

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

METODOLOGIA PARA MEDIÇÃO DE DESGASTE DE JUNTAS SOLDADAS

por

Amália Mayrhofer

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 Engenharia Mecânica.

Porto Alegre, dezembro de 2016

METODOLOGIA PARA MEDIÇÃO DE DESGASTE DE JUNTAS SOLDADAS

por

Amália Mayrhofer

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

Prof. Dr. Alcy Rodolfo dos Santos Carrara
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. Dr. Ney Francisco Ferreira

Comissão de Avaliação:

Prof. Patric Daniel Neis

Prof. Heraldo José de Amorim

Prof. Cintia Cristiane Petry Mazzaferro

Porto Alegre, 2 de dezembro de 2016.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, por todo apoio e estímulo que recebi até aqui;

Ao meu namorado Fábio, por toda ajuda, paciência e incentivo;

Ao meu professor orientador Dr. Ney Francisco Ferreira, pela paciência, disponibilidade e conselhos fornecidos durante o desenvolvimento deste trabalho;

Ao William Hackenhaar, que auxiliou na soldagem dos discos;

À equipe do LATRIB, que ajudou na realização dos ensaios, particularmente ao Kássio F. Gomes que me auxiliou na obtenção das micrografias, e ao Jean Poletto, pela ajuda com os dados em Matlab;

À equipe do LdSM, por disponibilizar o scanner para digitalização, em especial ao João R. M. Pereira pelos seus ensinamentos.

MAYRHOFER, A. **Metodologia para medição de desgaste de juntas soldadas**. 2016. 27 páginas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

RESUMO

O desgaste em juntas soldadas é um assunto pouco abordado na literatura, especialmente quanto à análise das diferentes regiões ao longo do cordão de solda. Tendo isso em vista, este trabalho objetiva desenvolver uma metodologia para medir o desgaste na direção longitudinal à solda. Três discos de aço 1020 com 6 mm de espessura, foram soldados circunferencialmente com diferentes energias de soldagem, através do processo MAG. O ensaio pino sobre disco foi utilizado seguindo a norma ASTM G99 e uma esfera de Nitreto de Silício com 7,94 mm de diâmetro foi usada como pino, percorrendo trilhas de diferentes raios e que permitiram atritar diferentes regiões da solda. O desgaste da esfera foi medido através de microscopia ótica e contagem de pixels, com ajuda do Adobe Photoshop, enquanto que o desgaste nos discos foi avaliado por meio da digitalização tridimensional a laser. Durante o desenvolvimento da metodologia, algumas modificações foram necessárias, como alteração do suporte da esfera e do número de parafusos de fixação do disco. Além disso, os resultados do trabalho recomendam a utilização de discos com maior espessura, esferas com diâmetro maior e aprimoramentos no sistema de atuação do tribômetro para melhor controle de forças compatíveis com o ensaio (forças até 100 N).

PALAVRAS-CHAVE: Metodologia, Desgaste, Junta soldada, Pino sobre disco.

MAYRHOFER, A. **Methodology for measuring wear of welded joints**. 2016. 27 páginas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

ABSTRACT

Wear on welded joints is a subject rarely discussed in the literature, especially regarding the analysis of the different regions along the weld bead. Thus, this work aims to develop a methodology to measure wear in the longitudinal direction to the weld. Three 1020 steel discs with 6 mm thickness were welded circumferentially with different welding energies through the MAG process. The pin-on-disk test was used following the ASTM G99 standard and a 7.94 mm diameter silicon nitride ball was used as a pin, traversing tracks of different radii and allowing different regions of the weld to be rubbed. The wear of the sphere was measured by optical microscopy and pixel count with the help of Adobe Photoshop, while wear on the discs was evaluated by three-dimensional laser scanning. During the development of the methodology, some modifications were required, such as changing the sample holder and the number of disc fastening screws. In addition, the results of the work recommend the use of thicker discs, larger diameter spheres and improvements in the tribometer actuation system for better control of forces compatible with the test (forces up to 100 N).

KEYWORDS: Methodology, Wear, Welded joint, Pin-on-disk.

ÍNDICE	Pág.
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVO	1
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
3.1 Processos de soldagem	2
3.2 Soldagem MAG	2
3.3 Medição de desgaste através do ensaio pino sobre disco.....	3
3.4 Mecanismos de desgaste.....	3
3.5 Medição de desgaste em juntas soldadas	4
4. METODOLOGIA.....	6
4.1 Discos.....	6
4.2 Pinos.....	7
4.3 Ensaio pino sobre disco	7
4.4 Medição do desgaste	8
4.4.1 Esfera.....	8
4.4.2 Discos.....	9
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	10
5.1 Desgaste	11
5.2 Coeficiente de atrito e força	12
5.3 Deformação nos discos	13
6. CONCLUSÕES.....	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	15
ANEXO A – INCERTEZAS.....	16
APÊNDICE A – GRÁFICOS DE FORÇA E COEFICIENTE DE ATRITO.....	17
APÊNDICE B – MICROGRAFIAS	19
APÊNDICE C – TABELAS DE CÁLCULO	20

1. INTRODUÇÃO

A soldagem é um processo de união, muito utilizada nos metais e suas ligas devido à sua versatilidade e ótimas propriedades mecânicas proporcionadas. Além disso, a produtividade dos processos de soldagem é, na maioria dos casos, maior do que técnicas alternativas tais como parafusos ou rebites. Também pode ser usada para revestir materiais, formando uma proteção contra corrosão, atrito, e outros tipos de desgaste. Juntas podem ser definidas como as partes da peça sobre a qual será realizada a soldagem [Machado, 1996; Lancaster, 1980]. A junta soldada é dividida basicamente em três zonas, metal de base (MB), metal de solda (MS) e zona afetada pelo calor (ZAC). A ZAC é a região na qual a temperatura atingida não é alta o suficiente para causar a fusão do material, mas sim para causar mudanças significativas na microestrutura e propriedades do metal de base [Kou, 2003]. A influência da dureza sobre o comportamento do desgaste é divergente, microestruturas de dureza elevada podem ter alta taxa de desgaste [Wang, et al., 1999], do mesmo modo que podem levar a taxas de desgaste menores [Kato, 2000].

O coeficiente de atrito apresenta comportamento dinâmico e histerético, tendo uma forte dependência do seu histórico precedente [Ostermeyer, 2003]. Partículas originadas pelo desgaste podem se aglutinar na zona de contato entre as superfícies atritadas, alterando o coeficiente de atrito e, conseqüentemente, o desgaste do material. Além disso, materiais podem se comportar de maneira diferente quando submetidos a situações de desgaste distintas. Há vários mecanismos de desgaste, e cada um deles é sensível a inúmeros parâmetros, mas não obrigatoriamente da mesma maneira, por isso a necessidade de uma grande variedade de testes. O desgaste tem sua natureza complexa, sendo uma propriedade do sistema tribológico e não uma propriedade dos materiais [Bayer, 2004].

O estudo do desgaste em juntas soldadas é de suma importância, uma vez que a soldagem é amplamente utilizada na manutenção de componentes mecânicos, recuperando trincas ou fraturas de maneira rápida, o que possibilita um aumento da vida útil das peças e reduz o tempo de interrupção das máquinas e equipamentos [Weber, et al., 2008]. O estudo do desgaste nas juntas soldadas permite conhecer melhor o seu comportamento, tanto nas diferentes microestruturas da ZAC, quanto no metal de base e metal de solda. Correlacionar a microestrutura com o desgaste é relevante, já que ela depende dos parâmetros de soldagem, que podem ser ajustados de acordo com a microestrutura desejada, podendo reduzir as regiões de maior desgaste.

Muitos estudos analisam juntas soldadas tendo em vista suas propriedades mecânicas, isto é feito através de ensaios de tração, cisalhamento, fadiga, dureza [Sharma, et al., 2014; Sartori, 2010; Müller, 2010; Rosendo, 2009]. Porém, poucos pesquisadores examinam o desgaste. Krishnan et al., 2006, realizou um estudo para avaliar o desgaste nas diferentes regiões de juntas soldadas por fusão, inclusive nas sub-regiões da ZAC. Neste trabalho, as amostras foram coletadas em seções transversais à solda, e os autores verificaram uma diferença de comportamento do desgaste das diferentes zonas em função do histórico do ensaio, evidenciando a necessidade de cuidados para uma análise mais precisa das diferentes regiões. Uma alternativa é a realização de ensaios para avaliar o desgaste longitudinal à solda, característica não encontrada em trabalhos acadêmicos.

2. OBJETIVO

O principal objetivo deste trabalho é desenvolver uma metodologia para medir longitudinalmente o desgaste de juntas soldadas, avaliando-o nas diferentes regiões do cordão de solda.

Objetivos específicos:

- Avaliar a viabilidade da utilização de amostras (corpos de prova) fabricadas a partir de chapa de aço 1020 com 6 mm de espessura e soldadas por processo MAG (Metal Active Gas), utilizando diferentes velocidades e energias de soldagem;
- Preparação dos corpos de prova, com a planificação da superfície dos discos soldados através do processo de retificação. Lixamento da superfície e ataque

químico para obter, respectivamente, rugosidade adequada para os ensaios e visualização delimitada das regiões do metal de solda e da zona afetada pelo calor;

- Definição dos parâmetros de ensaio: força aplicada pelo pino sobre o disco, velocidade e distância percorrida pelo disco;
- Realização dos ensaios pino sobre disco com auxílio do tribômetro do Laboratório de Tribologia (LATRIB) utilizando como pino uma esfera de Nitreto de Silício de 7,94 mm de diâmetro;
- Avaliação do volume desgastado nos discos utilizando scanner laser e do pino através de microscopia ótica.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são explicados alguns tópicos importantes referentes a este estudo, bem como trabalhos similares que embasaram a metodologia.

3.1 Processos de soldagem

A soldagem é um processo que visa a união de materiais de forma permanente. É classificada basicamente em dois grandes grupos: a soldagem em fase sólida e a soldagem por fusão. A soldagem em fase sólida, segundo Modenesi et al., 2012, consiste na aplicação de pressões elevadas entre uma ferramenta e a junta a ser soldada, de maneira que as superfícies metálicas se deformem plasticamente, permitindo a aproximação atômica – em geral as peças são aquecidas localmente para facilitar a sua deformação. A soldagem por fricção com mistura (Friction Stir Welding, FSW) é um exemplo, no qual o aquecimento e a deformação da superfície se dá através de uma ferramenta especial que é forçada, em rotação, contra as peças, conforme Figura 3.1(a).

A soldagem por fusão, segundo os autores, consiste na aplicação de calor tanto na região de união para que ela seja fundida, quanto no metal de adição – quando este for utilizado – o que produz a ligação pela solidificação do metal fundido. A soldagem ao arco elétrico com gás de proteção (GMAW – Gas Metal Arc Welding), esquematizada na Figura 3.1(b), exemplifica esse processo em que, de acordo com Machado, 1996, é estabelecido um arco elétrico entre a peça e um consumível na forma de arame. Tal processo também é conhecido como soldagem MIG/MAG (MIG – Metal Inert Gas e MAG – Metal Active Gas), no qual o arame é fundido continuamente pelo arco elétrico e o metal de solda é protegido da atmosfera pelo fluxo de um gás – ou mistura de gases – inerte ou ativo.

