

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

ANÁLISE DO DESGASTE EM JUNTAS SOLDADAS DE CHAPAS FINAS DE AÇO HARDOX

450

por

Breno Luvison Basso

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, junho de 2018

ANÁLISE DO DESGASTE EM JUNTAS SOLDADAS DE CHAPAS FINAS DE AÇO HARDOX
450

por

Breno Luvison Basso

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dra. Thamy Cristina Hayashi
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação.**

Orientadora: Prof. Cíntia Cristiane Petry Mazzaferro

Coorientador: Prof. José Antônio Esmerio Mazzaferro

Comissão de Avaliação:

Prof. Cíntia Cristiane Petry Mazzaferro

Prof. Patric Daniel Neis

Prof. Ney F. Ferreira

Porto Alegre, 15, junho de 2018.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a minha família, meu pai José, minha mãe Neide e meu irmão Renan pelo amor, apoio e incentivo.

À minha namorada Mariana por estar sempre ao meu lado.

Agradeço aos professores Cíntia Cristiane Petry Mazzaferro e José Antônio Esmerio Mazzaferro pelos conselhos, conhecimento, atenção e paciência sempre presentes na orientação deste trabalho de conclusão de curso.

À equipe do Laboratório de Soldagem e Técnicas Conexas (LS&TC) da UFRGS pela ajuda e companhia.

Agradecimentos também a empresa SSAB Brasil, pelo fornecimento do material utilizado neste estudo.

Agradeço ao Laboratório Multiusuário de Análise de Superfícies (LAMAS/UFRGS) por disponibilizar o interferômetro para uso.

BASSO, B.L. **Análise do desgaste em juntas soldadas de chapas finas de aço HARDOX 450**. 2018. 13 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

RESUMO

O desgaste tem impacto direto no projeto de componentes mecânicos, muitas vezes levando a um superdimensionamento destes. Investimentos no desenvolvimento de materiais que consigam aliar resistência e baixo peso são cada vez mais frequentes. O aço Hardox 450 vem ao encontro desta necessidade, possibilitando o uso de chapas finas devido à combinação de dureza e tenacidade. Os processos de soldagem são amplamente utilizados na fabricação e manutenção de máquinas, porém as juntas soldadas possuem propriedades mecânicas diferentes daquelas do metal base. Para este trabalho, foram soldadas chapas de Hardox 450 com 1mm de espessura pelos processos MAG com arame AWS ER70S-6 e TIG autógeno, com três variações de parâmetros de soldagem na MAG e duas na TIG. Após, analisou-se o desgaste no metal base (MB) e nos metais de solda das juntas soldadas através de ensaios de deslizamento linear recíproco, além de medições de dureza e do coeficiente de atrito médio. Os resultados mostraram que o MB juntamente com as amostras soldadas pelo processo TIG apresentaram maior resistência ao desgaste, maiores durezas e menores coeficientes de atrito. O comportamento entre dureza e desgaste foi oposto nas soldas feitas pelo processo MAG, sendo que a de maior dureza entre elas apresentou o maior desgaste. Nestas amostras constatou-se também uma relação direta entre os valores de diluição e de dureza do metal de solda.

PALAVRAS-CHAVE: (Desgaste, TIG, MAG, chapas finas)

BASSO, B.L. **Analysis of wear on welded joints of HARDOX 450 steel thin plates**. 2018. 13 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

ABSTRACT

The wear has a direct impact on the design of mechanical components, often leading to an oversizing of these. Investments in the development of materials that can combine resistance and low weight are becoming more frequent. Hardox 450 steel fill this need, allowing the use of thin plates due to the combination of hardness and toughness. Welding processes are widely used in the manufacture and maintenance of machines, however welded joints have different mechanical properties than the base metal. For this work, Hardox 450 plates with 1mm thickness were welded by the GMAW processes with AWS ER70S-6 wire and autogenous GTAW, with three variations of welding parameters in GMAW and two in GTAW. Afterwards, the wear on the base metal (MB) and weld metals of welded joints was analyzed by reciprocal linear sliding tests, as well as hardness and average friction coefficient measurements. The results showed that the MB along with the samples welded by the GTAW process presented higher resistance to wear, higher hardness and lower coefficients of friction. The behavior between hardness and wear was opposite in the welds made by the GMAW process, being the sample with the higher hardness between them presented the highest wear. In these samples a direct relationship between the dilution values and the hardness of the weld metal was also verified.

KEYWORDS: (Wear, GTAW, GMAW, thin plates)

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	1
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1
4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	2
4.1 PROCESSO MAG	2
4.2 PROCESSO TIG.....	2
4.3 DILUIÇÃO.....	3
5. METODOLOGIA.....	3
5.1 MATERIAS	3
5.2 SOLDAGEM E SEUS PARÂMETROS.....	3
5.3 DILUIÇÃO DO METAL DE SOLDA.....	4
5.4 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA PARA OS ENSAIOS DE DESGASTE	4
5.5 ENSAIO DE DESGASTE	5
5.6 QUANTIFICAÇÃO DO DESGASTE.....	6
5.7 MEDIÇÃO DAS DUREZAS.....	7
6.RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	7
6.1 RESISTÊNCIA AO DESGASTE.....	7
6.2 VALORES DE DUREZA E ATRITO MÉDIO.....	10
7.CONCLUSÕES	11
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	12

1. INTRODUÇÃO

O desgaste vem sendo estudado ao longo dos anos devido ao seu impacto direto no projeto de peças e equipamentos, muitas vezes levando a um superdimensionamento destes. Em indústrias como a de mineração, sucroalcooleira e em equipamentos agrícolas, este tipo de desgaste gera perdas financeiras consideráveis, tanto no custo direto das máquinas e componentes quanto em sua manutenção.

Os processos de soldagem são amplamente utilizados na fabricação e na manutenção de máquinas e equipamentos. Dentre eles, destacam-se o processo MAG (Metal Active Gas) pela sua facilidade em automação aliada a qualidade de solda, e a soldagem TIG (Tungsten Inert Gas) por sua qualidade superior (Guerra, 1996).

O aço Hardox 450 vem sendo aplicado a componentes mecânicos devido à sua elevada resistência ao desgaste, pela combinação de dureza com tenacidade. Esses fatores, aliados com a soldabilidade da liga, a torna bastante utilizada em equipamentos e máquinas ligados à mineração (SSAB, 2018).

A boa combinação de elevada resistência mecânica e tenacidade do aço Hardox 450 leva ao uso de chapas cada vez menos espessas, visando uma maior eficiência dos equipamentos juntamente com a redução de custos.

