



PUCRS

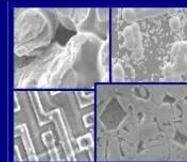
PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

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

Faculdade de Engenharia

Faculdade de Física

Faculdade de Química



PGETEMA

DISPOSITIVO PINO-DISCO PARA ANÁLISE DE DESGASTE NA PRESENÇA DE DIESEL E BIODIESEL

JOSUÉ VERDI

ENGENHEIRO DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Porto Alegre

Agosto, 2011



PUCRS

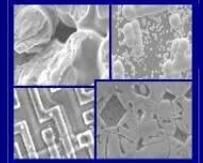
PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

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

Faculdade de Engenharia

Faculdade de Física

Faculdade de Química



PGETEMA

DISPOSITIVO PINO-DISCO PARA ANÁLISE DE DESGASTE NA PRESENÇA DE DIESEL E BIODIESEL

JOSUE VERDI

ENGENHEIRO DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

PROF. DR. CARLOS ALEXANDRE DOS SANTOS

Trabalho realizado 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

Agosto, 2011

“A sabedoria não vem automaticamente com a idade. Nada vem – exceto rugas. É verdade, alguns vinhos melhoram com o tempo, mas apenas se as uvas eram boas em primeiro lugar.”

Abigail Van Buren

DEDICATÓRIA

À minha família, pelo apoio e motivação incondicional que me proporcionaram em toda a minha vida acadêmica.

À minha namorada, pela compreensão das horas que deixei de ficar com ela para poder me dedicar aos meus estudos.

A todos os colegas e professores de pós-graduação que de algum modo me auxiliaram em momentos difíceis.

A Deus por ter colocado todas as pessoas citadas acima em minha vida e ter me feito uma pessoa completa e capaz, possibilitando o surgimento de várias oportunidades na minha vida.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, professor Carlos Alexandre dos Santos pelo companheirismo e orientação.

Aos familiares, namorada e amigos por estarem sempre me apoiando e fazerem parte da minha vida.

À PUCRS, ao CNPq, à FAPERGS e à FINEP.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	4
AGRADECIMENTOS	5
SUMÁRIO	6
LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE TABELAS	11
LISTA DE SÍMBOLOS	12
RESUMO	13
ABSTRACT	14
1. INTRODUÇÃO	15
1.1. Cenário Brasileiro do Biodiesel	16
2. OBJETIVOS	18
2.1. Objetivos Específicos	18
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
3.1. Tribologia.....	20
3.1.1. Soluções Tribológicas.....	21
3.2. Desgaste	21
3.2.1. Desgaste Abrasivo.....	23
3.2.2. Desgaste Erosivo.....	23
3.2.3. Desgaste por Corrosão.....	24
3.2.4. Desgaste por Cavitação.....	25
3.3. Mecanismo de Desgaste das Ligas Alumínio-Silício	26
3.4. Lubrificantes.....	31
3.5. Combustíveis.....	32
3.6. Motores Ciclo Diesel	36
3.7. Ensaio de Desgaste	40
3.7.1. Ensaio de Disco de Borracha com Areia	40
3.7.2. Ensaio de Erosão de Partículas Sólidas.....	41
3.7.3. Ensaio de Erosão por Cavitação	41

3.7.4. Ensaio de Desgaste de Quatro Esferas.....	42
3.7.5. Ensaio de Desgaste Bloco-Disco.....	43
3.7.6. Ensaio de Desgaste Pino-Disco	43
4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	47
4.1. Dispositivo de Teste	48
4.1.1. Projeto Mecânico	48
4.1.2. Projeto Eletrônico.....	50
4.1.3. Projeto Elétrico.....	57
5. PLANO DE VALIDAÇÃO	60
5.1. Preparação das Amostras	61
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	64
6.1. Construção e Calibração do Dispositivo	64
6.2. Ensaio Preliminares.....	66
6.2.1. Variação Volumétrica e Coeficiente de Desgaste.....	67
6.2.2. Análise Microscópica	68
7. CONCLUSÕES	73
8. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	74
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	75

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Setor rodoviário brasileiro (BRASIL, 2009).	15
Figura 1.2 – Fontes de biodiesel (BRASIL, 2009).	17
Figura 3.1. Soluções tribológicas (STOETERAU, 2004).	22
Figura 3.2. Desgaste abrasivo de dois corpos (STACHOWIAK, 2001).	23
Figura 3.3. Desgaste abrasivo de três corpos (STACHOWIAK, 2001).	23
Figura 3.4. Mecanismos de erosão (STACHOWIAK, 2001).	24
Figura 3.5. Efeitos das superfícies corroídas (STACHOWIAK, 2001).	25
Figura 3.6. Lâminas de silício protegendo a matriz de alumínio (MAHATO, 2010)...	26
Figura 3.7. Arranjos do dispositivo Pino-Disco (SO, 1996).	27
Figura 3.8. Mecanismo de delaminação do Al-Si (MAHATO, 2010).	28
Figura 3.9. Regime DUM mostra deformação ao redor das partículas de silício nas primeiras horas de ensaio (MAHATO, 2010).	29
Figura 3.10. Alterações superficiais do DUM (MAHATO, 2010).	30
Figura 3.11: Transesterificação de Triacilgliceróis. R – Cadeia Carbônica de Ácidos Graxos. R' – Cadeia Carbônica do Álcool Reagente (CONDE, 2007). ...	35
Figura 3.12: Fluxograma de produção de biodiesel por transesterificação (CONDE, 2007).	35
Figura 3.13. Componentes de motores diesel (KEGK, 2008).	37
Figura 3.14. Desgaste do pistão da bomba injetora (FRAER, 2005).	38
Figura 3.15. Depósitos de carbono sob o bico injetor (KEGL, 2008).	38
Figura 3.16. Acúmulo de carvão nos pistões (KEGL, 2008).	39
Figura 3.17. Desgaste das bronzinas sob efeito de biodiesel e diesel (FRAER, 2005).	39

Figura 3.18. Esquemático do dispositivo de teste e morfologia do desgaste (BAYER, 2004).....	40
Figura 3.19. Dispositivo para teste de desgaste por erosão (BAYER, 2004).....	41
Figura 3.20. Teste de desgaste por cavitação (BAYER, 2004).....	42
Figura 3.21. Esquemático do teste com Quatro Esferas (ASTM D4172, 2010).....	42
Figura 3.22. Teste de análise de desgaste bloco-disco (ASTM G77, 2010).....	43
Figura 3.23. Representação esquemática do dispositivo Pino-Disco (ASTM G99, 2004).....	44
Figura 3.24. Taxa de desgaste (YANG,2005).	46
Figura 4.1. Fluxograma das atividades da metodologia.....	47
Figura 4.2. Projeto inicial do dispositivo de desgaste.....	48
Figura 4.3. Projeto final do dispositivo de desgaste proposto.	49
Figura 4.4. Dimensões parciais do dispositivo de teste projetado (em milímetros)...	50
Figura 4.5. Placa de controle.	51
Figura 4.6. Instrumentação do controle de revoluções.	52
Figura 4.7. Sinal gerado pelo sensor óptico.....	52
Figura 4.8. Controle do processo.....	54
Figura 4.9. Controle de processo malha fechada.	54
Figura 4.11. Timer gerado a cada milissegundo.	56
Figura 4.12. Interrupção gerada a cada revolução do disco.	56
Figura 4.10. Laço principal.....	56
Figura 4.13. Função de controle.	56
Figura 4.14. Motor CC Pittman 12V.	57

Figura 4.15. Driver de potência para acionamento do motor.	58
Figura 4.16. Fluxo de corrente no driver de potência.	58
Figura 4.17. Driver de Potência.....	59
Figura 5.1. (A e B) Microestruturas do Al-Si (MO) e (MEV), (C a F) EDS.	63
Figura 6.1. Tribômetro para ensaio de desgaste pino-disco.	65
Figura 6.2. Disco após ensaio de desgaste.	66
Figura 6.3. Análises com MEV e MO – B5 x 5N.....	69
Figura 6.4. Análises com MEV e MO - B100 x 5N	70
Figura 6.5. Análises com MEV e MO - B5 x 8N	71
Figura 6.6. Análises com MEV e MO - B100 x 8N	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Especificação de alguns óleos vegetais em natura e óleo diesel (CONDE, 2007).....	34
Tabela 5.1. Características da liga Al-Si utilizada no disco.....	62
Tabela 6.1. Características dos discos.	67

LISTA DE SÍMBOLOS

ANP	Agência Nacional de Petróleo, Gás e Biocombustíveis
ASTM	American Society for Testing Materials
Bx	Mistura de diesel com adição de X% de biodiesel
PNPB	Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel
IC	Índice de Cetano
PM	Parte por Milhão
CO	Dióxido de Carbono
HC	Hidrocarbonetos
NOx	Óxido de Nitrogênio
DM	Desgaste Moderado
DS	Desgaste Severo
DUM	Desgaste Ultra Moderado
AA	Aluminum Association

RESUMO

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.

Desde o surgimento dos programas nacionais para a adição de biodiesel no diesel, diversos grupos têm estudado a eficácia deste combustível, abordando aspectos econômicos, de meio ambiente, desempenho e durabilidade dos motores diesel. O presente trabalho tem o objetivo de projetar, construir e testar um tribômetro para análise de materiais submersos em biodiesel e diesel. O equipamento de teste foi desenvolvido tendo como referência a norma ASTM G99 – 95a (Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus). A validação do projeto se realizou mediante ensaios de desgaste da liga alumínio-silício AA305 em duas condições: na presença de diesel (B5) e na presença de biodiesel (B100), com rotação fixa de 220 rpm, e forças de 5 N e 8 N durante períodos de 150.000 ciclos. As análises dos dados tiveram como finalidade fazer um comparativo do desgaste da liga em estudo, utilizada em motores diesel, em diferentes soluções. Após os ensaios foram analisadas as perdas de massa, a topografia do disco e a microestrutura. A análise qualitativa das amostras indicou melhor lubrificidade do biodiesel (B100) para as condições de teste adotadas.

Palavras-Chaves: Pino-Disco, Desgaste, Diesel, Biodiesel, Alumínio-Silício.

ABSTRACT

VERDI, Josué. **Pin-on-Disk Device to Analyze Wear in Presence of Diesel and Biodiesel**. Porto Alegre. 2011. Master Thesis. Graduation Program in Materials Engineering and Technology, PONTIFICAL CATHOLIC UNIVERSITY OF RIO GRANDE DO SUL.

Since the biodiesel national programs began, many research groups have been studied this fuel efficiency, such as economical aspects, environments effects and engine performance and durability. The research objective was project and build a pin-on-disk device test per ASTM G99 – 95a (Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus) to test material wear under diesel (B5) biodiesel (B100). The project validation was realized by performing aluminum-silicon wear test under two conditions: in presence of diesel (B5) and in presence of biodiesel (B100), with fix speed of 220 rpm, pin load of 5 N and 8 N during 150,000 cycles. The test analysis desired to compare the wear of an alloy used in diesel engines under different solutions. After the wear test, the disc weight loss, the topography and the microstructure were analyzed. The qualitative preliminary result shows better lubricates of biodiesel (B100) to test conditions adopted.

Key-words: Pin on Disk, Wear, Diesel, Biodiesel, Aluminum-Silicon Alloy.

1. INTRODUÇÃO

A alta demanda de combustíveis fósseis para geração de energia tem alavancado a pesquisa para o desenvolvimento de combustíveis renováveis para integrar a matriz energética brasileira, diminuindo a dependência do petróleo e reduzindo as emissões de gases poluentes. Muitos combustíveis vem sendo desenvolvidos, mas poucos deles alcançam o desenvolvimento sustentável nos aspectos energético, econômico, social e ambiental. Para o caso de veículos leves foi implementado com sucesso o programa PROÁLCOOL em meados de 1980, utilizando um biocombustível (Etanol) menos poluente que a gasolina. Por suprir toda a frota de veículos pesados, principalmente caminhões de transporte, ônibus e máquinas agrícolas, o diesel tem fundamental importância no Brasil. O gráfico da Figura 1.1 ilustra a distribuição dos combustíveis no setor rodoviário brasileiro no ano de 2009 (BRASIL, 2009).

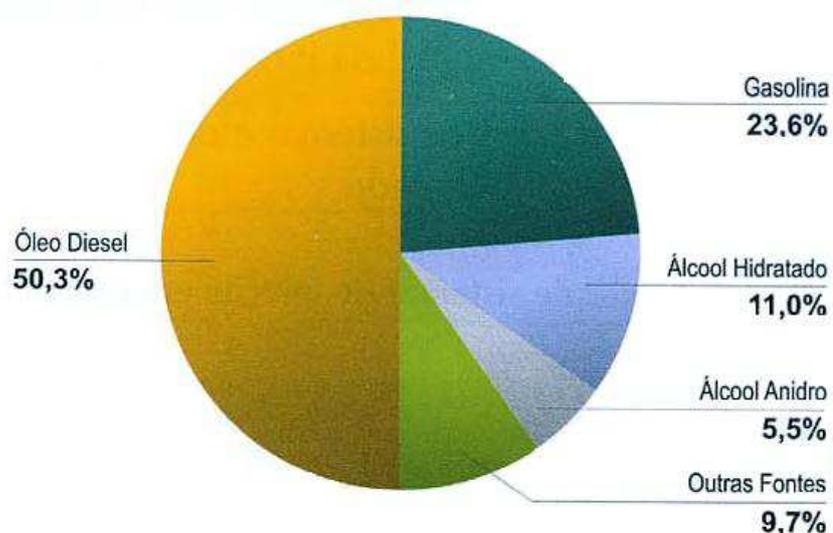


Figura 1.1 – Setor rodoviário brasileiro (BRASIL, 2009).

Há grande empenho para garantir que os proprietários de veículos não venham a ser penalizados pelo uso do biodiesel, tendo a vida útil de seus veículos afetados pelo uso do mesmo. A ANP (Agência Nacional de Petróleo, Gás e Biocombustíveis) divulgou em BRASIL, 2009 seu estudo, realizado em uma rede de laboratórios e institutos credenciados, que o uso de B5 (diesel com adição de 5% de biodiesel) é viável em motores ciclo diesel convencional, sem sofrer alteração de desempenho e vida útil.

1.1. Cenário Brasileiro do Biodiesel

Desde os anos 70, com a criação do programa pró-álcool, o Brasil mostrou dominar as tecnologias para a produção de combustíveis de fonte renovável. No ano de 2005, o Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB) estabeleceu as metas para o uso do biodiesel. Entre os anos de 2008 e 2012 seria obrigatório o uso de 2% de biodiesel (B2) em todo o diesel comercializado no território nacional. No ano de 2013 seria migrado para o B5, mas pela rápida evolução da produção brasileira, antecipou-se o uso do B5 para 2010 (BRASIL, 2009).

A produção brasileira de biodiesel vem aumentando expressivamente ano após ano. A produção de 732 mil litros no ano de 2005 chegou a 1,6 bilhões no ano de 2009. Em 2010 a produção foi aproximadamente 50% maior do que no ano anterior, o que se refletiu na produção obtida de 2,4 bilhões de litros (POWER, 2010).

Os pesquisadores vêm estudando diversas fontes de óleo para a produção do biodiesel, mas no cenário atual o biodiesel é feito basicamente de óleo de soja e gordura animal (sebo bovino), conforme ilustração do gráfico da Figura 1.2. Outras fontes como palmeira de dendê mostram-se bastante atraentes, mas a produção para tal fim ainda é modesta. Outras espécies como algodão, pinhão manso, mamona, girassol e amendoim, além de óleos residuais de cocção (fritura) estão sendo avaliadas em relação à viabilidade técnica, econômica e sócio-ambiental (BRASIL, 2009).

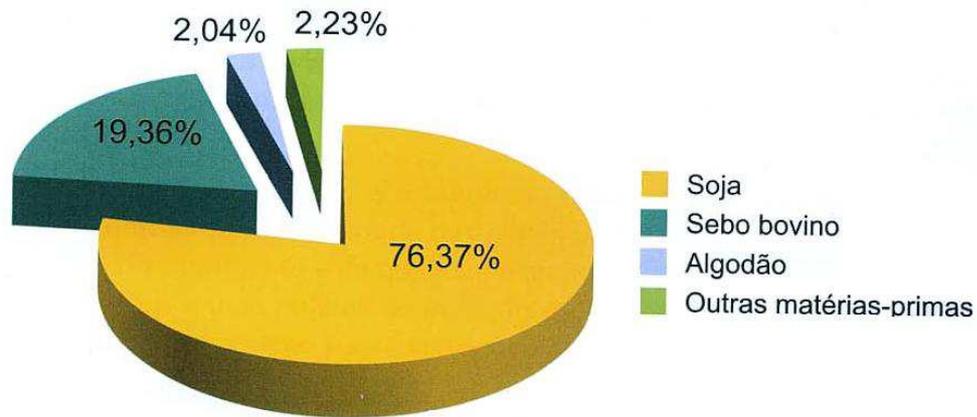


Figura 1.2 – Fontes de biodiesel (BRASIL, 2009).

Para apresentação deste trabalho estabeleceu-se a seguinte seqüência: no Capítulo 2 está apresentado o objetivo principal da pesquisa, e no Capítulo 3 a fundamentação teórica sobre desgaste, lubrificantes, combustíveis, testes de desgaste, e motores diesel. O Capítulo 4 mostra o procedimento experimental, com todas as etapas de desenvolvimento do dispositivo, enquanto no Capítulo 5 é apresentado o plano de validação. Os resultados e as discussões pertinentes são abordados no capítulo 6, seguido das conclusões no Capítulo 7, e das sugestões para trabalhos futuros e bibliografia nos capítulos seguintes.

2. OBJETIVOS

O presente trabalho teve o objetivo de projetar, construir e testar um tribômetro que possibilite o estudo de desgaste de materiais submersos em diesel e biodiesel, dada a crescente demanda de pesquisa na busca de um combustível de fonte renovável e menos poluente para substituir o diesel.

Procedimentos normatizados podem ser utilizados para determinar o desgaste dos componentes mecânicos com maior agilidade se comparados às condições reais de utilização. Neste trabalho será projetado um dispositivo de desgaste do tipo pino-disco conforme a norma ASTM G99 (Teste de Desgaste com Dispositivo Pino-Disco). Será feita uma adequação na norma para possibilitar análises de materiais submersos em combustíveis. Para a validação do projeto, será estudada a variação de desgaste da liga AA305 (alumínio-silício) submersa em B5 (diesel comercial) e B100 (biodiesel puro).

2.1. Objetivos Específicos

- Revisar conceitos tribológicos que afetam o comportamento dos materiais em ensaio de desgaste, como os mecanismos de interação entre as superfícies e a ação de lubrificantes.
- Projetar e construir um dispositivo para estudar o desgaste de materiais submersos em biocombustíveis. O ensaio de desgaste segue procedimentos laboratoriais para determinar o desgaste durante o deslizamento de um pino sobre um disco.

- Executar ensaios para fazer a calibração do dispositivo, que deve manter a velocidade do disco constante durante o ensaio, executar o número de revoluções pré-determinado e aplicar a carga do pino sobre o disco sem perdas na mancalização.
- A etapa de validação será constituída pela comparação de ensaio submerso em B5 e ensaio submerso em B100. Será executado um ensaio de 150.000 ciclos para cada caso e após serão feitas análises nas amostras para evidenciar os mecanismos de desgaste.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Dispositivos de análise laboratorial de desgaste são dispositivos que buscam reproduzir fenômenos que acontecem no dia-a-dia de maneira acelerada e controlada.

Para uma análise de desgaste fundamentada é necessário entender todas as variáveis que se encontram por trás de um ensaio, pois muitas vezes a soma de diversos fatores acaba convergindo o ensaio para um resultado distante do esperado.

Nos tópicos seguintes, serão revisados conceitos de tribologia, desgaste e lubrificantes que englobam o universo dos conceitos em que um dispositivo de desgaste pino-disco se encontra. Será feita uma prévia revisão do mecanismo de desgaste do alumínio-silício e de combustíveis, uma vez que a validação do dispositivo se dará mediante estudo dos mesmos. Também serão revisados artigos que contenham análises de desgaste de motores com uso de biodiesel para que se possa fazer uma analogia entre a aplicação real do biodiesel e o ensaio executado na validação. Finalizando a revisão bibliográfica, serão citados alguns tipos de dispositivos de análise de desgaste.

3.1. Tribologia

Tribologia é a ciência que estuda a interação de superfícies e seus assuntos relacionados. Popularmente esta ciência é conhecida como lubrificação, desgaste e atrito, incluindo os estudos da interação física e química de componentes,

distribuição de forças, conversão de energia e alteração de topografia (BHUSHAN, 2002).

O desgaste é a maior causa de descarte e perda de propriedades mecânicas dos componentes mecânicos e qualquer redução no desgaste tem saldo positivo no orçamento da manutenção, sendo também a principal causa de perdas de energia por dissipação. A lubrificação é uma técnica efetiva para controlar o desgaste e reduzir o atrito (STACHOWIAK, 2001), condição indispensável em um motor de combustão interna ciclo Otto ou ciclo Diesel.

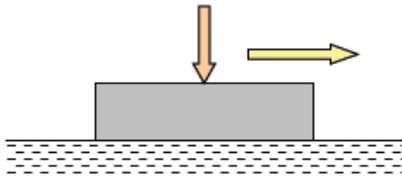
A seguir são apresentados alguns conceitos e definições básicas sobre tribologia: lubrificação e desgaste.

3.1.1. Soluções Tribológicas

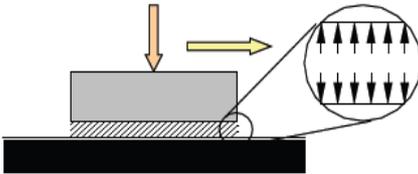
Todo projeto sujeito a cargas e a deslocamento entre as partes necessita de análise tribológica para ter sucesso. A solução mais lógica é o uso de lubrificantes, mas dependendo da complexidade do projeto devem-se adotar outras práticas (STOETERAU, 2004).

3.2. Desgaste

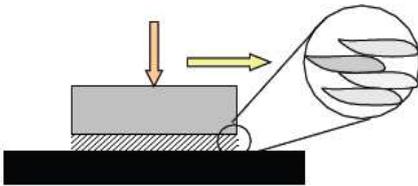
As formas de desgastes mais comuns são o desgaste abrasivo, desgaste erosivo, desgaste corrosivo e a cavitação. Desgastes abrasivos e erosivos são formas de desgastes causadas entre partículas e material sólido, ocasionando a perda de material devido à passagem de partículas duras sobre a superfície. A cavitação é o impacto localizado dos fluidos em regime turbulento em uma superfície. O grande desafio dos projetistas é prever os pontos aonde estes diferentes tipos de desgaste podem ocorrer, e selecionar os materiais apropriados para a redução dos efeitos de desgaste (STACHOWIAK, 2001). A Figura 3.1 mostra as soluções tribológicas mais utilizadas na engenharia.



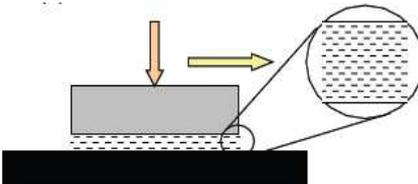
Contato a Seco: utilizado com materiais de características de baixo desgaste e baixo atrito. Aplicação restrita às altas cargas. É usual a utilização de sobre metal lubrificante.



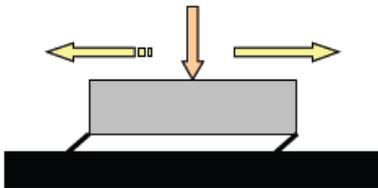
Filmes Químicos: utilizado para proteger as superfícies sujeitas ao cisalhamento. É de extrema importância a manutenção da temperatura do filme, mantendo suas propriedades lubrificantes.



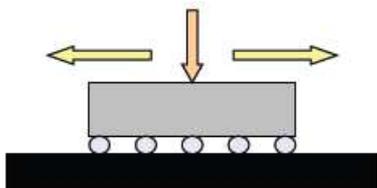
Sólidos Lamelares: sólidos de baixa resistência ao cisalhamento são utilizados para proteger as superfícies dos materiais, como grafite e dissulfeto de molibdênio.



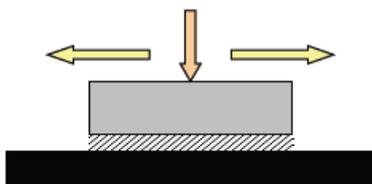
Lubrificação Fluídica: fluidos contínuos separam as superfícies com movimento relativo evitando o cisalhamento. O fluido mais utilizado nesta aplicação é o ar, mas também pode-se encontrar vapor ou líquido.



Elastômeros: as superfícies podem ser separadas por elastômeros. Limita-se a aplicações com deslocamento relativo de pequena amplitude.



Elementos Rolantes: mancais de elementos rolantes e rolamentos são as soluções tribológicas mais difundidas na indústria. Apesar da complexa solução matemática, os fabricantes simplificam suas aplicações, dispondo modelos padronizados e soluções prontas para o uso.



Campos Magnéticos: o princípio de atração e repulsão entre os pólos magnéticos possibilita o suporte de cargas sem contato mecânico. Não há geração de calor por atrito, entretanto correntes parasitas geram calor nos mancais, exigindo refrigeração.

Figura 3.1. Soluções tribológicas (STOETERAU, 2004).

3.2.1. 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).