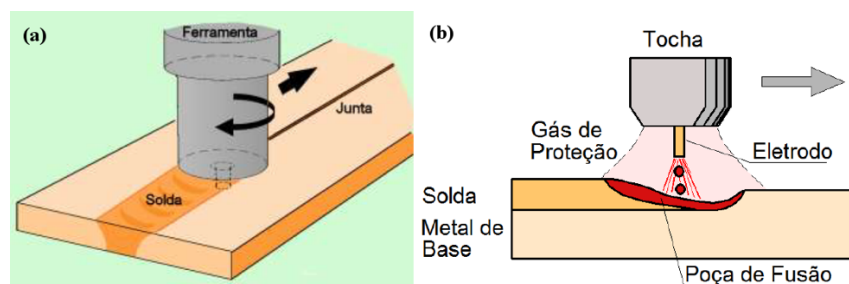


Figura 3.1 – Processos de soldagem: (a) Soldagem por fricção com mistura (FSW), (b) soldagem GMAW. (Adaptado de Modenesi et al., 2012).

3.2 Soldagem MAG

Os parâmetros de soldagem têm forte influência sobre as propriedades mecânicas da junta soldada e geometria do cordão. A tensão da fonte, por exemplo, é o principal parâmetro para regular a largura do cordão. A intensidade de corrente influencia a taxa de deposição, modo de transferência, penetração e reforço. A velocidade de soldagem, que é a velocidade com que a tocha se desloca, também tem influência na geometria da poça de fusão. Um aumento da

velocidade, mantendo os outros parâmetros fixos, leva a uma menor distorção da estrutura, ZAC mais estreita, diminuição das dimensões gerais do cordão e maior refino dos grãos do metal de solda [Machado, 1996]. Portanto, uma velocidade menor resultará numa maior ZAC, uma vez que teremos uma taxa de entrada de calor maior. Kou, 2003, estudou o crescimento de grão da ZAC, Figura 3.2. Quanto mais perto do limite da zona fundida, ponto 1 da Figura 3.2(a), (b) e (c), maior se torna a temperatura de pico na região, maior o tamanho de grão e menor a dureza. Assim, o tamanho de grão aumenta à medida que o limite da zona fundida se aproxima, indicado pelas setas na Figura 3.2(d).

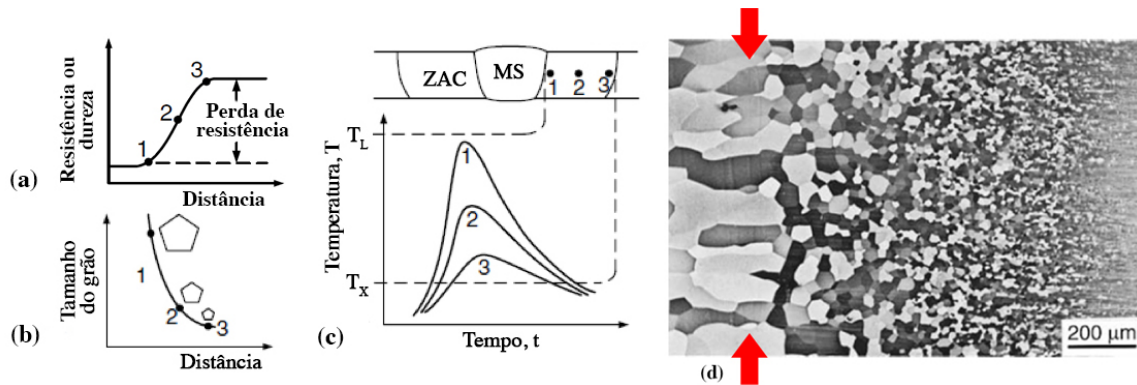


Figura 3.2 – Crescimento de grão na ZAC: (a) variação da dureza, (b) variação do tamanho de grão, (c) ciclo térmico (d) crescimento de grão na solda por feixe de elétrons de molibdênio, setas indicam o limite da zona fundida. (Adaptado de Kou, 2003).

3.3 Medição de desgaste através do ensaio pino sobre disco

O ensaio pino sobre disco segue a norma ASTM G99 – 2004, e consiste no posicionamento de um pino perpendicularmente a um disco circular plano. Tanto o pino quanto o disco podem girar, e em ambos os casos o caminho de deslizamento se dá sobre um círculo na superfície do disco. O pino é pressionado contra o disco com uma força especificada e o resultado do desgaste é medido através do volume perdido, tanto para o pino, quanto para o disco. A quantidade de desgaste é determinada por uma medição apropriada das dimensões lineares (altura) de ambas amostras, antes e após o teste, ou através do peso de ambas. Caso sejam usadas dimensões lineares de desgaste, como por exemplo, medida da variação da altura do pino por sensor linear de posição (LVDT), essas devem ser convertidas para desgaste volumétrico. A perda de massa também deve ser convertida para volume através da densidade da amostra. Os resultados do teste de desgaste normalmente são obtidos para uma distância de deslizamento, velocidade e força selecionadas. Diferentes distâncias de deslizamento podem ter relação não linear com desgaste volumétrico devido à transição entre regiões com diferentes mecanismos de desgaste, por exemplo.

A norma cita algumas maneiras de medir o desgaste. Entretanto, Neis et al., 2014, estudou e comparou três métodos diferentes para medição em materiais de frenagem por fricção – método gravimétrico/balança eletrônica, método de medição linear com apalpador e scanner laser tridimensional – e concluiu que a digitalização tridimensional mede o desgaste de maneira mais precisa. Segundo Silva, 2006, por meio de modelos digitalizados, dados de objetos em 3D e detalhes superficiais podem ser obtidos com grande precisão. A digitalização fornece um conjunto de coordenadas de pontos – chamada nuvem de pontos – que permite, com ajuda de softwares, gerar malhas, superfícies e sólidos através do qual medidas de desgaste podem ser obtidas.

3.4 Mecanismos de desgaste

Segundo Both, 2011, existem basicamente quatro tipos de desgaste: abrasivo, erosivo, adesivo e fadiga. O desgaste abrasivo se dá pela movimentação de partículas duras forçadas contra uma superfície, o que origina ranhuras direcionadas. O desgaste erosivo é causado por impactos repetidos de pequenas partículas sólidas. Desgaste adesivo ocorre quando há transferência de material de uma superfície para outra por soldagem no estado sólido, devido ao

movimento relativo entre elas. Desgaste por fadiga é causado por esforços cíclicos que dão origem a trincas na superfície ou abaixo dela, levando ao desprendimento de partículas e à fratura.

O desgaste também pode ser dividido entre suave e severo. De acordo com Fernandes et al., 2013, a transição do desgaste suave para severo é controlada pelo rompimento do filme de fricção, que ocorre normalmente com o aumento da força normal aplicada e da velocidade de deslizamento. A uniformidade e a espessura do filme diminuem com a severidade das condições do ensaio. No desgaste suave, o filme de fricção é homogêneo e mais espesso do que no desgaste severo. Segundo os autores, o filme de fricção pode atuar como lubrificante sólido, reduzindo a taxa de desgaste.

3.5 Medição de desgaste em juntas soldadas

Foram encontrados quatro trabalhos relacionados ao tema desgaste de juntas soldadas, cujos resumos são apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Resumo dos trabalhos relacionados.

Autores	Parte desgastada	Tipo de solda	Objetivo do trabalho	Resultados obtidos
Krishnan et al., 2006	Pino	MAG	Análise do desgaste no MB, MS e diferentes regiões da ZAC	<ul style="list-style-type: none"> • Maior desgaste no MS quando comparado ao MB • Pinos compostos de apenas uma região específica da ZAC tiveram desgaste diferente dos pinos com todas as suas regiões
García et al., 2008	Disco	TIG	Análise do desgaste no MB, MS e ZAC de três maneiras: <ul style="list-style-type: none"> • Com tratamento térmico final (TTF) e com a solda feita após pré-aquecimento do MB • Sem TTF e com o pré-aquecimento • Sem TTF e sem pré-aquecimento 	Maior desgaste na terceira análise, e menor desgaste na primeira
Mata et al., 2016	Disco	FSW	Análise do desgaste no MB e na solda, variando os seguintes parâmetros de soldagem: velocidade de rotação da ferramenta de fricção e força axial	Menor desgaste no MB em comparação à região soldada, para a qual o desgaste aumentava com os parâmetros de soldagem
Palanivel et al., 2012	Pino	FSW	Análise do desgaste na solda - realizada com ferramentas de diferentes geometrias - variando os seguintes parâmetros de soldagem: velocidade de rotação da ferramenta de fricção e força axial	Desgaste aumentou junto com os parâmetros de soldagem até atingir um limite, a partir do qual começou a decrescer. A ferramenta classificada como quadrado reto resultou numa solda mais resistente ao desgaste

Os trabalhos realizados por Mata et al., 2016 e Palanivel et al., 2012, analisaram o desgaste da solda no estado sólido, cuja ZAC é extremamente reduzida [Machado, 1996], o que não permitiu uma análise detalhada das suas diferentes regiões. O trabalho de García et al., 2008, apesar de analisar o desgaste no MB, MS e ZAC, não fez uma distinção entre as sub-regiões da ZAC, analisando-a apenas como um todo.

Na pesquisa realizada por Krishnan et al., 2006, o desgaste da junta soldada foi examinado mais detalhadamente. O processo MAG foi utilizado para realizar as soldas cujo MB era um aço de baixo carbono. Empregou-se o ensaio pino sobre disco, com velocidade de 1 m/s, distância de deslizamento de 1500 m e força aplicada entre 19 e 79 N. Os pinos – de seção retangular – foram coletados transversalmente à solda, conforme Figura 3.3, permitindo avaliar as regiões da ZAC, bem como MB e MS.

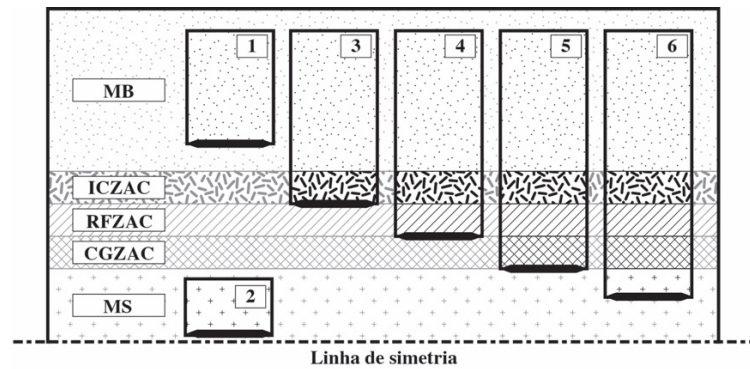


Figura 3.3 – Desenho esquemático dos pinos retangulares.

De acordo com a Figura 3.3, a região inferior dos pinos – destacada na cor preta – representa a face ensaiada. Os pinos 1 e 2 foram retirados apenas de uma região, metal de base (MB) e metal de solda (MS) respectivamente. Os pinos 3, 4 e 5 apresentavam, nessa ordem, apenas umas das três regiões da ZAC sendo atritada contra o disco: região intercrítica (ICZAC), região de refino de grão (RFZAC) e região de crescimento de grão (CGZAC). No pino 6 foi realizado um ensaio mais longo. Começando no MS, o ensaio progrediu atritando todas as regiões da ZAC, até chegar no MB.