2. OBJETIVOS

Busca-se neste estudo verificar o efeito da soldagem na resistência ao desgaste de chapas Hardox 450 de 1mm de espessura, soldadas em cinco configurações distintas, sendo três delas efetuadas pelo processo MAG com o arame AWS ER70S-6 de 0,8 mm de diâmetro, onde foram variados os parâmetros de soldagem, mas mantida a energia de soldagem praticamente constante, e duas variações de parâmetros relativos ao processo TIG autógeno. Os cordões de solda devem ser isentos de defeitos como porosidades, falta de penetração, etc.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Apesar de os processos de soldagem serem amplamente utilizados em componentes e estruturas suscetíveis ao desgaste abrasivo, não existem muitos trabalhos voltados à análise das juntas soldadas. A maioria deles tem seu foco no estudo do metal base e nos revestimentos soldados aplicados nas superfícies expostas ao desgaste. Tampouco foram encontrados estudos analisando o desgaste em chapas finas como as presentes neste trabalho.

Giarollo, et. al., 2017, apresentaram uma análise comparando o desgaste abrasivo entre o metal base de um aço estrutural ASTM A242 com 4,75mm de espessura e as juntas soldadas pelo processo MAG, com arame AWS ER70S-6. Foram efetuados os ensaios do tipo de roda de borracha e pino-sobre-chapa, sendo que em ambos os casos, o metal de solda apresentou maior resistência ao desgaste do que o metal base.

Em um estudo com um aço martensítico com dureza de 470HV e 12mm de espessura, Mazzaferro, et. al., 2017, compararam a resistência ao desgaste por deslizamento linear recíproco entre o metal base, metal de solda e as divisões da zona afetada pelo calor (de grãos grosseiros, refino de grão, intercrítica e subcrítica). Nele, constatou-se maior resistência no metal base do que no metal de solda, e que tanto a dureza quanto a microestrutura tiveram um papel importante na resistência ao desgaste.

Através da comparação de quinze aços de durezas próximas a 400HB, Ojala, et. al., 2013, concluirá que aços de dureza similar apresentam performance diferentes quanto à resistência ao desgaste, divergindo do proposto por Archad, 1953, de que a

taxa de desgaste é inversamente proporcional à dureza do material. Os ensaios foram realizados pelo método pino-sobre-disco, onde os argumentos apresentados foram a microestrutura e a composição química, embora o tamanho das partículas removidas no desgaste (*debris*) resultantes também tenha sido mencionado.

Costa, et. al., 2017, expuseram o quão controversa é a literatura sobre os efeitos dos *debris* sobre o desgaste abrasivo. O estudo foi feito sobre o par tribológico alumínio-aço, onde adicionou-se alumina diluída em água destilada sobre o par. Verificou-se os tamanhos dos *debris* resultantes e seus efeitos sobre o desgaste e coeficiente de atrito. A conclusão obtida foi a de que as partículas de maior tamanho (10 μ m) apresentaram maior redução no coeficiente de atrito, devido à formação de uma tribocamada, fator este que ocasionou em um aumento de massa superficial. As partículas de menor tamanho (0,1 μ m) também reduziram o coeficiente de atrito quando comparadas com a referência, porém de forma menos significativa.

Amorim, 2018, avaliou o desgaste utilizando um ensaio de deslizamento linear recíproco, em um aço Hardox 500 e os metais de solda deste aço soldado com os arames de soldagem AWS ER80S-G e AWS ER120S-G, empregando o processo de soldagem MAG. Constatou-se que os materiais com maior dureza apresentaram uma tendência à formação de terceiro corpo durante o ensaio (*debris*), sendo possível visualizar incrustações de material desgastado na esfera de alumina, gerando a formação de sulcos nas regiões de desgaste, resultando em um aumento do volume removido de material.

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1 PROCESSO MAG

Segundo Machado, 1996, o processo de soldagem MAG se baseia na formação do arco elétrico entre a peça e um eletrodo maciço nu consumível, continuamente alimentado. A poça de fusão é protegida por um gás, ou mistura de gases, podendo ser inerte ou oxidante (“ativo”), e daí provem o fato de, no Brasil, ele ainda ser geralmente denominado “MIG – Metal Inert Gas”, ou “MAG – Metal Active Gas”. Existem vários fatores que explicam a grande flexibilidade e aplicação deste processo, dentre eles estão a facilidade de operação e automatização e o baixo conteúdo de hidrogênio depositado no metal de solda.

Marques, 2011, ressalta que a manutenção do arco elétrico é garantida pela alimentação contínua do arame eletrodo, além da facilidade em se manter o comprimento de arco aproximadamente constante. Outras características destacadas são alta taxa de deposição, alto fator de ocupação do soldador, grande variedade de materiais e espessuras, não exigência de remoção de escória e limpeza aliada a uma menor exigência da habilidade do soldador.

4.2 PROCESSO TIG

O processo TIG (Tungsten Inert Gas), é explicado por Machado, 1996, como sendo um processo composto por um eletrodo não consumível de tungstênio puro ou composto com outros metais ou óxidos, este gerando um arco elétrico com a peça, protegido da atmosfera (juntamente com a poça de fusão) por um gás inerte (geralmente argônio). Isto permite a coalescência dos metais com ou sem a presença de metal de adição.

Marques, 2011, destaca a eficiência contra a contaminação, o que permite a soldagem de materiais de difícil soldabilidade com ótimos resultados. Além disso, o fato de o eletrodo não ser consumível possibilita soldagens sem a adição de metal de enchimento, fator este bastante interessante ao se tratar de soldagem de chapas finas. Devido ao arco elétrico ser bastante estável, as soldas produzidas por TIG costumam

ter boa aparência e acabamento, o que exige pouca ou nenhuma limpeza após a operação, além de, por não haver reação entre o metal-gás e o metal-escória, não gerar muitos fumos e vapores, facilitando a visibilidade do operador.

4.3 DILUIÇÃO

A diluição é definida por Marques, 2011, como a participação relativa do metal base e de adição na zona fundida, ou seja, a composição química final do cordão de solda depende da diluição do metal base no metal de solda, sendo que, cada um possui suas respectivas composições químicas, sendo determinada pela equação 4.3.1.

$$Diluição = \frac{Massa\ fundida\ do\ metal\ base}{Massa\ total\ do\ cordão\ de\ solda} * 100\% \quad (4.3.1)$$

A diluição pode ser determinada a partir de uma macrografia, sendo que 100% representa uma solda sem metal de adição e 0% representa brasagem.

5. METODOLOGIA

5.1 MATERIAS

O Hardox 450 é um aço desenvolvida pela empresa SSAB, bastante utilizado em chapas de sacrifício, carrocerias de caminhões, e outras aplicações relativas principalmente ao setor de mineração. Apresenta boas propriedades mecânicas como dureza entre 425 e 475 HV, resistência à tração entre 1400 e 1600 MPa e resistência ao escoamento de 1250 MPa (SSAB, 2018). A Tabela 5.1.1 apresenta a composição química nominal da liga.

