

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

GUILHERME DE MARCO PESSÔA DO EGITO

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO DESGASTE DO METAL DE SOLDA GTAW
REFORÇADO POR CARBONETOS DE TITÂNIO**

Ilha Solteira
2017

GUILHERME DE MARCO PESSÔA DO EGITO

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO DESGASTE DO METAL DE SOLDA GTAW
REFORÇADO POR CARBONETOS DE TITÂNIO**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.
Área: Materiais e Processos de Fabricação.

Prof. Dr. Juno Gallego
Orientador

Ilha Solteira
2017

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

- E299a Egito, Guilherme de Marco Pessoa do.
Avaliação da resistência ao desgaste do metal de solda *GTAW* reforçado por carbonetos de titânio / Guilherme de Marco Pessoa do Egito. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2017
58 f. : il.
- Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Materiais e Processos de Fabricação, 2017
- Orientador: Juno Gallego
Inclui bibliografia
1. Ligas de titânio. 2. Revestimento duro. 3. Resistência ao desgaste. 4. Soldagem.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Ilha Solteira

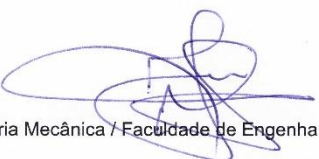
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

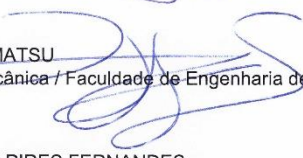
TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Avaliação da resistência ao desgaste de metal de solda GTAW reforçado por carbonetos de titânio

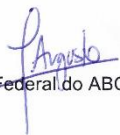
AUTOR: GUILHERME DE MARCO PESSÔA DO EGITO

ORIENTADOR: JUNO GALLEGO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em ENGENHARIA MECÂNICA, área: MATERIAIS E PROCESSOS DE FABRICAÇÃO pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. JUNO GALLEGO
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. RUIS CAMARGO TOKIMATSU
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. FREDERICO AUGUSTO PIRES FERNANDES
Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais / Universidade Federal do ABC

Ilha Solteira, 28 de julho de 2017

Dedico em especial ao meu pai André Odilon Leite do Egito e minha mãe Marlene de Marco Pessôa do Egito com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa da minha vida.

AGRADECIMENTOS

A minha mãe, Marlene, por sempre acreditar nos meus sonhos, pelos conselhos e incentivos que me nortearam a chegar onde estou. Ao meu pai e minhas irmãs por torcerem para meu sucesso.

Ao meu prezado orientador professor Juno Gallego, por dedicação, paciência e ensinamentos, que auxiliaram para a conclusão do mestrado.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica – DEM e ao Programa da Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PPGEM pela oportunidade oferecida.

Agradeço ao meu amigo José Gedael Fagundes Júnior pelo compartilhamento de conhecimento adquirido ao longo do seu mestrado e das amostras que foram utilizadas nesse trabalho.

Agradeço ao meu amigo Luís Alberto Schiwind Pedroso Stussi da Silva Pereira pela ajuda na confecção das placas de leitura e amplificação de sinal da célula de carga.

A todos os amigos de Campo Grande (MS) e os que fiz em Ilha Solteira (SP) pelo apoio, conselhos e amizade.

A empresa IMPLALIFE BIOTECNOLOGIA – Jales (SP) pela doação dos cavacos das ligas de titânio.

Agradeço a CAPES pelo apoio financeiro.

RESUMO

Setores industriais, como o sucroalcooleiro e a mineração, sofrem com a grande perda de eficiência ou até a parada de seus equipamentos causada pelo desgaste abrasivo. Para que essas paradas sejam reduzidas utiliza-se de técnicas para aumentar a vida útil das peças como revestimentos duros. Os revestimentos mais comuns empregados nesses reparos são compostos de altos teores de cromo e carbono aplicados por soldagem. O presente trabalho foi analisado o comportamento ao desgaste de metal de solda endurecido por carbonetos de titânio, formados a partir de uma mistura de cavacos das ligas ASTM F67 e ASTM F136 após solda pelo processo de soldagem ao arco tungstênio em atmosfera gasosa, SATG (Gas Tungsten Arc Welding – GTAW) em uma base de aço ASTM A36. A resistência ao desgaste foi avaliada por ensaios de microabrasão, nos quais foi empregado um microabrasômetro de esfera fixa (ISO 26424). Houve uma massiva formação de carbonetos de titânio (TiC) na matriz ferrosa, reforçada pela presença de carbonetos finos. O coeficiente de desgaste para um baixo carregamento apresentou um crescimento constante enquanto para uma alta carga e distância de deslizamento apresentou um patamar de estabilização, sendo o melhor resultado apresentado pelo cordão solda ASTM F 136 de alta energia.

Palavras-chave: Ligas de titânio. Revestimento duro. Resistência ao desgaste. Soldagem.

ABSTRACT

Industrial sectors, such as sugar/alcohol and mining, suffer with a large loss of efficiency or malfunction of the equipments caused by abrasive wear. For these shutdowns are reduced use of techniques to extend the life of parts, such as hard coatings. The most common coatings used in these repairs are compounds high levels of chromium and carbon applied by welding. The presente work aimed the wear behavior of a weld metal hardened by titanium carbides was analyzed, produce from a mixture of chips of alloys ASTM F 67 and ASTM F 136 after welded by Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) on a steel base ASTM A 36. The wear resistance was evaluated by micro abrasive wear test, in which it was employed a ball cratering test. There was a massive formation of titanium carbides (TiC) in the ferrous matrix, reinforced by the presence of fine carbides. The wear rates to low load showed constant growth. while to high load and slip distance showed a stabilization level, the best result using high heat input welding of ASTM F 136 titanium alloy.

Keywords: Titanium alloys. Hardfacing. Wear resistance. Welding.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Desgaste abrasivo: a) de dois e b) de três corpos.	16
Figura 2 - Técnicas de aplicação de revestimento duro.	17
Figura 3 - Equipamento de soldagem TIG.....	18
Figura 4 - Máquina de desgaste micro abrasivo de esfera livre.	19
Figura 5 - Máquina de desgaste micro abrasivo de esfera fixa.	20
Figura 6 - Modos de desgaste abrasivo: (a) Riscamento; (b) Rolamento.....	21
Figura 7 - Modo de desgaste abrasivo misto.....	21
Figura 8 - Seção de corte das amostras	25
Figura 9 - Identificação das amostras.....	25
Figura 10 - Medição do diâmetro das crateras de desgaste.....	28
Figura 11 - Imagens dos cordões de solda das amostras ASTM F 67: a) 1,8kJ/mm, b) 2,5 kJ/mm, c) 3,2 kJ/mm; e ASTM F 136: d) 1,8 kJ/mm, e) 2,5 kJ/mm, f) 3,2 kJ/mm.....	31
Figura 12 - Imagens geradas no MEV das amostras ASTM F 67 e ASTM F 136. ...	32
Figura 13 - Exemplo de crateras de desgaste do aço ASTM A 36 e do cordão de solda ASTM F 67 com carga de 11,2 N.	35
Figura 14 - Exemplo de crateras de desgaste do aço ASTM A 36 e do cordão de solda ASTM F 136 com carga de 11,2 N.	36
Figura 15 - Exemplo de crateras de desgaste do aço ASTM A 36 e do cordão de solda ASTM F 67 com carga de 29,6 N.	37
Figura 16 - Exemplo de crateras de desgaste do aço ASTM A 36 e do cordão de solda ASTM F 136 com carga de 29,6N.	38
Figura 17 - Variação do volume de desgaste com a distância de deslizamento durante os ensaios de micro desgaste abrasivo. Carga nominal 11,2N.....	41
Figura 18 - Variação do volume de desgaste com a distância de deslizamento durante os ensaios de micro desgaste abrasivo. Carga nominal 29,6N.....	41
Figura 19 - Variação do coeficiente de desgaste com a distância de deslizamento durante os ensaios de micro desgaste abrasivo. Carga nominal 11,2 N.	45

Figura 20 - Variação do coeficiente de desgaste com a distância de deslizamento durante os ensaios de micro desgaste abrasivo. Carga nominal 29,6 N.	45
Figura 21 - Variação do coeficiente de desgaste com a dureza Vickers dos materiais ensaiados por micro desgaste abrasivo nas cargas de 11,2 N e 29,6 N.	46
Figura 22 - Ajuste dos resultados experimentais obtidos neste trabalho com o mapa da taxa de desgaste (ou coeficiente de desgaste) em função da dureza dos materiais de engenharia. Os pontos assinalados são referentes aos valores médios e a dispersão expressão pelo desvio-padrão dos mesmos.	48
Figura 24 - Célula de carga de balança digital.	54
Figura 25 - Circuito de leitura da célula de carga.	54
Figura 26 - Célula de carga: a) estrutura de suporte para célula de carga; b) montagem para medição da tensão.	55
Figura 27 - Bags de areia para peso-morto.	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Processo de limpeza dos cavacos.	23
Tabela 2 - Parâmetros de soldagem da mistura carbonetante.....	24
Tabela 3 - Parâmetros do ensaio de desgaste micro abrasivo de esfera fixa.	27
Tabela 4 - Médias e erro padrão das medidas de micro dureza Vickers do cordão de solda.....	33
Tabela 5 - Volume médio de desgaste para o aço ASTM A 36 para carregamento de 11,2 N.....	39
Tabela 6 - Volume médio de desgaste das ligas ASTM F 67 e ASTM F 136 para carregamento de 11,2 N.....	39
Tabela 7 - Volume médio de desgaste para o aço ASTM A 36 para carregamento de 29,6N.....	40
Tabela 8 - Volume médio de desgaste das ligas ASTM F 67 e ASTM F 136 para carregamento de 29,6N.....	40
Tabela 9 - Coeficiente de desgaste para o aço ASTM A 36.....	43
Tabela 10 - Coeficiente de desgaste das ligas de titânio ASTM F 67 e ASTM F 136 com carga de 11,2 N.	44
Tabela 11 - Coeficiente de desgaste das ligas de titânio ASTM F 67 e ASTM F 136 com carga de 29,6 N.	44
Tabela 12 – Relação massa x tensão x força.....	56
Tabela 13 - Tabela com os dados do ensaio de desgaste micro abrasivo com carga de 11,2 N para o metal base e as ligas ASTM F67 e ASTM F136.	58
Tabela 14 - Tabela com os dados do ensaio de desgaste micro abrasivo com carga de 29,6 N para o metal base e as ligas ASTM F67 e ASTM F136.	59

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ASTM	American Society for Testing and Materials
BSE	Backscattered Secondary Electrons (Elétrons Retroespalhados)
DUH	Dynamic Ultra Micro Hardness Tester
GTAW	Gas Tungsten Arc Welding (Soldagem ao arco elétrico com proteção gasosa e eletrodo de tungstênio)
HV	Hardness Vickers (Dureza Vickers)
ISO	International Organization for Standardization (Organização Internacional para Padronização)
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
Na ₂ SiO ₃	Silicato de Sódio
SAE	Society of Automotive Engineers
SiC	Carboneto de Silício
RPM	Rotações por minuto
TIG	Tungsten Inert Gas

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Definição	Unidade
A_t	Área total da cratera de desgaste	$[\text{mm}^2]$
A_r	Área de rolamento	$[\text{mm}^2]$
A_g	Área de riscamento	$[\text{mm}^2]$
d	Diâmetro da cratera de desgaste	$[\text{mm}]$
E	Energia de soldagem	$[\text{kJ/mm}]$
h	Profundidade de penetração	$[\text{mm}]$
k	Coeficiente de desgaste	$[\text{Pa}^{-1}]$
N	Força normal	$[\text{N}]$
Q	Vazão de gás	$[\text{L/min}]$
R	Raio da esfera	$[\text{mm}]$
S	Distância de deslizamento	$[\text{m}]$
t	Tempo	$[\text{s}]$
v	Velocidade de soldagem	$[\text{mm/min}]$
V	Volume de desgaste	$[\text{mm}^3]$
v_t	Velocidade tangencial periférica da esfera de ensaio	$[\text{m/s}]$
W	Taxa de desgaste	$[\text{mm}^3/\text{m}]$

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	15
2.1	DESGASTE.....	15
2.2	REVESTIMENTO DURO	17
2.3	SOLDAGEM A ARCO ELÉTRICO COM PROTEÇÃO GASOSA E ELETRODO DE TUNGSTÊNIO	18
2.4	ENSAIO DE DESGASTE MICRO ABRASIVO.....	19
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	23
3.1	PROCESSAMENTO DO CAVACO DAS LIGAS ASTM F 67 E ASTM F 136 E PREPARAÇÃO DE MISTURA CARBONETANTE	23
3.2	SOLDAGEM DOS CORPOS-DE-PROVA	24
3.3	PREPARAÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	25
3.4	ENSAIO DE MICRODUREZA VICKERS	26
3.5	ENSAIO DE DESGASTE MICRO ABRASIVO DE ESFERA FIXA	26
3.5.1	Análise da cratera das ligas de titânio ASTM F 67 e ASMT F 136	27
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
4.1	CORDÕES DE SOLDA DAS LIGAS DE TITÂNIO ASTM F 67 E ASTM F 136	30
4.1.1	Macrografia da superfície dos cordões de solda.....	30
4.1.2	Microscopia eletrônica de varredura (MEV) por elétrons retroespalhados (BSE) dos cordões de solda	31
4.2	ANÁLISE DA DUREZA DA SUPERFÍCIE DOS CORDÕES DE SOLDA POR MICRO DUREZA VICKERS	32
4.3	ANÁLISE DA RESISTÊNCIA AO DESGASTE MICRO ABRASIVO DOS CORDÕES DE SOLDA.....	34
4.3.1.	Volume de desgaste com cargas de 11,2 N e 29,5 N para aço ASTM A 36 e cordões de solda das ligas de titânio ASTM F 67 e ASTM F 136.....	34

4.3.2.	Coeficiente de desgaste para o aço ASTM A 36 e as ligas de titânio ASTM F 67 e ASTM F 136 com carga de 11,2 N e 29,6 N	43
5	CONCLUSÕES	49
	REFERÊNCIAS	51
	APÊNDICE A - DETERMINAÇÃO DA CARGA DO ENSAIO	54
	APÊNDICE B – PUBLICAÇÕES REFERENTES A ESTE TRABALHO	57
	APÊNDICE C - TABELA COMPLETA PARA ENSAIO DE DESGASTE COM CARGA DE 11,2 N	58
	APÊNDICE D - TABELA COMPLETA PARA ENSAIO DE DESGASTE COM CARGA DE 29,6 N	59

1 INTRODUÇÃO

Desgaste pode ser definido como a perda progressiva de massa da superfície de um corpo sólido devido ao contato e movimento relativo com um outro corpo sólido, líquido ou gasoso, sendo um fenômeno complexo que depende das condições de deslizamento e propriedades dos materiais (1). Com isso, diminui a durabilidade da peça e acarreta na perda de desempenho de um equipamento no qual está inserido.