A área das seções transversais dos pinos foi mantida constante, de maneira que a pressão de contato fosse a mesma. O autor utilizou o coeficiente de resistência ao desgaste (CRD) como parâmetro para diferenciar o comportamento do desgaste das diferentes regiões, expresso em $N\mu\text{m}/\mu\text{mm}^3$ e dado por:

$$CRD = \frac{FF \times S}{V} \quad (3.1)$$

$$S = (2 \times \pi \times r t) \times (N \times t / 60) \quad (3.2)$$

$$V = \pi \times r^2 \times h \quad (3.3)$$

Sendo:

- FF - força de fricção [N]
- S - distância de deslizamento [m]
- V - volume perdido [mm^3]
- rt - raio da trilha de desgaste [m]
- N - número de rotações por minuto [rpm]
- t - tempo [s]
- r - raio do pino [mm]
- h - perda de altura do pino [mm]

Os autores realizaram um ensaio de microdureza Vickers com uma carga de 0,3 kg aplicada durante 10 s (HV 0.3) e verificou-se que a região de maior dureza foi a CGZAC, de acordo com a Figura 3.4(a). Segundo o autor, isso é devido à sua proximidade com a linha de fusão. Observa-se uma discordância com o estudo de Kou, 2003, cuja pesquisa revela uma diminuição de dureza da ZAC conforme o limite de fusão se aproxima, como mostra a Figura 3.2(a), citada anteriormente. Além disso, o ensaio apontou maior dureza para o MS quando comparado ao MB. Apesar disso, o MS apresentou um desgaste maior, como mostrado na Figura 3.5(b).

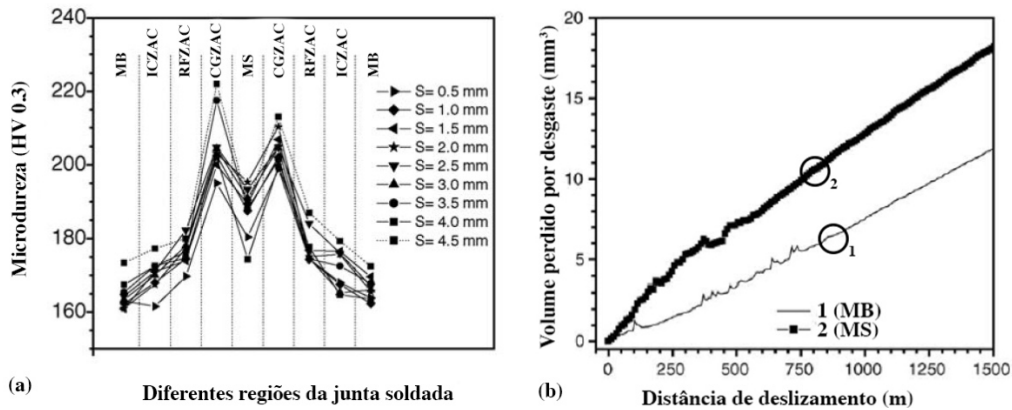


Figura 3.4 – Análise: (a) microdureza das diferentes regiões da junta soldada, onde S representa a distância ao longo da espessura da junta soldada, (b) volume desgastado para os pinos 1 e 2. (Adaptado de Krishnan et al., 2006).

A Figura 3.5(a) apresenta o CRD do pino 6, desde o MS até o MB. Percebe-se pouca diferença entre o coeficiente produzido nas diferentes regiões da ZAC, diferentemente do resultado obtido pelos pinos que iniciavam o ensaio nestas mesmas regiões – pinos 1, 3, 4 e 5 – conforme mostra a Figura 3.5(b). Nota-se, por exemplo, que CRD para a região CGZAC – pino 5 – foi em média $2,32 \text{ N}\mu\text{m}/\mu\text{mm}^3$, enquanto que no pino 6, a mesma região apresentou um coeficiente maior, em torno de $3,5 \text{ N}\mu\text{m}/\mu\text{mm}^3$.

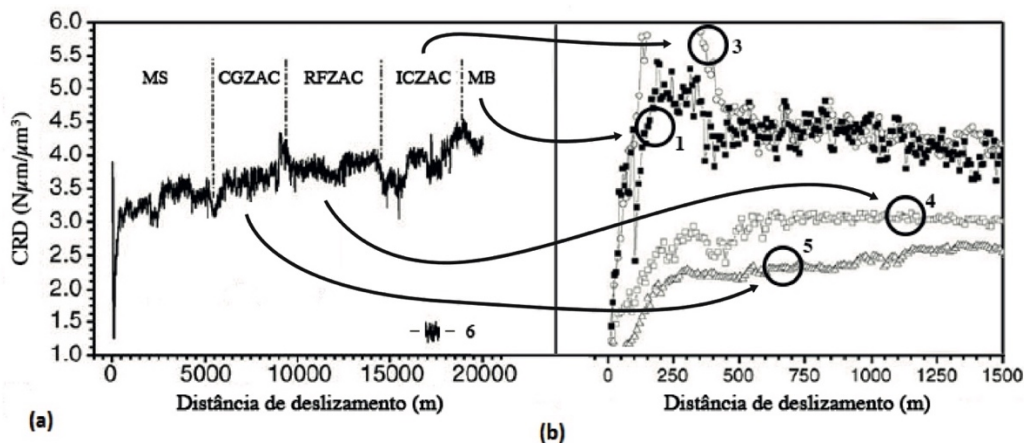


Figura 3.5 – (a) Coeficiente de resistência ao desgaste para o ensaio do pino 6, (b) coeficiente de resistência ao desgaste para os ensaios com pinos 1, 3, 4 e 5. (Adaptado de Krishnan et al., 2006).

4. METODOLOGIA

4.1 Discos

Foram utilizados três discos de aço 1020, com 160 mm de diâmetro e 6 mm de espessura. Os discos foram soldados circunferencialmente, em um raio de 45 mm, através do processo MAG por um robô Yaskawa Motoman Robotics MA1400. Após a soldagem, as superfícies dos discos foram retificadas, resultando em uma espessura final de aproximadamente 5,6 mm.

A eficiência do processo MAG, razão entre a quantidade de calor realmente transferida para a peça e o total gerado pelo arco, é de 0,8. Os parâmetros de soldagem são apresentados na Tabela 4.1. O gás de proteção utilizado foi o C25 (25% CO_2 e 75% Ar), com uma vazão de 15 L/min, e a transferência do metal foi realizada por curto-circuito. Utilizou-se o eletrodo ER70S-6, cuja composição química é apresentada na Tabela 4.2, com diâmetro de 1,2 mm, e sua distância até a peça se manteve em 15 mm.

Tabela 4.1 – Parâmetros de soldagem.

Solda	W [m/min]	U [V]	V [mm/s]	E [J/mm]	I [A]
Disco 1	5	23	8	460	200
Disco 2	5	23	6	613	200
Disco 3	5	23	3	1226	200

Tabela 4.2 – Composição química do eletrodo ER70S-6. (Adaptado de Fortes, 2005).

C	Si	Mn	P	S
Carbono	Silício	Manganês	Fósforo	Enxofre
0,06 a 0,15	0,8 a 1,15	1,4 a 1,85	0,025 máx.	0,035 máx.

Os parâmetros W (velocidade de alimentação do arame), U (tensão) e I (corrente) foram mantidos constantes durante o processo. A E (energia de soldagem), que controla a entrada de calor por unidade de comprimento de solda, variou com a V (velocidade de soldagem), permitindo alterar o tamanho do cordão de solda. Na Figura 4.1 podem ser observados os cordões de solda dos discos antes de serem usinados e retificados.

Antes dos ensaios, os discos foram lixados com lixa de granulometria 1500 e atacados com Nital 10% (90% álcool etílico e 10% ácido nítrico) permitindo a visualização e a delimitação das regiões do metal de solda e zona afetada pelo calor. O ataque formou uma fina camada de oxidação, que foi eliminada antes dos ensaios através da lixa de granulometria 600.

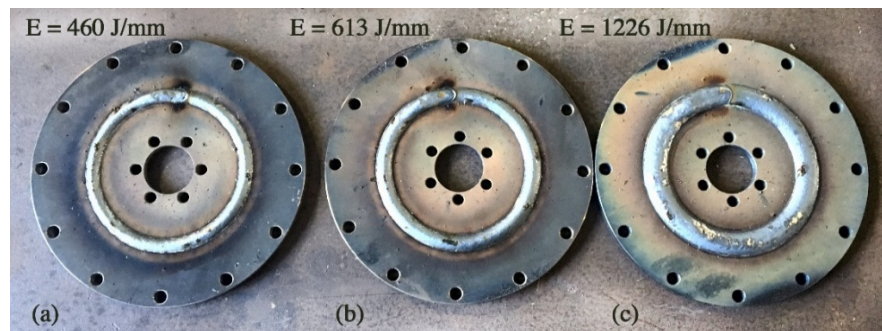


Figura 4.1– Discos soldados antes de serem usinados: (a) disco 1, (b) disco 2 e (c) disco 3, evidenciando um aumento progressivo no tamanho do cordão de solda do primeiro ao último.

4.2 Pinos

Uma esfera de Nitreto de Silício (Si_3N_4) com 7,94 mm de diâmetro e dureza de 85 HRc foi utilizada. A esfera foi fixada através de um suporte parafusado ao carro atuador do tribômetro. A Figura 4.2(a) mostra o suporte em vista explodida e (b) o suporte montado com a esfera fixada.

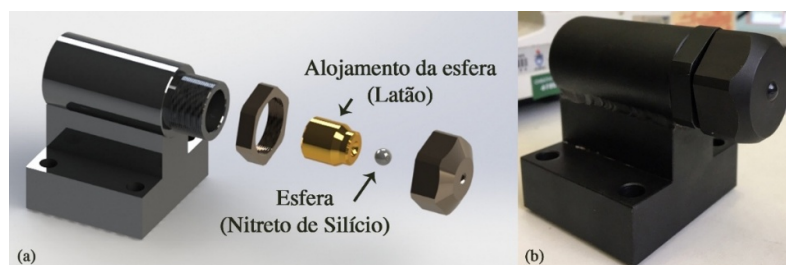


Figura 4.2 – Suporte usado na fixação da esfera (a) em vista explodida e (b) montado com a esfera fixada.

4.3 Ensaio pino sobre disco

Utilizou-se o tribômetro desenvolvido por Neis, 2012, representado na Figura 4.3. Através de um atuador pneumático, acoplado ao suporte do pino, uma força normal é aplicada e medida através de uma célula de carga. No eixo que liga o motor ao disco, é utilizado um transdutor para

medir o torque frenante resultante do contato do pino contra o disco. Os dados obtidos são tratados em Matlab, que utiliza a Equação 4.1 para calcular o coeficiente de atrito. As incertezas de medição do equipamento encontram-se no Anexo A.

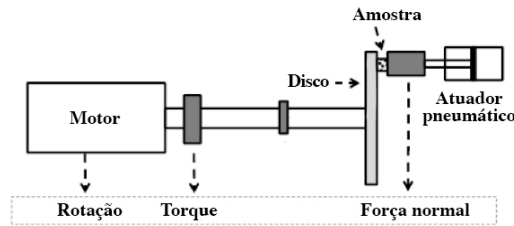


Figura 4.3 – Representação esquemática do tribômetro utilizado. (Adaptado de Neis et al., 2014).

$$\mu = \frac{T}{F \times R} \quad (4.1)$$

Onde μ é o coeficiente de atrito (adimensional), T é o torque medido pelo transdutor (N.m), F é a força normal medida pela célula de carga (N) e R é o raio de aplicação da força (m).

