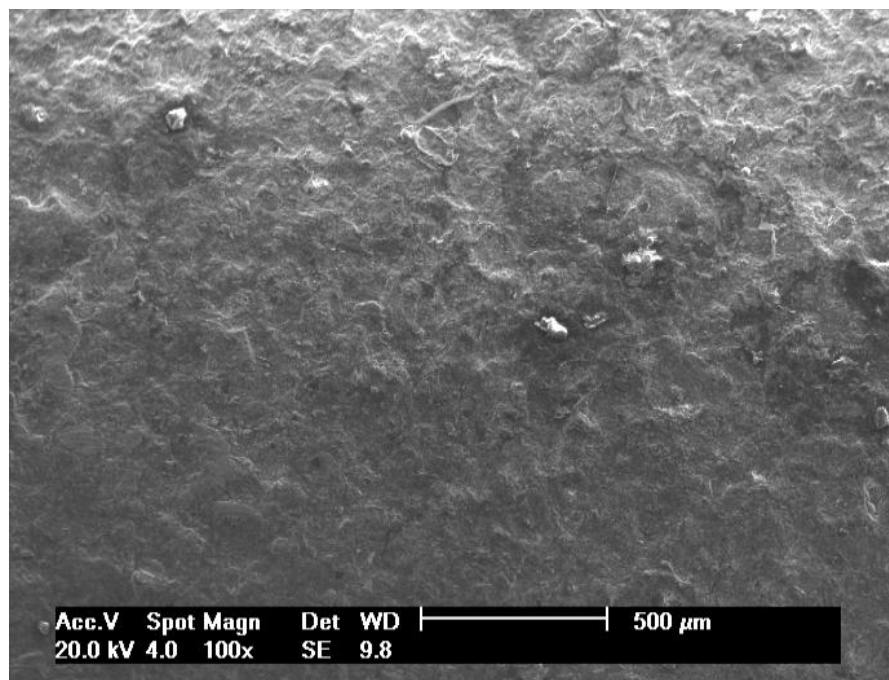


Figura 5.20. Imagem de MEV da Amostra SAE 1045 que desgastaram com granalha e SiO<sub>2</sub>, 100x.

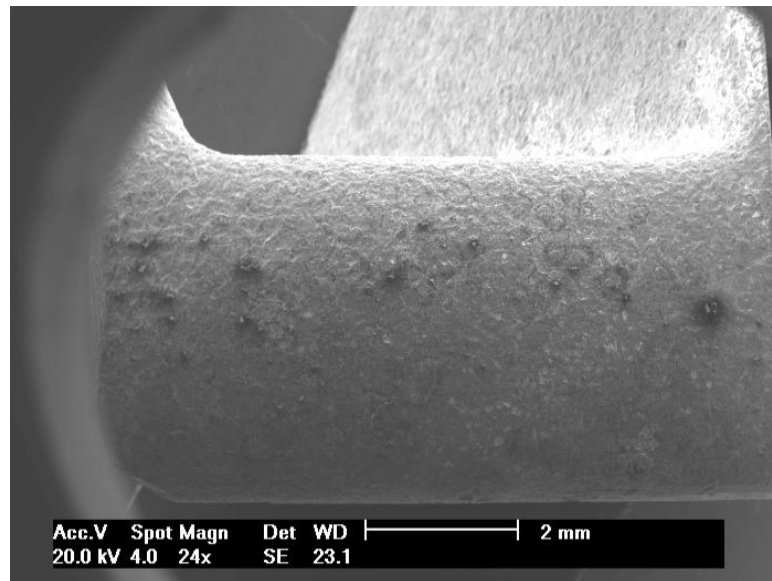
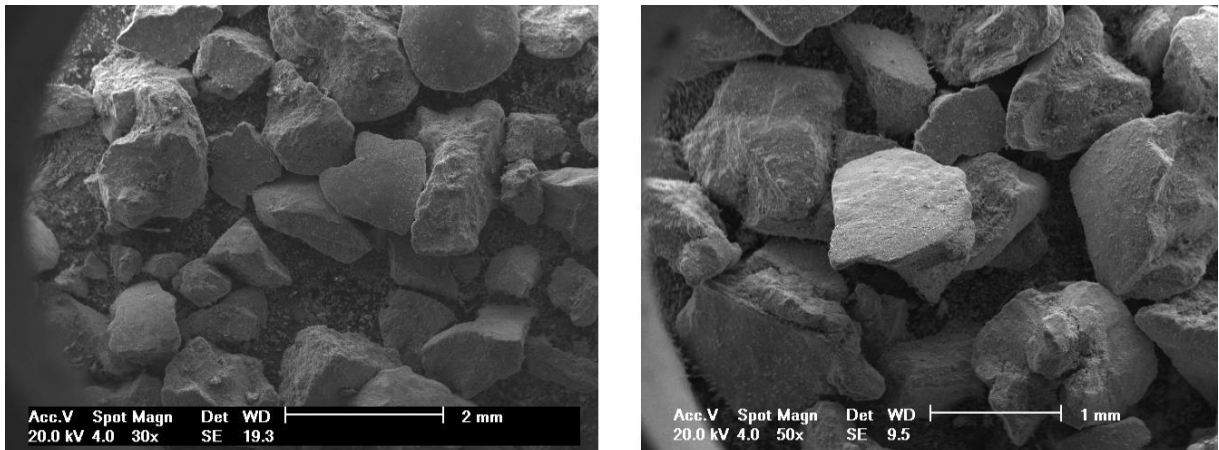


