INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

Autarquia Associada à Universidade de São Paulo

**Fabricação de equipamento para avaliação do desgaste microabrasivo e aplicação em
ligas Al - 19% Si com adições de magnésio e cobre obtidas por fundição por
centrifugação**

ROGÉRIO LIMA BARRETO

Dissertação apresentada como parte dos
requisitos para a obtenção do Grau de Mestre
em Ciências na área Tecnologia Nuclear -
Materiais

Orientador:
Prof. Dr. Antônio Augusto Couto

Coorientador:
Prof. Dr. Nelson Batista de Lima

São Paulo

2020

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

Autarquia Associada à Universidade de São Paulo

**Fabricação de equipamento para avaliação do desgaste microabrasivo e aplicação em
ligas Al - 19% Si com adições de magnésio e cobre obtidas por fundição por
centrifugação**

Versão Corrigida

Versão Original disponível no IPEN

ROGÉRIO LIMA BARRETO

Dissertação apresentada como parte
dos requisitos para a obtenção do Grau
de Mestre em Ciências na área
Tecnologia Nuclear - Materiais

Orientador:

Prof. Dr. Antônio Augusto Couto

Coorientador:

Prof. Dr. Nelson Batista de Lima

São Paulo

2020

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte

Como citar:

BARRETO, R. L. . ***Fabricação de equipamento para avaliação do desgaste microabrasivo e aplicação em ligas Al - 19% Si com adições de magnésio e cobre obtidas por fundição por centrifugação.*** 2020. 94 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN/SP, São Paulo.
Disponível em: (data de consulta no formato: dd/mm/aaaa)

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de geração automática da Biblioteca IPEN/USP,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Barreto, Rogério Lima Fabricação de equipamento para a avaliação do desgaste microabrasivo e aplicação em ligas Al - 19% Si com adições de magnésio e cobre obtidas por fundição por centrifugação / Rogério Lima Barreto; orientador Antônio Augusto Couto; co-orientador Nelson Batista Lima. -- São Paulo, 2020. 94 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Nuclear (Materiais) -- Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2020. 1. Desgaste microabrasivo. 2. Ligas Al - Si hipereutéticas. 3. Fundição por centrifugação. I. Couto, Antônio Augusto, orient. II. Lima, Nelson Batista, co-orient. III. Título.
--

FOLHA DE APROVAÇÃO

Autor: Rogério Lima Barreto

Título: Fabricação de equipamento para avaliação do desgaste microabrasivo e aplicação em ligas Al - 19% Si com adições de magnésio e cobre obtidas por fundição por centrifugação

Dissertação apresentada ao programa de Pós Graduação em Tecnologia Nuclear da Universidade de São Paulo para obtenção do grau de Mestre em Ciências na área Tecnologia Nuclear - Materiais.

Data: ____________

Banca examinadora

Prof. Dr.: _____

Instituição: _____ **Julgamento:** _____

Prof. Dr.: _____

Instituição: _____ **Julgamento:** _____

Prof. Dr.: _____

Instituição: _____ **Julgamento:** _____

Prof. Dr.: _____

Instituição: _____ **Julgamento:** _____

Prof. Dr.: _____

Instituição: _____ **Julgamento:** _____

DEDICATÓRIA

Dedico, a minha mãe, razão de minha existência.

AGRADECIMENTO

Ao Dr. Antônio Augusto Couto, minha eterna gratidão pela orientação, dedicação, apoio, prontidão, conselhos, incentivos. Muito obrigado por tudo.

Ao Dr. Nelson Batista Lima, pelos valiosos conhecimentos transmitidos e pela atenção nos momentos que precisei.

RESUMO

BARRETO, Rogério L. *Fabricação de equipamento para avaliação do desgaste microabrasivo e aplicação em ligas Al - 19% Si com adições de magnésio e cobre obtidas por fundição por centrifugação*. 2020. 94 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear - Materiais) – Instituto de Pesquisas Energéticas Nucleares – Autarquia Associada à Universidade de São Paulo.

Ligas do sistema Al - Si são as mais importantes entre as ligas fundidas de alumínio. Como a densidade do silício ($2,33 \text{ g/cm}^3$) e do Mg_2Si ($1,88 \text{ g/cm}^3$) são menores do que a do alumínio ($2,67 \text{ g/cm}^3$), pretende-se com a fundição por centrifugação obter uma maior concentração de partículas de silício primário e de Mg_2Si na parede interna da camisa. Nesse sentido, os objetivos do trabalho são realizar a construção de uma máquina para o estudo de desgaste microabrasivo e determinar o desgaste na superfície interna de tubos fundidos por centrifugação de ligas Al-Si hipereutéticas com adições de magnésio e cobre. As amostras para ensaios de desgaste microabrasivo foram retiradas da parede interna da camisa de cilindro automotivo obtida pelo processo fundição por centrifugação. A construção da máquina para o ensaio de desgaste microabrasivo por esfera rotativa ocorreu com êxito após uma etapa inicial utilizando um protótipo em escala menor. A análise do desgaste microabrasivo foi realizada em amostras da liga Al-19%Si com adições de 2,5 e 5% de cobre e magnésio. As ligas foram obtidas pelo processo de fundição por centrifugação nas composições Al-19%Si, Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu e Al-19%Si-5%Mg-5%Cu. O desenvolvimento de uma máquina e a avaliação das superfícies internas de tubos centrifugados com adições de magnésio e cobre, permitiram concluir que a máquina teve sucesso quanto à geração das calotas de desgaste nas regiões inicial, central e final dos tubos centrifugados. Para cada tubo e região foram obtidas as áreas, os volumes e as profundidades das calotas de desgaste, que variaram de acordo com a quantidade de partículas primárias de silício e de Mg_2Si que se concentraram na superfície interna do tubo centrifugado. A resistência ao desgaste está relacionada com a presença de partículas primárias na superfície interna dos tubos centrifugados. Contudo, uma quantidade excessiva de partículas primárias acumuladas junto à superfície interna dos tubos centrifugados pode conduzir a um desgaste maior devido ao maior arrancamento das partículas.

Palavras - Chave: desgaste microabrasivo; ligas Al – Si hipereutéticas; fundição por centrifugação.

ABSTRACT

BARRETO, Rogério L. *Manufacture of equipment for evaluation of microabrasive wear and application in Al - 19% Si alloys with magnesium and copper additions obtained by centrifugal casting*. 2020. 94 p. Dissertation (Master in Nuclear Technology - Materials) - Institute of Nuclear Energy Research - Autarchy Associated to the University of São Paulo.

Alloys of the Al - Si system are the most important of the cast aluminum alloys. As the density of silicon (2.33 g / cm³) and Mg₂Si (1.88 g / cm³) are lower than that of aluminum (2.67 g / cm³), it is intended with centrifugal casting to obtain a greater concentration of primary silicon particles and Mg₂Si on the inner wall of the jacket. In this sense, the objectives of the work are to carry out the construction of a machine for the study of micro-abrasive wear and to determine the wear on the internal surface of tubes cast by centrifugation of hyper-eutectic Al – Si alloys with magnesium and copper additions. The samples for micro abrasive wear tests were removed from the inner wall of the automotive cylinder liner obtained by the centrifugal casting process. The construction of the machine for the micro-abrasive wear test by rotating sphere was successful after an initial step using a smaller scale prototype. The analysis of micro-abrasive wear was performed on samples of the Al-19% Si alloy with additions of 2.5 and 5% copper and magnesium. The alloys were obtained by the casting process by centrifugation in the compositions Al-19% Si, Al-19% Si-2.5% Mg-2.5% Cu and Al-19% Si-5% Mg-5% Cu. The development of a machine and the evaluation of the internal surfaces of centrifuged tubes with additions of magnesium and copper, allowed us to conclude that the machine was successful in generating the wear caps in the initial, central and final regions of the centrifuged tubes. For each tube and region, the areas, volumes and depths of the wear caps were obtained, which varied according to the quantity of primary silicon and Mg₂Si particles that were concentrated on the inner surface of the centrifuged tube. Wear resistance is related to the presence of primary particles on the inner surface of the centrifuged tubes. However, an excessive amount of primary particles accumulated near the inner surface of the centrifuged tubes can lead to greater wear due to the greater pullout of the particles.

Key words: micro abrasive wear; Al-Si hypereutectic alloys; centrifugal casting.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Perfil da Indústria Brasileira do Alumínio (Associação Brasileira de Alumínio. Balanço dos Bens).....	18
Tabela 2- Amostras dos resultados Composição Al-19%Si início (tubo 1)	56
Tabela 3- Amostras dos resultados Composição Al-19%Si meio (tubo 1)	56
Tabela 4 - Amostras dos resultados Composição Al-19%Si fim (tubo 1).....	56
Tabela 5 - Amostras dos resultados Composição Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu início (tubo2).....	56
Tabela 6 - Amostras dos resultados Composição Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu meio (tubo 2).....	57
Tabela 7 - Amostras dos resultados Composição Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu fim(tubo 2)	57
Tabela 8 - Amostras dos resultados Composição Al-19%Si5%Mg5%Cu início (tubo 3)	57
Tabela 9 - Amostras dos resultados Composição Al-19%Si5%Mg5%Cu meio(tubo 3)	57
Tabela 10 - Amostras dos resultados Composição Al-19%Si5%Mg5%Cu fim (tubo 3).....	58
Tabela 11 - Resumo das tabelas 12, 13 e 14 seguintes referente aos resultados da composição Al-19%Si início, meio e fim (tubo1).....	59
Tabela 12 - Amostras dos resultados Composição Al-19%Si início (tubo1)	59
Tabela 13 - Amostras dos resultados Composição Al-19%Si meio (tubo 1)	60
Tabela 14 - Amostras dos resultados Composição Al-19%Si fim (tubo 1).....	62
Tabela 15 - Resumo das tabelas 16, 17 e 18 seguintes referente aos resultados da composição Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu início, meio e fim (tubo 2)	64
Tabela 16 - Amostras dos resultados Composição Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu início (tubo2).....	64
Tabela 17 - Amostras dos resultados Composição Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu meio (tubo 2).....	66
Tabela 18 - Amostras dos resultados Composição Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu fim (tubo2)	67
Tabela 19 - Resumo das tabelas 20, 21 e 22 seguintes referente aos resultados da composição Al-19%Si5%Mg5%Cu início, meio e fim (tubo2).....	69
Tabela 20 - Amostras dos resultados Composição Al-19%Si5%Mg5%Cu início (tubo 3)	69
Tabela 21 - Amostras dos resultados Composição Al-19%Si-5%Mg-5%Cu meio (tubo 3).....	71
Tabela 22 - Amostras dos resultados Composição Al-19%Si-5%Mg-5%Cu fim (tubo 3)	72

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. – Brunidor.....	20
Figura 2. – Influência dos elementos de liga na viscosidade do alumínio, Verrane na variação da fluidez do alumínio em função dos teores de silício e cobre, Kin e Loper.....	24
Figura 3. – Modelos da forma que ocorrem o desgaste abrasivo. (a) grão abrasivos presos deslizam sobre a superfície menos dura; (b) grãos abrasivos livres entre as superfícies dura e macia	32
Figura 4. – Desgaste microabrasivo a dois e três corpos.....	33
Figura 5. – Amostra da composição Al -19% Si fixa por parafuso no porta amostras.....	36
Figura 6. – Fotografia mostrando uma visão geral da máquina desgaste abrasivo piloto	40
Figura 7. – Máquina Desgaste Abrasivo piloto parte2	41
Figura 8. – Máquina Desgaste abrasivo.....	41
Figura 9.–Motor Elétrico Trifásico 220 V, 1700rpm.....	42
Figura 10 -Redutor de Velocidade 1/20 acoplamento de entrada (laranja) e saída (cinza)	43
Figura 11 - Display para medição força célula de carga.....	44
Figura 12 – Placa Arduino para gerenciamento da medição força célula de carga	44
Figura13 - Célula de carga fixa na morsa e potenciômetro	45
Figura 14 – Célula de carga sendo testada.....	45
Figura 15 -Protótipo da máquina de desgaste abrasivo (montado para a operação).....	46
Figura 16 -Vista superior da máquina de desgaste por esfera rotativa	47
Figura 17-Plano de cortes dos tubos centrifugados	48
Figura 18 - Corpos de prova para ensaios de desgaste microabrasivo retirados dos tubos centrifugados	49
Figura 19 - Célula carga (1) Mesa de translado responsável por levar a célula de carga (2), porta amostras (3), até encontrar a esfera rotativa 30 mm (4)	50
Figura 20 - Porta amostra (1), Modelagem do processo, (2) Amostra fixa pela porta amostras (3)	50
Figura 21-Equipamento utilizado para medir as crateras geradas nos ensaios de desgaste micro abrasivo.....	51
Figura 22- Esfera fabricada em o aço AISI 52100 temperado e revenido.....	54
Figura 23 - Seção do cilindro mostra a usinagem retirando as porosidades, e preparando dessa forma as amostras definitivas da pesquisa	58
Figura 21- WZ Dureza superficial na região inicial, central e final do tubo 1	73
Figura 22- Superfície desgastada microabrasivo (tubo -1)Al-19%Si região inicial de vazamento amostra com um minuto e outra com dez minutos de atrito	76

Figura 23 - Figura 23A e 23B - Análises da superfície desgastada microabrasivo (tubo -1) Al-19%Si região central de vazamento da amostra com um minuto e outra com dez minutos de atrito	76
Figura 24 - Análises da superfície desgastada microabrasivo (tubo -1) Al-19%Si região final de vazamento	77
Figura 25- Análises da superfície desgastada microabrasivo (Tubo -2) Al19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu – Região inicial de vazamento	78
Figura 26 - Resultados de dureza superficial liga Al – 19%Si.	74
Figura 27 - Análise da superfície desgastada microabrasivo (tubo -2) Al 19%Si-2,5%Mg -2,5%Cu região final de vazamento	80
Figura 28 - Análise da superfície desgastada microabrasivo (tubo -3) Al-19%Si-5%Mg-5%Cu região inicial	81
Figura 29 - Análise da superfície desgastada microabrasivo (tubo -3) Al-19%Si-5%Mg-5%Cu região central.....	82
Figura 30 - Análise da superfície desgastada microabrasivo (tubo -3) Al-19%Si-5%Mg-5%Cu região fina	83

GRÁFICOS

Gráfico 1 – Diâmetro da cratera d_c x tempo de desgaste da cratera da composição de início (tubo 1) Al - 19%Si.(Azul)	60
Gráfico 2 – Profundidade de desgaste da cratera h_t x tempo de desgaste da cratera da composição de início (tubo) Al - 19%Si. (Azul)	60
Gráfico 3 – Diâmetro da cratera d_c x tempo de desgaste da cratera da composição meio (tubo) Al - 19%Si. (Azul)	61
Gráfico 04 – Profundidade de desgaste da cratera h_t x tempo de desgaste da cratera da composição meio (tubo 1) Al - 19%Si. (Azul)	62
Gráfico 5 – Gráfico diâmetro da cratera d_c x tempo de desgaste da cratera da composição fim (tubo 1) Al - 19%Si. (Azul).....	63
Gráfico 6 – Profundidade de desgaste da cratera h_t x tempo de desgaste da cratera da composição fim (tubo 1) Al - 19%Si. (Azul).....	63
Gráfico 7 – Diâmetro cratera d_c x tempo de desgaste da cratera da composição início Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu (tubo 2) (Vermelho).....	65
Gráfico 8 – Profundidade de desgaste da cratera h_t x tempo de desgaste da cratera da composição início Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu (tubo 2) (Vermelho)	65
Gráfico 9 – Diâmetro cratera d_c x tempo de desgaste da cratera da composição Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu meio (tubo 2) (Vermelho).....	66
Gráfico 10 – Profundidade de desgaste da cratera h_t em mm (Eixo Vertical) x Tempo de desgaste da cratera em min. (Eixo horizontal) da composição Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu (tubo 2) (Vermelho)meio (tubo 2) (Azul).....	67
Gráfico 11 – Diâmetro cratera d_c x tempo de desgaste da cratera da composição fim Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu fim (tubo (Vermelho).....	68
Gráfico 12 – Profundidade de desgaste da cratera h_t x tempo de desgaste da cratera da composição fim Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu fim (tubo 2) (Vermelho).	68
Gráfico 13 – Diâmetro cratera d_c x tempo de desgaste da cratera da composição Al-19%Si-5%Mg-5%Cu Início (tubo 3) (Verde).....	70
Gráfico 14 – Profundidade de desgaste da cratera h_t x tempo de desgaste da cratera da composição Al-19%Si-5%Mg-5%Cu Início (tubo 3) (Verde).	70
Gráfico 15 – Diâmetro cratera d_c x tempo de desgaste da cratera da composição Al-19%Si-5%Mg-5%Cu meio (tubo 3) (Verde)	71
Gráfico 16 – Profundidade de desgaste da cratera h_t x tempo de desgaste da cratera da composição meio Al-19%Si-5%Mg-5%Cu (tubo 3) (Verde).....	71

Gráfico 17 – Gráfico diâmetro cratera d_c x tempo de desgastada cratera da composição Al-19%Si-5%Mg-5%Cu fim (tubo 3)(Verde) 72

Gráfico 18 – Profundidade de desgaste da cratera h_t x tempo de desgaste da cratera da composição Al-19%Si-5%Mg-5%Cu fim (tubo 3) (Verde) 72

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AISI – American Iron and Steel Institute (Sistema Americano).

USP - Universidade de São Paulo

UPM - Universidade Presbiteriana Mackenzie

MCI - Motores de combustão interna

MDP - Motor Diesel Pesado

FGM – *Functionally Graded Material*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	15
2 OBJETIVOS.....	17
2.1 Objetivo geral.....	17
2.2 Objetivos específicos	17
3 REVISÃO DA LITERATURA.....	18
3.1 Utilização do Alumínio na Indústria Automotiva.....	18
3.2 Fundição por Centrifugação de Ligas Al-Si.....	20
3.3 Desgaste Microabrasivo por Esfera Fixa.....	30
4. CONSTRUÇÃO DA MÁQUINA DE DESGASTE MICROABRASIVO POR ESFERA ROTATIVA FIXA	40
4.1 A Construção da Máquina Rotativa Protótipo	40
4.2 Detalhes da Construção da Máquina de Desgaste Microabrasivo	42
4.3 Máquina de Desgaste Microabrasivo por Rotação de Esfera Fixa Construída	46
5MATERIAIS E MÉTODOS	47
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	52
CONCLUSÕES.....	84
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	89

1 INTRODUÇÃO

O consumo de materiais de alumínio no mundo é o que mais cresce, e com isso as indústrias utilizam mais o alumínio por possuir características específicas, no que se refere às propriedades dos materiais. Sendo o alumínio o material mais consumido depois de aço carbono. Como resultado, mais material para reciclar. Neste contexto as indústrias produzem muitos componentes como pistões para motores a combustão e turbinas (REIS, 2006). Dentre os diversos metais utilizados nas indústrias no mundo, o alumínio apresenta um dos maiores crescimentos de consumo, tornando-se, atualmente, a segunda indústria metalúrgica do mundo, superada apenas pela indústria do aço (ASM HANDBOOK, 2017).

Conforme verificado por Cardille (2009), as indústrias automobilísticas estão se empenhando cada vez mais em fabricar carros cada vez mais leves e menos poluentes. Mesmo com a introdução de novas tecnologias, estes motores ainda apresentam grande perda da energia devido ao atrito, consequentemente elevado consumo de combustível (MOCELLIN, 2007).

Nas últimas décadas, a indústria automotiva e especialmente na área de projetos de motores tem sido forçada a se preocupar com emissões nocivas que um motor pode causar ao meio ambiente (CARDILLE, 2009).