Tabela 5.1.1 – Composição química do aço Hardox 450 (SSAB,2018)

C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	Cr (%)	Ni (%)	Mo (%)	B (%)
0,18	0,25	1,3	0,015	0,004	0,1	0,04	0,003

As chapas de Hardox 450 utilizadas nesse estudo possuíam dimensões de 300 mm x 100 mm x 1mm de espessura.

5.2 SOLDAGEM E SEUS PARÂMETROS

As chapas foram soldadas por um robô MA1400 da Yaskawa Motoman Robotics aliado a uma fonte TransPuls Synergic 4000 R da marca Fronius. Os valores instantâneos de corrente e tensão foram coletados através do Sistema de Aquisição Portátil SAP 4.01 (IMC Soldagem). Realizou-se soldas testes para garantir a efetividade da soldagem e determinação dos parâmetros ideais para produção de juntas isentas de defeitos.

Três das cinco amostras foram processadas por MAG em um trabalho anterior (Sartori, 2017), o qual visava o estudo das distorções em chapas finas nos processos de soldagem. Estas foram feitas com arame AWS ER70S-6 de 0,8 mm de diâmetro e Ar + 2% O₂ como gás de proteção, e a nomenclatura que será utilizada no presente trabalho será baseada nas velocidades de soldagem empregadas, sendo MAG12 para 12mm/s, MAG15 para 15mm/s e MAG20 para 20mm/s. Neste trabalho foram soldadas duas amostras através do processo TIG autógeno, com o gás de proteção Argônio, sendo que as velocidades de soldagem empregadas foram 12mm/s (TIG12) e 20mm/s (TIG20). Os parâmetros de soldagem encontram-se na Tabela 5.2.1. Calculou-se a energia de soldagem através da equação 5.2.1:

$$E = \eta \times \frac{(UI)}{v} \quad (5.2.1)$$

onde E é a energia de soldagem (J/mm), U é a tensão de soldagem em (V), I é a corrente de soldagem (A), v a velocidade de soldagem (mm/s) e η é o rendimento térmico dos processos.

Tabela 5.2.1– Parâmetros de soldagem das amostras

Amostra	MAG12	MAG15	MAG20	TIG12	TIG20
Velocidade de soldagem (mm/s)	12	15	20	12	20
Corrente (A)	90	95	110	130	180
Tensão (V)	16	18	21,4	11	11
Energia de soldagem (J/mm)	102	96,9	100,05	83,42	69,3
Alimentação do arame (m/min)	4,2	4,8	5,1	-	-

5.3 DILUIÇÃO DO METAL DE SOLDA

A partir das metalografias das seções transversais das amostras MAG apresentadas na Figura 5.3.1, foi possível calcular a diluição do metal de solda. Para isso, utilizou-se o software ImageJ para determinar as áreas total de metal fundido, as áreas superior e inferior do reforço do cordão de solda, além de altura e largura. A maior diluição foi encontrada na MAG20, seguido pela MAG15, os valores obtidos estão apresentados na Tabela 5.3.1.

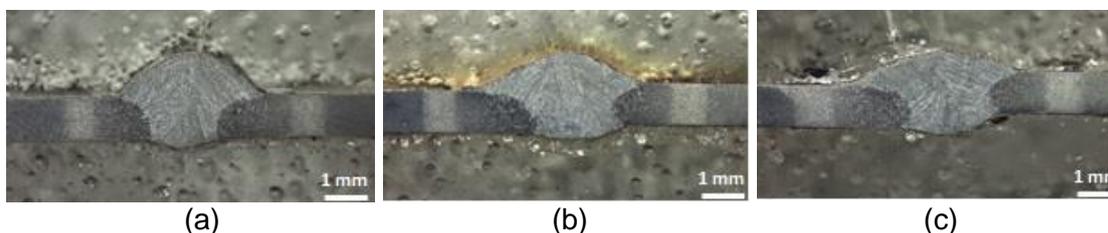


Figura 5.3.1 – Macrografias: (a) MAG12, (b) MAG15 e (c) MAG20.

Tabela 5.3.1 – Diluição das amostras MAG.

Amostra	MAG12	MAG15	MAG20
Diluição	44,60%	52,10%	57,80%

5.4 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA PARA OS ENSAIOS DE DESGASTE

Retirou-se uma amostra de 50 mm x 50 mm de cada chapa soldada além de uma amostra do metal base para execução dos ensaios de desgaste, que também foi realizado em uma amostra do metal base. Nas juntas soldadas, procurou-se selecionar os locais onde o cordão de solda estivesse mais linear e as chapas planas, para facilitar as etapas posteriores de preparação das amostras para os ensaios de desgaste, e o próprio ensaio de desgaste. Os cortes foram feitos com discos abrasivos e refrigerados com fluido para evitar o aquecimento das amostras. Cada uma das amostras passou

por uma sequência de oito lixas, de granulometria inicial de 80 e final de 1500, e posteriormente polimento com alumina $0,05\mu\text{m}$. Como última ação desta etapa, atacou-se as amostras com Nital 10% para facilitar a visualização das regiões do cordão de solda.

5.5 ENSAIO DE DESGASTE

O ensaio de desgaste por deslizamento linear recíproco foi efetuado em um microtribômetro fabricado pela empresa TTP - Indústria Mecânica Ltda, Figura 5.5.1(a). Neste sistema, o movimento linear é realizado pela mesa onde a amostra plana é fixada e a carga é aplicada sobre a esfera, que permanece estática. Os parâmetros utilizados nos ensaios encontram-se descritos na Tabela 5.5.1. Foram realizados três ensaios no cordão de solda de cada amostra soldada, todos no sentido longitudinal a ele (Figura 5.5.1(b)), assim como no metal base, e os ensaios foram efetuados sem adição de lubrificante, ou seja, a seco.

