

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**  
**DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA**  
**ENGENHARIA MECÂNICA**

**NATHAN MACIEL PORTES**

**DEPOSIÇÃO DE LIGAS Fe-Mn-Cr-Si-B POR PLASMA PTA**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PONTA GROSSA**

**2021**

**NATHAN MACIEL PORTES**

**DEPOSIÇÃO DE LIGAS Fe-Mn-Cr-Si-B POR PLASMA PTA**

**Deposition of Fe-Mn-Cr-Si-B alloys by PTA plasma**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentada como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).  
Orientador: Prof. Dr. Anderson Geraldo Marena Pukasiewicz

**PONTA GROSSA**

**2021**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais.  
Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



## **TERMO DE APROVAÇÃO**

DEPOSIÇÃO DE LIGAS FE-MN-CR-SI-B POR PLASMA PTA

por

NATHAN MACIEL PORTES

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 18 de maio de 2021 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Anderson Geraldo Marena Pukasiewicz  
Orientador

Prof. Dr. Luciano Augusto Lourençato  
Membro Titular

Profa. Ma. Heliety Rodrigues Borges Barreto  
Membro Titular

Prof. Dr. Marcos Eduardo Soares  
Responsável pelos TCC

Prof. Dr. Marcelo Vasconcelos de  
Carvalho  
Coordenador do Curso

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Anderson Geraldo Marena Pukasiewicz, pela sabedoria e paciência com que me guiou nesta trajetória.

À minha esposa, Larissa, por todas as palavras de apoio, toda compreensão e incentivo e por estar sempre ao meu lado.

À minha família, especialmente meus pais, Kiko e Gina, que juntos não mediram esforços para que eu pudesse estudar, sempre com total apoio e incentivo.

Aos meus irmãos, Francini e Francisco, cunhado, Júnior, e sogra Maristela, obrigado pelo apoio e torcida.

Às minhas sobrinhas, Yasmin e Geórgia, pelos momentos de descontração que me auxiliaram durante períodos de estresse.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

## RESUMO

PORTES, Nathan Maciel. **Deposição de ligas Fe-Mn-Cr-Si-B por plasma PTA.** 2021. 52f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2021.

A busca por reduções de custos dentro dos mais variados setores industriais é constante. A otimização da vida útil de peças e maquinários, por exemplo, é um desses casos em que o benefício econômico é alto. Ligas com alta resistência mecânica têm sido utilizadas como revestimentos para contornar problemas relacionados a desgastes de equipamentos. Uma dessas alternativas é a técnica de soldagem por plasma de arco transferido (PTA), em que o material de adição utilizado é na forma de pó. É um processo bastante promissor, pois permite a mistura de ligas, o que aumenta sua gama de aplicação. A possibilidade de utilizar ligas específicas buscando características exclusivas, entretanto, também traz consigo divergências e desafios na otimização de parâmetros de soldagem para cada caso. Portanto, o objetivo deste trabalho foi avaliar a influência de parâmetros de soldagem na microestrutura e propriedades mecânicas dos revestimentos de ligas Fe-Mn-Cr-Si-B. Os parâmetros variados foram a corrente de soldagem pulsada e taxa de alimentação de pó. Foram feitas análises em microscópio óptico e em microscópio eletrônico de varredura (MEV), bem como avaliada a microdureza do revestimento. Os resultados obtidos mostraram que as intensidades de corrente escolhidas foram insuficientes para fundir a quantidade de pó empregada junto ao substrato de forma homogênea, com valores de diluição muito baixos ou nulos e presença de poros. As microestruturas foram mais refinadas e definidas nos revestimentos de menor corrente pulsada, não proporcionando variações elevadas na dureza dos revestimentos.

**Palavras-chave:** Soldagem PTA. Ligas Fe-Mn-Cr-Si-B. Corrente pulsada. Taxa de alimentação de pó. Microestrutura.

## ABSTRACT

PORTES, Nathan Maciel. **Deposition of Fe-Mn-Cr-Si-B alloys by PTA plasma.** 2021. 52p. Work of Conclusion Course (Graduation in Mechanical Engineering). Federal Technology University - Paraná. Ponta Grossa, 2021.

The search for cost reductions within the most varied industrial sectors is constant. Optimizing the service life of parts and machinery, for example, is one of those cases in which the economic benefit is high. Alloys with high mechanical resistance have been used as coatings, so as to overcome problems related to equipment wear. One of these alternatives is the plasma transferred arc (PTA) technique, where the addition material used is in the form of powder. It is a very promising process, as it allows the mixing of alloys, increasing its range of application. The possibility of using specific alloys seeking exclusive features, however, also brings with it divergences and challenges in the optimization of welding parameters for each case. Therefore, the objective of this study was to evaluate the influence of welding parameters on the microstructure and mechanical properties of Fe-Mn-Cr-Si-B alloy coatings. The varied parameters were the pulsed welding current and powder feed rate. Analyzis were performed using an optical microscope and a scanning electron microscope (SEM), as well as evaluating the microhardness of the coating. The results obtained showed that the current intensities chosen were not sufficient to melt the amount of powder used next to the substrate in a homogeneous way, with very low or null dilution values and the presence of pores. The microstructures were more refined and defined in the coatings with lower pulsed current, not providing high variations in the hardness of the coatings.