Nas últimas décadas questões sobre controle de emissões atmosféricas vêm sendo debatidas globalmente com desdobramentos em leis mais restritivas para liberação de novos motores a combustão interna. Mesmo com a introdução de novas tecnologias, estes motores ainda apresentam grande perda da energia devido ao atrito, consequentemente elevado consumo de combustível (MOCELLIN, 2007).

É importante ressaltar que essa dissertação delimitou-se em colher informações sobre os efeitos do estudo de novas Ligas do sistema Al - Si com adições de cobre e magnésio. Finalmente, auxiliar a conhecer novas ligas metálicas tendo como referência a liga do sistema Al - Si, que são as mais importantes principalmente por suas características específicas como a baixa fluidez. Em relação à fabricação de blocos de motores, o brunimento define características tribológicas nos materiais, pois o peso e o acabamento final das superfícies móveis estão com a durabilidade e consumo e bom funcionamento.

Os parâmetros de entrada, processo de retificação em que é envolvida a velocidade de corte de um material, a rotação, ambiente influenciam na confiabilidade dentre outras propriedades importantes. Motivo pelo interesse das grandes indústrias automobilísticas em estender os benefícios das ligas do sistema alumínio-silício.

É interessante, aliás, reunir informações com o propósito de responder ao problema de pesquisa: De que forma a aplicação do método para o estudo de desgaste microabrasivo por esfera rotativa aplicada em liga de alumínio de ligas Al-Si hipereutéticas com adições de magnésio e cobre pode contribuir com a construção do conhecimento sobre esta liga? Sobretudo, relacionado com o desgaste em camisa de cilindro automotivo obtida pelo processo de fundição por centrifugação em ligas hipereutéticas Al-Si, utilizando a técnica de desgaste microabrasivo de ligas Al-Si hipereutéticas com adições de magnésio e cobre por esfera rotativa fixa.

O objetivo desta dissertação é de realizar a construção de uma máquina para o estudo de desgaste microabrasivo de ligas Al - Si hipereutéticas com adições de magnésio e cobre. Principalmente relacionado com o desgaste em camisa de cilindro automotivo obtida pelo processo de fundição por centrifugação em ligas hipereutéticas Al - Si, utilizando a técnica de desgaste por esfera rotativa fixa. O projeto planeja a construção de uma máquina para a realização de desgaste microabrasivo.

O equipamento foi projetado e fabricado segundo trabalhos anteriores da Universidade de São Paulo (USP). Para o estudo de desgaste foram utilizados três tubos centrifugados de ligas Al-Si com adições de cobre e de magnésio. As amostras para ensaios de desgaste microabrasivo serão retiradas da parede interna da camisa de cilindro automotivo obtida pelo processo de fundição por centrifugação.

Devido à necessidade de estudo do desgaste microabrasivo por esfera rotativa fixa desta liga Al-Si, hipereutéticas com adições de magnésio e cobre, pois há poucos estudos sobre o tema. A pesquisa se justifica através da aplicação do método para o estudo de desgaste microabrasivo por esfera rotativa fixa. Sendo um incentivo a utilização das novas ligas de alumínio, mais leves, em camisa para motor a combustão interna, pois contribuirá com o meio ambiente, atendendo as normas reguladoras de emissão de poluentes.

A aplicação do método para o estudo de desgaste microabrasivo por esfera rotativa é uma análise geral como forma de estudar o desgaste por esfera rotativa fixa e como resultado o produto da construção da máquina que fará o desgaste microabrasivo por esfera fixa. Assim sendo, esse estudo será composto por duas partes. A primeira descreverá a construção de uma máquina para o ensaio de desgaste microabrasivo por esfera rotativa adaptada ao modelo IFS 2005, a máquina será construída próxima a esse modelo. Esta máquina realizará ensaios de desgaste abrasivo, sendo possível avaliar as propriedades de desgaste de materiais metálicos e não metálicos sob várias condições de ensaio.

O material da esfera rotativa com diâmetro de 30 mm que será utilizada durante os ensaios de desgaste será o aço AISI 52100 temperado e revenido abordará o desgaste microabrasivo (SANTOS et al., 2015).

A segunda parte deste plano compreenderá a análise do desgaste microabrasivo. As ligas serão obtidas pelo processo de fundição por centrifugação nas composições Al - 19% Si, Al - 19% Si -2,5% Mg-2,5% Cu e Al - 19% Si-5% Mg-5%Cu. Essa composição é o produto final do processo de fabricação da máquina de desgaste microabrasivo por esfera rotativa fixa, quando as amostras são atritadas a três corpos. As amostras foram retiradas dos tubos centrifugados das ligas fabricadas no laboratório de fundição da Universidade Presbiteriana Mackenzie (UPM).

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Realizar a fabricação de uma máquina de desgaste microabrasivo por esfera rotativa fixa e estudar o desgaste na superfície interna de tubos fundidos por centrifugação da liga hipereutética Al-Si com adições de magnésio e cobre.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Construir uma máquina para o estudo do desgaste microabrasivo por esfera rotativa fixa.
- Avaliar o desgaste microabrasivo por esfera rotativa fixa da superfície interna de tubos centrifugados das ligas Al-19% Si, Al - 19% Si -2,5% Mg-2,5% Cu e Al - 19% Si-5% Mg-5%Cu. Caracterizar o desgaste em relação a posição no tubo centrifugado
- Correlacionar o desgaste microabrasivo por esfera rotativa fixa com as frações das fases Si e Mg_2Si , e com a dureza nas ligas Al - 19% Si, Al - 19% Si -2,5% Mg-2,5% Cu e Al - 19% Si-5% Mg-5%Cu fundidas por centrifugação.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Utilização do Alumínio na Indústria Automotiva

Dentre os diversos metais utilizados nas indústrias no mundo, o alumínio apresenta um dos maiores crescimentos de consumo, tornando-se, atualmente, a segunda indústria metalúrgica do mundo, superada apenas pela indústria do aço (ASM HANDBOOK, 2017).

Conforme mostrado na Tabela 1, que reforça os números justificados. O Brasil é o décimo primeiro produtor de alumínio primário, precedido pela China, Rússia, Canadá, Emirados Árabes, Índia, Austrália, Noruega, Bahrein e Estados Unidos; terceiro produtor de bauxita, atrás da Austrália e China; e terceiro produtor de alumina, atrás de China e Austrália.

Tabela 1–Perfil da Indústria Brasileira do Alumínio

Composição	2017	2018
Empregos (31/12)	412.915	419.247
Diretos	113.972	113.807
Indiretos	297.943	305.440
Faturamento (R\$ bilhões)	62,9	61,5
Participação no PIB(%)	1,0	0,9
Participação no PIB Industrial (%)	5,2	4,9
Investimentos (R\$ bilhões) ⁽¹⁾	0,7	0,6
Impostos pagos (R\$ bilhões) ^{(1) (2)}	13,6	13,2
Produção de Alumínio Primário (mil t)	802	659
Investimentos (R\$ bilhões) ⁽¹⁾	53	52
Produção de Alumínio Primário (mil t)	802	659
Consumo Doméstico de Produtos Transformados (mil t)	1.258	1.373
Consumo Doméstico de Produtos Transformados (mil t)	1.258	1.373
Consumo <i>Per Capita</i> (kg/hab./ano)	6,1	6,6
Exportação (mil t) (peso alumínio)	383	287
Importação (mil t) (peso alumínio)	526	690
Balança Comercial da Indústria do Alumínio (US\$ milhões FOB) ⁽³⁾		
■ Exportações	4.097	4.001
■ Importações	1.437	1.984
■ Saldo	2.660	2.017
Participação das Exportações de Alumínio nas Exportações Brasileiras (%)	1,9	1,7

Notas:

(1) Estimativa com base em dados da ABAL e Ministério da Economia.

(2) Inclui impostos sobre produção, consumo e propriedade.

(3) Inclui Bauxita e Alumina.

Fonte: ABAL – Disponível em: <<http://abal.org.br>>. Acesso em: 03março. 2020.

A indústria automotiva e especialmente na área de projetos de motores tem sido forçada a se preocupar com emissões nocivas que um motor pode causar ao meio ambiente (COZZA, 2006).

Nas últimas décadas questões sobre controle de emissões atmosféricas vêm sendo debatidas globalmente com desdobramentos em leis mais restritivas para liberação de novos motores a combustão interna (MOCELLIN, 2007).

Em consequência da constante e intensa demanda por otimização dos veículos para reduzir os níveis de diferentes tipos de emissões, assim como para reduzir o consumo de combustíveis, novas tecnologias têm sido buscadas e desenvolvidas no campo das superfícies dos cilindros de blocos de motores (COZZA, 2006).

Segundo a norma DIN 8589, os processos que utilizam ferramentas abrasivas são denominados como de corte com arestas geometricamente indefinidas (WANG; et al. 2011). Na fabricação de blocos de motores, o brunimento define as características tribológicas da superfície do cilindro e seu domínio é de grande importância para os fabricantes de blocos de motores e para a indústria automobilística, em virtude da sua importância técnica para o bom funcionamento e desempenho dos motores. As características da superfície brunida dos cilindros têm forte influência na durabilidade do motor, no tempo de amaciamento, no consumo de óleo lubrificante e de combustível (MOCELLIN, 2007).

O brunimento é um processo de usinagem em que o movimento de avanço é executado simultaneamente ao movimento de corte, produzindo na peça, uma superfície cruzada, como é ilustrado na Figura 12. Logo, nesse processo, a remoção do material ocorre por meio de grãos abrasivos que se encontram em contato praticamente constante com a superfície usinada, determinando uma grande área de contato entre o abrasivo e a peça, desta maneira, produzindo baixas pressões e velocidades de corte (BYRNES, 1992).

Estas baixas pressões e velocidades de corte, quando comparadas com outros processos de usinagem como o mandrilamento, possibilitam ao brunimento ser menos agressivo a superfície da peça após a usinagem e permite a obtenção de boa exatidão dimensional, boa qualidade superficial e boa exatidão geométrica.

Figura. 1 - Brunidor

Fonte: Aaron (1995).

Os motores de combustão interna (MCI) são máquinas térmicas nas quais a energia química do combustível se transforma em trabalho mecânico, sendo que o fluido de trabalho consiste dos produtos da combustão da mistura ar-combustível, na câmara de combustão e o próprio processo de combustão está integrado ao funcionamento geral do motor (TOLMASQUIM, 2016).

Aproximadamente 40% da energia consumida num Motor Diesel Pesado (MDP) são convertidas em trabalho útil e até 15% da energia total gerada na câmara de combustão é perdida pelo atrito entre os componentes que formam o motor (REJOWSKI; et al., 2012).

Uma abordagem muito utilizada para aumentar o trabalho efetivo num motor de combustão interna (MCI) é a redução da dissipação da energia, embora a distribuição das perdas por atrito nos componentes do motor dependa de muitos fatores, por exemplo, do projeto do motor e do regime de operação, é bem aceito que o sistema formado por pistão, anéis e cilindro apresenta uma contribuição significativa para as perdas mecânicas devido ao atrito (CARVALHO, 2011).

3.2 Fundição por Centrifugação de Ligas Al-Si

O processo de fundição por centrifugação favorece a produção de peças com eixo de simetria, tais como: tubos, caldeiras, vasos de pressão e camisas de cilindros automotivos. Além disto, na fundição por centrifugação, a ação da força centrífuga faz com que o produto final apresente uma menor porosidade e grãos mais finos, melhorando todas as propriedades mecânicas das ligas de alumínio (IPM, 2009).

Entretanto, a principal característica almejada no processo de centrifugação das ligas Al-Si é a possibilidade de obtenção de um material com classificação funcional (“*Functionally Graded Material*” – FGM), (CONTATORI, 2017).

Na centrifugação, os compostos menos densos tenderão a se concentrar no diâmetro interno da peça. Como a densidade do silício ($2,33 \text{ g/cm}^3$) é menor do que a do alumínio ($2,67 \text{ g/cm}^3$) pretende-se com a centrifugação obter uma maior concentração de partículas de silício primário na parede interna da camisa, onde se necessita de uma elevada resistência ao desgaste, enquanto que o restante da camisa apresentará um teor de silício mais baixo, evitando a fragilização da liga decorrente do alto teor de silício (CONTATORI, 2017).

A adição de cobre nas ligas de alumínio melhora a dureza e a resistência mecânica. Além disto, a adição do cobre nas ligas Al – Si hipereutéticas também aumenta a densidade da liga no estado líquido, favorecendo, a princípio, a migração das partículas de silício primário para a parede interna da camisa durante o processo de fundição por centrifugação. Além do cobre, serão também adicionadas quantidades variadas de magnésio (CONTATORI, 2017). Ainda segundo o autor, o magnésio em ligas Al-Si forma o intermetálico Mg_2Si .

Este intermetálico, com densidade de $1,88 \text{ g/cm}^3$, também vai migrar para a parede interna da camisa de cilindro fundida por centrifugação. Nas ligas Al-Si fundidas por centrifugação também serão adicionados refinadores de grão de alumínio primário e modificadores da forma do silício eutético.

Na fundição por centrifugação, um molde permanente é rotacionado sobre seu eixo, sendo que o metal é vazado em movimento de rotação na direção da parede do molde, onde é solidificado após o resfriamento. No caso das ligas Al-Si, o silício diminui a contração de solidificação de 6,0 % do alumínio puro para 3,5% nas ligas contendo 12,0 % de silício (COUTO et al., 2010).

O tamanho de grão resultante em peças fundidas em altas velocidades (1000 a 1500 RPM) é menor, principalmente no diâmetro externo. Devido ao menor intervalo de solidificação (comparado com outros elementos de liga), as ligas de Al-Si apresentam menor

tendência a porosidades espalhadas se concentrando nas regiões de menor perda de calor (ALMEIDA, 2009).

A ação da força centrífuga faz com que os compostos menos densos (silício) concentrem-se no diâmetro interno da peça, podendo ser uma condição desejada em determinadas circunstâncias. A microestrutura final de uma liga fundida é muito importante, pois influencia suas propriedades mecânicas. Grandes grãos colunares, resultante de outros processos de fundição, são indesejáveis e o grão mais fino obtido na fundição por centrifugação melhora todas as propriedades mecânicas das ligas de alumínio (ALMEIDA et al., 2008).

A principal propriedade exigida do material da camisa de cilindros automotivos é a resistência ao desgaste devido à abrasão que os anéis de pistão exercem na superfície interna da mesma quando do funcionamento do motor. As ligas de Al-Si hipereutéticas são candidatas à utilização como camisa de cilindro, pois o silício adicionado ao alumínio (acima de 12%) aumenta consideravelmente a resistência ao desgaste da liga (BARRAGAN NETO, 2011).

Contudo, vale ressaltar que ligas com grandes quantidades de silício apresentam uma fragilidade que acaba dificultando a utilização deste material como camisa de cilindro. Associando-se a obtenção de grãos menores resultantes do processo de centrifugação, ao alto teor de silício segregado na parte interna da camisa que provoca o aumento da resistência ao desgaste, assim como, estando o restante da camisa com baixo teor de silício, o que provoca uma condição menos frágil ao conjunto, serão atendidos os requisitos de resistência ao desgaste na superfície interna da camisa do cilindro. Nas superfícies internas das camisas de um motor deslocam-se os pistões e anéis, promovendo um considerável desgaste entre a camisa de cilindro e anéis do pistão em razão do atrito existente (COUTO et al., 2010).

As camisas automotivas são hoje normalmente produzidas em ferro fundido, pois necessitam serem fabricadas em material resistente ao desgaste, devido à abrasão que os anéis de pistão exercem na superfície interna das mesmas quando do funcionamento do motor. O desenvolvimento de camisas em material mais leve e com resistência ao desgaste compatível às do ferro fundido certamente possibilitará uma redução ainda maior no peso dos motores de combustão (CONTATORI, 2017).

Todas as indústrias, especialmente a aeroespacial e automobilística, estão atualmente à procura de ligas leves ou ligas cujas propriedades são favoráveis e com altos valores de resistência mecânica em contrapartida com o baixo peso, boa ductilidade, dureza, resistência à corrosão, entre outras. Além de seu baixo peso, há outras vantagens das ligas de alumínio

as quais incluem o ponto de fusão relativamente baixo, boa condição de fundição, boa usinabilidade, bom acabamento superficial e alta condutibilidade térmica e elétrica (MONTEIRO, 2011).

A característica marcante destas ligas é que elas consistem de uma fase primária, de alumínio ou de silício, e de uma estrutura eutética composta por esses dois elementos. A produção de alumínio e ligas em alumínio fundidas tem aumentado consideravelmente nas últimas décadas (ALMEIDA et al., 2008).

Ligas de alumínio fundidas devem possuir quantidades suficientes de elementos formadores de eutético (usualmente o silício), a fim de ter adequada fluidez, que podem ser associados a elementos endurecedores (Mg ou Cu). Ligas Al-Si que não contêm grandes adições de cobre são utilizadas quando boa fluidez e boa resistência à corrosão são requeridas. Por outro lado, quando dureza e resistência são essenciais, adições de magnésio tornam as ligas tratáveis termicamente. Ligas de Al-Sihipoeutéticas (7 a 10% Si) apresentam alta ductilidade e baixa resistência. Porém, nestes casos, adições de magnésio são usadas para compensar os baixos níveis de silício, contribuindo para o endurecimento da liga (FUOCCO, 1997).

Adições de silício ao alumínio puro aumentam fortemente a fluidez, a resistência à formação de trincas de contração e melhoram as características de alimentação. A adição de cobre aumenta substancialmente a dureza e a resistência mecânica da liga, tanto na condição bruta de fusão como tratada termicamente (ASM HANDBOOK, 1992). A maior ou menor eficiência de um metal e de suas ligas em ser aplicado no processo de fundição/solidificação está associada a sua afinidade com material do molde. Desta forma tem-se que a sua fluidez pode ser uma importante propriedade para tal finalidade. Verran et al., (2004) em seus estudos além de apresentar uma breve revisão bibliográfica sobre a importância do conhecimento da fluidez metálica para emprego no processo de fundição enfoca, também, os efeitos do teor e do tipo de elemento de liga bem como da temperatura de vazamento sobre a fluidez do Alumínio e de algumas ligas de Alumínio. Apesar das ligas fundidas de alumínio-silício e alumínio-silício-cobre serem importantes comercialmente, os dados sobre fluidez, incluindo a influência das variáveis de fundição, não foram ainda coletados. A maneira como importantes variáveis do processo, como o grau de superaquecimento, a composição da liga e a afinidade metal/molde afetam a fluidez e sua consequência sobre a estrutura produzida necessita ser investigado.

Em seus estudos Kim e Loper (1995; 1999) analisaram a fluidez das ligas Al-Si com variações de Cobre até aproximadamente 3,5%, para vários graus de superaquecimento e

constatarem que baixos teores de Cobre afetam esta propriedade do binário, como pode ser visto na Figura 2 a seguir. A Figura 2a apresenta os gráficos que mostram a variação da viscosidade do alumínio com elementos de liga comum. Pelo gráfico é possível observar que a viscosidade da liga decresce consideravelmente com aumento do teor de Si e de Mg. Por seu lado o Cu, mesmo em baixos teores, eleva esta propriedade.