Os ensaios tribológicos foram realizados respeitando a norma ASTM G99-04 de pino sobre disco. Primeiramente, um ensaio teste foi feito para ajustar força, velocidade e distância que garantissem uma trilha de desgaste adequada para análise, isto é, de volume mensurável. Os parâmetros força de 100 N, velocidade tangencial de 0,75 m/s e distância de 600 m se mostraram apropriados e, portanto, foram utilizados nos ensaios subsequentes. Os ensaios foram realizados de acordo com a Tabela 4.3. Em cada um dos três discos, atritou-se a esfera em cinco raios diferentes, possibilitando a formação de trilhas em diferentes regiões da junta soldada. A rotação do motor foi ajustada de acordo com o raio da trilha, assegurando a mesma velocidade tangencial em todos os ensaios. A configuração do ensaio foi alterada durante o desenvolvimento da metodologia e será explicada adiante, nos resultados do trabalho.

Tabela 4.3 – Parâmetros de ensaio.

Disco	Trilha	Velocidade [m/s]	Distância [m]	Força [N]	Raio [mm]	Rotação [rpm]	Duração do ensaio [s]	Configuração do ensaio	
								Quantidade de parafusos para fixação do disco	Suporte da esfera
1	1	0,75	600	100	35	205	800	6	Latão
	2				39	184			
	3				43	167			
	4				47	153			
	5				50	144			
2	1				35	205			
	2				39	184			
	3				43	167			
	4				47	153			
	5				50	144			
3	1				35	205			
	2				39	184			
	3				43	167			
	4				47	153			
	5				50	144			
								12	Aço

4.4 Medição do desgaste

4.4.1 Esfera

Após a realização de cada uma das trilhas, a marca de desgaste da esfera foi fotografada utilizando um microscópio Zeiss, modelo Axio Lab.A1 e aumento de 50x. Uma vez que a

geometria desgastada da esfera foi aproximada para uma calota esférica, as micrografias foram utilizadas na determinação da área da base da calota, e encontram-se no Apêndice B.

A norma ASTM G99-04 fornece a Equação 4.2 para calcular o volume perdido por desgaste no pino.

$$V_{pino} = \frac{\pi \cdot W_{pino}^4}{64 \cdot R} \quad (4.2)$$

Sendo:

- V_{pino} - volume de material perdido por desgaste [mm³]
- W_{pino} - diâmetro da marca deixada na esfera [mm]
- R - raio da esfera [mm]

A incerteza da Equação 4.2 é de 1% se $\frac{W_{pino}}{R} < 0,3$, e de 5% se $\frac{W_{pino}}{R} < 0,7$, e encontra-se no Apêndice C. Para calcular o volume perdido no pino, obteve-se primeiro a área da marca de desgaste deixada na esfera. Esta área foi calculada através da contagem de pixels – Figura 4.4(a) –, com ajuda do software Adobe Photoshop. Tendo o número de pixels, este foi multiplicado pela área de cada pixel, obtida da câmera acoplada ao microscópio ($7,67 \times 10^{-7} \text{ mm}^2$), totalizando a área do desgaste (A). Como a marca não era perfeitamente circular, foi aproximada para um círculo de mesma área, conforme Figura 4.4(b). Através da área do círculo, calculou-se o diâmetro da marca deixada na esfera, W_{pino} , utilizando a Equação 4.3, permitindo o cálculo do volume desgastado no pino, Figura 4.4(c). A tabela com todos valores obtidos encontra-se no Apêndice C.

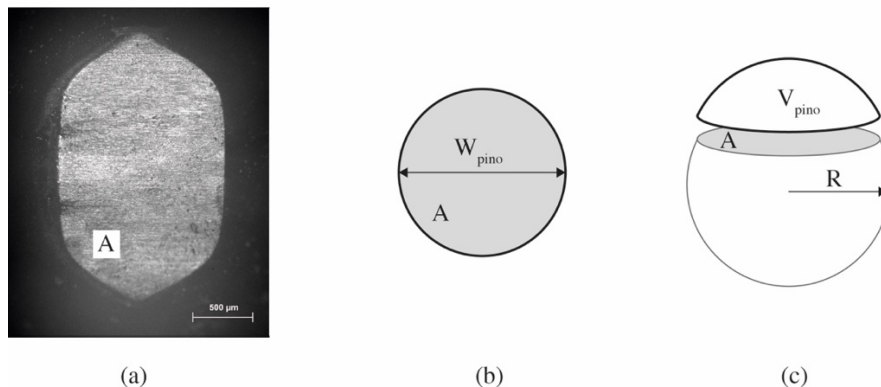


Figura 4.4 – (a) Contagem de pixels e determinação da área desgastada, (b) aproximação da marca para um círculo de mesma área e determinação de W_{pino} , (c) cálculo do V_{pino} .

$$W_{pino} = \sqrt{\frac{4 \times A}{\pi}} \quad (4.3)$$

4.4.2 Discos

Para medir o volume desgastado nos discos utilizou-se a digitalização tridimensional a laser. O equipamento utilizado é da marca Tecnodrill, modelo Digimil 3D, e possui um cabeçote emissor de laser pontual modelo ConoProbe 1000, da marca Optimet. As características da lente utilizada encontram-se no Anexo A. O modelo é um equipamento CNC que pode trabalhar como fresadora ou scanner tridimensional a laser; Silva, 2006, detalha o seu funcionamento. O scanner 3D se desloca nos eixos X e Y através do CNC, ao mesmo tempo em que o laser mede a altura no eixo Z. A digitalização gera um arquivo texto com os pontos da superfície nas coordenadas (X, Y, Z), isto é, uma nuvem de pontos.

Os dados obtidos foram tratados no software Geomagic Qualify 2013, que permite transformar a nuvem de pontos em uma superfície. O passo a passo descrito a seguir está esquematizado na Figura 4.5 e foi aplicado para cada uma das trilhas, em três regiões distintas de cada disco (a) – defasadas em 120° aproximadamente – permitindo obter, posteriormente, uma média do volume desgastado em cada trilha. Após gerar a superfície no programa (b), um plano de referência foi criado – para cada uma das trilhas – a partir de uma região plana em torno da trilha (c). A seguir, isolou-se a trilha desejada (d) e (e) e calculou-se o volume abaixo do plano

de referência (f), ou seja, entre a superfície e o plano gerado, obtendo, dessa maneira, o volume desgastado naquela parcela da trilha, V_p (mm^3). O software também permite medir a distância entre dois pontos (g), essa ferramenta foi utilizada para medir a distância entre as extremidades da trilha, que corresponde a corda da circunferência, C (mm). Tendo esse comprimento, e conhecendo o raio da trilha, R (mm), é possível obter o ângulo formado pelas extremidades da corda e com origem no centro da circunferência, θ , através da Equação 4.4.

$$\theta = \arccos\left(-\frac{C^2}{2 \times R^2} + 1\right) \quad (4.4)$$

Com o volume desgastado parcial de cada trilha e o ângulo correspondente, obtém-se o volume total, V_t (mm^3), através da Equação 4.5. A tabela com todos valores obtidos encontra-se no Apêndice C.

$$V_t = \frac{360 \times V_p}{\theta} \quad (4.5)$$

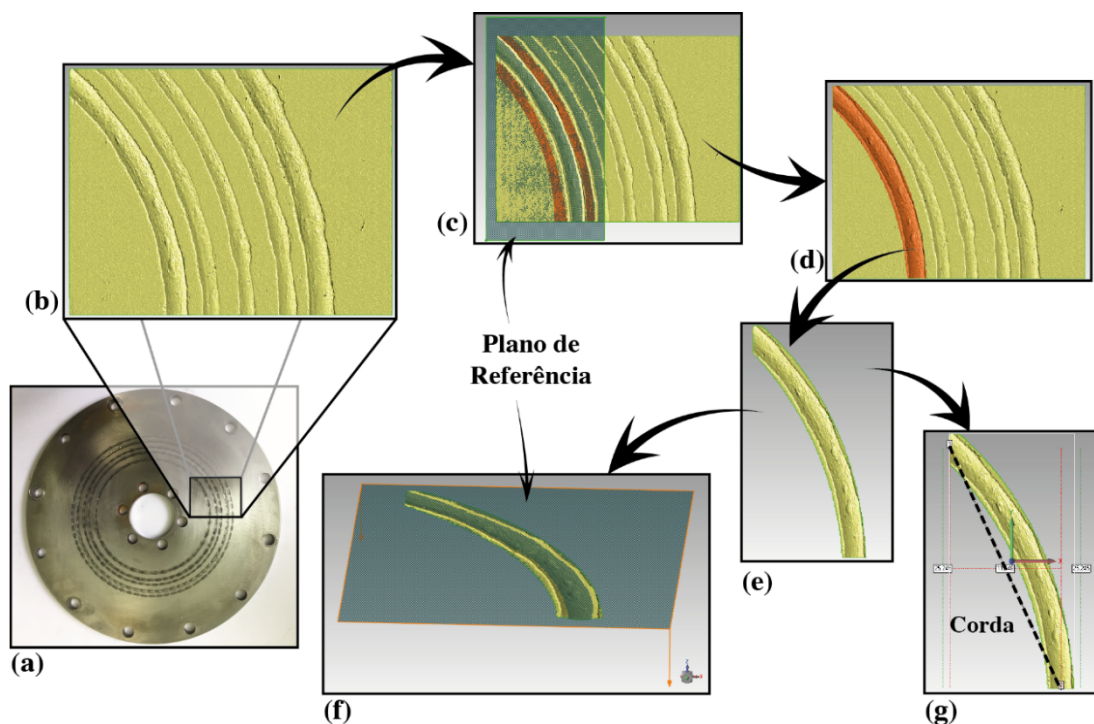


Figura 4.5 – Esquema do passo a passo utilizado para calcular o volume desgastado nos discos.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os ensaios iniciaram com o disco 1 sendo fixado ao tribômetro apenas por 6 parafusos. No entanto, as trilhas resultantes apresentaram desgaste irregular, conforme Figura 5.1(a), provavelmente causadas pela vibração decorrente do desalinhamento do disco. A utilização de 6 parafusos se mostrou pouco conveniente. Desta maneira, para o restante dos ensaios, disco 2 e 3, utilizou-se 12 parafusos, o que gerou trilhas mais uniformes, como mostra a Figura 5.1(b) e (c). Além disso, a espessura do disco de 6 mm se mostrou insuficiente, o que possivelmente causou a sua deformação elástica conforme aplicação da força, contribuindo para o seu desalinhamento. Sugere-se, portanto, aumentar a espessura dos discos para 12 mm em estudos posteriores. A Figura 5.2(a) mostra a configuração inicial do ensaio, com apenas 6 parafusos, e em (b) a fixação por 12 parafusos.