Figura 5.21. Imagem de MEV da face da mostra SAE 1045 que desgastaram com granalha e SiO<sub>2</sub>, 24x.

Nas amostras onde foi utilizado a mistura de sílica como abrasivo, não foi observado um mecanismo diferente de desgaste, apenas observou-se que alguns grãos de sílica ficaram incrustados em alguns espaços vazios na (pontos brancos da Figura 5.21) superfície devido a saída das partículas previamente encruadas, mesmo após a limpeza das amostras.

#### 5.4.2. Desgaste e Quebra do abrasivo

Com base nos dados apresentados na literatura, foram realizadas análises microscópicas nos abrasivos utilizados na bancada, cada um individualmente, onde fosse possível analisar se o mesmo estivesse sofrendo quebra, ou arredondamento de suas geometrias devido ao atrito causado pelas barras de trilha. Na Figura 5.22 é possível ver o MEV da granalha de aço, antes e após o ensaio de desgaste.



A) MEV da Granalha antes do ensaio 30x

B) MEV da Granalha após o ensaio 50x

Figura 5.22. Imagem do MEV da granalha de aço.

Comparando as Figuras A com a B, não é possível observar mudanças na geometria do abrasivo, fato esse não constatado na literatura. Porém não indica que a mesma está errada, pois nessa bancada existe um espaço para que o abrasivo role, e não quebre (fato que deve ser levado em consideração, pois do contrário quebraria o grão de plantas colhidas). Este apenas é um indicativo das características da simulação do sistema de trilha de uma colheitadeira, pois na prática sempre entra grão novo.

Também foi realizada uma microscopia eletrônica de varredura do abrasivo de sílica utilizado na bancada, a fim de caracterizar a sua morfologia, pois a mesma é desconhecida e não foi encontrada na literatura dados sobre o seu formato, se a mesma é angular ou possui formato esférico.

A Figura 5.23 ilustra a morfologia da sílica utilizada como abrasivo para simular o alto teor da mesma presente na casca do arroz. A partir da imagem é possível visualizar que a sílica possui muitas faces pontiagudas, em proporção até maiores que a da granalha, o que leva a mesma a ter uma maior capacidade de riscamento, aliada a sua alta dureza.