Na maioria das situações de ocorrência de parada de máquinas para reparo de peças desgastadas, dentre os vários mecanismos de desgaste, há a presença muito grande do desgaste abrasivo, por ser um mecanismo de desgaste responsável por 50% dos problemas industriais (2).

Existem técnicas que diminuem as ocorrências de paradas, uma delas é a de se revestir a superfície da peça com um material com maior resistência ao desgaste e, assim, aumenta a vida útil da peça.

Esse tipo de revestimento denomina-se revestimento duro, que por sua vez é uma técnica utilizada nos setores sucroalcooleiro e da mineração, afim de aumentar a durabilidade da peça e realizar os reparos de forma programado.

Dentro do contexto de desgaste abrasivo, em que se busca ensaios em laboratórios, e que os resultados possam ser transferidos para situações próximas ao real, tem-se o desgaste micro abrasivo (3). A diferença entre desgaste abrasivo e desgaste micro abrasivo está no tamanho médio das partículas, sendo no segundo um tamanho máximo de 10 μm .

O trabalho tem como objetivo analisar o desempenho ao desgaste abrasivo dos cordões de solda formados a partir da soldagem GTAW de uma mistura carbonetante de ligas de titânio ASTM F 67 e ASTM F 136 (obtidos através da reciclagem de cavacos de implantes odontológicos) em uma base de aço ASTM A 36, com diferentes energias de soldagem (1,8, 2,5 e 3,2 kJ/mm).

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 DESGASTE

O desgaste, em específico o desgaste abrasivo, é um processo que ocorre no contato entre superfícies em movimento relativo, e como consequência, ocasiona uma perda de material dos componentes que estão em contato, com ou sem a presença de partículas abrasivas, acarretando em uma diminuição da eficiência da máquina, diminuição da produção, redução dos lucros, aumento dos custos de manutenção e a realização de paradas não programadas.

Para se prevenir o desgaste acentuado de um componente, deve-se projetar adequadamente a máquina para o tipo de processo, na qual será inserida e conhecer e identificar os tipos de mecanismos de desgaste predominante no sistema.

O projeto tem a finalidade de reduzir o desgaste dos componentes ou aprimorar a transferência de carga e movimento, propiciando apenas a baixa tensão, utilizando material apropriado e lubrificantes em função da carga aplicada, da temperatura e do ambiente no qual se insere (4).

Os principais tipos de mecanismos de desgaste podem ser anunciados como adesão, abrasão, erosão, por fadiga na superfície e por corrosão (5, 6, 7).

O desgaste por adesão é provocado pelo contato entre duas superfícies, causando uma retirada da camada do material e, este, aderindo a superfície do outro (5).

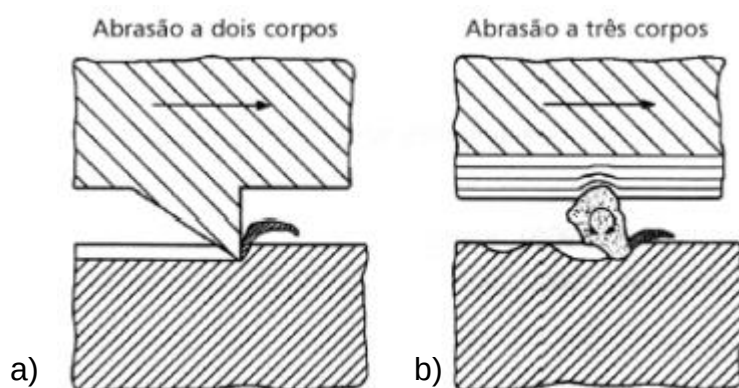
O desgaste por fadiga na superfície é especificado pela formação de trincas ocasionado por ciclos repetitivos e alternados de cargas em corpos sólidos, podendo gerar fragmentos com a quebra da superfície (1, 7).

O desgaste por corrosão, segundo Pereira (11) é um fenômeno químico e eletroquímico que faz as propriedades dos aços diminuírem quando esses são expostos ao meio agressivo, já o desgaste “estraga” os metais através da remoção da superfície.

O desgaste por erosão é a perda progressiva de material da superfície sólida por exposição ininterrupta ao impacto de partículas duras (8).

O desgaste abrasivo ocorre devido a partículas duras forçadas contra e movendo-se ao longo de uma superfície sólida (9). Ainda ele pode ser dividido em dois tipos: desgaste abrasivo de dois corpos, Figura 1a, ou de três corpos, Figura 1b. O desgaste abrasivo de dois corpos ocorre quando apenas duas superfícies em contato e movimento relativo se atritam uma em relação a outra, ocasionado a formação de partículas oxidadas desprendidas da superfície. Já desgaste abrasivo de três corpos os grãos abrasivos estão livres para mover-se entre as superfícies. O desgaste abrasivo de três corpos pode ser dividido em aberto (o desgaste é gerado por um fluxo de partículas abrasivas que fluem sobre um corpo sólido) e fechado (o desgaste é gerado por partículas carregadas entre dois corpos sólidos) (10).

Figura 1 - Desgaste abrasivo: a) de dois e b) de três corpos.



Fonte: Adaptado Gahr (1).

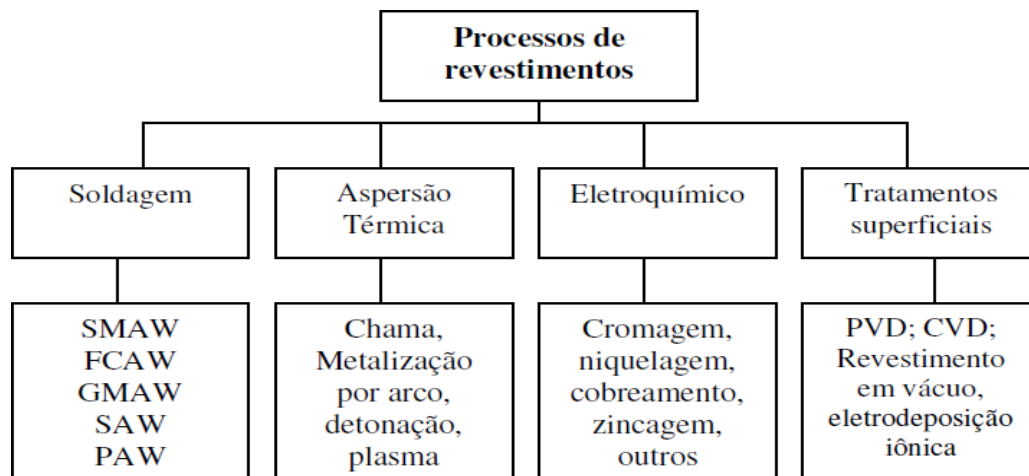
Ainda dentro do termo desgaste por abrasão, há o desgaste micro abrasivo que tem a sua ocorrência quando se trabalha com partículas abrasivas de tamanho médio de 10 μm , e são utilizados em laboratórios de ensaios de desgaste micro abrasivo. Enquanto o tamanho médio de partículas de desgaste abrasivo são de 50 a 250 μm (11).

2.2 REVESTIMENTO DURO

Revestimento duro dá-se a uma liga depositado na superfície de um material mole, com a finalidade de se aumentar a dureza e a resistência ao desgaste (por abrasão, corrosão, fadiga, impacto). A aplicação do revestimento duro por soldagem tem como objetivo reduzir o desgaste e, assim, reduzir os custos de produção, aumentar a vida em serviço do componente da máquina ou equipamento e reduzir paradas para manutenção (13).

Existem diversas técnicas para aplicação de revestimento, como mostra a Figura 2. Em alguns casos aplica-se revestimento na superfície por soldagem, outro não se adiciona outro elemento, mas muda-se as propriedades em contato com outro material (através do processo eletroquímico).

Figura 2 - Técnicas de aplicação de revestimento duro.



Fonte: Fagundes Júnior (14).

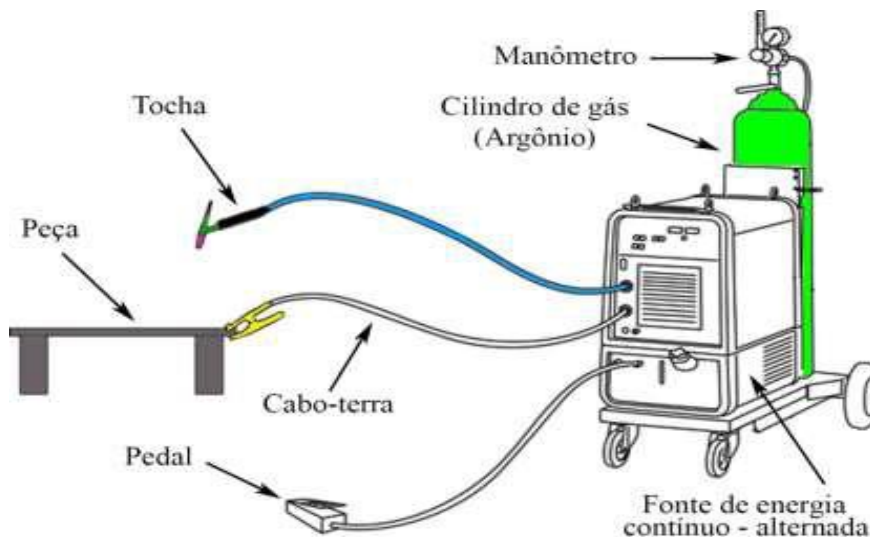
Uma das técnicas de aplicação de revestimento duro, a qual foi utilizada nesse trabalho, é soldagem a arco elétrico com proteção gasosa e eletrodo de tungstênio, que terá seu processo detalhado posteriormente.

2.3 SOLDAGEM A ARCO ELÉTRICO COM PROTEÇÃO GASOSA E ELETRODO DE TUNGSTÊNIO

A soldagem a arco elétrico com proteção gasosa e eletrodo de tungstênio (*Gas Tungsten Arc Welding – GTAW*) é utilizada para soldagem de chapas finas (0,2 a 3,0 mm) de aço carbono, inoxidável, alumínio, magnésio, titânio. Este processo consiste no aquecimento de uma região, a qual será unida, até atingir o ponto de fusão, e para isso é fornecido energia através de arco elétrico, que fundirá o metal de base e o metal de adição formando-se uma poça de metal líquido (14, 15).

O equipamento utilizado no processo GTAW (Figura 3), possui um cilindro de gás (podendo conter gás hélio, argônio mistura de hélio e argônio ou argônio e hidrogênio), fonte de corrente contínua/alternada, cabo terra e tocha.

Figura 3 - Equipamento de soldagem TIG.



Fonte: Fagundes Júnior (14).

2.4 ENSAIO DE DESGASTE MICRO ABRASIVO

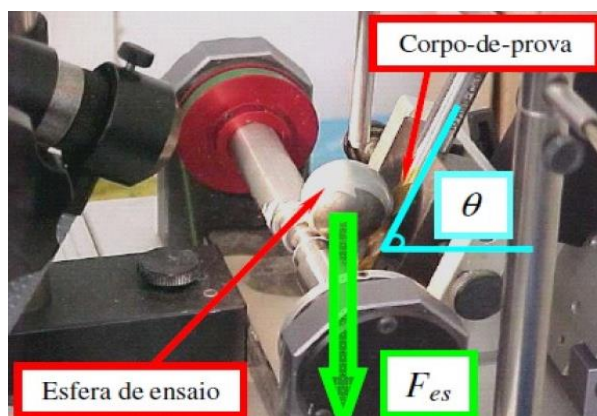
O ensaio de desgaste micro abrasivo baseia-se em promover contato entre uma esfera e uma amostra plana, com ou sem aplicação de abrasivo, com a esfera girando em relação à amostra (3).

Sua finalidade é determinar se o revestimento aplicado na superfície tem boa resistência ao desgaste ou não, pois quando se ensaia o corpo-de-prova em contato com a esfera em movimento rotativo gera uma calota esférica ou cratera de desgaste, que através dessa pode se determinar o comportamento do material ao desgaste, determinado se ele “resiste” ou não a uma determinada condição de trabalho (5).

Para se realizar ensaio de desgaste micro abrasivo, há duas configurações básicas: ensaio de desgaste micro abrasivo de esfera livre (Figura 4) e esfera fixa (Figura 5). Nesse trabalho será mais abordado o ensaio de desgaste micro abrasivo de esfera fixa.

A diferença entre os dois tipos de configuração de ensaio está na força normal, em que na de esfera livre a força normal é função do peso da esfera e da inclinação (θ) do corpo de prova. Quanto maior o diâmetro da esfera e menor for o ângulo θ , maior a força normal que atuará sobre o corpo-de-prova.

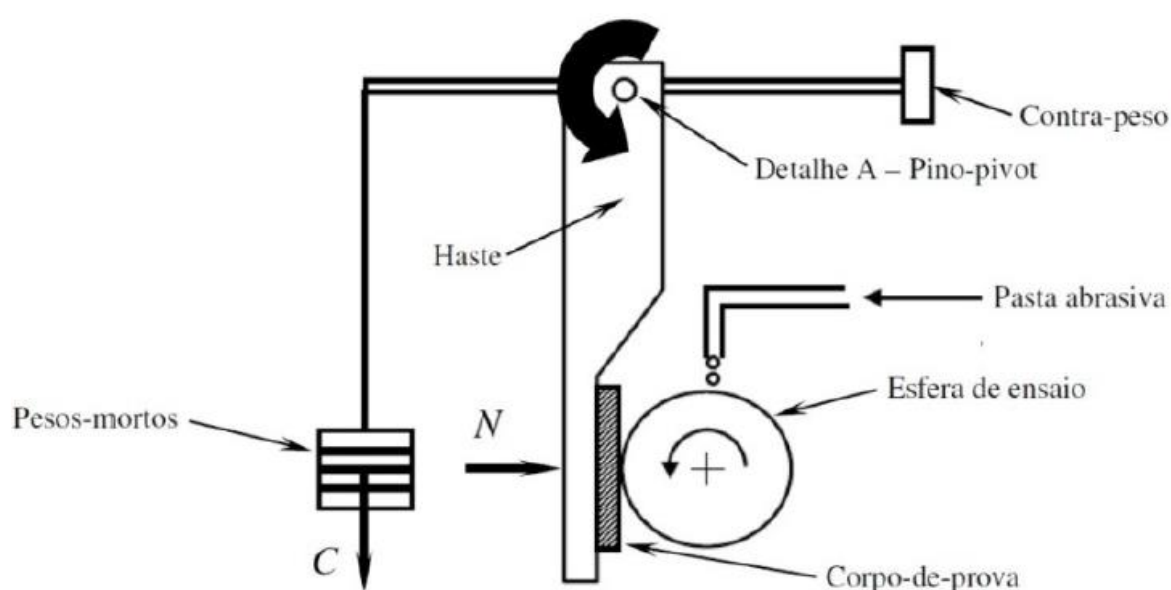
Figura 4 - Máquina de desgaste micro abrasivo de esfera livre.