As Figuras 3.2 e 3.3 ilustram a diferença entre o desgaste de dois corpos, quando a partícula está aderida a uma das superfícies, e de três corpos, quando a partícula está livre entre as superfícies cisalhantes.

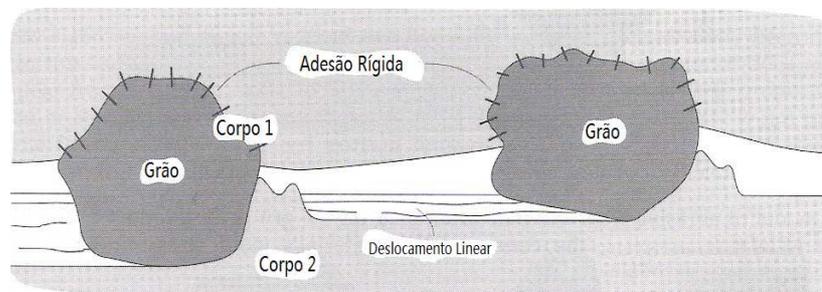


Figura 3.2. Desgaste abrasivo de dois corpos (STACHOWIAK, 2001).

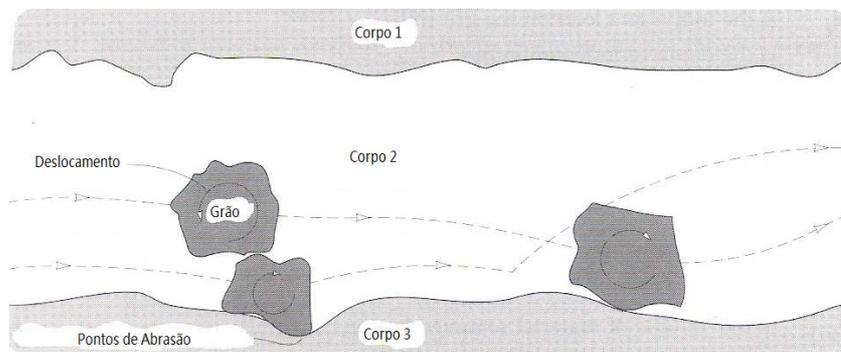


Figura 3.3. Desgaste abrasivo de três corpos (STACHOWIAK, 2001).

3.2.2. 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). Alguns dos possíveis mecanismos de erosão podem ser vistos na Figura 3.4.

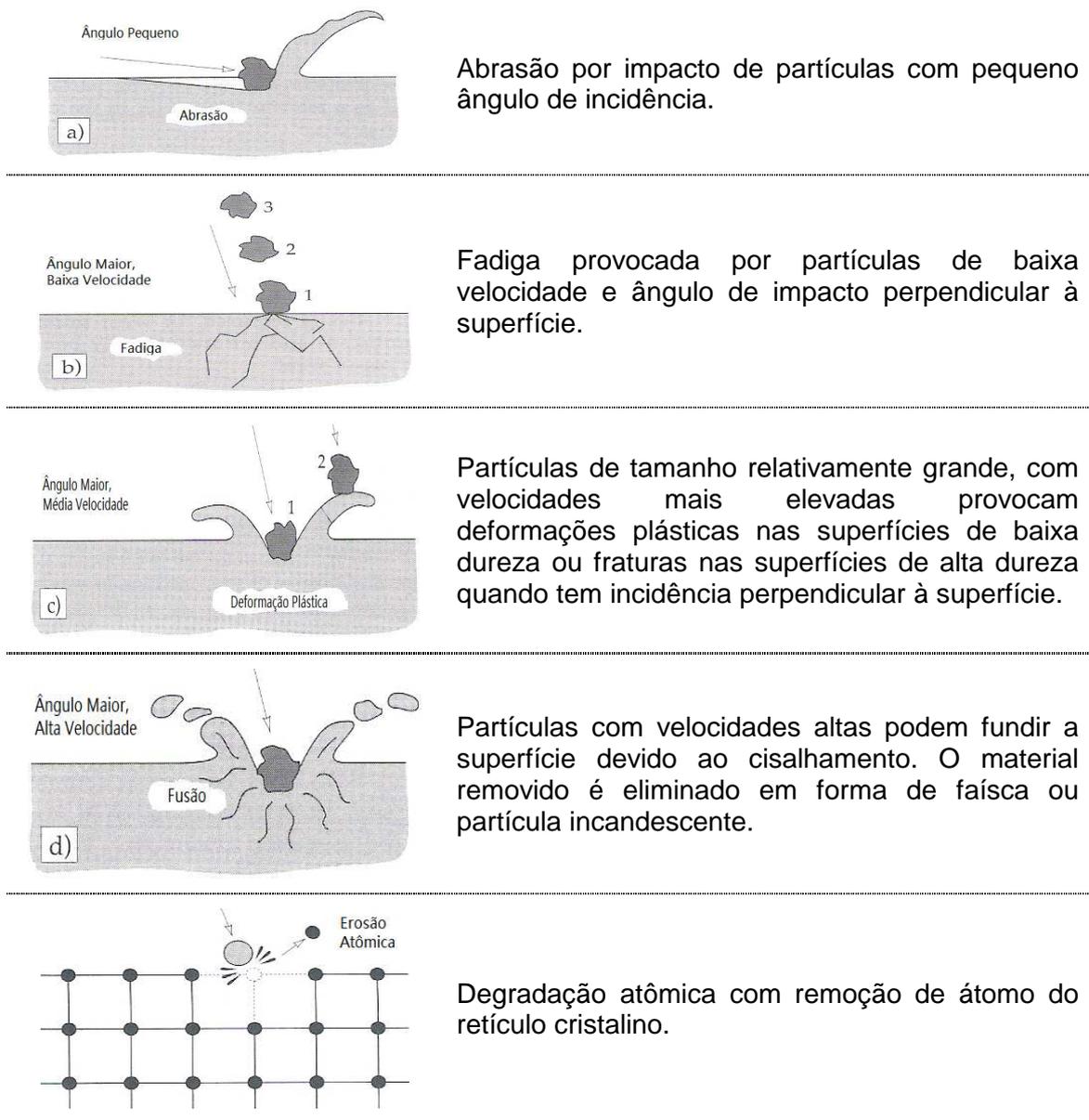


Figura 3.4. Mecanismos de erosão (STACHOWIAK, 2001).

3.2.3. 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).

A Figura 3.5 apresenta uma representação esquemática do processo de degradação por corrosão nos casos em que a camada oxidada é removida pelo cisalhamento entre as superfícies, acelerando a degradação superficial.

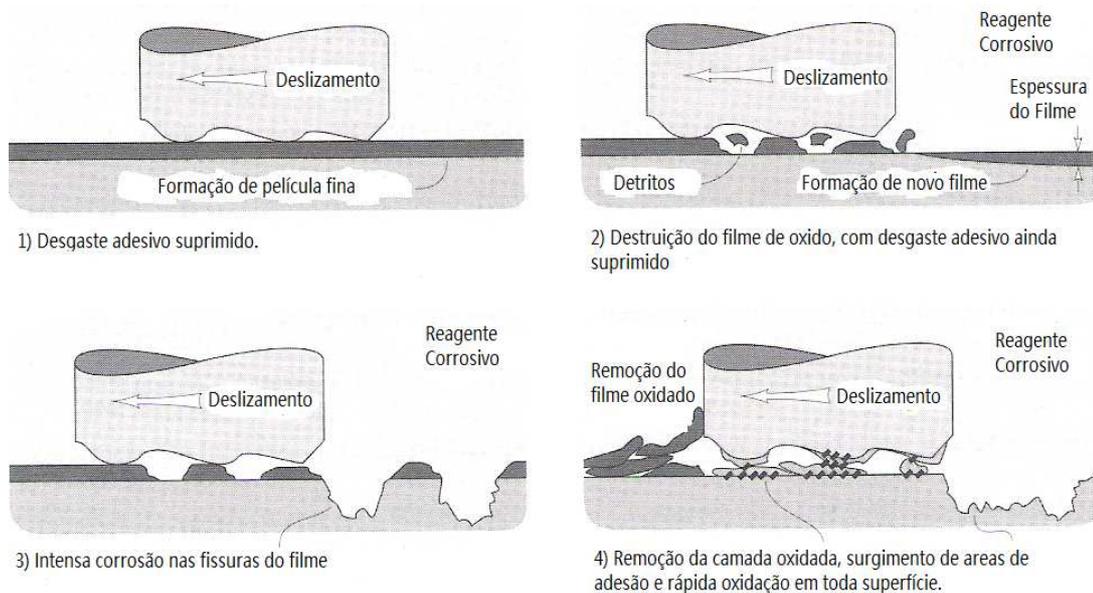


Figura 3.5. Efeitos das superfícies corroídas (STACHOWIAK, 2001).

3.2.4. 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 à condensação das bolhas e o colapso destas com a superfície da máquina, 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, 2001).

3.3. Mecanismo de Desgaste das Ligas Alumínio-Silício

O desgaste abrasivo do alumínio acontece quando partículas ásperas e duras penetram em sua matriz arrancando material. Este fenômeno é influenciado por vários fatores como: propriedades físicas dos materiais, condição de operação, geometria dos corpos, microestrutura e fenômenos químicos (SAHIN, 2009).

Como o alumínio é um material bastante dúctil, é necessário adicionar uma segunda fase de alta dureza na matriz do material, como o silício, para aumentar a resistência ao desgaste. As partículas de silício se comportam como lâminas protetoras da matriz, evitando a abrasão da matriz dúctil com o segundo corpo cisalhante, conforme ilustração da Figura 3.6. Pequenas cargas de compressão apresentam desgaste bastante baixo e estável, entretanto com o aumento da compressão, as lâminas de silício são arrancadas da matriz dúctil do alumínio, acelerando o processo de desgaste (MAHATO,2010).

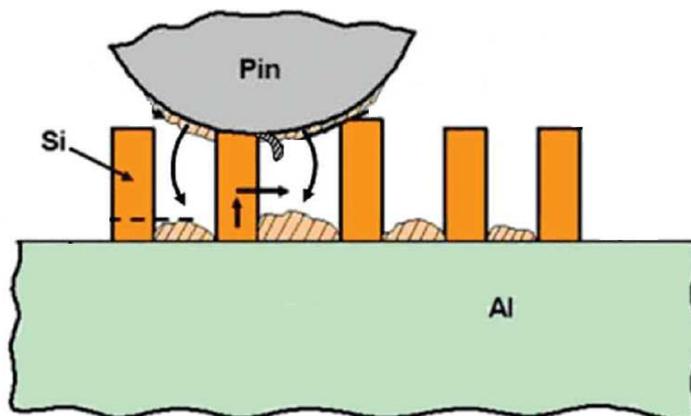


Figura 3.6. Lâminas de silício protegendo a matriz de alumínio (MAHATO, 2010).

O silício é um dos ligantes mais baratos introduzidos na ligas de alumínio e adiciona inúmeras propriedades, melhorando a fluidez, aumentando a resistência em função de volume, elevando a resistência à corrosão, reduzindo o coeficiente de expansão térmica e aumentando a resistência ao desgaste (KORI, 2008).

Muitos estudos foram feitos para analisar os efeitos de microestrutura, composição, processo de manufatura e condições de controle atmosférico no comportamento das ligas de Al-Si. O método mais utilizado para a análise laboratorial de desgaste é o dispositivo pino-disco. SO (1996) enfatiza que o mecanismo de desgaste, o coeficiente de fricção e a temperatura do material são afetados conforme arranjo do pino, rotatório ou estacionário, conforme ilustração da Figura 3.7. A carga é aplicada pelo peso morto do disco superior, independentemente da configuração do pino. Nos estudos de So, o pino era feito em aço de médio e alto carbono e o disco era feito em aço de médio e alto carbono e de liga de alumínio. So concluiu que com pinos e discos de mesmo material o desgaste será dominado pelo pino que está rodando, sendo o desgaste do disco desprezível. Para durezas de aço de mesma ordem, o desgaste do pino será dominante, mesmo que a dureza do pino seja maior. Para desgaste com grande diferença de dureza entre os materiais, o desgaste sempre prevalecerá no material de menor dureza, independente se for o pino ou o disco.

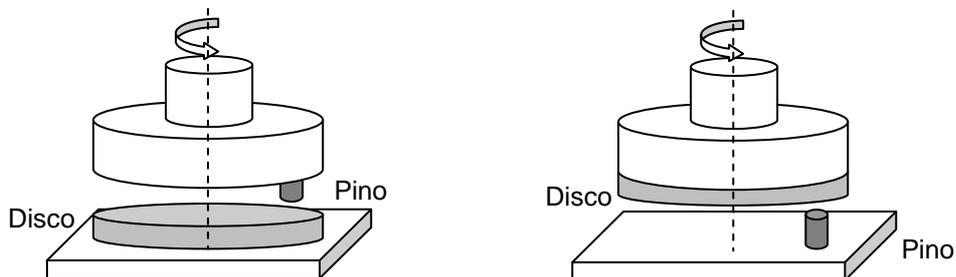


Figura 3.7. Arranjos do dispositivo Pino-Disco (SO, 1996).

A força de interação entre a matriz de alumínio e o silício e a deformação plástica da matriz são outros fatores extremamente importantes para a resistência ao desgaste. Se as lamínas de Si não estiverem perfeitamente aderidas na matriz ou se a matriz se deformar permitindo a remoção do grão, processo semelhante à figura 3.8, a proteção da superfície não será efetivo e o desgaste atingirá altas taxas (SU, 2010).

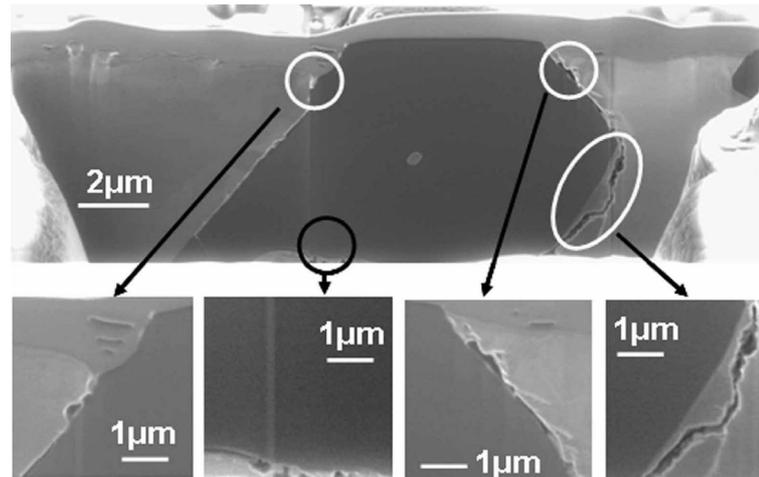


Figura 3.8. Mecanismo de delaminação do Al-Si (MAHATO, 2010).

As ligas de Al-Si da série 300 têm sido um dos materiais de maior demanda para a manufatura de componentes de motores, inclusive componentes submetidos a severas condições de abrasão. Estudos de laboratório mostram que o alumínio tem comportamento tribológico bastante complexo. Observam-se dois regimes de desgaste: desgaste moderado (DM) e desgaste severo (DS). No regime DM são observados a oxidação da superfície, deformação plástica, delaminação e transferência de material por adesão. Uma característica bastante comum no DM é a formação de tribofilme, composto por fragmentos de silício, óxido de alumínio e alumínio, que proporcionam uma taxa de desgaste baixíssima (BURANY, 2011).

Com lubrificação normal, o desgaste de um pistão não deve exceder alguns nanômetros por hora, para garantir a vida longa de um motor. A taxa de desgaste do regime DM encontra-se entre 10^{-4} e $10^{-3} \text{ mm}^3 / \text{m}$, enquanto a taxa de desgaste do DS pode ultrapassar $10^{-2} \text{ mm}^3 / \text{m}$. Para atender a demanda de desgaste de motores, definiu-se um novo regime de desgaste, o regime de desgaste ultra-moderado (DUM), com taxas de desgaste menores do que $10^{-6} \text{ mm}^3 / \text{m}$ (BURANY, 2011).

O tribofilme que conduz o processo de desgaste a taxas extremamente baixas, inicialmente passa pelo processo de fratura ou descolamento da matriz, que faz com que as lâminas de silício penetrem na matriz do alumínio. A direta exposição da matriz de alumínio com a face oposta de cisalhamento provoca a formação de grãos ultrafinos. Conseqüentemente, o cisalhamento provoca

deformação plástica dos grãos e fraturas no silício, favorecendo a formação do tribofilme, material altamente lubrificante. Uma película de óleo residual também é observada na superfície, composta de uma mistura de óxido de alumínio e carbonetos amorfos (BURANY, 2011). MAHATO, 2010, relata que o uso de lubrificantes ricos em fósforo e zinco favorece a formação do tribofilme.

MAHATO, 2010, estudou o comportamento das ligas eutéticas de Al-Si nos regimes DUM e DM. Utilizando um dispositivo Pino-Disco, com disco de Al-Si e pino de aço, lubrificado por óleo de motor, os testes tiveram duração de 40 horas com velocidade constante de 0,2m/s. Para o primeiro ensaio, utilizando pressão de contato de 12,7 MPa, verificaram-se pequenos danos nas lâminas de silício e intensa deformação plástica nas duas primeiras horas de ensaio, tempo necessário para formação do tribofilme, conforme ilustração da Figura 3.9. O desgaste nas 38 horas seguintes de ensaio foi apenas um sexto do desgaste das duas primeiras horas.

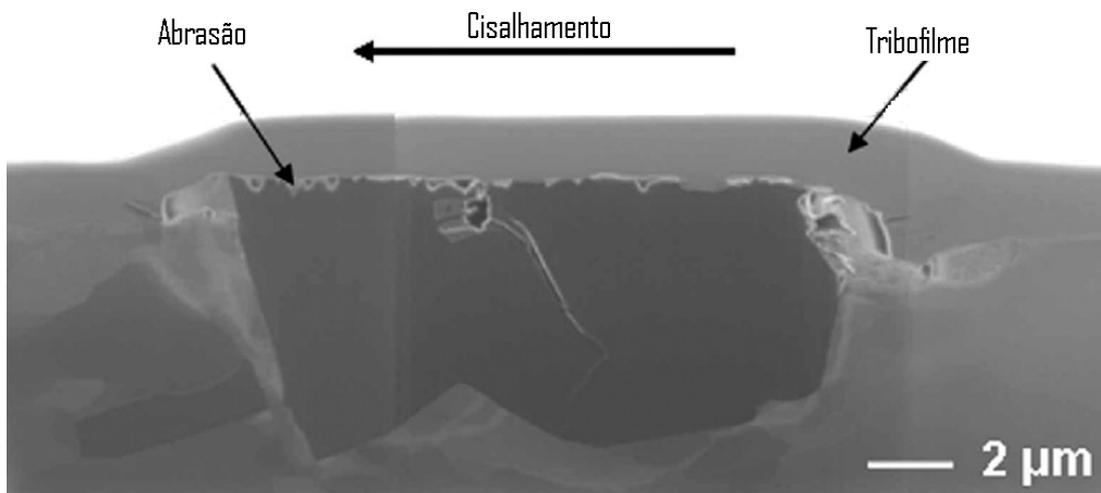


Figura 3.9. Regime DUM mostra deformação ao redor das partículas de silício nas primeiras horas de ensaio (MAHATO, 2010).

No segundo caso, com pressão de contato de 25,4 MPa, verificou-se que grande parte das lâminas de silício desapareceram da superfície nas duas primeiras horas, ocasionando a deformação plástica da matriz e a formação de sub-grãos próximos à superfície, conforme Figura 3.10. A alta pressão de contato inibe a formação de hidrocarbonetos, presentes no DUM, entretanto favorece a formação

de sulfetos, como o MoS_2 que é forte agente lubrificante, levando o desgaste à taxas bastante similares ao DM.

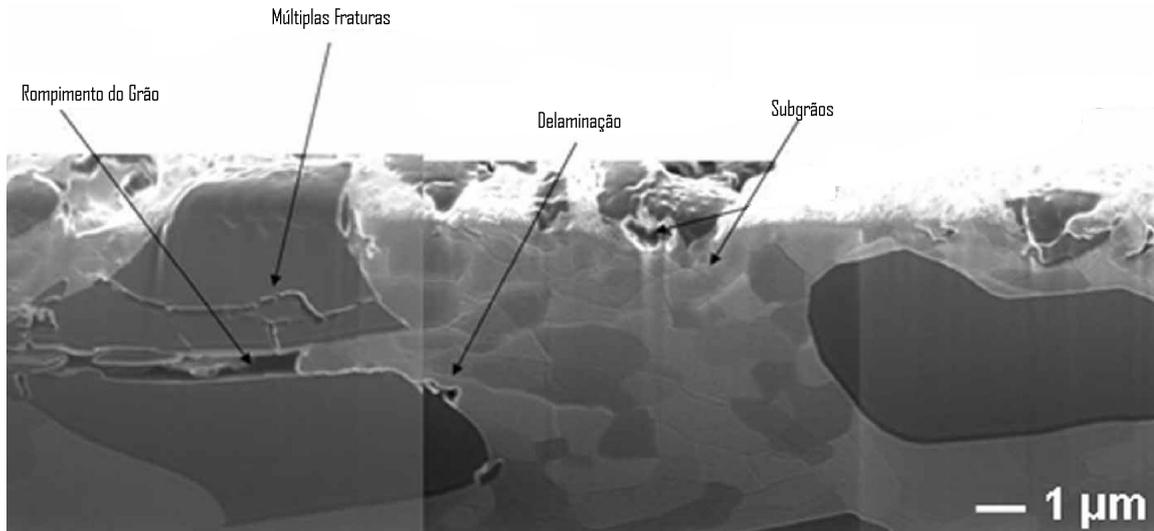


Figura 3.10. Alterações superficiais do DUM (MAHATO, 2010).

Lasa (2002) e seus colaboradores estudaram o desgaste de algumas ligas de Al-Si fundidas com percentual de silício entre 12 e 15% e diferentes composições. Uma amostra continha 1,1% Cu sendo considerada referência para o ensaio. Duas outras amostras continham 4% Cu e as duas últimas continham estrutura globular. Todas as amostras receberam tratamento T6, com solubilização e tratamento de envelhecimento artificial. O ensaio foi realizado com dispositivo pino-disco, onde o pino foi usinado com a liga em análise e o disco foi feito com material de pastilha de freio. O autor analisou duas situações onde a velocidade do disco variava entre 0,089 m/s e 0,356 m/s com carga fixa de 45,51 N. Concluiu-se que o Cu aumenta consideravelmente a resistência ao desgaste e que o tratamento T6 foi mais efetivo em composições com Cu mais elevado. Concluiu-se também que o desgaste é inversamente proporcional a velocidade do disco. Baixas velocidades favorecem o processo oxidativo do Cu e do Si e induzem ao desgaste por adesão.

A influência do refinamento do grão no desgaste de ligas hipoeutéticas foi estudada por Prasada-Rao e seu grupo (2005). Em ensaios com dispositivo pino-disco com velocidade de 1 m/s e carga entre 50 e 200N realizaram-se ensaios de 30 minutos, onde se concluiu que a modificação do Si eutético de agulha para placas de finas fibras foi mais eficaz na redução do desgaste do que o refinamento dos grãos.

Além do processo de desgaste abrasivo, ligas de alumínio podem sofrer desgaste corrosivo. Reações galvânicas entre a matriz e o elemento de liga, formação de terceiro componente entre as interfaces dos componentes ou defeitos de interface provocados pela cristalização do material são as formas mais comuns de desgaste corrosivo. A anodização é o processo mais utilizado para evitar a corrosão das superfícies das ligas do alumínio, entretanto, quando grãos pontiagudos do elemento de liga se formam na superfície, é formada uma cavidade na superfície anodizada, formando pontos suscetíveis à corrosão (HE, 2011).

3.4. Lubrificantes

A função básica de um lubrificante é atenuar a fricção e o desgaste dos sistemas mecânicos. Aspectos como desempenho do lubrificante e resistência à degradação em serviço influenciam as características de desgaste e fricção do sistema (CARRETEIRO, 1998). Muitas pesquisas de lubrificantes estão relacionadas ao entendimento da degradação devido à alta importância que tal variável tem na vida útil de um sistema tribológico. Entretanto, a relação custo-benefício da qualidade de lubrificante e seu tempo de troca são considerações econômicas de extrema importância no dia a dia da engenharia (STACHOWIAK, 2001).

A viscosidade é um parâmetro dos fluidos que determina a sua respectiva resistência para escoar. A viscosidade do biodiesel é maior do que a viscosidade do diesel. Estudos revelam que a viscosidade do biodiesel é aproximadamente 1,6 vezes maior do que a viscosidade do diesel a 45°C, e à medida que a temperatura diminui, a diferença entre as viscosidades aumenta (MISHRA, 2010).

Cada lubrificante apresenta sua respectiva viscosidade e uma particular resposta às mudanças de temperatura e pressão. Tais variáveis influenciam diretamente na espessura do filme protetor, que em primeira análise faz acreditar que quanto maior a viscosidade, maior será o filme que separa as superfícies, reduzindo o atrito e o desgaste. Infelizmente esta afirmação nem sempre é verdadeira, pois maior viscosidade requer maior trabalho para se mover. A

conseqüência de tal fenômeno é a perda de potência global do sistema e a geração de altas taxas de calor nas superfícies de contato, causando a falha mecânica dos componentes (STACHOWIAK, 2001).