**Keywords:** PTA welding. Fe-Mn-Cr-Si-B alloys. Pulsed current. Powder feed rate. Microstructure.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Soldagem por fusão e por pressão .....	12
Figura 2 - Aspecto de junta soldada.....	15
Figura 3 - Esquema dos processos PTA e PAW .....	16
Figura 4 - Esquema de equipamentos para soldagem PTA .....	18
Figura 5 - Fonte de energia .....	19
Figura 6 - Unidade de refrigeração.....	20
Figura 7- Alimentador de pó.....	21
Figura 8 -Distância bico-peça.....	24
Figura 9 - Diluição.....	26
Figura 10 - Diagrama de Schaeffler.....	28
Figura 11 - Morfologia do pó.....	29
Figura 12 - Análise inicial das amostras com ampliação de 10x .....	41
Figura 13 - ZTA das amostras com ampliação de 10x .....	42
Figura 14 - Medida da ZTA da Amostra 2 com ampliação de 12,5x .....	43
Figura 15 – Amostra 4 para cálculo de diluição .....	44
Figura 16 – Amostras em microscópio óptico com aumento de 200x.....	45
Figura 17 – Amostras em MEV com aumento de 2000x.....	46
Figura 18 – Regiões dendríticas e interdendríticas da amostra 3 .....	47
Figura 19 – Composição química de região dendrítica presente em amostra 3 .....	47
Figura 20 – Composição de região interdendrítica presente em amostra 3 .....	48

## LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1 - Arranjo do processo.....	31
Fotografia 2 - Alimentador de pó .....	32
Fotografia 3 - Aspecto dos cordões de solda .....	33
Fotografia 4 - Amostras cortadas .....	34
Fotografia 5 - Cortadeira Metalográfica Maxicut .....	34
Fotografia 6 - Embutimento das amostras .....	35
Fotografia 7 - Lixamento e Polimento .....	36
Fotografia 8 - Análise em Estereoscópio Zeiss .....	37
Fotografia 9 - Microscópio Óptico Zeiss Imager A.2m .....	38
Fotografia 10 - Análise por microscopia eletrônica de varredura.....	39
Fotografia 11 - Ensaio de Microdureza Vickers .....	40



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros de soldagem utilizados .....	31
Tabela 2 – Medição ZTA .....	42

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>10</b>
1.1 JUSTIFICATIVA.....	10
1.2 OBJETIVOS.....	11
1.2.1 Objetivo Geral.....	11
1.2.2 Objetivos Específicos.....	11
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>12</b>
2.1 PROCESSOS DE SOLDAGEM .....	12
2.2 PROCESSO DE DEPOSIÇÃO E SOLDAGEM POR PLASMA PTA.....	16
2.2.1 Equipamentos de Soldagem PTA.....	17
2.2.2 PARÂMETROS DE SOLDAGEM PTA.....	22
2.2.3 Vantagens do Processo PTA.....	24
2.3 AÇOS INOXIDÁVEIS .....	25
2.3.1 Aços Inoxidáveis Austeníticos.....	25
2.3.2 Ligas Austeníticas Fe-Mn-Cr-Si-B.....	25
2.4 METALURGIA DE SOLDAGEM .....	26
2.4.1 Diluição .....	26
2.4.2 Diagrama de Schaeffler .....	27
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>29</b>
3.1 SELEÇÃO DA LIGA.....	29
3.2 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA .....	30
3.3 DEPOSIÇÃO POR PLASMA PTA .....	30
3.4 ANÁLISE METALOGRÁFICA .....	33
3.4.1 Preparação Das Amostras.....	33
3.4.2 Preparação Metalográfica .....	35
3.4.3 Estereoscopia Óptica.....	36
3.4.4 Microscopia Óptica .....	37
3.4.5 Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura .....	38
3.5 ENSAIO DE MICRODUREZA VICKERS .....	39
<b>4 RESULTADOS</b> .....	<b>41</b>
4.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS.....	41
4.1.1 Cálculo da Diluição .....	43
4.2 ANÁLISE DA MICROESTRUTURA EM MICROSCÓPIO ÓPTICO .....	44
4.3 ANÁLISE MICROESTRUTURAL MEV .....	45
4.4 ANÁLISE DA MICRODUREZA VICKERS.....	48
<b>5 CONCLUSÃO</b> .....	<b>50</b>
<b>6 REFERÊNCIAS</b> .....	<b>51</b>

## 1 INTRODUÇÃO

No setor industrial são inúmeras as situações em que peças e maquinários de grande porte sofrem com desgastes, por elevadas cargas e trabalhos cíclicos, tornando o uso de revestimentos metálicos de elevada resistência uma das alternativas mais eficazes para contornar esse problema.

Uma técnica que promove de maneira bastante eficiente essa deposição de revestimento é o processo de soldagem PTA (Plasma Transferred Arc), ou simplesmente “Plasma Pó”.

Consiste em um processo a arco elétrico, com pó como metal de adição, podendo ser considerado uma variação do processo de soldagem PAW (Plasma Arc Welding), onde se tem arame como metal de adição. Além dessa distinção, esses dois processos diferem principalmente pelo fato de que o procedimento PAW surgiu como uma evolução do TIG, buscando maior constrição do arco e, conseqüentemente mais penetração, enquanto no PTA, suas aplicações são basicamente de revestimento, onde portanto, tem-se o objetivo de baixa diluição (e baixa penetração) (SILVA, DUTRA, 2012; TAKANO, QUEIROZ, D’OLIVEIRA, 2008).