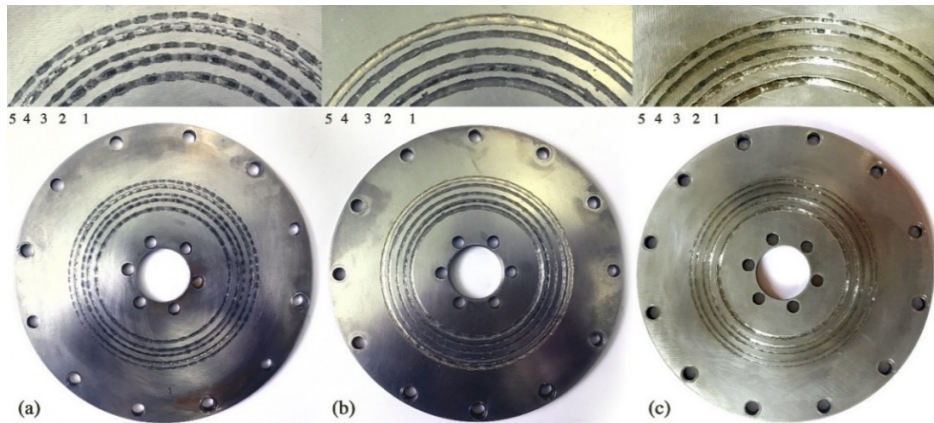


Figura 5.1 – (a) Trilhas no disco 1, fixado por 6 parafusos, (b) trilhas no disco 2 e (c) trilhas no disco 3, fixados por 12 parafusos.

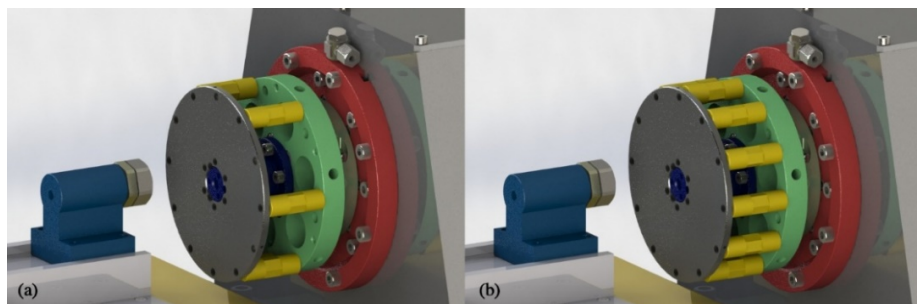


Figura 5.2 – Discos fixados ao tribômetro por (a) 6 parafusos e (b) 12 parafusos.

Durante os ensaios dos discos 1 e 2 utilizou-se a mesma esfera, rotacionando-a após cada trilha, de maneira que uma superfície ainda não desgastada fosse atritada no ensaio seguinte. Na trilha 5 do disco 2 a esfera perdeu aderência contra o suporte de latão e girou dentro do alojamento, conforme mostra a Figura 5.3(a). A Figura 5.3(b) mostra a esfera desgastada posicionada junto ao suporte de latão, bem como a esfera sem desgaste.

Trocou-se a esfera por uma nova e optou-se por colocar um elemento adesivo entre o suporte e a esfera – devido à danificação do suporte – a fim de mantê-la mais firme e pressionada. Entretanto, isso não foi o suficiente para evitar a rotação da esfera, que acabou por ocorrer novamente no ensaio do disco 3 – trilha 1. Um novo suporte foi usinado e decidiu-se substituir o material latão por aço. A esfera rotacionou outra vez, na trilha 2 do disco 3, supostamente por falta de aperto. No restante dos ensaios, a esfera foi mantida mais pressionada em seu alojamento, evitando a sua rotação.

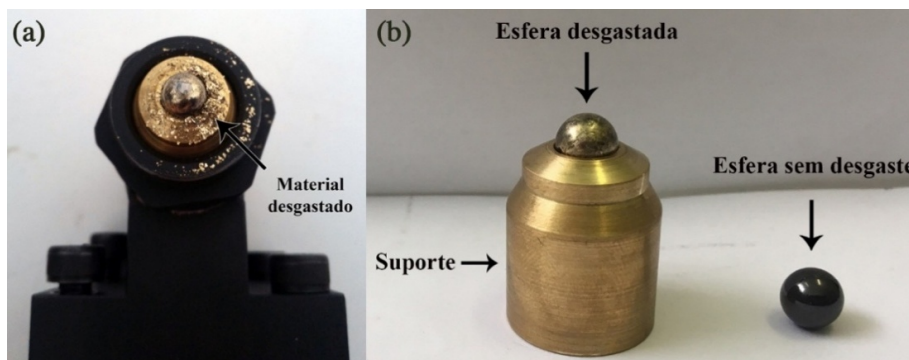


Figura 5.3 – (a) Alojamento desgastado, (b) esfera desgastada posicionada no suporte e esfera sem desgaste.

5.1 Desgaste

O desgaste da esfera – à esquerda – e o desgaste médio da trilha correspondente – à direita – encontram-se na Figura 5.4 para os discos 1, 2 e 3. Observa-se, para o disco 2, que o

maior desgaste ocorreu na trilha 5, quando a esfera rotacionou. O mesmo ocorre para o disco 3, nas trilhas 1 e 2. Verifica-se, portanto, um aumento do desgaste do disco quando a esfera gira.

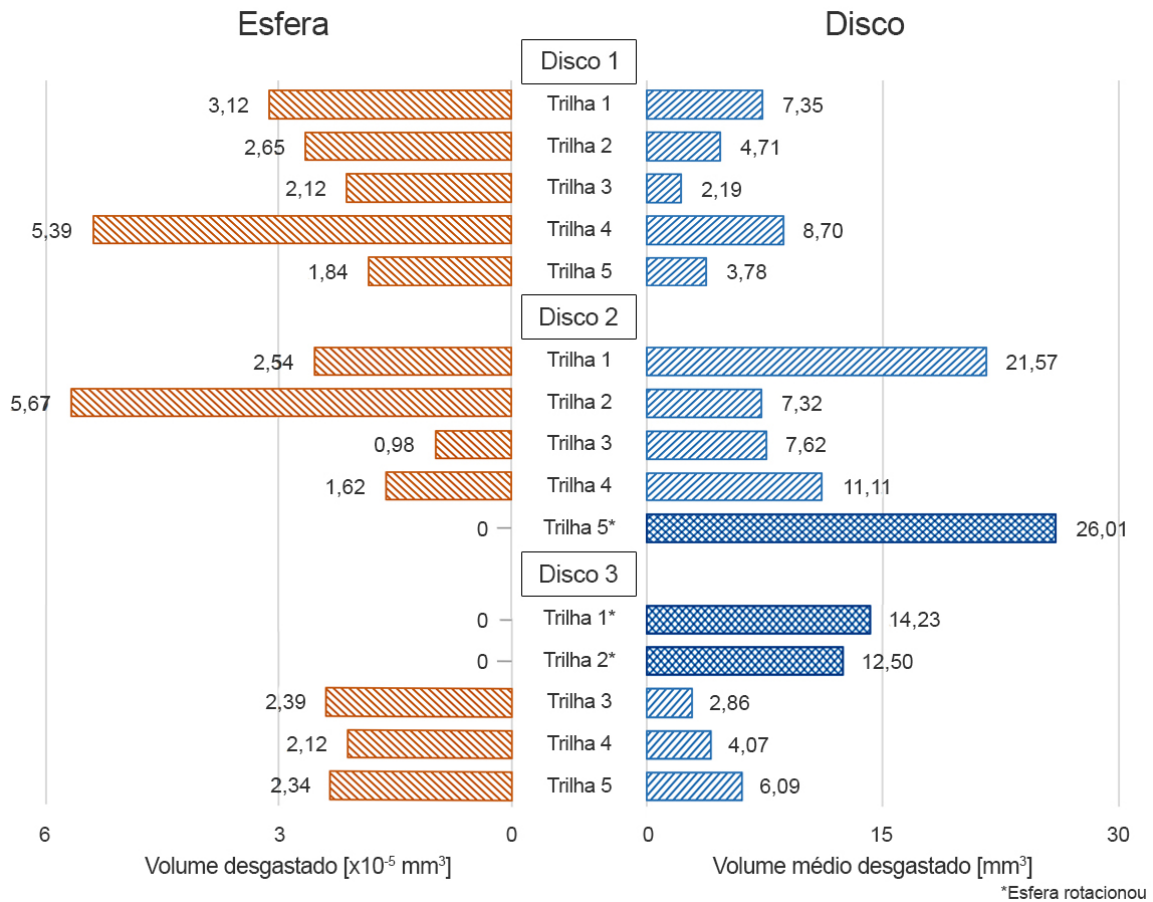


Figura 5.4 – Volume desgastado para a esfera – à esquerda – e para os discos – à direita – nos discos 1, 2 e 3, respectivamente.

A Figura 5.5(a) mostra os discos retificados antes de serem atacados com Nital, (b) discos após o ataque e em (c) o disco 3 aproximado, possibilitando a visualização da região do MB, ZAC e MS. Através do ataque com Nital, a região da ZAC não pode ser visualizada de forma clara nos três cordões de solda. Recomenda-se uma macrografia da seção do disco após os ensaios, para verificar em qual região cada trilha foi produzida, processo não realizado no escopo desse trabalho que procura desenvolver a metodologia de ensaio.

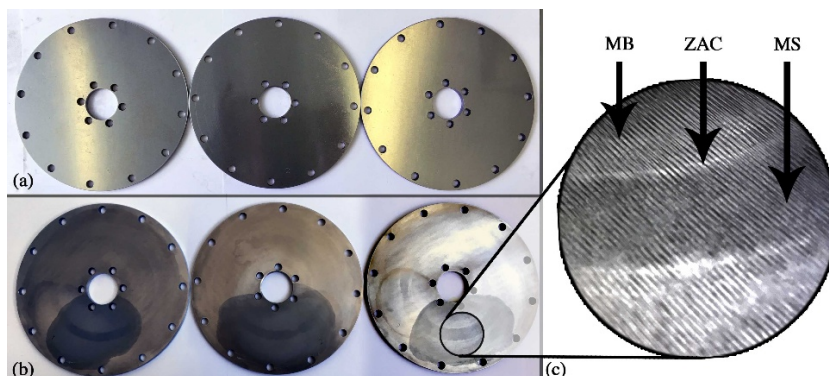


Figura 5.5 – (a) Discos retificados antes do ataque com Nital, (b) discos após o ataque e (c) aproximação no disco 3, delimitando as três regiões da solda, antes dos ensaios.

5.2 Coeficiente de atrito e força

A Figura 5.6 apresenta o coeficiente de atrito médio – à esquerda – e a força média – à direita – para as respectivas trilhas dos discos 1, 2 e 3. Os cálculos das médias foram feitos

considerando os dados a partir dos 100 s, tempo necessário para o assentamento da esfera sobre o disco, além disso, os últimos 20 s também foram desconsiderados devido à queda da força e do atrito causada pelas instabilidades do final do ensaio. A barra de erro representa o desvio padrão. A força de 100 N, por ser muito baixa para o tribômetro utilizado, se mostrou difícil de ser controlada, os gráficos de ensaio do disco 3, apresentados no Apêndice A, apresentam essa instabilidade.

Observa-se que os maiores coeficientes de atrito, em sua maioria, estão relacionados às menores forças. A Figura 5.7 mostra como a diminuição da força proporciona um aumento no atrito. Verifica-se também que os menores coeficientes de atrito ocorreram na trilha 5 do disco 2 e trilhas 1 e 2 do disco 3, ou seja, na qual a esfera rotacionou. O restante dos gráficos encontram-se no Apêndice A.