O biodiesel possui vantagens com respeito a desgaste, custo e disponibilidade, além de ter melhor lubricidade se comparado ao diesel. Entretanto, por efeitos moleculares, o biodiesel ataca quimicamente as superfícies e promove a degradação dos materiais (HASEEB, 2010).

Como conseqüência da diferente composição química, o biodiesel apresenta diferentes propriedades físicas como alto número de cetano, baixo poder calorífico, alta lubricidade e alto ponto de combustão (SAMARAS, 2010).

3.5. Combustíveis

Para ter aceitação na indústria e no transporte, um combustível deve assegurar os seguintes requisitos (CONDE, 2007):

1. Oferta em abundância a preço competitivo;
2. Fácil combustão sem deixar excesso de cinzas;
3. Os produtos da combustão não podem ser nocivos às pessoas e à máquina;
4. Deve ter elevado poder calorífico.

A composição dos combustíveis é basicamente hidrocarbonetos, carbono, hidrogênio e oxigênio (petróleo, álcoois, óleos vegetais, gordura animal, madeira). Segundo CONDE, 2007, as principais características dos combustíveis utilizados em motores de ciclo diesel são:

1. *Viscosidade:* A viscosidade do óleo combustível é de extrema importância para o sistema de injeção do motor e para a lubrificação. No sistema de injeção, a alta viscosidade pode interferir no funcionamento dos bicos injetores, aumentando a pressão no sistema e gerando gotículas muito grandes que dificultam a queima do combustível. Por outro lado, a baixa viscosidade pode levar ao desgaste, pois não lubrifica o sistema de forma adequada.
2. *Ponto de Névoa:* O ponto de névoa é a temperatura em que os sólidos presentes no combustível começam a cristalizar. Dependendo da temperatura ambiente em que o combustível está exposto, o mesmo pode congelar se estiverem com o ponto de névoa muito elevado.
3. *Índice de Cetano:* O índice de cetano (IC) representa a facilidade de combustão que o combustível apresenta. Quanto mais alto o IC mais fácil será a combustão.
4. *Teor de Impureza:* impurezas como água, sedimentos e cinzas devem ser mantidos os mais baixos possíveis, pois contribuem para o desgaste do sistema.
5. *Teor de Enxofre:* O enxofre é um contaminante indesejável nos combustíveis, pois é extremamente poluente para o meio ambiente e altamente corrosivo para os motores.

O Biodiesel é um combustível renovável derivado de óleos animais e vegetais com características similares ao óleo diesel. Pode ser usado em motores de ciclo diesel misturado ao diesel mineral em qualquer proporção, ou até mesmo puro. A Tabela 3.1 faz um comparativo das propriedades físico-química do óleo diesel mineral e de diversos óleos vegetais (CONDE, 2007).

Tabela 3.1. Especificação de alguns óleos vegetais em natura e óleo diesel (CONDE, 2007).

Características	Tipo de óleo					Óleo diesel
	mamona	babaçu	dendê	soja	pequi	
Poder calorífico (kcal.kg ⁻¹)	8913	9049	8946	9421	9330	10950
Ponto de névoa (°C)	10	26	31	13	26	0
Índice de cetano	nd	38	38-40	36-39	38	40
Massa específica a 25°C (g.cm ⁻³)	0,9578	0,9153	0,9118	nd	0,9102	0,8497
Viscosidade a 37,8°C (cSt)	285	30,3	36,8	36,8	47,0	2,0-4,3
Destilação a 90% (°C)	nd	349	359	370	nd	338
Teor de cinzas (%)	nd	0,03	0,01	nd	0,01	0,014
Cor (ASTM)	1,0	0,5	1,0	nd	2,0	2,0
Resíduo de carbono						
Conradson sobre 10% do resíduo seco (%)	nd	0,28	0,54	0,54	nd	0,35

Por ter alta viscosidade, o biodiesel encontra maior resistência para injeção, empobrecendo a mistura. Adicionalmente afeta o ponto da injeção, a pressão de injeção e a característica da pulverização do bico, que são parâmetros fundamentais para o bom funcionamento de motores diesel (MISHRA, 2010).

A densidade é outro fator importante, pois impacta diretamente no índice de cetano e no poder calorífico. A densidade também está diretamente ligada na relação da quantidade de combustível em função do volume da câmara de combustão (MISHRA, 2010).

O óleo ou gordura não pode ser aproveitado como combustível em sua forma natural devido a sua alta densidade. Para reduzir a viscosidade, o processo converte uma molécula de óleo em três pequenas moléculas de ésteres e uma molécula de glicerina. A glicerina é removida do biodiesel e os ésteres são o biodiesel (HASEEB, 2010). Óleos vegetais e gorduras animais são ésteres formados por ácidos monocarboxílicos, saturados ou não-saturados, e tri álcool glicerídeo. Os ésteres são chamados de triglicerídeos e podem reagir com álcool na presença de um catalisador. Este processo químico é conhecido como transesterificação (LEUNG, 2009).

A transesterificação de óleos vegetais é o processo utilizado para a obtenção do biodiesel. A reação de síntese mais usual utiliza uma razão molar de 1:6 de óleo:álcool, com adição de 0,4% de hidróxido de sódio ou potássio (meio básico). Também é possível realizar a transesterificação em meio ácido, porém o rendimento é menor. A Figura 3.11 representa a reação química do processo de transesterificação (CONDE, 2007).

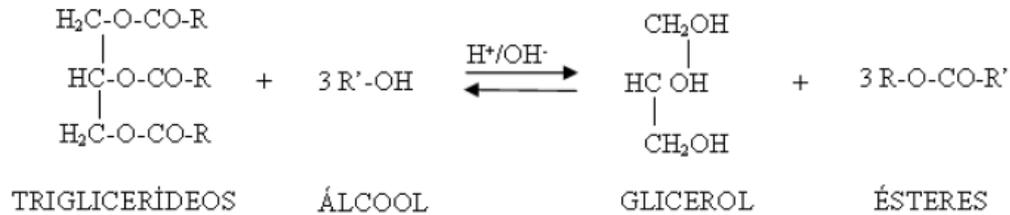


Figura 3.11: Transesterificação de Triacilgliceróis. R – Cadeia Carbônica de Ácidos Graxos. R' – Cadeia Carbônica do Álcool Reagente (CONDE, 2007).

Tipicamente utiliza-se para a fração de álcool o metanol ou o etanol. Se for utilizado metanol, a reação produzirá ésteres metílicos e se for utilizado etanol serão produzidos ésteres etílicos. Independente do tipo de álcool haverá uma fração de glicerina a ser separada, obtendo assim o biodiesel. A reação utilizando metanol apresenta-se mais viável. O etanol possui teores de água em torno de 5% que prolongam a reação. Outro ponto positivo para o uso do metanol é a separação da glicerina, que pode ser obtida facilmente pelo processo de decantação (JULIATO, 2006). O fluxograma que segue na Figura 3.12 ilustra o funcionamento de uma planta de biodiesel utilizando o processo de transesterificação.

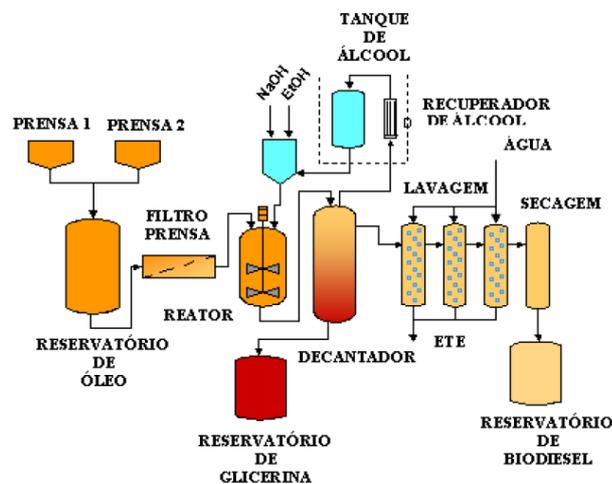


Figura 3.12: Fluxograma de produção de biodiesel por transesterificação (CONDE, 2007).

Exatamente como o diesel de petróleo, o biodiesel opera em motores de combustão por compressão com pequena ou nenhuma modificação. O biodiesel oferece diversas vantagens sobre o diesel. A queima do biodiesel é menos nociva à saúde humana, além de ter melhor lubricidade se comparada ao diesel. Entretanto, devido sua composição química, acelera a degradação dos metais pelo processo de oxidação (HASSEB, 2010).

Estudos mostram que a emissão de partículas (PM), dióxido de carbono (CO) e hidrocarbonetos (HC) são reduzidas com a utilização do biodiesel, entretanto o consumo de combustível e emissão de óxidos de nitrogênio (NOx) aumentam (SAMARAS, 2010).

Através da adaptação das propriedades do biodiesel, tentou-se reduzir a emissão de NOx. Técnicas como ajuste do ponto de ignição, emulsificação do biodiesel em água, metano e etano, diminuíram a emissão de NOx, entretanto aumentaram a deterioração do motor (HASSEB, 2010).

Alguns pontos técnicos do biodiesel como rápida oxidação, viscosidade e baixa estabilidade ainda precisam ser melhores estudados, pois podem afetar a confiabilidade mecânica dos motores. Apesar de o biodiesel ter alta lubricidade, há evidências de formação de depósitos nos bicos injetores e anéis de segmentos, além da diluição do óleo do carter pelo biodiesel, ocasionando desgaste prematuro nos mancais do virabrequim (JULIATO, 2006).

3.6. Motores Ciclo Diesel

Com cerca de 2.000 pontos tribológicos, os automóveis tornaram-se alvo dos estudos tribológicos. Tomando por base apenas o motor, que corresponde a uma grande parcela destes pontos, em 25 anos a vida útil de um motor saltou de 50.000 km para 150.000 km (VOLCI, 2007, STONE, 1993).

Em estudos realizados por HASEEB, constatou-se que o biodiesel possui boa lubricidade em testes de baixa duração. Entretanto, nos testes de longa duração o

desgaste aumenta devido ao início do processo de corrosão. Materiais como zinco, alumínio e cobre são altamente susceptíveis à ação corrosiva do biodiesel.

Muitos estudos do biodiesel estão relacionados ao desgaste dos principais componentes mecânicos de um motor, como bomba injetora, bicos injetores, pistões e virabrequim, conforme ilustração da Figura 3.13.

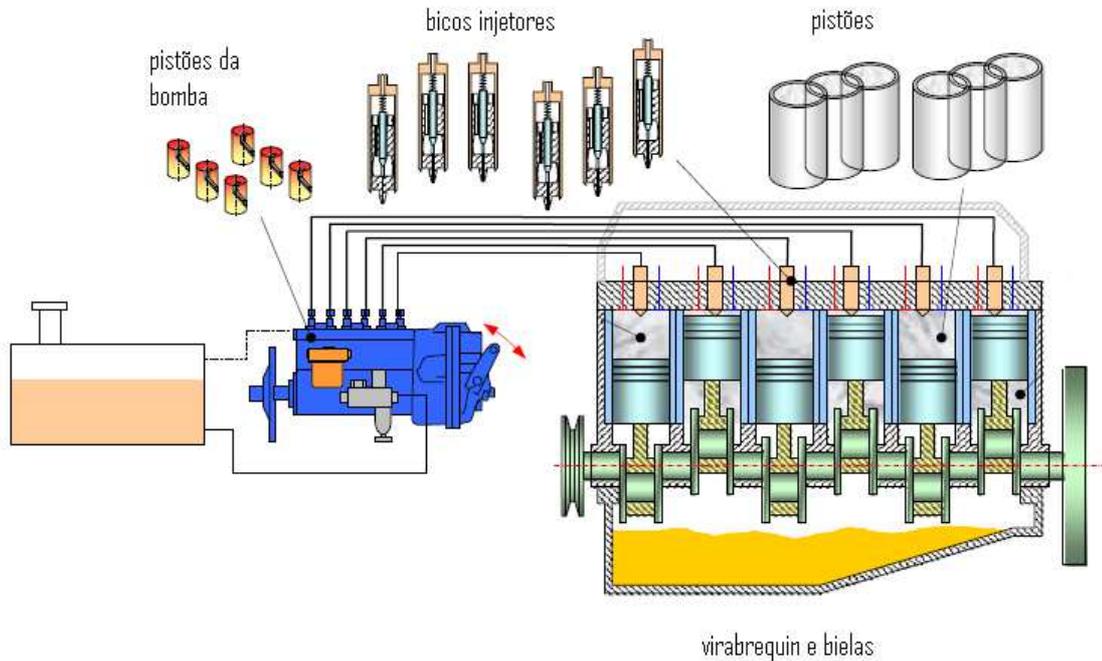
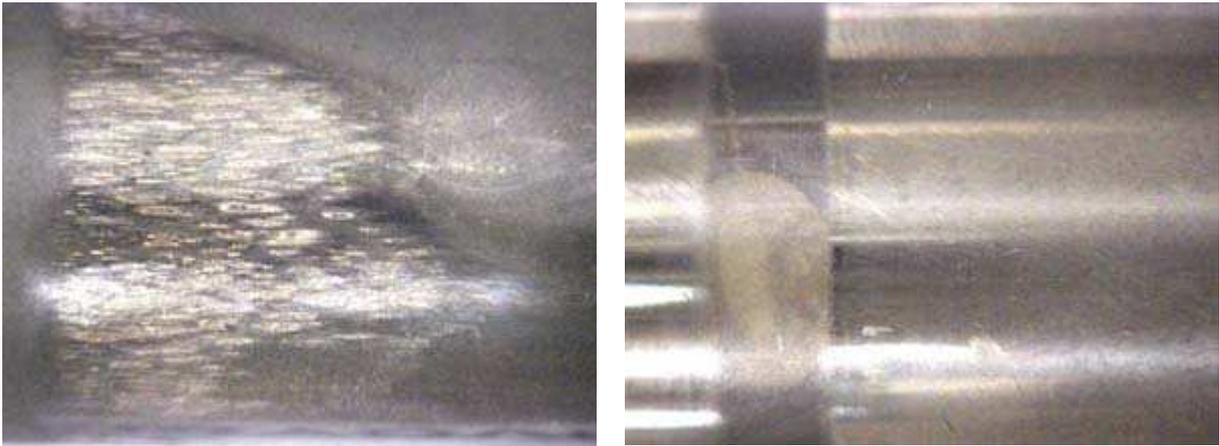


Figura 3.13. Componentes de motores diesel (KEGK, 2008).

Segundo estudos nos pistões da bomba injetora realizados por KEGK, 2008, não foi constatado nenhum problema crítico para este item na presença de biodiesel. Foram analisadas a saia e a cabeça do pistão na presença de diesel (B5) e biodiesel (B100). Constatou-se que a cabeça do pistão apresentou desgaste anormal na presença do biodiesel, entretanto esta não exerce nenhuma função significativa, ao contrário da saia que é responsável pela vedação do cilindro. Não foi constatado desgaste anormal na saia, logo, descartou-se o pistão da bomba da lista de componentes afetados pelo uso do biodiesel.

Entretanto, um estudo comparativo entre B20 e diesel em testes de longa duração, equivalente a 90.000 km, mostrou que os pistões usados nas bombas com biodiesel não poderiam ser reutilizados devido ao alto grau de deformação, conforme ilustrado na Figura 3.14 (FRAER, 2005).



(a) Desgaste do pistão com B20.

(b) Desgaste do pistão com diesel.

Figura 3.14. Desgaste do pistão da bomba injetora (FRAER, 2005).

Os bicos injetores tiveram resultados satisfatórios. Analisando a Figura 3.15, pode-se ver que o uso do B100 reduz o acúmulo de carbono depositado na superfície do bico injetor (KEGL, 2008).

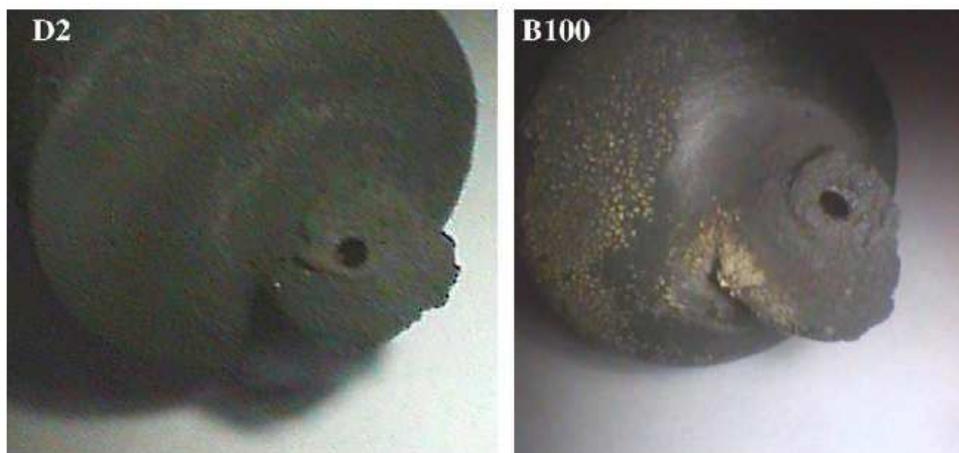


Figura 3.15. Depósitos de carbono sob o bico injetor (KEGL, 2008).

Em análise de uso do B5, utilizando uma camionete Ford Ranger, foram rodados aproximadamente 100.000 km. As inspeções visuais, do sistema de pulverização, levantamento de agulha, pressão de operação e quantidade de injeção não apresentaram nenhuma anomalia após o teste (BRASIL, 2009).

KEGL, 2008 também analisou os depósitos de carbono na câmara de combustão. Foram observadas diferentes regiões de acúmulo de carbono na utilização do diesel, mas o montante de carbono presente na câmara de combustão

mostrou-se similar ao encontrado com uso de B100. A Figura 3.16 ilustra o acúmulo de carbono nos cilindros do motor.

Os desgastes na câmara de combustão e na cabeça do cilindro foram considerados similares para o uso de B20 e diesel. Entretanto, constatou-se a formação de “borra” no compartimento das válvulas para o uso de B20 (FRAER, 2005).

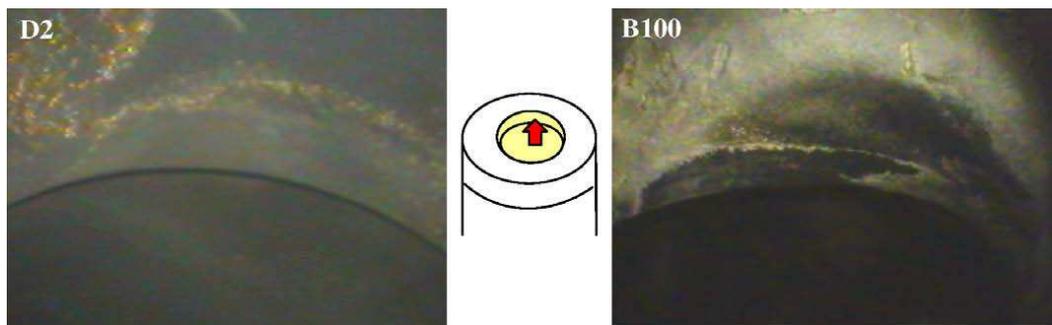
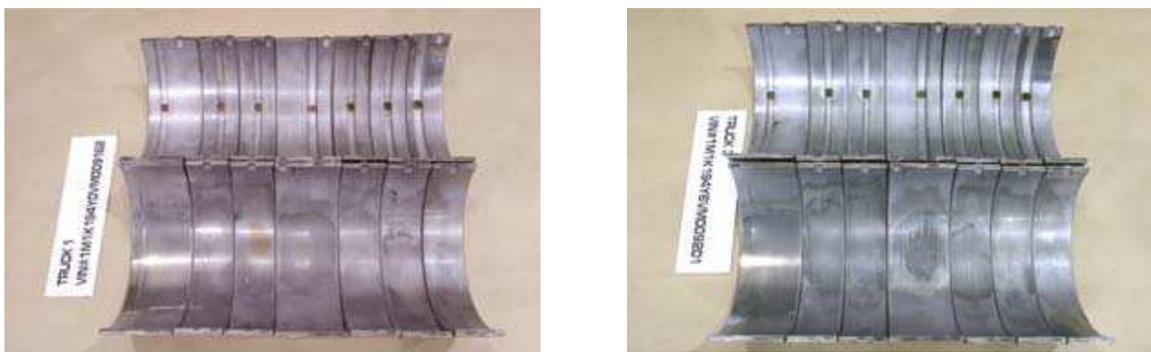


Figura 3.16. Acúmulo de carvão nos pistões (KEGL, 2008).

Em testes realizados em tratores Mack, observou-se desgaste normal das bronzinas e no mancal do virabrequim. Os motores operando com B20 apresentaram desgaste no revestimento de cobre, enquanto os motores que trabalhavam com diesel exibiram desgaste na forma de pé de galinha e casca de laranja nos mesmos componentes (FRAER, 2005). A Figura 3.17 exhibe o desgaste obtido nas bronzinas do estudo feito por FRAER.



(a) Desgaste das bronzinas com biodiesel.

(b) Desgaste das bronzinas com diesel.

Figura 3.17. Desgaste das bronzinas sob efeito de biodiesel e diesel (FRAER, 2005).

3.7. Ensaio de Desgaste

Ensaio de desgaste são práticas muito importantes, pois com eles é possível fazer um estudo de degradação acelerada de dispositivos, simulando longos tempos de utilização em campo em um período de tempo relativamente curto.

Os testes de laboratório 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).

O presente trabalho é baseado sobre uma norma fenomenológica. A seguir serão brevemente explicados alguns testes fenomenológicos.

3.7.1. Ensaio de Disco de Borracha com Areia

Consiste em um teste para determinar 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 à material arenoso, conforme ilustração da Figura 3.18. 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 nelas podem-se encontrar os parâmetros para a execução deste (BAYER, 2004).

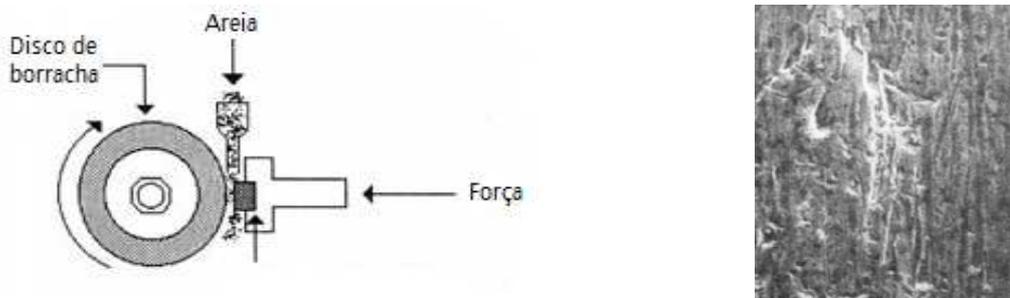


Figura 3.18. Esquemático do dispositivo de teste e morfologia do desgaste (BAYER, 2004).

3.7.2. 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. A Figura 3.19 ilustra um dispositivo para este teste (BAYER, 2004).

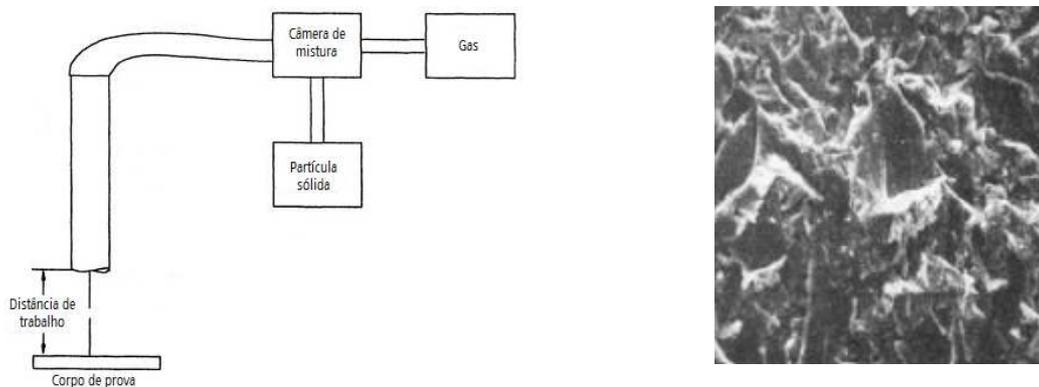


Figura 3.19. Dispositivo para teste de desgaste por erosão (BAYER, 2004).

3.7.3. 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).

O desgaste do corpo de prova, que é submerso em um líquido, acontece devido à alta vibração provocada por um transdutor ultrassônico. A norma ASTM G32 (ASTM G32, 2010) pode ser usada para conduzir este teste. A Figura 3.20 ilustra um dispositivo para este teste (BAYER, 2004)

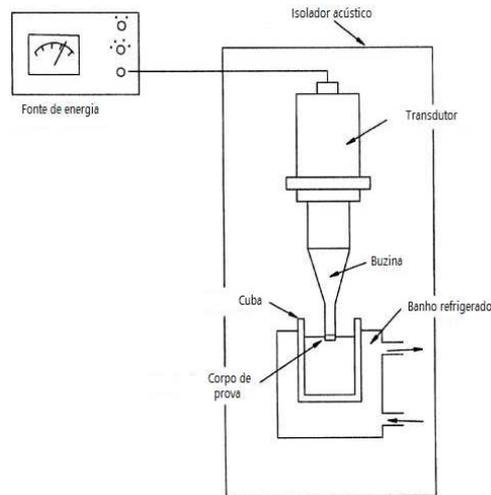


Figura 3.20. Teste de desgaste por cavitação (BAYER, 2004).