Esse maior controle de diluição somado a depósitos de alta qualidade metalúrgica e superficial são algumas das vantagens que fazem com que o processo PTA se torne bastante atrativo industrialmente para utilização em revestimentos metálicos (SILVA, DUTRA, 2012).

Aliado a isso, deve-se levar em consideração que a possibilidade de mistura de pós capacita o processo PTA a expandir sua aplicação, com características específicas para determinada situação, tornando-o ainda mais interessante.

### 1.1 JUSTIFICATIVA

A vantagem de poder contar com mais opções de material de deposição também traz consigo desafios. Por ser um processo de soldagem relativamente novo quando comparado a outros processos mais convencionais, sua literatura pode ser considerada um pouco escassa e dispersa, sobretudo atrelado ao fato de se possuir

um vasto campo no que se diz respeito à combinação do processo de soldagem em si com a escolha do pó a ser utilizado (TAKANO, QUEIROZ, D'OLIVEIRA, 2008).

Ligas austeníticas de Fe-Mn-Cr-Si, por exemplo, combinadas com a adição de boro, podem muito bem ser utilizadas em revestimentos. Por possuírem elevada dureza, são bastante úteis ao combate a desgastes, tornando-as interessantes na utilização em conjunto ao processo PTA.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar a influência de parâmetros de soldagem na microestrutura e propriedades mecânicas de Ligas de Fe-Mn-Cr-Si-B depositadas pelo processo PTA.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Avaliar as alterações provocadas na microestrutura e microdureza de Ligas Fe-Mn-Cr-Si-B ao se variar a corrente (pulsada) e a taxa de alimentação de pó no processo de Soldagem PTA. Também serão analisadas as alterações na microestrutura e microdureza da ZTA do metal base.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

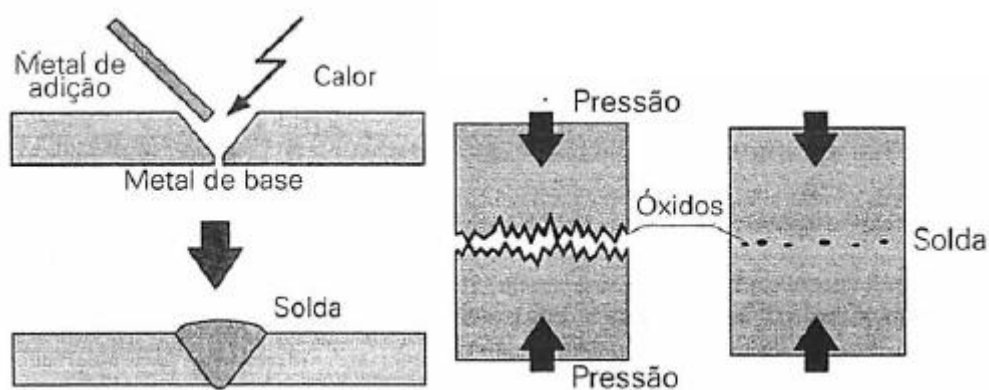
### 2.1 PROCESSOS DE SOLDAGEM

Segundo a AWS (American Welding Society), soldagem pode ser definida como “o processo de união de materiais usados para obter a coalescência(união) localizada de metais e não-metais, produzida por aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a utilização de pressão e/ou material de adição.”

Uma forma de se classificar os mais variados tipos de processos é separando-os em dois grandes grupos: Soldagem por fusão e soldagem por pressão, sendo que nesse segundo grupo estão inclusos os processos de soldagem por forjamento, ultrassom, fricção, difusão, entre outros (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE ,2011).

Abaixo na figura 1, tem-se o esboço de soldagem por fusão e por pressão. Em seguida, no quadro 1, pode-se observar os processos relacionados ao primeiro grupo, por fusão, com seus principais tipos e algumas de suas características.

**Figura 1: Soldagem por fusão e por pressão**



**Fonte: Marques, Modenesi e Bracarense (2011)**

Quadro 1 - Processos de soldagem por fusão

Processo	Fonte de calor	Tipo de corrente e polaridade	Agente protetor	Outras características	Aplicações
Soldagem por eletroescória	Aquecimento por resistência da escória líquida	Contínua ou alternada	Escória	Automática/Mecanizada Junta na vertical. Arame alimentado mecanicamente na poça de fusão. Não existe arco elétrico.	Soldagem de aços carbono, baixa e alta liga, espessura $\geq 50$ mm. Soldagem de peças de grande espessura, eixos, etc.
Soldagem a arco submerso	Arco elétrico	Contínua ou alternada. Eletrodo +	Escória	Automática/Mecanizada ou semiautomática. O arco arde sob uma camada de fluxo granular.	Soldagem de aços carbono, baixa e alta liga, espessura $\geq 10$ mm. Posição plana ou horizontal de peças estruturais, tanques, vasos de pressão, etc.
Soldagem com eletrodo revestido	Arco elétrico	Contínua ou alternada. Eletrodo + ou -	Escória e gases gerados	Manual. Vareta metálica recoberta por camada de fluxo.	Soldagem de quase todos os metais, exceto cobre puro, metais preciosos, reativos e de baixo ponto de fusão. Usado na soldagem em geral.
Soldagem com arame tubular	Arco elétrico	Contínua. Eletrodo +	Escória e gases gerados ou fornecidos por fonte externa. Em geral o CO <sub>2</sub>	Automático ou semiautomático. O fluxo está contido dentro de um arame tubular de pequeno diâmetro.	Soldagem de aços carbono, baixa e alta liga, com espessura $\geq 1$ mm. Soldagem de chapas, tubos, etc.
Soldagem MIG/MAG	Arco elétrico	Contínua. Eletrodo +	Argônio ou Hélio, Argônio + O <sub>2</sub> , Argônio + CO <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub>	Automática/Mecanizada ou semiautomática. O arame é sólido.	Soldagem de aços carbono, baixa e alta liga, não ferrosos, com espessura $\geq 1$ mm. Soldagem de tubos, chapas etc. Qualquer posição.