Fonte: Oliveira (5).

Já a configuração de esfera fixa, a força normal é aplicada pelo “peso-morto”. O corpo-de-prova fica fixo em uma haste, que gira em torno do eixo “*pino-pivot*”. Quando se aplica cargas C , por inserção de “peso-morto”, há uma tendência da haste de rotacionar em torno do “*pino-pivot*”, ocasionado no contato entre o corpo-de-prova e a esfera a atuação da força normal. Como o sistema possui um contrapeso, isso faz com que o sistema fique em equilíbrio (5).

Figura 5 - Máquina de desgaste micro abrasivo de esfera fixa.

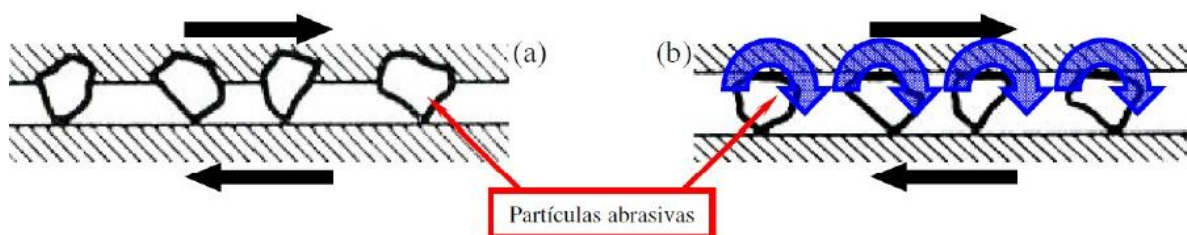


Fonte: Oliveira (5).

Quando se realiza os ensaios de desgaste micro abrasivo, pode-se observar a ocorrência de três modos de desgaste abrasivo como o “riscamento”, “rolamento” ou o misto de “riscamento” com “rolamento”.

O “riscamento”, como mostra a Figura 6a, ocorre quando as partículas abrasivas deslizam sobre a superfície a ser ensaiada. O “rolamento”, como mostra a Figura 6b, que ocorre quando as partículas rolam sobre a superfície. E o misto sendo uma mistura entre o “riscamento” e o “rolamento” (5).

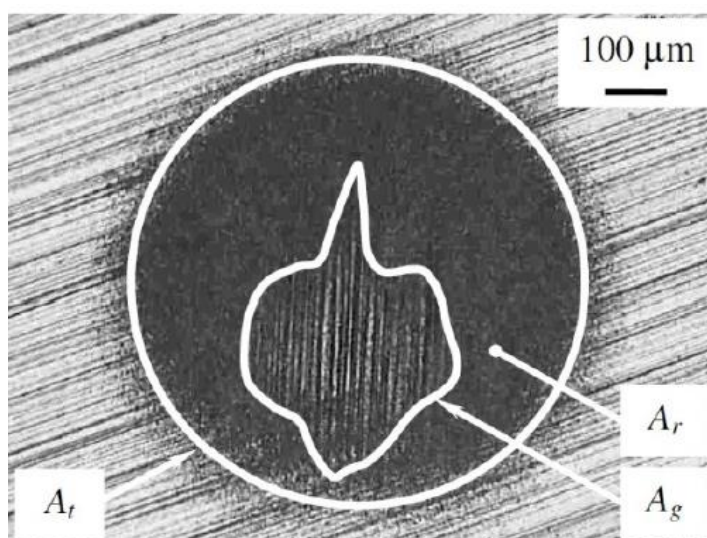
Figura 6 - Modos de desgaste abrasivo: (a) Riscamento; (b) Rolamento.



Fonte: Cozza (11).

Na Figura 7 mostra o fenômeno de desgaste abrasivo misto, onde A_t é a área total da cratera de desgaste, A_r área de rolamento e A_g área de riscamento. Os índices “t”, “r” e “g” são referências dos termos “total”, “rolling” e “grooving” (11).

Figura 7 - Modo de desgaste abrasivo misto.



Fonte: Cozza (11).

A partir do término do ensaio de desgaste micro abrasivo a cratera de desgaste é analisada e, assim, pode-se retirar algumas grandezas geométricas, como o diâmetro da cratera (d), a profundidade de penetração da esfera (h) e o volume de

material removido (V). As equações necessárias para o cálculo desses parâmetros serão apresentados no capítulo 3, Materiais e Métodos.

2.5 REGIME PERMANENTE DE DESGASTE

Um ensaio diz-se que entrou em regime permanente quando o coeficiente de desgaste (k) ou a taxa de desgaste (W) perdura constante ao longo do tempo, sem que há uma distância de deslizamento (S) ou tempo de ensaio padrão, para que esse isso ocorra (5).

Esse regime também pode ser observado quando, através da construção do gráfico de volume de desgaste (V) em função do tempo (t) ou volume de desgaste (V) em função da distância de deslizamento (S), observa-se uma variação linear do volume de desgaste com o tempo ou distância de deslizamento. Nesse caso, diz-se que o regime permanente do ensaio foi alcançado (5, 9).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 PROCESSAMENTO DO CAVACO DAS LIGAS ASTM F 67 E ASTM F 136 E PREPARAÇÃO DE MISTURA CARBONETANTE

O material utilizado para os ensaios de desgaste micro abrasivo de esfera fixa é proveniente do trabalho do Fagundes Júnior (2015) (14), a qual foi soldado em uma base de aço ASTM A 36 (80 mm x 32 mm x 10 mm) um cordão com uma mistura carbonetante, contendo pós de titânio das ligas ASTM F 67 (16) e ASTM F 136 (17), proveniente da reciclagem de cavacos doados pela empresa *IMPLALIFE BIOTECNOLOGIA* (18), situada na cidade de Jales, São Paulo.

Esses cavacos provenientes da usinagem de implantes dentários passaram por um processo de limpeza, pois estavam impregnados de fluido de corte. O processo de limpeza está descrito na Tabela 1.

Tabela 1 - Processo de limpeza dos cavacos.

Etapas	Descrição	Cavacos [g]	Água [ml]	Detergente [ml]	Tempo [min]
1	Limpeza	500	4000	200	360
2	Limpeza	500	4000	200	360
3	Banho Ultrassônico	20	500	30	10
4	Banho Ultrassônico	20	500	-	5

Fonte: Adaptado de Fagundes Júnior (14).

Após a limpeza, colocou-se os cavacos para secarem numa estufa, por 24 horas à 75°C. Depois esses cavacos passaram por um processo de moagem, utilizando um dispositivo de granito para obter o pó de titânio (14).

Esse pó passou pela classificação, na qual se utilizou uma peneira de granulometria de 40 Mesh (0,42 mm), retirando o pó mais fino e com esse fazer a

preparação da mistura para a soldagem. Para isso, utilizou-se a estequiometria para as duas ligas de titânio (ASTM F 67 e ASTM F 136) de 10g para 3 g de pó de grafite. Também foi adicionado na massa total da mistura 2% de massa de silicato de sódio (Na_2SiO_3) e em pequenas quantidades, água destilada.

3.2 SOLDAGEM DOS CORPOS-DE-PROVA

Após a preparação da mistura carbonetante, esta foi inserida na superfície preparada do metal base, com uma ajuda de um molde de 3 mm de espessura com um canal de 6 mm x 80 mm. Preenchido o canal, colocou-se o metal base com a mistura na estufa por 24 horas à 75°C antes da soldagem. A soldagem foi feita utilizando uma fonte de energia da marca LINCOLN ELECTRIC modelo PRECISION TIG 225, com corrente de 230 A e trator de corte automático da WHITE MARTINS modelo MC 46, velocidade de 100 a 1000 mm/min, com adaptação para suporte da tocha.

Os parâmetros para soldagem da peça, como tipo de eletrodo, diâmetro do eletrodo, bocal de proteção, corrente (I), tensão (V), velocidade de soldagem (v), vazão de argônio (Q) e energia de soldagem (E), estão contidas na Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros de soldagem da mistura carbonetante.

Eletrodo	Tungstênio com 2% de tório
Diâmetro do eletrodo [mm]	3,25
Bocal de proteção	n° 10
Tensão [V]/Corrente [A]	29/230
v [mm/min]	100, 125 e 175
Q [L/min]	12
E [kJ/mm]	1,8; 2,5 e 3,2

Fonte: Próprio autor.

3.3 PREPARAÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DAS AMOSTRAS

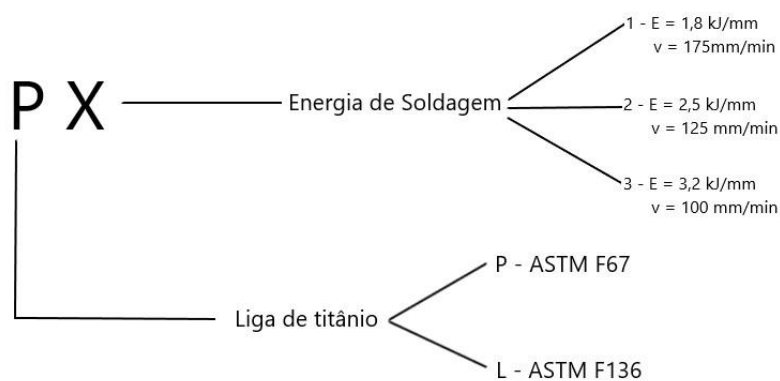
Após a soldagem, a peça foi cortada com a policorte da marca PANTEC modelo PANCUT 80, rotação de 3600 rpm, de acordo com a Figura 8 e identificadas de acordo com a outra figura. Foram realizados os processos de acabamento superficial, utilizando lixas de granulometria 80 a 1200, e posteriormente polidas com alumina de 1 μm e acabada com de 0,3 μm . A identificação das amostras seguiu o formato da Figura 9.

Figura 8 - Seção de corte das amostras .



Fonte: Próprio autor.

Figura 9 - Identificação das amostras.



Fonte: Próprio autor.

Para os cálculos estatísticos neste trabalho foi empregado um nível de significância de 5%(19).

Para o cálculo da média ($\bar{X}$), utilizou-se a Equação 1.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (1)$$

Onde X_i é o valor observado e n é o número total de observações.

Para o cálculo do erro padrão (E_i), utilizou-se a Equação 2.

$$E_i = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (2)$$

Onde σ é o desvio padrão.

3.4 ENSAIO DE MICRODUREZA VICKERS

No cordão de solda foi realizado a medição da dureza, utilizando-se de um ultramicrodurômetro digital da marca SHIMADZU, modelo DUH 211S, na qual determinou-se os valores de micro dureza Vickers (HV). A carga máxima utilizada para os ensaios foi de 1000 mN, mantidos por 5 segundos. As medidas foram feitas na superfície do cordão de solda em pontos aleatórios. Foram realizadas 10 medições para cada amostra.

3.5 ENSAIO DE DESGASTE MICRO ABRASIVO DE ESFERA FIXA

A máquina para o ensaio foi a máquina projetada e construída por Oliveira (2015), baseando-se na norma técnica ISO 26424-2008 [14] e “*Ball cratering or Micro Abrasion Wear Testing of Coatings*” (21).

Os parâmetros para o ensaio de micro desgaste abrasivo estão contidos na Tabela 3, utilizando como abrasivo carboneto de silício com granulometria média de 7 μm . Foram realizados 2 ensaios para cada percurso, ou distância de deslizamento,

(60, 84 e 120 m). Caso as crateras não tivessem tamanho similares, um terceiro ensaio foi realizado para a determinação do comportamento ao desgaste. A determinação das cargas está contida no apêndice A.

Tabela 3 - Parâmetros do ensaio de desgaste micro abrasivo de esfera fixa.

Tempo [min]	5, 7 e 10
Força Normal [N]	11,2 e 29,6
Rotação da esfera [rpm]	150
Diâmetro da esfera [mm]	25,4
Distância de deslizamento [m]	60, 84 e 120
Concentração do abrasivo [g/cm ³]	0,35
Gotejamento do abrasivo [gotas/10s]	1

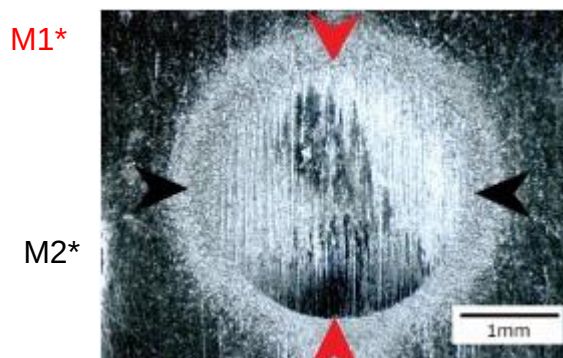
Fonte: Próprio autor.

3.5.1 Análise da cratera das ligas de titânio ASTM F 67 e ASMT F 136

Após o ensaio de desgaste micro abrasivo de esfera fixa, realizou-se a análise da cratera de desgaste, obtendo-se o diâmetro da cratera (d), no qual seu valor foi medido através do estereomicroscópio da marca ZEISS, modelo DISCOVERY V8, usando uma objetiva 1X com fator de ampliação (zoom) 2,5 em todas as imagens obtidas por uma câmera digital com resolução de 5 mega pixels.

Após o ensaio de desgaste micro abrasivo foram medidos os diâmetros das crateras, de acordo com o exemplo da Figura 10. Após a medição das crateras de desgaste, obteve-se o valor médio do diâmetro da cratera.

Figura 10 - Medição do diâmetro das crateras de desgaste.



*M1 e M2 – modo de medição do diâmetro da cratera.

Fonte: Próprio autor.

Com o valor determinado do diâmetro da cratera, pode-se calcular os valores da profundidade de penetração da esfera e do volume de material removido através das Equações (3) e (4), na qual são em função do diâmetro da cratera, conforme a norma ISO 26424:2008 (20).

$$h = \frac{d^2}{8R} \quad \text{para } d \ll R \quad (3)$$

$$V = \frac{\pi d^4}{64R} \quad \text{para } d \ll R \quad (4)$$

Considerando R, o raio da esfera usada no ensaio.