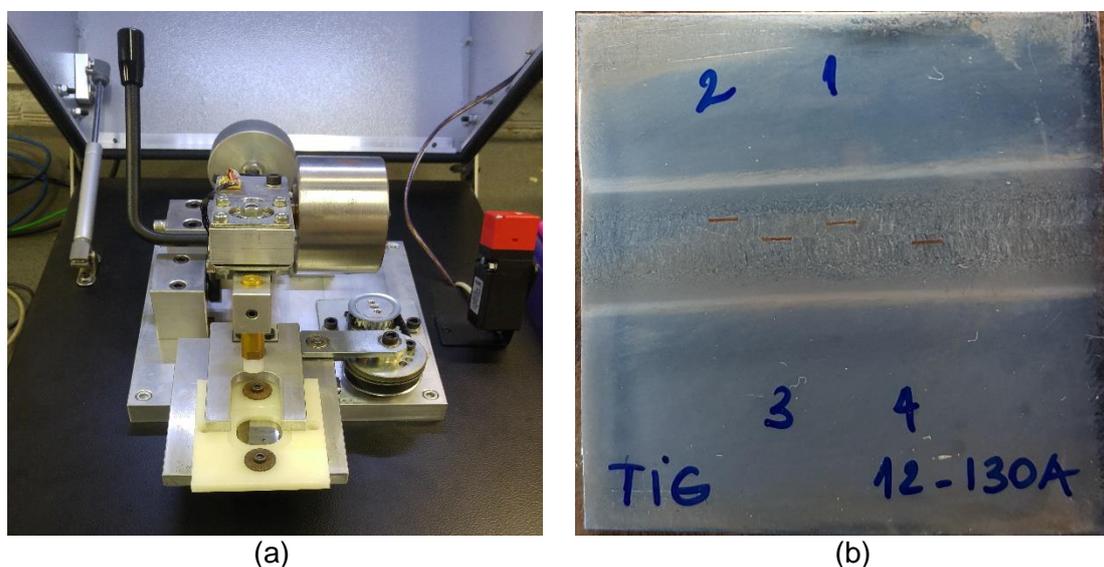


Figura 5.5.1– (a) Microtribômetro utilizado nos ensaios de desgaste por deslizamento e (b) amostra TIG12 após ensaios.

Tabela 5.5.1– Parâmetros utilizados nos ensaios de desgaste.

Frequência	1 Hz
Força normal aplicada	10N
Tempo de Ensaio	2h
Tamanho da trilha	2mm
Material da esfera	Alumina - Al_2O_3
Diâmetro da esfera	4,762mm

Através dos dados coletados pela célula de carga presente no equipamento, foi possível determinar o coeficiente de atrito médio no ensaio, de acordo com sua variação ao longo do tempo, como exemplificado na Figura 5.5.2. Após cada ensaio, foram feitas imagens tanto das trilhas de desgaste quanto das esferas. Vale ressaltar que a esfera foi rotacionada ou substituída entre os ensaios, obtendo assim uma nova área para o contato entre a esfera e a amostra.

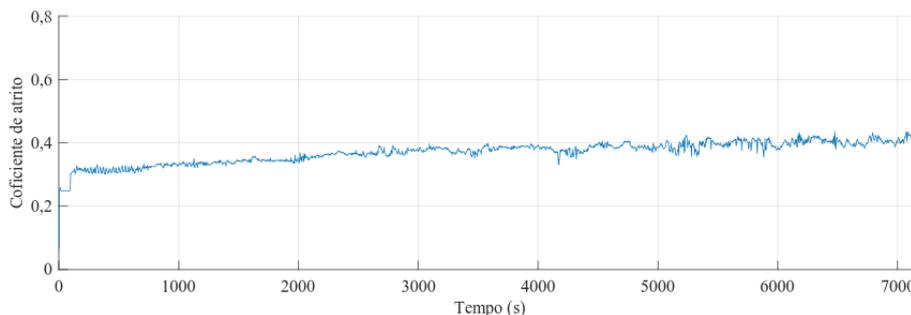


Figura 5.5.2 – Gráfico do coeficiente de atrito obtido durante o ensaio 1 da amostra TIG12.

5.6 QUANTIFICAÇÃO DO DESGASTE

Segundo a norma ASTM G133, dependendo do par tribológico utilizado, o desgaste pode ocorrer apenas na esfera, quando o material da amostra plana é muito mais resistente que o material da esfera, somente na amostra plana, quando o material da esfera é muito mais resistente, ou em ambos. No presente estudo, tanto a esfera quanto as amostras apresentaram desgaste.

Para o cálculo do volume desgastado nas regiões de desgaste, ou seja, nas trilhas das amostras, utilizou-se um Interferômetro Bruker - Contour GT, que gera perfis topográficos das áreas ensaiadas. Assim, traçou-se três linhas em regiões livres de desgaste para determinar uma linha de referência, Figura 5.6.1(a) e (b). Fica caracterizado como desgaste a região abaixo da linha de referência, Figura 5.6.1(c). Após, foram traçadas dez linhas igualmente espaçadas transversalmente ao sentido da trilha, para determinar a área desgastada em cada plano formado pelas linhas, Figura 5.6.1(c), negligenciando as extremidades das trilhas por nelas ocorrer erros geométricos associados aos pontos de inversão de sentido do movimento. Assim, calculando a média da área transversal desgastada e sabendo que a trilha tem 2mm de comprimento, pode-se calcular o volume através da equação 5.6.1:

$$V_d = A_t \times L \quad (5.6.1)$$

onde V_d é o volume desgastado em mm^3 , A_t a área transversal abaixo da linha de referência (mm^2) e L o comprimento da trilha (2mm).

Vale mencionar que, devido à limitação da faixa de captação do interferômetro ser de aproximadamente 1,2mm, para cada trilha era necessário gerar duas imagens, uma de cada lado da trilha, como mostrado (um lado da trilha) na Figura 5.6.1(a).

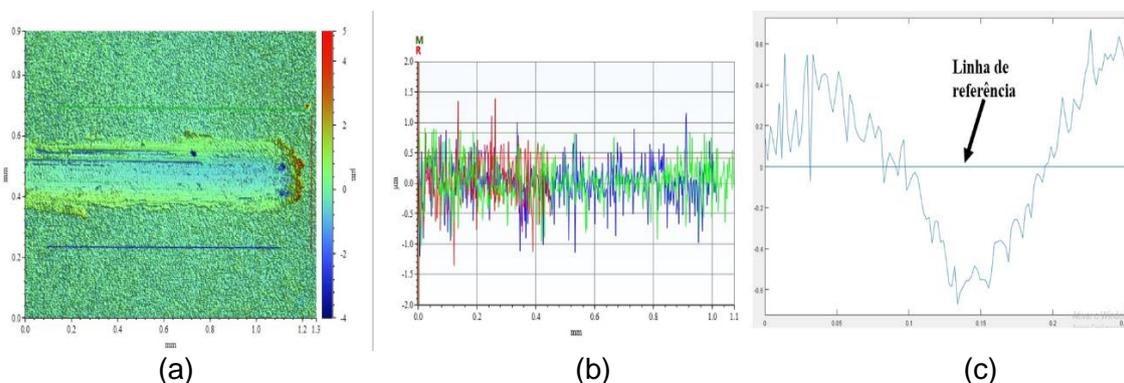


Figura 5.6.1 – Cálculo do desgaste: (a) Linhas para determinação da referência do plano; (b) Variações do perfil topográfico presentes na amostra; c) Perfil da área com a linha de referência.

Para a determinação do volume desgastado na esfera, após cada ensaio foram feitas imagens das marcas deixadas nas esferas com o auxílio de um microscópio óptico. Após, fazendo-se uso do programa ImageJ (programa editor de imagens) a região desgastada da esfera foi aproximada por círculos Figura 5.6.2(a). Foram feitas cinco medições, e o valor médio foi tomado como o representativo da área desgastada. Calculou-se a altura do material removido (h) em função do diâmetro efetivo da marca (D), pela equação 5.6.2:

$$h = R - \left[R^2 - \left(\frac{D^2}{4} \right) \right]^{1/2} \quad (5.6.2)$$

onde R é o raio inicial da esfera, e assim como as demais unidades está em mm.