Figura 2 - Influência dos elementos de liga na viscosidade do alumínio, Verran et al., (2004) e na variação da fluidez do alumínio em função dos teores de silício e cobre, Kin e Loper (1995; 1999)

No gráfico da Figura 2b pode ser avaliada a forte influência do Si sobre a fluidez do alumínio o que já não acontece com o cobre que tende a inibir tal propriedade. Por outro lado, para melhor entender-se da fluidez é necessário o conhecimento de uma importante propriedade dos metais fundidos: a viscosidade. Sobre este aspecto Wang et al.,(1995) sugere que a variação da temperatura de solidificação, a viscosidade, a tensão superficial do metal e a soma da presença de inclusões são os maiores fatores que determinam a fluidez da liga. O alto ponto de fusão do Si em relação ao Al, afeta a viscosidade da liga que decresce com o acréscimo do teor de Si. Consequentemente ligas contendo teores elevados de Si

possuem excelente fluidez, adições de Si contribuem para a redução na contração de solidificação da liga contribuindo também para sua resistência principalmente a trabalhos a quente.

Segundo Kim e Loper (1995; 1999) este comportamento tem sido atribuído à influência do alto calor de fusão do Silício pro-eutético, muito maior do que o do alumínio ou do cobre, de modo que esta liberação intensa de calor durante a solidificação possibilita que as ligas com teores de silício mais elevados mantenham o estado líquido por mais tempo e assim molham melhor o molde. O modo de solidificação pode ser alterado para o crescimento de grão colunar com frente plana [caso das ligas diluídas] até a formação de dendritas colunares nas quais os braços são expostos e fraturam formando grãos equiaxiais [caso das ligas ricas em soluto] que fluem pela corrente de metal líquido. A melhor molhabilidade do metal pelo molde pode ser associada à maior fluidez do metal ou da liga, e este aspecto pode ser associado ao “mushy zone” ou intervalo de solidificação ou faixa de solidificação que segundo Garcia(2001) trata da distancia das linhas “Liquidus/Solidus” para cada liga. Para uma liga que possui um intervalo de solidificação curto, Figura 2, o “mushy” é mais fino e a casca sólida, que se forma sobre o menisco líquido nos instantes iniciais, é mais grossa, além disso, a força motriz para a distorção desta casca é mais forte e aumenta com o tempo. Força motriz para a distorção térmica mais a pressão metalostática agem de tal forma que somente a região mais fina [região suposta com menor resistência mecânica] da casca ou região do menisco seja empurrada em direção à parede do molde, promovendo a formação das marcas superficiais, com péssimos reflexos na trabalhabilidade do lingote, principalmente, à frio.

Ligas contendo teores de cobre entre 4 a 6% respondem fortemente ao tratamento térmico. Porém, o elemento reduz a resistência à corrosão em geral sob algumas condições específicas como a corrosão sobtensão. Adições de cobre também reduzem a resistência à formação de trinca de contração e diminuem a fundibilidade(ASM HANDBOOK, 1992).

Grupos de estudo formados por pesquisadores têm pesquisado os efeitos da fundição centrífuga em ligas de alumínio.

Rajanet al., (2010) estudaram a caracterização dos compósitos da liga de alumínio AA 356 (Al-7,5Si-0,35Mg) e AA 2124 (Al-4,5Cu-1,6 Mg-0,25Zn-0,2Si) reforçados com 15% de carvão de Silício SiC, com dimensão média de 23 μm . O compósito foi processado através de fundição centrífuga. Os autores concluíram que o SiC migrou para a parte externa do tubo centrífugo, devido à sua maior densidade, proporcionando um substancial aumento de dureza e resistência mecânica nesta região.

Seguindo esta linha de pesquisa, isto é, com compósitos de ligas de alumínio processadas através de fundição centrífuga, Velinho et al., (2003) efetuaram uma investigação por meio de microtomografia de raios-X, buscando informações sobre o comportamento do compósito da liga de alumínio Al -7Si-0,3Mg com reforço de 10% de SiC; neste trabalho os autores observaram algumas porosidades geradas no processo devido aos gases da liga. Os autores concluíram que o SiC migra de forma suave ao longo da peça, proporcionando características mecânicas benéficas ao desempenho do material (VELHINHO et al., 2003).

Os pesquisadores Wang et al., (2011), efetuaram uma abordagem em um processo de fundição centrífuga utilizando também um compósito de 20% de SiC reforçando uma liga de alumínio com composição próxima do eutético (11,85%Si), os autores buscaram identificar as regiões de maior concentração de SiC no produto final centrífugo (WANG et al., 2011).

As ligas de alumínio também continham 0,98% Cu; 0,85% Mg; 0,95% Ni e 0,28% Fe e as partículas de SiC de 15, 30 e 59 μm . Os autores concluíram que no processo houve a migração do SiC para a parte externa do cilindro centrífugo, numa concentração de 55% vol., distribuído uniformemente. A variação no tamanho das partículas contribuiu para a melhoria na distribuição do SiC, com partículas finas dispersas entre as partículas grosseiras, a porosidade dos compósitos foi inferior a 0,35% vol., que pode ser atribuído à segregação e ao movimento de rotação de partículas de SiC ao fluxo de material fundido gerado pelo aumento da pressão metalostática e as opostas migrações de partículas de gás e de SiC durante o vazamento na centrífuga (WANG et al., 2011).

Huang et al., (2011) efetuaram estudo de fabricação de pistões automotivos em liga de alumínio reforçada com SiC através do processo de fundição centrífuga. O estudo partiu de uma liga hipereutética de alumínio (18% Si), reforçada com 17,2% vol. de SiC, nos tamanhos de 15 μm e 30 μm . Dentre os resultados obtidos, constatou-se que pistões compostos, baseados em liga de alumínio parcialmente reforçados com partículas de SiC, foram fabricados com sucesso por fundição centrífuga. O produto de estudo apresentou uma grande quantidade de partículas de SiC na cabeça do pistão, atendendo aos requisitos, tais como a dureza, resistência ao desgaste e ao comportamento de expansão térmica de pistões (HUANG et al., 2011).

Huang et al., (2011) investigaram a influência de alguns parâmetros, tais como, temperatura de vazamento do fundido, temperatura do molde e velocidade de rotação da centrífuga em relação ao raio do tubo fundido, sobre a segregação das partículas de Mg_2Si e

Si. Os autores procuraram identificar o processo de segregação e distribuições das partículas de Mg_2Si e Si, considerando o tamanho e fração em volume das partículas primárias no tubo centrifugado de uma liga comercial de alumínio com composição química de 18%Si e 1,2% Mg.

Os autores concluíram que o índice de segregação das partículas cresceu com o aumento da temperatura de vazamento e da temperatura do molde, chegando a uma relação de 59% e diminuiu com o aumento da velocidade de centrifugação, chegando a uma relação de 53% do volume total investigado. Estes autores também concluíram que o tamanho das partículas de Mg_2Si e Si diminuiu com o aumento da temperatura de vazamento, temperatura no molde e da rotação de centrifugação, com seus diâmetros mudando de 70 a 30 μm para 30 a 18 μm , concentrando-se na região interna do tubo. Ao final chegaram a conclusão que cilindros fabricados com material com gradiente funcional (FGM) possuem melhor expansão térmica e características mecânicas superiores aos cilindros convencionais de motos e automóveis (HUANG et al., 2011).

Vale ressaltar também o estudo de Zhanget al., (2000), onde foi investigada a influência da velocidade de rotação e taxa de resfriamento sobre a formação e distribuição graduada de partículas de Mg_2Si , em tubos centrifugados de liga de alumínio hipereutética. Partiu-se do alumínio puro, sendo acrescido Mg e Si de forma a obter uma liga hipereutética (Al-15%Mg $_2$ Si), velocidades de rotação de 800, 1200 e 1600 rpm. Esses autores concluíram que velocidades de rotação mais baixas resultaram em uma melhor distribuição de gradiente de partículas primárias de Mg_2Si . Porém, acompanhada de um elevado volume de defeitos. Com um aumento na velocidade de rotação, uma aparente mudança do perfil de distribuição de partículas na periferia exterior foi observada. Enquanto isso, a influência da velocidade de rotação sobre a distribuição de partículas no interior do tubo centrifugado foi muito pequena.

A taxa extremamente alta de arrefecimento conseguida através da utilização de um molde de cobre com arrefecimento de água conduziu a uma microestrutura refinada nas proximidades da parede externa do tubo, quando comparado com a mesma área em outros tubos obtidos através da utilização de moldes de grafite. Sugeriu-se que tanto a microestrutura e a macro segregação nos tubos centrifugados são toleráveis, no entanto, são necessárias novas investigações com técnicas otimizadas (ZHANG et al., 2000).

Já os pesquisadores Xie et al., (2009) investigaram as características microestruturais e os efeitos dos parâmetros de processo sobre essas características, em processo de fabricação de tubo centrifugado de liga de alumínio hipereutética (Al-19Si-5Mg), nas

rotações de 450, 600 e 800 rpm. Observaram que uma grande quantidade de partículas de Mg_2Si e de silício primário foram concentradas na camada interna do tubo de liga Al-19Si-5Mg preparadas por fundição centrífuga.

Estas partículas formaram um gradiente de distribuição muito evidente nas camadas interna, do meio, e externa na direção da espessura. Isto dá uma distribuição funcionalmente gradual. Quando a velocidade da centrífuga foi aumentada, as quantidades de partículas de Mg_2Si e Si primário aumentaram na camada interna e diminuíram nas camadas do meio, e externa. Contudo, quando a temperatura do molde pré-aquecido foi aumentado e/ou quando a temperatura de vazamento do metal fundido foi aumentada, uma elevada quantidade de partículas de Si primário migraram para a camada interna do tubo, em uma distribuição graduada, obviamente devido a um maior período de tempo de solidificação do metal fundido (XIE et al., 2009).

O estudo apresentado pelos pesquisadores Jayakumaret al., (2012) mostrou que a adição de Mg na proporção de 3 a 5% na liga comercial de alumínio AA 390 (17%Si), desencadeou uma transformação de parte do silício primário existente na matriz em Mg_2Si , sendo que devido ao efeito do processo de centrifugação, o silício primário Si e a fase Mg_2Si segregaram gradualmente no sentido da periferia interna da peça fundida, devido à menor densidade destas fases em comparação com a matriz. O aumento do teor de Mg aumentou a concentração de Mg_2Si , enquanto a percentagem de silício primário Si diminuiu. O tamanho do Mg_2Si na fase de reforço é menor, sendo distribuído nas bordas das partículas primárias de silício e também individualmente na matriz (JAYAKUMAR et al., 2012).

O processo de fundição por centrifugação é muito mais eficaz em termos de obtenção de propriedades mecânicas e as de fadiga, em comparação com a fundição por gravidade. Os efeitos anteriores variam dentro do vazamento, de acordo com a posição relativa de onde a amostra é feita a partir da fundição, e quanto maior for a distância, em relação ao centro de rotação (maior força centrífuga ou superior G), tanto maior será o aumento nas propriedades mecânicas. Assim, um material funcional graduado, com propriedades de mudança ao longo de um eixo é obtido (CHIRITA et al., 2008).

Na fundição por centrifugação, um molde permanente é rotacionado sobre seu eixo, sendo que o metal é vazado em movimento de rotação na direção da parede do molde, onde é solidificado após o resfriamento. No caso das ligas Al - Si, o silício diminui a contração de solidificação de 6,0 % do alumínio puro para 3,5 % nas ligas contendo 12,0 % de silício. O tamanho de grão resultante em peças fundidas em altas velocidades (1000 a 1500 rpm) são menores, principalmente no diâmetro externo (COUTO et al., 2010).

Devido ao menor intervalo de solidificação (comparado com outros elementos de liga), as ligas de Al - Si apresentam menor tendência a porosidades espalhadas se concentrando nas regiões de menor perda de calor. A ação da força centrífuga faz com que os compostos menos densos (silício) se concentrem no diâmetro interno da peça, podendo ser uma condição desejada em determinadas circunstâncias (ALMEIDA, 2009).

A microestrutura final de uma liga fundida é muito importante, pois influencia suas propriedades mecânicas. Grandes grãos colunares, resultante de outros processos de fundição, são indesejáveis e o grão mais fino obtido na fundição por centrifugação melhora todas as propriedades mecânicas das ligas de alumínio. Em consequência da constante e intensa demanda por otimização dos veículos para reduzir os níveis de diferentes tipos de emissões, assim como para reduzir o consumo de combustíveis, novas tecnologias têm sido buscadas e desenvolvidas no campo das superfícies dos cilindros de blocos de motores (MOCELLIN, 2007).

Ligas do sistema Al - Si são as mais importantes entre as ligas fundidas de alumínio, principalmente por sua alta fluidez, baixa contração nos fundidos, elevada resistência à corrosão, boa soldabilidade, fácil brasagem e baixo coeficiente de expansão térmica (COUTO et al., 2010).

Aproximadamente 40% da energia consumida num Motor Diesel Pesado (MDP) são convertidas em trabalho útil e até 15% da energia total gerada na câmara de combustão é perdida pelo atrito entre os componentes que formam o motor. Uma abordagem muito utilizada para aumentar o trabalho efetivo num motor de combustão interna (MCI) é a redução da dissipação da energia (REJOWSKI et al., 2012).

Embora a distribuição das perdas por atrito nos componentes do motor dependa de muitos fatores, por exemplo, do projeto do motor e do regime de operação, é bem aceito que o sistema formado por pistão, anéis e cilindro apresenta uma contribuição significativa para as perdas mecânicas devido ao atrito. O processo de fundição por centrifugação favorece a produção de peças com eixo de simetria, tais como: tubos, caldeiras, vasos de pressão e camisas de cilindros automotivos (CONTATORI, 2017).

Além disto, na fundição por centrifugação, a ação da força centrífuga faz com que o produto final apresente uma menor porosidade e grãos mais finos, melhorando todas as propriedades mecânicas das ligas de alumínio. Entretanto, a principal característica almejada no processo de centrifugação das ligas Al - Si é a possibilidade de obtenção de um gradiente funcional de propriedade ("Functionally Graded Material" - FGM). Na centrifugação, os

compostos menos densos tenderão a se concentrar no diâmetro interno da peça (CONTATORI, 2017).

Como a densidade do silício ($2,33 \text{ g/cm}^3$) é menor do que a do alumínio ($2,67 \text{ g/cm}^3$) pretende-se com a centrifugação obter uma maior concentração de partículas de silício primário na parede interna da camisa, onde se necessita de uma elevada resistência ao desgaste, enquanto que o restante da camisa apresentará um teor de silício mais baixo, evitando a fragilização da liga decorrente do alto teor de silício (CONTATORI, 2017).

A adição de cobre nas ligas de alumínio melhora a dureza e a resistência mecânica. Além disto, a adição do cobre nas ligas Al-Si hipereutéticas também aumenta a densidade da liga no estado líquido, favorecendo, a princípio, a migração das partículas de silício primário para a parede interna da camisa durante o processo de fundição por centrifugação. Além do cobre, serão também adicionadas quantidades variadas de magnésio. O magnésio em ligas Al - Si forma o intermetálico Mg_2Si . Este intermetálico, com densidade de $1,88 \text{ g/cm}^3$, também vai migrar para a parede interna da camisa de cilindro fundida por centrifugação (CONTATORI, 2017).

Ainda Segundo Contatori (2017), nas ligas Al-Si fundidas por centrifugação também serão adicionados refinadores de grão de alumínio primário e modificadores da forma do silício eutético. Na fundição por centrifugação, um molde permanente é rotacionado sobre seu eixo, sendo que o metal é vazado em movimento de rotação na direção da parede do molde, onde é solidificado após o resfriamento.

No caso das ligas Al-Si, o silício diminui a contração de solidificação de 6,0 % do alumínio puro para 3,5% nas ligas contendo 12,0 % de silício. O tamanho de grão resultante em peças fundidas em altas velocidades (1000 a 1500 RPM) é menor, principalmente no diâmetro externo. Devido ao menor intervalo de solidificação (comparado com outros elementos de liga), as ligas de Al-Si apresentam menor tendência a porosidades espalhadas se concentrando nas regiões de menor perda de calor (CONTATORI, 2017).

3.3 Desgaste Microabrasivo por Esfera Fixa

Norton (2013, p. 470) define que desgaste,

[...] é considerado divisível em cinco categorias genéricas: desgaste por adesão, desgaste por abrasão, desgaste por corrosão, fadiga superficial e erosão. Outros mecanismos como fadiga por corrosão, desgaste por corrosão, desgaste por microabrasão, combinam

elementos de mais de uma categoria, para se fazer presente o desgaste geralmente requer que haja um movimento relativo entre duas superfícies. O desgaste por adesão ocorre quando as asperezas de duas superfícies entram em contato e aderem uma a outra e depois se rompem quando há deslizamento, transferindo - se material de uma peça a outra, para fora do sistema. O desgaste por abrasão envolve uma superfície dura e rugosa removendo material de uma mais mole ou então partículas duras aprisionadas entre duas superfícies erodindo ambas.

Neste contexto, fica claro que conhecer o desgaste de um material é de fundamental importância podendo até prever qual a causa e quando será a falha o que poderá, por exemplo, planejar a substituição de um componente avariado pelo desgaste. Pode-se dizer ainda que frequentemente no desgaste abrasivo misto há ocorrência de desgaste abrasivo por riscamento, no centro da cratera de desgaste do material desgastado e desgaste abrasivo por rolamento nas bordas do material. Julgo pertinente trazer à baila que é de fundamental importância saber o comportamento de um material quanto a sua resistência ao desgaste.

O desgaste é definido como a perda progressiva de material da superfície de um corpo sólido devido à ação mecânica, isto é; o contato e movimento relativo de um corpo sólido contra um corpo sólido, líquido ou gasoso (BEZERRA, 2016).

Segundo (Jiang et. Al., 1998, p.35).

O desgaste microabrasivo é considerado como um mecanismo de desgaste muito comum e severo que ocorre quando as duas superfícies estão em contato direto e uma delas mais dura que a outra. Ao aplicar a carga normal, as asperezas da superfície dura penetram na mais macia produzindo deformações plásticas.

O desgaste abrasivo ocorre quando partículas ou protuberâncias duras movimentam enquanto são forçadas contra uma superfície (ASM HANDBOOK, 1992). Na Figura 3 são apresentados dois tipos de desgaste abrasivo. O primeiro tipo de desgaste acontece em processos de lixamento e usinagem, a superfície dura é o agente de abrasão das duas superfícies de fricção Fig.(3a). O segundo tipo de desgaste acontece, por exemplo, em polimento com pasta diamantada, o agente de abrasão é um terceiro corpo (abrasão de três corpos), e consiste geralmente de partículas abrasivas pequenas, soltas entre as superfícies suficientemente duras para desgastar uma das superfícies ou ambas Fig.(3b) (BEZERRA, 2016).

Figura 3 - Modelos da forma que ocorrem o desgaste abrasivo. (a) grão abrasivos presos deslizam sobre a superfície menos dura; (b) grãos abrasivos livres entre as superfícies dura e macia.

Fonte: (BEZERRA, 2016, p.29).

O atrito a três corpos, como proposto nessa dissertação é representado na figura 4.

Figura 4 – Desgaste microabrasivo a dois e três corpos

Fonte: VICENTE (2017, p.01)

Um material só consegue danificar ou arranhar o outro material se sua dureza for maior e sua taxa de desgaste não é inerente ao material, esta é dependente de características de cada superfície, da presença de abrasivos entre elas, da velocidade de contato, da pressão exercida e de outras condições ambientais (BEZERRA, 2016).