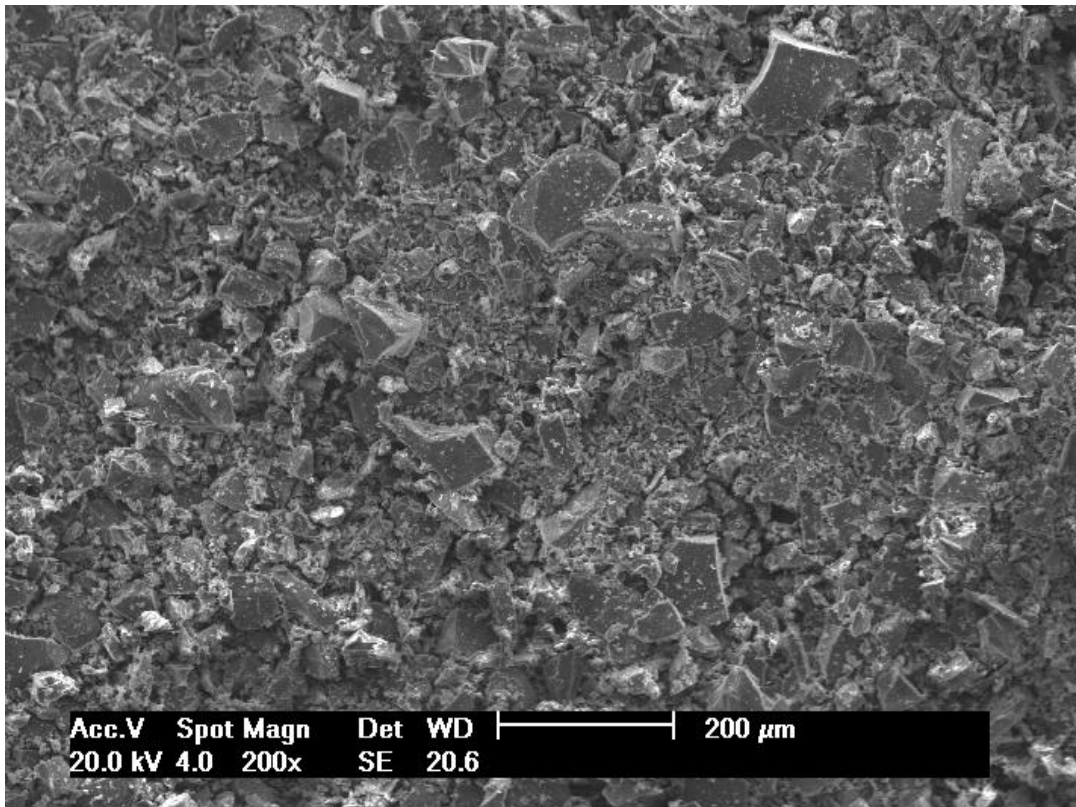


Figura 5.23. Imagem do MEV da sílica antes do ensaio de desgaste, 200x.

Não foram realizadas análises do abrasivo em diversos tempos, estas somente foram feitas nas amostras das barras de trilha.

### 5.5. Análise da Composição Química

Como parte da caracterização das amostras, foi realizado uma análise da composição química das amostras, a ponto de verificar se ambas estão compatíveis com especificação dos aços. A análise foi realizada em um espectrômetro óptico da marca Spectro Analytical Instruments modelo Specrolab, tipo LavId06B. Este espectrômetro tem a resolução de 0,2% a 0,6% para elementos dissolvidos no ferro, e para os não dissolvidos é de 1% a 3%.

A composição dos aços é apresentada nas Tabelas 5.5, e 5.6.

Tabela 5.5. Composição química do SAE 1045.

	C(%)	Si(%)	Mn(%)	P(%)	S(%)
Especificado	0,43 - 0,5	0,10 - 0,35	0,6 - 0,9	0,04 máx.	0,04 máx.
Verificado	0,381	0,181	0,636	0,0193	0,00881

Tabela 5.6. Composição química do SAE 1518.