O volume de material removido da esfera é aproximado por uma calota esférica, e seguindo a norma ASTM G133-5, 2016, pode ser determinado pela equação 5.6.3:

$$V_e = \left(\frac{\pi h}{6} \right) \times \left(\frac{3D^2}{4+h^2} \right) \quad (5.6.3)$$

onde V_e é o volume desgastado da esfera (mm^3).

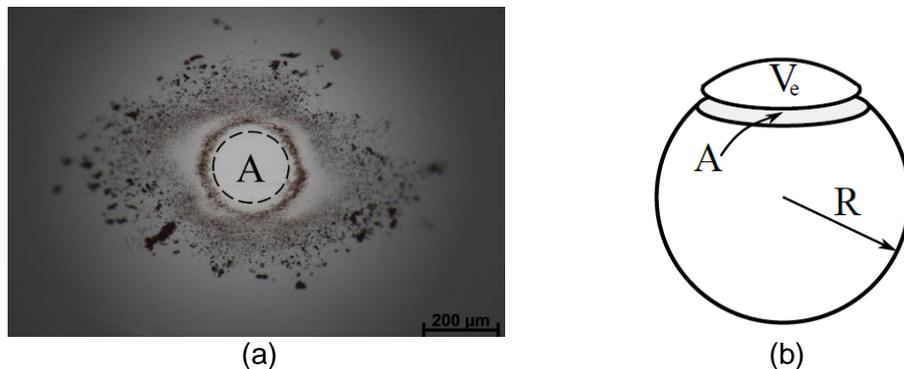


Figura 5.6.2 – (a) Imagem da esfera desgastada do terceiro teste no metal base, com a aproximação da área desgastada por um círculo, (b) Volume de material removido da esfera (V_e) representado por uma calota esférica, onde A é a área da base da calota e R o raio da esfera [Giarollo et. al., 2017].

5.7 MEDIÇÃO DAS DUREZAS

Os ensaios de microdureza foram realizados na amostra de metal base e nas cinco amostras de junta soldada, nos seus metais de solda, com um microdurômetro Insize. As cargas aplicadas foram de 300 gramas, com um tempo de permanência de 10 segundos.

6.RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 RESISTÊNCIA AO DESGASTE

Verificou-se através do gráfico da Figura 6.1.1 que o metal base juntamente com os metais de solda das juntas soldadas pelo processo TIG apresentam maior volume desgastado na esfera do que na trilha. No processo MAG, observou-se uma tendência crescente do volume desgastado na trilha da MAG12 para a MAG20, sendo que o resultado da condição MAG20 apresentou um grande desvio devido à amostra do ensaio 1 exibir sulcos profundos em uma das laterais da trilha (Figura 6.2.1 (a) e (b)). Esses sulcos foram causados por *debris* que ficaram presos entre a superfície da

amostra e a esfera, potencializando a remoção de material da trilha. Já na Figura 6.2.1 (c) e (d), observa-se o terceiro ensaio da MAG20 onde não foi constatado a presença de sulcos profundos. Esse fato também foi observado no trabalho de Amorim, 2018.

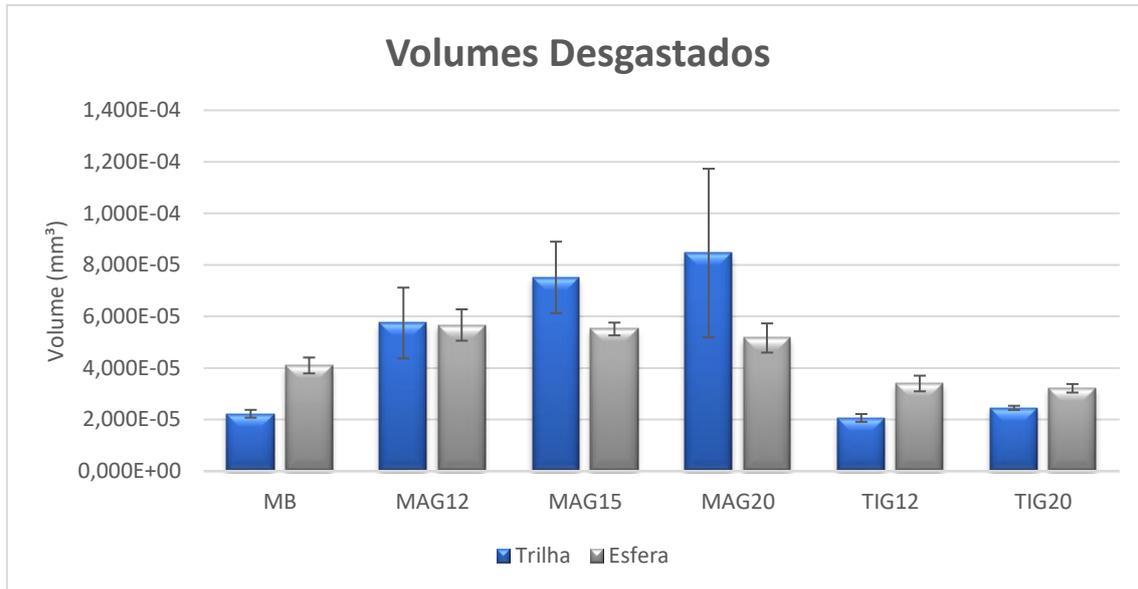


Figura 6.1.1 – Comparativo dos volumes desgastados das trilhas e das esferas, para cada condição estudada.