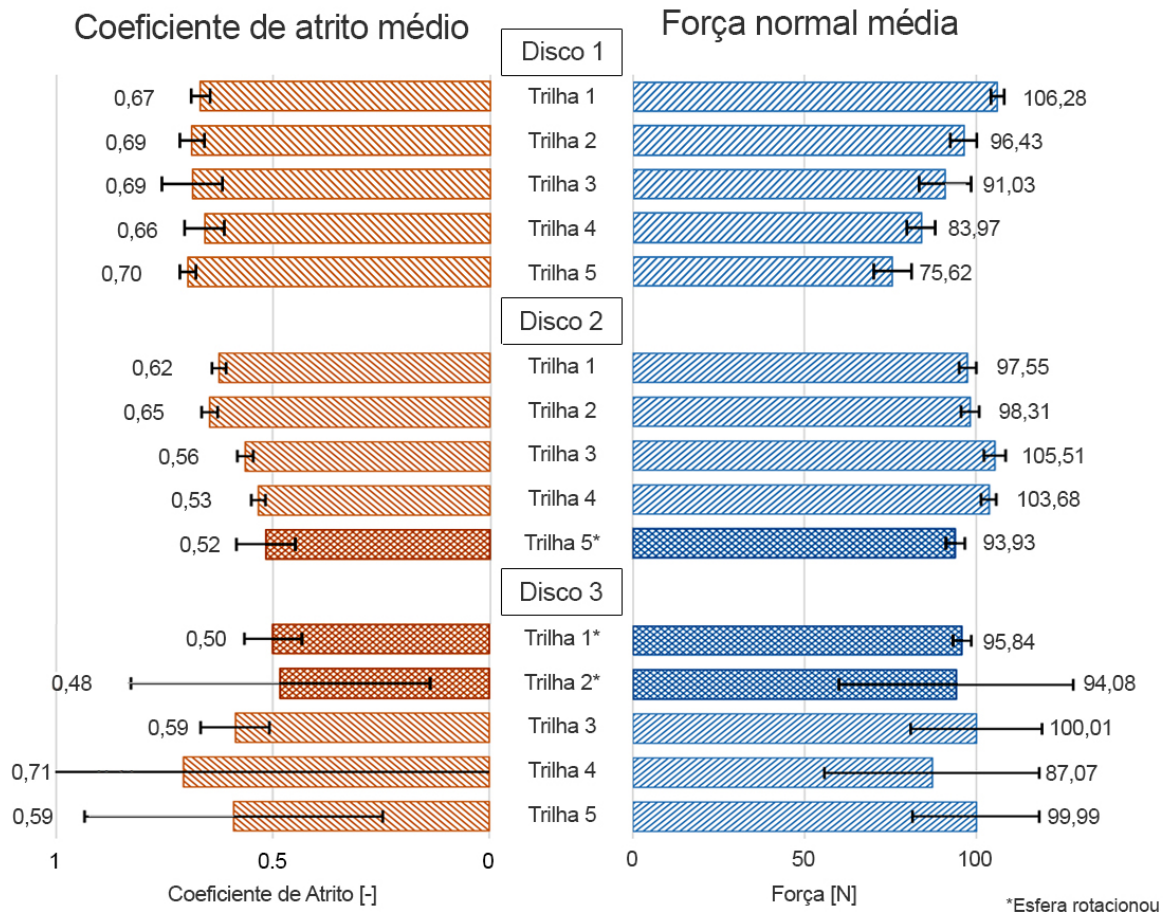


Figura 5.6 – Coeficiente de atrito médio e força média para o disco 1, 2 e 3, respectivamente.

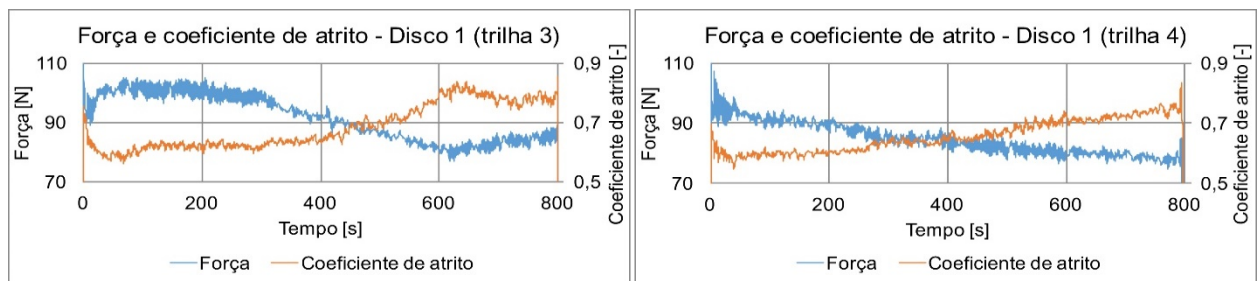


Figura 5.7 – Gráficos da força e do coeficiente de atrito para a trilha 3 e 4 do disco 1.

5.3 Deformação nos discos

A partir da região plana de cada disco, traçou-se um plano de referência, permitindo a visualização dos espectros de algumas regiões. As regiões avermelhadas (entre as trilhas)

encontram-se acima do plano, enquanto as regiões azul-escuros (trilhas) encontram-se abaixo. Desse modo, constatou-se que os discos estavam deformados, conforme mostra a região avermelhada na Figura 5.8. Uma possível causa para essa distorção são as tensões residuais geradas pela soldagem e aliviadas durante a retirada do material das trilhas. Recomenda-se a digitalização dos discos antes de serem ensaiados, para verificar se esta distorção já existe antes do ensaio (após retífica).

Verifica-se trilhas bem mais evidentes no disco 2, o que está de acordo com os cálculos do volume, cujos resultados foram superiores aos discos 1 e 3. Além disso, o disco 2 apresentou um desgaste 2,8 e 1,9 vezes maior do que nos discos 1 e 3, respectivamente. Este mesmo disco foi o que apresentou, segundo o espectro, maior deformação após os ensaios.

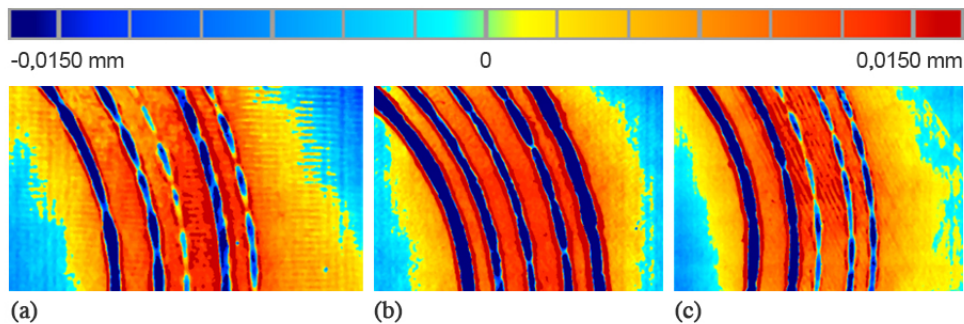


Figura 5.8 – Espectro (a) disco 1, (b) disco 2 e (c) disco 3.

6. CONCLUSÕES

Com relação ao desenvolvimento da metodologia de ensaio para medir desgaste em juntas soldadas, conclui-se que:

- Através do emprego de diferentes energias de soldagem foi possível obter cordões de solda com diferentes tamanhos, porém, os discos apresentaram-se distorcidos, provavelmente devido ao alívio de tensões residuais – geradas pela soldagem - durante a formação das trilhas. Além disso, a baixa rigidez do disco possivelmente causou a sua deformação elástica durante aplicação da força. Portanto, para trabalhos futuros, sugere-se a utilização de discos mais espessos, de 12 mm por exemplo.

- O ataque químico com Nital 10% não se mostrou adequado para visualização clara das diferentes regiões da solda. Para isso, sugere-se adicionar uma etapa de análise macrográfica da seção do disco após o ensaio de desgaste. A utilização do processo de retificação para planificação da superfície se mostrou eficiente, apesar da dúvida com relação à distorção do disco após este processo. Recomenda-se, portanto, a digitalização dos discos antes dos ensaios.

- Os parâmetros de ensaio adotados se mostraram apropriados, produzindo trilhas com volume mensurável. Todavia, a força de 100 N foi difícil de ser controlada, visto que o tribômetro foi concebido para aplicação de forças maiores. Pretende-se, futuramente, implementar um atuador menor e uma célula de carga mais precisa, além de melhorar o sistema de controle da força.

- Em alguns ensaios a esfera se despreendeu e rotacionou dentro do suporte, o que levou a um desgaste maior nas respectivas trilhas. A esfera de 7,94 mm de diâmetro se revelou muito pequena e, portanto, propõe-se o uso de esferas de diâmetro maior – 12,7 mm, por exemplo. Tendo em vista que as marcas de desgaste deixadas na esfera seguiram um padrão, marcas distintas poderão indicar problemas de ensaio – problemas de fixação, por exemplo –, desta maneira, um estudo dessas demarcações poderá contribuir para o desenvolvimento da metodologia.

- As técnicas utilizadas para avaliar o desgaste da esfera (microscopia ótica) e do disco (digitalização a laser) foram consideradas adequadas. Além disso, a digitalização de três regiões em cada disco, se mostrou apropriada frente ao desgaste irregular apresentado em algumas trilhas, permitindo determinar a perda volumétrica por desgaste com maior precisão.