3.7.4. Ensaio de Desgaste de Quatro Esferas

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

Três esferas de 12,7 mm de diâmetro são engastadas juntas e cobertas por óleo lubrificante. Uma quarta esfera é colocada no topo das esferas e pressionada na cavidade das esferas engastadas, conforme demonstração da Figura 3.21. Após o aquecimento do lubrificante a esfera do topo é girada provocando cisalhamento entre as quatro esferas. A resposta do teste consiste em analisar o diâmetro das depressões provocadas nas esferas engastadas (ASTM D4172, 2010).

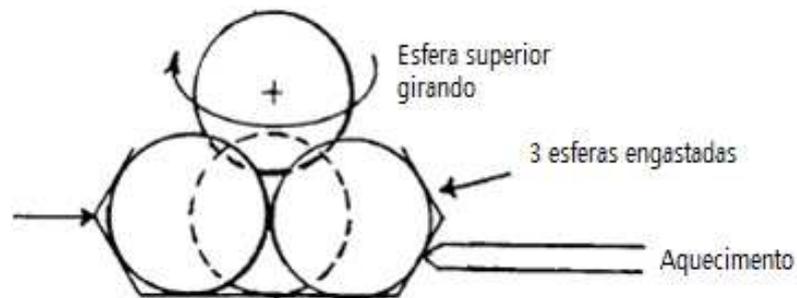


Figura 3.21. Esquemático do teste com Quatro Esferas (ASTM D4172, 2010).

3.7.5. 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.

O bloco de teste é pressionado contra o disco que encontrasse em rotação. Conforme a norma ASTM G77 (ASTM G77, 2010), o resultado do teste deve ser obtido pelo cálculo da perda de volume do bloco, através das dimensões do desgaste do bloco, e pela perda de volume do disco calculado, através do cálculo da perda de massa do disco. A Figura 3.22 ilustra o funcionamento deste teste.

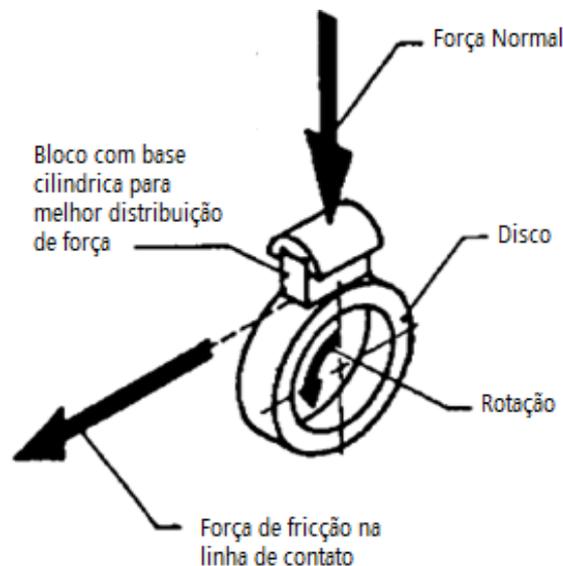


Figura 3.22. Teste de análise de desgaste bloco-disco (ASTM G77, 2010).

3.7.6. 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 Figura 3.23 ilustra o funcionamento teórico do dispositivo.

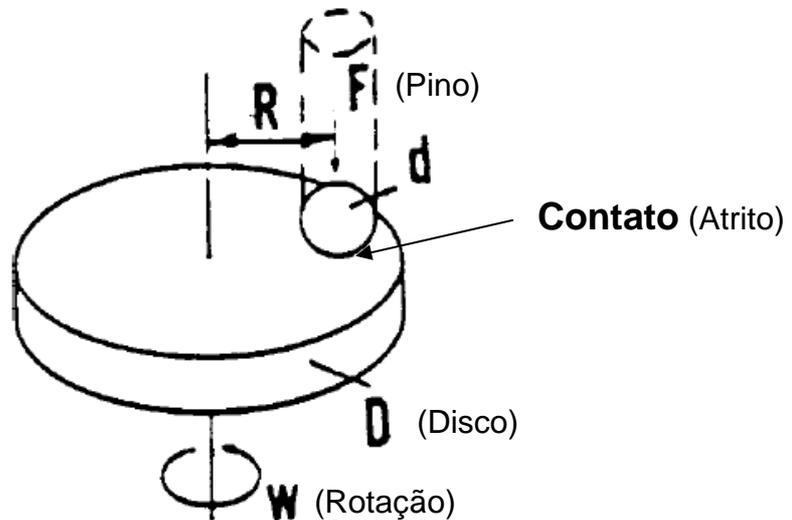


Figura 3.23. Representação esquemática do dispositivo Pino-Disco (ASTM G99, 2004).

Pode-se configurar o dispositivo tanto na horizontal quanto na vertical, contanto que o eixo do pino esteja perpendicular com a face do disco. Com carga pré-determinada, o pino é pressionado sobre o disco que está em movimento, sendo possível simular a carga utilizando dispositivos mecânicos, hidráulicos, pneumáticos e elétricos.

A determinação do desgaste é feita através da análise de perda de massa ou variação das medidas do disco e do pino realizadas antes e depois dos testes. A quantidade de desgaste é resultado de uma combinação de fatores como força aplicada, velocidade de deslizamento, distância percorrida, o meio em que o teste é realizado e as propriedades dos materiais. As características dos sistemas reais como meio corrosivo, temperatura, lubrificação e geometria podem levar o teste a resultados distantes dos valores reais, logo deve-se simular o maior número possível de variáveis.

Para ensaio com análise de dimensão, com pino com ponta esférica de raio R , adota-se a Equação (3.1) para determinar a perda de volume, assumindo que o desgaste do disco seja insignificante (ASTM G99, 2004).

$$V_{Pino} = \frac{\pi h}{6} \left(\frac{3 \times d^2}{4} + h^2 \right)$$

Onde :

$$h = r - \left(r^2 - \frac{d^2}{4} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.1)$$

$V = \text{Perda_Volume}$

$d = \text{diâmetro_do_desgaste}$

$r = \text{raio_do_pino}$

Para ensaio com análise de dimensão do disco deve-se considerar o raio do risco provocado pelo desgaste e assumir que o desgaste do pino seja desprezível. A Equação (3.2) é utilizada para a determinação da perda de volume do disco (ASTM G99, 2004).

$$V_{Disco} = 2\pi R \left[r^2 \sin^{-1} \left(\frac{d}{2r} \right) - \frac{d}{4} (4r^2 - d^2)^{\frac{1}{2}} \right]$$

Onde :

(3.2)

$R = \text{Raio_da_pista_de_desgaste}$

$d = \text{largura_da_pista_de_desgaste}$

Para ensaios com análise de massa, deve-se apenas transformar a perda de massa em perda de volume conforme a Equação (3.3) (ASTM G99, 2004).

$$V = \frac{W}{\rho}$$

Onde :

(3.3)

$W = \text{Perda_de_massa}$

$\rho = \text{Densidade}$

Com o número de revoluções executados pelo disco é possível calcular a distância percorrida pela Equação (3.4).

$$L = 2\pi R \times N$$

Onde :

$$L = \text{Distância}_{\text{percorrida}} \quad (3.4)$$

$$N = \text{revoluções}_{\text{do}_{\text{disco}}}$$

O coeficiente de desgaste k é um parâmetro obtido através da perda de volume em função da distância percorrida, de acordo com a Equação de Archard, Equação (3.5).

$$k = \frac{HV}{PL}$$

Onde :

$$k = \text{Coeficiente}_{\text{de}_{\text{desgaste}}} \quad (3.5)$$

$$H = \text{Dureza}_{\text{Brinell}}$$

$$P = \text{Carga}_{\text{do}_{\text{Pino}}}$$

Devido às altas taxas de desgaste no início do deslizamento o processo de desgaste se divide em dois regimes, transiente e estável. A Figura 3.24 ilustra o comportamento do desgaste. Conforme estudos de YANG, 2005, a imprecisão na obtenção do coeficiente de desgaste pode chegar a erros de 1000% quando se leva em conta o regime transiente. Seus estudos propõem o cálculo do coeficiente de desgaste levando em conta apenas a região entre os pontos P e Q.

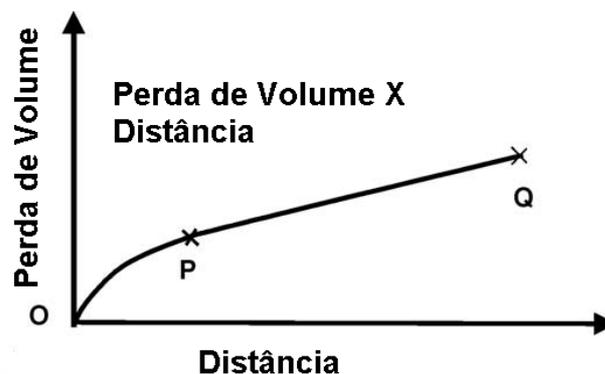


Figura 3.24. Taxa de desgaste (YANG,2005).

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para a realização da metodologia experimental proposta neste trabalho seguiu-se etapas seqüências de atividades de acordo com o fluxograma da Figura 4.1.

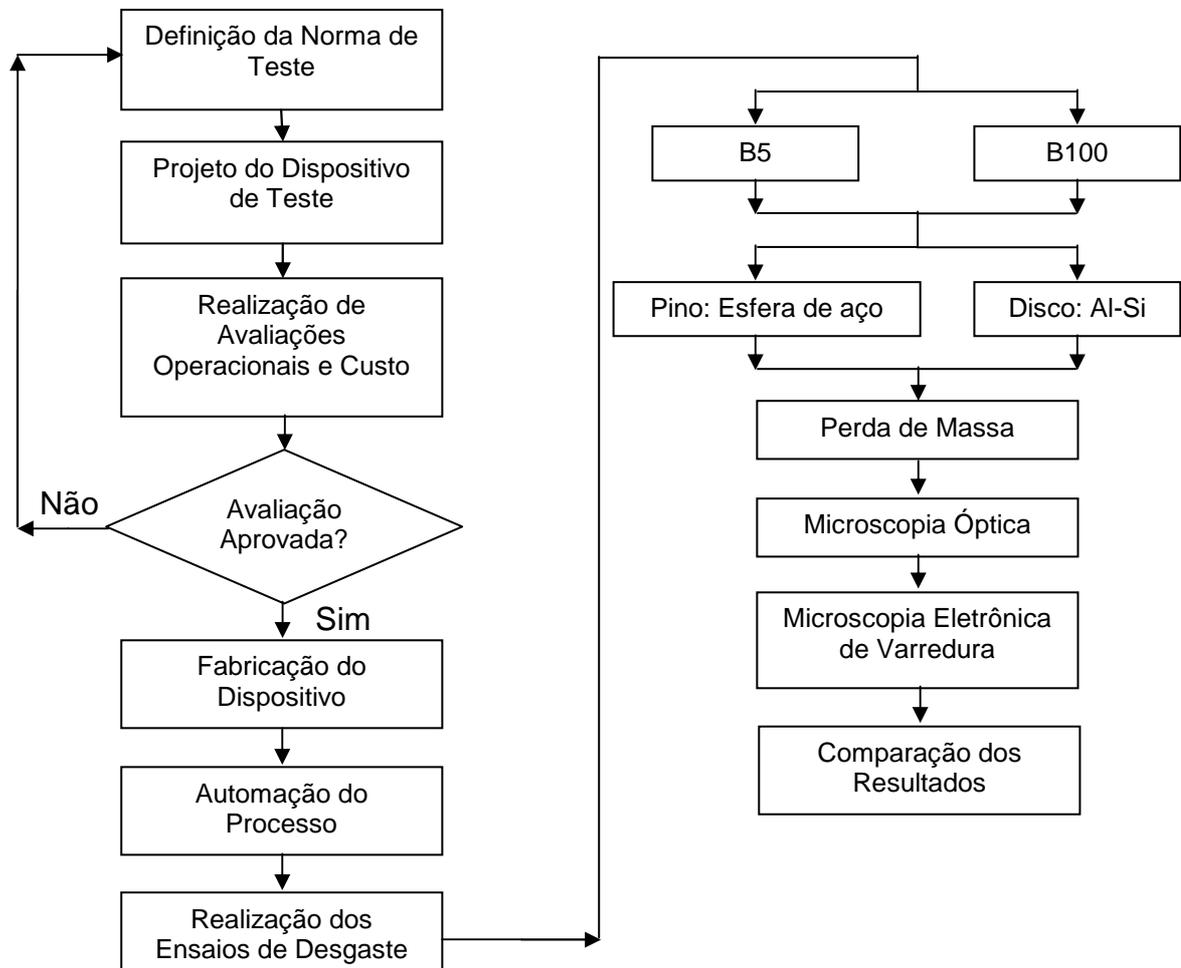


Figura 4.1. Fluxograma das atividades da metodologia.

4.1. Dispositivo de Teste

O desenvolvimento do dispositivo de teste foi dividido em três etapas: projeto mecânico desenvolvido com o software PRO-Engineer, projeto elétrico e projeto eletrônico desenvolvido na linguagem de programação C.

4.1.1. Projeto Mecânico

Inicialmente projetou-se um dispositivo horizontal que trabalharia com o disco no interior de um compartimento cheio de combustível. O pino seria inserido pela lateral deste compartimento, acoplado a um fuso com uma célula de carga, que aplicaria a força desejada no pino através do movimento do fuso, conforme ilustração da Figura 4.2.

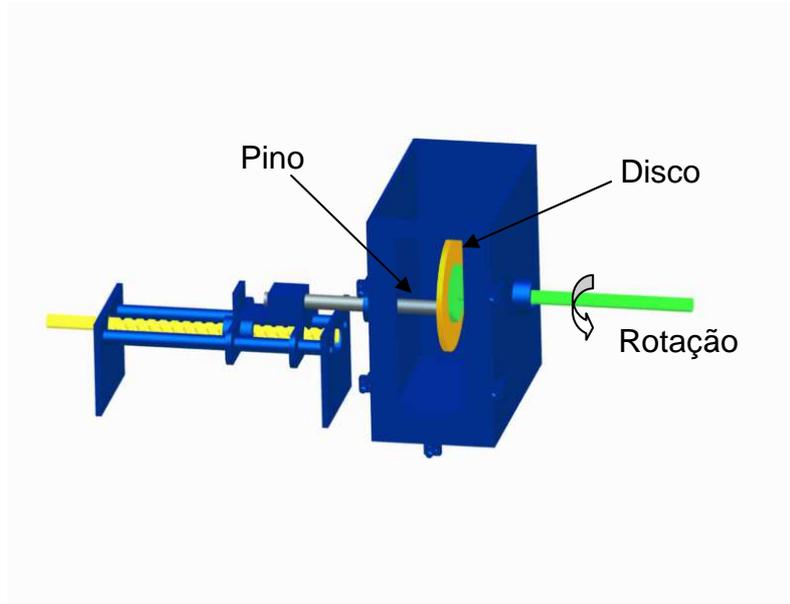


Figura 4.2. Projeto inicial do dispositivo de desgaste.

Observaram-se algumas desvantagens neste projeto, como alto custo de automação para determinação da força aplicada, dificuldade de vedação e vários pontos de mancalização. Com o dispositivo trabalhando na vertical seriam necessários 3 litros de combustível para submergir o disco. Tal fato dificultaria a

análise do combustível, pois os fragmentos de desgaste ficariam diluídos em um volume muito grande de combustível.

Posteriormente projetou-se um dispositivo vertical para utilizar 0,8 litros de combustível, eliminando grande parte dos dispositivos de automatização e todos os dispositivos de selagem do tanque de fluido lubrificante. A Figura 4.3 mostra o projeto do dispositivo.

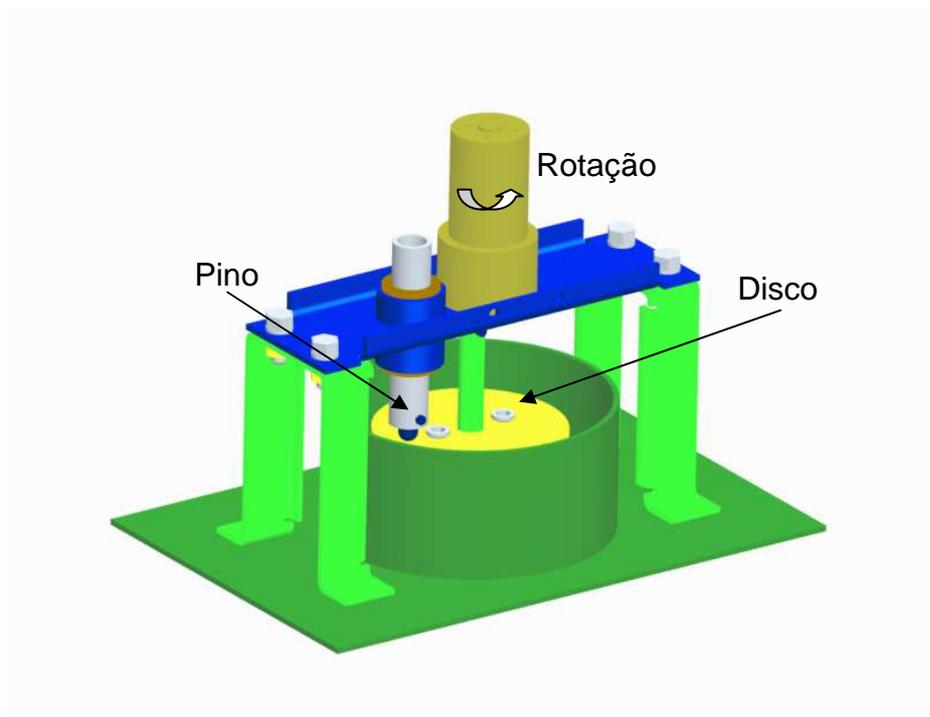


Figura 4.3. Projeto final do dispositivo de desgaste proposto.

A força aplicada no pino é determinada analiticamente. Projetou-se um eixo vertical deslizante para aplicar a força pela ação da gravidade. Utilizando um eixo vazado, é possível variar a massa do eixo com peso adicional. Uma balança deve ser utilizada para determinar a massa do eixo e do peso adicional, determinando a força aplicada no pino. O dispositivo pode ser operado com massas variando entre 200 e 1000 gramas.

A Figura 4.4 apresenta as dimensões do dispositivo e mostra o ponto de contato entre o pino e o disco, que será a região aonde ocorrerão os fenômenos físicos e químicos que determinarão a resposta deste ensaio. Os desenhos das peças mecânicas que compõem o dispositivo podem ser vistos no anexo A.

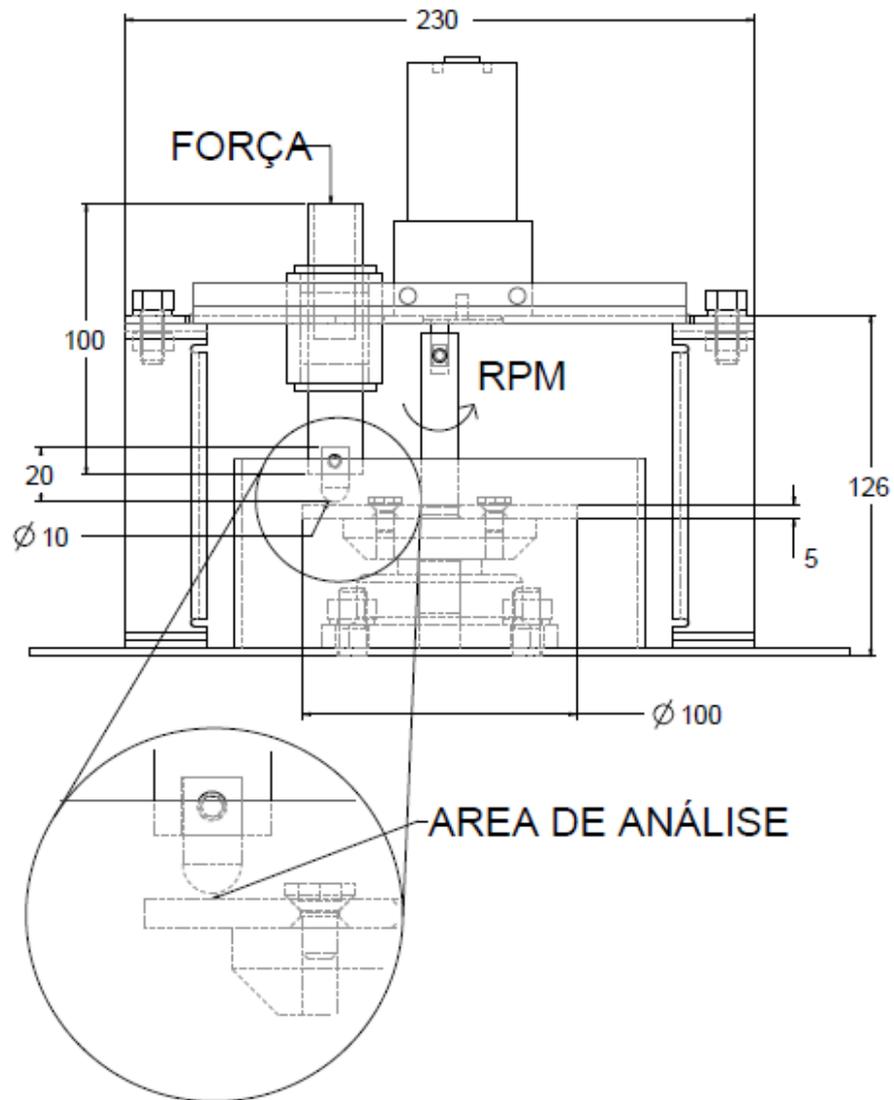


Figura 4.4. Dimensões parciais do dispositivo de teste projetado (em milímetros).

4.1.2. Projeto Eletrônico

O projeto eletrônico deste dispositivo tem o objetivo de fazer a aquisição do período de revolução do disco, gerar sinal de controle de pulsos modulados (PWM) para controlar a rotação do motor e também controlar a quantidade de revoluções executadas durante o ensaio de desgaste, desligando o dispositivo ao fim do teste. Uma placa de controle provida de um microcontrolador MSC1211 será utilizada para o controle do dispositivo.

O dispositivo permite a seleção de velocidade que varia de 150 a 250 rpm, com acréscimo de 10 rpm a cada clique. A quantidade de revoluções também pode ser selecionada, variando de 10.000 até 150.000 revoluções, com acréscimo de 10.000 revoluções a cada clique. Um terceiro botão inicia o teste e desabilita os outros dois botões, impossibilitando a mudança de parâmetros no decorrer do ensaio. A seleção dos parâmetros é mostrada no display e atualizada a cada seleção de parâmetro. No decorrer do ensaio o display exibirá o número de revoluções já executados e a velocidade do disco. A Figura 4.5 ilustra a placa de controle e seus periféricos.

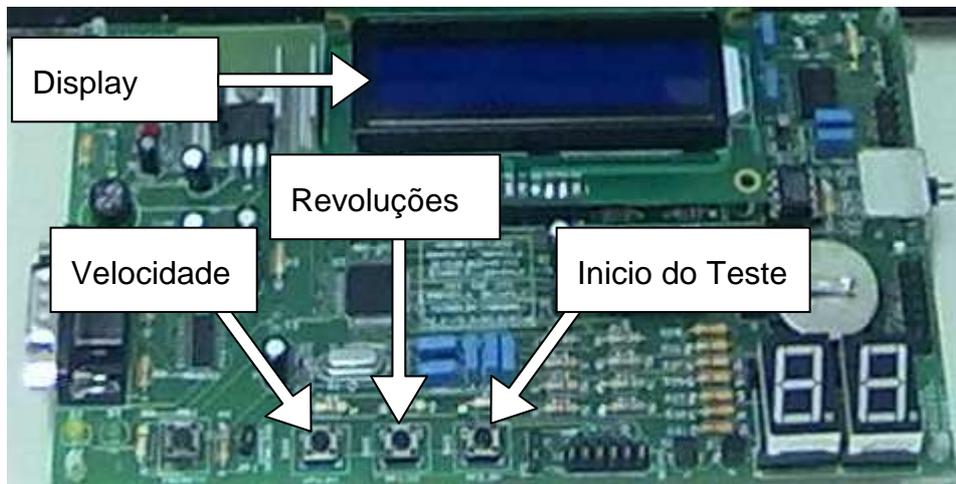


Figura 4.5. Placa de controle.

Utilizando um incoder acoplado ao eixo do disco e um acoplador óptico possibilitou-se a aquisição do período de giro do disco. A Figura 4.6 A ilustra o incoder produzido em nylon com uma cavidade de acionamento e o sensor óptico, composto por um fotodiodo TIL32 e um fototransistor TIL78, com funcionamento elétrico ilustrado na Figura 4.6 B. Adicionaram-se duas resistências de 330 ohms (Ω) em série com os LEDs, limitando a corrente em 10 miliampères (mA) e a tensão sobre os LEDs em 1,7V.