	C(%)	Si(%)	Mn(%)	P(%)	S(%)
Especificado	0,15 - 0,21	---	1,1 - 1,4	0,04 máx.	0,05 máx.
Verificado	0,187	0,183	1,22	0,0202	0,019

Foi observado que o teor de carbono está abaixo do especificado na amostra do SAE 1045. Já o SAE 1518 está de acordo com a especificação. Ambas as amostras foram retiradas mais de 1 mm de material para a execução do ensaio, ou seja, ambas estão isentas da influência da descarbonetação.



## 6. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados apresentados e discutidos neste trabalho conclui-se que:

- A bancada de testes que foi desenvolvida para a simulação de desgaste teve um desempenho adequado e satisfatório para simular um desgaste acelerado (apresenta eventos em uma escala maior do que a referência, no caso as barras de trilha da colheitadeira), sendo possível a partir da mesma tirar informações de desgaste de diferentes materiais. Entretanto faz-se necessário aumentar a servicibilidade do sistema, para ser possível ciclar mais tempo, diminuindo o setup (intervalos de manutenção);
- O Baixo teor de carbono aliado à presença de manganês dissolvida na ferrita tem influência positiva na resistência ao desgaste abrasivo. Aços com médio carbono como o SAE 1045, podem apresentar uma resistência inicial boa ao desgaste abrasivo, no entanto com o tempo perde mais material que ligas especiais para este tipo de aplicação, dependendo do tipo de abrasivo.
- A sílica pode aumentar muito o potencial de desgaste se incorporado MOG que entra em colheitadeiras, sendo que nos testes realizados aumentou 20% da perda de massa misturado a essa proporção com a granalha de aço.

## 7. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

- Alterar parâmetros na banca de testes como, velocidade e fechamento de côncavo.

Testar materiais alternativos na bancada, visto que a mesma já está construída e pronta e em condição de funcionamento. Materiais alternativos como, compósitos especialmente desenvolvidos para o desgaste abrasivo.

- Testar a influência de diferentes teores de manganês no aço, ou até mesmo em ferro fundido como um componente de desgaste, tentado assim desenvolver um material com custo compatível somente com a adição de manganês.
- Analisar a influência de diferentes teores de sílica na composição da mistura dos abrasivos, visando concluir se o desgaste é linear de acordo com a mistura da mesma.
- Melhorar as condições de trabalho da bancada de testes, visando continuar a sua função na comparação de desgaste abrasivo entre materiais em colhedoras de grãos.
- Executar ensaios de desgaste com a casca do arroz obtida do arroz processado em colheita, visando analisar uma condição mais real.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15814 - **Granalha de Aço Fundido de Alto Carbono para Jateamento**, Rio de Janeiro, Brasil, 2010.

AGCO DO BRASIL. Santa Rosa, 2009. Disponível em < <http://www.agco.com.br/>>, Acesso em 05 set. 2011.

AGUDELO, J.I.P. **Efeito da Forma da Particula Abrasiva no Desgaste de Ligas de Alumínio e de Aço Usadas na Fabricação de Cavidades para Moldes de Injeção de Termoplásticos**. Curitiba, 2011. Dissertação. Universidade tecnológica federal do Paraná. Programa de pós-graduação em engenharia mecânica e de materiais.

ALBERTIN E. Desgaste abrasivo – Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo. In: **58° Congresso Anual da ABM**: Rio de Janeiro: ABM, 2003.

ASTM G32, **Standard Test Method for Cavitation Erosion Using Vibratory Apparatus**. American Society for Testing and Materials. ASM Society: United States, 14 p., 2003.

ASTM G40, **Standard Terminology Relating to Wear and Erosion**. Annual book of standards, Volume 03.02: Wear and Erosion Metal, Corrosion, United States, 2001.

ASTM G65, **Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus**. American Society for Testing and Materials. ASM Society: United States, 12 p., 2002.

ASTM G77, **Standard Test Method for Ranking Resistance of Materials to Sliding Wear Using Block-on-Ring Wear Test**. American Society for Testing and Materials. ASM Society: United States, 11 p., 2010.

ASTM G99-04, **Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus**. American Society for Testing and Materials. ASM Society: United States, 5 p., 2004.