- Os resultados dos desgastes, tanto da esfera quanto do disco, ainda não podem ser discutidos, visto que, por se tratar do desenvolvimento da metodologia, algumas alterações precisaram ser realizadas no decorrer do trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Society for Testing and Materials; **“ASTM G99: standard test method for wear testing with a pin-on-disc apparatus”**, ASTM, 5 p., 2004.
- Bayer, R.G.; **“Mechanical wear fundamentals and testing”**, Marcel Dekker, 2nd edition, 2004.
- Both, G.B.; **“Caracterização e avaliação tribológica de superfícies resistentes ao desgaste para aplicação em ferramentas de conformação a frio”**, Dissertação (mestrado em engenharia), 123 p., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.
- Fernandes, G.P.; Haertel Jr.; Zanutto, P.S.; Sinatora, A.; **“Influence of mild and severe wear condition in the formation and stability of friction film in clutch system”**, Wear, 302, p.1384 – 1391, 2013.
- Fortes, C.; **“Apostila de Soldagem MIG/MAG”**, ESAB, 2005.
- García, A.; Varella, A.; Montero, J.; Mier, J.R.; Zaragoza, S.; Barbadillo, F.; **“Tribological behaviour of an A355 steel pipe welding”**, Materials Science Forum, Vols. 587, p. 360 – 364, 2008.
- Kato, K.; Adachi, K.; **“Modern tribology handbook – wear mechanisms”**, Modern Tribology Handbook – Principles of Tribology, LLC, Vol. 1, 2001.
- Kato, K.; **“Wear in relation to friction – a review”**, Wear, 241, p. 151 – 157, 2000.
- Kou, S.; **“Welding metallurgy”**, Wiley-Interscience, 2nd edition, 2003.
- Krishnan, S.N.; Toppo, V.; Basak, A.; Ray, K.K.; **“Wear behaviour of a steel weld-joint”**, Wear, 260, p. 1285 – 1294, 2006.
- Lancaster, J.F.; **“Metallurgy of welding”**, George Allen & Unwin, 3rd edition, 1980.
- Machado, I.G.; **“Soldagem e técnicas conexas: processos”**, 1996.
- Mata, O.C.; Pérez, A.F.M.; Pérez, G.Y.M.; Vázquez, F.J.G.; Arizmendi, A.; **“Wear Resistance Analysis of A359/SiC/20p Advanced Composite Joints Welded by Friction Stir Welding”**, Soldagem & Inspeção, 21(2), p. 220-227, 2016.
- Modenesi, P.J.; Marques, P.V.; Santos, D.B.; **“Introdução à Metalurgia da Soldagem”**, 2012.
- Müller, R.; **“Caracterização mecânico-metalúrgica de uniões soldadas em aço alta resistência baixa liga”**, Monografia, 66 p., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010.
- Nascimento, C.; Reis, G.B.S.; Andrade, J.B.R.; Moraes, V.; Vilarinho, L.; **“Técnicas de medição usadas para avaliar o desgaste por corrosão na borda do cordão de solda do aço inoxidável ferrítico 410D”**, 7^o Congresso brasileiro de engenharia de fabricação, 2013.
- Neis, P.D.; Ferreira, N.F.; da Silva, F.P.; **“Comparision between methods for measuring wear in brake friction materials”**, Wear, 319, p. 191– 199, 2014.
- Neis, P. D.; **“Projeto e construção de um tribômetro com controle independente da temperatura do disco”**, Tese (doutorado em engenharia), 130 p., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.
- Ostermeyer, G.P.; **“On the dynamics of the friction coefficient”**, Wear, 254, p. 852 – 858, 2003.
- Palanivel, R.; Mathews, P.K.; Murugan, N.; Dinaharam, I.; **“Prediction and optimization of wear resistance of friction stir welded dissimilar aluminum alloy”**, Procedia Engineering, 38, p. 578 - 584, 2012.
- Rosendo, T.S.; **“Estudo do desempenho mecânico de solda(s) ponto por fricção (FSpW) da liga AA6181-T4”**, Tese (doutorado em engenharia), 132 p., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.
- Sartori, M.; **“Caracterização mecânica e metalúrgica de soldas aluminotérmicas em trilhos ferroviários”**, Monografia, 69 p., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010.
- Sharma, V.; Shahi A.S.; **“Effect of groove design on mechanical and metallurgical properties of quenched and tempered low alloy abrasion resistant steel welded joints”**, Materials and Design, 53, p. 727 – 736, 2014.
- Silva, F.P.; **“O uso da digitalização tridimensional a laser no desenvolvimento e caracterização de texturas aplicadas ao design de produtos”**, Dissertação (mestrado em engenharia), 179 p., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.
- Wang, Y.; Lei, T.; Liu, J.; **“Tribo-metallographic behavior of high carbon steels in dry sliding II. Microestrutura and wear”**, Wear, 231, p. 12 – 19, 1999.
- Weber, A.J.; Amaral Filho, D.; Alexandria Junior, J.P.; Cunha, J.A.P.; Araújo, P.; **“Curso Técnico Mecânico - Manutenção Industrial”**, Senai, 1^a edição, 2008.

ANEXO A – INCERTEZAS

A.1 Tribômetro

O coeficiente de atrito, calculado pela equação A.1, tem sua incerteza dada pela combinação das incertezas da força, torque e raio, e foi calculada para um raio efetivo de 42,8 mm – média dos raios utilizados nos ensaios tribológicos – como mostra a Tabela A.1.

$$\mu = \frac{T}{F \times R} \quad (\text{A.1})$$

Onde μ é o coeficiente de atrito (adimensional), T é o torque medido pelo transdutor (N.m), F é a força normal medida pela célula de carga (N) e R é o raio de aplicação da força (m).

Tabela A.1 – Incertezas de medição do coeficiente de atrito.

Força [N]	Torque [N.m]				
	1	2	4	6	8
40	89				
50	76	64			
60	67	55			
80	56	45			
100	50	38	32		
120	46	34	28		
140	42	31	25		
160	40	28	22	20	
180	38	26	20	18	
200	37	25	19	17	16

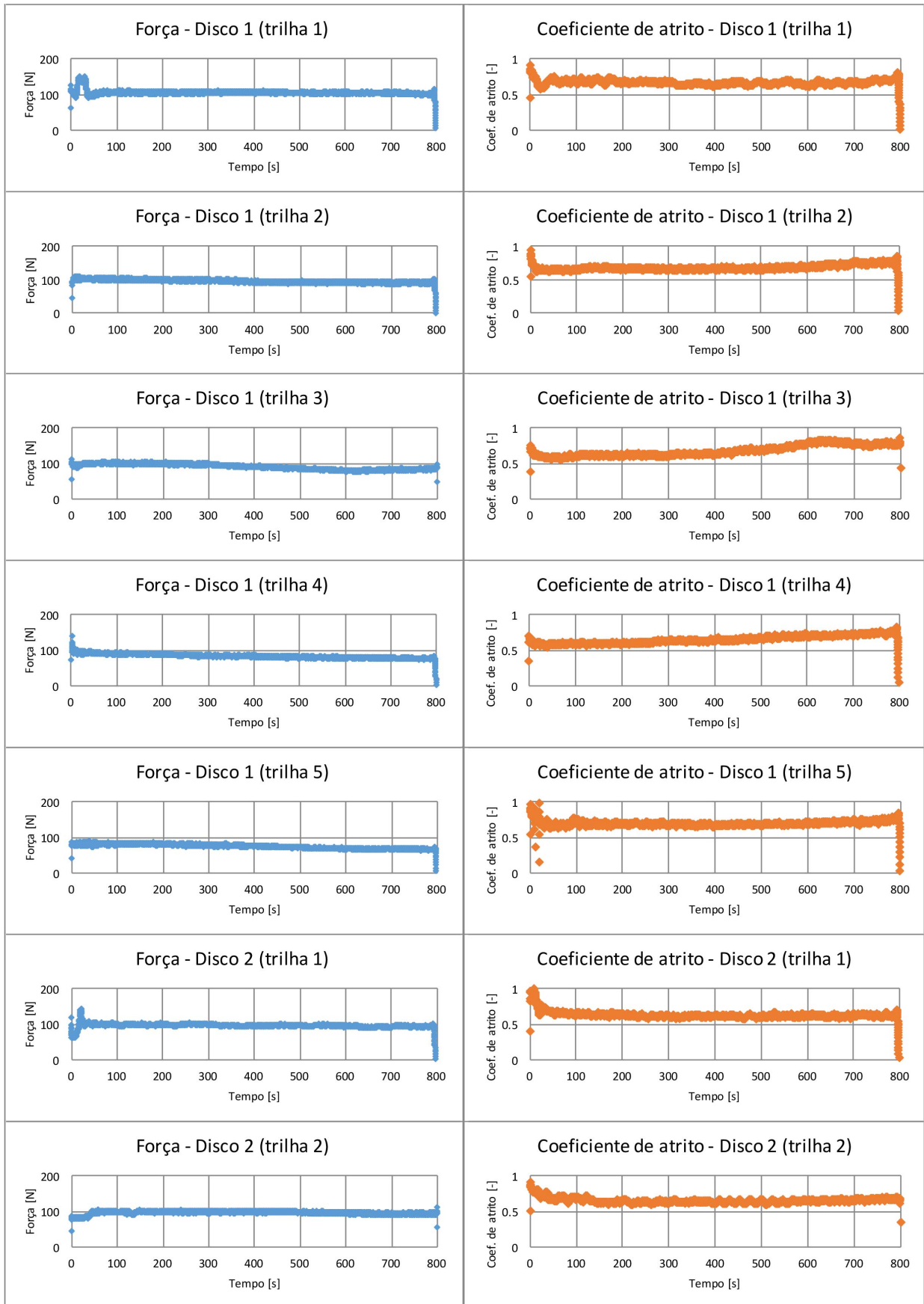
A.2 Scanner

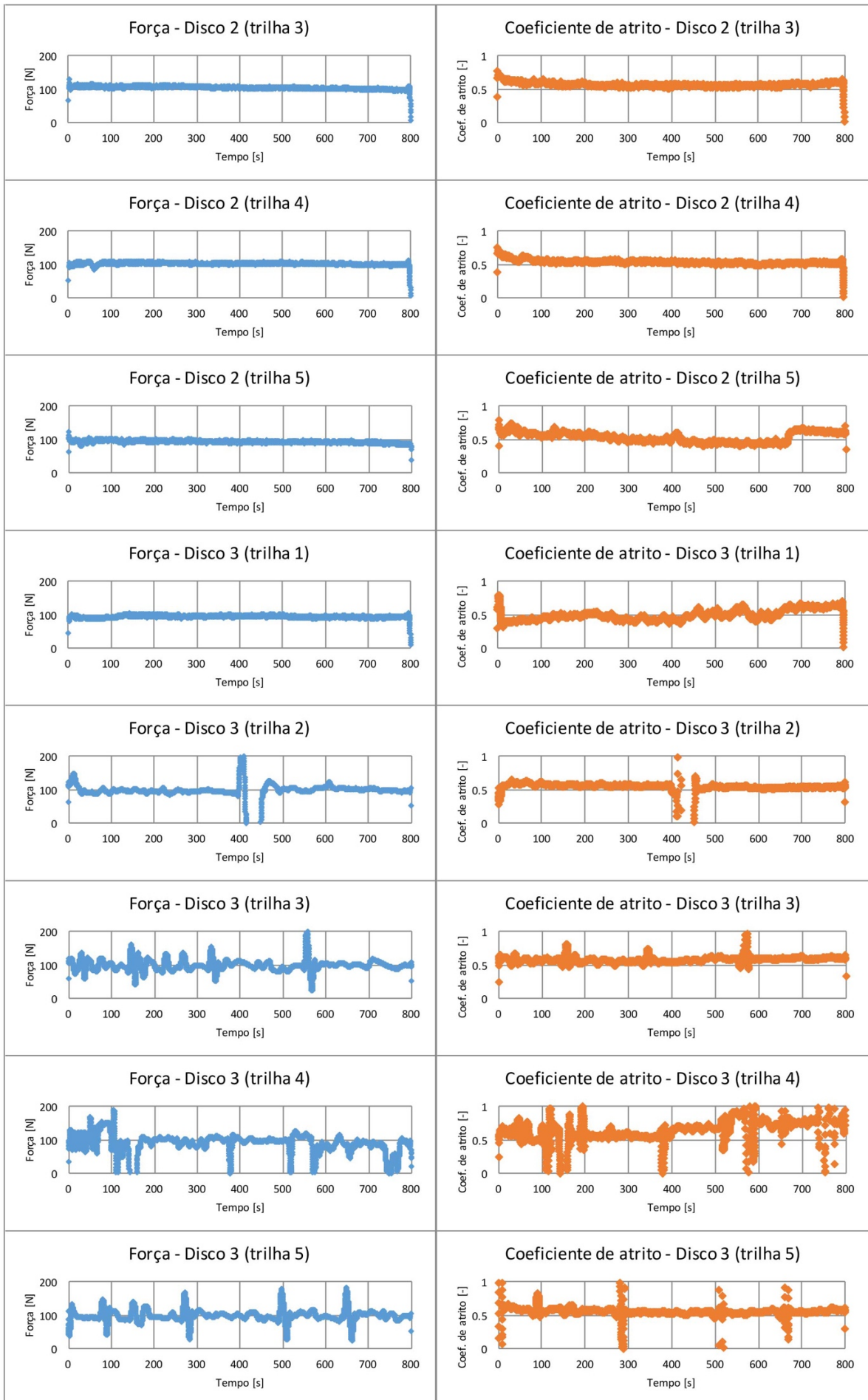
A lente utilizada para as digitalizações tridimensionais foi a de 25 mm, que possui precisão máxima de 0,0002 mm (0,2 μm), de acordo com Silva, 2006. A tabela A.2 apresenta as características da lente.