Soldagem a plasma	Arco elétrico	Contínua constante ou pulsada. Eletrodo -	Argônio, Hélio ou Argônio + Hidrogênio	Manual ou automática. O arame ou pó é adicionado separadamente. Eletrodo não consumível de tungstênio. O arco é constricto por um bocal.	Todos os materiais importantes de engenharia, exceto Zn, Be e suas ligas, com espessura de até 1,5 mm. Passes de raiz.
Soldagem TIG	Arco elétrico	Contínua ou alternada. Eletrodo -	Argônio, Hélio ou mistura desses	Manual ou automática. Eletrodo não consumível de tungstênio. O arame é adicionado separadamente.	Soldagem de todos os metais, exceto Zn, Be e suas ligas, espessura entre 1 a 6 mm. Soldagem de não ferrosos e aço inox. Passe de raiz de soldas em tubulações.
Soldagem por feixe de elétrons	Feixe de elétrons	Contínua. Alta tensão. Peça +	Vácuo (=10 <sup>-4</sup> mm Hg)	Soldagem automática. Não usa, em geral, metal de adição. Feixe de elétrons permite uma elevada concentração de energia.	Soldagem de todos os metais, exceto nos casos de evolução de gases ou vaporização excessiva.
Soldagem a laser	Feixe de luz		Argônio ou Hélio	Soldagem automática. Não usa, em geral, metal de adição. Laser permite uma elevada concentração de energia.	Soldagem de todos os metais, exceto nos casos de evolução de gases ou vaporização excessiva. Indústria automobilística, nuclear e aeroespacial.
Soldagem a gás	Chama oxiacetilênica		Gás (CO, H <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O)	Manual. Arame adicionado separadamente.	Soldagem manual de aço carbono, Cu, Al, Zn, Pb e bronze. Soldagem de chapas finas e tubos de pequeno diâmetro.

Fonte: Adaptado de Marques, Modenesi e Bracarense (2011)

Como se pode notar, a soldagem por fusão engloba a maioria dos processos, e consiste em um processo de união que utiliza a fusão do metal base para fazer a solda.

Dentro destes processos, há uma subdivisão, formando-se três grupos com os principais processos:

1) Soldagem a gás:

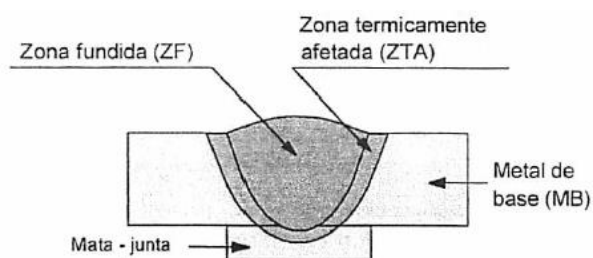
Soldagem oxiacetilênica (OAW);

2) Soldagem a arco:

- Soldagem a arco com eletrodo revestido (SAER ou em Inglês Shielded Metal Arc Welding- SMAW);
  - Soldagem a arco elétrico com eletrodo não consumível de Tungstênio, mais conhecido no Brasil como TIG;
  - Soldagem a arco submerso (SAS ou em Inglês-submerged arc welding- SAW);
  - Soldagem a arco elétrico com eletrodo consumível sob proteção gasosa de gás inerte (MIG) ou gás ativo (MAG);
  - Soldagem a arco tubular (FCAW);
  - Soldagem a plasma (PAW, PTA);
- 3) Soldagem por feixe de elétrons (EBW, LBW) (Kou, 2002).

Após o procedimento de solda escolhido, a junta soldada apresenta o aspecto demonstrado na figura 2. A zona fundida da solda é aquela constituída pelo metal da solda, e representa o somatório do metal de base fundido junto com o metal de adição. Por outro lado, a zona termicamente afetada (ZTA) é a região do metal afetada em sua propriedade e/ou estrutura pelo calor do processo (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2011).