Para diferenciar desgaste abrasivo de desgaste micro abrasivo, utiliza-se alguns parâmetros como a taxa de desgaste (W), o coeficiente de desgaste (k) e o tamanho médio das partículas abrasivas utilizadas no processo de desgaste (5).

Quando se relaciona o volume da cratera de desgaste com a força normal, obtêm-se a equação de Archard (5), Equação 5 para o desgaste abrasivo.

$$V = kSN \quad (5)$$

Sendo k o coeficiente de desgaste, S a distância de deslizamento e N a força normal.

A taxa de desgaste (W) pode ser calculada pela Equação 6.

$$W = \frac{V}{S} \quad (6)$$

O coeficiente de desgaste (k) pode ser calculada pela Equação 7, substituindo a Equação 5 na Equação 6.

$$k = \frac{W}{N} \quad (7)$$

consideração a velocidade periférica da esfera (v_t) pelo tempo do ensaio (t), Equação 8.

$$S = v_t t \quad (8)$$

Como, v_t pode ser escrito na forma $v_t = 2\pi nR$ onde n é a rotação da esfera em rpm. Assim, reescrevendo a Equação 8 e substituindo o valor da velocidade periférica da esfera, obtêm-se a Equação 9.

$$S = 2\pi nRt \quad (9)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CORDÕES DE SOLDA DAS LIGAS DE TITÂNIO ASTM F 67 E ASTM F 136

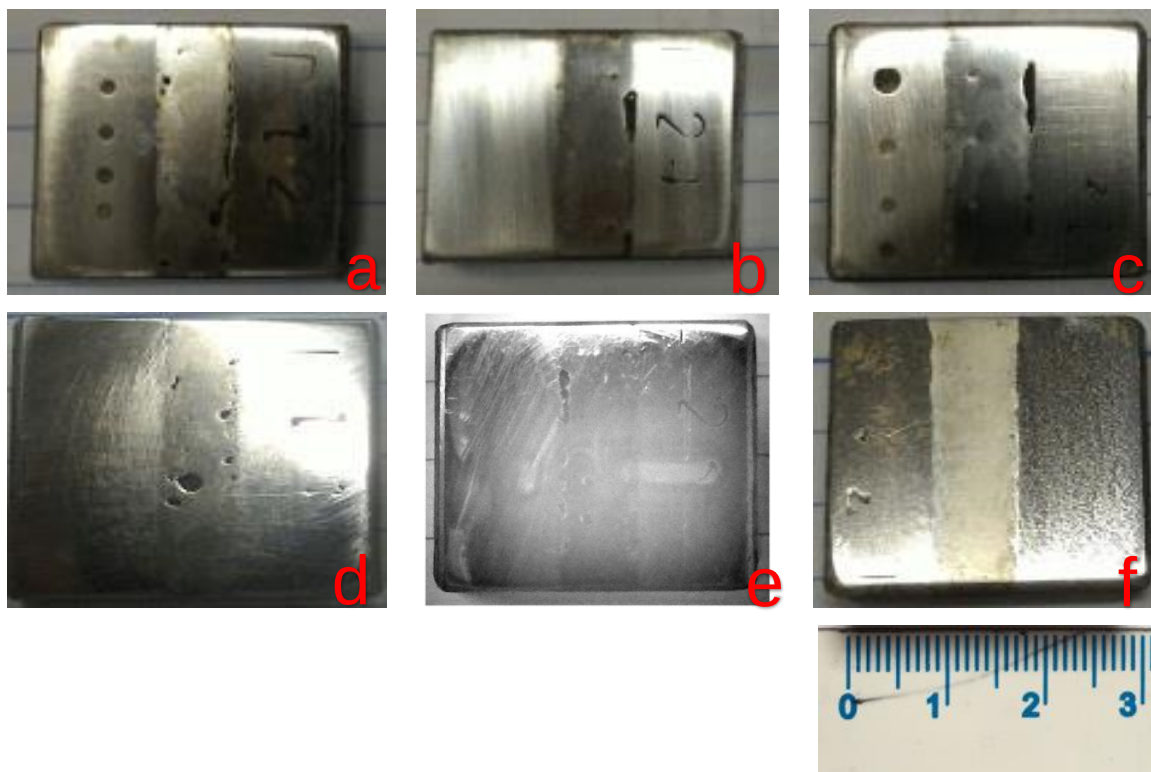
Após a soldagem das amostras das ligas de titânio ASTM F 67 (grau 4, titânio puro) e ASTM F 136 (Ti-6Al-4V) pelo processo *GTAW* e os processos de lixamento e polimento, observou-se pelo método de macrografia as imperfeições no cordão de solda e por microscopia eletrônica de varredura (MEV) a formação dos carbonetos de titânio.

4.1.1 Macrografia da superfície dos cordões de solda

Na Figura 11 estão representadas as superfícies dos cordões de solda das ligas de titânio, em que foram realizados os ensaios de desgaste micro abrasivo de esfera fixa.

Como pode-se observar nas imagens acima, alguns cordões de solda apresentaram cratera, decorrentes da soldagem, mas isso não teve impacto para a realização dos ensaios posteriores.

Figura 11 - Imagens dos cordões de solda das amostras ASTM F 67: a) 1,8kJ/mm, b) 2,5 kJ/mm, c) 3,2 kJ/mm; e ASTM F 136: d) 1,8 kJ/mm, e) 2,5 kJ/mm, f) 3,2 kJ/mm.

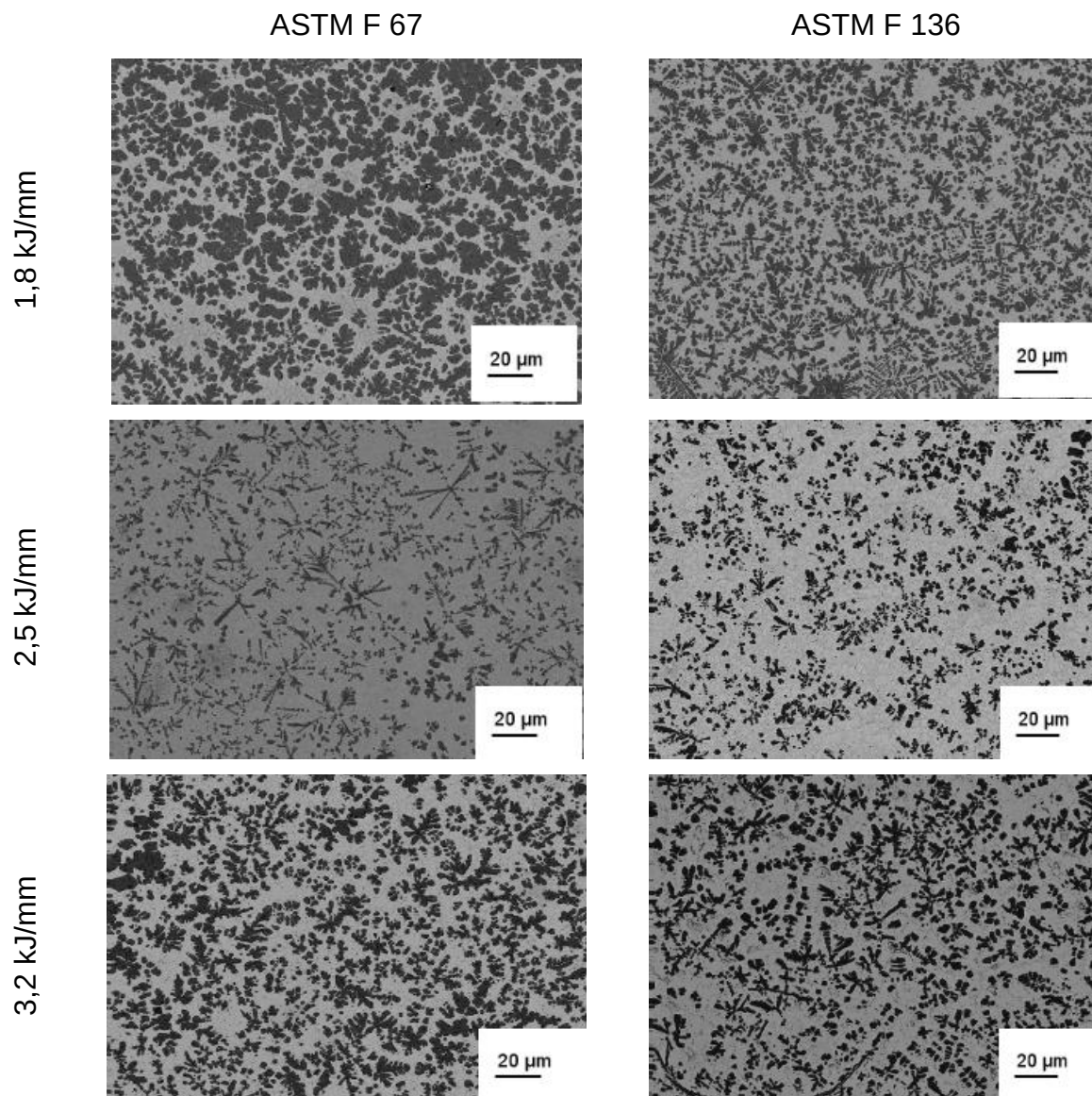


Fonte: Próprio autor.

4.1.2 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) por elétrons retroespalhados (BSE) dos cordões de solda

As micrografias geradas pelo MEV por detector de elétrons retroespalhados (BSE) expôs uma matriz ferrítica como sendo a fase predominante, e os carbonetos de titânio como uma segunda fase, e a distribuição desses carbonetos na matriz é uniforme, como mostra a Figura 12, no qual as áreas claras são a matriz ferrítica e as áreas escuras são os carbonetos dendríticos.

Figura 12 - Imagens geradas no MEV das amostras ASTM F 67 e ASTM F 136.



Fonte: Próprio autor.

4.2 ANÁLISE DA DUREZA DA SUPERFÍCIE DOS CORDÕES DE SOLDADA POR MICRO DUREZA VICKERS

Após realizado o ensaio de micro dureza Vickers na superfície do cordão de solda para cada liga de titânio, se obteve as médias de HV apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Médias e erro padrão das medidas de micro dureza Vickers do cordão de solda.

Amostra*	Energia [kJ/mm]	HV [kgf/mm ²]
P1	1,8	763 ± 144
P2	2,5	645 ± 90
P3	3,2	518 ± 53
L1	1,8	515 ± 33
L2	2,5	416 ± 33
L3	3,2	406 ± 30

Nota: *P – liga de titânio puro e L – Ti-6Al-4V

Fonte: Próprio autor.

O ensaio de micro dureza demonstrou que os cordões de solda formados por baixas energias de soldagem, apresentaram uma dureza mais elevada que os outros. Isso se dá pela concentração de carbonetos em determinadas regiões, influenciando dureza, já que com altas energias, há uma maior dispersão dos carbonetos. Isso também foi observado no trabalho de Macedo (22), em que a diminuição da dureza com o avanço das medidas do corpo-de-prova contendo titânio se deu pela distribuição dos carbonetos de titânio na matriz, sem a presença de regiões de aglomeração dos mesmos.

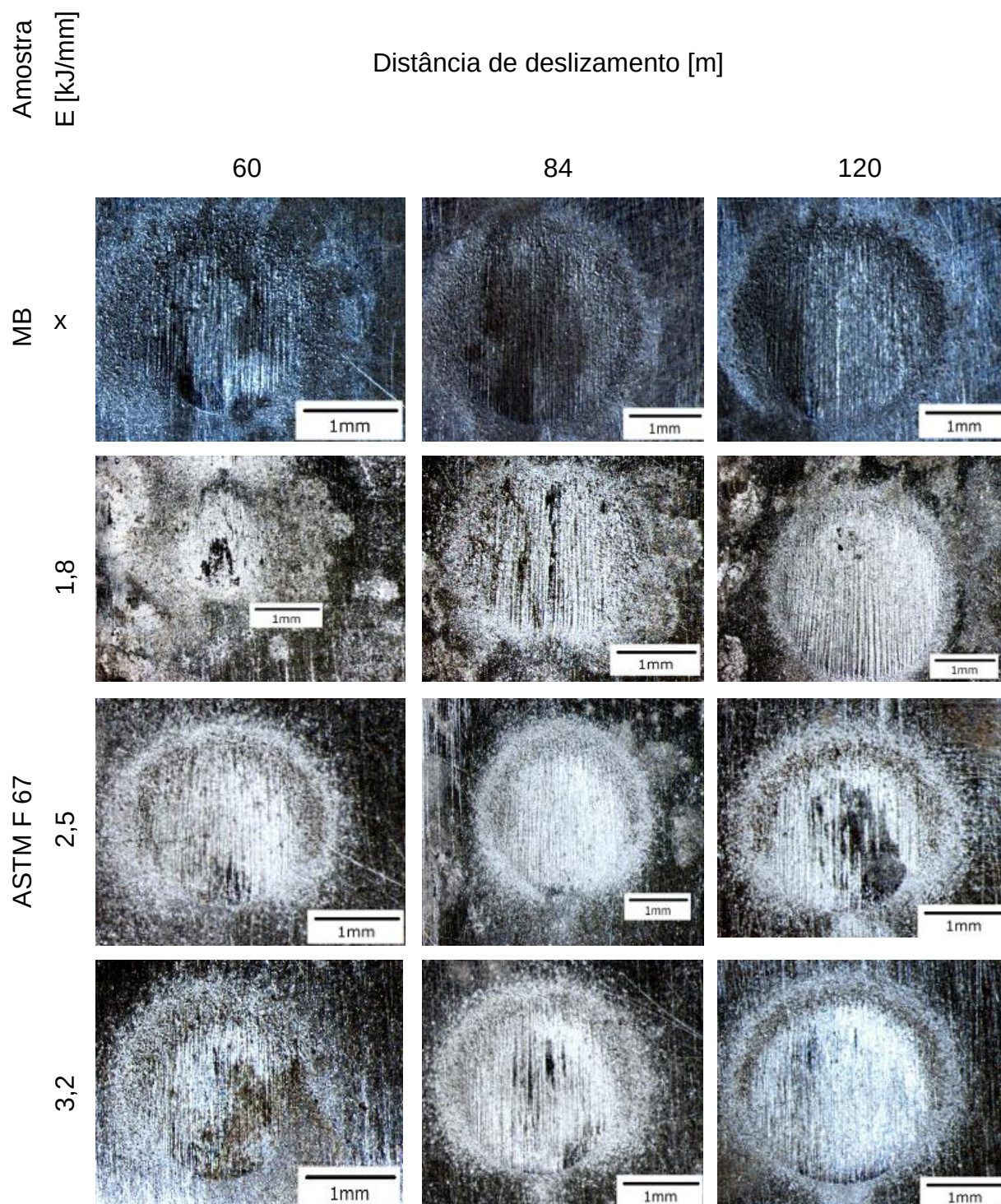
Quando se observa o tipo de liga a dureza mostrou-se superior nas ligas de ASTM F 67, pois a microestrutura demonstrou carbonetos mais grosseiros em baixa energia na liga ASTM F 67, e a distribuição dos carbonetos na matriz com o aumento da energia são menores comparados com a mesma energia na liga ASTM F 136, e isso influenciou numa maior dureza para a liga ASTM F 67.