É interessante, ressaltar que através do tamanho médio das partículas abrasivas é possível diferenciar o desgaste abrasivo e “desgaste microabrasivo ocorre com participação de partículas abrasivas com tamanho médio na ordem micrométrica”. Partículas abrasivas com tamanho médio entre 3 e 6 μm , aproximadamente, são utilizadas em ensaios de desgaste microabrasivo. (Já o desgaste abrasivo é gerado por partículas abrasivas maiores, entre 50 e 250 μm), (COZZA, 2011).

Entende-se que magnitude do desgaste depende da rugosidade do material mais duro e das propriedades mecânicas do material mais macio. Propriedades específicas como a dureza, tenacidade, estrutura e composição das superfícies de contato, temperatura, coeficiente de atrito, lubrificantes e outros. Portanto, pode-se dizer ainda que o desgaste microabrasivo, que pode ser estudado através de ensaio de desgaste por microabrasão.

O estudo objeto desta dissertação é um teste que consiste na observação de um desgaste gerado pelo atrito da esfera rotativa fixa em um corpo de prova e um terceiro mais duro que os dois (esfera e corpo de prova), chamado abrasivo de carbeto de silício.

Sendo assim, fica evidente a necessidade em se conhecer os tipos de desgastes, pois as indústrias, principalmente as fabricantes de componentes de máquinas rotativas querem saber quanto será a vida útil de determinado produto. Conhecer o desgaste do material através de um método já praticado por outros pesquisadores ajudará também na questão do meio ambiente, pois, ao se utilizar materiais mais leves como é o caso da Liga de Al-Si aqui estudadas.

Em consequência da constante e intensa demanda por otimização dos veículos para reduzir os níveis de diferentes tipos de emissões, assim, como para reduzir o consumo de combustíveis, novas tecnologias têm sido buscadas e desenvolvidas no campo das superfícies dos cilindros de blocos de motores (MOCELLIN, 2007).

Segundo a norma DIN 8589, os processos que utilizam ferramentas abrasivas são denominados como de corte com arestas geometricamente indefinidas (WANG et al., 2011).

Na fabricação de blocos de motores, o brunimento define as características tribológicas da superfície do cilindro e seu domínio é de grande importância para os fabricantes de blocos de motores e para a indústria automobilística, em virtude da sua importância técnica para o bom funcionamento e desempenho dos motores.

As características da superfície brunida dos cilindros têm forte influência na durabilidade do motor, no tempo de amaciamento, no consumo de óleo lubrificante e de combustível. Os motores de combustão interna (MCI) são máquinas térmicas nas quais a energia química do combustível se transforma em trabalho mecânico, sendo que o fluido de trabalho consiste dos produtos da combustão da mistura ar-combustível, e na câmara de combustão e os próprios processos de combustão estão integrados ao funcionamento geral do motor (ASM HANDBOOK, 1992).

Uma abordagem muito utilizada para aumentar o trabalho efetivo num motor de combustão interna (MCI) é a redução da dissipação da energia (REJOWSKI, 2012). Embora a distribuição das perdas por atrito nos componentes do motor dependa de muitos fatores, por exemplo, do projeto do motor e do regime de operação, é bem aceito que o sistema formado por pistão, anéis e cilindro apresenta uma contribuição significativa para as perdas mecânicas devido ao atrito. A maior parte dos *experts* descreve cinco categorias gerais de desgaste: Desgaste por adesão, desgaste por abrasão, erosão, desgaste por corrosão e fadiga superficial (NORTON, 2013, p. 419).

Segundo Rejowski, (2012), as características da superfície brunida dos cilindros têm forte influência na durabilidade do motor, no tempo de amaciamento, no consumo de óleo

lubrificante e de combustível. Pode-se conceituar o desgaste microabrasivo como sendo uma falha. Uma vez iniciado o movimento relativo em qualquer mecanismo.

Certamente terá o desgaste. Tudo isso na presença de partículas abrasivas.

Segundo Cozza ET al., (2014, p. 31), desde a sua apresentação à comunidade científica voltada a tribologia em meados de 1997. Pelo professor Ian M. Hutchins – Universidade de Cambridge, os equipamentos de ensaio de desgaste microabrasivo por esfera rotativa fixa vêm demonstrado aceitação e desenvoltura no estudo do comportamento ao desgaste micro-abrasivo de materiais.

A origem desse quadro, a máquina de ensaio de desgaste micro abrasivo por esfera rotativa fixa modelo LFS 2005 foi projetada e construída pela primeira vez pelo Eng. Renato Bergantin (2002), em seu projeto de formatura. Tendo como orientadores o Prof. Roberto Martins de Souza e DeniolKatsuki e Amilton Sinatora. É interessante, aliás, afirmar ainda que esta máquina é capaz de realizar desgaste em materiais metálicos, não metálicos sob várias condições de ensaios.

Quando se utiliza o método de ensaio de desgaste microabrasivo por esfera rotativa fixa existem variáveis que são independentes como as propriedades físico-químicas e metalúrgicas da esfera, da pasta abrasiva do acabamento superficial, do material da amostra e parâmetros como a força normal controlada e constante, distância de deslizamento, o diâmetro da esfera, a força normal, concentração da pasta abrasiva bem como o tempo da duração do ensaio abrasivo (COZZA, 2006. p. 21).

As ligas serão obtidas pelo processo de fundição por centrifugação nas composições Al-19%Si, Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu e Al-19%Si-5%Mg-5%Cu. Os tubos centrifugados das ligas serão fabricados no laboratório de fundição da Universidade Presbiteriana Mackenzie conforme mostrado na figura 5

Figura 5 - Amostra da composição Al - 19% Si fixa por parafuso no porta amostra

Fonte: Autor

A origem desse quadro é facilmente encontrada quando foi desenvolvido um equipamento chamado "dimplegrinder" no qual o corpo de prova ensaiado permanece dentro da solução abrasiva durante todo o teste de desgaste (OLEA, 2002).

É interessante, acrescentar ainda que o ensaio proposto nesta dissertação será por gotejamento acionado por gravidade. O carbetto de silício e água destilada será armazenado em um recipiente com válvula dosadora a qual será regulada mecanicamente durante o ensaio de desgaste microabrasivo. Esse tipo de ensaio consiste no desgaste de um corpo de prova, gerado por uma esfera em movimento de rotação e por partículas abrasivas, inseridas entre o corpo de prova e a esfera durante o ensaio. São geradas calotas esféricas, também chamadas de crateras de desgaste, e a análise destas permite a avaliação do comportamento do desgaste abrasivo do material (COZZA, 2006).

Conforme verificado por outros pesquisadores o estudo do desgaste abrasivo por esfera rotativa tem sido muito estudado quando o tema é desgaste de materiais. A possibilidade de reconstruir esses componentes ou prepará-los para suportar melhor as condições de trabalho em aplicações que exijam grandes solicitações ou fenômenos complexos de desgaste é constantemente estudada, novas técnicas são propostas, sempre no sentido de aumentar a sua vida útil e reduzir os custos (OLIVEIRA, 2015).

Pode-se conceituar ainda que existe um grande interesse das empresas fabricantes de acessórios que são utilizados em processos com movimento relativo. Por isso o interesse em saber como o material se comporta naquelas condições específicas de uso. Prevendo dessa forma seu tempo de vida útil, garantindo também os custos mais baixos (OLIVEIRA, 2015).

Apesar das características frágeis dos materiais cerâmicos em relação aos metais, caracterizada pela baixa tenacidade à fratura, em aplicações tribológicas esta propriedade pouco importa. Materiais como Al_2O_3 , SiC, $Si_3 N_4$, ZrO_2 , entre outros, encontram utilidade como componentes de seções quentes de turbinas a gás, bicos queimadores, anéis de vedação, esferas de rolamento, próteses, etc. (FAGURY NETO, KIMINAMI, 2007).

Neste contexto, fica explicada a função e a importância do método de gotejamento da solução abrasiva de carbetos de silício. Sendo submerso ou não, ou a seco (desgaste a dois corpos) isso tudo são variáveis que precisam ser levadas em consideração quando se estuda este tipo de desgaste. É possível afirmar que desgaste abrasivo assistido por gotejamento abrasivo é válido quando se estuda este modelo de desgaste. Primeiro, porque não necessita de circulação forçada, depois, porque ficou óbvio que o controle por tarefa definida é fácil de controlar, logo, torna-se fundamental neste tipo de estudo desgaste por esfera rotativa fixa (FAGURY NETO, KIMINAMI, 2007).

Conforme explicado acima o que importa, portanto, é estar claro qual o método de inserção do terceiro elemento de desgaste a três corpos. Suas características e melhor desempenho quando se fala em desgaste. O carbetos de silício aplicado por gotejamento e gravidade tem sido o mais adequado no estudo de desgaste por abrasão (rolamento e riscamento).

Esse tipo de ensaio consiste no desgaste de um corpo de prova, gerado por uma esfera em movimento de rotação e por partículas abrasivas, inseridas entre o corpo de prova e a esfera durante o ensaio. São geradas calotas esféricas, também chamadas de crateras de desgaste, e a análise destas permite a avaliação do comportamento do desgaste abrasivo do material (OLIVEIRA, 2015).

A fricção e o desgaste são o resultado da rugosidade da micro superfície das áreas em contato com movimento relativo entre si. Os "vales" em uma superfície bem acabada a ordem de grandeza das amplitudes dos picos encontra-se na faixa de $0,01 \mu m$.

Quando o atrito entre os corpos iniciam micro soldagem, pois devido ao calor e a pressão no ponto, este chega a atingir o limite máximo de elasticidade do material fundindo-o. E em alguns pontos são arrancados e que impedem o movimento aumentando o atrito e o desgaste (COZZA, 2006).

De acordo outros autores muitos fatores contribuem para o específico tipo de desgaste estudado todas as variáveis do processo precisam ser definidas e conhecidas para uma melhor eficiência dos resultados; pode-se dizer que as ligas Al-Sihipereutéticas com adições de magnésio e cobre em relação ao desgaste microabrasivo utilizando a técnica de desgaste por esfera rotativa fixa é uma metodologia aceita em testes abrasivos de materiais (SILVA, 2012). No primeiro momento será verificada a coerência com estudos anteriores no que se refere as várias propriedades da liga alumínio-silício Al-Sihipereutética com adições de magnésio e cobre.

Avaliar o resultado da máquina que fará o desgaste microabrasivo por esfera rotativa fixa. Conforme explicado acima sobre particulados abrasivos, o objetivo desta dissertação é de realizar um estudo de desgaste micro abrasivo de ligas Al-Sihipereutéticas com adições de magnésio e cobre. Principalmente relacionado com o desgaste em camisa de cilindro automotivo obtida pelo processo de fundição por centrifugação em ligas hipereutéticas Al-Si, utilizando a técnica de desgaste por esfera.

O surgimento de processos abrasivos remonta desde os tempos pré- históricos de certo modo aconteceu a mais de 10.000 anos em que os habitantes daquela época afiavam seus instrumentos e que para a afiação destes instrumentos eles eram conformados e afiados com materiais mais duros por abrasão e lascamento (ANUSAVICE; SHEN, RAWLS, 2013, p. 231).

Segundo Anusavice; Shen, Rawls, (2013, p. 231), “Desgaste é um processo de remoção de material de um substrato pela abrasão com partículas relativamente grossas. Sendo o abrasivo uma substância afiada, dura, natural ou sintética utilizada para desbaste, acabamento ou polimento de uma substância mais mole”.

Segundo Fitzpatrick (2013, p. 319), esse material é feito através da combinação de areia de sílica comum com coque (carvão mineral refinado) em fornos na ausência de oxigênio. O resultado é um abrasivo cerca de 33 a 50 % mais duro que o óxido de alumínio. A dureza do carboneto de silício, combinada com uma estrutura de cristal tenaz, mas friável, significa que ele cria mais arestas de corte nítidas do que o óxido de alumínio e assim, corta mais rápido. Mas os cristais tendem a cisalhar em lascas maiores, assim os grãos cisalham completamente mais cedo.

Conforme explicado acima e Segundo Nussbaum (1988) *apud* Betiatto (2015, p.23):

A friabilidade do abrasivo é uma propriedade importante do abrasivo, sendo a habilidade para ficar afiado e manter sua afiação entre dressagens. Um abrasivo com boa friabilidade permite a

geração de lascas de cisalhamento pequenas, muitas vezes antes de o grão inteiro romper completamente para fora.

Por todas essas razões, o carbeto de silício será usado a três corpos, ou seja, no processo de desgaste a três corpos envolve o corpo de prova, a esfera e o carbeto de silício cinza, água destilada na concentração 0,35 g/cm³.

4 CONSTRUÇÃO DA MÁQUINA DE DESGASTE MICROABRASIVO POR ESFERA ROTATIVA FIXA

4.1 Construção da Máquina Rotativa: Protótipo

Foi construído primeiramente um protótipo em escala menor conforme Figura 6. O modelo piloto foi realizado com ajuda do sistema composto com um motor de ventilador (1), uma morsa “sem fim” (2) eixo esfera de 30 mm (3) e amostra de alumínio (4). Nesta fase inicial foi colocado o parâmetro aleatório de tempo de deslizamento bem como sua rotação uma vez que foi limitada ao uso de um potenciômetro com três faixas de potência distintas.

Figura 6 – Fotografia mostrando uma visão geral da máquina desgaste abrasivo piloto.

Fonte: Autor

A Figura 6 mostra uma fase mais adiantada da pesquisa, a máquina de desgaste final ainda não estava pronta. Por este motivo, foi instalada a máquina piloto dentro dela, pois a mesa de translado já estava funcionando. Nessa fase da pesquisa foram testadas três amostras da fase inicial, meio e fim do tubo.

Na terceira fase da pesquisa estas interferências foram resolvidas e, então, partiu-se para a finalização da máquina de desgaste abrasivo final conforme Figura 5. Os componentes da máquina são descritos conforme a Figura 5.1 Inversor de Frequência modelo Schneider ATV 312, 2 Disjuntor trifásico modelo Schneider 32 A EZ9F333332, 3 Base emborrachada (1000 mm x 600 mm x 10 mm), 4 Motor trifásico 220 volts, Marca WEG 1 cv – 1700 rpm,

5 Porta Amostra Al Si e amostra da composição Al-19%Si, Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu e Al-19%Si-5%Mg-5%Cu, 6 Célula Carga 1N e carrinho porta célula de carga, 7 Mesa translado, 8 Redutor 1:20, 9 conjunto (Acoplamento, mancal, eixo e esfera de 30 mm, 10 Reservatório Solução Carbeto Silício).

Figura7 - Máquina Desgaste Abrasivo piloto parte 2

Fonte: Autor

Figura 8 - Máquina Desgaste Abrasivo

Fonte: Autor.

4.2 Detalhes da Construção da Máquina de Desgaste Microabrasivo

Para a construção da máquina de desgaste foi utilizado um motor trifásico 227 V, esse equipamento foi disponibilizado pelo Departamento de Pesquisa do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia. Este motor através de sua potência instalada transmite em seu eixo a rotação que é manipulada na escala de 1:20 por um redutor. O redutor é inserido neste processo para reduzir a rotação primária do motor em até 20 vezes. Na saída do eixo do redutor e apoiado em um mancal de esferas foi fixada através de solda. Ao centro de um eixo que foi acoplado na saída do redutor. A esfera de 30 milímetros de diâmetro. A finalidade da esfera é transportar durante seu movimento partículas de silício em solução aquosa a 0.36 por cento em volume, a esfera e eixo acoplado a um redutor de velocidade com fator de redução 1: 20. Na Figura 6 mostra o motor elétrico utilizado nesta máquina de desgaste microabrasivo final.

Figura 9 - Motor Elétrico Trifásico 220 V, 1700rpm.

Fonte: Autor.

O redutor de velocidade apresentado na Figura 7. Foi aplicado na máquina para com a ajuda de um inversor de frequência reduzir a rotação do motor 1700 rpm para 40 rpm, que é uma rotação utilizada por outros pesquisadores.

Figura 10 -Redutor de Velocidade 1/20 acoplamento de entrada (laranja) e saída (cinza).

Fonte: Autor

Junto a estes dois componentes estão presentes também uma mesa de translado a qual através de um fuso que controla o avanço do corpo de prova com a amostra da liga Al - Si. Presente ainda neste processo com a finalidade de compor o terceiro corpo do desgaste está solução de carbetos de silício, sendo utilizada a água desmineralizada como solvente.

Esta solução armazenada em um recipiente com capacidade de 1000 ml. Na base desse reservatório está instalada uma válvula que atuará pela gravidade. E sua função é dosar a solução de carbetos de silício quando do atrito entre dois corpos, no caso o da esfera e a do corpo de prova. Quando o motor é acionado a solução por gravidade entra em contato com a esfera e o corpo de prova, iniciando o processo de desgaste. Conhecido como princípio de funcionamento de desgaste a três corpos que está relacionado principalmente neste caso, com o desgaste em camisa de cilindro automotivo obtida pelo processo fundição por centrifugação em ligas hipereutéticas Al-Si.

Para isto será utilizado a técnica de desgaste por esfera rotativa fixa. As amostras para ensaios de desgaste micro abrasivo serão retiradas da parede interna da camisa de cilindro automotivo obtida pelo processo fundição por centrifugação. As amostras são em um total de 30 (10 início, 10 meio e 10 final) para cada composição.

A Figura 11 mostra a fotografia do display para medição força célula de carga, o display é controlado por uma placa Arduino (Figura 12) que é uma plataforma livre. Foi parametrizada para ler uma força de contato de 1N. Antes de se aplicar na máquina de

desgaste definitiva um teste e para isso foi utilizado um potenciômetro com peso conhecido no caso o peso de 0.474 N para certificar a calibração do sistema. A figura 10 mostra a célula de carga fixa na morsa e potenciômetro sendo verificado seu peso. Na figura 11 mostra a fotografia do sistema de leitura calibrado pronto para se instalar na máquina.

Figura 11 - Display para medição força célula de carga

Fonte autor.

Figura 12 - Placa Arduino para gerenciamento da medição força célula de carga.

Fonte: Autor.

Figura 13 - Célula de carga fixa na morsa e potenciômetro

Fonte: Autor.

Esta pressão foi administrada por uma célula (2) de carga fixada no suporte do carro principal (1). Ao girar o fuso da mesa de translado, a célula de carga é empurrada em sentido axial do eixo da mesa fazendo a amostra encostar-se à esfera rotativa de 30 mm. Pela terceira lei de Newton a força de reação é registrada no display garantindo a pressão de 1N.

Figura 14 - Célula de carga sendo testada.

Fonte: Autor

4.3 Máquina de Desgaste Microabrasivo por Rotação de Esfera Fixa Construída

O local de construção e Montagem do conjunto eletromecânico (máquina rotativa de esfera fixa) foi o laboratório GP Mecatônica do IFRO). Para a construção do protótipo, Figura 15, foram utilizados um Inversor de Frequência (1), um disjuntor trifásico com base emborrachada (2), uma base de suporte em borracha (3), um motor trifásico 227 V (4), uma célula de carga 1N (5), uma Mesa de Translado (6), um Redutor mecânico de 1 para 20 (7), um acoplamento (8), um Mancal (9), um eixo (10), uma esfera aço AISI 52100 temperado e revenido (11), um Reservatório Solução Carбето Silício (12).

Figura 15 - Protótipo da máquina de desgaste abrasivo (montado para a operação).

Fonte: Autor.

O funcionamento da máquina rotativa de esfera fixa ocorre da seguinte forma: motor trifásico 227V, através de sua potência instalada, transmite em seu eixo rotação 1700 rpm, essa rotação é reduzida pelo inversor (frequência). Para otimizar a relação de redução utilizou-se um redutor por engrenagens que tem em seu eixo saída na escala de 1:20 causando uma rotação de 40 rpm.