**Figura 2- Aspecto de junta soldada**



**Fonte: Marques, Modenesi e Bracarense (2011)**



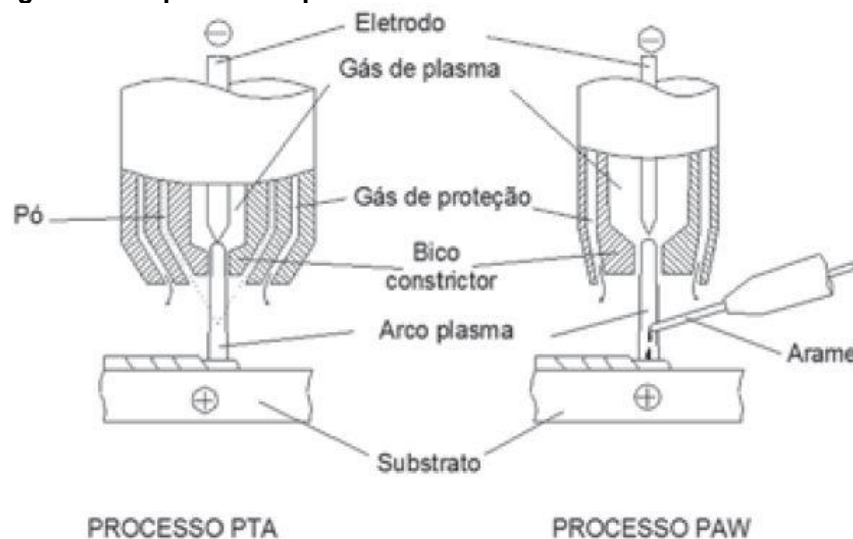
## 2.2 PROCESSO DE DEPOSIÇÃO E SOLDAGEM POR PLASMA PTA

Em geral, os procedimentos de soldagem a plasma são considerados uma modificação do processo TIG, visto que ambos utilizam um arco elétrico (plasma), gerado por um eletrodo de tungstênio não consumível como fonte primária de calor, tendo como sua principal diferença a constrição do arco (KOU,2002).

Quando se utiliza arame como metal de adição, tem-se o processo PAW (Plasma Arc Welding), enquanto ao se utilizar pó como metal de adição, denominamos o processo de PTA (Plasma Transferred Arc), ou simplesmente, “Plasma pó” (DÍAZ, DUTRA, D’OLIVEIRA, 2010; TAKANO, QUEIROZ, D’OLIVEIRA,2010).

A figura 3, ilustra os dois processos, demonstrando sua similaridade construtiva.

**Figura 3 - Esquema dos processos PTA e PAW**



Fonte: Díaz, Dutra e D’Oliveira (2010)

Apesar dessas similaridades, é importante salientar que suas aplicações e parametrizações são consideradas divergentes.

Enquanto no procedimento PAW se buscou a constrição do arco para uma melhor penetração, o processo PTA surge para aplicação em revestimentos, com baixa diluição (portanto, baixa penetração) (SILVA, DUTRA, 2012).

Além do bocal de constrição do arco, o que também difere o processo PTA do TIG é o fato do PTA possuir três sistemas de gases e dois arcos ajustáveis

independentemente. O arco não transferido (arco piloto), é utilizado para iniciar e estabilizar o arco principal entre o eletrodo de tungstênio e a peça, chamado de arco plasma (TIGRINHO, 2005; RIBEIRO, 2007).

O gás ionizado (gás plasma) utilizado normalmente é o Argônio, sendo este forçado a passar através do orifício constritor, onde o eletrodo está fixado. O gás de proteção (ativo ou inerte), passa em um bocal externo, conforme observado na Figura 3, exercendo efetivamente o papel de proteção da solda contra eventuais contaminações pelo ar atmosférico. Para o transporte do material de adição em formato de pó, utiliza-se um Alimentador de pó, que com o auxílio de um fluxo de gás (novamente Argônio é o mais usual), é direcionado à tocha plasma. Esse gás é denominado gás de arraste (DÍAZ, DUTRA, D'OLIVEIRA, 2010; SANTOS, 2003; RIBEIRO, 2007).