Tabela A.2 – Características da lente de 25 mm. (Adaptado de Silva, 2006).

Scanner 3D	Lente	25 mm
Lente Feixe de Laser	Precisão (μm)	< 3 0,2 (máx.)
	Faixa não captada 1 (mm)	< 12,656
	Faixa de Operação (mm)	12,656 a 14,496 (1,84)
	Faixa não captada 2 (mm)	> 14,496

APÊNDICE A – GRÁFICOS DE FORÇA E COEFICIENTE DE ATRITO





APÊNDICE B – MICROGRAFIAS

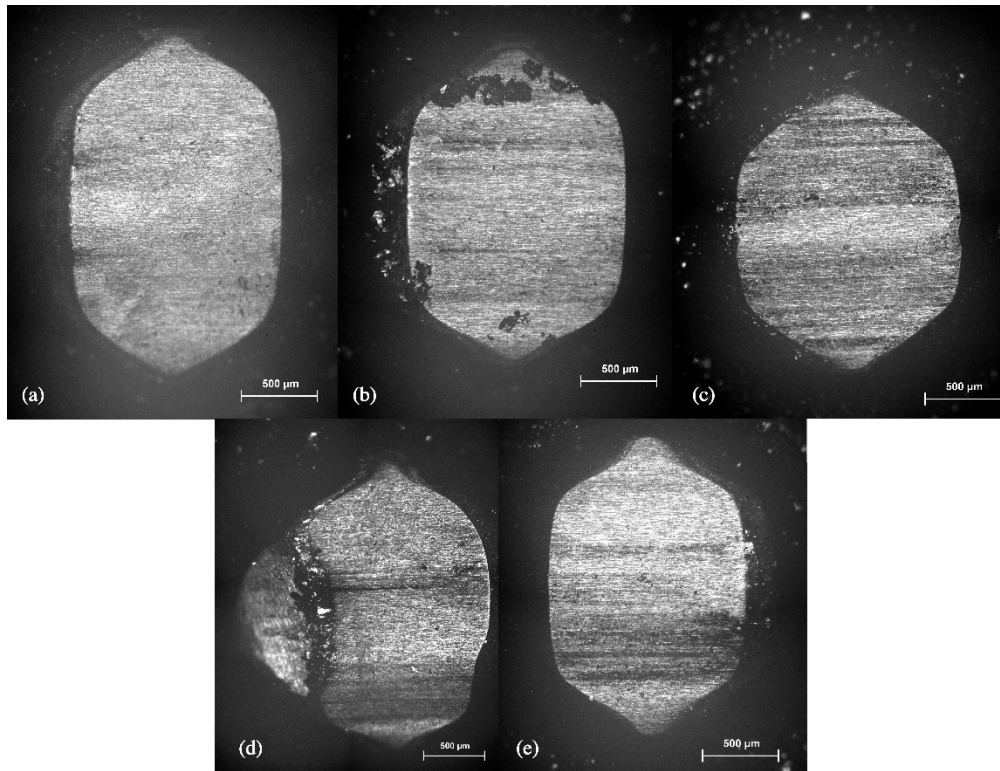


Figura B.1 – Micrografias da esfera utilizada no disco 1, escala 500 μm , (a) trilha 1, (b) trilha 2, (c) trilha 3, (d) trilha 4 e (e) trilha 5.

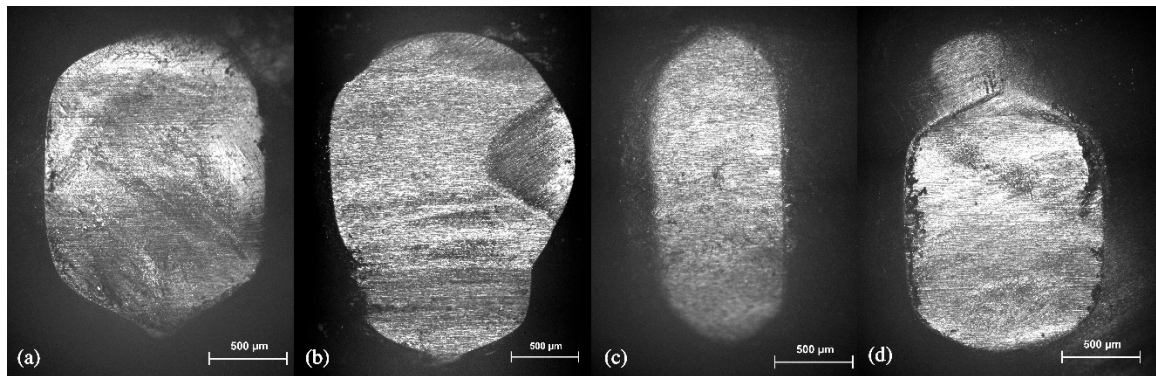


Figura B.2 – Micrografias da esfera utilizada no disco 2, escala 500 μm , (a) trilha 1, (b) trilha 2, (c) trilha 3 e (d) trilha 4.

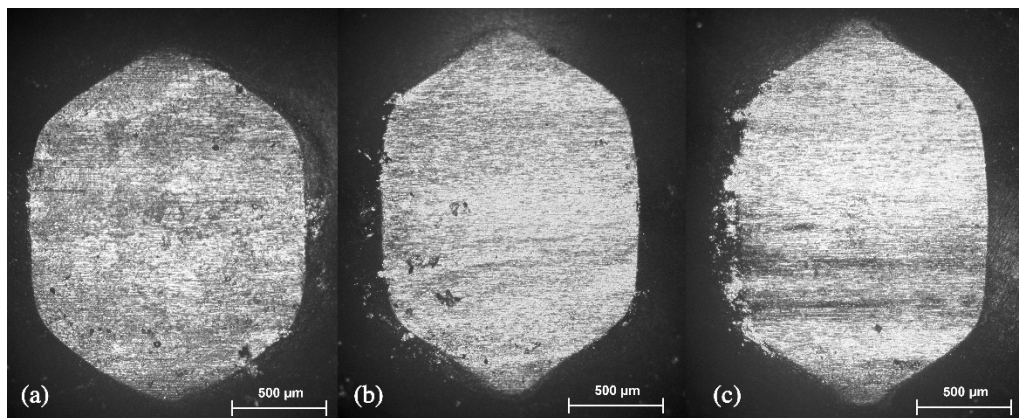


Figura B.3 – Micrografias da esfera utilizada no disco 3, escala 500 μm , (a) trilha 3, (b) trilha 4 e (c) trilha 5.

APÊNDICE C – TABELAS DE CÁLCULO

Tabela C.1 – Cálculos esfera.

	Trilha	Número de pixels Np	Área desgastada A [mm ²]	Diâmetro correspondente Wpino [mm]	Volume desgastado no pino Vpino [mm ³]	$\frac{Wpino}{R}$	Incerteza
DISCO 1	1	51475	3.95E-02	2.24E-01	3.12E-05	0.05647004	1%
	2	47430	3.64E-02	2.15E-01	2.65E-05	0.05420589	1%
	3	42416	3.25E-02	2.04E-01	2.12E-05	0.05126073	1%
	4	67631	5.19E-02	2.57E-01	5.39E-05	0.06472809	1%
	5	39467	3.03E-02	1.96E-01	1.84E-05	0.04944666	1%
DISCO 2	1	46445	3.56E-02	2.13E-01	2.54E-05	0.05364008	1%
	2	69381	5.32E-02	2.60E-01	5.67E-05	0.06556019	1%
	3	28827	2.21E-02	1.68E-01	9.80E-06	0.04225904	1%
	4	37050	2.84E-02	1.90E-01	1.62E-05	0.04790866	1%
	5	-	-	-	-	-	-
DISCO 3	1	-	-	-	-	-	-
	2	-	-	-	-	-	-
	3	45015	3.45E-02	2.10E-01	2.39E-05	0.05280786	1%
	4	42385	3.25E-02	2.03E-01	2.12E-05	0.05124199	1%
	5	44525	3.41E-02	2.09E-01	2.34E-05	0.05251966	1%

Tabela C.2 – Cálculos discos.

	Trilha	DISCO 1					DISCO 2				DISCO 3			
		Raio R [mm]	Corda C [mm]	Ângulo θ [°]	Volume parcial trilha Vp [mm ³]	Volume total trilha Vt [mm ³]	Corda C [mm]	Ângulo θ [°]	Volume parcial trilha Vp [mm ³]	Volume total trilha Vt [mm ³]	Corda C [mm]	Ângulo θ [°]	Volume parcial trilha Vp [mm ³]	Volume total trilha Vt [mm ³]
Medida 1	1	35	14.18	23.38	0.52	8.02	19.40	32.19	2.03	22.69	12.91	21.26	0.80	13.60
	2	39	14.24	21.05	0.28	4.80	19.38	28.78	0.68	8.52	12.92	19.07	0.60	11.25
	3	43	14.17	18.97	0.12	2.37	19.38	26.05	0.52	7.12	12.90	17.25	0.10	2.05
	4	47	14.21	17.39	0.48	9.95	19.30	23.70	0.70	10.60	12.89	15.76	0.15	3.51
	5	50	14.23	16.36	0.16	3.43	19.30	22.26	1.75	28.26	12.90	14.82	0.31	7.49
Medida 2	1	35	23.19	38.70	0.76	7.08	27.87	46.92	2.81	21.52	29.32	49.52	2.23	16.19
	2	39	22.90	34.15	0.49	5.21	29.09	43.80	1.08	8.87	29.15	43.89	1.80	14.79
	3	43	22.79	30.73	0.18	2.06	28.53	38.75	0.95	8.83	29.01	39.42	0.37	3.33
	4	47	22.64	27.88	0.61	7.90	28.16	34.86	1.21	12.46	28.98	35.91	0.43	4.34
	5	50	22.53	26.04	0.25	3.52	27.93	32.44	2.29	25.36	29.00	33.71	0.55	5.82
Medida 3	1	35	23.08	38.50	0.74	6.95	23.68	39.55	2.25	20.51	28.83	48.64	1.74	12.90
	2	39	23.00	34.31	0.39	4.12	23.48	35.04	0.45	4.58	28.67	43.13	1.37	11.46
	3	43	22.90	30.88	0.18	2.13	23.33	31.48	0.60	6.92	28.65	38.91	0.35	3.19
	4	47	22.93	28.24	0.65	8.26	23.24	28.62	0.82	10.27	28.51	35.31	0.43	4.35
	5	50	22.87	26.44	0.32	4.39	23.12	26.73	1.81	24.39	28.51	33.13	0.46	4.96