ASTM G105, **Standard Test Method for Conducting Wet Sand/Rubber Wheel Abrasion Tests**. American Society for Testing and Materials. ASM Society: United States, 9 p., 2010.

BAYER, Raymond G; **Mechanical Wear: Fundamentals and Testing**. Marcel Dekker: New York, 395 p., 2004.

BUCKLEY, Donald H; **Surface Effects in Adhesion, Friction and Lubrification**. Elsevier: Amsterdam, 623 p., 1981.

CASSOLA M. S., MORAES S. L., ALBERTIN E. **Desgaste na Mineração: o caso dos Corpos Moedores**. R. Esc. Minas, Ouro Preto, 59(2): 173-178, abr. jun. 2006

CULPIN, C. **Farm Machinery**. Collins Professional and Technical books, 11. ed. [S.I.], 1986.

CYM                    Materiales:                    Abrasivos.                    Disponível                    em:  
<<http://www.cym.com.ar/castellano/prodcast05.html>>. Acesso em: 07 de setembro de 2011.

FERNANDEZ J.E., FERNANDEZ M.D.R, DIAZ R.V, NAVARRO R.T., **Abrasive Wear Analysis Using Factorial Experimental Design**. Elsevier Science B.V. v.255, p.38-43, 2003.

GONELI A.L.D., RODRIGUES D.H., RIBEIRO D.M., CORRÊA P.C. **Análise da Variação das Propriedades Físicas dos Grãos de Soja Durante o Processo de Secagem**. Ciênc. Tecnol. Aliment., Campinas, 25(3): 611-617, jul.-set. 2005.

HÖHER, Alberto. **Design de uma Peneira Rotativa para Colheitadeiras de Grão**. Porto Alegre, 2011. Dissertação. Programa de Pós Graduação em Design, UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL.

HOTZA, D., DELLA V.P., JUNKES J.A., OLIVEIRA A.P.N. **Estudo Comparativo entre a Sílica Obtida por Lixívia ácida da Casca de Arroz Obtida por Tratamento Térmico de Cinza da Casca de Arroz**. Quim. Nova, Vol. 29, No. 6, 1175-1179, 2006.

HUYNH, V.M.; POWELL, T.; SIDDALL, J.N. Threshing and Separating Process – A new mathematical model. **Transactions of the ASAE**. St. Joseph, v.25, n.1, p.65-73. 1982

JACOBSON N.A.S., HOGMARK S. **Influence of Hardness of the Counter Body in Three-Body Abrasive Wear an Overlooked Hardness Effect**. TRIBOLOGY INTERNATIONAL, V.27, N°4 P 233-241, 1994.

JINCHENG X., **Ecodesign for Wear Resistant Ductile Cast Iron with Medium Manganese Content**, Materials and Design, v.24, p. 63-68, 2003.

KRAUSS, George. **Steels: Processing, Structure, and Performance**, P263-280, 2005;

LONGHAY SPECIAL STEEL, AISI 1518 **Carbon steel**, <http://www.steel0.com/index.htm#>, Acesso em 12 de dezembro de 2011.

MOB Minérios Ouro Branco, **Aditivos Minerai**s: **Quartzo** <http://www.ourobranco.com.br>, Acesso em 18 de novembro de 2012.

MODI O.P, PANDIT P., MONDAL D.P., PRASAD B.K., **High-stress Abrasive Wear Response of 0.2% Carbon Dual Phase Steel: Effects of Microstructural Features and Experimental Conditions**, Material Science and Engineering A. v.458, p. 303-311, 2007.

MONTEPINO: Produtos. Disponível em: < <http://www.montepino.com.br/>>. Acesso em 07 de setembro de 2011.

MORAES, Adriano. **Estudo Comparativo do Desgaste de Navalhas de Aço AISI S1 e SAE 4340 Durante o Corte da Sucata**. Porto Alegre, 2011. Dissertação. Programa de Pós graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL.