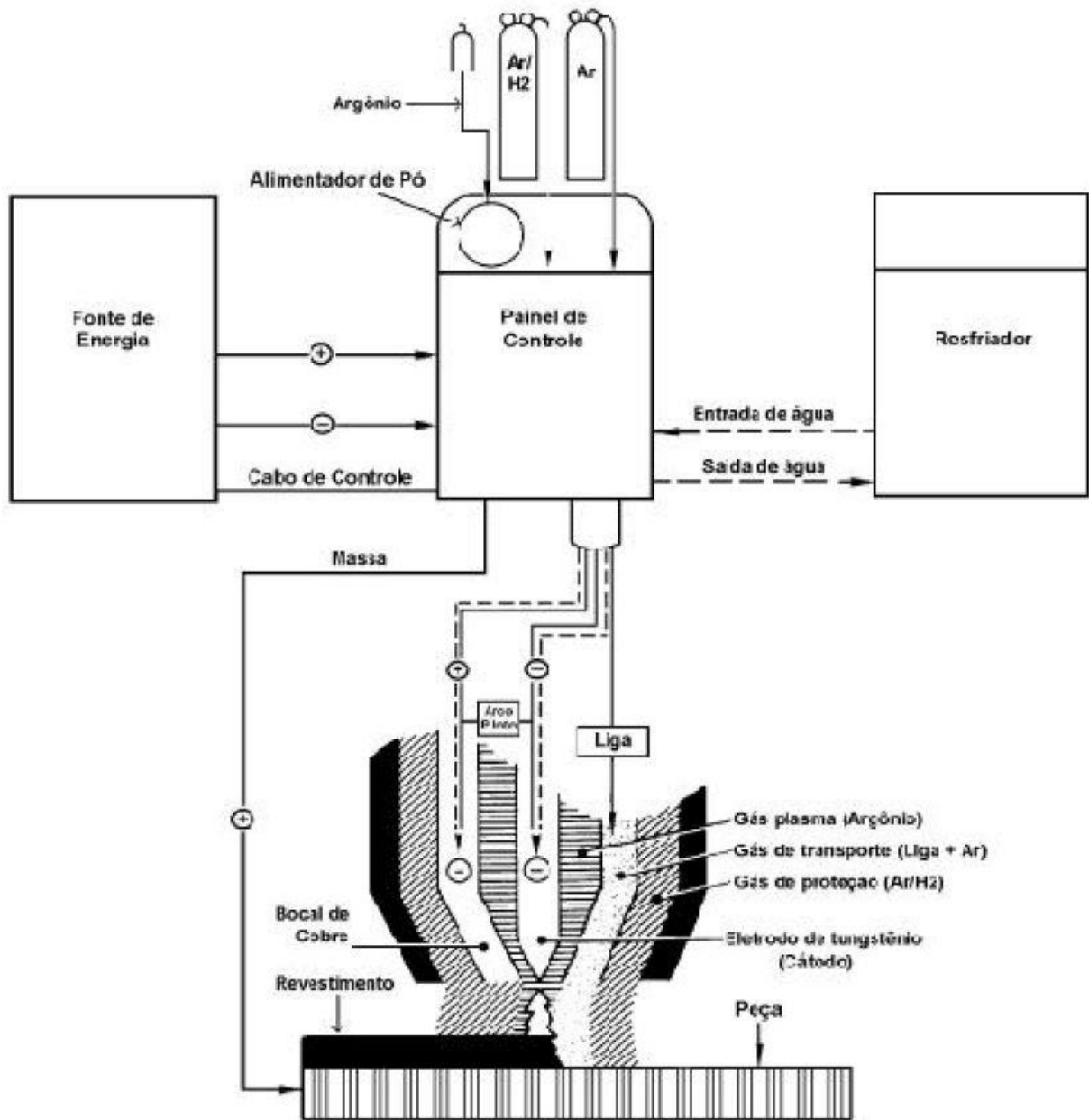
### 2.2.1 Equipamentos de Soldagem PTA

Os itens básicos que compõe o processo PTA são:

- Fonte de Energia e Unidade de controle de plasma;
- Tocha de Soldagem;
- Unidade de refrigeração de tocha;
- Alimentador de pó;
- Sistema de suprimento de gases;

A figura 4 apresenta o esquema dos equipamentos citados.

Figura 4 - Esquema de equipamentos para soldagem PTA



Fonte: Tigrinho (2005)

### 2.2.1.1 Fonte de energia e unidade de controle de plasma

Tem a função de fornecer a energia para o sistema de soldagem. Além disso, também regula o fluxo dos gases, corrente de soldagem, tipo de corrente, início do arco (RIBEIRO, 2007).

**Figura 5- Fonte de energia**



**Fonte: Manual Digiplus A7 (2015)**

### 2.2.1.2 Tocha de soldagem

A tocha de soldagem tem a função de direcionar o arco e fixar o eletrodo de tungstênio. Possui canais para passagem dos gases e da água de refrigeração, além de um bico de cobre responsável pela constrição do arco (RIBEIRO, 2007).

Para se aumentar a vida útil da tocha, faz-se necessário a utilização de unidade de refrigeração, onde um fluxo de água evita o superaquecimento da tocha.

**Figura 6 – Unidade de refrigeração**



Fonte: <<https://www.imc-soldagem.com.br/pt-br/equipamentos/unidade-de-refrigeracao/ur-23>>

### 2.2.1.3 Alimentador de pó

É responsável pela dosagem da liga metálica, transportando-a do silo de armazenamento até a poça de fusão. O grau de homogeneidade e continuidade do transporte do pó é fator importante para a qualidade da solda (SILVA, DUTRA, 2012; RIBEIRO, 2007).

**Figura 7- Alimentador de pó**

Fonte: <[http://www.spssoldagem.com.br/catalogo/Catalogo\\_de Equipamentos\\_SPS- Soldagem.pdf](http://www.spssoldagem.com.br/catalogo/Catalogo_de Equipamentos_SPS- Soldagem.pdf)>

#### 2.2.1.4 Sistema de suprimento de gases

Conforme já comentado, existem três sistemas de gases no processo PTA. São gases inertes responsáveis por reduzir desgaste do eletrodo e proteger a solda da atmosfera (RIBEIRO, 2007).

O gás mais externo chama-se gás de proteção, e como o próprio nome diz, tem a função de proteger a poça fundida contra possíveis contaminações causadas pela atmosfera. Geralmente utiliza-se argônio (TIGRINHO, 2005; RIBEIRO, 2007).

O sistema mais interno recebe o chamado gás plasma, responsável por auxiliar a gerar o feixe de plasma e proteger o eletrodo de tungstênio. Argônio é o gás comumente utilizado (RIBEIRO, 2007; DÍAZ, DUTRA, D'OLIVEIRA, 2010).

O Terceiro sistema de gás recebe o nome de gás de arraste, o qual tem função de transportar o material em forma de pó ao arco plasma, dando origem ao revestimento. Pode-se utilizar argônio, mistura de argônio com hidrogênio ou hélio (SANTOS, 2003; RIBEIRO, 2007).

## 2.2.2 PARÂMETROS DE SOLDAGEM PTA

Os principais parâmetros envolvidos na soldagem PTA são a corrente de soldagem, taxa do material de adição, velocidade de soldagem, vazão dos gases (proteção, transporte, plasma) e distância bico-peça (DÍAZ, DUTRA, D'OLIVEIRA,2010).