4.3 ANÁLISE DA RESISTÊNCIA AO DESGASTE MICRO ABRASIVO DOS CORDÕES DE SOLDA

4.3.1. Volume de desgaste com cargas de 11,2 N e 29,5 N para aço ASTM A 36 e cordões de solda das ligas de titânio ASTM F 67 e ASTM F 136

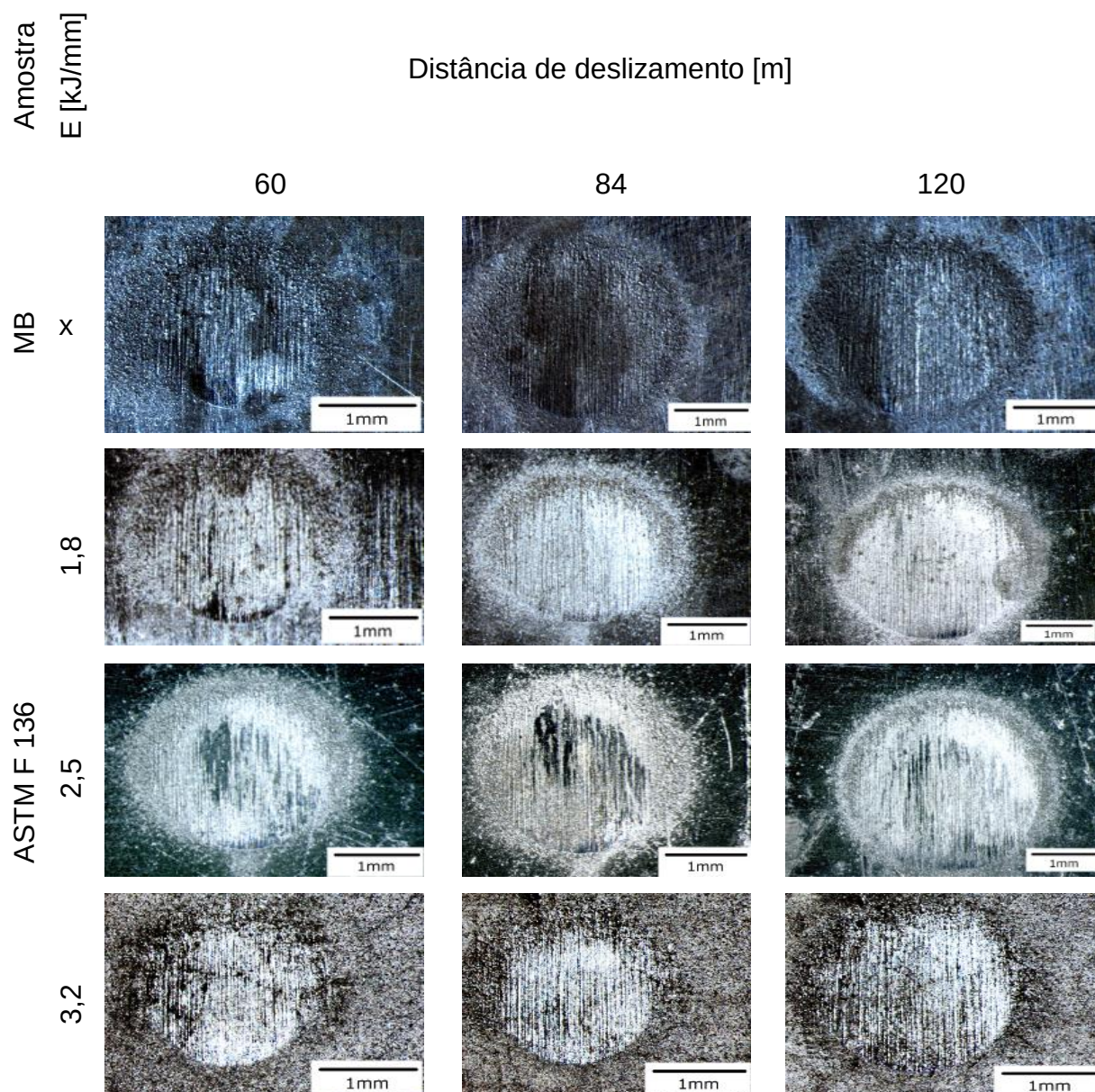
Para exemplificar as crateras de desgaste para cada distância de deslizamento, na Figura 13 estão representados o aço ASTM A 36 e o cordão de solda da liga ASTM F 67 e, na Figura 14 estão representados o aço ASTM A 36 e o cordão de solda da ASTM F 136, para carga de 11,2 N.

Figura 13 - Exemplo de crateras de desgaste do aço ASTM A 36 e do cordão de solda ASTM F 67 com carga de 11,2 N.



Fonte: Próprio autor.

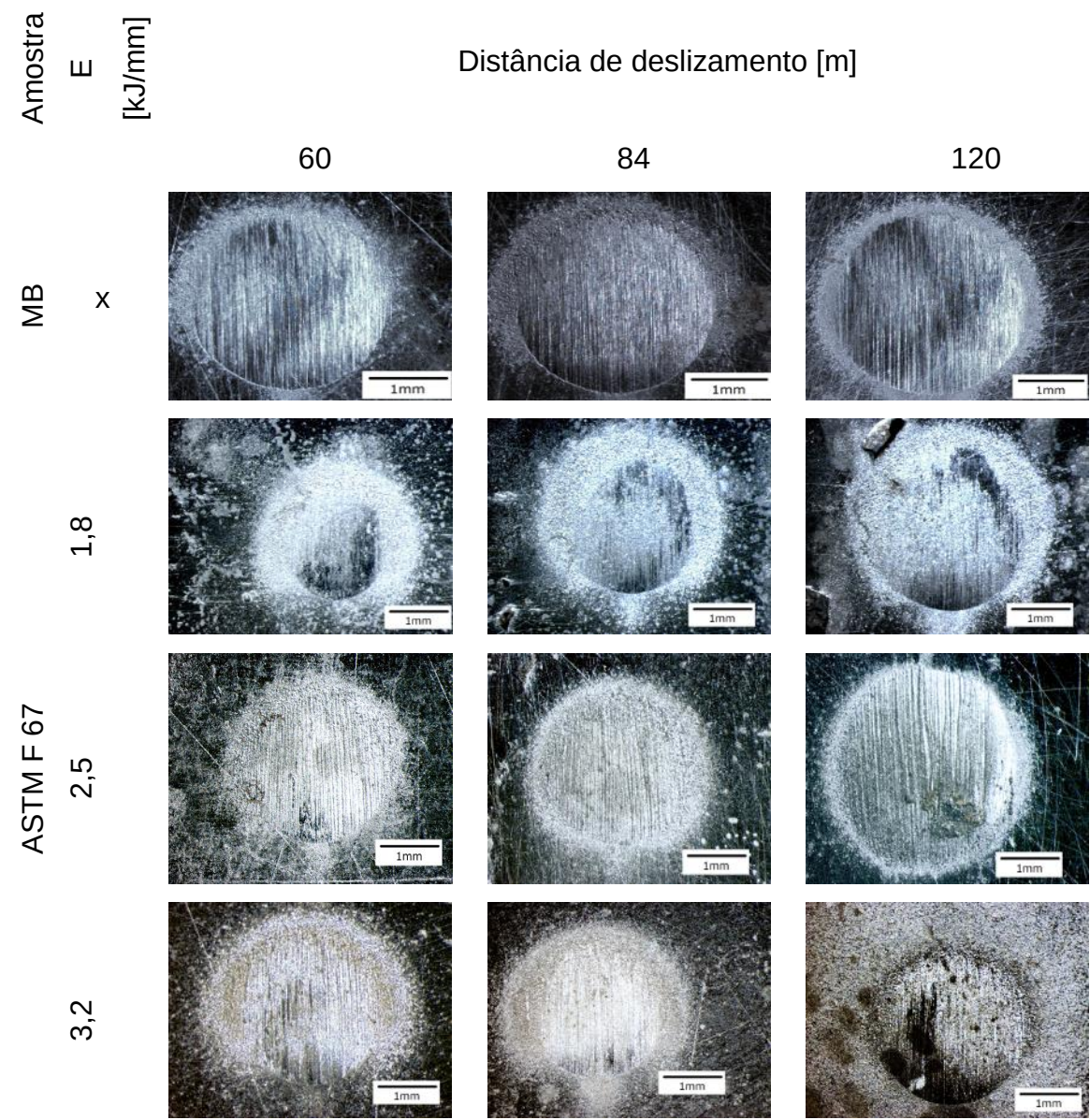
Figura 14 - Exemplo de crateras de desgaste do aço ASTM A 36 e do cordão de solda ASTM F 136 com carga de 11,2 N.



Fonte: Próprio autor.

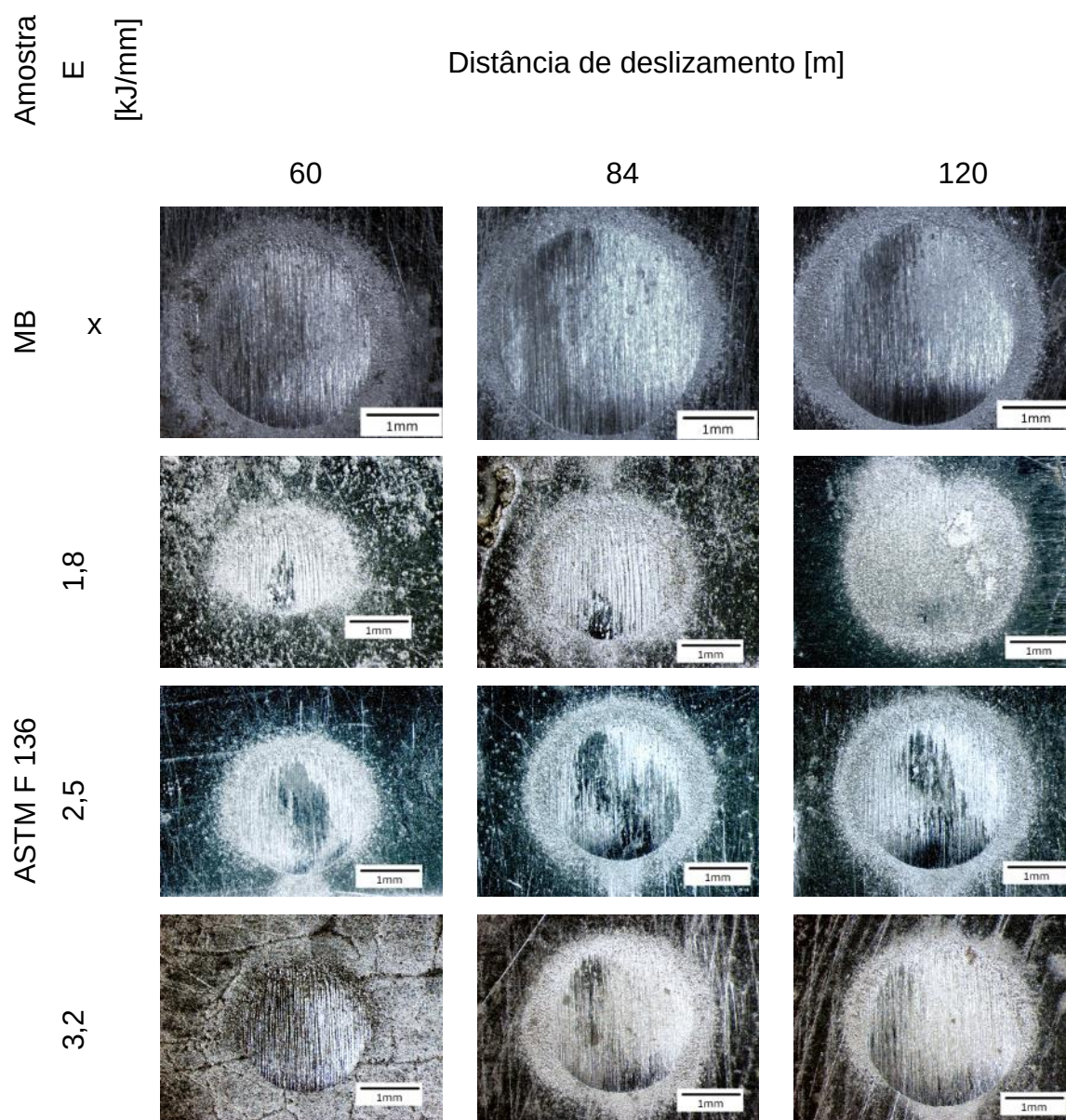
Para exemplificar as crateras de desgaste para cada distância de deslizamento, na Figura 15 estão representados o aço ASTM A 36 e o cordão de solda da liga ASTM F 67 e, na Figura 16 estão representados o aço ASTM A 36 e o cordão de solda da ASTM F 136, para carga de 29,6 N.

Figura 15 - Exemplo de crateras de desgaste do aço ASTM A 36 e do cordão de solda ASTM F 67 com carga de 29,6 N.



Fonte: Próprio autor.

Figura 16 - Exemplo de crateras de desgaste do aço ASTM A 36 e do cordão de solda ASTM F 136 com carga de 29,6N.



Fonte: Próprio autor.

Nas Figura 13, Figura 14, Figura 15 e Figura 16 pode-se observar que o tamanho das crateras dos cordões de solda das ligas de titânio em relação ao aço ASTM A 36 são menores, assim, o processo de revestimento duro da reciclagem de

cavacos como insumos do processo *GTAW* aumentou a resistência ao desgaste do aço ASTM A 36, independentemente da energia.

Os valores do volume médio de desgaste, para carga de 11,2 N, são indicados na Tabela 5 para o aço ASTM A 36 e na Tabela 6 para os cordões de ligas de titânio ASTM F 67 e ASTM F 136.

Tabela 5 - Volume médio de desgaste para o aço ASTM A 36 para carregamento de 11,2 N.

Distância de deslizamento [m]	0	60	84	120
Volume médio de desgaste [mm ³]	0	0,049	0,133	0,238

Fonte: Próprio autor.

Tabela 6 - Volume médio de desgaste das ligas ASTM F 67 e ASTM F 136 para carregamento de 11,2 N.

		Distância de deslizamento [m]			
		0	60	84	120
Amostra	E [kJ/mm]	Volume médio de desgaste [mm ³]			
ASTM F67	1,8	0	0,006	0,089	0,202
	2,5	0	0,046	0,072	0,123
	3,2	0	0,030	0,065	0,111
ASTM F136	1,8	0	0,006	0,085	0,181
	2,5	0	0,045	0,066	0,110
	3,2	0	0,028	0,041	0,077

Fonte: Próprio autor.

A tabela completa para carga de 11,2 N encontra-se no apêndice C.

Os valores do volume médio de desgaste, para força normal de 29,6 N, são indicados na Tabela 7 para o aço ASTM A 36 e na Tabela 8 para os cordões das ligas de titânio ASTM F 67 e ASTM F 136.

Tabela 7 - Volume médio de desgaste para o aço ASTM A 36 para carregamento de 29,6N.

Distância de deslizamento [m]	0	60	84	120
Volume médio de desgaste [mm ³]	0	0,140	0,204	0,308

Fonte: Próprio autor.

Tabela 8 - Volume médio de desgaste das ligas ASTM F 67 e ASTM F 136 para carregamento de 29,6N.

		Distância de deslizamento [m]			
		0	60	84	120
Amostra	E [kJ/mm]	Volume médio de desgaste [mm ³]			
ASTM F67	1,8	0	0,034	0,135	0,233
	2,5	0	0,084	0,179	0,274
	3,2	0	0,067	0,099	0,166
ASTM F136	1,8	0	0,036	0,107	0,230
	2,5	0	0,081	0,155	0,247
	3,2	0	0,065	0,093	0,157

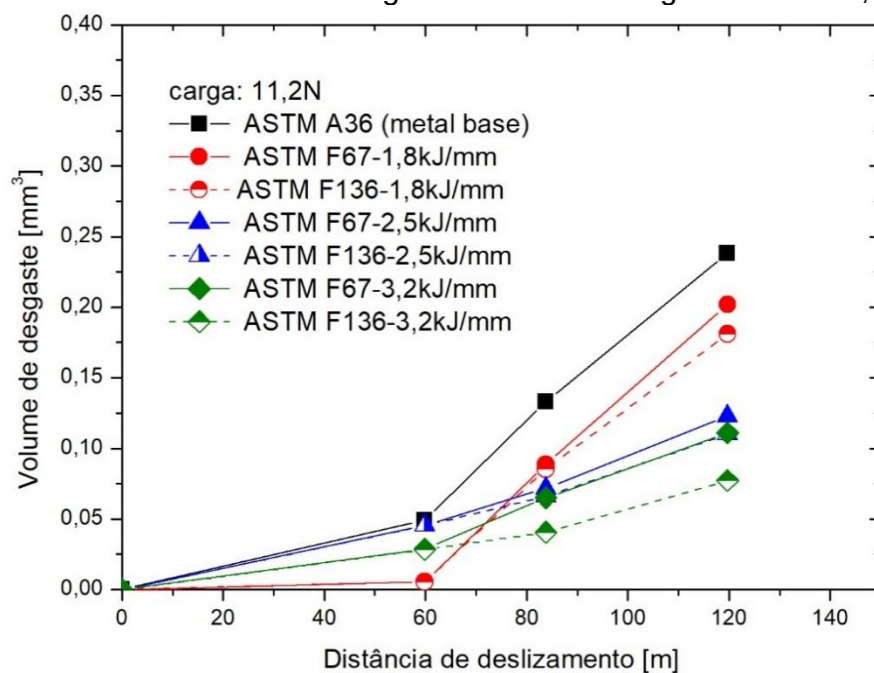
Fonte: Próprio autor.

A tabela completa para carga de 29,6 N encontra-se no apêndice D.

Com os valores da Tabela 5 e da

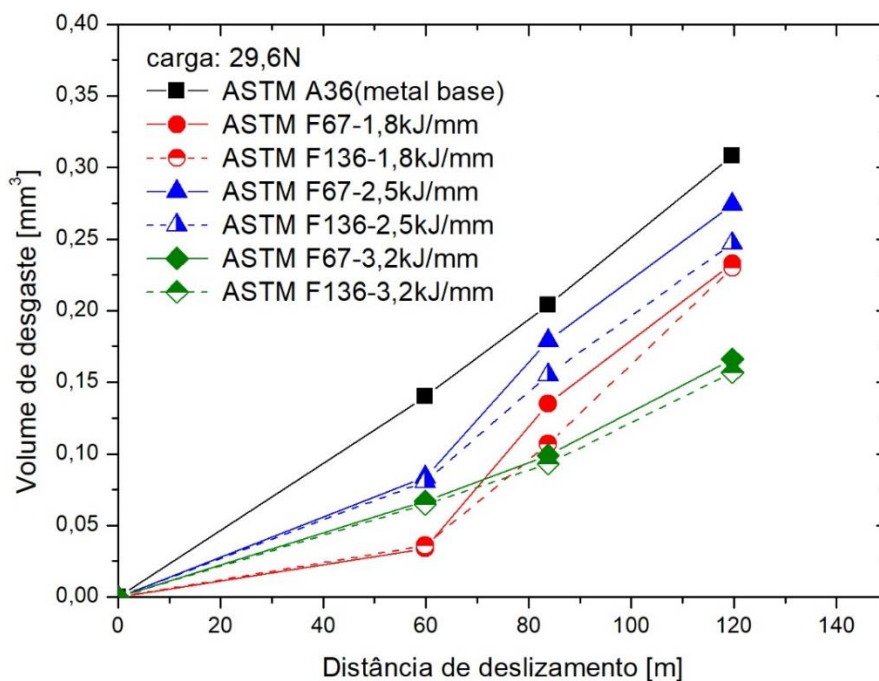
Tabela 6 construiu-se o gráfico conforme a Figura 17 para carga de 11,2 N e, com os valores da Tabela 7 e da Tabela 8, construiu-se o gráfico conforme a Figura 18 para carga de 29,6 N, do volume de desgaste por distância de deslizamento.

Figura 17 - Variação do volume de desgaste com a distância de deslizamento durante os ensaios de micro desgaste abrasivo. Carga nominal 11,2N.



Fonte: Próprio autor.

Figura 18 - Variação do volume de desgaste com a distância de deslizamento durante os ensaios de micro desgaste abrasivo. Carga nominal 29,6N.



Fonte: Próprio Autor.

Nas Figura 17 e 18 percebe-se que o desgaste no aço ASTM A 36 foi superior ao verificado no metal de solda GTAW, independentemente da carga aplicada durante o ensaio de micro desgaste abrasivo. O aumento da energia de soldagem contribuiu para reduzir o desgaste do metal de solda ensaiado em percursos mais longos. O incremento da energia de soldagem influencia diretamente a microestrutura do metal de solda, favorecendo a diluição química e a redução da dureza da material. O aumento da carga de ensaio de 11,2N para 29,6N incrementou significativamente o volume de desgaste. Inicialmente o desgaste foi atenuado no metal de solda produzido com baixa energia de soldagem (1,8 kJ/mm), pois este material apresentou menor diluição após a soldagem (14). No entanto, com a estabilização da cratera de desgaste decorrente do aumento do percurso dos ensaios de micro desgaste esta vantagem deixou de existir, sendo o volume de desgaste mais reduzido nas amostras ASTM F 136/3,2 kJ/mm observadas no maior percurso ensaiado. Assim, o metal de solda produzido com cavacos da liga ASTM F 136 fundidos com alta energia de soldagem (3,2 kJ/mm) mostraram o melhor desempenho no processo abrasivo, sendo o desgaste nesta condição entre 50 a 68% do observado para o aço ASTM A 36. Uma provável explicação para este comportamento deve estar relacionada ao fato que a microestrutura do metal de solda seja mais homogênea, apresentando menor gradiente de dureza entre os carbonetos de titânio e a matriz ferrítica endurecida por solução sólida e precipitação fina de carbonetos.

4.3.2. Coeficiente de desgaste para o aço ASTM A 36 e as ligas de titânio ASTM F 67 e ASTM F 136 com carga de 11,2 N e 29,6 N

Na Tabela 9 encontram-se os valores do coeficiente de desgaste (k) do aço ASTM A 36 para as cargas de 11,2 e 29,6 N.

Tabela 9 - Coeficiente de desgaste para o aço ASTM A 36.

	Distância de deslizamento			
	0	60	84	120
Força [N]	Coeficiente de desgaste [MPa ⁻¹]			
11,2	0	$7,32 \times 10^{-8}$	$1,41 \times 10^{-7}$	$1,78 \times 10^{-7}$
29,6	0	$7,89 \times 10^{-8}$	$8,22 \times 10^{-8}$	$8,69 \times 10^{-8}$

Fonte: Próprio autor.

Nas Tabela 10 e Tabela 11 encontram-se os valores do coeficiente de desgaste das ligas de titânio com carregamento de 11,2N e 29,6N, respectivamente.

Tabela 10 - Coeficiente de desgaste das ligas de titânio ASTM F 67 e ASTM F 136 com carga de 11,2 N.

		Distância de deslizamento [m]			
		0	60	84	120
Amostra	E [kJ/mm]	Coeficiente de desgaste k [MPa ⁻¹]			
ASTM F67	1,8	0	$8,21 \times 10^{-9}$	$9,43 \times 10^{-8}$	$1,50 \times 10^{-7}$
	2,5	0	$6,79 \times 10^{-8}$	$7,64 \times 10^{-8}$	$9,21 \times 10^{-8}$
	3,2	0	$4,30 \times 10^{-8}$	$6,93 \times 10^{-8}$	$8,25 \times 10^{-8}$
ASTM F136	1,8	0	$8,14 \times 10^{-9}$	$9,09 \times 10^{-8}$	$1,35 \times 10^{-7}$
	2,5	0	$6,75 \times 10^{-8}$	$7,03 \times 10^{-8}$	$8,21 \times 10^{-8}$
	3,2	0	$4,22 \times 10^{-8}$	$4,32 \times 10^{-8}$	$5,77 \times 10^{-8}$

Fonte: Próprio autor.

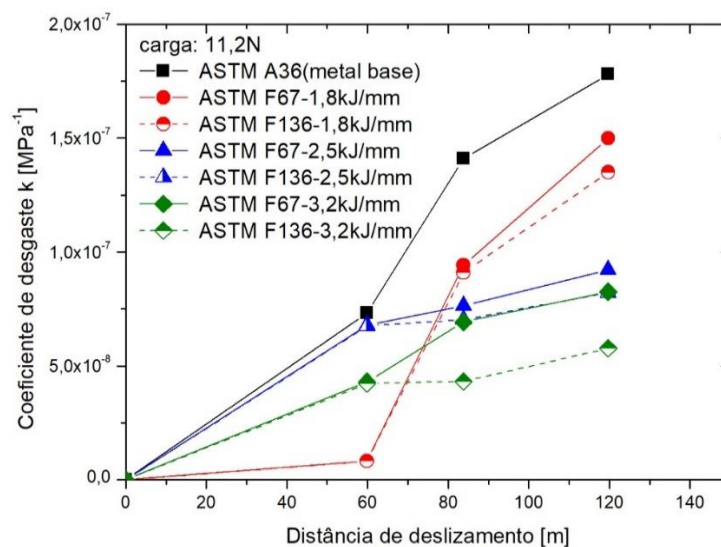
Tabela 11 - Coeficiente de desgaste das ligas de titânio ASTM F 67 e ASTM F 136 com carga de 29,6 N.

		Distância de deslizamento [m]			
		0	60	84	120
Amostra	E [kJ/mm]	Coeficiente de desgaste k [MPa ⁻¹]			
ASTM F67	1,8	0	$1,91 \times 10^{-8}$	$5,43 \times 10^{-8}$	$6,56 \times 10^{-8}$
	2,5	0	$4,73 \times 10^{-8}$	$7,23 \times 10^{-8}$	$7,74 \times 10^{-8}$
	3,2	0	$3,78 \times 10^{-8}$	$3,99 \times 10^{-8}$	$4,69 \times 10^{-8}$
ASTM F136	1,8	0	$2,03 \times 10^{-8}$	$4,30 \times 10^{-8}$	$6,49 \times 10^{-8}$
	2,5	0	$4,55 \times 10^{-8}$	$6,24 \times 10^{-8}$	$6,97 \times 10^{-8}$
	3,2	0	$3,65 \times 10^{-8}$	$3,75 \times 10^{-8}$	$4,43 \times 10^{-8}$

Fonte: Próprio autor.

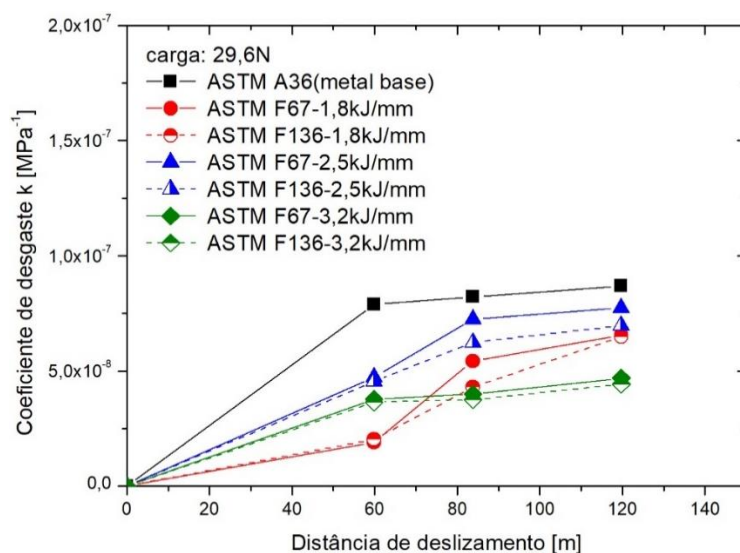
Com esses valores, construiu-se o gráfico do coeficiente de desgaste pela distância de deslizamento: a Figura 19 para o carregamento de 11,2 N e a Figura 20 para o carregamento de 29,6 N.

Figura 19 - Variação do coeficiente de desgaste com a distância de deslizamento durante os ensaios de micro desgaste abrasivo. Carga nominal 11,2 N.



Fonte: Próprio autor.

Figura 20 - Variação do coeficiente de desgaste com a distância de deslizamento durante os ensaios de micro desgaste abrasivo. Carga nominal 29,6 N.

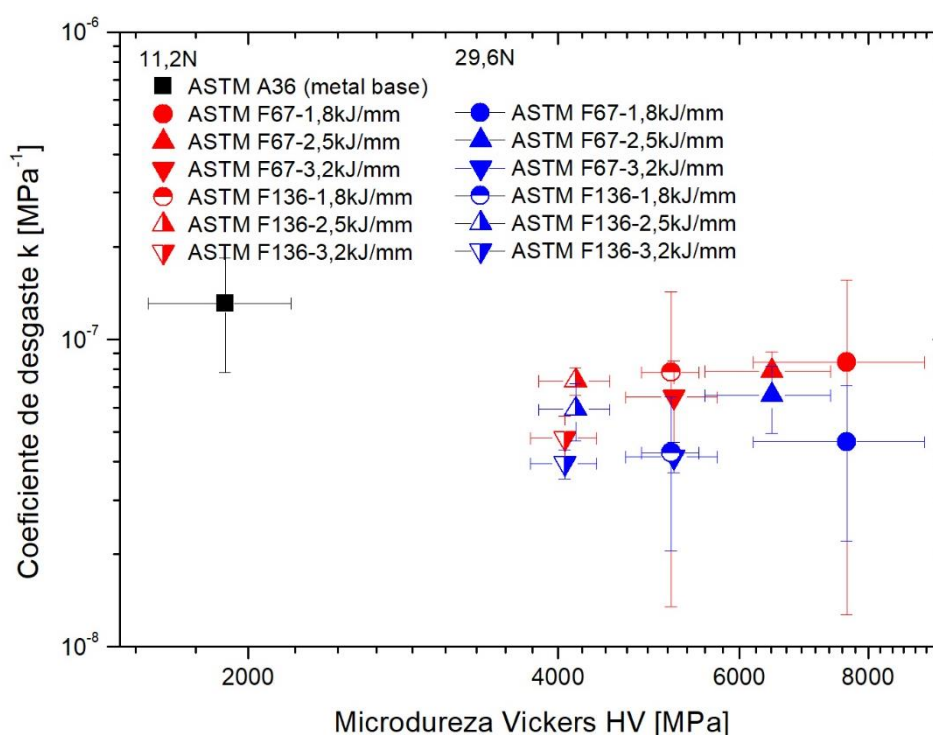


Fonte: Próprio autor.

As Figura 19 e Figura 20 mostram o efeito da carga aplicada durante os ensaios de micro desgaste abrasivo sobre o coeficiente de desgaste k . A carga de

11,2N promoveu uma variação crescente do coeficiente k , enquanto este parâmetro mostrou certo patamar de estabilização com o aumento do percurso de desgaste com a aplicação da força de 29,6N durante o ensaio. Isto pode sugerir que o desgaste verificado no aço ASTM A 36 ou no metal de solda GTAW após deslizamento de 60 metros inicie um processo de estabilização, pois a superfície da cratera seria capaz de distribuir mais homogeneamente as tensões e as deformações plásticas envolvidas no processo abrasivo. Independentemente da carga do ensaio o coeficiente de desgaste k foi significativamente menor no início do processo de desgaste para as amostras produzidas com menor energia de soldagem, sugerindo que o metal de solda mais duro e com menor diluição seja inicialmente mais resistente à abrasão. No entanto, ultrapassada a fase inicial do desgaste o processo abrasivo é atenuado no metal de solda mais diluído e com menor dureza média produzido com maior energia de soldagem, particularmente a amostra ASTM F 136/3,2 kJ/mm.

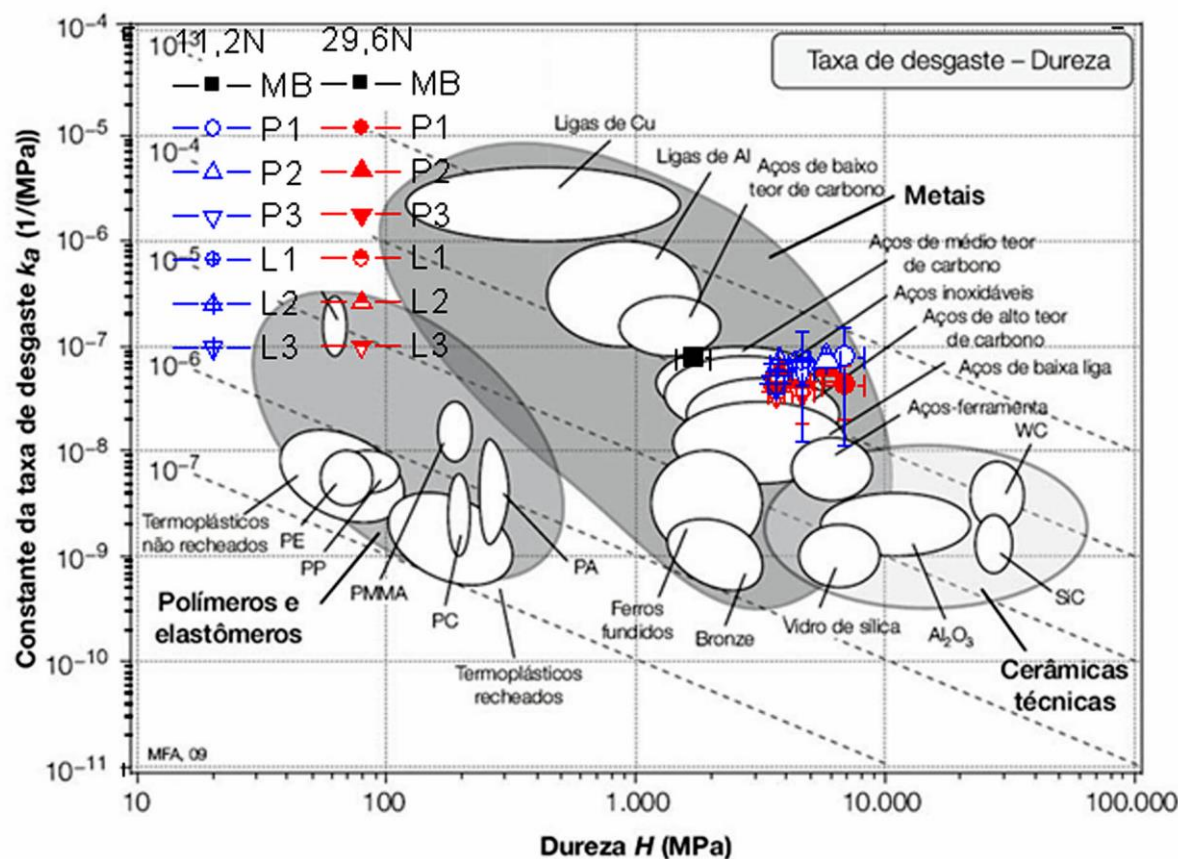
Figura 21 - Variação do coeficiente de desgaste com a dureza Vickers dos materiais ensaiados por micro desgaste abrasivo nas cargas de 11,2 N e 29,6 N.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 21 mostra que o metal de solda produzido por cavacos de titânio ASTM F 67 com menor energia de soldagem são mais duros. Materiais com menores valores de coeficiente de desgaste podem ser interpretados como mais resistentes ao desgaste abrasivo. A Figura 21 mostra que este comportamento está ocorrendo com a redução da dureza do material, sugerindo que materiais muito duros, ao sofrerem desgaste, geram resíduos extremamente abrasivos eficazes na remoção do metal de solda reforçado pelos carbonetos de titânio. Isto significa que a melhoria da superfície não passa somente pelo aumento da dureza do material, mas pelo controle da microestrutura, que deve formar carbonetos que sejam difíceis de serem erodidos, quebrados e/ou arrancados do metal de solda. Para esta finalidade a aplicação do metal de solda composto por cavacos da liga ASTM F 136 fundidos com elevada energia de soldagem (3,2 kJ/mm) mostrou melhores resultados.

Figura 22 - Ajuste dos resultados experimentais obtidos neste trabalho com o mapa da taxa de desgaste (ou coeficiente de desgaste) em função da dureza dos materiais de engenharia. Os pontos assinalados são referentes aos valores médios e a dispersão expressão pelo desvio-padrão dos mesmos.



Fonte: Adaptado de M. F. ASHBY (23).

A Figura 22 mostra um bom ajuste dos resultados médios obtidos com o mapa da taxa de desgaste em função da dureza (23).

5 CONCLUSÕES

Os cordões de solda produzidos por reciclagem de cavacos apresentaram um bom desempenho ao desgaste abrasivo, independentemente da carga aplicada, especialmente quando este cordão foi preparado com alta energia de soldagem (3,2 kJ/mm).

O aumento da carga de ensaio de 11,2 N para 29,6 N influenciou no aumento do volume de desgaste. No começo do desgaste, o metal de solda produzido com baixa energia de soldagem apresentou melhor desempenho, por este material possuir uma menor taxa de diluição. Porém, com a estabilização do processo de desgaste decorrente do aumento do percurso (ou distância de deslizamento) dos ensaios, esse benefício deixou de existir, sendo a amostra ASTM F 136 preparada com alta energia de soldagem, a que apresentou menor volume de desgaste nos maiores percursos.

A carga de ensaio em relação ao coeficiente de desgaste k demonstrou-se que para uma carga de 11,2 N promoveu uma variação crescente do coeficiente, enquanto que para uma carga de 29,6 N houve um patamar de estabilização com o aumento da distância de deslizamento. A amostra que obteve melhores resultados em relação a estabilização do desgaste com o aumento da distância foi o cordão de solda mais diluído e com menor dureza média produzido com alta energia de soldagem, particularmente o material ASTM F136/3,2kJ/mm.

A liga ASTM F 67 produzido por baixa energia de soldagem apresentou maior dureza em relação as outras ligas e energias de soldagem, porém, o seu desempenho ao desgaste foi menor em relação as outras ligas, pelo fato de que materiais mais duros quando sofrem desgaste geram partículas abrasivas eficazes na remoção do metal de solda. Já a liga ASTM F 136 produzida por alta energia de soldagem apresentou melhor desempenho ao desgaste, por essa amostra possuir uma microestrutura com carbonetos mais difíceis de serem arrancados do metal de solda.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Instrumentação da máquina de desgaste micro abrasivo de esfera fixa;
- Analisar a microestrutura do cordão de solda das ligas ASTM F 67 e ASTM F 136;
- Analisar o comportamento ao desgaste abrasivo dos cordões de solda para distâncias de deslizamento maiores;
- Comparar o comportamento ao desgaste abrasivo dos processos *GTAW* e *GTAW* parcialmente refundido por laser Nd: YAG pulsado;
- Analisar o comportamento ao desgaste abrasivo: abrasivo com diferentes concentrações.

REFERÊNCIAS

- 1 GAHR, K. H. Z. **Microstrucuture and wear of materials**. New York: North Holland, 1987. v.10. 560 p.
- 2 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIAL – ASTM. **ASTM - G-40 – 15**: standard terminology relating to wear and erosion. Materials Park: Annual Book of ASTM, 2015.
- 3 SANTOS, W. C. et al., Desenvolvimento de dispositivo e estudo do comportamento ao microdesgaste abrasivo do aço AISI 420 temperado e revenido. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 20, n. 2, p. 304 – 315, 2015.
- 4 DETTOGNI, M. A. **Principais mecanismos de desgaste e avaliação de diferentes ligas para corpos moedores**. 2010. 59 f. Tese (Especialização em Beneficiamento Mineral) – Faculdade de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP, Ouro Preto, 2010.
- 5 OLIVEIRA, D. L. **Construção de um equipamento de ensaio de desgaste micro abrasivo por esfera rotativa fixa para análise do desgaste em revestimento duro aplicado por soldagem**. 2015. 85 f. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, 2015.
- 6 PETERSON, M. B.; WINER, W. O. **Wear control handbook**. New York: ASME, 1980. p. 1358.
- 7 PEREIRA, Carlos H. S. **Um estudo sobre a dureza e os mecanismos de desgaste de materiais metálicos em altas temperaturas**. 2010. 67 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia dos Materiais) - Faculdade de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis, 2010.
- 8 EWALD, H. **Estudo do desgaste por erosão de ligas metálicas utilizadas em sistemas mecânicos de plantas siderúrgicas**. 2011. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade do Espírito Santo - UFES, Vitória, 2011.
- 9 COZZA, R. C. **Estudo de comportamento de coeficiente de desgaste e dos modos de desgaste abrasivo em ensaios de desgaste micro abrasivo**. 2006. 197f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica – POLI, Universidade de São Paulo - USP São Paulo, 2006.
- 10 STACHOWIAK, G. B.; STACHOWIAK, G. W. Wear mechanisms in ball-cratering tests with large abrasive particles. **Wear**, Amsterdam, v. 256, n. 6, p. 600-607, 2004. DOI: 10.1016/j.wear.2003.10.029.

- 11 COZZA, R. C. **Estudo do desgaste e atrito em ensaio micro-abrasivo por esfera rotativa fixa em condições de força normal constante e pressão constante**. 2011. 290f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica – POLI, Universidade de São Paulo - USP São Paulo, 2011.
- 12 HUTCHINGS, I. M. **Tribology**: friction and wear of engineering materials. Boca Raton: CRC, 1992, 272 p.
- 13 LIMA, Ademir C. et. al., Soldagem de revestimentos duros em facas picadoras de cana-de-açúcar de indústria sucroalcooleira: eletrodo revestido “versus” arame tubular. In: CONGRESSO NORTE-NORDESTE DE PESQUISA E INOVAÇÃO - CONNEPI, 7., 2012, Palmas. **Anais...**Palmas: Instituto Federal do Tocantins, 2012. p. 8.
- 14 FAGUNDES JÚNIOR, J. G. **Reciclagem de cavacos para a formação de carbonetos de titânio no metal de solda produzido por soldagem GTAW em aço-carbono**. 2015. 80 f. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista – UNESP, Ilha Solteira, 2015.
- 15 FONSECA, A. S. **Soldagem TIG**. Varginha: Centro de Formação Profissional “Aloysio Ribeiro de Almeida” – SENAI, 2004. 29 p. Apostila.
- 16 AMERICAN STANDART FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. **F 67 – 60**: standard specification forunalloyed titanium, for surgical implant applications (UNSR 50250, UNSR 50400, UNSR 50550, UNSR 50700). West Conshohocken, 2006.
- 17 AMERICAN STANDART FOR TESTING AND MATIRIALS - ASTM. **F 136 – 02^a**: standard specification for wrought titanium-6aluminum-4vanadium eli (extra low interstitial) alloy for surgical implant applications (UNSR 56401). West Conshohocken, 2002.
- 18 IMPLALIFE BIOTECNOLOGIA. Site. Jales, 2015. Disponível em: <<http://www.implalife.com.br/>>. Acesso em: 5 ago 2015.
- 19 CORREA, S. M. B. B. **Probabilidade e estatística**. 2 ed. Belo Horizonte: PUC Minas Virtual, 2003. 116 p.
- 20 INTERNATIONAL STANDART ORGANITION – ISO. **ISO - 26424 -2008**: fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics) – determination of the abrasion resistance of coatings by a micro-scale abrasion test. Switzerland, 2008.
- 21 GEE, M. G. et al. Ball cratering or micro-abrasion wear testing of coatings. **Measurement Good Practice Guide**, Middlesex, n. 57, 2002. Disponível em: <<http://www.npl.co.uk/publications/ball-cratering-or-micro-abrasion-wear-testing-ofcoatings> >. Acesso em: 14 nov. 2015.

- 22 Macedo, B. P. N. GALLEGO, J. **Efeito da morfologia dos carbonetos e da variação da microdureza em revestimentos duros resistentes ao desgaste abrasivo com aplicação na indústria sucroalcooleira.** Florianópolis: CREEM, 2009. v. 16. 6 p.
- 23 ASHBY, M. F. **Materials selection in mechanical design.** 4 ed. New York: Elsevier, 2011. 646 p.

APÊNDICE A - DETERMINAÇÃO DA CARGA DO ENSAIO

Para a determinação da força normal do contato amostra/esfera, utilizou-se uma célula de carga (Figura 23**Erro! Fonte de referência não encontrada.**) de 10 kg e precisão de 1 g.

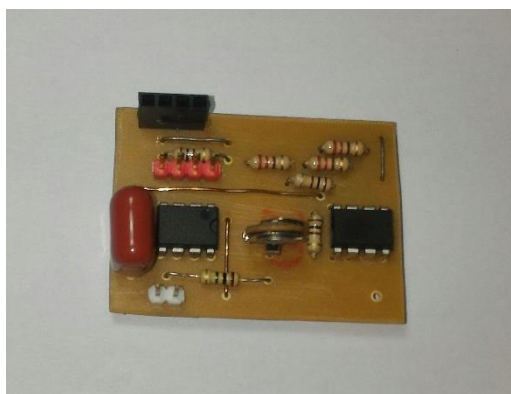
Figura 23 - Célula de carga de balança digital.



Fonte: Próprio autor.

O circuito para a leitura dos valores de tensão da célula foi confeccionado com um leitor da ponte de Wheatstone (*Strain Gauge* da célula) e um amplificador de sinal, como mostra a Figura 24.

Figura 24 - Circuito de leitura da célula de carga.



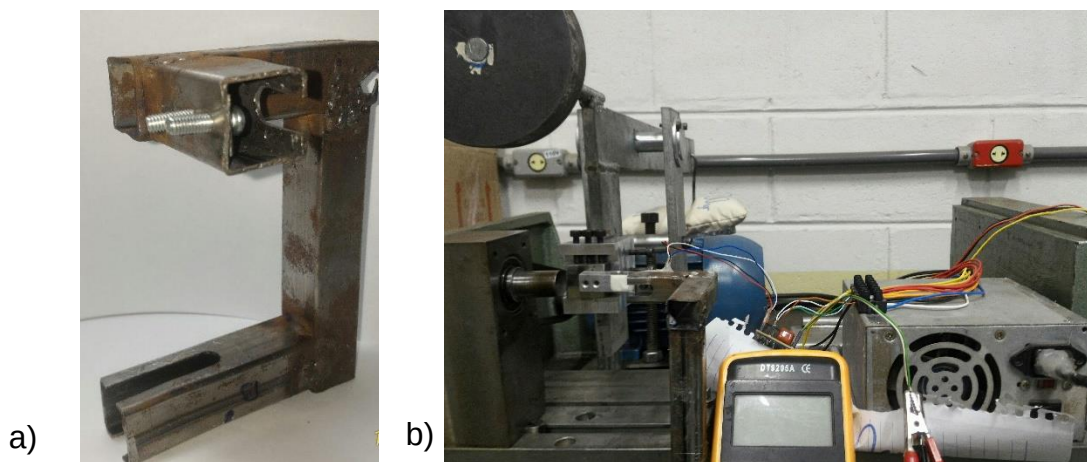
Fonte: Próprio autor.

A ponte de Wheatstone faz a conversão da deformação do *Strain Gauge* da célula em tensão. Porém a tensão gerada é muito baixa, então se utiliza de um circuito amplificador para que possa ser lido em um multímetro. Para a alimentação do circuito, utilizou-se uma fonte de 200 W e para leitura do sinal um multímetro da marca modelo.

Para efeito de calibração, utilizou-se de um durômetro Brinell/Vickers calibrado, com carga fixa de 5kg/49N, para determinação da relação força x tensão.

Após aferido a célula, construiu-se uma estrutura metálica com mostra a Figura 25a. Fez-se um rasgo em sua base para que se pudesse ajustar a base para ficar na mesma posição da esfera para realizar as medições. Para a determinação da carga montou-se o dispositivo segundo a Figura 25b.

Figura 25 - Célula de carga: a) estrutura de suporte para célula de carga; b) montagem para medição da tensão.



Fonte: Próprio autor.

Para peso-morto foram confeccionados *bags* de areia 3 de 100 g e 2 de 400g, como mostra a Figura 26.

Figura 26 - Bags de areia para peso-morto.



Fonte: Próprio autor.

A medições foram feitas inserindo ao peso-morto de 804g os *bags* de 100g, 200g, 300g, 400g e 800g, uma de cada vez, e observando a tensão lida no multímetro. Com esses valores, determinou-se o valor da carga que estava sendo aplicada no contato amostra/esfera, como mostra a Tabela 12.

Tabela 12 – Relação massa x tensão x força.

Massa peso-morto[kg]	Tensão média [V]	Força [N]
0	0	0
0,804	0,032	5,5
0,904	0,047	8,3
1,004	0,064	11,2
1,104	0,082	14,4
1,204	0,096	16,8
1,304	0,118	20,7
1,404	0,134	23,5
1,504	0,151	26,6
1,604	0,168	29,6

Fonte: Próprio autor.

As cargas utilizadas para a realização dos ensaios foram a de 11,2 e 29,6 N.

APÊNDICE B – PUBLICAÇÕES REFERENTES A ESTE TRABALHO

EGITO, G. M. P.; PONTIN, G. I.; FAGUNDES JUNIOR, J. G., GALLEGGO, J.; VENTRELLA, V. A. Revestimentos duros produzidos com cavacos de titânio: avaliação da resistência ao desgaste abrasivo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS - CBECIMAT, 22., 2016, Natal. Anais... Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2016. p. 6475-6485.

PONTIN, G. I.; EGITO, G. M. P. ; FAGUNDES JUNIOR, J. G. ; VENTRELLA, V. A.; GALLEGGO, J. Caracterização microestrutural de revestimentos duros à base de carbonetos de titânio refundidos com Laser pulsado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS - CBECIMAT, 22., 2016, Natal. Anais... Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2016. p. 4898-4908.

PALERMO, E. S.; GODOY, H. S. ; PONTIN, G. I. ; EGITO, G. M. P. ; GALLEGGO, J. Caracterização microestrutural de carbonetos formados a partir de ferro-ligas por fusão a arco elétrico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS - CBECIMAT, 22., 2016, Natal. Anais...Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2016. p. 5408-5419.

FAGUNDES JUNIOR, J. G.; OLIVEIRA, D. L.; PONTIN, G. I.; EGITO, G. M. P.; VENTRELLA, V. A.; GALLEGGO, J. Estudo Comparativo entre Soldas Contendo Diferentes Carbonetos (Cromo ou Titânio), Visando a Produção de Revestimentos Resistentes ao Desgaste. In: CONGRESSO NACIONAL DE SOLDAGEM - CONSOLDA, 42., 2015, Salvador. Anais... São Paulo: Associação Brasileira de Soldagem ABS, 2015. p. 1-9.

PALERMO, E. S.; GALLEGGO, J.; PONTIN, G. I.; EGITO, G. M. P. Resistência ao desgaste de soldas obtidas com a reciclagem das ligas de titânio ASTM F67 e ASTM F136. In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNESP - CICUNESP, 27., 2015, Ilha Solteira. Anais... São Paulo: Pró-Reitoria de Pesquisa PROPe, 2015. p. 1.

**APÊNDICE C - TABELA COMPLETA PARA ENSAIO DE DESGASTE COM
CARGA DE 11,2 N**

Tabela 13 - Tabela com os dados do ensaio de desgaste micro abrasivo com carga de 11,2 N para o metal base e as ligas ASTM F67 e ASTM F136.

Amostra	Distância de deslizamento [m]	Diâmetro cordão de solda [mm]		Volume de desgaste cordão de solda [mm ³]		Taxa de desgaste cordão de solda [mm ³ /m]		Coeficiente de desgaste cordão de solda [MPa ⁻¹]	
ASTM F67 1,8kJ/mm	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	60	1,10	1,09	5,56E-03	5,46E-03	9,26E-05	9,09E-05	8,27E-09	8,12E-09
	84	2,19	2,19	8,89E-02	8,81E-02	1,06E-03	1,05E-03	9,45E-08	9,36E-08
	120	2,77	2,61	2,26E-01	1,79E-01	1,88E-03	1,49E-03	1,68E-07	1,33E-07
ASTM F67 2,5kJ/mm	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	60	1,84	1,87	4,38E-02	4,73E-02	7,30E-04	7,88E-04	6,52E-08	7,03E-08
	84	2,10	2,05	7,52E-02	6,83E-02	8,95E-04	8,13E-04	7,99E-08	7,26E-08
	120	2,38	2,38	1,24E-01	1,23E-01	1,03E-03	1,02E-03	9,23E-08	9,15E-08
ASTM F67 3,2kJ/mm	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	60	1,72	1,59	3,38E-02	2,44E-02	5,64E-04	4,07E-04	5,03E-08	3,63E-08
	84	2,03	2,02	6,56E-02	6,44E-02	7,81E-04	7,66E-04	6,98E-08	6,84E-08
	120	2,34	2,29	1,15E-01	1,06E-01	9,57E-04	8,86E-04	8,55E-08	7,91E-08
ASTM F136 1,8kJ/mm	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	60	1,10	1,08	5,66E-03	5,26E-03	9,43E-05	8,76E-05	8,42E-09	7,83E-09
	84	2,03	2,31	6,50E-02	1,10E-01	7,74E-04	1,31E-03	6,91E-08	1,17E-07
	120	2,72	2,52	2,10E-01	1,56E-01	1,75E-03	1,30E-03	1,56E-07	1,16E-07
ASTM F136 2,5kJ/mm	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	60	1,88	1,82	4,83E-02	4,24E-02	8,05E-04	7,07E-04	7,19E-08	6,31E-08
	84	2,03	2,04	6,56E-02	6,63E-02	7,81E-04	7,89E-04	6,98E-08	7,05E-08
	120	2,30	2,32	1,08E-01	1,12E-01	9,01E-04	9,33E-04	8,05E-08	8,33E-08
ASTM F136 3,2kJ/mm	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	60	1,63	1,66	2,73E-02	2,93E-02	4,55E-04	4,89E-04	4,06E-08	4,37E-08
	84	1,82	1,79	4,19E-02	3,92E-02	4,99E-04	4,67E-04	4,46E-08	4,17E-08
	120	2,12	2,11	7,81E-02	7,66E-02	6,51E-04	6,38E-04	5,81E-08	5,70E-08

Fonte: Próprio autor.

**APÊNDICE D - TABELA COMPLETA PARA ENSAIO DE DESGASTE COM
CARGA DE 29,6 N**

Tabela 14 - Tabela com os dados do ensaio de desgaste micro abrasivo com carga de 29,6 N para o metal base e as ligas ASTM F67 e ASTM F136.

Amostra	Distância de deslizamento [m]	Diâmetro cordão de solda [mm]		Volume de desgaste cordão de solda [mm ³]		Taxa de desgaste cordão de solda [mm ³ /m]		Coeficiente de desgaste cordão de solda [MPa ⁻¹]	
ASTM F67 1,8kJ/mm	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	60	1,72	1,72	3,38E-02	3,38E-02	5,64E-04	5,64E-04	5,03E-08	5,03E-08
	84	2,47	2,39	1,44E-01	1,26E-01	1,71E-03	1,50E-03	1,53E-07	1,34E-07
	120	2,85	2,72	2,55E-01	2,12E-01	2,13E-03	1,76E-03	1,90E-07	1,57E-07
ASTM F67 2,5kJ/mm	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	60	2,16	2,16	8,41E-02	8,34E-02	1,40E-03	1,39E-03	1,25E-07	1,24E-07
	84	2,62	2,61	1,81E-01	1,78E-01	2,15E-03	2,12E-03	1,92E-07	1,89E-07
	120	2,80	3,01	2,38E-01	3,15E-01	1,98E-03	2,63E-03	1,77E-07	2,35E-07
ASTM F67 3,2kJ/mm	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	60	2,04	2,04	6,69E-02	6,69E-02	1,12E-03	1,12E-03	9,96E-08	9,96E-08
	84	2,15	2,35	8,26E-02	1,18E-01	9,83E-04	1,40E-03	8,78E-08	1,25E-07
	120	2,57	2,55	1,69E-01	1,63E-01	1,41E-03	1,36E-03	1,25E-07	1,22E-07
ASTM F136 1,8kJ/mm	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	60	1,78	1,72	3,88E-02	3,34E-02	6,47E-04	5,57E-04	5,77E-08	4,98E-08
	84	2,32	2,27	1,12E-01	1,02E-01	1,33E-03	1,21E-03	1,19E-07	1,08E-07
	120	2,71	2,85	2,08E-01	2,53E-01	1,74E-03	2,11E-03	1,55E-07	1,88E-07
ASTM F136 2,5kJ/mm	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	60	2,14	2,14	8,11E-02	8,03E-02	1,35E-03	1,34E-03	1,21E-07	1,20E-07
	84	2,49	2,55	1,47E-01	1,62E-01	1,75E-03	1,93E-03	1,57E-07	1,72E-07
	120	2,95	2,71	2,91E-01	2,08E-01	2,42E-03	1,74E-03	2,16E-07	1,55E-07
ASTM F136 3,2kJ/mm	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	60	2,02	2,03	6,37E-02	6,56E-02	1,06E-03	1,09E-03	9,48E-08	9,77E-08
	84	2,22	2,22	9,30E-02	9,30E-02	1,11E-03	1,11E-03	9,89E-08	9,89E-08
	120	2,50	2,55	1,51E-01	1,63E-01	1,26E-03	1,36E-03	1,12E-07	1,22E-07

Fonte: Próprio autor.