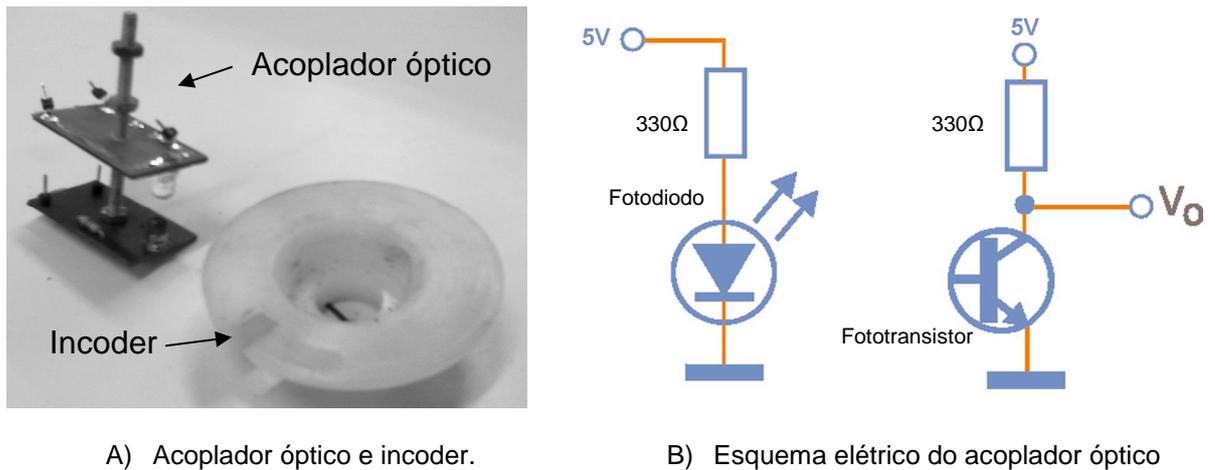


Figura 4.6. Instrumentação do controle de revoluções.

O fotodiodo é o dispositivo emissor óptico deste sensor e o fototransistor tem papel receptor e é responsável pelo envio de sinal para o microcontrolador. A todo o momento em que a fenda do incoder permitir a incidência da luz infravermelha do emissor para o receptor, a tensão em V_o , ilustrado na Figura 4.6 B, será drenado através do chaveamento do fototransistor e o sinal em V_o será igual a zero, formando uma borda de descida e uma borda de subida durante a passagem da fenda, conforme ilustração da Figura 4.7, que se refletirá na porta de aquisição de dados do microcontrolador.

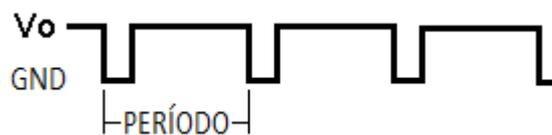


Figura 4.7. Sinal gerado pelo sensor óptico.

A cada borda de descida gerada pelo fototransistor o microcontrolador inicia um contador de milissegundos que irá parar na borda de descida seguinte. O valor do período é transformado em frequência e transferido para uma variável auxiliar e o contador de milissegundos é reiniciado.

A técnica de controlar um motor de corrente contínua utilizando pulsos modulados (PWM), consiste em variar a tensão média na armadura do motor. Um

sinal PWM nada mais é do que um interruptor que aciona e desaciona um sinal em um intervalo de tempo.

Neste projeto pretende-se controlar a velocidade de giro de um disco sujeito à cargas variáveis. A Equação 4.1 é utilizada para o cálculo de velocidade de motores. Se considerarmos que o atrito provocado entre o pino e o disco será somado ao coeficiente de atrito do motor, podemos ver claramente que com o aumento do fator de atrito e com o aumento da tensão média é possível manter a velocidade do motor constante.

$$\omega = \frac{k.V_a}{f.R_a}$$

Onde :

ω = velocidade _do_ motor

k = cons tan te _de_ torque

V_a = tensão _de_ armadura

f = coeficiente _de_ atrito

R_a = resistência _de_ armadura

(4.1)

Para controlar a velocidade do disco é necessário que o microcontrolador varie o sinal PWM, variando assim a tensão média no motor, de acordo com a velocidade de giro selecionada e com o coeficiente de atrito imposto pelo contato entre o pino e o disco. Na Figura 4.8 que ilustra o controle do processo, temos a realimentação do sistema sendo feita pelo período que irá variar de acordo com a velocidade instantânea do disco. Nesta figura também é ilustrado o sinal de controle PWM, que terá período constante de 10 milissegundos e variação de largura de pulso dividida em 256 possibilidades, logo se a largura do pulso for 255 estaríamos transferindo 100% da tensão da fonte para o motor, se for 127 estaríamos transferindo uma tensão média com 50% da tensão da fonte.

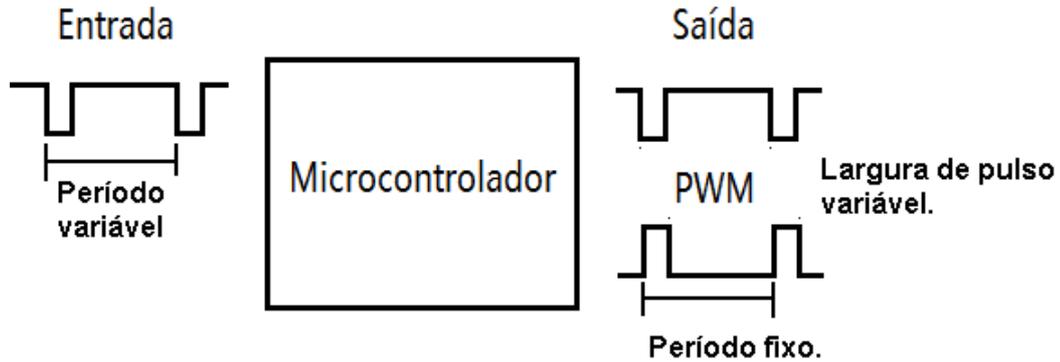
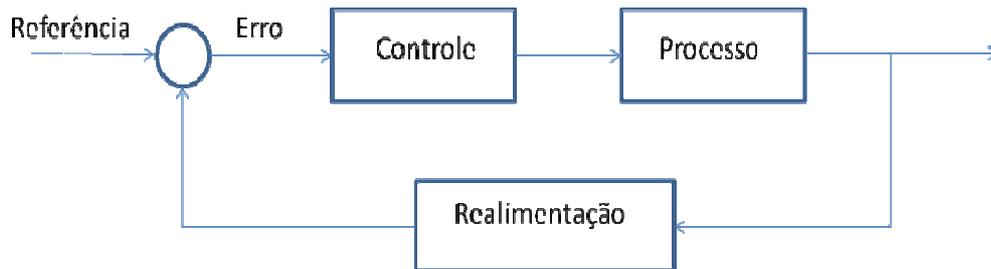


Figura 4.8. Controle do processo.

Utilizando o microcontrolador, foi programado um controle PI para possibilitar o controle das rotações do motor. A Figura 4.9 ilustra a técnica de controle malha fechada utilizada no dispositivo.



Onde:

Referência = Velocidade do disco selecionada

Realimentação = Período instantâneo do disco

Erro = Diferença entre velocidade instantânea e referência

Controle = Programa criado no microcontrolador

Processo = Tensão média aplicada no motor

Figura 4.9. Controle de processo malha fechada.

O processo funciona basicamente da seguinte maneira: A diferença entre a velocidade de rotação escolhida pelo usuário (referência) e a velocidade de rotação lida na realimentação resultam em um erro que é processado para corrigir o processo.

O controle PI é composto por duas ações quase intuitivas. A correção proporcional ao erro (P) é aplicada ao processo e cresce na mesma proporção que

o erro entre o valor real e o valor desejado cresce. A ação de correção integral (I), relacionada ao produto erro X tempo, corrige com maior intensidade erros que existem há muito tempo. A principal razão para a utilização de correção integral é a eliminação de erro de regime. A Equação 4.2 é utilizada para o cálculo do ganho.

$$u(t) = k_p \left[e_{rr}(t) + k_i \int e_{rr}(t) dt \right]$$

Onde:

u = amplitude_do_sinal_de_controle

e_{rr} = sinal_de_erro (4.2)

k_p = ganho_proporcional

k_i = ganho_integral

A sintonia do controlador foi feita de forma manual, ajustando o ganho proporcional para o valor de melhor ganho sem desestabilizar o sistema, seguido da seleção do ganho integral para eliminar o erro de regime.

O fluxograma a seguir ilustra o funcionamento das rotinas deste programa que é dividido da seguinte maneira: laço principal (Figura 4.10), timer de controle (Figura 4.11), interrupção do incoder (Figura 4.12) e rotina de controle (Figura 4.13).

O laço principal permite selecionar a velocidade do teste e a quantidade de revoluções desejadas para o ensaio. Ao pressionar o botão de inicialização dos testes o PWM, a interrupção do incoder e o timer são habilitados. Após estas tarefas, o laço principal entra em um laço que tem a função de imprimir no display a velocidade e o número de revoluções já executadas e desligar o dispositivo quando o número de revoluções desejadas for alcançado.

O timer de controle faz a contagem dos milissegundos necessários para uma revolução do disco e seta o flag do timer para que a próxima interrupção aconteça em 1 milissegundo.

A interrupção do incoder faz o cálculo da frequência, conta o número de revoluções executadas pelo disco ao longo do ensaio, zera a variável que controla o período de revolução e inicializa a rotina de controle.

A rotina de controle calcula os ganhos proporcional e integral e altera o PWM no pino que controla o motor.

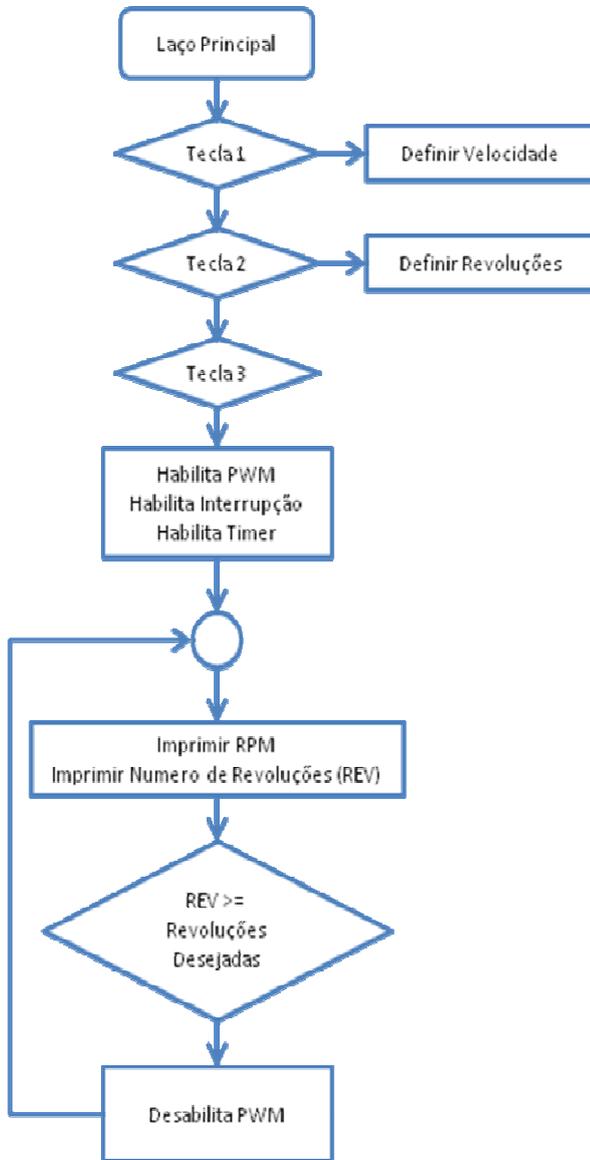


Figura 4.10. Laço principal.

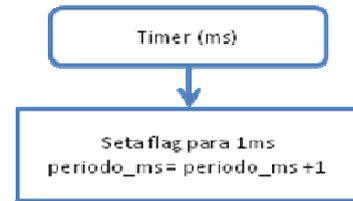


Figura 4.11. Timer gerado a cada milissegundo.

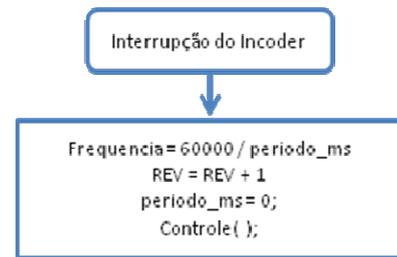


Figura 4.12. Interrupção gerada a cada revolução do disco.

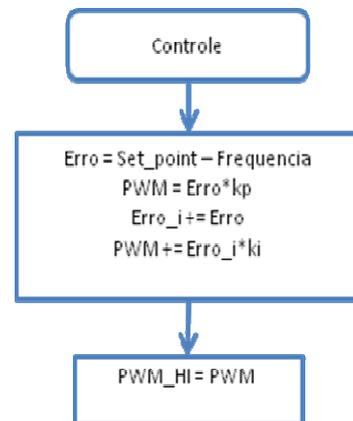


Figura 4.13. Função de controle.

O programa escrito na linguagem C pode ser visto no anexo B com maiores detalhes.

4.1.3. Projeto Elétrico

O projeto elétrico deste dispositivo consiste em um driver de potência e um motor de corrente contínua (CC), ilustrado na Figura 4.14, com especificações técnicas ilustradas na Tabela 4.1.



Figura 4.14. Motor CC Pittman 12V.

Tabela 4.1. Especificações técnicas do motor.

Especificações técnicas	
Marca	Pittman
Carga máxima (redução)	4,961 kg
Comprimento do motor	93,4mm
Comprimento da redução	34,9mm
Relação da Redução	19.7:1
Velocidade sem carga (com redução)	313rpm
Voltagem	12 v
Corrente (sem carga)	0,33A
Corrente (com carga máxima)	14.5A
Resistência	0.83Ω

Como a potência gerada na saída do microcontrolador não é suficiente para suprir o motor, um driver de potência foi desenvolvido para fazer a interface entre estes dispositivos. Para proteger o microcontrolador do circuito de alta potência é utilizado um acoplador óptico 4N33. Para chavear a potência do motor será utilizado um mosfet IRF640N. A Figura 4.15 ilustra a maneira de acionamento do motor.

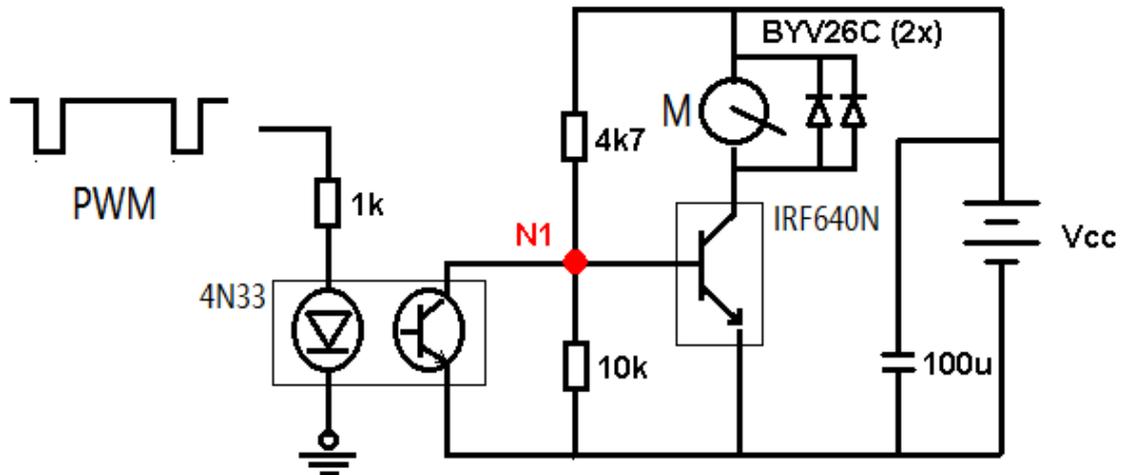


Figura 4.15. Driver de potência para acionamento do motor.

O transistor que compõem o acoplador óptico 4N33 tem a função de drenar a corrente no ponto N1 enquanto o sinal PWM estiver ativo. No momento em que o sinal PWM for desativado o transistor deixará de drenar a corrente do ponto N1 e a corrente será direcionada para o resistor de 10k, conforme a Figura 4.16.

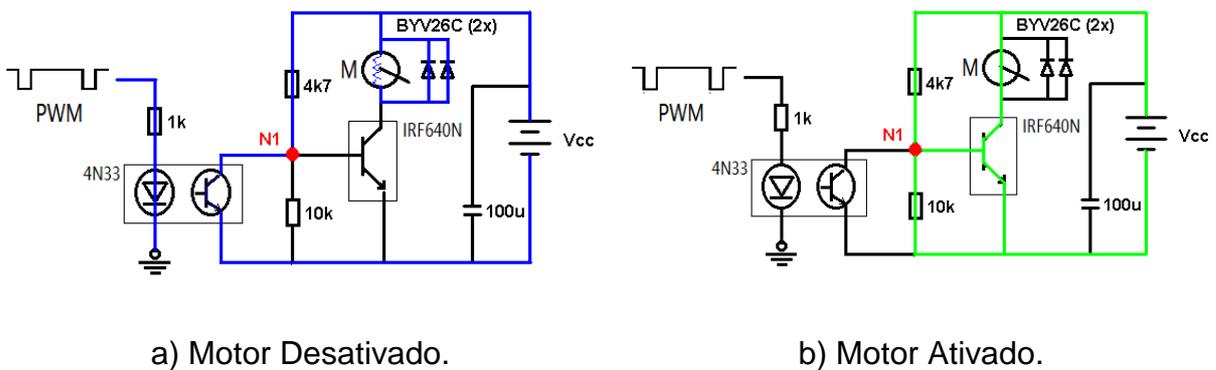


Figura 4.16. Fluxo de corrente no driver de potência.

O acionamento do mosfet requer uma tensão mínima de 4V no gatilho para acontecer. No estado morto do motor, podemos ver que o transistor do acoplador óptico acopla diretamente o gatilho ao terra da fonte Vcc. No estado ativo as resistências 4k7 e 10k estarão sob a tensão de 12V, gerando a tensão no gatilho conforme o cálculo a seguir:

$$i = \frac{V}{R} = \frac{12}{4k7 + 10k} = 0,8mA$$

$$V_{10k} = R.I = 10k.0,8m = 8V$$

Em paralelo com o motor foram adicionados dois diodos BYV26C reversamente polarizados. Como o motor se comporta como um indutor não é possível anular a corrente que circula na armadura instantaneamente, pois seria gerado um pico de tensão extremamente elevado que queimaria o transistor. O diodo será o caminho por onde a corrente irá fluir enquanto o mosfet estiver desligado.

Para o acionamento elétrico foi utilizada uma fonte de corrente contínua 12 V com capacidade para suprir 2A de corrente. A aquisição da corrente de trabalho foi realizada mediante carga de 1Kg no pino. A utilização de cargas maiores no pino elevarão a corrente de trabalho e poderão danificar a fonte e o circuito do driver.

A figura 4.17 ilustra o driver de potência e seus principais componentes.

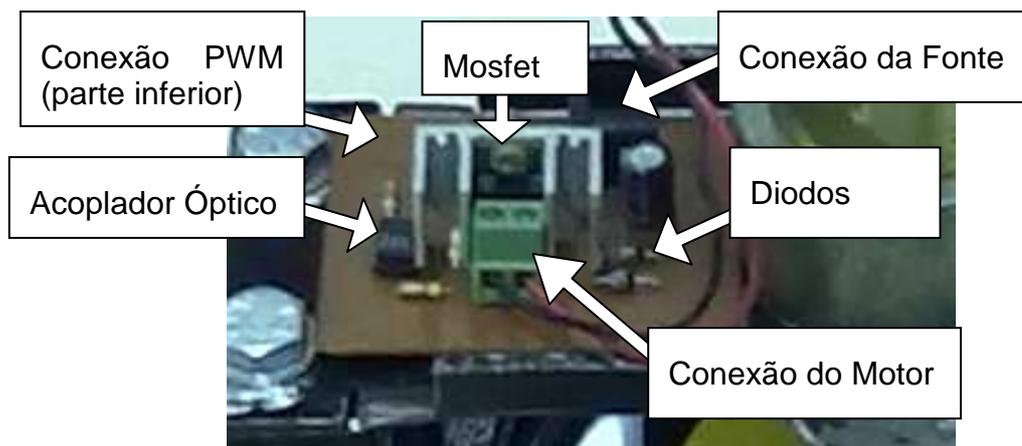


Figura 4.17. Driver de Potência.

No capítulo 4.1.2, onde foi explicado o funcionamento do sinal PWM, foi citado que a tensão média provém do tempo em que o sinal PWM está em ativo alto. Esta é a definição padrão, entretanto devido à inserção do driver de potência a tensão média aplicada no motor será calculada pelo tempo em que o PWM no processador estiver em ativo baixo. As opções de ativo baixo ou ativo alto são opções configuráveis no microcontrolador.

5. PLANO DE VALIDAÇÃO

Como validação do dispositivo será executado dois diferentes tipos de ensaio: submerso em B5 e submerso em B100. Os ensaios terão duração de 150.000, com duas diferentes cargas, 500mg e 800mg.

A aquisição do diesel foi feita na rede dos postos Petrobrás na cidade de Porto Alegre. O biodiesel foi adquirido em uma mini-usina de produção de biodiesel a partir de reaproveitamento de óleos vegetais (frituras). A mini-usina, sediada na região metropolitana de porto alegre, é fruto de um convênio de pesquisa entre a empresa RS BIO Máquinas e Equipamentos Ltda, Centro Social Marista (CESMAR) e PUCRS.

Para a realização dos testes é necessário fazer a preparação dos corpos de prova. Devem-se fazer análises de massa, acabamento superficial e dureza. Composição química, tratamento térmico e microestrutura também são características importantes para a compreensão dos resultados.

O resultado do ensaio depende basicamente da análise de variação de massa e da análise topográfica.

5.1. Preparação das Amostras

As amostras foram preparadas conforme detalhamento a seguir:

PINO:

A norma ASTM G99 recomenda que o pino tenha formato esférico ou cilíndrico, com diâmetro entre 2 e 10 mm. Recomenda-se acabamento superficial de 0,8 μm .

Neste trabalho o pino foi feito com uma esfera de rolamento de 10 mm de diâmetro (AISI 52100). Dispensou-se preparação de superfície para a esfera, uma vez que a mesma já possui excelente qualidade superficial.

DISCO:

O disco deve ter diâmetro entre 30 e 100 mm, com espessura partindo de 2 até 10 mm. A norma recomenda acabamento superficial de 0,8 μm . Adotou-se para este trabalho um disco com 100 mm de diâmetro e 5 mm de espessura, confeccionado com liga de Al-Si AA305.

Conforme recomendação da norma, os ensaios com carga de 500mg utilizaram acabamento superficial de 0,8 μm , passando por uma seqüência de lixas: 220, 320, 400, 600 e 1200. Como o desgaste do disco foi ínfimo e as ranhuras do processo de lixação não foram completamente removidas na área ensaiada, a análise microscópica destes discos foram prejudicadas pelo excesso de ranhuras nas amostras.

Na seguintes amostras, utilizando carga de 8N, a preparação da superfície passou pela mesma seqüência de lixas, seguido de polimento com abrasivo de granulação 1,0 μm e de novo polimento com abrasivo de 0,25 μm .

Todas as amostras passaram por processo de lavagem utilizando água e detergente, limpeza com álcool etílico e algodão, seguidos por secagem por

corrente de ar forçada e aquecida. Após a limpeza, foi utilizada uma balança analítica de 4 dígitos, GEHAKA AG200, para verificar a massa inicial dos discos. O mesmo processo de limpeza foi utilizado antes da aquisição da massa ao final do ensaio. Foram considerados apenas os dois dígitos mais significativos neste estudo.

Com amostra proveniente da mesma fonte dos discos foram realizados os testes de composição química, dureza e microestrutura, ilustrados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1. Características da liga Al-Si utilizada no disco.

Liga AA305					
Composição Química (% em massa):					
Alumínio	Silício	Cobre	Magnésio	Ferro	Manganês
Balanço	4,5 – 5,5	1,0 – 1,5	0,1	0,2	0,1
Condição:	Bruta de solidificação		Dureza:	65 HBW 5/250	

Na Figura 5.1 A pode-se observar a matriz de alumínio com agulhas de silício na superfície. A imagem foi gerada com aumento de 200 vezes sem ataque químico. Nesta mesma figura, nas imagens B, C, D, E e F pode-se ver a análise semi-qualitativa da composição química da amostra realizada por EDS.