A vista superior da máquina de desgaste por esfera rotativa pode ser observada na Fig. 16. A base escura na foto (material emborrachado de 10 mm de espessura) serve de amortizador de vibrações para o equipamento. Desta forma reduz as oscilações da esfera devido as resultantes de seu peso e resultante da força de atrito a três corpos. A excentricidade deve ser constante para que os diâmetros das calotas geradas seja esférico.

Figura 16 - Vista superior da máquina de desgaste por esfera rotativa

Fonte: Autor

5. MATERIAIS E MÉTODOS

Os corpos de prova para ensaios de desgaste microabrasivo foram obtidos a partir de tubos centrifugados das ligas Al-19%Si, Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu e Al-19%Si-5%Mg-5%Cu. Nos tubos centrifugados foram cortados anéis ao longo de um eixo longitudinal da corrida do cilindro fundido por centrifugação, conforme o esquema mostrado na figura 17. Um anel foi cortado da região de início de vazamento, outro na região central de vazamento e um terceiro anel na região final de vazamento no processo de centrifugação. A partir dos anéis cortados dos tubos centrifugados (início, meio e final de vazamento), corpos de prova foram obtidos da superfície interna (ponto 1) dos tubos centrifugados, conforme figura 17. Em cada anel foram retirados dez corpos de prova iguais de 10 mm x 10 mm x 10 mm, conforme figura 17. Os corpos de prova tiveram a superfície interna usinada em um torno de um metro de barramento modelo MANROD com a finalidade de reduzir a região de poros. Esses corpos de prova usinados foram utilizados para os ensaios de desgaste microabrasivo. Os dez corpos de prova obtidos de cada anel foram utilizados para os ensaios de desgaste nos seguintes tempos: 60, 120, 180, 240, 300, 360, 420, 480, 540 e 600 segundos.

Figura 17– Plano de cortes dos tubos centrifugados

Fonte: Contatori (2017, p.50).

Figura 18 – Corpos de prova para ensaios de desgaste microabrasivo retirados dos tubos centrifugados

Fonte: Autor

Para o ensaio de desgaste das ligas de Al-Si utilizou-se uma esfera de aço AISI 52100, com dureza 60HRC, com diâmetro de 30 mm e fixa no eixo de saída de um redutor (figura 19(4)). Como abrasivo foi utilizado o carbeto de silício (SiC) com tamanho médio de partícula de 4,3 μm . A concentração de abrasivo (SiC) em água destilada foi de 0,35 g/L. O sistema foi controlado por um inversor de frequência e um redutor, o qual manteve a rotação em 40 rpm. A força utilizada no ensaio foi de 1 N controlada por meio de uma célula de carga acoplada em dispositivo mecânico chamado mesa de translação, conforme figura 19(1). Os corpos de prova foram fixados com aperto de parafuso garantindo o seu travamento para reduzir ao máximo a vibração (figura 19(3)). Na figura 19(2) pode ser observado o porta-amostra e o esquema de microabrasão que ocorre com os corpos de prova. A esfera rotativa gira e gera a cratera de desgaste. O corpo de prova é fixado no porta-amostra fabricado em alumínio por meio de um parafuso de travamento. O raio de curvatura do porta-amostra é o mesmo raio de curvatura do cilindro onde foram retirados os corpos de prova.

Figura 19 – Célula carga e Mesa de traslado responsável por levar a célula de carga (1) e(2), porta amostras(3), até encontrar a esfera rotativa 30 mm (4)

Fonte: Autor

Figura 20- Porta amostra (1), Modelagem do processo (2), Amostra fixa pelo porta amostras (3).

Fonte: Autor

A Figura 21 mostra um corpo de prova dentro de um contador de bactérias do laboratório de microbiologia do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Rondônia, onde foram feitas as medidas e imagens das calotas de desgaste das ligas investigadas. Foi utilizada uma ampliação de 40 X, permitindo medidas mais precisas. As crateras foram medidas com um paquímetro digital king tools 0 a 150 mm. Foram feitas três medidas em cada cratera e retirada a média aritmética para a medida planificada.

Figura 21- Equipamento utilizado para medir as crateras geradas nos ensaios de desgaste microabrasivo

Fonte: Autor.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O redutor é inserido neste processo para reduzir a rotação primária do motor em até 40 vezes. Quarentarpm foi a velocidade de rotação utilizada para o atrito a três corpos, responsável pela criação das crateras nas amostras da composição Al-19%Si, Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu e Al-19%Si-5%Mg-5%Cu. Na saída do eixo do redutor foi apoiado em um mancal que é acoplado a um eixo de 200 mm de comprimento e 30 mm de diâmetro.

Na extremidade do eixo é soldado com solda tig uma esfera de 30 mm de diâmetro. O centro do eixo do foi acoplado ao redutor. O redutor sai com uma rotação de 40 rpm. A esfera de 30 mm foi centrada no eixo do redutor com auxílio de um relógio comparador.

Após verificar a excentricidade do eixo e esfera, teve o início das ações de soldagem, desta forma eixo e parafusos de fixação foi usinado. O seu balanceamento aferido, a máquina pode fazer o primeiro giro em vazio, ou seja, sem o contato com a amostra. Como conhecido na indústria, o comissionamento que acontece quando a máquina fabricada entra em funcionamento pela primeira vez, por isso suas potências instaladas são testadas em rampa, como a rotação desse equipamento que também é controlada por inversor de frequência que faz com que o eixo do motor elétrico seja parametrizado, por exemplo, para dar um quarto de volta na esfera de 30 mm de diâmetro com rotação muito baixa ou que a mesma gire todo seu perímetro com rotação de 40 rpm por intervalos de tempo diferentes. Um minuto a dez minutos por cada ensaio em amostra da composição.

Uma vez que se fez necessário que as calotas geradas ficassem com diâmetros harmônicos e esféricos. A célula de carga ajustada para 1N para garantir sempre a mesma força da esfera na face interna da amostra onde foi gerada a calota de desgaste.

Após esta etapa foi fixada a amostra definitiva da amostra, amostra da liga de alumínio das composições do material de origem que é o cilindro divididos em início, meio e fim do vazamento da composição que é fixada no porta amostras. “O porta amostras esta fixo na mesa de translado que é movimentada mecanicamente através de um fuso de avanço de 1/128” da polegada.

O fuso por sua vez leva a amostra ao encontro da esfera rotativa. Nesse momento o carbeto de silício é gotejado no momento do atrito entre amostra e esfera e carbeto de silício e a força de 1N aplicada. Para cada amostra são geradas calotas esféricas. Cada uma dessas amostras são atritadas a cada 60 segundos e em ordem de 1 a 10 minutos.

A esfera rotativa fixa após 60 segundos quando no cronômetro é suspensa a contagem.

Os ensaios foram realizados conforme a representação seguinte: 1 = 60 segundos, 2 = 120 segundos, 3 = a 180 segundo, 4 igual 240 segundos, 5 igual 300 segundos, 6 igual a 360 segundos, 7 igual a 420 segundos, 8 = 480 segundos 9 = 540 segundos até o total de 10 = 600 segundos de atrito na amostra. Durante seu movimento partículas de carbeto de silício em solução aquosa a 0,35% que caem em gotas por gravidade sobre a esfera e a amostra da composição. A mesa de translado, através de um fuso, controla o avanço do corpo de prova com as amostras de composições Al-19%Si, Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu e Al-19%Si-5%Mg-5%Cu. A amostra é fixada através de um parafuso na própria porta amostras com finalidade de diminuir as vibrações, garantindo assim um desgaste uniforme.

Presente ainda neste processo e com a finalidade de compor o terceiro corpo do desgaste a solução de carbeto de silício. Esta solução é armazenada em um recipiente com capacidade de 1.000 ml. Na base desse reservatório está instalada uma válvula que atua por gravidade, sendo sua função dosar gota a gota a solução de carbeto de silício, quando do atrito a três corpos, no caso o da esfera e a do corpo de prova e o carbeto de silício. Assim, quando o motor é acionado são cronometrados os tempos de 1 minuto a 10 minutos para cada amostra das composições Al-19%Si, Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu e Al-19%Si-5%Mg-5%Cu.

Para cada composição foram retiradas amostras do início, meio e fim do cilindro fundido. São os tempos de atrito, e o tempo de criação das calotas, foram de 1 a 10 minutos utilizados para cada amostra. Após isso a amostra é lavada com álcool 70 % e secada com vento a 40 graus centígrados e embalada em isopor para ser medida e observada.

A fotografia na Figura 22 mostra a esfera atritando a amostra Al-Si. A esfera fabricada em o aço AISI 52100 temperado e revenido, com rotação de 40 rpm atritando o carbeto de silício contra a parede da amostra Al-19%Si. Com uma força aferida por célula de carga parametrizada para 1N.

Figura 22- Esfera fabricada em o aço AISI 52100 temperado e revenido

Fonte: Autor.

Os resultados obtidos nos ensaios com a máquina de desgaste por abrasão efetuados por esfera rotativa apresentaram resultados coerentes com estudos anteriores. O desenvolvimento e fabricação da máquina de desgaste microabrasivo resumiam-se em três fases:

Obteve êxito no projeto piloto, o projeto piloto mostrou que as amostras obtidas pelo processo de fundição por centrifugação nas composições Al - 19% Si, Al - 19% Si -2,5% Mg-2,5% Cu e Al - 19% Si-5% Mg-5%Cu. Apresentaram comportamentos diferentes quanto ao desgaste, evidenciados nos seus diâmetros de suas crateras de desgaste e também nas suas profundidades das crateras.

Nessas primeiras observações já apresentou indicadores de que a adição de cobre e magnésio causa um aumento de dureza na composição. Foi corrigido o processo de simetria do desgaste, pois na fase final de construção e operação da máquina foram corrigidos os processos para que a cratera tenha um desgaste uniforme. Obteve êxito no projeto final da máquina de desgaste desta forma atingindo o objetivo. Conclusão dos resultados finais do estudo de desgaste composições Al - 19% Si. As cores verdes, amarela e azul representam respectivamente o início, meio e fim do vazamento da composição Al-19% Si. O desgaste foi sustentado no quesito diâmetro de desgaste da cratera “dc” em mm, profundidade de

desgaste da cratera “ht” em mm. O volume da cratera de desgaste “Vt” em mm³. E “D” é o espaço percorrido pela esfera em mm.

Para a obtenção destes resultados dos volumes das crateras de desgaste apresentados na tabela 2 abaixo foram obtidos por duas fórmulas a equação [I.5] e a profundidade de desgaste pela equação [II.8] abaixo. As equações se encontram nos trabalhos publicados por Baptista et al., (2000); Hutchings, (1998); Rutherford e Hutchings, (1996). E a equação [I.5] e [II.8] se encontram no trabalho publicados por E. A. da S. Santos Universidade Federal do Oeste do Pará, em que: V é o volume da calota impressa. A dedução dessas fórmulas é apresentada nos Anexo I.

$$ht = 15 - \sqrt{225 - 0.25dc^2} \text{ Equação [I.5]}$$

Unidades: ht [mm] e dc [mm]

$$Vt = \pi[(15.ht^2 - \frac{ht^3}{3})] \text{ Equação [II.8]}$$

$$Vt \Rightarrow [mm^3] \text{ e } ht \Rightarrow [mm]$$

Além da validação por um método matemático onde foi resolvido que: D é a distância de deslizamento, “rot” é a rotação em minutos, “r” é o raio da esfera, “d” o diâmetro da calota e “t” é o tempo do ensaio em minutos. Os resultados: D é a distância de deslizamento, “rot” é a rotação em minutos, “r” é o raio da esfera, “d” o diâmetro da calota e “t” é o tempo do ensaio em minutos da composição Al-19%Si. Os resultados encontrados foram aplicados em um programa Excel para a obtenção de planilhas programadas com fórmulas mostradas no anexo II. Essas planilhas são específicas para criar os parâmetros diâmetro de desgaste da cratera, profundidade de desgaste e volume de desgaste para as amostras ensaiadas.

Após os testes nas ligas foram gerada as Tabelas de 2 a 10 com os resultados das amostras que foram ensaiadas durante a fase de operação do projeto piloto e do protótipo inicial. Após a análise desses resultados preliminares chegou se a conclusão que a quantidade de poros na face interna era elevado o que causou erros nas amostras.

Primeiramente a usinagem definida para realizar o desbaste era de 1\10 mm. Logo após decidiu-se aumentar a usinagem de desbaste para 1 mm no diâmetro interno da amostra o que resultou em uma superfície interna mais homogênea sem poros.

Tabela 2 – Análise do processo de desgaste de amostras da liga Al-19%Si.

N. Amostra	Amostra	Diâmetro desgaste cratera (mm)	Profundidade desgaste cratera ht (mm)	Tempo de atrito (min)	Volume da cratera de desgaste (mm ³)
1	Al-19%Si	3,8	0,3	1	0,806
2	Al-19%Si	4,1	0,2	2	1,092
3	Al-19%Si	4,3	0,4	3	1,321

Fonte: Autor.

Tabela 3 - Análise do processo de desgaste de amostras da liga Al-19%Si.

N. Amostra	Amostra	Diâmetro desgaste cratera (mm)	Profundidade desgaste cratera ht (mm)	Tempo de atrito (min)	Volume da cratera de desgaste (mm ³)
1	Al-19%Si	3,5	0,1	1	0,580
2	Al-19%Si	4,0	0,4	2	0,989
3	Al-19%Si	3,5	0,2	3	0,580

Fonte: Autor.

Tabela 4 - Análise do processo de desgaste de amostras da liga Al-19%Si.

N. Amostra	Amostra	Diâmetro desgaste cratera (mm)	Profundidade desgaste cratera ht (mm)	Tempo de atrito (min)	Volume da cratera de desgaste Vt (mm ³)
1	Al-19%Si	4,2	0,1	1	0,202
2	Al-19%Si	3,7	0,4	2	0,970
3	Al-19%Si	4,4	0,2	3	1,440

Fonte: Autor.

Tabela 5 - Análise do processo de desgaste de amostras da liga Al-19%Si.

N. Amostra	Amostra	Diâmetro desgaste cratera (mm)	Profundidade desgaste cratera ht (mm)	Tempo de atrito (min)	Volume da cratera de desgaste Vt (mm ³)
1	Al-19%Si-2,5% Mg-2,5% Cu	3,0	0,3	1	0,313
2	Al-19%Si-2,5% Mg-2,5% Cu	3,5	0,5	2	0,580
3	Al-19%Si-2,5% Mg-2,5% Cu	4,2	0,4	3	1,221

Fonte: Autor.

Tabela 6. Análise do processo de desgaste de amostras da liga Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu

N. Amostra	Amostra	Diâmetro desgaste cratera (mm)	Profundidade desgaste cratera ht (mm)	Tempo de atrito (min)	Volume da cratera de desgaste Vt (mm ³)
1	Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu	3,5	0,1	1	0,980
2	Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu	4,0	0,2	2	1,090
3	Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu	3,5	0,2	3	1,580

Fonte: Autor.

Tabela 7. Análise do processo de desgaste de amostras da liga Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu

N. Amostra	Amostra	Diâmetro desgaste cratera (mm)	Profundidade desgaste cratera ht (mm)	Tempo de atrito (min)	Volume da cratera de desgaste Vt (mm ³)
1	Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu	4,2	0,1	1	0,400
2	Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu	3,7	0,3	2	0,400
3	Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu	4,4	0,2	3	0,580

Fonte: Autor.

Tabela 8 - Análise do processo de desgaste de amostras da liga Al-19%Si-5%Mg-5%Cu

N. Amostra	Amostra	Diâmetro desgaste cratera (mm)	Profundidade desgaste cratera ht (mm)	Tempo de atrito (min)	Volume da cratera de desgaste Vt (mm ³)
1	Al-19%Si-5%Mg-5%Cu	5,8	0,1	1	0,420
2	Al-19%Si-5%Mg-5%Cu	6,9	0,3	2	0,390
3	Al-19%Si-5%Mg-5%Cu	7,2	0,5	3	0,580

Fonte: Autor

Tabela 9 - Análise do processo de desgaste de amostras da liga Al-19%Si-5%Mg-5%Cu

N. Amostra	Amostra	Diâmetro desgaste cratera (mm)	Profundidade desgaste cratera ht (mm)	Tempo de atrito (min)	Volume da cratera de desgaste Vt (mm ³)
1	Al-19%Si-5%Mg-5%Cu	4,0	0,1	1	0,400
2	Al-19%Si-5%Mg-5%Cu	6,0	0,1	2	0,490
3	Al-19%Si-5%Mg-5%Cu	8,0	0,32	3	0,500

Fonte: Autor.

Tabela 10. Análise do processo de desgaste de amostras da liga Al-19%Si-5%Mg-5%Cu

N. Amostra	Amostra	Diâmetro desgaste cratera (mm)	Profundidade desgaste cratera ht (mm)	Tempo de atrito (min)	Volume da cratera de desgaste Vt (mm ³)
1	Al-19%Si-5%Mg-5%Cu	4,5	0,1	1	0,480
2	Al-19%Si-5%Mg-5%Cu	5,9	0,3	2	0,410
3	Al-19%Si-5%Mg-5%Cu	5,0	0,4	3	0,470

Fonte: Autor.

A Figura 23 mostra o anel do tubo sendo retirado 1mm do seu diâmetro interno para se obter uma superfície mais uniforme sem poros. Um ponto a ser observado seria as formas visuais das primeiras das calotas geradas com a ação do modelo piloto que trouxe diâmetros maiores que o esperado. Outro ponto importante foi a verificação dos parâmetros adotados no projeto definitivo. Evitando levar erros anteriores cometidos no projeto piloto devido a grande quantidade de poros.

Figura 23 – Seção do cilindro mostra a usinagem retirando as porosidades, e preparando dessa forma as amostras definitivas da pesquisa.

Fonte: Autor.

Com a retirada no diâmetro interno dos tubos obteve-se a correção das amostras com a retirada dos poros, que influenciaram nos resultados dos desgastes durante a fase piloto. Na sequência da pesquisa com base na correção do processo de aquisição das amostras, a quantidade de amostra por tubos foram aumentadas para 10 com a finalidade de aumentar a confiabilidade e checar o comportamento dos parâmetros: diâmetro de desgaste, profundidade de desgaste e volume de desgaste conforme pode-se verificar nas tabelas 11 a 22 a seguir. E também esses resultados foram representados nos gráficos de 1 a 18 que foram gerados a partir dos diâmetros e a formulação matemática aplicada conforme segue.

Tabela.11 – Resumo das tabelas 11, 12 e 13 seguintes referente aos resultados da composição Al-19%Si início, meio e fim (tubo 1).

n	AMOSTRA	FIM	MEIO	INÍCIO	Diâmetro cratera dc (mm)	Profundidade de Desgaste da Cratera ht (mm) $ht = 15 - \sqrt{225 - 0,25dc^2}$ Equação [1.5]	VOLUME da CRATERA de Desgaste Vt (mm³) $Vt = \pi[(15.ht^2 - \frac{ht^3}{3})]$ Equação [1.8]	TEMPO DE ATRITO min
1	al-19% - início				3,33	0,093	0,404	1
2					4,90	0,201	1,904	2
3					6,46	0,352	5,790	3
4					6,43	0,349	5,682	4
5					6,79	0,389	7,078	5
6					5,53	0,257	3,096	6
7					6,47	0,353	5,826	7
8					6,26	0,330	5,100	8
9					6,07	0,310	4,505	9
10					6,85	0,396	7,334	10
1	al-19% - meio				4,48	0,168	1,328	1
2					5,66	0,269	3,399	2
3					5,75	0,278	3,622	3
4					5,93	0,296	4,101	4
5					5,11	0,219	2,253	5
6					6,54	0,361	6,084	6
7					5,38	0,243	2,772	7
8					5,97	0,300	4,213	8
9					5,08	0,217	2,201	9
10					5,28	0,234	2,570	10
1	al-19% - fim				4,04	0,137	0,877	1
2					4,07	0,139	0,904	2
3					3,87	0,125	0,738	3
4					3,62	0,110	0,565	4
5					4,64	0,180	1,529	5
6					4,63	0,180	1,516	6
7					4,11	0,141	0,940	7
8					4,33	0,157	1,158	8
9					4,43	0,164	1,270	9
10					5,37	0,242	2,751	10

Fonte: Autor

Tabela 12 - Análise do processo de desgaste de amostras da liga Al-19%Si início (tubo 1).