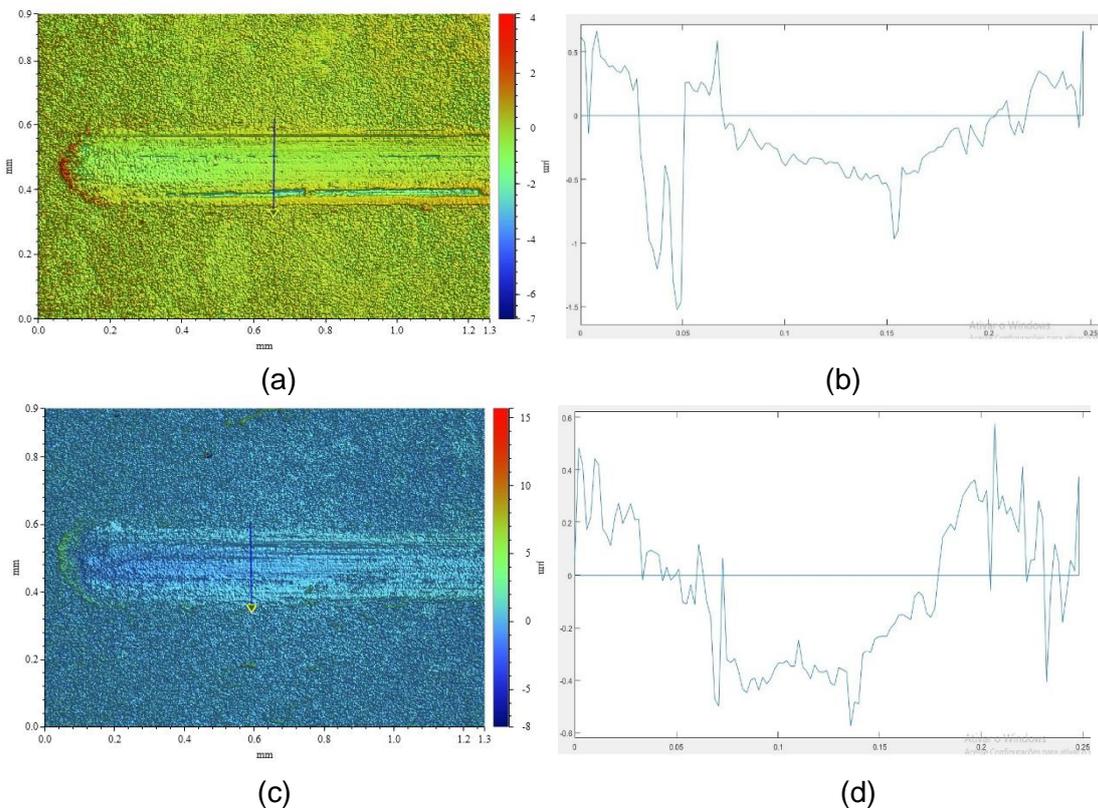


Figura 6.1.2 – Comparativo entre as topografias e seção de desgaste da amostra MAG20 do ensaio 1 (a e b) e ensaio 3 (c e d).

Ainda relativo ao desgaste, constatou-se que nas amostras de metal base, TIG12 e TIG20 houveram algumas seções com aumento de volume, mostradas na Figura 6.1.3. Este fato foi relatado também no trabalho de Costa, et. al., 2017. Segundo Stachowiak et. al., 2000, a presença de desníveis e forças compressivas acabam fixando as partículas oriundas do desgaste dos materiais na região de contato.

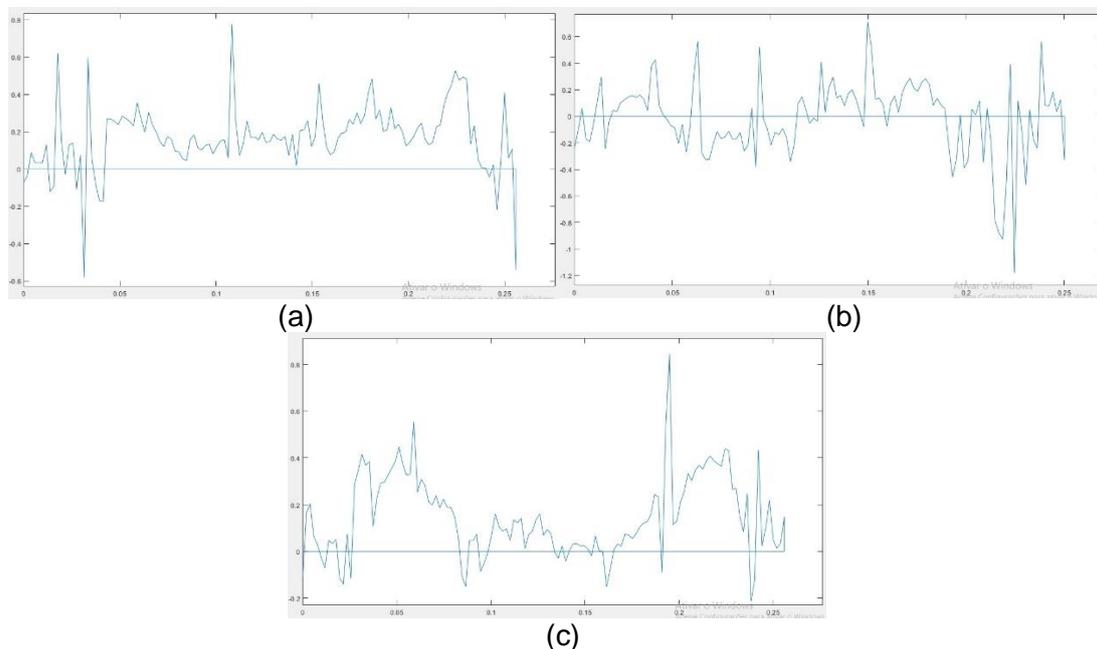


Figura 6.1.3 – Presença de material acima da linha de referência: (a) MB, (b) TIG12 e (c) TIG20

Os metais de solda das amostras MAG apresentaram maior deformação plástica quando comparados com as TIG e MB, o que é exemplificado através do comparativo das topografias em 3D de uma peça da MAG12 com uma da TIG12 representados na Figura 6.1.4. Este fato pode ser o motivo de as esferas que tiveram contato com os materiais de dureza mais elevada (MB, TIG12 e TIG20) apresentarem um formato de desgaste mais circular (Figura 6.1.5 (a), (b) e (c)). Já as relativas aos ensaios com MAG (menor dureza) a área de desgaste teve formas mais elípticas (Figura 6.1.5 (d), (e) e (f)). Além disso, na Figura 6.1.5 (b) pode-se visualizar *debris* incrustados na esfera do terceiro ensaio com a TIG12, destacado pelo círculo em preto.

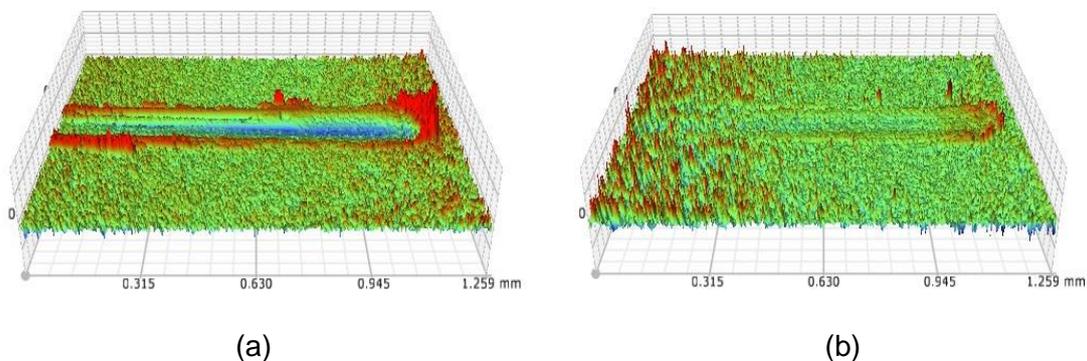


Figura 6.1.4 – Perfis topográficos das amostras: (a) MAG12, (b) TIG12. Nota-se a maior deformação plástica na primeira amostra.