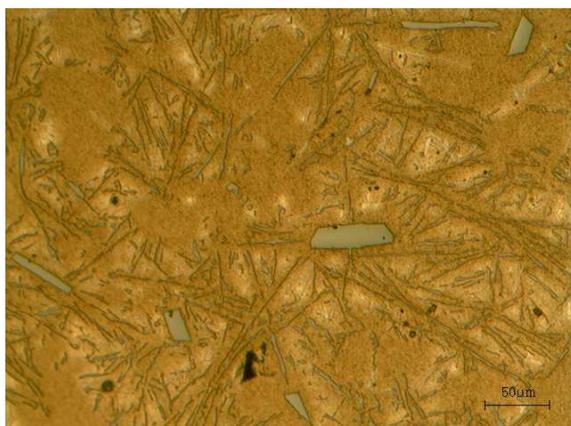


Figura A) Microestrutura

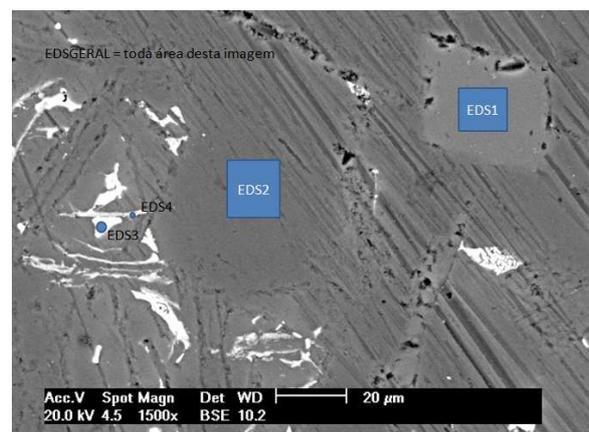


Figura B) Posições dos EDS

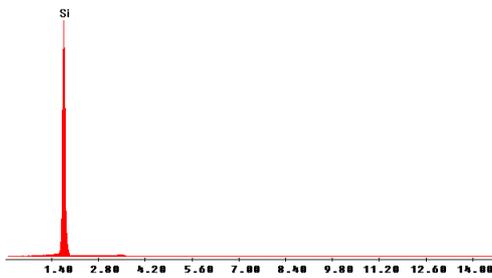


Figura C) EDS 1

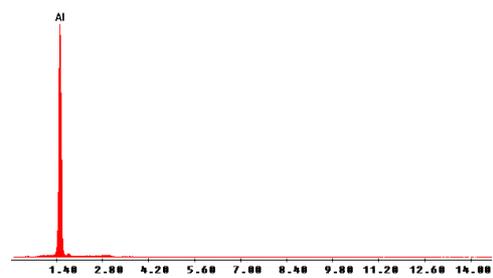


Figura D) EDS 2

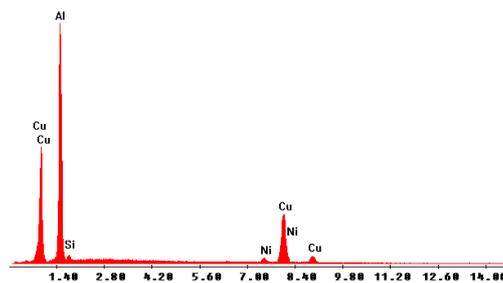


Figura E) EDS 3

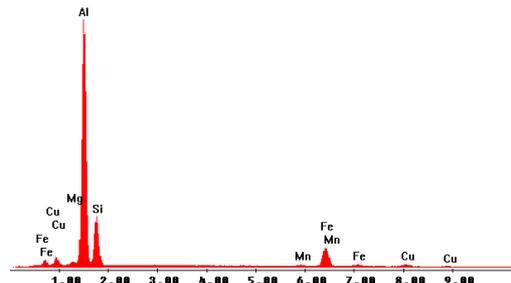


Figura F) EDS 4

Figura 5.1. (A e B) Microestruturas do Al-Si (MO) e (MEV), (C a F) EDS.

Observa-se que a matriz (EDS2) apresentou um pico significativo de alumínio, enquanto que o EDS2 realizado em um bloco facetado não dissolvido revelou apenas a presença de silício. Já os EDS3 e EDS4 indicaram a presença de alumínio, silício, cobre, magnésio e ferro, picos características de precipitados complexos com a forma de escrita chinesa, e formados devido a segregação dos elementos solutos.

As análises microscópicas foram feitas por um microscópio óptico da marca Olympus com câmara digital Sony acoplada e por um microscópio eletrônico de varredura Philips XL30.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com base na metodologia exposta anteriormente, foi projetado e construído um tribômetro pino-disco tomando por base a norma ASTM G99 – 95a para a realização de ensaios de desgaste submersos. A calibração do dispositivo foi feita previamente com a calibração dos dois principais parâmetros do dispositivo, força de atuação do pino e velocidade angular do disco, seguido de ensaios de desgaste do disco fabricado com a liga AA305 para validação.

6.1. Construção e Calibração do Dispositivo

Conforme explicado anteriormente, foram idealizados dois projetos de tribômetro, um utilizando disco vertical e outro utilizando disco horizontal, que foi a opção mais apropriada para o sucesso do projeto.

Após a confecção das partes e devida montagem do dispositivo, foi detectado um problema no balanceamento do eixo propulsor do disco. Devido ao desalinhamento do eixo do motor com o eixo propulsor, gerado pelo processo de solda, foi necessário criar um mancal para alojar um rolamento na parte superior do eixo propulsor. Um dispositivo de acoplamento móvel entre o eixo do motor e o eixo do propulsor do disco também precisou ser projetado para possibilitar a união dos eixos. A Figura 6.1 ilustra o dispositivo ao final de um ensaio com a presença de biodiesel (B100) no reservatório.

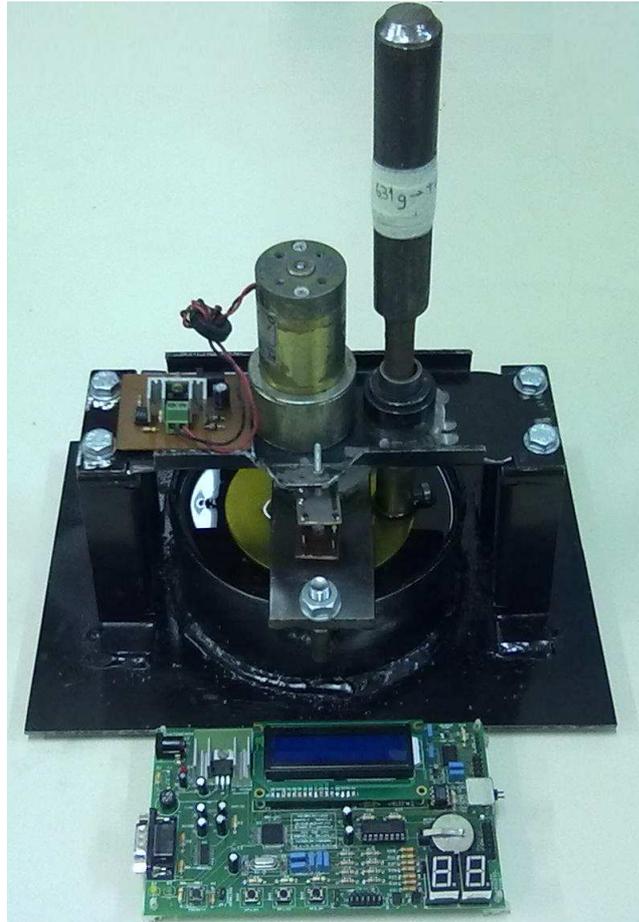


Figura 6.1. Tribômetro para ensaio de desgaste pino-disco.

Antes do início do primeiro ensaio foi testada a força de aplicação do pino com o auxílio de uma balança e constatou-se que toda a carga do pino estava sendo exercida na balança, descartando a hipótese de perda de carga na mancalização do eixo deslizante. Com o início do primeiro teste foi também descartada a hipótese de vibração gerada no pino, nenhum sinal visual, sonoro ou nas análises microscópicas evidenciaram tal fenômeno.

O controle de velocidade também foi averiguado e constatou-se que o sistema eletrônico foi capaz de variar a tensão média do motor, mantendo a velocidade do disco selecionada independente da carga do pino.

A força centrípeta gerada pela rotação do disco fez com que o nível do combustível ficasse acima do esperado, impossibilitando o uso da rotação máxima de 250 rpm, visto que o combustível transbordaria nesta velocidade. Foi necessária a introdução de uma guia para projetar o combustível na região de contato com o

pino, caso contrário a força centrípeta expulsaria todo o combustível da superfície, descaracterizando o desejo de ensaio submerso.

6.2. Ensaio Preliminares

Os resultados foram analisados de acordo com a variação de volume, coeficiente de desgaste, análises metalográficas por microscopia óptica e análise microscópica por eletrônica de varredura. A Figura 6.2 ilustra o disco após ensaio com combustível B100 com 8N de carga.

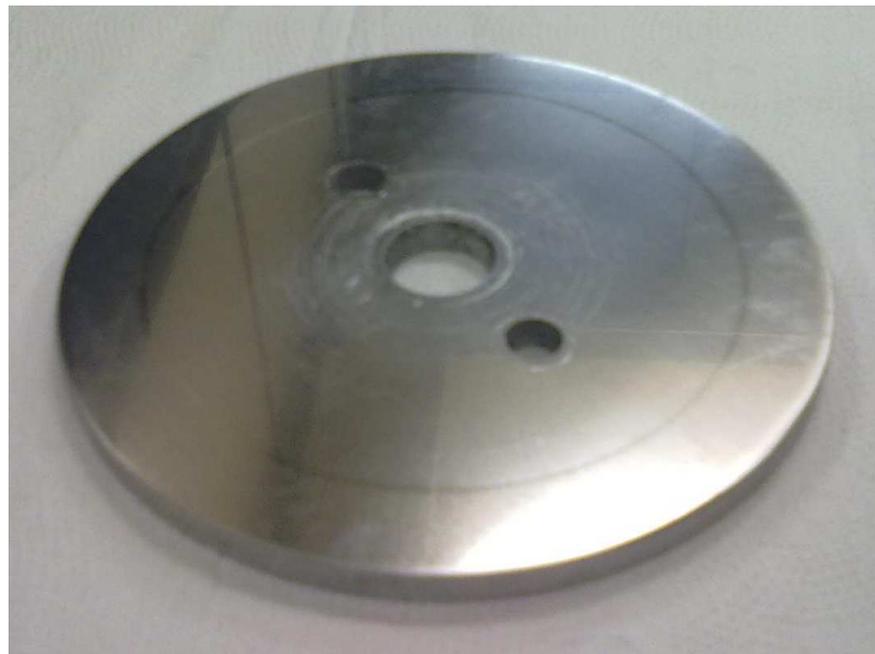


Figura 6.2. Disco após ensaio de desgaste.

A Tabela 6.1 contempla todas as informações coletadas antes e depois dos ensaios de desgaste.

Tabela 6.1. Características dos discos.

Disco:	B5 x 5N	B100 x 5N	B5 x 8N	B100 x 8N
Dimensões:	100 x 5 mm			
Massa Inicial:	100,42 g	104,91 g	100,58 g	100,58 g
Massa Final:	100,40 g	104,90 g	100,58 g	100,58 g
Variação de massa:	0,02 g	0,01 g	0 g	0 g
Densidade:	2,712 g/cm ³	2,712 g/cm ³	2,712 g/cm ³	2,712 g/cm ³
Rugosidade:	0,80 µm	0,80 µm	0,25 µm	0,25 µm
Largura da Pista	480 µm	440 µm	714 µm	638 µm
Diâmetro da Pista	78,7 mm	78,7 mm	78,7 mm	78,7 mm
L (distância percorrida)	3706 m	3706 m	3706 m	3706 m

6.2.1. Variação Volumétrica e Coeficiente de Desgaste

Como a dureza da esfera é bastante superior à dureza da liga em estudo, o desgaste do pino foi desprezado conforme explicação prévia da norma.

A perda volumétrica e o coeficiente de desgaste dos discos será mostrada a seguir, utilizando as Fórmulas 3.3 e 3.5.

$$Perda_Volume[mm^3] = \frac{perda_massa[g]}{densidade \left[\frac{g}{cm^3} \right]} \times 1000$$

$$Coeficiente_Desgaste = \frac{HB \cdot V[mm^3]}{P[N] \cdot L[m]}$$

- Para B5 com carga de 5N tem-se:

$$V = \frac{0,02[g]}{2,712 \left[\frac{g}{cm^3} \right]} \times 1000 = 7,4mm^3$$

$$k = \frac{65 \cdot 7,4mm^3}{5N \cdot 3706m} = 0,026 \frac{mm^3}{N \cdot m}$$

- Para B100 com carga de 5N tem-se:

$$V = \frac{0,01[g]}{2,712 \left[\frac{g}{cm^3} \right]} \times 1000 = 3,7mm^3$$

$$k = \frac{65 \cdot 3,7mm^3}{5N \cdot 3706m} = 0,013 \frac{mm^3}{N \cdot m}$$

- Para B5 com carga de 8N tem-se:

$$V = 0$$

$$k = 0$$

- Para B100 com carga de 8N tem-se:

$$V = 0$$

$$k = 0$$

6.2.2. Análise Microscópica

A análise microscópica das amostras foi feita com o uso de microscopia óptica (MO) e microscopia eletrônica de varredura (MEV).

A Figura 5.8 mostra algumas imagens coletadas das amostras ensaiadas em diesel (B5) com carga no pino de 5N. Na Figura 6.3 A é ilustrada a pista de contato

entre o pino e o disco. Na Figura 6.3 B pode-se ver a presença de grãos com processo de desgaste característico do Al-Si. As Figuras 6.3 B e C trazem grãos ampliados com características de fratura e delaminação.

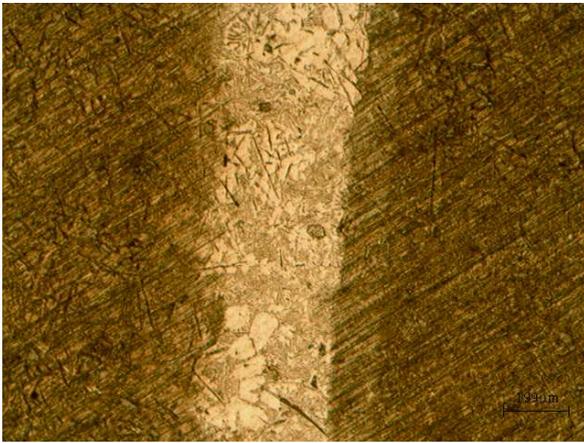


Figura A) MO com aumento de 50 vezes.

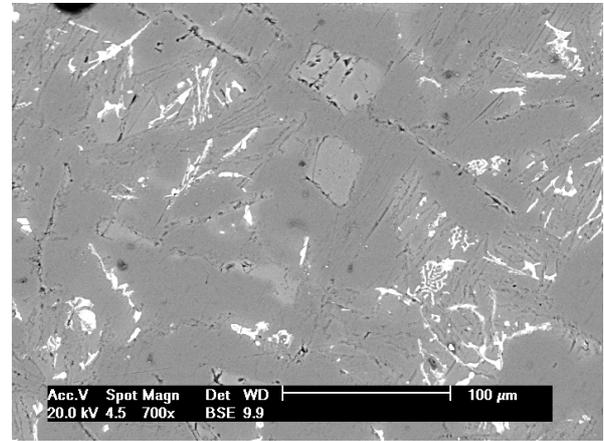


Figura B) MEV com aumento de 700 vezes.

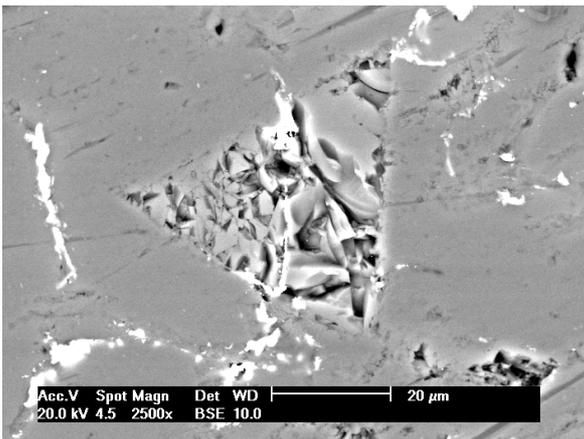


Figura C) MEV com aumento de 2500 vezes.

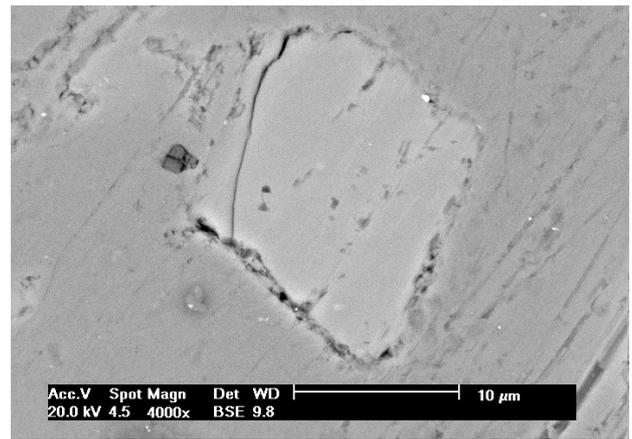


Figura D) MEV com aumento de 4000 vezes

Figura 6.3. Análises com MEV e MO – B5 x 5N

A Figura 6.4 ilustra o ensaio submerso em B100 com carga de 5N. Comparando a Figura 6.4 A com a Figura 6.3 A é possível observar que o desgaste foi menos intenso com B100, nem mesmo os riscos provenientes da lixa foram removidos. As Figuras 6.4 B, C e D mostram seus grãos ainda intactos, com leve característica de desgaste abrasivo.

A medida da largura da pista provocada pelo ensaio de desgaste foi realizada através de ferramenta de medição do microscópio óptico. A largura da pista utilizando o combustível B5 foi 40 μm mais larga do que a pista do ensaio com B100.

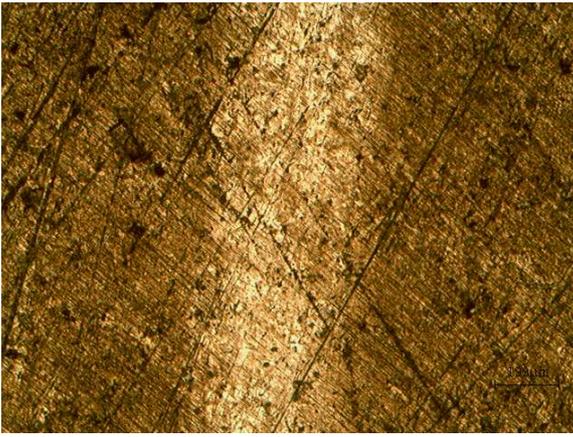


Figura A) MO com aumento de 50 vezes.

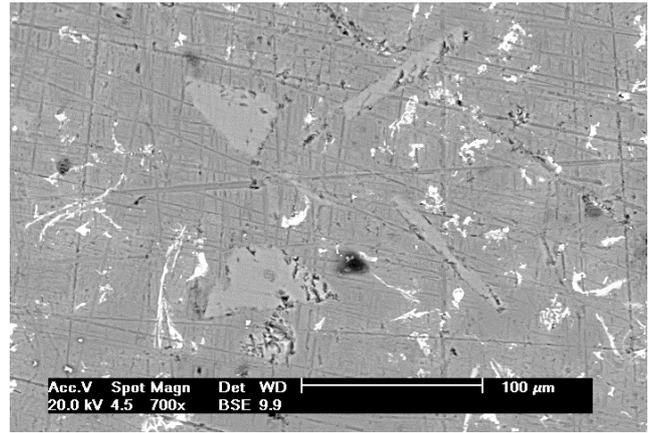


Figura B) MEV com aumento de 700 vezes.

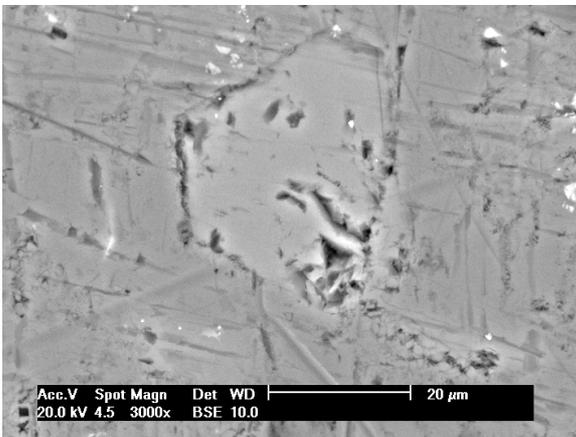


Figura C) MEV com aumento de 3000 vezes.

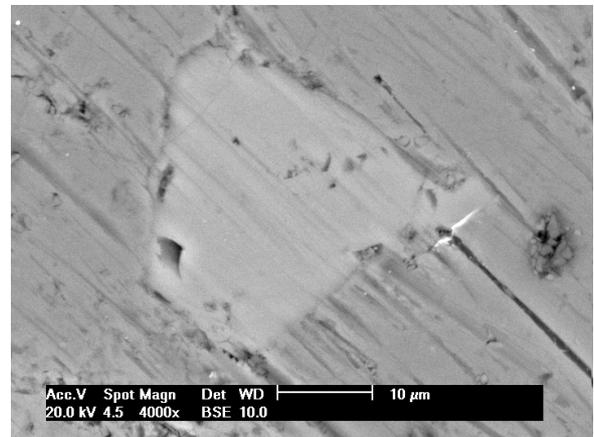


Figura D) MEV com aumento de 4000 vezes.

Figura 6.4. Análises com MEV e MO - B100 x 5N

As Figuras 6.5 e 6.6 ilustram o ensaio com carga de 8N. As regiões formadas pelos grãos de silício apresentaram inúmeras fissuras através de toda área, o que concorda com a maior força aplicada durante os ensaios.

Devido ao excelente polimento inicial, as amostras ensaiadas com 8N possibilitaram a análise com microscopia óptica com boa resolução, conforme ilustrado na Figura 6.5 C e 6.6 C, com aumento de 1000 vezes.

A Figura 6.5, ensaiada com combustível B5 teve severos danos de delaminação e fratura.

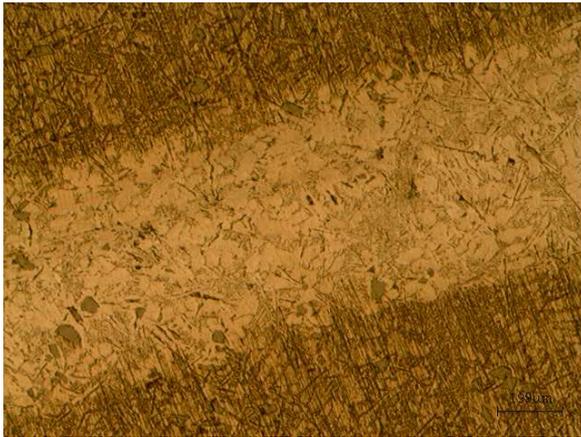


Figura A) MO com aumento de 50 vezes.

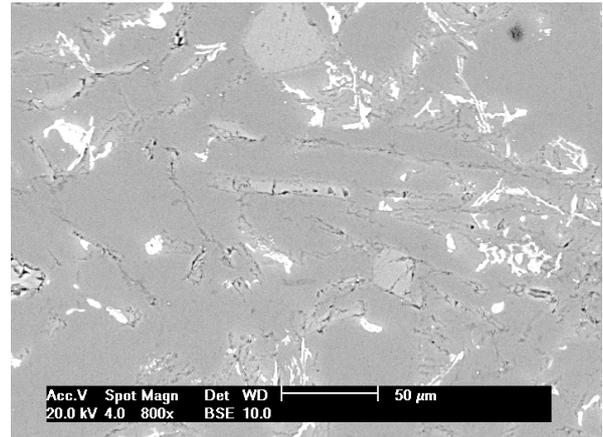


Figura B) MEV com aumento de 800 vezes.

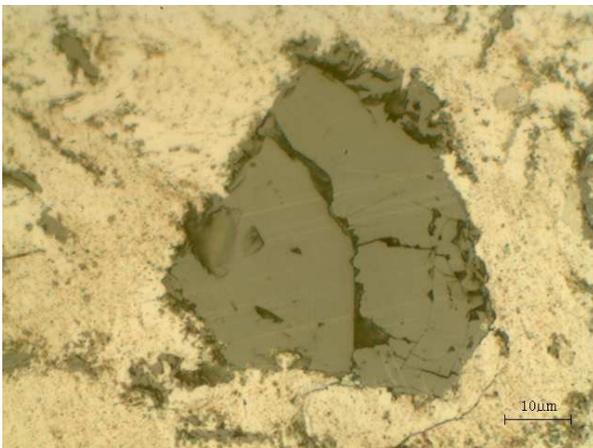


Figura C) MO com aumento de 1000 vezes.

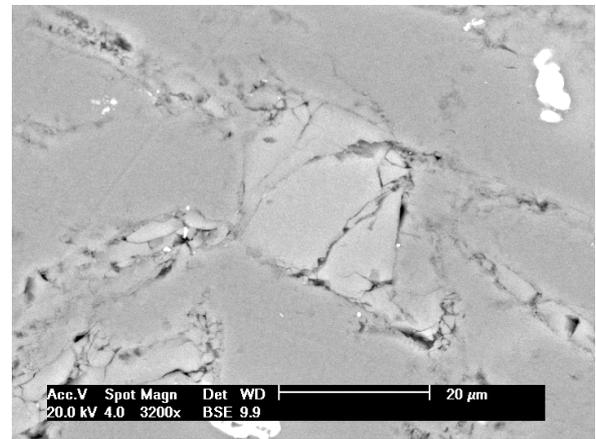


Figura D) MEV com aumento de 3200 vezes.

Figura 6.5. Análises com MEV e MO - B5 x 8N

A Figura 6.6, ensaiada com combustível B100, também apresentou alto índice de grãos com processo de delaminação, entretanto a fratura dos grãos não foi tão presente quanto no ensaio com B5.

No ensaio com carga de 8N também verificou-se maior largura da pista de desgaste para o combustível B5, ficando 76 μm mais larga do que o ensaio realizado com B100.

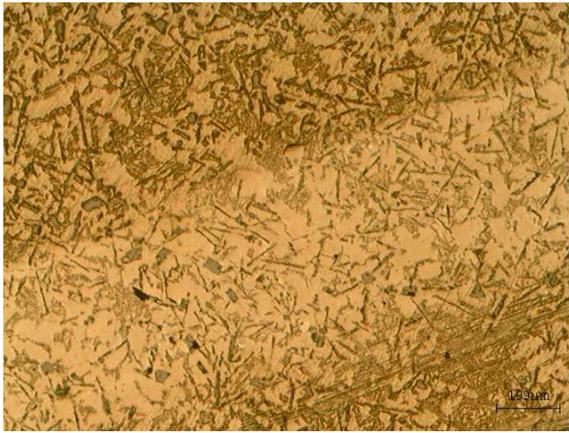


Figura A) MO com aumento de 50 vezes.