N. Amostra	Amostra	Diâmetro desgaste cratera (mm)	Profundidade desgaste cratera ht (mm)	Tempo de atrito (min)	Volume da cratera de desgaste (mm³)
1	Al-19%Si	3,33	0,093	1	0,404
2	Al-19%Si	4,90	0,201	2	1,904

3	Al-19%Si	6,46	0,352	3	5,790
4	Al-19%Si	6,43	0,349	4	5,682
5	Al-19%Si	6,79	0,389	5	7,078
6	Al-19%Si	5,53	0,257	6	3,096
7	Al-19%Si	6,47	0,353	7	5,826
8	Al-19%Si	6,26	0,330	8	5,100
9	Al-19%Si	6,07	0,310	9	4,405
10	Al-19%Si	6,85	0,396	10	7,334

Fonte: Autor.

Gráfico 1 – Diâmetro da cratera x Tempo de desgaste da cratera da composição Al - 19%Si. Início(tubo 1) (Azul)

Gráfico 2 – Profundidade de desgaste da cratera ht em mm (Eixo Vertical) x Tempo de desgaste da cratera em min. (Eixo horizontal) da composição Al - 19%Si. Início(tubo 1) (Azul)

Tabela 13. Análise do processo de desgaste de amostras da liga Al-19%Si meio(tubo 1).

N. Amostra	Amostra	Diâmetro desgaste cratera (mm)	Profundidade desgaste cratera ht (mm)	Tempo de atrito (min)	Volume da cratera de desgaste (mm ³)
1	Al-19%Si	4,48	0,168	1	1,328

2	Al-19%Si	5,66	0,269	2	3,399
3	Al-19%Si	5,75	0,278	3	3,622
4	Al-19%Si	5,93	0,296	4	4,101
5	Al-19%Si	5,11	0,219	5	2,253
6	Al-19%Si	6,54	0,361	6	6,084
7	Al-19%Si	5,38	0,243	7	2,772
8	Al-19%Si	5,97	0,300	8	4,213
9	Al-19%Si	5,08	0,217	9	2,201
10	Al-19%Si	5,28	0,234	10	2,570

Fonte: Autor

Gráfico 3 – Diâmetro da cratera em mm (Eixo Vertical) x Tempo de desgaste da cratera em min (Eixo horizontal) da composição Al - 19%Si. meio(tubo 1) (Azul)

Gráfico 4. Profundidade de desgaste da cratera ht em mm (Eixo Vertical) x Tempo de desgaste da cratera em min. (Eixo horizontal) da composição Al - 19%Si. Meio(tubo 1) (Azul)

Tabela 14. Análise do processo de desgaste de amostras da liga Al-19%Si fim (tubo 1).

N. Amostra	Amostra	Diâmetro desgaste cratera (mm)	Profundidade desgaste cratera ht (mm)	Tempo de atrito (min)	Volume da cratera de desgaste (mm ³)
1	Al-19%Si	4,04	0,137	1	0,877
2	Al-19%Si	4,07	0,139	2	0,904
3	Al-19%Si	3,87	0,125	3	0,738
4	Al-19%Si	3,62	0,110	4	0,565
5	Al-19%Si	4,64	0,180	5	1,529
6	Al-19%Si	4,63	0,180	6	1,516
7	Al-19%Si	4,11	0,141	7	0,940
8	Al-19%Si	4,33	0,157	8	1,158
9	Al-19%Si	4,43	0,164	9	1,270
10	Al-19%Si	5,37	0,242	10	2,751

Fonte: Autor

Gráfico 5 Diâmetro da cratera em mm (Eixo Vertical) x Tempo de desgaste da cratera em min (Eixo horizontal) da composição Al - 19%Si. Fim(tubo 1) (Azul)

Fonte: Autor

Gráfico 6. Profundidade de desgaste da cratera ht em mm (Eixo Vertical) x Tempo de desgaste da cratera em min. (Eixo horizontal) da composição Al - 19%Si. Fim(tubo 1) (Azul)

Fonte: Autor

Tabela 15 — Resumo das tabelas 16, 17 e 18 seguintes referente aos resultados da composição Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu início, meio e fim (tubo 2).

n	AMOSTRA	FIM	MEIO	INÍCIO	Diâmetro cratera dc (mm)	Profundidade de Desgaste da Cratera ht (mm) $ht = 15 - \sqrt{225 - 0,25dc^2}$ Equação [1.5]	VOLUME da CRATERA de Desgaste Vt (mm³) $Vt = \pi[(15.ht^2 - \frac{ht^3}{3})]$ Equação [1.8]	TEMPO DE ATRITO min
1	al-19si2,5mg-2,5cu - início				3,70	0,115	0,616	1
2					3,95	0,131	0,801	2
3					4,12	0,142	0,949	3
4					3,54	0,105	0,516	4
5					3,48	0,101	0,482	5
6					4,27	0,153	1,095	6
7					4,39	0,161	1,224	7
8					4,45	0,166	1,293	8
9					5,35	0,240	2,710	9
10					5,29	0,235	2,590	10
1	al-19si2,5mg-2,5cu - meio				2,49	0,052	0,126	1
2					2,74	0,063	0,185	2
3					2,80	0,065	0,202	3
4					2,70	0,061	0,174	4
5					2,80	0,065	0,202	5
6					2,91	0,071	0,235	6
7					3,17	0,084	0,332	7
8					3,26	0,089	0,371	8
9					3,27	0,089	0,376	9
10					3,36	0,094	0,419	10
1	al-19si2,5mg-2,5cu - fim				2,23	0,041	0,081	1
2					3,33	0,093	0,404	2
3					3,62	0,110	0,565	3
4					3,72	0,116	0,630	4
5					3,73	0,116	0,637	5
6					3,94	0,130	0,793	6
7					4,56	0,174	1,426	7
8					4,33	0,157	1,158	8
9					4,71	0,186	1,624	9
10					4,80	0,193	1,752	10

Tabela 16. Análise do processo de desgaste de amostras da liga Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu início (tubo 2).

N. Amostra	Amostra	Diâmetro desgaste cratera (mm)	Profundidade desgaste cratera ht (mm)	Tempo de atrito (min)	Volume da cratera de desgaste (mm³)
1	Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu	3,70	0,115	1	0,616
2	Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu	3,95	0,131	2	0,801
3	Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu	4,12	0,142	3	0,949
4	Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu	3,54	0,105	4	0,516
5	Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu	3,48	0,101	5	0,482
6	Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu	4,27	0,153	6	1,095
7	Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu	4,39	0,161	7	1,224
8	Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu	4,45	0,166	8	1,293
9	Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu	5,35	0,240	9	2,710
10	Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu	5,29	0,235	10	2,590

Fonte: Autor

Gráfico7 -Diâmetro da cratera em mm (Eixo Vertical) x Tempo de desgaste da cratera em min (Eixo horizontal) da composição Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu Início (tubo 2) Vermelho

Fonte: Autor

Gráfico8 - Profundidade de desgaste da cratera ht em mm (Eixo Vertical) x Tempo de desgaste da cratera em min. (Eixo horizontal) da composição Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu (tubo 2) (Vermelho)início (tubo 1) (Azul)

Fonte: Autor

Tabela 17. Análise do processo de desgaste de amostras da liga Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu meio (tubo 2).

N. Amostra	Amostra	Diâmetro desgaste cratera (mm)	Profundidade desgaste cratera (mm)	Tempo de atrito (min)	Volume da cratera de desgaste (mm ³)
1	Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu	2,49	0,052	1	0,126
2	Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu	2,74	0,063	2	0,185
3	Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu	2,80	0,065	3	0,202
4	Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu	2,70	0,061	4	0,174
5	Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu	2,80	0,065	5	0,202
6	Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu	2,91	0,071	6	0,235
7	Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu	3,17	0,084	7	0,332
8	Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu	3,26	0,089	8	0,371
9	Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu	3,27	0,089	9	0,376
10	Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu	3,36	0,094	10	0,419

Gráfico 9 - Diâmetro da cratera em mm (Eixo Vertical) x Tempo de desgaste da cratera em min (Eixo horizontal) da composição Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu meio (tubo 2) Vermelho

Fonte: Autor

tempo (min)

Gráfico10 - Profundidade de desgaste da cratera ht em mm (Eixo Vertical) x Tempo de desgaste da cratera em min. (Eixo horizontal) da composição Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu (tubo 2) (Vermelho) Meio(tubo 2) (Azul)

Fonte: Autor

Tabela 18. Análise do processo de desgaste de amostras da liga Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu fim(tubo 2).

N. Amostra	Amostra	Diâmetro desgaste cratera (mm)	Profundidade desgaste cratera ht (mm)	Tempo de atrito (min)	Volume da cratera de desgaste (mm ³)
1	Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu	2,23	0,041	1	0,081
2	Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu	3,33	0,093	2	0,404
3	Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu	3,62	0,110	3	0,565
4	Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu	3,72	0,116	4	0,630
5	Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu	3,73	0,116	5	0,637
6	Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu	3,94	0,130	6	0,793
7	Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu	4,56	0,174	7	1,426
8	Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu	4,33	0,157	8	1,158
9	Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu	4,71	0,186	9	1,624
10	Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu	4,80	0,193	10	1,752

Fonte: Autor

Gráfico 11 -Diâmetro da cratera em mm (Eixo Vertical) x Tempo de desgaste da cratera em min (Eixo horizontal) da composição Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu fim (tubo 2) Vermelho

Gráfico 12. Profundidade de desgaste da cratera ht em mm (Eixo Vertical) x Tempo de desgaste da cratera em min. (Eixo horizontal) da composição Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu (tubo 2) (Vermelho) Fim(tubo 2).

Fonte: Autor

Tabela 19 — Resumo das tabelas 19, 20 e 21 seguintes referente aos resultados da composição Al-19%Si5%mg5%cu início, meio e fim (tubo 3).

n	AMOSTRA	FIM	MEIO	INÍCIO	Diâmetro cratera dc (mm)	Profundidade de Desgaste da Cratera ht (mm) $ht = 15 - \sqrt{225 - 0,25dc^2}$ Equação [11.5]	VOLUME da CRATERA de Desgaste Vt (mm³) $Vt = \pi[(15.ht^2 - \frac{ht^3}{3})]$ Equação [11.8]	TEMPO DE ATRITO min
1	al-19s5%mg-5,0%cu - início				3,62	0,110	0,565	1
2					3,70	0,115	0,616	2
3					3,76	0,118	0,658	3
4					4,01	0,135	0,851	4
5					4,03	0,136	0,868	5
6					4,34	0,158	1,169	6
7					3,85	0,124	0,723	7
8					4,34	0,158	1,169	8
9					4,53	0,172	1,389	9
10					5,52	0,256	3,073	10
1	al-19s5%mg-5,0%cu - meio				2,90	0,070	0,232	1
2					2,98	0,074	0,259	2
3					3,39	0,096	0,434	3
4					3,31	0,092	0,394	4
5					3,43	0,098	0,455	5
6					4,09	0,140	0,921	6
7					4,22	0,149	1,045	7
8					3,70	0,115	0,616	8
9					4,68	0,184	1,583	9
10					4,95	0,206	1,983	10
1	al-19s5%mg-5,0%cu - fim				5,31	0,237	2,629	1
2					4,35	0,159	1,180	2
3					4,41	0,163	1,247	3
4					4,39	0,161	1,224	4
5					4,80	0,193	1,752	5
6					4,85	0,197	1,827	6
7					4,96	0,206	1,999	7
8					5,91	0,294	4,045	8
9					5,31	0,237	2,629	9
10					5,89	0,292	3,990	10

Fonte: Autor

Tabela 20. Análise do processo de desgaste de amostras da liga Al-19%Si-5%Mg-5%Cu início(tubo 3).

N. Amostra	Amostra	Diâmetro desgaste cratera (mm)	Profundidade desgaste cratera ht (mm)	Tempo de atrito (min)	Volume da cratera de desgaste (mm³)
1	Al-19% Si-5% Mg-5% Cu	3,62	0,110	1	0,565
2	Al-19% Si-5% Mg-5% Cu	3,70	0,115	2	0,616
3	Al-19% Si-5% Mg-5% Cu	3,76	0,118	3	0,658
4	Al-19% Si-5% Mg-5% Cu	4,01	0,135	4	0,851
5	Al-19% Si-5% Mg-5% Cu	4,03	0,136	5	0,868
6	Al-19% Si-5% Mg-5% Cu	4,34	0,158	6	1,169
7	Al-19% Si-5% Mg-5% Cu	3,85	0,124	7	0,723
8	Al-19% Si-5% Mg-5% Cu	4,34	0,158	8	1,169
9	Al-19% Si-5% Mg-5% Cu	4,53	0,172	9	1,389
10	Al-19% Si-5% Mg-5% Cu	5,52	0,256	10	3,073

Fonte: Autor

Gráfico 13 – Diâmetro da cratera em mm (Eixo Vertical) x Tempo de desgaste da cratera em min (Eixo horizontal) da composição Al-19%Si-5%Mg-5%Cu Início (tubo 3) (Verde)

Fonte: Autor

Gráfico 14 - Profundidade de desgaste da cratera ht em mm (Eixo Vertical) x Tempo de desgaste da cratera em min. (Eixo horizontal) da composição Al-19%Si-5%Mg-5%Cu Início (tubo 3) (Verde)

Fonte: Autor

Tabela 21. Análise do processo de desgaste de amostras da liga Al-19%Si-5%Mg-5%Cu meio (tubo 3).

N. Amostra	Amostra	Diâmetro desgaste cratera (mm)	Profundidade desgaste cratera ht (mm)	Tempo de atrito (min)	Volume da cratera de desgaste (mm ³)
1	Al-19%Si-5%Mg-5%Cu	2,90	0,070	1	0,232
2	Al-19%Si-5%Mg-5%Cu	2,98	0,074	2	0,259
3	Al-19%Si-5%Mg-5%Cu	3,39	0,096	3	0,434
4	Al-19%Si-5%Mg-5%Cu	3,31	0,092	4	0,394
5	Al-19%Si-5%Mg-5%Cu	3,43	0,098	5	0,455
6	Al-19%Si-5%Mg-5%Cu	4,09	0,149	6	0,921
7	Al-19%Si-5%Mg-5%Cu	4,22	0,149	7	1,045
8	Al-19%Si-5%Mg-5%Cu	3,70	0,115	8	0,616
9	Al-19%Si-5%Mg-5%Cu	4,68	0,184	9	1,583
10	Al-19%Si-5%Mg-5%Cu	4,95	0,206	10	2,629

Fonte: Autor

Gráfico 15 Diâmetro da cratera em mm (Eixo Vertical) x Tempo de desgaste da cratera em min (Eixo horizontal) da composição Al-19%Si-5%Mg-5%Cu meio (tubo 3) (Verde)

Fonte: Autor

Gráfico 16 Profundidade de desgaste da cratera ht em mm (Eixo Vertical) x Tempo de desgaste da cratera em min. (Eixo horizontal) da composição Al-19%Si-5%Mg-5%Cu meio (tubo 3) (Verde)

Fonte: Autor

Tabela 22. Análise do processo de desgaste de amostras da liga Al-19%Si-5%Mg-5%Cu fim(tubo 3).

N. Amostra	Amostra	Diâmetro desgaste cratera (mm)	Profundidade desgaste cratera ht (mm)	Tempo de atrito (min)	Volume da cratera de desgaste (mm ³)
1	Al-19%Si-5%Mg-5%Cu	5,31	0,237	1	2,629
2	Al-19%Si-5%Mg-5%Cu	4,35	0,159	2	2,629
3	Al-19%Si-5%Mg-5%Cu	4,41	0,163	3	1,180
4	Al-19%Si-5%Mg-5%Cu	4,39	0,161	4	1,247
5	Al-19%Si-5%Mg-5%Cu	4,80	0,193	5	1,752
6	Al-19%Si-5%Mg-5%Cu	4,85	0,197	6	1,827
7	Al-19%Si-5%Mg-5%Cu	4,96	0,206	7	1,999
8	Al-19%Si-5%Mg-5%Cu	5,91	0,294	8	4,045
9	Al-19%Si-5%Mg-5%Cu	5,31	0,237	9	2,629
10	Al-19%Si-5%Mg-5%Cu	5,89	0,292	10	3,990

Fonte: Autor

Gráfico 17 – Diâmetro da cratera em mm (Eixo Vertical) x Tempo de desgaste da cratera em min (Eixo horizontal) da composição Al-19%Si-5%Mg-5%Cu fim (tubo 3) (Verde)

Fonte: Autor

Gráfico 18 Profundidade de desgaste da cratera ht em mm (Eixo Vertical) x Tempo de desgaste da cratera em min. (Eixo horizontal) da composição Al-19%Si-5%Mg-5%Cu fim (tubo 3) (Verde)

Fonte: Autor

A Figura 21 mostra a dureza superficial das amostras das três composições afirmando também a dureza considerável na face interna dos cilindros e consequentemente nas amostras atritadas nesse estudo de desgaste micro abrasivo por esfera rotativa fixa.

Figura 21 - WZ Dureza superficial na região inicial, central e final do tubo 1.

Fonte: Contatori (2017).

A resistência ao desgaste da composição Al-19%Si início, calotas de desgaste geradas nessa região apresentaram uma superfície mais dura, mais resistente ao desgaste, uma amostra dessa região atritou com um intervalo de 1 minuto, apresentou diâmetro mais baixo do que diâmetro da região do meio e a amostra do final do tubo todas ensaiadas com intervalo de 1 minuto de duração.

A região do meio apresentou o maior desgaste, ou seja, a esfera rotativa e o carbeto de silício encontraram menor resistência e menor dureza, mostrando que as calotas de desgaste geradas nessa região apresentaram diâmetros das calotas de desgaste maior inicial e final apresentaram menor desgaste. Estudos anteriores (Contatori, 2017); (Carvalho, 2011); (Cardille, 2009); (Almeida, 2009); (Santos, 2015), mostram que a concentração de dendritas no meio do corrimento da composição fundida e no final do tubo mm a sua face interna apresentou maior resistência ao desgaste, lembrando que nestes dois locais onde a dureza do material é mais elevada. Isso mostra indicadores importantes para essa pesquisa, pois, esperasse encontrar resistência ao desgaste nessas regiões o que a pesquisa indica que o desgaste nesses pontos.

Conforme o desgaste, diâmetros, e profundidades de desgastes menores quando comparado aos resultados da amostra do meio do cilindro onde esperasse ter características de desgastes diferentes das extremidades do tubo, uma vez que a região do meio tem menor dureza, dessa forma o estudo mostra que o desgaste foi maior na região do meio do cilindro e que teve também maior diâmetro.