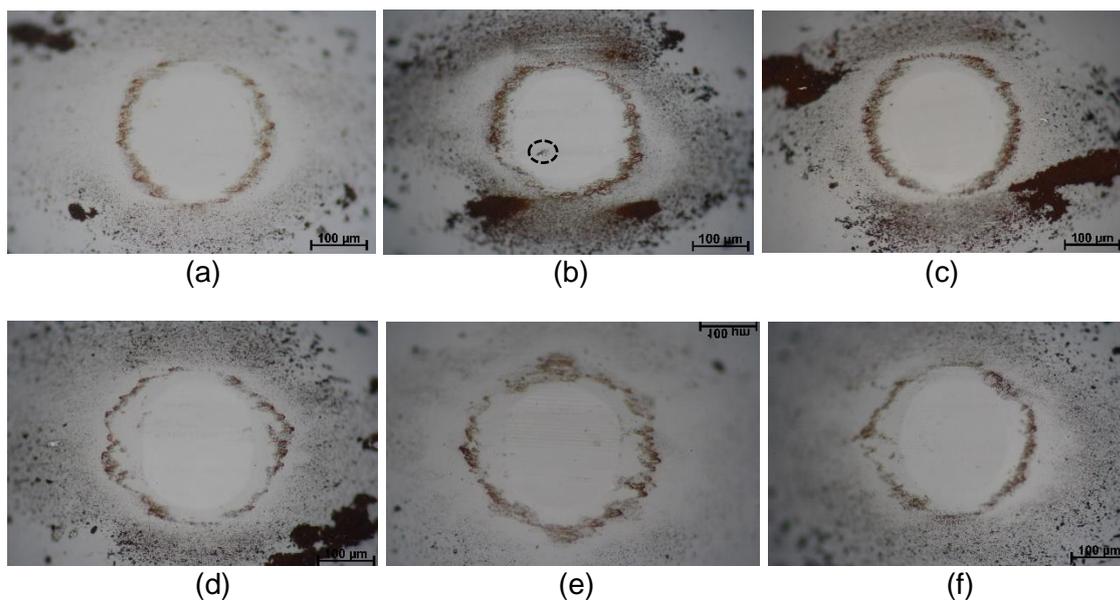


Figura 6.1.5 – Imagens das esferas com aumento de 200 vezes: (a) MB, (b) TIG12 com *debris* incrustados, (c) TIG20, (d) MAG12, (e) MAG15 e (f) MAG20

6.2 VALORES DE DUREZA E ATRITO MÉDIO

Os resultados de durezas do metal base e dos metais de solda produzidos a partir do processo TIG autógeno foram bastante parecidos, com valores ao redor de 470HV. Nas soldas MAG, a MAG12 foi a que apresentou menor dureza, enquanto que o maior valor foi apresentado pela MAG20, conforme mostrado no gráfico da Figura 6.5.1. As porcentagens de diluição foram de 57,8% para a MAG20, 52,1% para a MAG15, e a MAG12 apresentou 44,6% de diluição. Sendo assim, notou-se a relação direta entre diluição e dureza (quanto maior a diluição, ou seja, quanto maior a participação do metal base no metal de solda, maior é a dureza), pois o metal base possui uma diferente composição química e maior resistência mecânica do que o metal de adição.

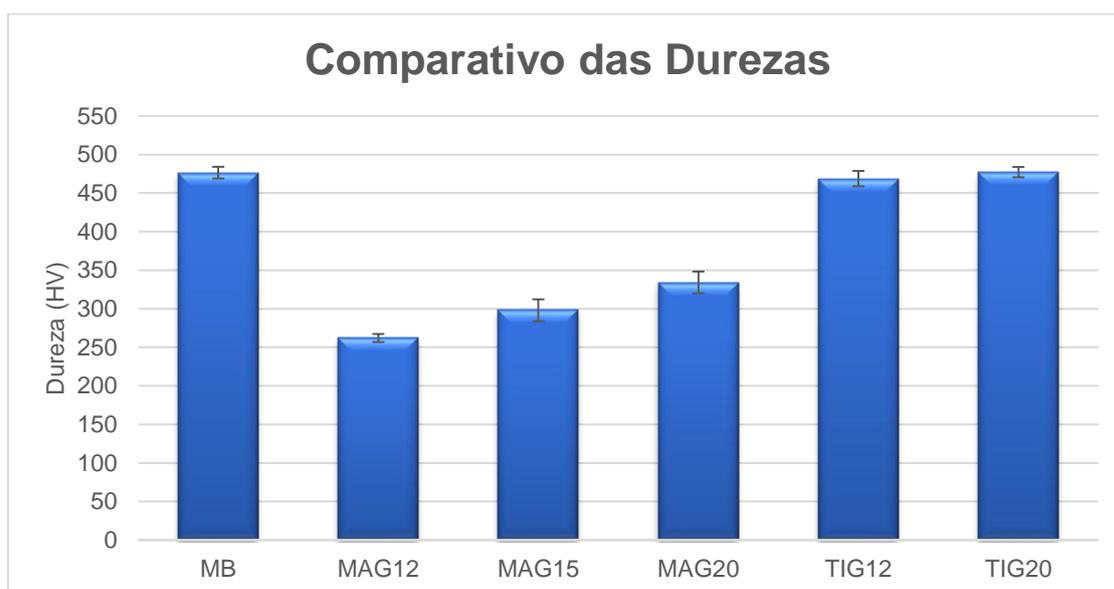


Figura 6.5.1 –Valores de durezas médios (HV) de todas as condições ensaiadas.

Constatou-se uma tendência entre dureza e coeficiente de atrito médio, sendo que os materiais mais duros apresentaram menores coeficientes de atrito, fato este constatado também por Amorim, 2018, e que pode ser atribuído à maior área de contato entre a esfera e o material na região do desgaste, devido à maior deformação plástica nos metais de solda de menor dureza. Observa-se no gráfico presente na Figura 6.5.2 que os menores valores dos coeficientes de atrito médio foram apresentados pelo metal base e pelas amostras TIG12 e TIG20 (sendo eles 0,38, 0,36 e 0,37, respectivamente), estes apresentando as maiores durezas (476,5, 469 e 477HV, nesta ordem).