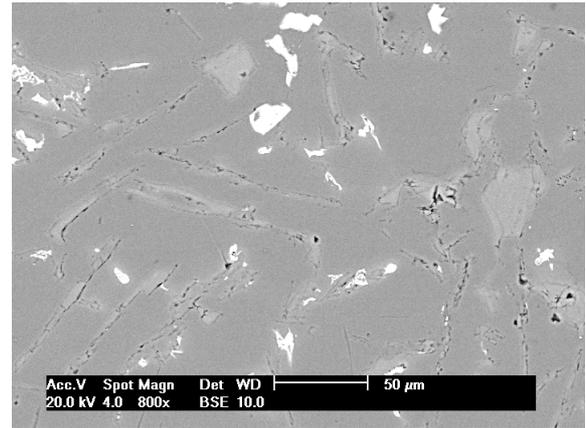


Figura B) MEV com aumento de 800 vezes.

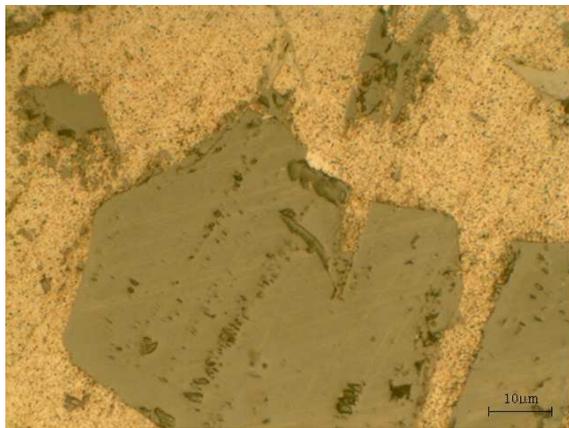


Figura C) MO com aumento de 200 vezes.

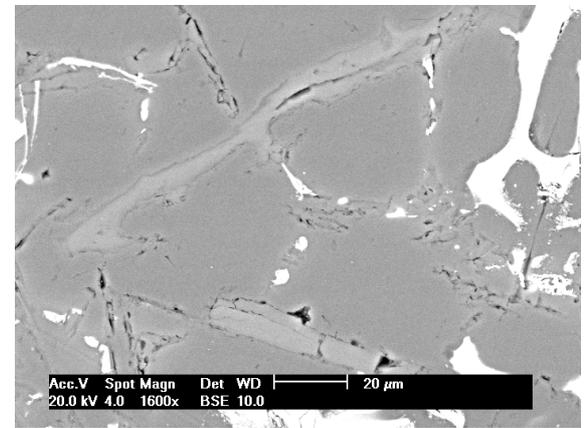


Figura D) MEV com aumento de 1600 vezes.

Figura 6.6. Análises com MEV e MO - B100 x 8N

Não foram encontrados vestígios de incrustações do material do pino na superfície do disco, o que comprova a maior resistência ao desgaste da esfera de aço empregada em relação à liga de alumínio.

7. CONCLUSÕES

A partir da metodologia proposta, resultados obtidos e comparação com a literatura especializada, foi possível a obtenção das seguintes conclusões:

- O tribômetro para análise de desgaste pino-disco, teve desempenho satisfatório e possibilitou a análise de desgaste de materiais submersos em combustíveis B5 e B100;
- Nas análises preliminares verificou-se a resposta para a mudança de parâmetros como acabamento superficial das amostras, força aplicada no pino e uso de diferentes combustíveis. Estas diferentes respostas para diferentes parâmetros evidenciam a validade das análises utilizando o tribômetro construído;
- Os ensaios realizados com carga de 8N utilizaram disco com menor rugosidade. Acredita-se que tal fato tenha mantido a variação de massa do ensaio igual a zero. Isto não inviabilizou as análises das amostras, pois mesmo sem perda de massa as características microscópicas do desgaste puderam ser analisadas.
- Em ambas as análises, 5N e 8N, constataram-se melhor lubrificidade para o biodiesel nas condições de teste adotadas, bem como a constatação feita por HASSEB, 2010 afirmando a melhor lubrificidade do biodiesel. Primeiramente, no ensaio 5N a variação volumétrica foi maior com o uso de B5. No ensaio seguinte não houve variação volumétrica, entretanto na análise microscópica qualitativa os efeitos tribológicos foram mais severos no ensaio utilizando B5.
- As características de desgaste da liga Al-Si puderam ser analisadas e se comportaram conforme estudo mostrado na revisão bibliográfica. Lâminas de silício protegeram a matriz de alumínio reduzindo o desgaste a taxas baixíssimas;

8. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar ensaios verificando a influência da estrutura bruta de solidificação em relação à resistência ao desgaste;
- Analisar a influência dos principais parâmetros de ensaio (velocidade e força) na resistência ao desgaste da liga alumínio-silício;
- Estudar outros materiais, como as ligas de cobre e zinco, no comportamento ao desgaste na presença de biodiesel;
- Realizar a análise com difração de raios-X para evidenciar a influência do biodiesel na formação do tribofilme na superfície da liga AA305.
- Investigar o comportamento dos materiais com diferentes misturas de diesel e biodiesel;
- Melhorar e implementar o dispositivo projetado e construído.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM D4172, Wear Preventive Characteristics of Lubricating Fluid (Four-Ball Method). **American Society for Testing and Materials**. ASM Society: United States, 5 p., 2010.

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 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 G76, Standard Test Method for Conducting Erosion Tests by Solid Particle Impingement Using Gás Jets. **American Society for Testing and Materials**. ASM Society: United States, 6 p., 2004.

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.

BHUSHAN, Bharat; **Introduction to Tribology**. John Wiley & Sons: New York, 732 p., 2002.

BRASIL, Ministério da Ciência e Tecnologia. **Testes e Ensaios para Validação do Uso da Mistura Biodiesel B5 em Motores e Veículos**. Secretaria de Desenvolvimento Tecnológico e Inovação. Brasília, 175 p., 2009.

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

BURANY, X.M; PERRY, T.A; SACHDEV, A.K; ALPAS, A.T. Subsurface Sliding Wear Damage Characterization in Al-Si Alloys using Focused Iron Beam and Cross-Sectional TEM techniques. **Wear**, v.270, pp.152-162, 2011.

CARRETEIRO, Ronald Pinto. **Lubrificantes e lubrificação**. Makron Books: São Paulo, 493 p., 1998.

CHANDRASHEKHARAIHAH, T.M.; Kori, S.A. Effect of Grain Refinement and Modification on the Dry Sliding Wear Behaviour of Eutectic Al-Si Alloys. **Tribology International**, v. 42, pp. 59– 65, 2009.

CONDE, A.P. **Desempenho de Motor Ciclo Diesel Alimentado com Biodiesel de Óleo de Soja**. Lavras: UFLA, 77p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Lavras, Brasil, 2007.

CORRÊA, I.M; Maziero, J.V; Úngaro, M.R; Bernardi, J.A; Storino, M. Desempenho de Motor Diesel com Mistura de Biodiesel de Óleo de Girasol. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, 21 de março de 2007, v.32, p.923-928. Disponível em < <http://www.editora.ufla.br>> . Acessado em : 10 de novembro de 2010.

FRAER, R; Dinh, H; Kenneth, P; McCormick, RL; Chandler, K; Buchholz, B. Operating Experience and Teardown Analysis for Engines Operating on Biodiesel Blends (B20). USA: NREL, **SAE Technical Paper No. 2005-01-3641**, 12 p., 2005.

HASEEB, A.S.M.A; Fazal, M.A; Masjuki, H.H. An Evolution of Material Compatibility; Performance; Emission and Engine Durability. **Renewable and Suitable Energy Reviews**, v.15, pp.1314-1324, 2010.

HE, C; LOU, D; WANG, J; CAI, Q. Corrosion Protection and Formation Mechanism of Anodic Coating on SiCp/Al Metal Matrix Composite. **Thin Solid Films**, v519, pp. 4759-4764, 2011.

JULIATO, A. **Análise da Influência de Diferentes Misturas de Biodiesel no Desempenho e Emissão de Poluentes de um Motor Diesel Agrícola**. Piracicaba: USP, 146p. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Faculdade de Agronomia, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Brasil, 2006.

KEGL, B; Kegl, M; Jerman, M.S; Pehan, S. Biodiesel Influence on Tribology Characteristics of a Diesel Engine. **Fuel**, v.88, pp.970-979, 2008.

KORI, S.A; CHANDRASHENKHARAIHAH, T.M. Effect of Grain Refinement and Modification on the Dry Sliding Wear Behaviour of Eutectic Al-Si Alloy. **Tribology International**, v.42, pp.59-65, 2008.

LASA, L.; Rodriguez-Ibabe, Effect of Composition and Processing Route on the Wear Behaviour of Al-Si Alloys. **Scripta Materialia**, v.46, pp. 477-481, 2002.

LEUNG, D.Y.C; Wu, X; Leung, M.K.H. A Review on Biodiesel Production using Catalyzed Transesterification. **Applied Energy**, v.87, pp.1083-1095, 2009.

LOZANO, D.E.; Mercado-Solisa, R.D.; Perez, A.J.; Talamantes, J.; Morales, F.; Hernandez-Rodriguez, M.A.L. Tribological Behaviour of Cast Hypereutectic Al-Si-Cu Alloy Subjected to Sliding Wear. **Wear**, v. 267, pp. 545-549, 2009.

MAHATO, A; Sachdev, A; Biswas, S.K. Lubricated Tribology of a Eutectic Aluminium-Silicon Alloy in the Ultra-Mild Wear and Mild Wear Regimes for Long Sliding Times. **ACSAMI**, Vol 2, 10, 2870-2879, 2010.

MANNHEIMER, W.A; **Microscopia dos Materiais**. 1.ed. E-papers Serviços Editoriais: Rio de Janeiro, 221 p., 2002.

MISHRA, R; TESFA, B; GU, F; POWLES, N. Prediction Models for Density and Viscosity of Biodiesel and their Effects on Fuel Supply System in CI Engines. **Renewable Energy**, v.35, p.2752-2760, 2010.

PADILHA, A.G; Filho, F.A; **Técnicas de Análise Micro Estrutural**. 1.ed. Hemus: São Paulo, 190 p., 2004.

POWER, **Produção de Biodiesel no Brasil deve Crescer 50% em 2010**. Disponível em: <<http://www.power.inf.br/site/todas-as-noticias-de-energias-alternativas/3794-producao-de-biodiesel-no-brasil-deve-crescer-50-em-2010>>. Acesso em: 17 dezembro 2010.

PRASADA-RAO, A.K.; Murty, B.S.; Chakraborty, M. Improvement in Tensile Strength and Load Bearing Capacity During Dry Wear of Al–7Si Alloy by Combined Grain Refinement and Modification. **Materials Science and Engineering A**, v. 395, pp. 323–326, 2005.

SAHIN, Y. Abrasive Wear Behaviour of SiC/2014 Aluminium Composite. **Tribology International**, v.43, pp.939-943, 2009.

SAMARAS, Z; Ntziachristos, L; Fontaras, G; Kousoulidou, M. Biodiesel Blend Effect on Common-Rail Diesel Combustion and Emissions. **Fuel**, v.89, pp.3442-3449, 2010.

SLATTERY, B.E.; EDRISYA, A.; PERRY, T. Investigation of Wear Induced Surface and Subsurface Deformation in a Linerless Al–Si Engine. **Wear**, v. 269, pp. 298–309, 2010.

SO, H., Characteristics of Wear Results Tested by Pin-on-Disc at Moderate to High Speeds. **Tribology International**, v.29, n.5, pp. 415-423, 1996.

STACHOWIAK, Gwidon W.; Batchelor, Andrew W. **Engineering Tribology**. 2.ed. Butterworth-Heinemann: Boston, 744 p., 2001.

STONE, Richard. **Introduction to Internal Combustion Engines**. 2.ed. USA: Society of Automotive Engineers, 573 p., 1993.

STOETERAU, R.L. **Tribologia**. Florianópolis: UFSC, 171 p., 2004. (Apostila da disciplina EMC 5315).

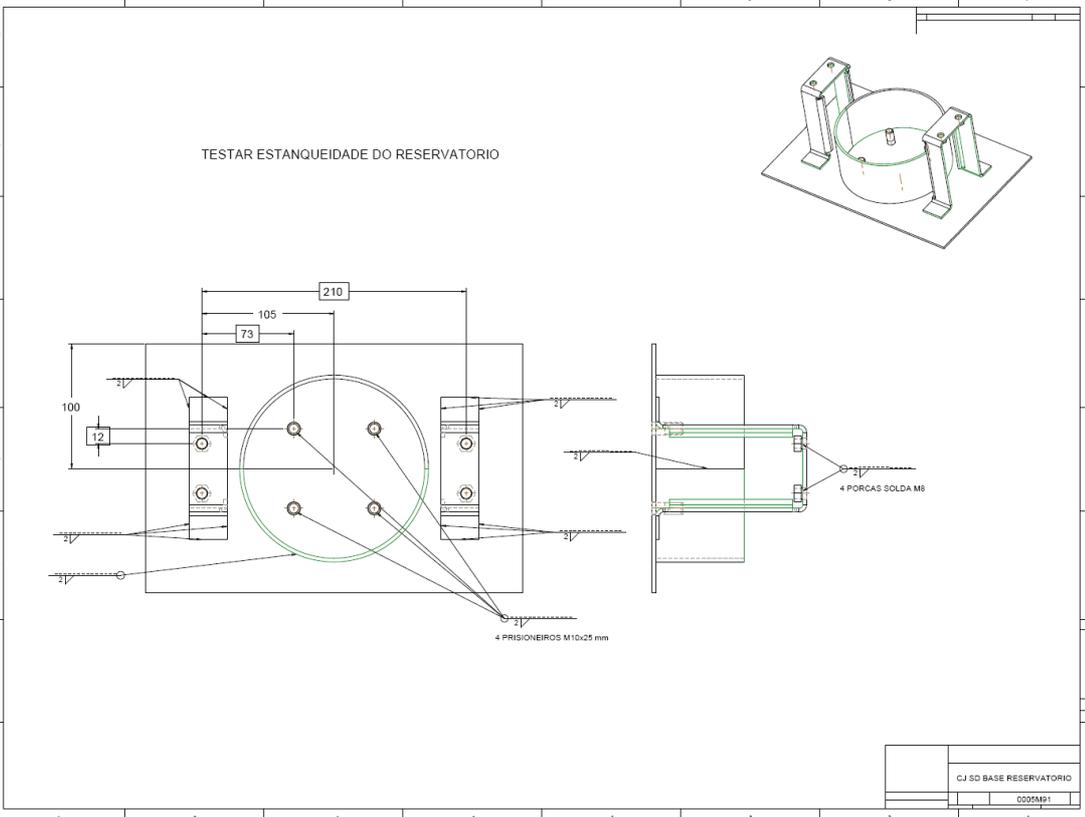
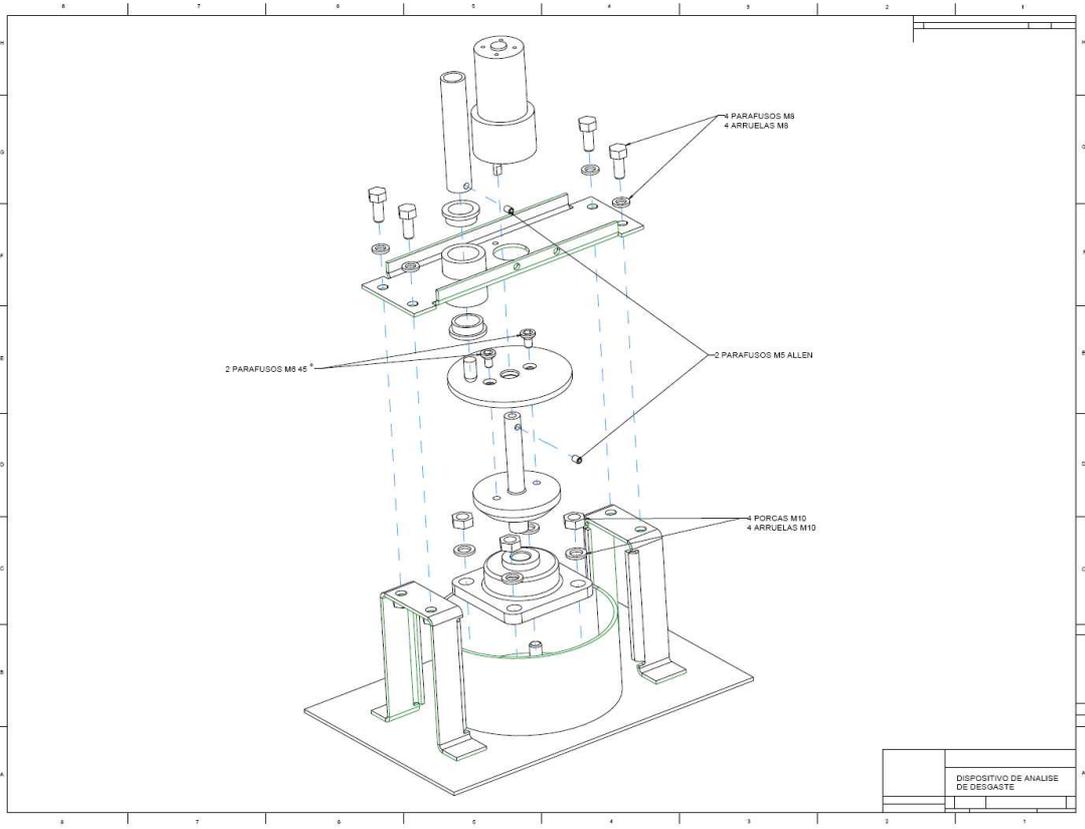
SU, J.F; NIE, X; STOILOV, V. Characterization of Fracture and Debonding of Si Particles in AlSi Alloys. **Materials Science and Engineering A**, v 527, pp. 7168 - 7175, 2010.

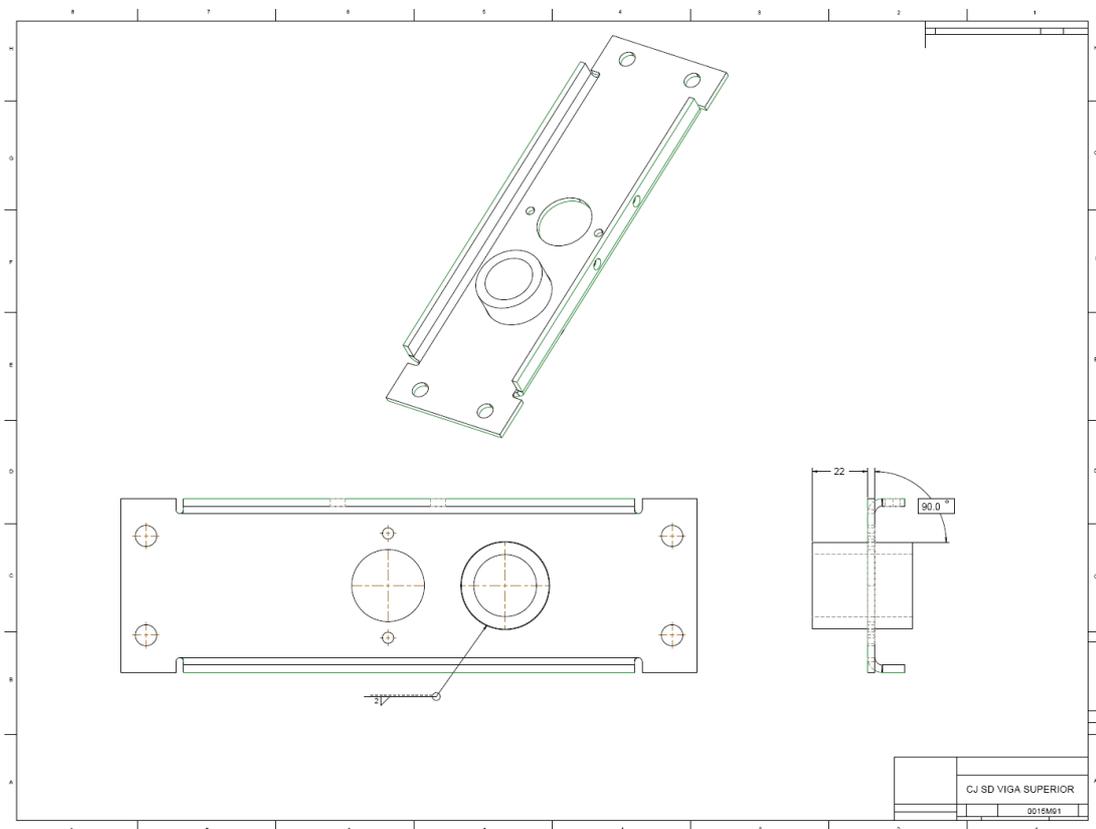
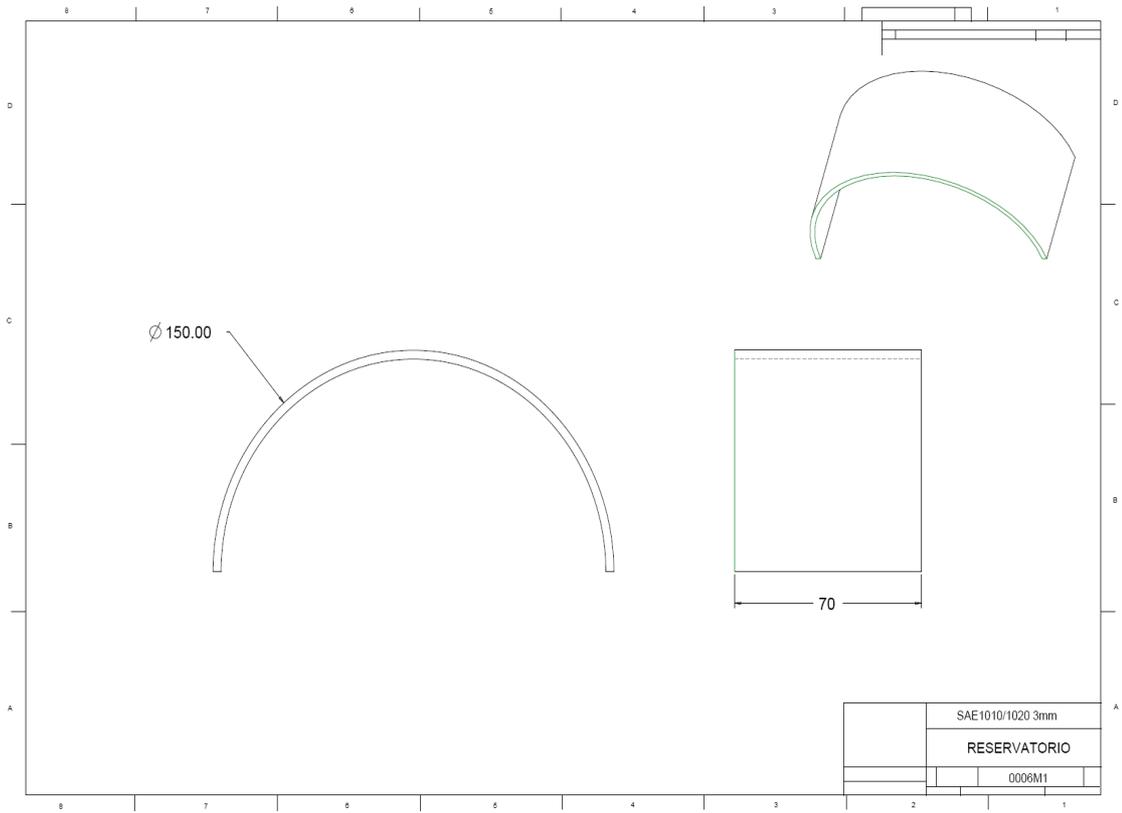
TORREIRA, Raul Peragallo. **Fluidos Térmicos: Água, Vapor, Óleos Térmicos**. Hemus: São Paulo, 319 p., 2002.