Conforme pode ser notado nesta análise no sentido longitudinal de um eixo aleatório da amostra retirada na região inicial de vazamento do tubo1 existe uma tendência de segregação de partículas com massa específica menor no caso o silício, rumo a face interna do tubo formando um gradiente funcional de propriedades do material indo ao encontro das conclusões dos pesquisadores Xie et al., (2009), no entanto nota-se também um aprisionamento de silício β próximo a parede do molde. Entende-se que devido à diferença de temperatura da superfície do molde em relação ao metal fundido, pode ter ocorrido um resfriamento rápido do metal em contato com as superfícies do molde provocando um acelerado processo de solidificação, aprisionando partículas de silício β .

Nesta região também a tendência da massa do metal líquido ter empurrado, ou melhor, aprisionado parte das partículas nesta região da parede do tubo. Observa-se a formação de dendritas de alumínio próximo a região central da parede do tubo, conforme ocorre em diversas posições entre 04 e 12 da tabela 02, o autor Contatori (2017), o que induz a tese da formação de uma região hipoeutética no centro da face da parede do tubo, tendo em vista que uma parte de partículas de β -silício ficou retida nas proximidades da face externa do tubo e outra significativa quantidade de partículas de β -silício segregou rumo a face interna da parede do tubo.

Conforme mostrado no gráfico da figura 21 em que Contatori (2017) mostra ter maior dureza em consequência do aprisionamento de silício primário devido às taxas transgênicas de calor elevadas, essa troca se dá quando a composição em estado líquido vinda da fundição em direção ao cilindro matriz, nesse momento é feito o primeiro contato entre a composição fundida e o molde fixo do cilindro da fundição.

Dessa forma e nesse momento surge a fase Si beta que se aglutina e se transforma em esfera de maiores diâmetros, impedindo que o silício primário migre para a face interna do diâmetro do tubo. O silício primário fica retido na região inicial do tubo elevando sua dureza. A força centrípeta atuante a partir desse momento leva o Mg_2Si ora transformados permanecem na externa do cilindro e a outra parte vai pela força centrífuga para a face interna do cilindro, dessa forma elevando sua dureza. Então as regiões iniciais e finais são mais resistentes ao desgaste o que pode ser visto no ponto.

A composição se torna cada vez mais dura e resistente ao desgaste. A resistência ao desgaste da composição diminui nessa região (central). O mecanismo de desgaste apresentado pelas três ligas foi o abrasivo a três corpos, devido à configuração orientada e paralela dos sulcos feitos na superfície desgastada das três ligas em estudo causaram rolamento desgaste por rolamento nas composições mais resistentes e riscamento e

rolamento nas composições menos resistentes. O ensaio de desgaste de abrasão por esfera (ballcratering) mostrou-se eficiente e adequado para ligas das três composições. Este ensaio apresenta-se adequado para ligas leves e filmes finos.

Na figura 22A e 22B são apresentadas imagens das crateras formadas em decorrência do ensaio de desgaste microabrasivo atuado por um período de 60 segundos de atrito entre esfera rotativa, carbetto de silício, e a liga Al-Si 19% primeira amostra desse lote. A partir do uso de um microscópio com 40 vezes observa-se uma calota com 3.33mm de diâmetro, de uma liga Al-Si 19% %, marcas de riscamento. A imagem 22 (B) refere - se a teste de ensaio por atrito com 10 minuto de atrito da esfera com a superfície da amostra de diâmetro 6.85 mm que foi quase duas vezes o diâmetro da primeira amostra da Fig. 22A na liga Al-19%Si na região de início de vazamento. Como era esperado, os testes com tempo de desgaste maiores mostram crateras com diâmetros maiores. Os maiores desgastes, de uma maneira geral, ocorreram na liga Al-19%Si sem adições de cobre e magnésio. Esta constatação está coerente com a menor quantidade de partículas na superfície interna e menor dureza do tubo dessa liga. A adição de magnésio conduziu à formação do composto Mg_2Si , que juntamente com as partículas de β -Silício favoreceram uma maior resistência ao desgaste, notado com mais evidência para tempos longos de ensaio.

Figura 22A e 22B - Análise da superfície desgastada microabrasivo (tubo -1) Al-19%Si região inicial de vazamento amostra com um minuto e outra com dez minutos de atrito.

Fig.22A que representa 60 segundos de atrito entre esfera rotativa, carbeto de silício, e a liga Al-Si 19% primeira amostra desse lote. Microscópio com 40 vezes. Amostra de uma calota com 3.33mm de diâmetro, de uma liga Al-Si 19%, marcas de riscamento.

A Fig. 22B que representa os 600 segundos de atrito com a última amostra deste lote AlSi 19% início o diâmetro 6.85 mm foi quase duas vezes o diâmetro da primeira amostra da Fig. A. O ruído durante o atrito permaneceu igual ao da amostra da Fig.22A

Fonte: Autor

Figura 23A e 23B - Análises da superfície desgastada microabrasivo (tubo -1) Al-19%Si região central de vazamento amostra com um minuto e outra com dez minutos de atrito

23A - Análise da superfície desgastada microabrasivo (tubo -1) Al-19%Si com 1 minuto de atrito

Amostra de uma calota com 4.48 mm de diâmetro, de uma liga AlSi 19% ,marcas de riscamento. 60 segundos de atrito esfera rotativa, carbeto de silício, e a liga de alumínio. (parte 2). Microscópio com 40 x

23B - Análise da superfície desgastada microabrasivo (tubo -1) Al-19%Si com 10 minuto de atrito

Amostra de uma calota com 5.28 mm de diâmetro, de uma liga AlSi 19% ,marcas de riscamento. 600 segundos de atrito esfera rotativa, carbeto de silício, e a liga de alumínio. Microscópio com 40 x.

Fonte: Autor.

Figura 24 - Análises da superfície desgastada microabrasivo (tubo -1) Al-19%Si região final de vazamento.

Fig.24A - Análise da superfície desgastada microabrasivo (tubo -1)Al-19%Si com 1 minuto de atrito.Amostra de uma calota com 4.04 mm de diâmetro, de uma liga AlSi 19% ,marcas de riscamento. 60 segundos de atrito esfera rotativa, carbeto de silício, e a liga de alumínio. Microscópio com 40 vezes.

Fig.24B - Análise da superfície desgastada microabrasivo (tubo -1)Al-19%Si com 10 minutos de atrito.

Amostra de uma calota com 5.37 mm de diâmetro, de uma liga AlSi 19% ,marcas de riscamento. 600 segundos de atrito esfera rotativa, carbeto de silício, e a liga de alumínio. Microscópio com 40 vezes.

Fonte: Autor.

Acima superfície desgastada micro-abrasivo (tubo -1)Al-19%Si região final de vazamento mostra que a região final do tubo ou o final do vazamento da liga Al-19%Si é a que tem o maior valor de dureza. Os compostos menos densos tendem a se concentrar na região da face interna do tubo centrifugado em virtude da massa específica do silício ($2,33 \text{ g/cm}^3$) e do Mg_2Si ($1,88 \text{ g/cm}^3$) serem menores do que a do alumínio em seu estado líquido ($2,56 \text{ g/cm}^3$).

No início do vazamento a taxa de transferência de calor é maior, pois a troca térmica com o ambiente externo onde a temperatura é menor isso causa uma retenção de partículas maior no caso partículas (β) e Mg_2Si . Com a adição de cobre aumenta a densidade do líquido e inibe a presença de dendritas de alumínio.

As amostras para ensaios foram retiradas da parede interna da camisa de cilindro automotivo após o processo de fundição por centrifugação nas seguintes composições Al-19%Si, Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu e Al-19%Si-5%Mg-5%Cu. As amostras (cilindro) foram cortadas primeiramente com serra manual em cilindro de 100 mm de diâmetro por 10 mm de altura. Cada lote foi caracterizado como corte inicial. Nesta amostra os diâmetros das

calotas foram os que tiveram a maior média conforme foi aumentando o tempo de atrito das amostras. O ruído proveniente da fricção foi baixo em relação à parte três ou a final.

Figura 25A e 25B -Análises da superfície desgastada microabrasivo (Tubo -2) Al19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu – Região inicial de vazamento.

Fig.25A - Análise da superfície desgastada microabrasivo(tubo -2) Al-19%Si-2,5%Mg -2,5%Cu região inicial de vazamento com 1 minuto de atrito. Amostra de uma calota com 3.70 mm de diâmetro, de uma liga Al-19%Si-2,5%Mg -2,5%Cu, marcas de riscamento. 60 segundos de atrito esfera rotativa, carbeto de silício, e a liga de alumínio. Microscópio com 40 vezes.

Fig. 25B - Análise da superfície desgastada microabrasivo Al-19%Si-2,5%Mg -2,5%Cu região inicial de vazamento com 10 minutos de atrito. Amostra de uma calota com 5.29 mm de diâmetro, de uma liga Al-19%Si-2,5% Mg -2,5%, marcas de riscamento. 600 segundos de atrito esfera rotativa, carbeto de silício, e a liga de alumínio. Microscópio com 40 vezes.

Fonte: Autor

Os compostos menos densos tendem a se concentrar na região da face interna do tubo centrifugado em virtude da massa específica do silício ($2,33 \text{ g/cm}^3$) e do Mg_2Si ($1,88 \text{ g/cm}^3$) serem menores do que a do alumínio em seu estado líquido ($2,56 \text{ g/cm}^3$).

No início do vazamento a taxa de transferência de calor é maior, pois a troca térmica com o ambiente externo onde a temperatura é menor isso causa uma retenção de partículas maior no caso partículas (β) e Mg_2Si . Com a adição de cobre aumenta a densidade do líquido e inibe a presença de dendritas de alumínio.

As amostras para ensaios foram retiradas da parede interna da camisa de cilindro automotivo após o processo de fundição por centrifugação nas seguintes composições Al-19%Si, Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu e Al-19%Si-5%Mg-5%Cu.

As amostras (cilindro) foram cortadas primeiramente com serra manual em cilindro de 100 mm de diâmetro por 10 mm de altura. Cada lote foi caracterizado como corte inicial. A figura 26 mostra a variação da dureza a liga Al – 19Si. (início, meio e fim).

Figura 26 – Resultados de dureza superficial liga Al – 19Si.

Fonte: CANTATORI (2017).

Os compostos menos densos tendem a se concentrar na região da face interna do tubo centrifugado em virtude da massa específica do silício ($2,33 \text{ g/cm}^3$) e do Mg_2Si ($1,88 \text{ g/cm}^3$) serem menores do que a do alumínio em seu estado líquido ($2,56 \text{ g/cm}^3$).

No início do vazamento a taxa de transferência de calor é maior, pois a troca térmica com o ambiente externo onde a temperatura é menor isso causa uma retenção de partículas maior no caso partículas (β) e Mg_2Si . Com a adição de cobre aumenta a densidade do líquido e inibe a presença de dendritas de alumínio.

As amostras para ensaios foram retiradas da parede interna da camisa de cilindro automotivo após o processo de fundição por centrifugação nas seguintes composições Al-19%Si, Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu e Al-19%Si-5%Mg-5%Cu.

As amostras para ensaios foram retiradas da parede interna da camisa de cilindro automotivo após o processo de fundição por centrifugação nas seguintes composições Al-19%Si, Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu e Al-19%Si-5%Mg-5%Cu. As amostras (cilindro) foram cortadas primeiramente com serra manual em cilindro de 100 mm de diâmetro por 10 mm de altura. Cada lote foi caracterizado como corte inicial. Nesta amostra os diâmetros das calotas foram os que tiveram a maior média conforme foi aumentando o tempo de atrito das

amostras. O ruído proveniente da fricção foi baixo em relação à parte três ou a final. Este gráfico mostra a relação entre desgaste e diâmetros.

Na figura 27A e 27B são apresentadas imagens das crateras formadas em decorrência do ensaio de desgaste micro-abrasivo. Fig.27A que representa 60 segundos de atrito entre esfera rotativa, carbeto de silício, e a liga (tubo -2) Al-19%Si-2,5%Mg -2,5%Cu região final, primeira amostra desse lote. A partir do uso de um microscópio com 40 vezes. Amostra com uma calota com 2.23mm de diâmetro, de uma liga Al-Si 19%, marcas de riscamento. A imagem 27B refere - se a teste de ensaio por atrito com 10 minuto de atrito da esfera em sua superfície e diâmetro de 4.80 mm Al-19%Si-2,5%Mg -2,5%Cu na região de final de vazamento figura 27B.

Figura 27A e 27B– Análise da superfície desgastada microabrasivo (tubo -2) Al 19%Si-2,5%Mg - 2,5%Cu região final de vazamento.

Fonte: Autor.

As amostras para ensaios foram retiradas da parede interna da camisa de cilindro automotivo após o processo de fundição por centrifugação nas seguintes composições Al-19%Si, Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu e Al-19%Si-5%Mg-5%Cu. As amostras (cilindro) foram cortadas primeiramente com serra manual em cilindro de 100 mm de diâmetro por 10 mm de altura. Cada lote foi caracterizado como corte inicial. Nesta amostra os diâmetros das calotas foram os que tiveram a maior média conforme foi aumentando o tempo de atrito das amostras. O ruído proveniente da fricção foi baixo em relação à parte três ou a final. Na figura 28A e 28B são apresentadas imagens das crateras formadas em decorrência do ensaio de desgaste micro-abrasivo. Fig. 28A que representa 60 segundos de atrito entre esfera rotativa, carbeto de silício, e a liga (tubo -2) Al-19%Si-5%Mg 5%Cu região inicial, primeira amostra desse lote. A partir do uso de um microscópio com 40 vezes. Amostra com uma calota com 3,62 mm de diâmetro, de uma liga (tubo -2) Al-19%Si-5%Mg 5%Cu, marcas de riscamento. A imagem 28B refere - se a teste de ensaio por atrito com 10 minutos de atrito da esfera em sua superfície e diâmetro de 5,52 mm Al-19%Si-2,5%Mg -2,5%Cu na região de inicial de vazamento figura 28B.

Figura 28A e 28B –Análise da superfície desgastada microabrasivo (tubo -3) Al-19%Si-5%Mg-5%Cu região inicial.

Fig.28A-Análise da superfície desgastada microabrasivo(tubo -3) Al-19%Si-5%Mg -5%Cu região inicial de vazamento com 1 minuto de atrito. Amostra de uma calota com 3.62 mm de diâmetro, de uma liga Al-19%Si-5% Mg -5%Cu, marcas de riscamento. 60 segundos de atrito esfera rotativa, carbeto de silício, e a liga de alumínio. Microscópio com 40 vezes.

Fig.28B - Análise da superfície desgastada microabrasivo(tubo -3) Al-19%Si-5%Mg -5%Cu região inicial de vazamento com 10 minutos de atrito. Amostra de uma calota com 5.52 mm de diâmetro, de uma liga Al-19%Si-5% Mg -5%Cu ,marcas de riscamento. 600 segundos de atrito esfera rotativa carbeto de silício, e a liga de alumínio. Microscópio com 40 vezes.

As amostras (cilindro) foram cortadas primeiramente com serra manual em cilindro de 100 mm de diâmetro por 10 mm de altura. Cada lote foi caracterizado como corte inicial. Nesta amostra os diâmetros das calotas foram os que tiveram a maior media, conforme foi aumentando o tempo de atrito das amostras.

Figura 29A e 29B –Análise da superfície desgastada microabrasivo (tubo -3) Al-19%Si-5%Mg-5%Cu região central.

Fig.29A - Análise da superfície desgastada microabrasivo(tubo -3) Al-19%Si-5%Mg -5%Cu região central de vazamento com 1 minuto de atrito. Amostra de uma calota com 3.62 mm de diâmetro, de uma liga Al-19%Si-5% Mg -5%Cu,marcas de riscamento. 60 segundos de atrito esfera rotativa, carbeto de silício, e a liga de alumínio. Microscópio com 40 vezes.

Fig.29B - Análise da superfície desgastada microabrasivo(tubo -3) Al-19%Si-5%Mg -5%Cu região central de vazamento com 10 minutos de atrito. Amostra de uma calota com 5.52 mm de diâmetro, de uma liga AlSi 19%,marcas de riscamento. 600 segundos de atrito esfera rotativa carbeto de silício, e a liga de alumínio. Microscópio com 40 vezes.

Fonte: Autor

As amostras para ensaios foram retiradas da parede interna da camisa de cilindro automotivo após o processo de fundição por centrifugação nas seguintes composições Al-19%Si, Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu e Al-19%Si-5%Mg-5%Cu. As amostras (cilindro) foram cortadas primeiramente com serra manual em cilindro de 100 mm de diâmetro por 10 mm de altura. Cada lote foi caracterizado como corte inicial. Nesta amostra os diâmetros das calotas foram os que tiveram a maior média conforme foi aumentando o tempo de atrito das amostras. O ruído proveniente da fricção foi baixo em relação à parte três ou a final. Este gráfico mostra a relação entre desgaste e diâmetros.

Figura 30A e 30B –Análise da superfície desgastada microabrasivo (tubo -3) Al-19%Si-5%Mg-5%Cu região final.

Fig. 30A - Análise da superfície desgastada microabrasivo(tubo -3) Al-19%Si-5%Mg-5%Cu região final de vazamento com 1 minuto de atrito. Amostra de uma calota com 3.62 mm de diâmetro, de uma liga Al-19%Si-5% Mg-5%Cu, marcas de riscamento. 60 segundos de atrito esfera rotativa carbeto de silício, e a liga de alumínio. Microscópio com 40 vezes.

Fig. 30B - Análise da superfície desgastada microabrasivo(tubo -3) Al-19%Si-5%Mg-5%Cu região final de vazamento com 10 minutos de atrito. Amostra de uma calota com 5.52 mm de diâmetro, de uma liga Al-19%Si-5% Mg-5%Cu, marcas de riscamento. 600 segundos de atrito esfera rotativa carbeto de silício, e a liga de alumínio. Microscópio com 40 vezes.

Fonte: Autor.

CONCLUSÕES

- Desenvolvimento e a construção de uma máquina de ensaio de desgaste microabrasivo por esfera rotativa fixa obteve sucesso, gerando resultados experimentais adequados quando da necessidade de avaliação da resistência ao desgaste de superfícies.
- Os maiores desgastes, de uma maneira geral, ocorreram na liga Al-19%Si sem adições de cobre e magnésio. Esta constatação está coerente com a menor quantidade de partículas na superfície interna e menor dureza do tubo dessa liga.
- A resistência ao desgaste está relacionada com a presença de partículas primárias na superfície interna dos tubos centrifugados. A adição de magnésio conduziu à formação do Mg_2Si , que juntamente com as partículas de β -Silício favoreceram uma maior resistência ao desgaste.
- Analisando os diâmetros das calotas e as profundidades de desgaste concluem-se que o início e final de vazamento do tubo são mais resistentes ao desgaste devido a sua dureza na face interna ser mais elevada.
- A resistência ao desgaste da composição Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu na região de início de vazamento apresentou calotas de desgaste com superfície mais dura e mais resistente ao desgaste.
- A resistência ao desgaste da composição Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu da região central de vazamento apresentou calotas de desgaste com superfície mais dura e mais resistente ao desgaste comparada com a região inicial.
- A resistência ao desgaste da composição Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu da região final de vazamento apresentou calotas de desgaste geradas com superfície mais dura e mais resistente ao desgaste quando comparada as regiões do início e meio desta composição.
- Analisando os diâmetros das calotas e as profundidades de desgaste concluem-se que as regiões de início e final de vazamento do tubo são mais resistentes ao desgaste devido a sua dureza na face interna ser mais elevada. Apresenta-se uma resistência mediana quando comparado com as amostras da região final de vazamento do tubo Al-19% Si.