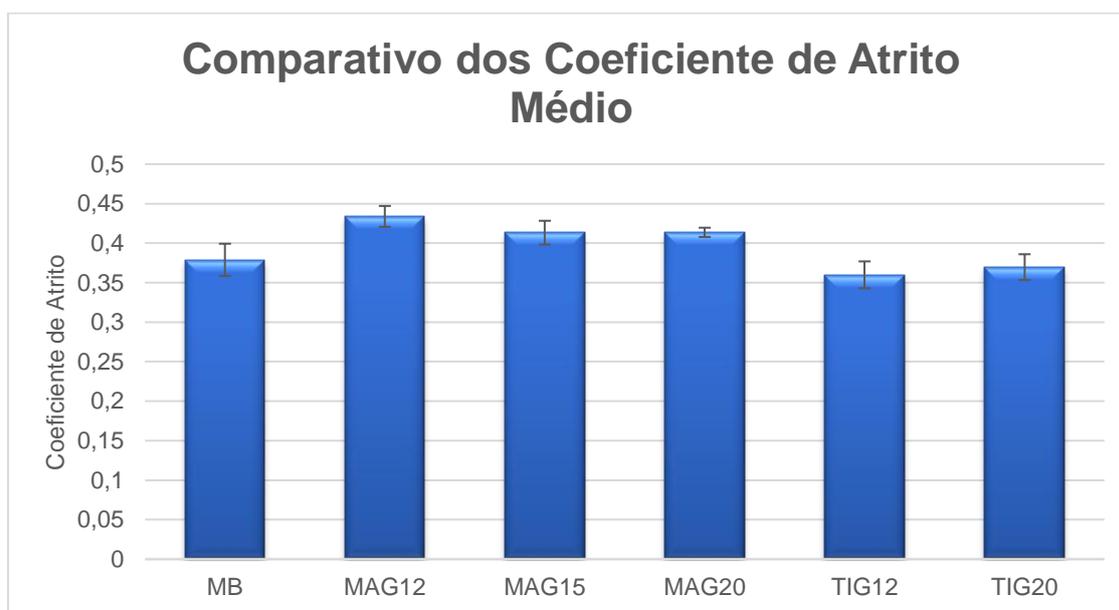


Figura 6.5.2 – Valores dos coeficientes de atrito médio, para cada condição estudada.

7.CONCLUSÕES

Os resultados do presente trabalho mostram que:

- Considerando-se os desvios, o metal base, TIG12 e TIG20 apresentaram os melhores desempenhos na resistência ao desgaste, apresentando os menores volumes desgastados. A diferença do menor volume desgastado médio, TIG12, para o maior, TIG20, foi de 18,8%.
- Já entre os corpos de prova soldados pelo processo MAG a diferença foi maior. O menor volume médio desgastado foi do MAG12, seguido pelo MAG15 (30,4% maior) e pelo MAG20 (47,1% maior). A diferença entre o menor volume desgastado (TIG12) e o maior (MAG20) foi de 308,7%.
- Os *debris* tiveram influência no desgaste, apresentando comportamentos diferentes. Em alguns casos, exemplificado pela amostra MAG20 ensaio 1 principalmente, estes ficaram presos entre o par tribológico gerando sulcos profundos e acelerando o desgaste. Já em outros casos, houve deposição dos *debris* (estes de menor tamanho) nas ondulações presentes nas amostras, levando a um aumento de volume de material na trilha.
- Nas esferas de alumina constatou-se que quando desgastadas contra materiais de dureza mais elevada (MB, TIG12 e TIG20), a superfície de desgaste tinha a forma mais circular, enquanto nas esferas relacionadas aos ensaios com as amostras MAG o formato foi mais elíptico.

- As amostras MAG apresentaram maior deformação plástica em relação as TIG e ao MB.
- Embora os materiais de maior dureza tenham apresentado os menores desgastes (MB, TIG12 e TIG20), na comparação entre as amostras MAG verifica-se que a MAG12 foi a que apresentou ao mesmo tempo a menor dureza (262HV) e o menor desgaste, e a MAG20 de maior dureza (334HV) também teve o maior desgaste, evidenciando que não se pode estabelecer sempre uma relação direta entre dureza e resistência ao desgaste.
- Nas amostras MAG constatou-se relação direta entre a diluição e a dureza, sendo na MAG20 57,8% e 334HV, MAG15 52,1% e 298HV e a MAG12 44,6% e 262HV.
- Os menores coeficientes de atrito médio foram obtidos nos ensaios com TIG20, MB e TIG12 respectivamente, embora os valores sejam bastante próximos (diferença de 5,5% entre o menor e o maior). Nas MAG os valores para as amostras MAG20 e MAG15 foram praticamente iguais, apenas foi notada a maior dispersão na mencionada por último. Pode-se notar uma relação inversa entre dureza e atrito médio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Amorim, F. R. **Avaliação do microdesgaste a dois corpos em juntas soldadas de um aço resistente ao desgaste**. 2017. 18 páginas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

Archard, J. F., “**Contact and rubbing of flat surfaces**”, Journal of Applied Physics, vol. 24, pp. 981–988, 1953

ASTM., “**G133-05: Standard Test Method for Linearly Reciprocating Ball-on-Flat Sliding Wear**”, 9 p., 2016.

Costa, H.L, Oliveira, M.M., de Mello, J.D.B. “**Effect of debris size on the reciprocating sliding wear of aluminium**”, Wear, Volumes 376–377, Part B, Pages 1399-1410, 2017.

Giarollo, D. F., Rigatto, M. V., Mazzaferro, C. P., Mazzaferro, J. E., “**Estudo do Desgaste Abrasivo a Dois e a Três Corpos de um Aço Estrutural: Comparação do Comportamento do Metal de Solda com o Metal Base**”, XLIII CONSOLDA – Congresso Nacional de Soldagem, Joinville, 11 p., 2017.

Machado, I. G.; “**Soldagem e Técnicas Conexas: Processos**”, Imprensa Livre, 1ª edição, pp. 14-16, 1996.

Marques, P.V., Modenesi, P.J., Bracarense, A.Q.; “**Soldagem: fundamentos e tecnologia**”, Editora UFMG, 3ª edição, pp.205 -235, 2011.

Mazzaferro, C. P., Giarollo, D. F., Medeiros, L. C., Froener, R. S., Mazzaferro, J. E., “**Efeito da Microestrutura na Dureza e na Resistência ao Desgaste de um Aço de Alta Resistência Soldado pelo Processo MAG**”, XLIII CONSOLDA – Congresso Nacional de Soldagem, Joinville, 10 p., 2017.

Ojala, N., Valtonen, K., Kallio, M., Aaltonen, J., Siitonen, P., Kuokkala, V. **“Abrasion wear performance of quenched wear resistant steels”**, World Tribology Congress, Torino, Italy, 2013.

Sartori, D. **Análise das distorções resultantes do processo de soldagem MAG em chapas finas de HARDOX 450**. 2017. 13 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

SSAB; **“Data sheet 168br Hardox® 450 2018-02-12”**, <http://www.ssab.com>. Acessado em 15/04/2018.

Stachowiak, G., Batchelor, A. **Engineering Tribology**. Publisher Butterworth-Heinemann, USA, 2nd edition, pp. 471-472, 2000.