### 2.2.2.1 Corrente de soldagem

A intensidade de corrente é considerada a variável mais importante do processo PTA. Ela afeta diretamente o aporte de calor do revestimento, sendo que o aumento de corrente de deposição deve ser seguido por um aumento na taxa de alimentação do pó, para que se tenha uma diluição minimizada (SANTOS, 2003; RIBEIRO, 2007).

Opções interessantes para minimização de defeitos tanto no início quanto no final do depósito surgem com a evolução de fontes de soldagem, sendo a utilização de corrente pulsada, uma delas (SANTOS, 2003).

Entre suas vantagens estão a menor distorção e menor ZTA; maior refinamento e homogeneidade da microestrutura do material depositado sem aumentar a taxa de resfriamento; aporte térmico menor do que em corrente contínua constante (KOU, 2002; SANTOS, 2003, BOND, 2008).

### 2.2.2.2 Taxa do material de adição

A taxa do material de adição interfere na geometria e formato do cordão do revestimento. Ela também tem relação com a ocorrência de defeitos como a porosidade e falta de fusão. Com maiores taxas de alimentação, geralmente se observa uma diminuição na diluição e aumento no reforço do cordão de solda (SANTOS, 2003).

### 2.2.2.3 Velocidade de soldagem

Relaciona-se a velocidade de soldagem à quantidade de calor que se transfere para a peça. Com os demais parâmetros fixados, ao se variar a velocidade de soldagem, observa-se a influência da mesma na microestrutura e tamanho da ZTA (SANTOS, 2003).

### 2.2.2.4 Vazão dos gases

Para o gás plasma, uma vazão maior acarreta maior penetração e maior quantidade de partículas expulsas. Estas vazões sendo excessivas, ocasionam imperfeições superficiais (poros), enquanto vazões insuficientes desgastam o eletrodo (RIBEIRO, 2007).

Para o gás de proteção, dentro de sua faixa adequada, a vazão aumentada proporciona maior diluição, visto que a taxa de resfriamento se torna menor (RIBEIRO, 2007).

A vazão do gás de arraste está relacionado à quantidade de pó que será transportado ao arco elétrico, acarretando as características já mencionadas anteriormente em relação a taxa de alimentação do pó.

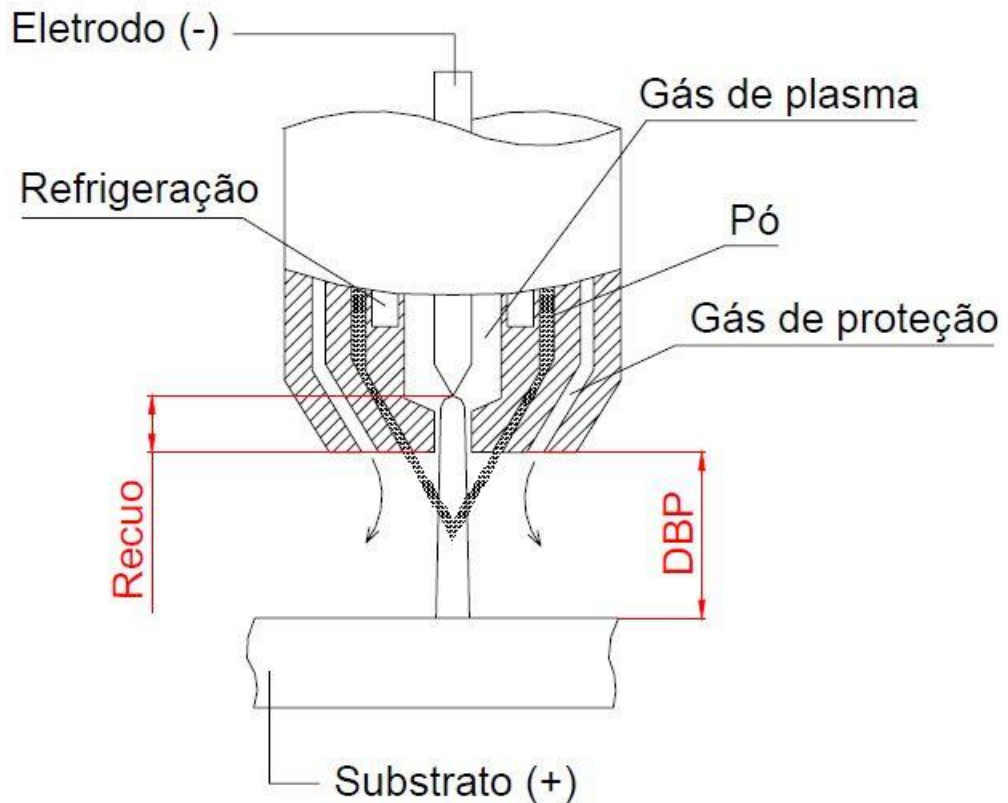
### 2.2.2.5 Distância bico-peça

O grau de influência da distância bico-peça sobre o revestimento depende muito do recuo do eletrodo em relação ao bico constritor e do diâmetro do orifício. A constrição do arco se torna maior utilizando um orifício com menor diâmetro em conjunto de maior recuo do eletrodo, ocasionando em um arco mais concentrado (DÍAZ, 2005).