NAHVI S.M., SHIPWAY P.H., McCARTNEY D.G., **Particle Motion and Modes of Wear in the dry Sand-Rubber Wheel Abrasion Test**. Elsevier Science B.V. v.267, p.2083-2091, 2009.

NETTO R.M., **Materiais Pozolânicos - Tecnologia e Produtividade das Construções**. Belo Horizonte, 2006. Monografia. Escola de Engenharia da UFMG.

PINTAÚDE, Giuseppe., **Análise dos Regimes Moderado e Severo de Desgaste Abrasivo Utilizando Ensaio Instrumentados de Dureza**. São Paulo, 2002. Tese. Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Mecânica.

POORYA, Hosseini; Radziszewski, Peter. **Combined Study of Wear and Abrasive Fragmentation Using Steel Wheel Abrasion Test**. Elsevier Science B.V. v.271, p. 689-686, 2011.

POUEY, M. T. F. **Beneficiamento da Cinza de Casca de Arroz Residual com Vistas à Produção de Cimento Composto e/ou Pozolânico**. Tese. Porto Alegre, 2006. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

RICHARDSON, R.C.D. **The Wear of Metals by Relatively Soft Abrasives**, Wear, V.11,p.245-75, 1968. Elsevier Science B.V

RIBEIRO, Rubens **.Avaliação da Resistência ao Desgaste Abrasivo de Revestimentos Soldados do tipo Fe-C-Cr Utilizados na Indústria Sucroalcooleira**. Ilha Solteira.2004.Dissertação. Programa de Pós-graduação em Engenharia mecânica. UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA.

RICHEY, C. .; JACOBSON, P.; HALL, C. W. **Agricultural Engineers' handbook**. 52617. ed. New York: McGRAW-HILL BOOK COMPANY, INC., 1961.

SANTANA, A.L.B., PITAÚDE G., PERUCHI L. **Resistência ao Desgaste Abrasivos dos Aços AISI 1045 e AISI P20 Ensaados em Roda de Borracha**. Universidade Tecnológica do Paraná, XVII SICITE, 2012.

SCHANOSKI R., RIGHI E.Z., WERNER V. **Perdas na Colheita Mecanizada de Soja no município de Maripá – PR**, Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental v.15, n.11, p.1206–1211, 2011

SILVA F.J.G., Casais R.B., Martinho R.P., Baptista A.P.M. **Role of Abrasive Material on Micro-abrasion Wear Tests**. Elsevier Science B.V. v.271, p. 2632-2639, 2011.

SILVA E.R., SANTOS R.F., SOUSA L.B.F., **Comparação de Desempenho entre os pós Abrasivos de Carbetto de Silício (SiC) e Alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) no Processo Híbrido AJEDM**. Universidade Federal de Uberlândia, 20º POSMEC, 2007.

SINATORA A. **Introdução ao Estudo do Atrito e Desgaste** - Instituto Nacional de engenharia de superfícies. Universidade de Caxias do Sul, 2009.

STACHOWIAK G.B.;Stachowiak G.W. **The Effects of Particle Characteristics on Three-body Abrasive Wear**. Elsevier Science B.V. v.249, p. 201-207, 2001.

STACHOWIAK, Gwidon W.; Batchelor, Andrew W. **Engineering Tribology**. 3.ed. Butterworth-Heinemann: Boston, 832 p., 2005.

TORREIRA, Raul Peragallo. **Fluidos Térmicos: Água, Vapor, Óleos Térmicos**. Hemus: São Paulo, 319 p., 2002.

U.S. DEPARTAMENT OF AGRICULTURE. **Farmers' Buletin No.1761**. Harvesting With Combines, 44 p. 1955.



VERDI, Josué. **Dispositivo Pino-Disco para Análise de Desgaste na Presença de Diesel e Biodiesel.** Porto Alegre. 2011. Dissertação. Programa de Pós Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL.

WAINER, E. & BRANDI, D.S. & HOMEN, F.D. - **Soldagem Processos e Metalurgia.** Ed.Edgard Blucher - SP. Brasil, 1992.