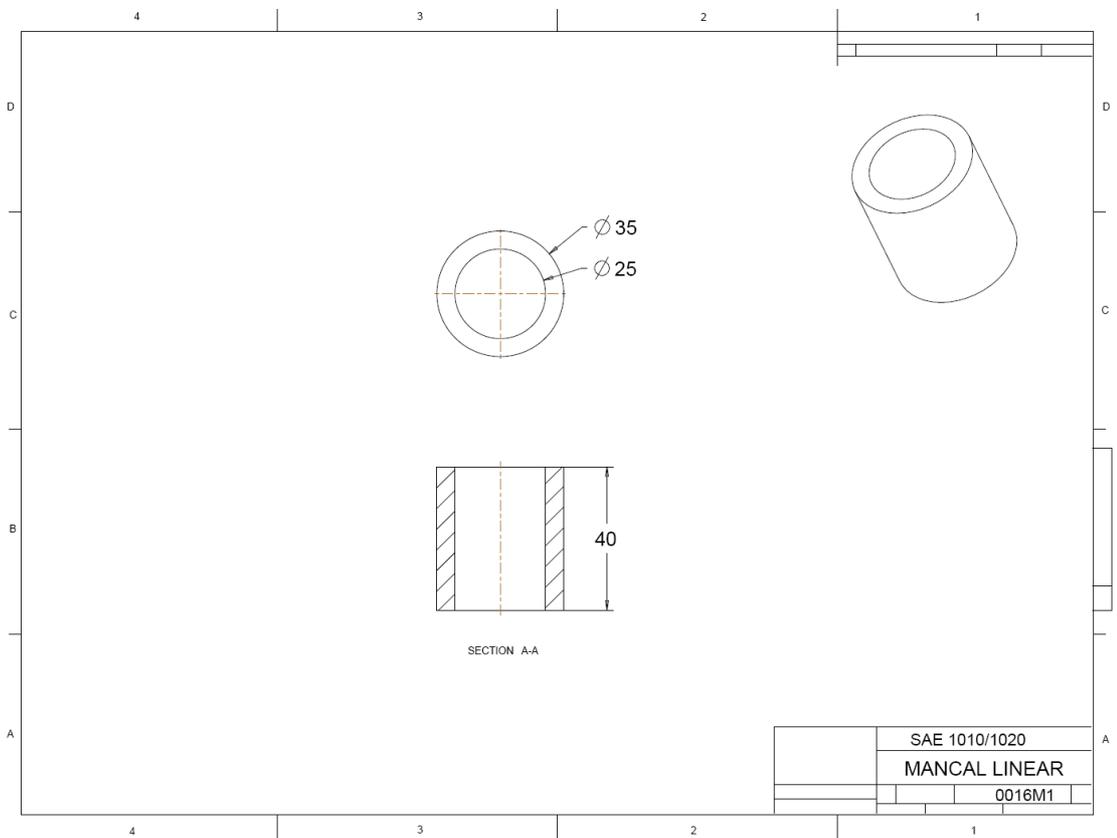
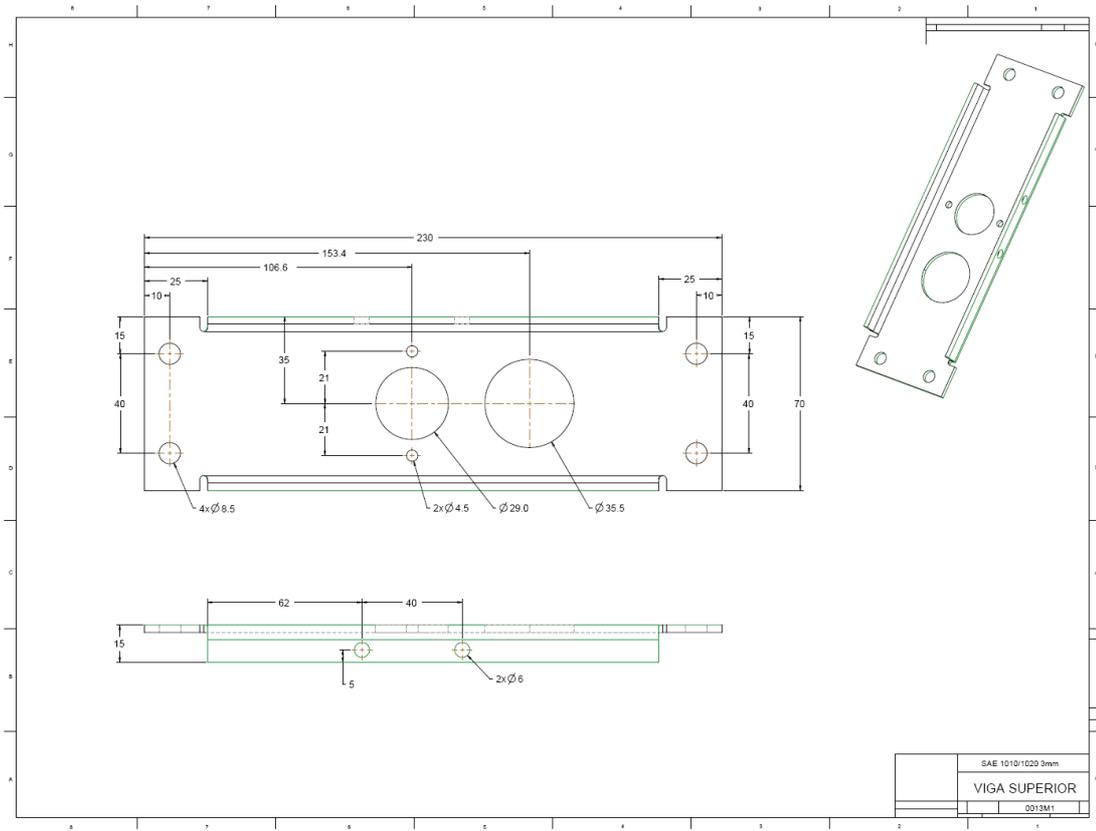
VOLCI, G.A. **Comportamento Tribológico do Anel do Primeiro Canaleta em Motor Operando em Sistema Flex Fuel**. Curitiba: UFP, 131p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais e Metalúrgica). Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, Brasil, 2007.

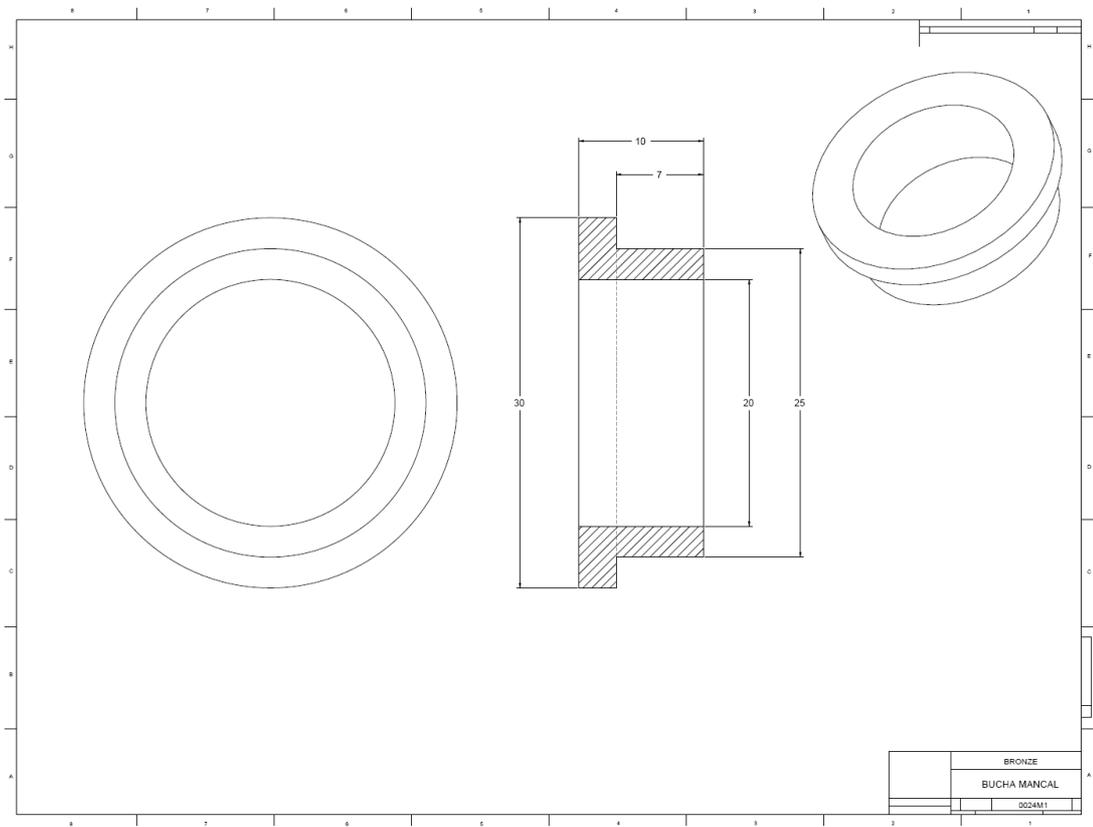
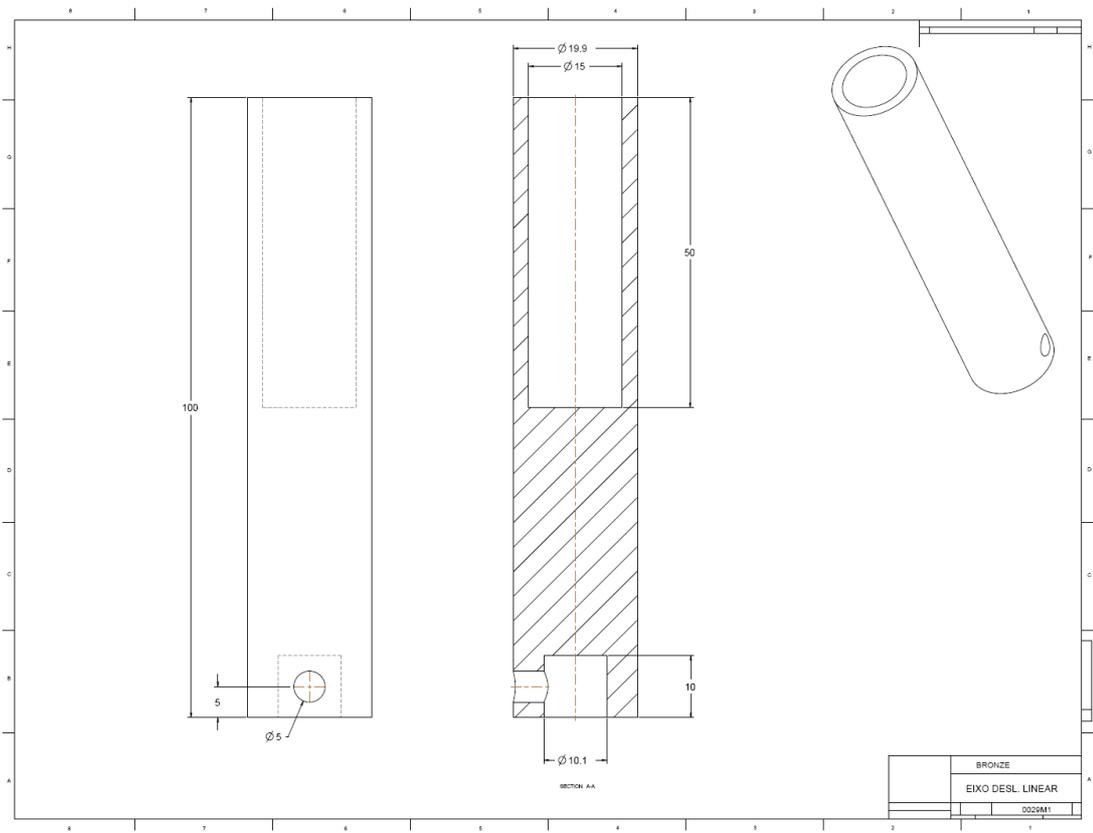
YANG, L.J. A Test Methodology for the Determination of Wear Coefficient. **Wear**, v.259, pp. 1453 - 1461, 2005.

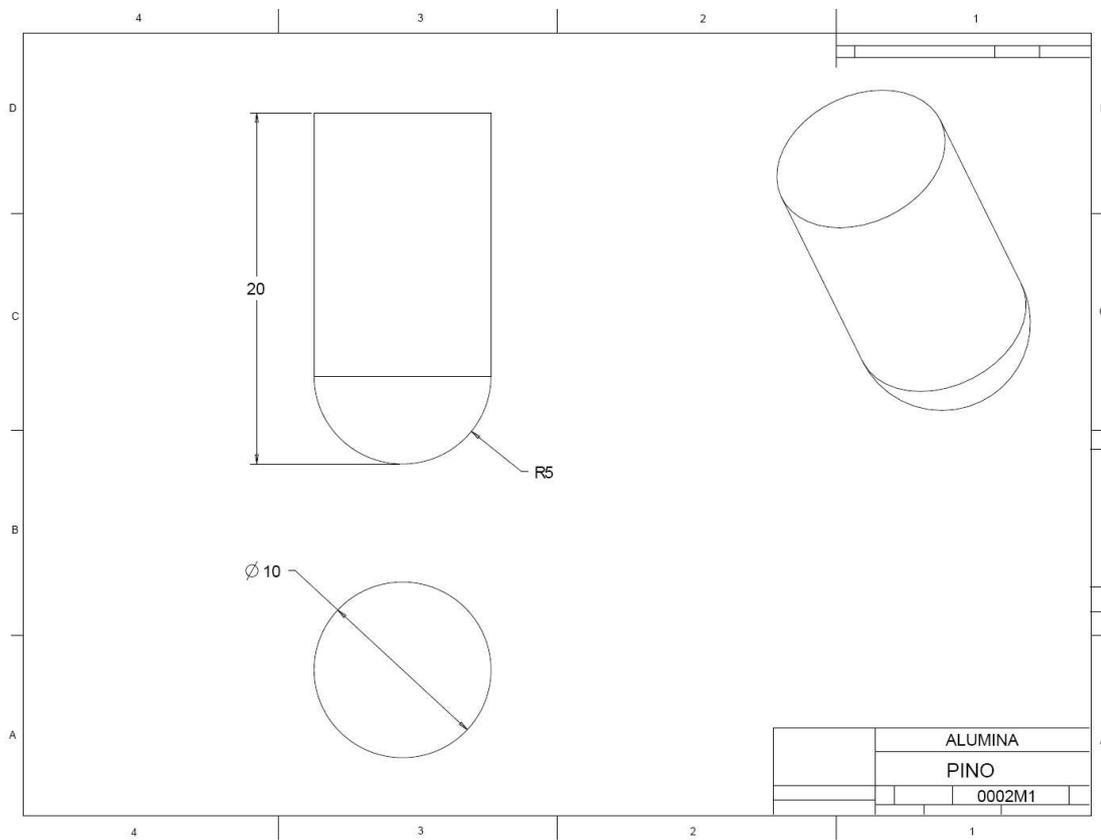
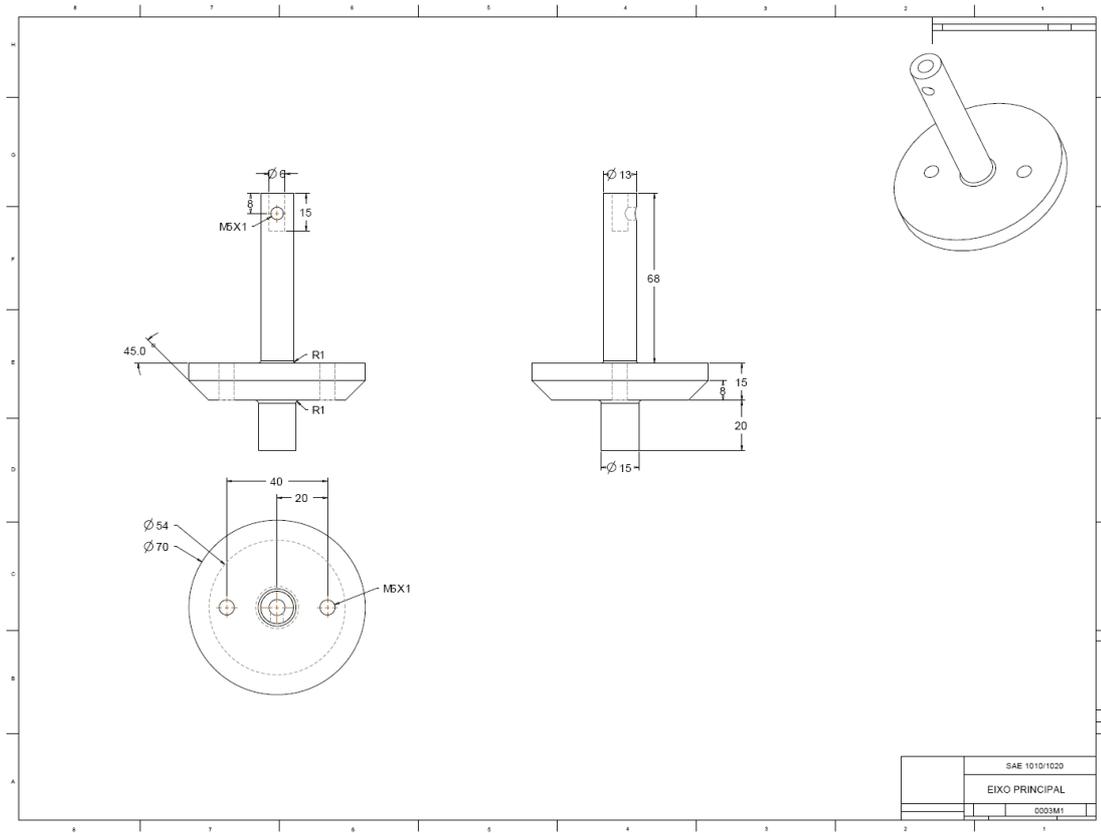
ANEXO A

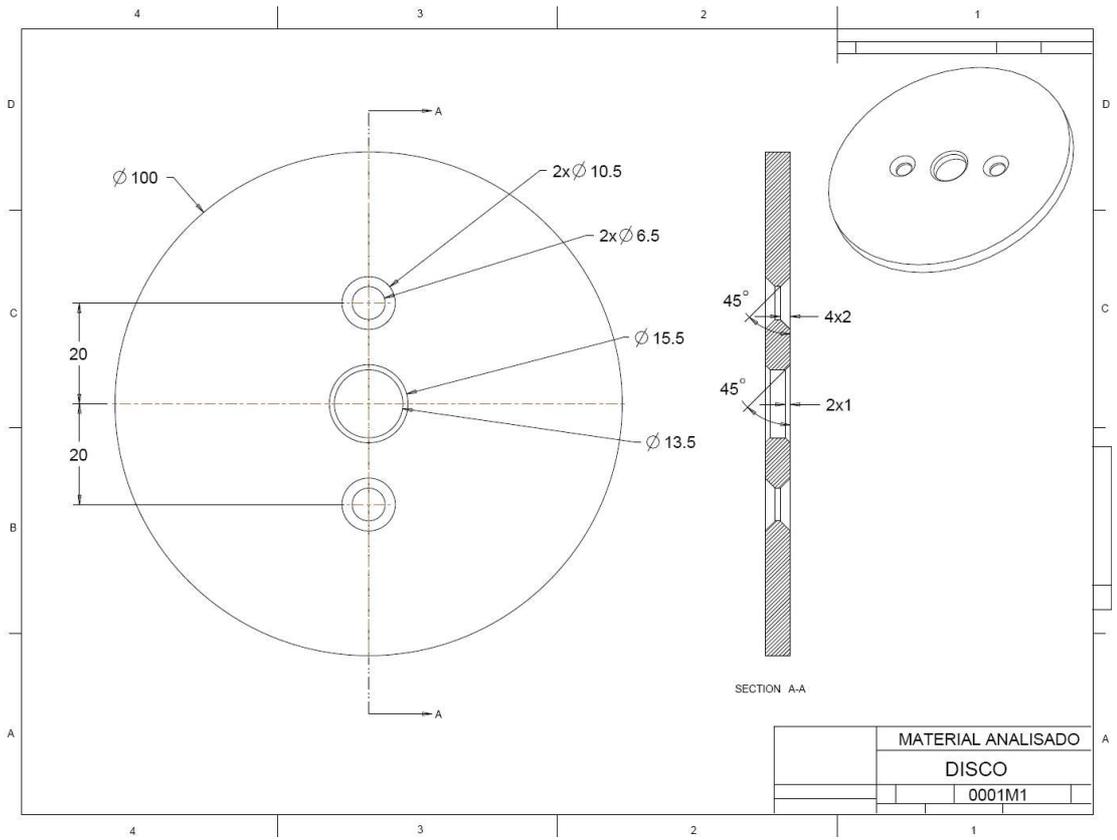












ANEXO B

```
#include <stdio.h>

#include "msc1211.h"

//display

#define LCDRS      P3_7
#define LCDEnable  P3_6
#define LCDData    P0
#define MAXCOL     17
#define BASELINE1  0x80
#define BASELINE2  0xC0

// timer

sfr at 0x91 __EXIF;
sfr at 0xe8 __EIE;

// pwm

sfr at 0xA1 __PWMCON;
sfr at 0xA3 __PWMHI;
sfr at 0xA2 __PWMLO;
sfr at 0xFB __USEC;
sfr at 0xF1 __PDCON;
sfr at 0xB3 __P3DDRL;
sfr at 0xa3a2 __TONE;
```

```

sfr at 0x8E __CKCON;
sfr at 0x0E __SMOD1;

//Variaveis interruptor incoder
unsigned int rev = 0;
unsigned int frequencia;
unsigned int i_rev=0;

//variaveis timer
unsigned int tempo_incoder = 0;

//var controle
int erro = 1;
int erro_i=0;
unsigned int set_point=150;
int pwm=10;

//***** Delay 1ms *****
void Delayms(int ms)
{
    int i;
    for(i=0;i<ms;i++)
    {
        _asm
            MOV R1,#4
            0$: MOV R0,#228
            1$: NOP
    }
}

```

```

        DJNZ R0,1$
        DJNZ R1,0$
    _endasm;
}
}

//***** LCD *****/
void WriteCommandLCD(char Data)
{
    Delaysms(2);
    LCDRS = 0;
    LCDData= (Data | 0xf) & (LCDData | 0xf0);
    LCDEnable=1;
    LCDEnable=0;
    LCDData=((Data<<4) | 0xf) & (LCDData | 0xf0);
    LCDEnable=1;
    LCDEnable=0;
    Delaysms(2);
}

void putchar(char c)
{
    if(c=='\r')
        WriteCommandLCD(BASELINE1);
    else if(c=='\n')
        WriteCommandLCD(BASELINE2);
    else

```

```

{
    LCDRS=1;
    LCDData= (c | 0xf) & (LCDData | 0xf0);
    LCDEnable=1;
    LCDEnable=0;
    LCDData=((c<<4) | 0xf) & (LCDData | 0xf0);
    LCDEnable=1;
    LCDEnable=0;
}
}

void ClearLCD(void)
{
    WriteCommandLCD(0x01);
}

//***** Interrupcao a cada MS *****
void _timer0(void) interrupt 1
{
    TH0 = 0xFC;
    TL0 = 0x66; // seta flag tempo para 1ms

    tempo_incoder ++;
}

//***** Rotina para Calculo de Controle *****
void controle(void)

```

```
{  
    erro = set_point - frequencia;  
    if (erro > 200)  
        erro = 200;  
    if (erro <-200)  
        erro = -200;  
    pwm= erro/5;  
  
    erro_i += erro;  
    if (erro_i > 3000)  
        erro_i = 3000;  
    if (erro_i <-3000)  
        erro_i = -3000;  
    pwm += erro_i/60;  
  
    if (pwm > 150)  
        pwm = 150;  
    if (pwm < 10)  
        pwm = 10;  
  
    __PWMHI = pwm;  
}  
  
//***** Interrupcao a cada Pulso Incoeder *****  
void iex7(void) interrupt 11  
{  
    frequencia = 60000/tempo_incoder;
```

```
tempo_incoder = 0;
controle();

    i_rev++;
if (i_rev >= 1000)
{
    rev ++;
    i_rev = 0;
}
    __EXIF = 80; // limpa flag de interrupcao do int 5
}

//***** MAIN *****
void main()
{
    unsigned int prg=1;
    unsigned int lim_rev = 10;

//habilita LCD
    LCDEnable=0;
    Delayms(100);
    WriteCommandLCD(0x28);
    WriteCommandLCD(0x01);
    WriteCommandLCD(0x0f);
    ClearLCD();

    while (1)
```

```
{
switch (prg)
{
case 1:
    /******* Botao para setar Velocidade *****/
    while (!P1_5)
    {
        set_point += 10;
        if (set_point > 250)
            set_point = 150;
        printf("\rFREQ:%11u",set_point);
        Delayms(200);
        break;
    }
    /******* Botao para setar Revolucoes *****/
    while (!P1_4)
    {
        lim_rev += 10;
        if (lim_rev > 150)
            lim_rev = 10;
        printf("\rREV (MIL):%6u",lim_rev);
        Delayms(200);
        break;
    }
    /******* Botao para Iniciar Ensaio *****/
    while (!P3_2)
    {
```

```
prg=2;
```

```
/** habilita pwm */
```

```
__PDCON&=~0x12;
```

```
__PWMCON=0x21;//29
```

```
__USEC = 0x4;// altera o periodo 10 miliseg
```

```
__P3DDRL&=~0xC0;
```

```
__PWMHI = 0xFF;// seta duty entre 0 e 256
```

```
__PWMLO = 0x00;
```

```
__PWMCON=0x31;//39
```

```
__CKCON &= 0xF7;
```

```
__PWMHI = 20; // valor qualquer para iniciar controle.
```

```
}
```

```
/** habilita int5 */
```

```
__EIE = 0x08;
```

```
IE = 0x82;
```

```
/** habilita timer */
```

```
TMOD = 0x11;
```

```
TCON = 0xF0;
```

```
TF0 = 0; //limpa flag interrupcao timer
```

```
TH0 = 0xFC; //tempo para estourar a cada 1ms
```

```
TL0 = 0x66;
```

```
}
```

```
break;

case 2: // imprimir status do teste no display
    printf("\rFREQ:%11u",frequencia);
    printf("\nREV:%8d.",rev);
    Delayms(20);
    printf("\n%16d000",i_rev);

break;
}
if (rev >= lim_rev) // comando de parada de ensaio
{
    printf("\r FIM DO TESTE ");
    printf("\nTOTAL:%6u.000",rev);
    __PWMCON=0; // desabilita PWM
    prg = 0;
}
}
}
```