- A resistência ao desgaste da composição Al-19%Si-5%Mg-5%Cu da região de início de vazamento apresentou calotas de desgaste com superfície mais dura e mais resistente ao desgaste, quando comparada as amostras do tubo da liga Al-19% Si e Al-19%Si-2,5%Mg-2,5%Cu.
- A resistência ao desgaste também está relacionada com a presença de partículas primárias na superfície interna dos tubos centrifugados. A adição de magnésio conduziu à formação do Mg_2Si , que juntamente com as partículas de β -Silício favoreceram uma maior resistência ao desgaste. Contudo, uma quantidade excessiva de partículas primárias acumuladas junto à superfície interna dos tubos centrifugados pode conduzir a um desgaste maior devido ao maior arrancamento das partículas.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Indicadores conhecidos a partir do estudo de desgaste micro abrasivos por esfera rotativa fixa é analisar também outras ligas junto a outras metodologias. Nessa pesquisa também surgiu a idéia futura de analisar o peso das amostras antes e depois do desgaste.

Aproveitando tal deixa o estudo micro abrasivo em outros materiais metálicos e não metálicos como os cerâmicos, se faz importante esse estudo nesse processo metodológico.

O estudo da influência dos espaçamentos dendritos secundários na dureza da liga Cu-14Al-5Ni-5Fe após o processo de solidificação, bem como de outras ligas. Nesses estudos aliga é solidificada em um dispositivo de solidificação direcional ascendente sendo o calor extraído através de refrigeração à água em uma base de aço SAE 1020. As medições dos espaçamentos dendritos secundários são obtidas por meio de microscopia óptica com software acoplado. As variáveis térmicas de solidificação como velocidade de deslocamento da isoterma líquidos (VL) e taxa de resfriamento (TR) foram avaliadas em função da distância da superfície de extração de calor. A dureza e os espaçamentos dendritos secundários são correlacionados com as posições dos termopares devidamente fixados no lingote. Givanildo Alves dos Santosetal.,(2020). A aplicação de carbetto de silício na superfície de cabeçotes para aumentar a vida útil do sistema eixo, biela, cabeçote, anéis. Pistão se faz interessante buscar uma pesquisa nesse seguimento.

Dedução das fórmulas das equações profundidade de desgaste ht (mm) e volume de desgasta V_t da cratera de desgaste das amostras. Profundidade total de penetração da esfera de ensaio (ht): Com fundamentação teórica baseada no teorema de Pitágoras, conforme mostrado na figura 1.

Fig. 1 - Mostra a esfera de aço desgastando a superfície da amostra

$$(R - ht)^2 + \left(\frac{dc}{2}\right)^2 = R^2 \quad \text{Equação [I]}$$

Igualando a equação I a zero fica:

$$ht^2 - 2Rht + \frac{dc^2}{4} = 0 \quad \text{Equação [I.1]}$$

Os coeficientes da equação II são respectivamente: A = 1, B = -2R, C = (dc/4)². Então:

$$\Delta = B^2 - 4AC \quad \text{Equação [I.2]}$$

$$\Delta = (-2R)^2 - 4.1.\left(\frac{dc}{4}\right)^2$$

$$\Delta = (4R)^2 - (dc)^2$$

$$ht = \frac{-(-2R) \pm \sqrt{(-2R)^2 - 4.1.\left(\frac{dc}{4}\right)^2}}{2.1} \quad \text{Equação [I.3]}$$

Analisando a Fig. 1 pode – se concluir que:

$$dc = 0 \Rightarrow ht = 0$$

$$dc = 30 \text{ mm} \Rightarrow ht = 15 \text{ mm}$$

Essa condição é satisfeita apenas para a raiz gerada pela equação:

$$ht = \frac{-(-2R) - \sqrt{(-2R)^2 - 4.1.\left(\frac{dc}{4}\right)^2}}{2.1} \quad \text{Equação [I.4]}$$

Como nessa dissertação foi utilizada uma esfera de diâmetro 30.0 mm (R = 15 mm):

$$ht = 15 - \sqrt{225 - 0.25dc^2} \quad \text{Equação [I.5]}$$

Unidades: ht [mm] e dc [mm]

Volume total da cratera de desgaste (Vt)

A figura 2. Mostra a esfera e a parte hachurada representa a cratera de desgaste e pode ser calculada aplicando a fórmula:

$$f(x) = \pi \int_0^h [f(x)]^2 dx \quad \text{Equação [II.1]}$$

Figura 2. Cálculo do volume total de desgaste.

$$Vt = \pi \int_0^{ht} [R^2 - (x - R)] dx \text{ Equação [II.2]}$$

$$Vt = \pi \int_0^{ht} [R^2 - (x^2 + R^2 - 2R \cdot x)] dx \text{ Equação [II.3]}$$

$$Vt = \int_0^{ht} (2R \cdot x - x^2) dx \text{ Equação [II.4]}$$

$$Vt = \pi \left[2R \cdot \frac{x^2}{2} - \frac{x^3}{3} \right] \Big|_0^{ht} \text{ Equação [II.5]}$$

$$Vt = \pi \left[2R \cdot x^2 - \frac{x^3}{3} \right] \Big|_0^{ht} \text{ Equação [II.6]}$$

$$Vt = \pi \left[(R \cdot ht^2 - \frac{ht^3}{3}) - 0 \right] \text{ Equação [II.7]}$$

$$Vt = \pi \left[(15 \cdot ht^2 - \frac{ht^3}{3}) \right] \text{ Equação [II.8]}$$

$$Vt \Rightarrow [mm^3] \text{ e } ht \Rightarrow [mm]$$

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, G. F. C. **Estudo da liga Al-Sihipoeutéticas fundida em moldes de areia verde: efeito da adição de refinadores e modificadores de grão nas propriedades mecânicas**. (Dissertação - Engenharia de Materiais). Universidade Presbiteriana Mackenzie. São

Paulo 2009. Disponível em: <<http://tede.mackenzie.br/jspui/bitstream/tede/2744/1/Gisele%20Fabiane%20Costa%20Almeida1.pdf>> Acesso em: 20 Out. 2019.

ALMEIDA, G. F. C.; COUTO, A. A.; SEVERINO, B. P.; CABRAL NETO, A.; VATAVUK, J.; MACHADO, K. B. S. C. **Estudo de ligas Al-Si fundidas em molde de areia verde efeito da adição de refinador e de modificadores de grão nas propriedades mecânicas**. 18º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 24 a 28 de Novembro de 2008, Porto de Galinhas, PE, Brasil. 2008. Disponível em: <<https://www.ipen.br/biblioteca/2008/cbecimat/13292.pdf>> Acesso em: 27 out. 2019.

ANUSAVICE, KENNETH J.; SHEN, CHIAYI; RAWLS, H. RALPH. *Phillips Materiais Dentários*. Número da edição: 12. Ed. Elsevier. Ano da edição: 2013. I.S.B.N.: 9788535268188.

ASM HANDBOOK. *Friction, Lubrication, and Wear Technology*. Editor: George E. Totten. Volume 18. 2017. Copyright # 2017 ASM International. Wallrights reserved. Disponível em: <www.asminternational.org> Acesso em: 26 mar. 2019.

ASM HANDBOOK. *Casting. Metals*, vol 15, 1992. Disponível em: <www.asminternational.org> Acesso em: 26 mar. 2019.

BARRAGAN NETO, VALTER. **Simulação computacional em camisas de motor construídas em liga de alumínio silício**. São Paulo, 2011. 82 f.: il. ; 30 cm. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia de Materiais) – Universidade Presbiteriana Mackenzie, 2011. Disponível em: <<http://tede.mackenzie.br/jspui/bitstream/tede/1321/1/Valter%20Barragan%20Neto.pdf>>. Acesso em 21 Out. 2019.

BETIATTO, J. **Estudo da frequência e profundidade do dressamento no processo de retífica Centerless** - Relatório de Estágio II, apresentado como requisito parcial à Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica. Universidade de Caxias do Sul – Centro de ciências exatas e da tecnologia curso de Engenharia mecânica – Caxias do Sul, 2015.

CARDILLE, Dionízio, Mateo. **Estudo do Comportamento do Coeficiente de Desgaste e dos Modos de Desgaste em Ensaios de Desgaste Microabrasivo**. 2009. Disponível em: <https://www.google.com.br/search?sclient=psy-ab&site=&source=hp&btnG=Pesquisar&q=estudo+do+comportamento+do+coeficiente+de+desgaste+e+dos+modos+de+desgaste+em+ensaios+de+desgaste+micro+abrasivo>. Acesso em: 12 set. 2019.

CARVALHO, M. A. S. **Avaliação de um motor de combustão interna ciclo Otto utilizando diferentes tipos de combustíveis**. Universidade Federal da Bahia – Escola Politécnica programa de pós-graduação em Engenharia Industrial. Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Industrial da Universidade Federal da Bahia

(Mestrado em Engenharia Industrial. Salvador) 2011. Disponível em: <<http://repositorio.ufba.br/ri/handle/ri/18744>>. Acesso em: 28 ago. de 2019.

CONTATORI, C. **Efeitos do cobre e do magnésio na microestrutura da liga Al-19%Si fundida por centrifugação**, 2017. 195 p. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas Nucleares – IPEN-CNEN/SP. São Paulo.

COUTO, A. A; MARRECO, D. M; CABRAL NETO, A; J; NAVA, VATAVUK; M. A. **Caracterização de ligas Al-Si eutética e hipereutética fundidas por centrifugação para aplicações automotivas**. 19º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais – CBECiMat, 21 a 25 de novembro de 2010, Campos do Jordão, SP, Brasil. Disponível em: <<https://www.ipen.br/biblioteca/2010/eventos/cbecimat/15889.pdf>> Acesso em: 14 ago. 2019.

COZZA, R. C. **Estudo do comportamento do coeficiente de desgaste e dos modos de desgaste abrasivo em ensaios de desgaste microabrasivo**. Dissertação de M. Sc., Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil, 2006.

COZZA, R. C. **Estudo do Desgaste e Atrito em Ensaios Microabrasivo por Esfera Rotativa Fixa em Condições de Força Normal Constante e Pressão Constante**. Tese (Doutorado em Ciências): Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Mecânica, São Paulo - SP, 2011.

COZZA RC, SUZUKI RdS, Schön CG. **Projeto, Construção e validação de um equipamento de ensaio de desgaste microabrasivo por esfera rotativa livre para a medição do coeficiente de atrito**. Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineração, v. 11(2):117-24, 2014.

CHIRITA, G.; SOARES, D.; SILVA, F.S. – Advantages of the centrifugal casting technique for the production of structural components with Al-Si alloys – *ELSEVIER – Materials and Design*, 2008, 29 p. 20-27.

FAGURY NETO, E. KIMINAMI, R.H.G.A. **Avaliação da resistência ao desgaste de aluminas manométricas produzidas a partir da decomposição térmica de acetato de alumínio liofilizado**. 2007. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/ce/v53n328/a1253328.pdf>> 30 Ago. 2019.

FITZPATRICK, M. **Introdução aos processos de usinagem**. AMGH – Editora – Ltda. 1ª edição. São Paulo – SP. 2013.

FUOCCO, R; CORREA, E.R.; CORREA, A.V.O. – *“Typical Defects in Cast Aluminum Wheels.”* AFS Transactions. v.92, p.1-9. 1997.

GARCIA, A. – **Solidificação: Fundamentos e Aplicações**. Editora da UNICAMP, Campinas, Brasil, 2001.

HUANG, XIAOYU; LIU, CHANGMING; LV, XUNJIA; LIU, GUANGHUI; LI, FUQIANG, LI – *Aluminum alloy pistons reinforced with SiC fabricated by centrifugal casting*. ELSEVIER – Journal of Materials Processing Technology 211 - 1540-1546. 2011.

IPM- Instituto Presbiteriano Mackenzie MACKPESQUISA: **memória VIII** / Instituto Presbiteriano Mackenzie. São Paulo: Editora MACKPESQUISA, 2009. 128p.; 23cm.

JAYAKUMAR, E.; RAJAN, T.P.D.; PAI, B.C. – Effect of Mg on solidification Microstructures of Homogenous and Functionally Graded A390 Aluminum Alloys. *Trans Indian Inst. Met.*, December – 2012, 65(6), p.677-681.

JIANG, J., SHENG, F. & REN, F. *Modelling of two-body abrasive wear under multiple contact conditions*. *Wear*, Vol. 217, No. 1, pp. 35-45. 1998. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043164898001616>>. Acesso em: 17 nov. 2019.

KIM, J. M. e LOPER, D. R. Jr. *Effect of Solidification Mechanism on Fluidity of Al-Si Casting Alloys*. AFS Transaction, n° 95, pp.521-529, 1995.

KIM, J. M. e LOPER, D. R. Jr. *A Influência da Solidificação sobre a Fluidez das Ligas de Alumínio-Silício*. *Fundição e Serviços*, n° 75, pp.14-28, março, 1999.

LOPER, D. R. Jr. *Fluidity of aluminum-silicon casting alloys*. Trans. Amer. Foundrym. Soc. n° 100, pp.533-538, 1992.

MOCELLIN, F. *Nova tecnologia: brunimento em ferro fundido*. CIMA – Inovação e processos. 07 nov. 2007. Disponível em: <https://www.cim.com.br/portal/noticia/exibir_noticia/2304-nova-tecnologia-brunimento-em-ferro-fundido-vermicular>. Acesso em: 11/04/2010.

MONTEIRO, R. L. *Análise do efeito de tratamento térmico T4 em ligas de Al-Cu produzidas pelo processo de “Direct Squeeze Casting”*. Trabalho de Conclusão de Curso (título de engenheiro de Materiais). Universidade Federal do Pará - Marabá-Pa 2011, 91f. Disponível em: <https://femat.unifesspa.edu.br/images/TCCs/2011/TCC-Rafael_Lazaro_Monteiro_2011.pdf> Acesso em: 21 set. 2019.

NORTON, ROBERT L. *Projeto de máquinas* [recurso eletrônico]: uma abordagem integrada / Robert L. Norton; [tradução: Konstantinos Dimitriou Stavropoulos ... et al.]. – 4. ed. – Dados eletrônicos. – Porto Alegre: Bookman, 2013. Tradução dos capítulos 8 e 16 da 4. ed. Tradução de outros trechos da 4. Ed. por Jéssica Fraga de Castro e Equipe Bookman. Editado também como livro impresso em 2013. ISBN 978-85-8260-023-8.

OLEA, C. A. W. *Caracterização por microscopia eletrônica do aço SAE 1141 micro ligado ao Nb*. 2002. 106f. (Dissertação) Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM. Ministério da Educação Universidade Federal do Rio grande do Sul. Porto Alegre 2002.

OLIVEIRA, D. L. *Construção de um equipamento de ensaio de desgaste microabrasivo por esfera rotativa fixa para análise do desgaste em revestimento duro aplicado por soldagem*. Ilha Solteira: [s.n.], 2015, 84f. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Materiais e Processo de Fabricação, 2015.

RAJAN, T.P.D.; PILLAI R.M.; PAI, B.C. – *Characterization of centrifugal cast functionally graded aluminum-silicon carbide metal matrix composites*. ELSEVIER – Materials Characterization 61- 923-928. 2010.

REIS, M. N. **Processo de produção e uso do alumínio na construção civil: contribuição à especificação técnica das esquadrias de alumínio**. São Paulo, 2006. 342p. Dissertação (Mestrado – Área de Concentração: Tecnologia da Arquitetura) – FAUUSP. 2006.

REJOWSKI, Edney D.; MORDENTE, Paulo J. da Rocha; PILLIS, Marina F. **Camisa de cilindro revestida com filme de carbono amorfo na forma de diamante**. Centro Tecnológico MAHLE METAL LEVE SA., Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN. Prêmio AEA - Projetos de Meio Ambiente. 2012.

SANTOS, W. C. et al. Desenvolvimento de dispositivo e estudo do comportamento ao microdesgaste abrasivo do aço AISI 420 temperado e revenido. **Matéria (Rio J.)**, Rio de Janeiro, v. 20, n. 2, p. 304-315, June 2015. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-70762015000200304&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 29 Jul. 2019.

SANTOS, E. A. da S. **Análise comparativa do desgaste tribológico da Liga Al7075 e Ligas ferrosas de baixo e médio carbono**. 22º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais 06 a 10 de Novembro de 2016, Natal, RN, Brasil. 2016.

SILVA, D.J. **Influência do revestimento de nitreto de titânio depositado via feixe de elétrons na resistência ao desgaste microabrasivo das ligas de alumínio-magnésio-silício AA6101 e AA6351**. Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, ENM.DM – 174A/2012, Brasília, DF, 80p. 2012.

SILVA, Dávila Moreira Lopes. **Processo de brunimento em camisas de cilindro de motores de combustão interna: uma análise da influência da velocidade de avanço no acabamento superficial** / Dávila Moreira Lopes Silva. – 2017. 82 f. : il. color. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2017. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/31740/1/2017_tcc_dmlsilva.pdf>. Acesso em: 20 set. 2020.

TOLMASQUIM, M. T. **Energia Termelétrica: Gás Natural, Biomassa, Carvão, Nuclear**/ EPE: Rio de Janeiro, 2016. 417p.:il; 21 x 29,7cm. Inclui bibliografia e índice. ISBN 978-85-60025-05.

VELHINHO, A.; SEQUEIRA, P.D.; MARTINS, RUI; VIGNOLES, G.; FERNANDES, BRAZ F.; BOTAS, J.D.; ROCHA, L.A. – **X-ray tomographic imaging of Al/SiC p functionally graded composites fabricated by centrifugal casting**. ELSEVIER - Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 200 - 295-302. 2003.

VERRAN, G. O., PALOSHI Jr. J. e ARAUJO NETO, E. **Método Alternativo para Medição do índice de Fluidez de Ligas de Al em Coquilhas**. Fundação e Serviços, nº 134, pp.70-79, fevereiro, 2004.

VICENTE, Antenor. **Mecanismos de desgaste dos metais. MM Brasil – Mundo Mecânico 2017.** Disponível em: <<https://mundomecanico.com.br/mecanismos-de-desgaste-dos-metais/>>. Acesso em: 24 Ago.2019.

WANG, K.; CHENG, J.F.; SUN, W.J.; XUE, H.S. – “An approach for increase of reinforcement content in particle rich zone of centrifugally cast SiCp/Al composites.” *ELSEVIER - Journal of Composite Materials*. 46(9) 1021-1027. 2011.

WANG, L.; MAKLOUF, M; APELIAN, D. **Aluminium die casting alloys: alloy composition, microstructure, and properties-performance relationships.** International Materials Reviews, v.40, n.6, p.221-237, 1995.

XIE, Young; LIU, Changming; ZHAI, Yanbo; WANG, Kai; LING, Xuedong – Centrifugal casting processes of manufacturing in situ functionally gradient composite materials of Al-19Si-5Mg alloy. *RARE METALS*, Aug 2009, Vol. 28, N° 4, p. 405.

ZHANG, JIAN; FAN, ZHONGYUN; WANG, YUQING; ZHOU, BENLIAN – *Hypereutectic aluminium alloy tubes with graded distribution of Mg²Si particles prepared by centrifugal casting.* ELSEVIER - Materials and Design 21 (2000) 149-153. 2000.

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Diretoria de Pesquisa, Desenvolvimento e Ensino
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 – Cidade Universitária CEP: 05508-000
Fone/Fax(0XX11) 3133-8908
SÃO PAULO – São Paulo – Brasil
<http://www.ipen.br>

O IPEN é uma Autarquia vinculada à Secretaria de Desenvolvimento, associada à Universidade de São Paulo e gerida técnica e administrativamente pela Comissão Nacional de Energia Nuclear, órgão do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações.