

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SÃO PAULO (UNESP)
FACULDADE DE ENGENHARIA
ILHA SOLTEIRA**

JOÃO GUSTAVO SOUZA LAGO

**OBTENÇÃO DE CARBONETOS APÓS SOLDAGEM A LASER UTILIZANDO
LIGAS DE TITÂNIO EM PÓ COM PROCESSAMENTO COM MICRO-ONDAS.**

Ilha Solteira, 2022

JOÃO GUSTAVO SOUZA LAGO

**OBTENÇÃO DE CARBONETOS APÓS SOLDAGEM A LASER UTILIZANDO
LIGAS DE TITÂNIO EM PÓ COM PROCESSAMENTO COM MICRO-ONDAS.**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Escola de Engenharia de Ilha Solteira - Unesp
como parte dos requisitos para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador:
Prof. Dr. Juno Gallego

Ilha Solteira/SP, 2022

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

L177o Lago, João Gustavo Souza.
Obtenção de carbonetos após soldagem a laser utilizando ligas de titânio em pó com processamento com micro ondas: obtenção de carbonetos após soldagem a laser utilizando ligas de titânio em pó com processamento com micro ondas / João Gustavo Souza Lago. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2022
36 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Mecânica) -
Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2022

Orientador: Juno Gallego
Inclui bibliografia

1. Desgaste abrasivo. 2. Soldagem laser. 3. Carboneto de titânio.


Raiane da Silva Santos

Supervisora Técnica de Seção
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação
CRB/8 - 9999

ATA DA DEFESA – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

TÍTULO: OBTENÇÃO DE CARBONETOS APÓS SOLDAGEM A LASER UTILIZANDO
LIGAS DE TITÂNIO EM PÓ COM PROCESSAMENTO COM MICRO-ONDAS

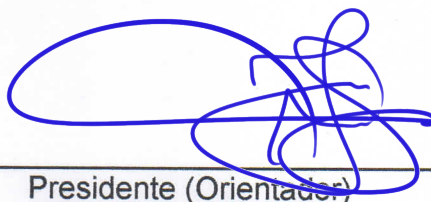
ALUNO: JOÃO GUSTAVO SOUZA LAGO

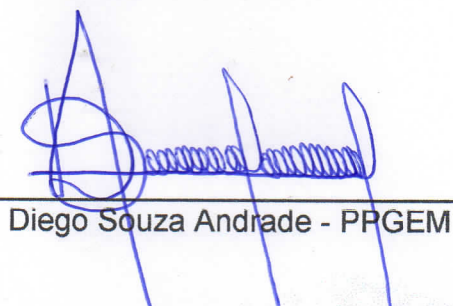
RA: 162053551

ORIENTADOR: Juno Gallego

Aprovado (X) - Reprovado () pela Comissão Examinadora

Comissão Examinadora:



Presidente (Orientador)

Diego Souza Andrade - PPGEM

Documento assinado digitalmente
gov.br LUCIANA TAKAHASHI
Data: 29/05/2022 01:43:05-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Luciana Takahashi - PPGEM

Ilha Solteira(SP), 27 de maio de 2022.

Aos meus pais e amigos.

AGRADECIMENTOS

Ao meu pai José Honório Lago Filho e minha mãe Lucimara Lago, que foram aqueles que sempre me apoiaram para obter todas as minhas conquistas.

Ao meu irmão Renato Lago pelo apoio e parceria ao longo de todos esses anos.

Ao Professor Juno Gallego pelo suporte, conselhos e amparo ao longo de toda minha graduação, resultando neste trabalho.

Aos meus amigos Pedro Trentin, Andressa Oliveira, Henrique Scalon, Cassiano Ferreira, Matheus Farias, que me forneceram amizade, amparo nos momentos difíceis e muita alegria nos momentos de comemoração. A todos vocês obrigado!

Gostaria também de agradecer ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (**CNPq**) por financiar toda a pesquisa e tornar tudo isso possível.

RESUMO

O chamado desgaste abrasivo consiste na perda de material pela fricção de partículas mais duras com maquinários e implementos agrícolas. A fim de se criar alternativas para a minimização das perdas materiais e monetárias no âmbito industrial e agrário, este trabalho busca desenvolver técnicas de deposição de metais mais resistentes, contendo carbonetos obtidos com irradiação de micro-ondas sobre as áreas desgastadas, prolongando assim o tempo de vida de maquinários e reduzindo o número de paradas para manutenção. Bem como encontrar um destino rentável para produtos até então sem utilização industrial, tais como cavacos de titânio de ligas ASTM F67 e o ASTM F136 provenientes de usinagens de próteses ortodônticas. O titânio por ser um bom formador de carboneto foi escolhido para ser alvo de estudo, desenvolvendo-se assim um método de produção de pó através de processamento com micro-ondas ao se reciclar cavacos de titânio para ser utilizado como preenchimento das áreas desgastadas. O estudo visou a obtenção de parâmetros de soldagem de melhor adequação aos requisitos estipulados para servir como um bom revestimento resistente ao desgaste abrasivo, tais como profundidades de focalização; melhor incidência energética; melhor valor de potência de pico e largura temporal. Foram obtidos bons cordões de solda com profundidade de focalização estipulada em 0,25mm e com incidência energética de 9J, obtendo assim grande número de partículas de carboneto de titânio formado além de partículas com dimensões pequenas. Excelentes resultados para o aumento de resistência esperado.

Palavras Chave: Desgaste Abrasivo, Soldagem Laser, Carboneto de Titânio.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. METODOLOGIA	6
2.1. Limpeza do Cavaco de Titânio ASTM F67 e ASTM F136.....	6
2.2. Fragilização do Cavaco de Titânio com processo em Micro-Ondas.	7
2.3. Moagem do dos Cavacos de Titânio.....	8
2.4. Aplicação do Pó de Titânio sobre metal base.	9
2.5. Soldagem do metal base com a mistura carbonetante.	10
2.6. Soldagem do metal base com a mistura carbonetante.	12
2.7. Análise das amostras.....	12
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES	13
3.1. Análise do primeiro teste (Profundidade de Focalização).	13
3.2. Análise do segundo teste (Energia de Pulso).....	19
4. CONCLUSÃO	27
5. REFERÊNCIAS	27

1. INTRODUÇÃO

O problema chamado desgaste consiste na perda progressiva de massa e/ou deformação na superfície de corpos em contato. É um fenômeno que não pode ser evitado, porém poder ser controlado e amenizado através da aplicação de diversas técnicas de tratamento superficial. Esse problema não é uma propriedade específica de cada material, pois depende do sistema que o envolve, portanto para definir a técnica que melhor se aplica deve se levar em consideração o mecanismo de desgaste atuante. Para cada mecanismo existe uma determinada técnica que melhor se aplica em sua correção. Na literatura existe certa controvérsia na definição dos mecanismos de desgaste que se justifica devido à similaridade entre alguns mecanismos e ainda o fato de que o desgaste é um fenômeno com maior complexidade do que se imagina. Os mecanismos de desgaste podem ser classificados em quatro grupos: adesivo, abrasivo, por fadiga e por reações tribo químicas, como mostrado na Figura 1.1. Apesar do fenômeno do desgaste ser classificado e analisado individualmente, na prática, as manifestações de tais mecanismos podem ocorrer em conjunto. O mecanismo mais comum de desgaste é o abrasivo. Cerca de 50% das ocorrências de falhas por desgaste em equipamentos industriais são classificados por este mecanismo [20]. O desgaste abrasivo se manifesta em dois tipos: dois corpos, quando no contato entre duas superfícies ocorre a abertura de sulcos naquela que for mais mole e por três corpos, de acordo com a Figura 1.2, quando entre as superfícies ocorrer à ação de um corpo adicional. A partir do momento em que ocorrer desprendimentos de partículas esse sistema se torna desgaste abrasivo por três corpos. [1,2].

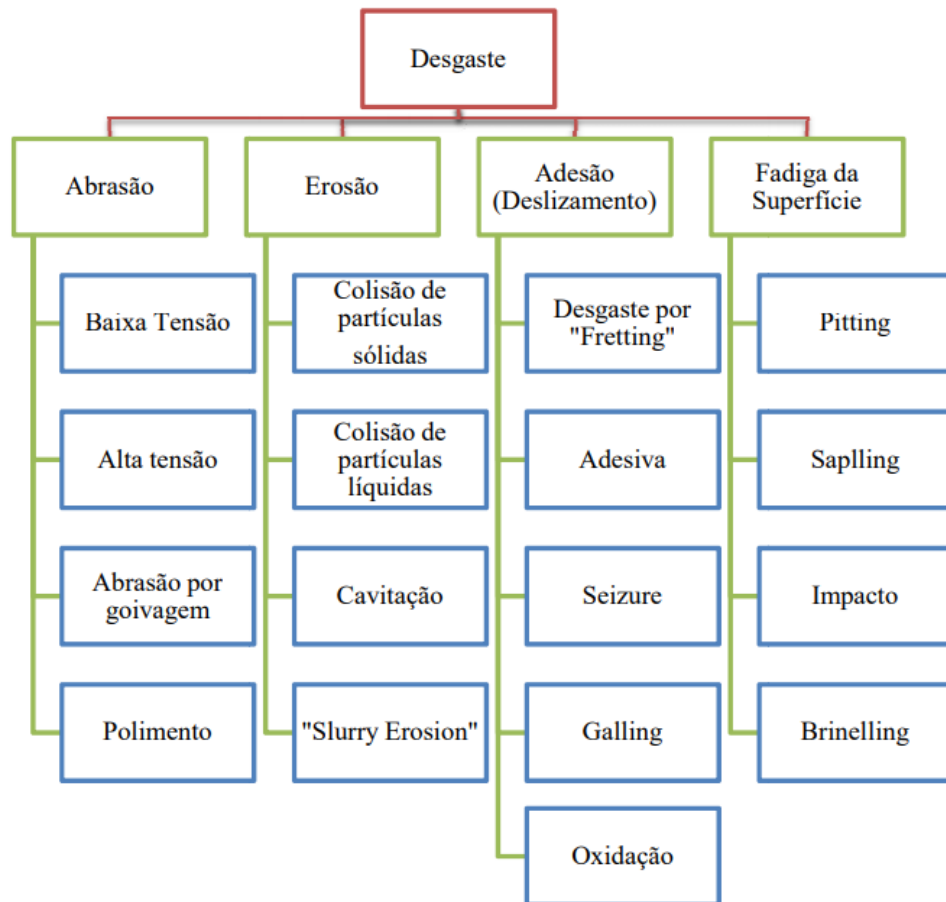


Figura 1.1. Esquema de Classificação de Desgaste [3].

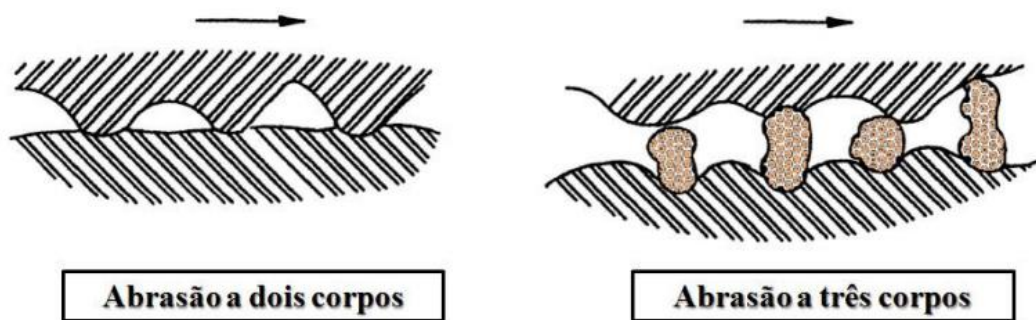


Figura 1.2. Tipos de desgaste Abrasivo [23].

Para reparo deste problema normalmente são utilizadas técnicas de soldagem para deposição de material sobre a superfície danificada, para isso existem várias categorias de revestimento dependendo das propriedades que se deseja obter no final, tais como. [4].

- Revestimento de aços inoxidáveis (“cladding”) – promover uma camada superficial contra corrosões.
- Revestimento de reconstrução (“build-up”) – promover a restauração das dimensões originais da peça.
- Amanteigamento (“buttering”) – aplicação de uma ou mais passes de solda em uma face da junta.
- Revestimento duro (“hardfacing”) – promover um significativo aumento na resistência ao desgaste. [4].

O processo de hardfacing consiste em um processo de obtenção de propriedades ou dimensões desejadas mediante a aplicação de uma camada de metal de certa composição sobre um metal base de outra composição para que a superfície tratada fique altamente resistente ao desgaste. [5]. Uma outra definição consiste ao revestimento duro como uma liga homogeneamente depositada por um processo de soldagem na superfície de um material que requer aumento de alguma de suas propriedades, geralmente dureza e resistência ao desgaste, sem haver uma perda significativa de outras propriedades do material. [6].

Existem várias técnicas para a aplicação dos revestimentos duros, algumas delas consistem na aplicação de uma camada de metal duro mediante fusão por soldagem [5]. Uma técnica que está sendo estudada é a aplicação de revestimentos duros utilizando soldagem a laser como meio para que ocorra a formação de carbonetos que irão promover o aumento de resistência e dureza do material.

O nome LASER é a abreviatura da descrição do processo em inglês: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. É um processo avançado para unir materiais com a utilização de um feixe laser de alta potência e alta densidade de energia que se propaga no ar com pouca divergência, orientando-se por óticas sem perder ou alterar suas características físicas. Apresenta diferentes modos de aplicação, podendo ser laser de onda pulsada (PW) ou contínua (CW). Nos últimos anos vem ganhando mais destaque devido a sua tecnologia na união promissora com alta qualidade, alta precisão, alto desempenho e um processo facilmente automatizado. [7-11].

Entre estas características podemos citar:

- Elevadíssimas velocidades de soldagem
- Ausências de contato entre a fonte de calor e a peça a soldar.
- Baixa entrega térmica, distorção e ZTA.

Dentre os tipos de soldagem a laser temos o laser Nd:YAG que utiliza um cristal sintético de ítrio e alumínio dopado com neodímio. O cristal Nd:YAG é fisicamente duro, estável e opticamente isotrópico e com uma boa condutividade térmica, permitindo assim uma boa operação do laser em altos níveis de potência e o neodímio é um excelente material laser pois produz um nível mais alto de potência de pico do que qualquer outro elemento dopante [12]. O equipamento de soldagem a laser Nd:YAG, representado na Figura 1.3, consiste em um meio ativo de cristal Nd:YAG, uma fonte de energia e uma lâmpada pulsante, tenho um par de espelho, um 100% reflexivo e outro parcialmente reflexivo. O laser é distribuído por uma fibra óptica até o cabeçote de soldagem. [12].

Os parâmetros da soldagem a laser são os que influenciam na qualidade dos cordões e na geometria do mesmo, sendo de extrema importância conhecer seus efeitos sobre o processo de soldagem. A potência de pico (P) e o parâmetro que define a potência máxima de cada pulso, está intimamente ligada ao poder de penetração do cordão de solda no metal base, é medida em watts (W). A largura temporal (t) que é o tempo de duração de cada pulso medido em milissegundo, intimamente ligado com a largura do cordão de solda. Tem-se também que um outro parâmetro importante é a taxa de repetição de pulso, que é a frequência (f) do pulso durante um segundo, podendo ser medida em hertz (Hz). Dispondo dos valores de potência de pico e largura temporal pode-se calcular a energia de pulso que está sendo empregada no processo de soldagem de acordo com a Equação 1. [12-13].

$$E = P . t \quad (1)$$

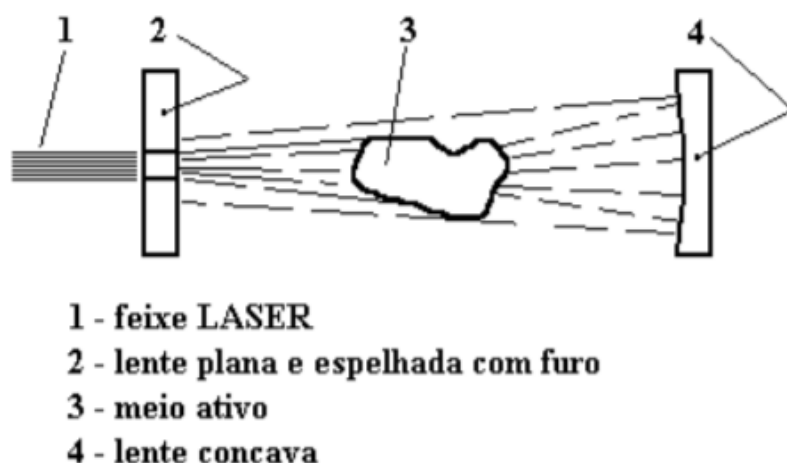


Figura 1.3 exemplo do processo de soldagem a laser [7].

O carbono pode fazer ligação com diversos elementos químicos, porém por convenção o termo carboneto é aplicado para definir os compostos formados a partir da ligação entre elementos com eletronegatividade igual ou menor a do carbono. [14-18]. As propriedades de um carboneto são determinadas por três fatores essenciais: a diferença da eletronegatividade entre o elemento e o carbono, a relação entre os raios atômicos, e as características da ligação química (iônica, covalente e metálica) presentes. Desta forma, os carbonetos podem ser divididos em quatro grupos:

- Carbonetos Intersticiais: formados pelos elementos dos grupos IV, V e VI localizados nos períodos 4,5 e 6 da tabela periódica.
- Carbonetos Covalentes: formados pelos elementos boro e silício.
- Carbonetos Intermediários: formado pelos metais de transição dos grupos VII e VIII.
- Carbonetos Salinos: formados pelos elementos dos grupos I, II e III.

O carboneto de titânio (TiC) está no grupo dos carbonetos intersticiais, que por sua vez são compostos cristalinos entre os metais dos grupos IV, V e VI nos períodos 4, 5 e 6, ligados ao carbono, o titânio apresenta um sistema de ligação binário com o carbono, onde na forma de carbonetos apresenta a estequiometria TiC, com estrutura cristalina CFC. Os carbonetos de titânio possuem dureza consideravelmente alta, o que os tornam comum na aplicação de peças e componentes que necessitam de bom desempenho aos mecanismos de desgaste. [14].

2. METODOLOGIA

2.1. Limpeza do Cavaco de Titânio ASTM F67 e ASTM F136.

Primeiramente deve-se limpar os cavacos obtidos de resíduos de usinagem para se tornarem apropriados para sua utilização nesta pesquisa. Para isso, deve-se retirar toda e qualquer impureza sólida presente entre os cavacos bem como garantir a inexistência de óleos de refrigeração; fluidos e graxa oriundos da usinagem anterior.

Em um balde comum é colocado uma quantidade suficiente de cavacos de titânio, isto é, a quantidade deve ser adequada para o tamanho do balde disponível, para que haja espaço suficiente para promover uma boa limpeza sem sobrecarregá-lo. Então é acrescentado 2 litros de água morna, em torno de 45°C, juntamente com detergente líquido. Os cavacos ficam de molho por 6 horas para que haja um enxágue e renovação do processo por mais uma vez.

Feito isso os cavacos são levados para um banho ultrassônico com água por um período de 10 minutos e 5 minutos para retirar possíveis impurezas sólidas remanescentes do banho e os últimos resquícios de substâncias de usinagem. Cada porção de cavaco é passada pelo banho ultrassônico duas vezes, sendo que a cada etapa os mesmo são enxaguados e sua água trocada. A tabela abaixo resume o processo mencionado acima [19].

Tabela 2.1. Resumo do processo de limpeza.

Etapa	Tipo de Banho	Período	Detergente (ml)
1	Permanência em Molho	6 h	200
2	Permanência em Molho	6 h	200
3	Banho Ultrassônico	10 mim	30
4	Banho Ultrassônico	5 mim	Ausência



Figura 2.1. Aparelho de Ultrassom utilizado [Elaborado pelo Autor].

2.2. Fragilização do Cavaco de Titânio com processo em Micro-Ondas.

Após se realizar a limpeza adequada dos cavacos e os mesmos estarem completamente limpos e sem impurezas inicia-se o processo de fragilização. Para isso, o cavaco é colocado na parte inferior de um cadinho cerâmico juntamente com pó de carvão vegetal por cima, completando todo o volume do cadinho (o carvão vegetal é processado por um liquidificador convencional até obter-se um pó de granulação menor que uma peneira de cozinha padrão) nas proporções apresentadas na Tabela 2.2. A figura 2.3A mostra o cadinho preenchido com o cavaco e o carvão vegetal.

Por um período obtido experimentalmente de 10 minutos o cadinho preenchido com o cavaco e o carvão é banhado pelas micro-ondas elevando sua temperatura, representado pela Figura 2.3B, propiciando o aparecimento de uma fina camada de carboneto de titânio em toda superfície, tornando-o suficientemente frágil para se promover uma moagem e transformá-lo em um pó extremamente fino. Após esse processo, o carvão é separado do cavaco fragilizado, fazendo uso de uma peneira convencional.

Tabela 2.2. Proporções entre Cavaco de Titânio e Carvão em pó.

Cavaco de Titânio (g)	Carvão Vegetal em Pó (g)
5	30



Figura 2.2. Micro-ondas utilizado no processo de fragilização [Elaborado pelo Autor].

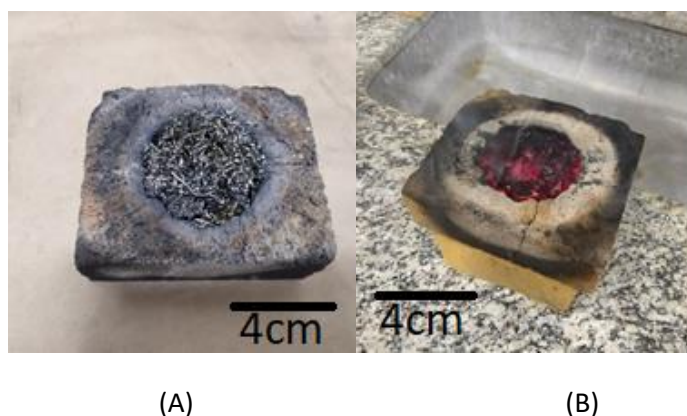


Figura 2.3. Cavacos antes (A) e depois (B) do processamento com Micro-Ondas [Elaborado pelo Autor].

2.3. Moagem dos Cavacos de Titânio.

Após o processo de fragilização dos cavacos, que os torna suficientemente frágeis e quebradiços, inicia-se a moagem afim de se obter um pó de pequena granulação, representado na Figura 2.5. Para isso, utiliza-se um moinho de bolas, presente na Figura 2.4 a, adaptado a um torno mecânico com rotação de 120 RPM por um período de 4 horas inicialmente. Após esse tempo o processo é interrompido para que haja a verificação do pó obtido, ou seja, se a maior parte dos cavacos se tornou um pó com uma granulação desejada, menor que $45\mu\text{m}$. Uma série de peneiras, representados na Figura 2.4 b, são utilizadas para a medição da granulação das partículas, sendo elas 140 e 325 mesh, partículas menores que $106\mu\text{m}$ e $45\mu\text{m}$ respectivamente. Caso seja detectado que não houve um volume suficiente de partículas de granulação correta, aquelas que não atingiram o esperado voltam por mais 4 horas no moinho para que atinjam o valor desejado.

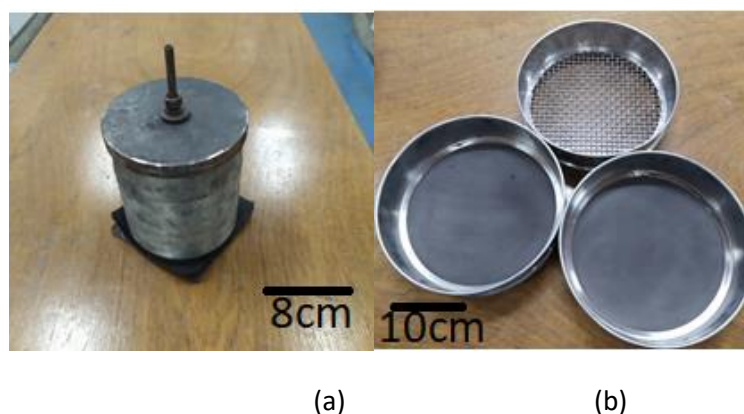


Figura 2.4. Moinho de Bolas em (a) e peneiras em (b) utilizadas no processo [Elaborado pelo Autor].

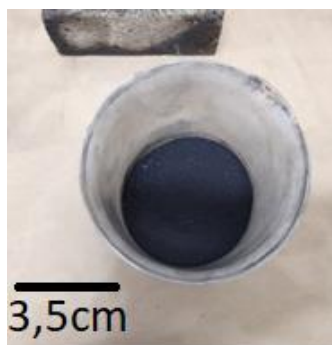


Figura 2.5. Pó de Titânio com granulação menor que $45\mu\text{m}$ obtido após peneiramento [Elaborado pelo Autor].

2.4. Aplicação do Pó de Titânio sobre metal base.

Após a obtenção do pó de titânio de granulação inferior a $45\mu\text{m}$ pode iniciar o processo de deposição sobre o metal base de interesse, para isso uma mistura contendo o pó de titânio; carbono grafite e silicato de sódio é misturado nas proporções apresentadas na Tabela 2.3, foi instituído o nome de mistura carbonetante para essa mistura.

Em um copo plástico foi adicionado os componentes da mistura respeitando as proporções da Tabela 2.3, obtidas experimentalmente, em seguida foi-se acrescentando água em pequenas quantidades para que a mistura adquirisse até que sua consistência fosse parecida com uma “lama” densa para facilitar o processo de aderência no metal base, utilizando uma espátula pequena a lama é aplicada sobre o metal base e colocada em uma estufa por um período de 12h a uma temperatura de aproximadamente 100°C para haver o processo de “vitrificação” do silicato de sódio tornando possível o processo de soldagem seguinte.

Tabela 2.3. Proporções da mistura carbonetante.

Pó de Titânio (g)	Carbono Grafite (g)	Silicato de Sódio (g)
10	2	1

Foi preparado como metal base uma chapa de aço 1040 de dimensões 202x35x3mm que foi dividida em 3 partes de 66mm de comprimento cada. Em uma parcela foram feitos 5 canais com profundidades diferentes utilizando uma Fresadora CNC Romi Discovery, com broca de 6,3 mm. Os 5 canais usinados tem profundidade ajustada de 1,5mm de profundidade até 0,25mm com intervalos de 0,25mm de acordo com a Figura 2.6.



Figura 2.6. Metal Base Preparado com chapa metálica [Elaborado pelo Autor].

2.5. Soldagem do metal base com a mistura carbonetante.

Com a mistura carbonetante já vitrificada e bem aderida sobre o metal base, pode-se iniciar o processo de soldagem afim de se promover uma formação suficiente de carboneto de titânio, para isso inicialmente foi pensado dois testes com intuito de conhecer os melhores parâmetros de soldagem para promover uma formação de carboneto de titânio suficientemente capaz de atingir os objetivos do estudo, isto é, haver formação de um solda rica em carbonetos e em dimensões de cordão necessárias para se poder usar como revestimento metálico, uma solda pouco penetrante e com largura relevante.

Para os dois testes foi usado uma máquina de soldagem do tipo Nd:YAG da United Winners, modelo UW 150 A, representado na Figura 2.7 e Figura 2.8, o primeiro teste foi pensado para analisar a melhor profundidade de focalização fazendo com que o foco da máquina de solda fosse ajustado no fundo de cada chanfro, como representado na Figura 2.9.

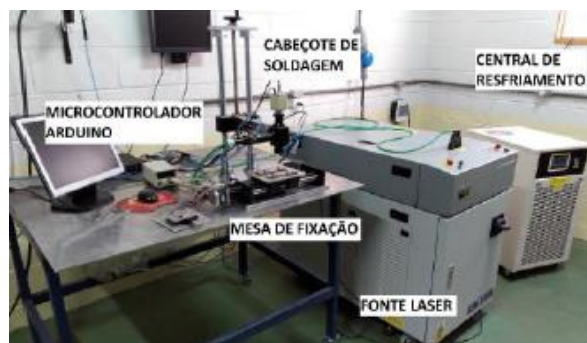


Figura 2.7. Máquina de soldagem do tipo Nd:YAG da United Winners [13]

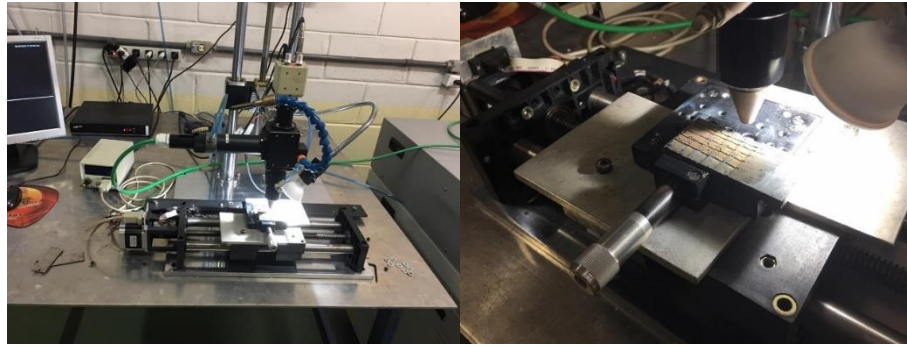


Figura 2.8. Cabeçote de Soldagem [Elaborado pelo Autor].



Figura 2.9. Chapa de Aço após Soldagem [Elaborado pelo Autor].

Devido a problemas de nivelamento no aparelho fresador houve ligeiras diferenças de profundidade em cada chanfro, explicando as variações de valores presentes em cada chanfro da Figura 2.9, com isso as análises que viram a posteriori tomaram como base os valores de profundidade da Figura 2.9, desprezando os valores pensados presentes na Figura 2.6.

O segundo teste representado na Figura 2.10 teste busca a determinação da energia do pulso (E_p) calculado de acordo com a Equação 1. Neste teste foi fixado os valores de frequência e velocidade de avanço em 9 Hz e 1,6mm/s respectivamente, bem como o valor de profundidade de focalização em 0,18-0,28mm, variando-se os valores de largura temporal e a potência de pico, as especificações dos parâmetros de cada cordão de solda foram dispostas na Tabela 2.4. Os valores de potência de pico foram poucos variados uma vez que esse parâmetro está relacionado com o grau de profundidade do cordão de solda, como este estudo busca obter um metal de solda para revestimento o parâmetro realmente importante é o de largura temporal, que está relacionado com a largura do cordão.

Tabela 2.4. Especificações dos Parâmetros de Soldagem.

Cordão de Solda	Frequência (Hz)	Velocidade de Avanço (mm/s)	Potência de Pico (kW)	Largura Temporal (ms)	Energia de Pulso (j)
A	9	1,6	1,2	9	10,8
B	9	1,6	1,2	8	9,6
C	9	1,6	1,2	7	8,4
D	9	1,6	1,5	8	12
E	9	1,6	1,5	7	10,5
F	9	1,6	1,5	6	9
G	9	1,6	1,2	6	7,2
H	9	1,6	1,2	5	6
I	9	1,6	1,5	5	7,5

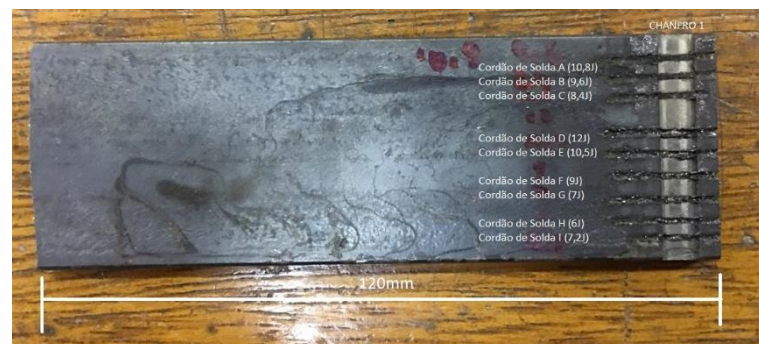


Figura 2.10. Chapa de Aço após soldagem [Elaborado pelo Autor].

2.6. Preparação das amostras para análise.

Os canais foram cortados lateralmente para deixar o feixe de solda a vista em seguida as amostras foram embutidas em baquelite para facilitar o manuseio e lixadas com as granas 120, 220, 320, 400, 600 e 1200 após esse processo, as amostras foram polidas com auxílio de uma politriz utilizando alumina 1 μ m como material abrasivo. Tal procedimento deixou a superfície completamente espelhada e pronta para ser analisada. Após estes procedimentos as superfícies foram atacadas com Nital 2% para revelação dos contornos dos cordões de solda.

2.7. Análise das amostras

Com as amostras perfeitamente polidas foi feita a análise macro via estereomicroscopia e microestrutural utilizando um microscópio eletrônico de varredura (MEV) Zeiss Evo, modelo LS-15 no modo de contraste de elétrons retroespalhados (BSE), aonde o contraste é definido pela diferença do número atômico dos componentes, evidenciando a presença dos carbonetos de titânio de melhor modo.

Em seguida utilizando o software livre ImageJ foi possível uma análise estatística de todos os testes feitos para ter de maneira quantitativa os resultados obtidos. Pelo software foi feita a análise de porcentagem de área ocupada pelos carbonetos de titânio; número de partículas totais; diâmetro de Feret e a circularidade das partículas formadas, bem como a análise geométrica de cada feixe de solda, calculando os valores de profundidade e largura para cada um, esse estudo se mostrou importante, uma vez que com ele pode-se focar o tipo de soldagem para os fins que o estudo necessita.

Analizando cada cordão de solda individualmente primeiramente deve-se transformar as imagens em faixas exclusivamente de preto e branco, fazendo com que as partículas mais escuras (carbonetos de titânio) fiquem evidenciadas, para isso deve-se seguir a seguinte sequência de operações no software: Image > Adjust > Threshold, selecionando o que será destacado por um escala na colocação desde o preto absoluto até o branco, após ser selecionado a área de interesse deve seguir a sequência de operação para separar partículas que não deveriam estar juntas, mas acabaram sendo contabilizadas pelo software, para isso segue-se: Process > Binary > Watershed.

Depois que a imagem já foi preparada seguindo os passos anteriores foi feito a análise estatística para o cálculo dos fatores destacados anteriormente para isso segue a sequência de comandos: Analyze > Analyze Particles

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Análise do primeiro teste (Profundidade de Focalização).

O primeiro teste buscou obter a melhor profundidade de focalização do feixe cônico do aparelho de soldagem, determinando assim qual é o melhor valor para esse parâmetro, a fim de obter-se os melhores cordões de solda com maiores quantidades de carboneto de titânio formadas.

Foram soldados 5 feixes de solda de acordo com a Figura 2.9, cada um com focalização no fundo de um chanfro, isto é, o feixe A tem focalização no fundo do chanfro 1, o feixe B tem focalização no fundo do chanfro 2, o mesmo ocorre com os demais. Os parâmetros de soldagem selecionados para esses teste foram: 2 kW de potência de pico, frequência de 9 Hz com uma velocidade de avanço de 1 mm/s e uma largura temporal de 2 ms, resultando em uma energia de pulso de acordo com a Equação 1 igual a 4J.

Para o primeiro teste foi analisado somente os feixes de solda presentes sobre o chanfro 1, uma vez que, para o chanfro 2 já houve uma agressiva redução no número de partículas formadas de carboneto de titânio, bem como uma baixa aderência da solda sobre o metal base e uma alta dispersão do pó de titânio. Fato que pode ser explicado devido a maior profundidade do chanfro que faz com que o feixe cônico do laser disperse, fazendo a incidência energética ser menor. Esse fato pode ser observado de maneira qualitativa de acordo com a Figura 3.1.

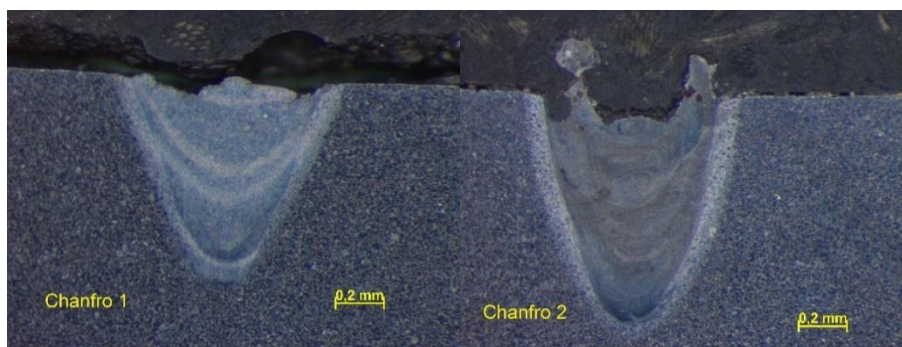


Figura 3.1. Macroestruturas do Feixe A sobre chanfro 1 e 2 respectivamente [Elaborado pelo Autor].

Com auxílio do software ImageJ foram obtidos os valores geométricos para o feixe A. O chanfro 1 apresenta uma largura de 0,81 mm e profundidade de 0,77mm, o chanfro 2 possui uma largura de 0,72mm e profundidade de 0,84 mm. O feixe sobre o chanfro 1 apresentou maior largura, uma fato positivo uma vez que o estudo busca obter um cordão de solda para reparo de estruturas danificadas pelo desgaste, tornando essa dimensão de extrema importância, já o feixe sobre o chanfro 2 foi oque obteve maior profundidade, porém com dispersão de pó de titânio, sendo um péssimo resultado para os padrões procurados no estudo. Desde modo, o feixe de solda sobre o chanfro 1 é superior em padrões geométricos.

A partir disso, utilizando as imagens das microestruturas obtidas via MEV foram feitas as análises estatísticas para cada feixe de solda sobre o chanfro 1, utilizando como auxílio o software ImageJ. Realizando o processo citado anteriormente obteve-se as análises que serão dispostas nas Figuras 3.2 a 3.6 e Tabelas 3.1 a 3.5.

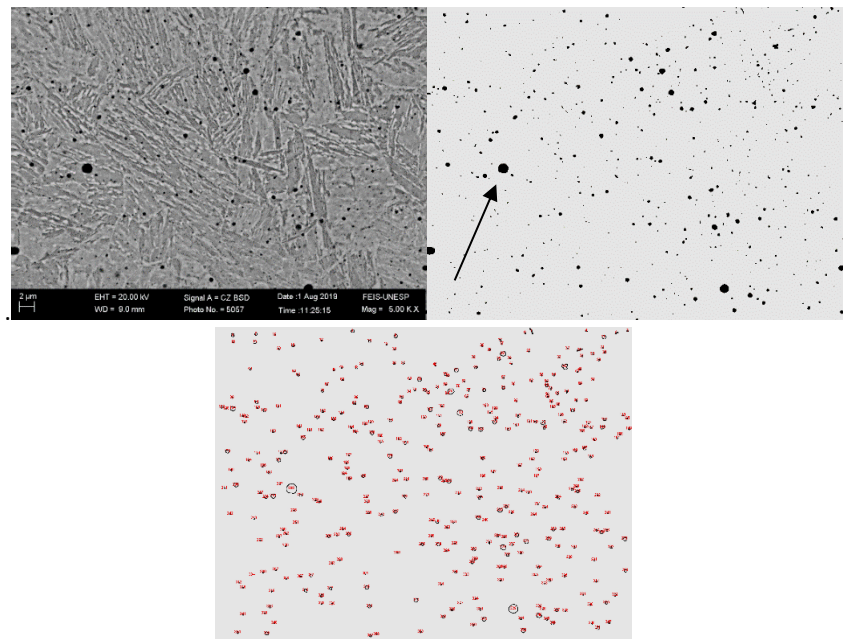


Figura 3.2. Análise do Chanfro 1 Feixe A com ImageJ, imagem com aumento de 5 mil vezes, imagem convertida em preto e branco e pontos analisados, respectivamente [Elaborado pelo Autor].

Tabela 3.1. Análise do Chanfro 1 Feixe A com ImageJ

Total de Partículas analisadas	Área Total (μm ²)	Tamanho Médio (μm)	Fração Volumétrica	Circularidade	Diâmetro de Feret (μm)
671	36,223	0,054	1,66	0,894	0,319

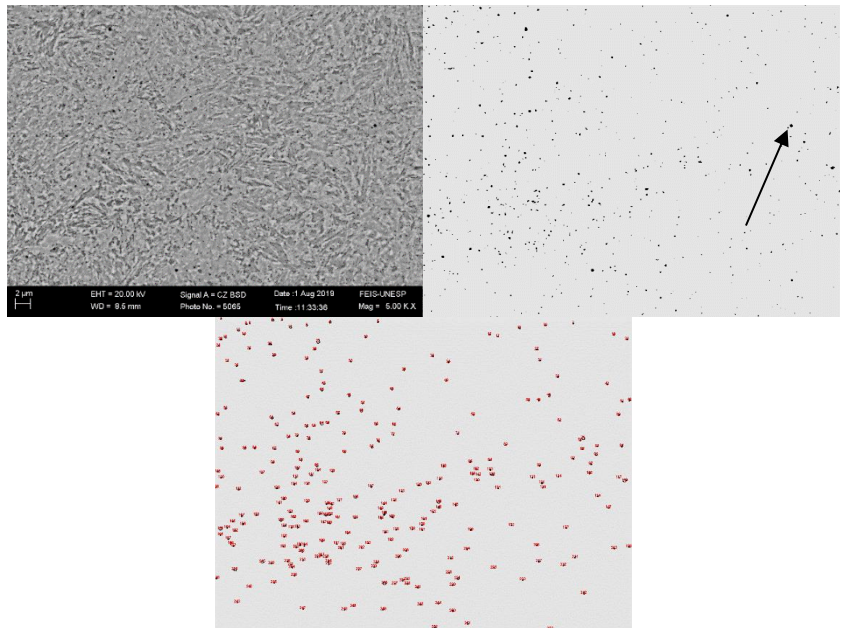


Figura 3.3. Análise do Chanfro 1 Feixe B com ImageJ, imagem com aumento de 5 mil vezes, imagem convertida em preto e branco e pontos analisados, respectivamente [Elaborado pelo Autor].

Tabela 3.2. Análise do Chanfro 1 Feixe B com ImageJ

Total de Partículas analisadas	Área Total (μm^2)	Tamanho Médio (μm)	Fração Volumétrica	Circularidade	Diâmetro de Feret (μm)
321	8,083	0,025	0,37	0,913	0,243

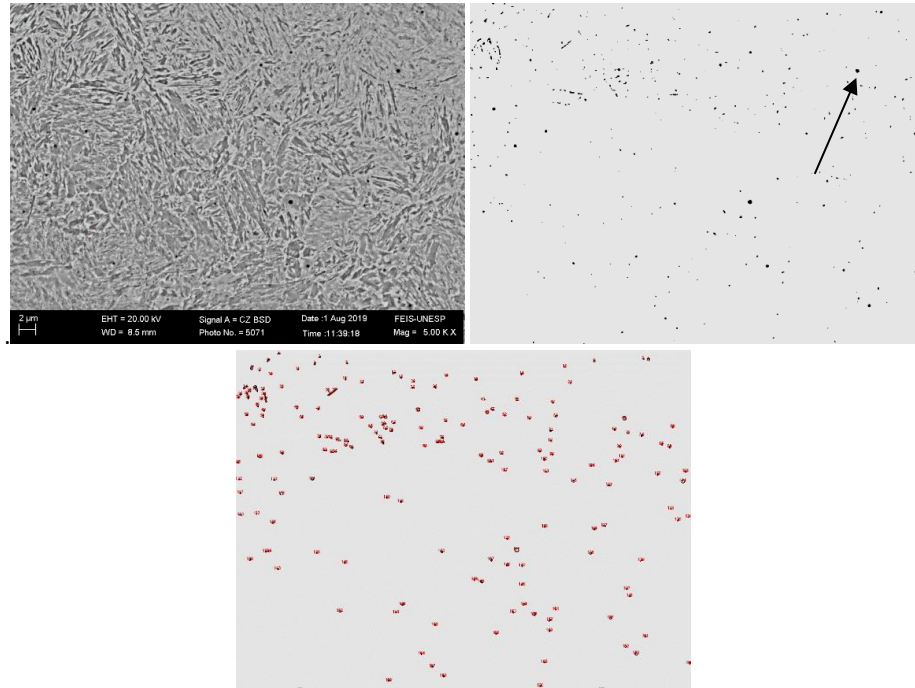


Figura 3.4. Análise do Chanfro 1 Feixe C com ImageJ, imagem com aumento de 5 mil vezes, imagem convertida em preto e branco e pontos analisados, respectivamente [Elaborado pelo Autor].

Tabela 3.3. Análise do Chanfro 1 Feixe C com ImageJ

Total de Partículas analisadas	Área Total (μm^2)	Tamanho Médio (μm)	Fração Volumétrica	Circularidade	Diâmetro de Feret (μm)
115	3,149	0,027	0,144	0,888	0,257

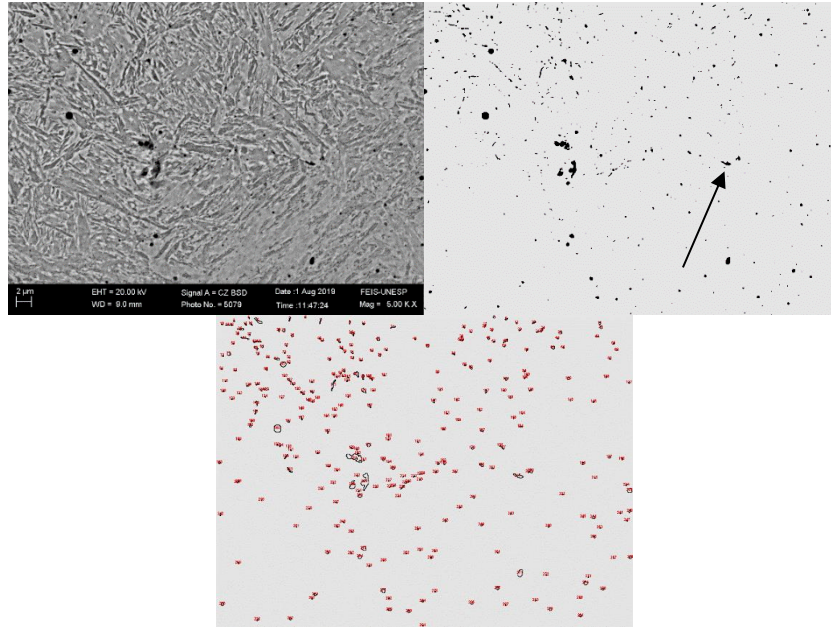


Figura 3.5. Análise do Chanfro 1 Feixe D com ImageJ, imagem com aumento de 5 mil vezes, imagem convertida em preto e branco e pontos analisados, respectivamente [Elaborado pelo Autor].

Tabela 3.4. Análise do Chanfro 1 Feixe D com ImageJ

Total de Partículas analisadas	Área Total (μm^2)	Tamanho Médio (μm)	Fração Volumétrica	Circularidade	Diâmetro de Feret (μm)
233	12,633	0,054	0,579	0,871	0,327

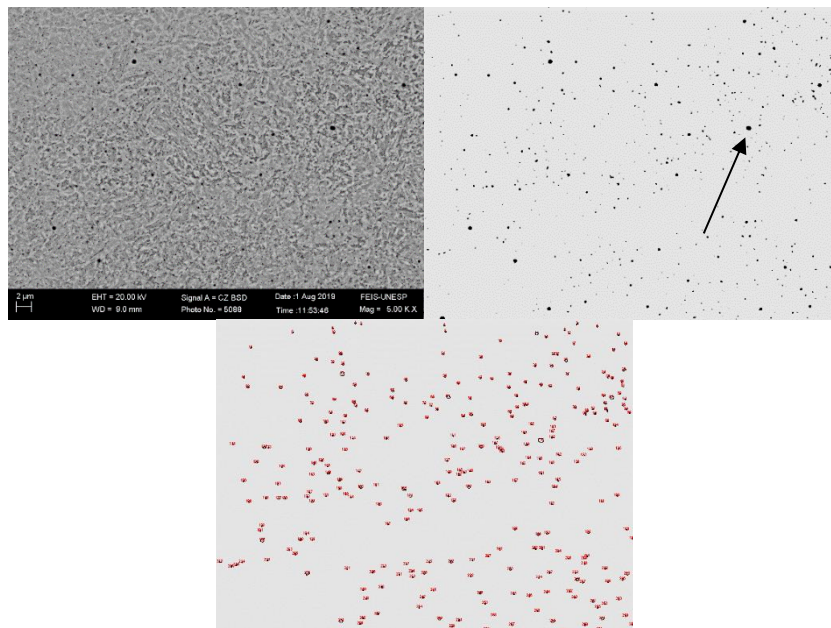


Figura 3.6. Análise do Chanfro 1 Feixe E com ImageJ, imagem com aumento de 5 mil vezes, imagem convertida em preto e branco e pontos analisados, respectivamente [Elaborado pelo Autor].

Tabela 3.5. Análise do Chanfro 1 Feixe E com ImageJ

Total de Partículas analisadas	Área Total (μm^2)	Tamanho Médio (μm)	Fração Volumétrica	Circularidade	Diâmetro de Feret (μm)
241	7,583	0,031	0,348	0,94	0,248

Cada parâmetro analisado foi escolhido devido a sua importância em obter um revestimento de maior resistência superficial, reduzindo os efeitos de desgaste. Analisar número total de partículas formadas em cada feixe de solda é importante, pois, um número elevado de partículas de carboneto de titânio resulta em alta resistência ao material; quantificar a área média das partículas e o volume que eles ocupam revela se para aquele volume de controle existe uma quantidade significativa de área preenchida; o diâmetro de feret é um bom indicador do tamanho médios das partículas presentes, pois partículas grandes tentem a ser menos resistentes que partículas menores e por fim analisar a circularidade das partículas nos mostra o quão circulares elas são, isto é, uma circularidade próxima de 0 indica partículas sem forma definida, ao passo que próximo de 1 indica um circunferência perfeita, reduzindo efeitos de concentração de tensão, tornando-as mais resistentes ao desgaste.

Com base nas Figuras 3.2 a 3.6 e Tabelas 3.1 a 3.5 é possível analisar e obter dados quantitativos sobre cada feixe de solda. Por este estudo utilizar soldagem a laser, que dispõe de uma alta quantidade energética em curtos períodos de tempo, espera-se obter um número elevado de partículas com tamanhos relativamente pequenos, uma vez que o pulso energético é extremamente concentrado fazendo com que o material se funda, porém, sem tempo para desenvolver grandes partículas devido a extrema velocidade de pulsação. Sabendo disso, os resultados obtidos vão de encontro ao esperado uma vez que todos apresentaram alta formação de partículas de carboneto e diâmetro de feret relativamente baixo. Dentre todos os feixes de solda, o que apresentou melhores resultados foi o feixe A, por apresentar a maior formação de partículas de carboneto de titânio, com um total de 671 partículas formadas. Foi o que apresentou maior porcentagem de área, com 1,66% de área total, além de apresentar ótimos valores de circularidade e tamanho de feret, com 0,894 e 0,32 μm respectivamente. Embora haja outros feixes com elevados número de partículas formadas, como o feixe B e D, os mesmo apresentaram baixos índices de porcentagem de área, mostrando que embora tenham sido formadas muitas partículas, estas apresentam tamanhos desprezíveis, fato perceptível pela diferença entre os valores do diâmetro de feret para o feixe A quando comparado aos demais.

Os valores de circularidade em todos os feixes de solda são bem similares e próximos a 1, porem esse fato também pode ser explicado pelo tipo de soldagem aplicada neste estudo, soldagem a laser, que como dito antes fornece muita energia concentrada em um curto período, fazendo com que haja inúmeros pontos de fundição seguido por rápido resfriamento e solidificação.

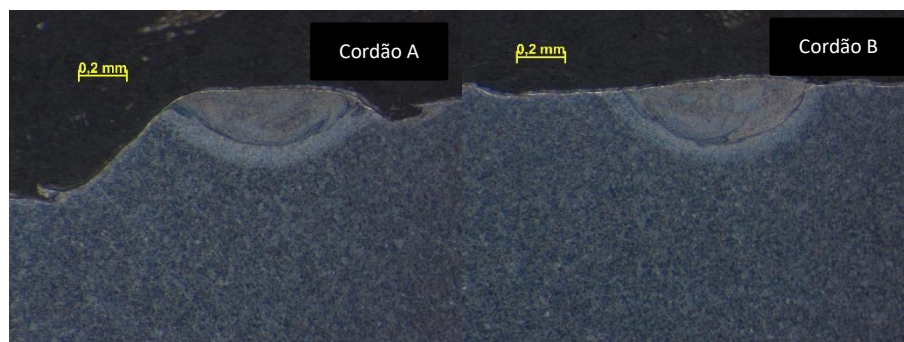
Por esse motivos o feixe de solda A sobre o chanfro 1 com profundidade de 0,18 a 0,28mm foi o escolhido para ser padronizado e mantido em futuros testes.

3.2. Análise do segundo teste (Energia de Pulso).

O segundo teste buscou obter a melhor energia de pulso do feixe cônico do aparelho de soldagem, variando a potência de pico entre 1,2kW e 1,5kW e a largura temporal de 5ms a 9ms, obtendo assim de acordo com a Equação 1 valores de energia de pulso diferentes para cada cordão de solda , buscando determinar qual é o melhor valor para esse parâmetro para obter-se os melhores cordões de solda com maiores quantidades de carboneto de titânio formadas, e melhores geometrias para o propósito do estudo.

No segundo teste foram soldados 9 cordões com profundidade de focalização ajustada para o fundo do chanfro de solda de 0,25mm de profundidade, valor obtido experimentalmente pelo primeiro teste, de acordo com a Figura 2.10. Todos os parâmetros de soldagem para cada cordão de solda foram especificados na Tabela 2.4.

Com as amostras devidamente preparadas seguindo as especificações presentes nos procedimentos experimentais cada cordão de solda foi primeiramente analisado com auxílio do software livre ImageJ para se obter as dimensões geométricas para cada cordão de solda. As macrográficos analisadas foram obtidas por um Estéreo Microscópio Zeiss Discovery V8 e estão presentes na Figura 3.7.



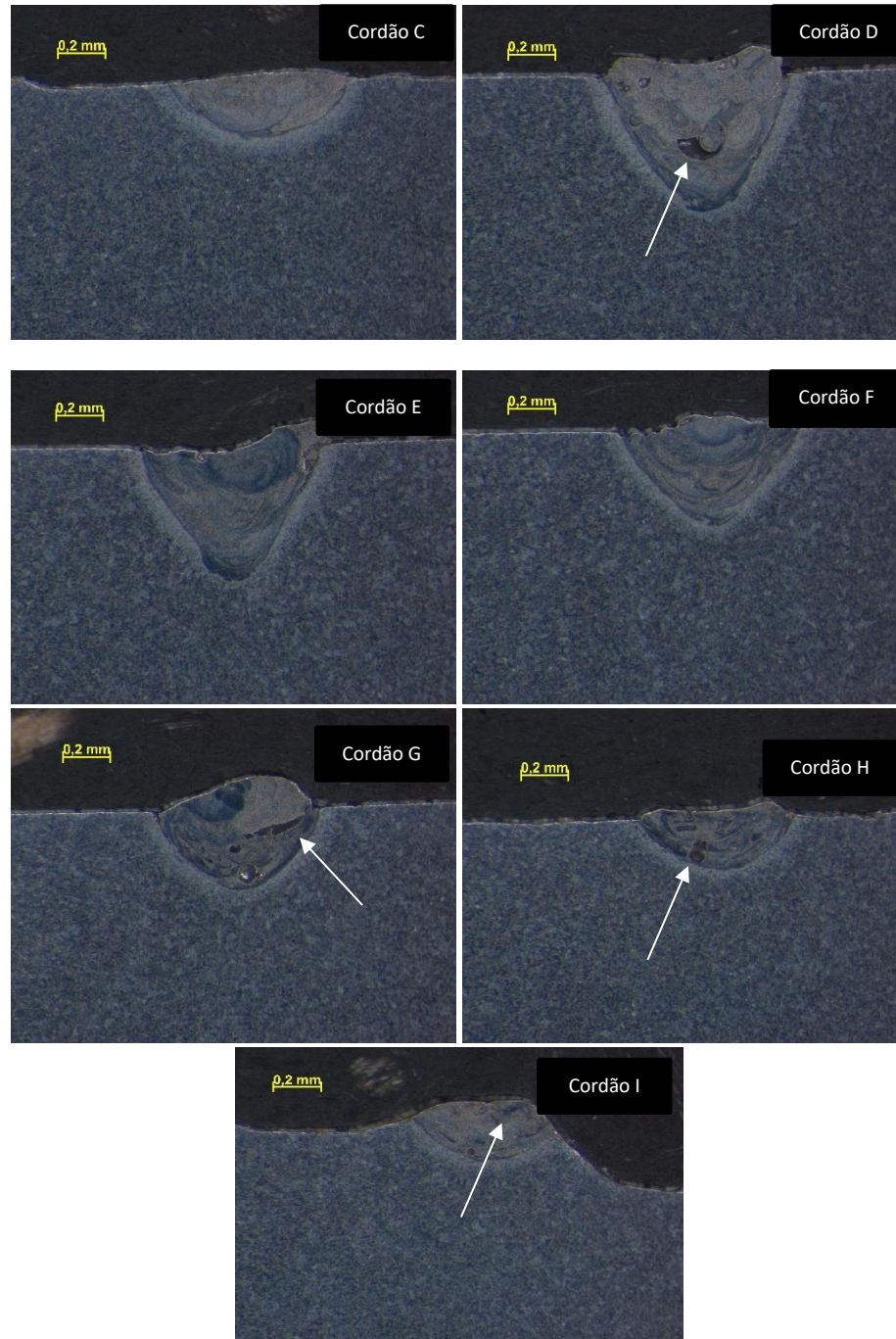


Figura 3.7. Macrografais dos cordões de solda [Elaborado pelo Autor].

Analisando as imagens presentes na Figura 3.7 foi possível construir um gráfico presente na Figura 3.8 de todas as profundidades e larguras dos cordões de solda para melhor visualização e entendimento.

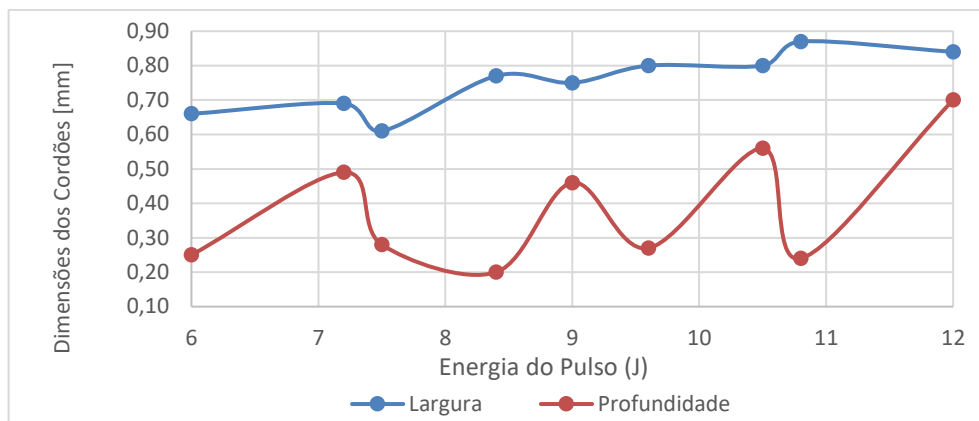


Figura 3.8. Dimensões geométricas dos cordões de solda em milímetros [Elaborado pelo Autor].

Uma primeira análise da Figura 3.8 é a grande oscilação dos padrões geométricos presentes em cada cordão de solda fato interessante que nos mostra que este parâmetro (energia de pulso) é extremamente importante no resultado final do cordão, sendo preciso determinar qual a melhor faixa de operação para os padrões pré-estabelecidos para cada caso.

Nota-se que o cordão que apresenta as maiores dimensões desse teste é justamente o que dispõe da maior energia aplicada, sendo ele o cordão D com 12J. Porém, o mesmo apresenta uma falha considerável em seu centro de aproximadamente 0,16mm, fato que também pode ser explicado devido a alta energia aplicada, havendo uma rápida evaporação do pó de titânio presente sobre o metal base não deixando tempo suficiente para que aja a aderência do mesmo, diminuindo a resistência do cordão.

Os mesmo problema aparece nos cordões G, H e I, referentes aos menores valores de energia de pulso. O aparecimento de falhas no interior dos cordões, diferentemente do caso anterior, é devido pela baixa energia aplicada que acaba por não ser suficiente para conseguir fundir o pó de titânio com o metal de solda corretamente, promovendo o aparecimento de vazios de 0,28mm; 0,10mm e 0,03mm respectivamente.

Nota-se que os cordões de solda que apresentaram maiores valores de profundidade foram os que tiveram os valores de potência de pico aumentada para 1,5kW, fato já esperado de acordo com a literatura, uma vez que esse parâmetro esta intimamente ligado com o grau de penetração do cordão de solda, ao passo que a largura temporal interfere de forma maior nos valores de largura dos cordões.

Os demais cordões de solda não apresentaram falhas estruturais e foram selecionados para a análise quantitativa utilizando o software ImageJ. A partir disso, utilizando as imagens das microestruturas obtidas via MEV foram feitas as análises estatísticas para os cordões de solda A, B, C, E e F. O processo realizado foi citado anteriormente obtendo-se as análises que serão dispostas nas Figuras 3.9 a 3.13 e Tabelas 3.6 a 3.10.

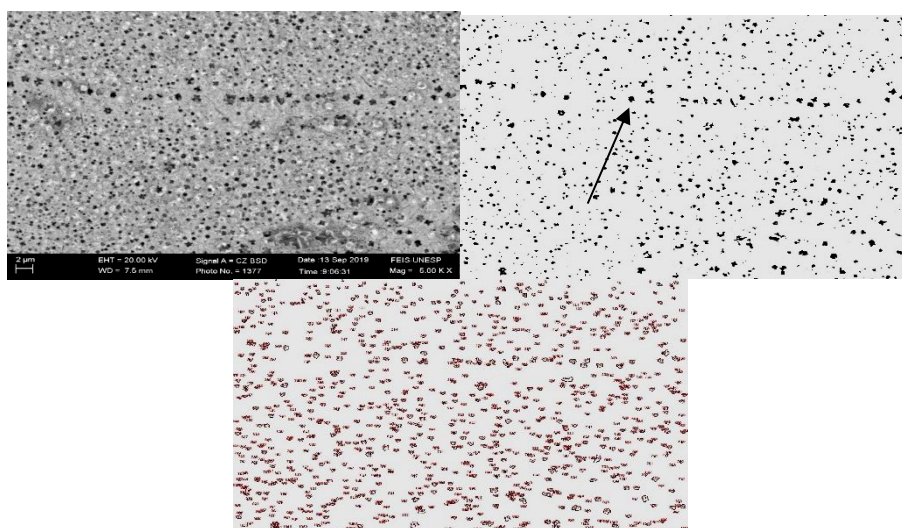


Figura 3.9. Análise do Cordão A com ImageJ, imagem com aumento de 5 mil vezes, imagem convertida em preto e branco e pontos analisados, respectivamente [Elaborado pelo Autor].

Tabela 3.6. Análise do Cordão A com ImageJ.

Total de Partículas analisadas	Área Total (μm^2)	Tamanho Médio (μm)	Fração Volumétrica	Circularidade	Diâmetro de Feret (μm)
1038	89,11	0,086	4,115	0,867	0,405

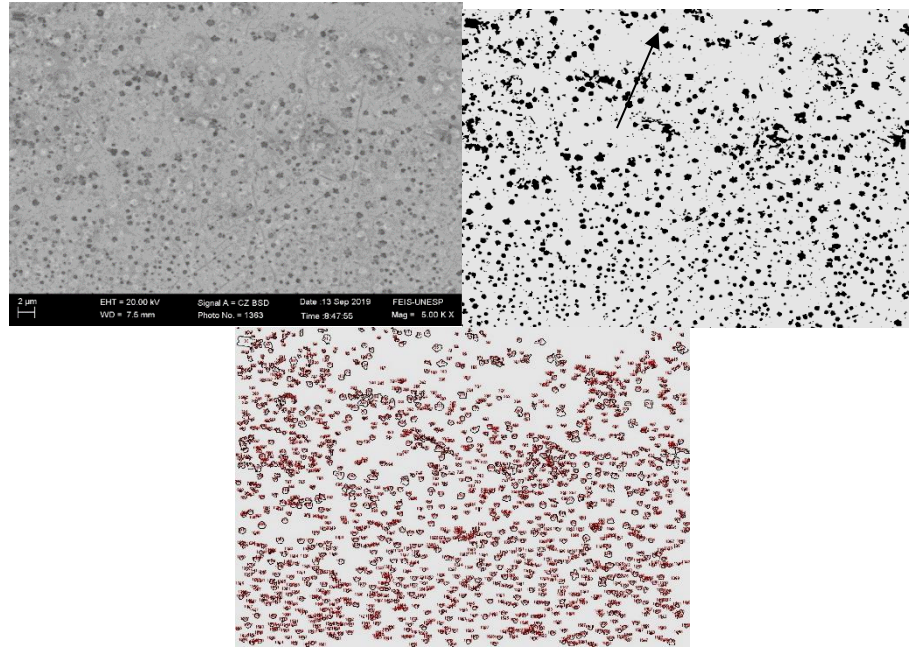


Figura 3.10. Análise do Cordão B com ImageJ, imagem com aumento de 5 mil vezes, imagem convertida em preto e branco e pontos analisados, respectivamente [Elaborado pelo Autor].

Tabela 3.7. Análise do Cordão B com ImageJ

Total de Partículas analisadas	Área Total (μm^2)	Tamanho Médio (μm)	Fração Volumétrica	Circularidade	Diâmetro de Feret (μm)
1661	220,783	0,133	10,196	0,822	0,492

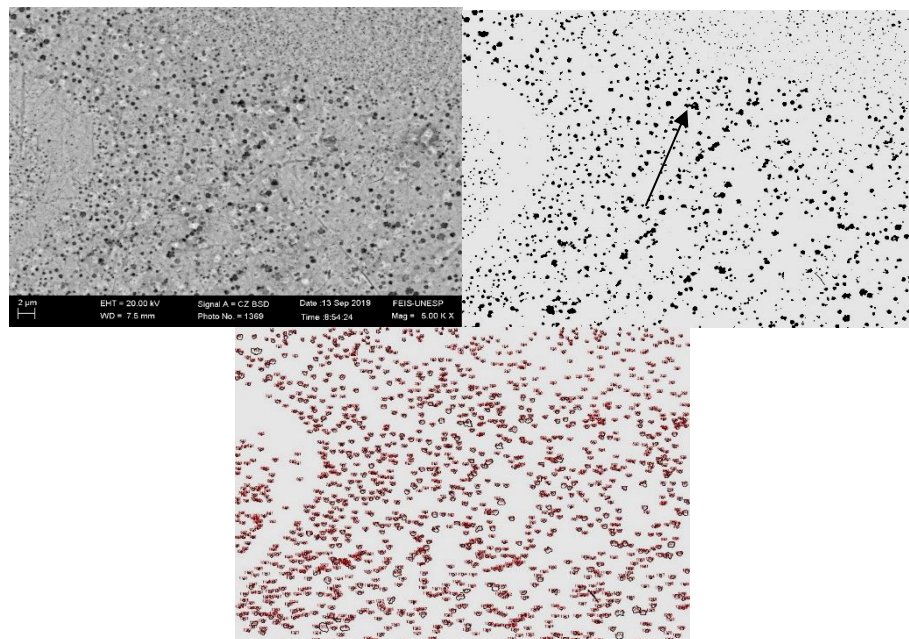


Figura 3.11. Análise do Cordão C com ImageJ, imagem com aumento de 5 mil vezes, imagem convertida em preto e branco e pontos analisados, respectivamente [Elaborado pelo Autor].

Tabela 3.8. Análise do Cordão C com ImageJ

Total de Partículas analisadas	Área Total (μm^2)	Tamanho Médio (μm)	Fração Volumétrica	Circularidade	Diâmetro de Feret (μm)
1412	123,085	0,087	5,684	0,903	0,398

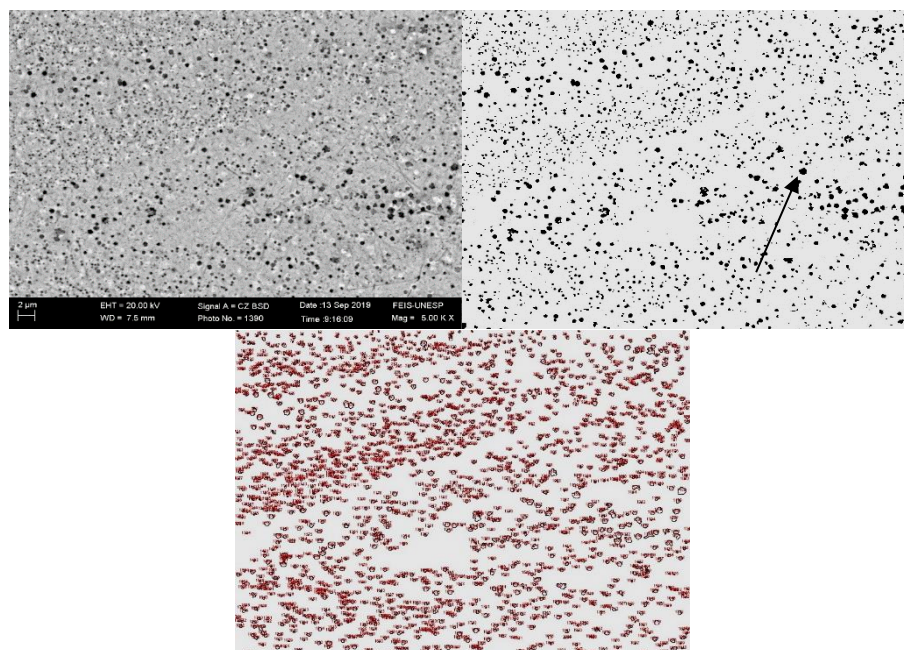


Figura 3.12. Análise do Cordão E com ImageJ, imagem com aumento de 5 mil vezes, imagem convertida em preto e branco e pontos analisados, respectivamente [Elaborado pelo Autor].

Tabela 3.9. Análise do Cordão E com ImageJ

Total de Partículas analisadas	Área Total (μm^2)	Tamanho Médio (μm)	Fração Volumétrica	Circularidade	Diâmetro de Feret (μm)
1933	138,335	0,072	6,34	0,907	0,364

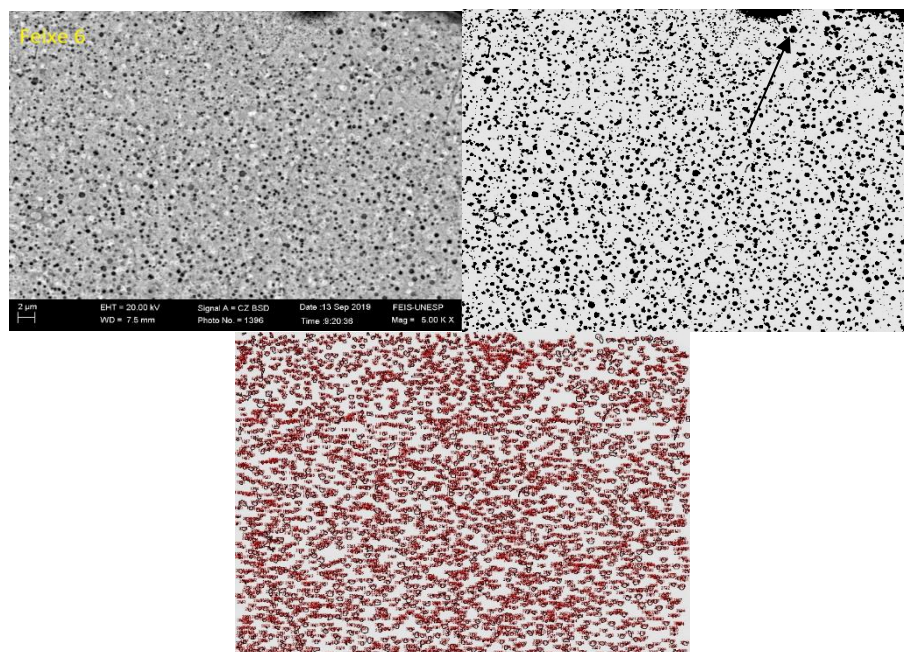


Figura 3.13. Análise do Cordão F com ImageJ, imagem com aumento de 5 mil vezes, imagem convertida em preto e branco e pontos analisados, respectivamente [Elaborado pelo Autor].

Tabela 3.10. Análise do Cordão F com ImageJ

Total de Partículas analisadas	Área Total (μm^2)	Tamanho Médio (μm)	Fração Volumétrica	Circularidade	Diâmetro de Feret (μm)
3340	323,352	0,097	14,819	0,859	0,432

Com base nas Figuras 3.9 a 3.13 e Tabelas 3.6 a 3.10 é possível analisar e obter dados quantitativos sobre cada feixe de solda. Como dito anteriormente, por este estudo utilizar soldagem a laser, que dispõe de uma alta quantidade energética em curtos períodos de tempo, espera-se obter um número elevado de partículas com tamanhos relativamente pequenos, uma vez que o pulso energético é extremamente concentrado fazendo com que o material se funda, porém, sem tempo para desenvolver grandes partículas devido a extrema velocidade de pulsação. Sabendo disso, os resultados obtidos vão de encontro ao esperado uma vez que todos apresentaram alta formação de partículas de carboneto e baixos valores de diâmetro de Feret.

Dentre os cordões de solda selecionados para a análise por não apresentarem vazios interiores, o que mais apresentou formação de partículas foi o cordão F, com 3340 partículas formadas. Os demais apresentam significativa redução no total de partículas conforme foi aumentando-se o valor da energia de pulso, sendo que o cordão A apresentou o menor número de partículas formadas, dispondo da maior energia de pulso aplicada no teste. O tamanho médio das partículas do mesmo modo que o primeiro teste se mostrou pequeno, fato já esperado como

dito antes devido ao tipo de soldagem aplicado no teste. Todos os cordões de solda analisados se mantiveram com valores relativamente próximos, entre $0,072\mu\text{m}$ e $0,133\mu\text{m}$, sendo o cordão E o que apresentou menores valores. Sabe-se que esses dois parâmetros são de extrema importância no resultado de dureza do revestimento, pois, quanto menor o tamanho médio das partículas formadas e maior a quantidade de partículas formadas, maior será a dureza apresentada pelo revestimento em questão. O objetivo principal deste estudo é obter revestimentos de elevada resistência, sabendo disso, os dados obtidos ao se analisar as amostras são muito otimistas, revelando que o caminho de estudo está sendo o correto. Este fato foi comprovado no preparo das amostras, que se mostraram nitidamente muito mais resistentes nos cordões de solda.

No segundo teste obteve-se uma relativa melhora no total de área preenchida em relação ao primeiro teste, variando de 4% a 14% de volume ocupado por carbonetos de titânio, sendo que mais uma vez o que apresentou maiores valores de volume ocupado foi o cordão F. Percebe-se um altos valores de fração volumétrica na faixa de 9J a 10J de energia de pulso, ao passo que saindo dessa faixa seja para valores maiores ou menores há um abrupto decaimento do volume ocupado.

Todos os cordões de solda analisados apresentaram valores de circularidade de diâmetro de Feret similares, estando nas faixas $0,822$ a $0,903$ e $0,36\mu\text{m}$ a $0,49\mu\text{m}$ respectivamente. Assim como no primeiro teste, o segundo apresentou valores baixos de Diâmetro de Feret e valores próximos de 1 para a circularidade, ou seja, partículas numerosas; pequenas e próximas de uma circunferência, dados ideais para o objetivo da pesquisa.

Ao se analisar todos os parâmetros observou-se que o cordão que apresentou os melhores resultados foi o cordão F com energia de pulso de 9J, pois apresentou o melhor resultado quanto ao número de partículas formadas, um tamanho médio e diâmetro de Feret pequeno, a maior fração volumétrica dentre os cordões de solda e uma circularidade bem próxima de 1. Foram obtidos dados muito positivos neste teste, pois justamente a ideia de se usar a soldagem a laser foi uma tentativa de aumentar o número de partículas, porém com tamanhos menores. Desejo obtido com sucesso, com relação a estudos passados desenvolvidos dentro do mesmo grupo de pesquisa realizados por Fagundes (2015), Pontin (2017) e Filho (2019) que apresentaram tamanhos médios relativamente maiores, por utilizarem outro processo de soldagem.

4. CONCLUSÃO

Realizando os dois testes, pode-se concluir que a melhor profundidade de focalização foi a do chanfro 1, com focalização no fundo do mesmo, sendo de 0,25mm de profundidade. Tratando-se de energia de pulso, os melhores resultados foram obtidos pelo cordão de solda F, com 9J de energia de pulso, sendo 1,6kW de potência de pico e 6ms de largura temporal, apresentando 3340 partículas formadas; 14,82% de fração volumétrica; diâmetro de Feret de 0,432 μ m e uma circularidade de 0,859. Sabendo disso, constata-se que houve uma refinação dos carboneto de titânio, que apresentaram tamanhos médios relativamente menores que os obtidos em outros testes na mesma área de pesquisa, além de uma circularidade muito próxima de 1, gerando uma maior resistência do revestimento. Esse refino nos carbonetos deve-se ao método de soldagem, que diferente de estudos passados, Fagundes (2015), Pontin (2017) e Filho (2019), onde se utilizavam soldagem TIG passou-se a utilizar soldagem laser, que fornece uma alta concentração de energia focada em uma pequena área em um curto período de tempo estimulando a formação de carbonetos mais circulares e de tamanho menores.

5. REFERÊNCIAS

- [1]. GAHR, K.H. Z. Microstructure and wear of materials. New York: Elsevier, 1987. V. 10.
- [2]. MELLOR, B. G. Surface coatings for protection against wear. Boca Raton: Woodhead Publishing Limited, 2006. 430 p.
- [3]. BUDINSKY K.G. Wear Modes, Surface Engineering for Wear Resistance. USA: Editora Prentice Hall, 1988. p 15-43.
- [4]. CONDE, R.H. Recubrimientos resistentes al desgaste. Boletín Técnico Conarco, n. 85, p.2-20, dec 1986.
- [5]. JEFFUS, F Larry. Welding: Principles and Applications. 5. Ed. Editora THOMSON Delmar Learning. USA. 904 p. 2002.
- [6]. HUTCHINGS, I. M. Tribology: Friction and wear of engineering material. CRC Press Inc. Boca Raton. USA. 273 p. 1992.
- [7]. OLIVEIRA SANTOS, J. F e outros. "Processamento de materiais por Feixe de Elétrons, LASER e Jato de Água". Publicação do ISQ - Instituto de Soldadura e Qualidade - Lisboa 1991.
- [8]. RAMALHO, José. Notas de aula da disciplina Novas Tecnologias da Produção, do curso de pós-graduação em Eng^a Industrial. Lisboa – 1990.

- [9]. ARATA, Y. "LASER Welding". Technocrat nº5, volume 2 – 1978.
- [10]. GIMENES JR., Luiz, RAMALHO, José e JOAQUIM, Roberto Comparação entre os Processos Laser e Feixe de Elétrons Aplicado a Soldagem de Aços, Revista Tecnologia & Soldagem, set,out,nov/94.
- [11]. KATAYAMA, SEIJI. Handbook of laser welding technologies. Osaka : Woodhead, 2013. 14p.
- [12]. TECH, AMADA WELD. Laser Welding Fundamentals. Califórnia : s.n., 2016
- [13]. RODRIGUES, THÚLIO JOSÉ. Soldagem dissimilar autógena com laser pulsado Nd:YAG dos aços superduplex UNS S32750 e superaustenítico AISI 904L. Ilha Solteira : ese de mestrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, 2019.
- [14]. PIERSON, H. O. Handbook of refractory carbides and nitrides. New Jersey: Noyes Publications, 1996. 7.
- [15]. WANG, X. H. et al. Fabricating TiC particles reinforced Fe-based composite coatings produced by GTAW multi-layers melting process. Materials Science and Engineering 441, 2006. 60-67. 8.
- [16]. GALLO, S. ; ALAM, ; O'DONNELL,. In-situ synthesis of titanium carbides in iron alloys using plasma transferred arc welding. Surface & Coatings Technology 225, 2013. 79-84. 9.
- [17]. PENG, D. X. et al. Wear behavior of ceramic powder clad on carbon steel surface by gas tungsten arc welding. Industrial Lubrication and Tribology 65/2, 2013. 129-134. 10.
- [18]. MOGHADDAM, H. Z.; SHARIFITABAR, ; ROUDINI, G. Microstructure and wear properties of Fe–TiC composite coatings produced by submerged arc cladding process using ferroalloy powder mixtures. Surface and Coatings Technology 361, 2019. 91-101.
- [19]. JÚNIOR, JOSÉ GEDAEL FAGUNDES. Reaproveitamento de cavacos de titânio gerado na indústria de implantes ortodônticos para a obtenção de diferentes morfologias de carbonetos depositados a arco elétrico. Belo Horizonte : Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Minas Gerais, 2020.
- [20]. FILHO, LUIZ GUSTAVO FREDDI LOMBA. Aplicação de micro-ondas para a produção de pós usados em revestimento endurecido por carboneto de titânio durante soldagem com arco elétrico Gtaw . Ilha Solteira : Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira -UNESP,, 2019
- [21]. RIBEIRO, RUBENS. R. Avaliação da resistência ao desgaste abrasivo de revestimentos soldados do tipo Fe-C-Cr utilizados na indústria sucroalcooleira. Ilha Solteira : Tese de mestrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, 2004
- [22]. PONTIN, GABRIEL INACIO. Microestrutura do metal de solda GTAW reforçado com carboneto de titânio, parcialmente refundido por laser ND:YAG pulsado . Ilha Solteira :

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP, 2017

[23]. BAYER, G Raymond. Mechanical Wear Fundaments and Testing. 2. Ed. USA,399p.2004.