O recuo do eletrodo está diretamente ligado à largura e penetração do cordão de solda, influenciando a concentração do arco, e, conseqüentemente a qualidade superficial do depósito, sendo medido desde a ponta do eletrodo até a face externa do bico constritor (DÍAZ, DUTRA, D'OLIVEIRA, 2010; RIBEIRO, 2007).



Figura 8- Distância bico-peça



Fonte: Díaz (2005)

### 2.2.3 Vantagens do Processo PTA

Dentre as principais vantagens do processo de deposição por plasma PTA, destacam-se:

- Baixa diluição (5 a 20%) e mínima distorção;
- Estabilidade do arco, mesmo em correntes baixas;
- Revestimentos densos e homogêneos com alta qualidade superficial e metalúrgica;
- A possibilidade de mistura de pós eleva seu campo de aplicação;
- Maior velocidade de deposição, caracterizada pela maior concentração de energia advinda da constrição do arco plasma;

## 2.3 AÇOS INOXIDÁVEIS

Os aços inoxidáveis são ligas de Ferro, Carbono (0,03-0,1%) e no mínimo 10,5% de Cromo, o que faz com que não se oxidem à atmosfera ambiente normal. São classificados em três grupos, de acordo com sua estrutura cristalina predominante na liga à temperatura ambiente: Aços inoxidáveis austeníticos (Estrutura CFC); aços inoxidáveis ferríticos (Estrutura CCC); aços inoxidáveis martensíticos (Estrutura TCC).

Algumas de suas principais características são: alta resistência a corrosão; são conformados e soldados com certa facilidade; são materiais inertes; relação custo/benefício favorável; entre outras (KOU, 2002).

### 2.3.1 Aços Inoxidáveis Austeníticos

Os aços inoxidáveis austeníticos contêm 16 a 25% de Cr, 8 a 20% de Ni, 1 a 2% de manganês, 0,5 a 3% de silício, além de eventualmente outros elementos de liga (LIPPOLD, 2005).

Uma característica importante é o fato de possuírem grande ductilidade e elevado coeficiente de dilatação térmica, quando comparado com aços de estrutura ferrítica. Possuem também, resistência à corrosão muito maior do que aços inoxidáveis ferríticos e martensíticos (PUKASIEWICZ, 2008; LIPPOLD, 2015).

### 2.3.2 Ligas Austeníticas Fe-Mn-Cr-Si-B

As ligas Austeníticas Fe-Mn-Cr-Si são conhecidas como ligas de memória de forma. Recebem esse nome pelo fato de possuírem a capacidade de retornar ao seu estado inicial, após sofrer deformação plástica, desde que passem por um ciclo térmico de aquecimento apropriado (PUKASIEWICZ, 2008).

Dentre outras características microestruturais, pode-se citar a elevada resistência à deformação da austenita  $\gamma$  e baixa energia de falha de empilhamento (EFE). Essas características, por exemplo, trouxeram resultados interessantes em pesquisas relacionadas à resistência à cavitação (PUKASIEWICZ, 2008).

A adição de Boro a essas ligas, traz o refinamento dos grãos e aumenta sua resistência mecânica (SHYNE *et al.*, 1956).

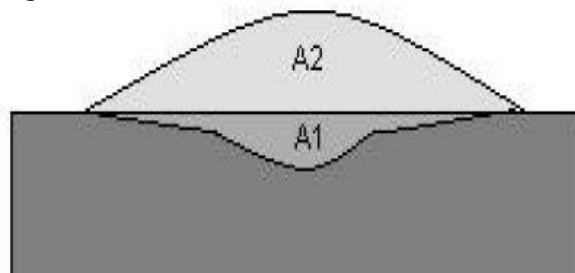
## 2.4 METALURGIA DE SOLDAGEM

Em soldagem é importante a avaliação da estrutura e o consequente conhecimento das propriedades de um depósito de solda de aços inoxidáveis. Esse conhecimento influi na escolha do processo adequado para a execução da soldagem, bem como na previsão e prevenção dos problemas que podem ocorrer (LIPPOLD, 2015).

### 2.4.1 Diluição

A composição química de uma solda não é a mesma que a composição química especificada para o metal de adição depositado, devido a participação do metal de base na constituição da zona fundida. O coeficiente de diluição, ou simplesmente diluição, indica a participação do metal de base na constituição da zona fundida (KOU, 2002).

**Figura 9 - Diluição**



Fonte: BATISTA *et al.* (2011)

Na figura 9, “A1” representa a área de penetração, e, “A2” representa a área de seção transversal da zona fundida.

A diluição é calculada através da equação 1.

$$D(\%) = \frac{A1}{A1+A2} \quad (1)$$

A diluição é função do processo e procedimento de soldagem. Por exemplo, na soldagem PTA ela é de ordem de 6 a 10%, enquanto na solda a arco submerso pode atingir 80%.

Na soldagem de metais dissimilares, a diluição é um dado indispensável para a previsão dos constituintes e propriedades da solda. Um exemplo clássico é o emprego do diagrama de Schaeffler na soldagem de aços inoxidáveis.

#### 2.4.2 Diagrama de Schaeffler

O diagrama de Schaeffler é o principal instrumento para a avaliação do depósito de solda. Ele permite prever com antecedência a microestrutura de uma solda de liga Cr-Ni.

Para a utilização do diagrama de Schaeffler, necessita-se calcular os parâmetros denominados por Schaeffler como Cromo Equivalente e Níquel Equivalente.

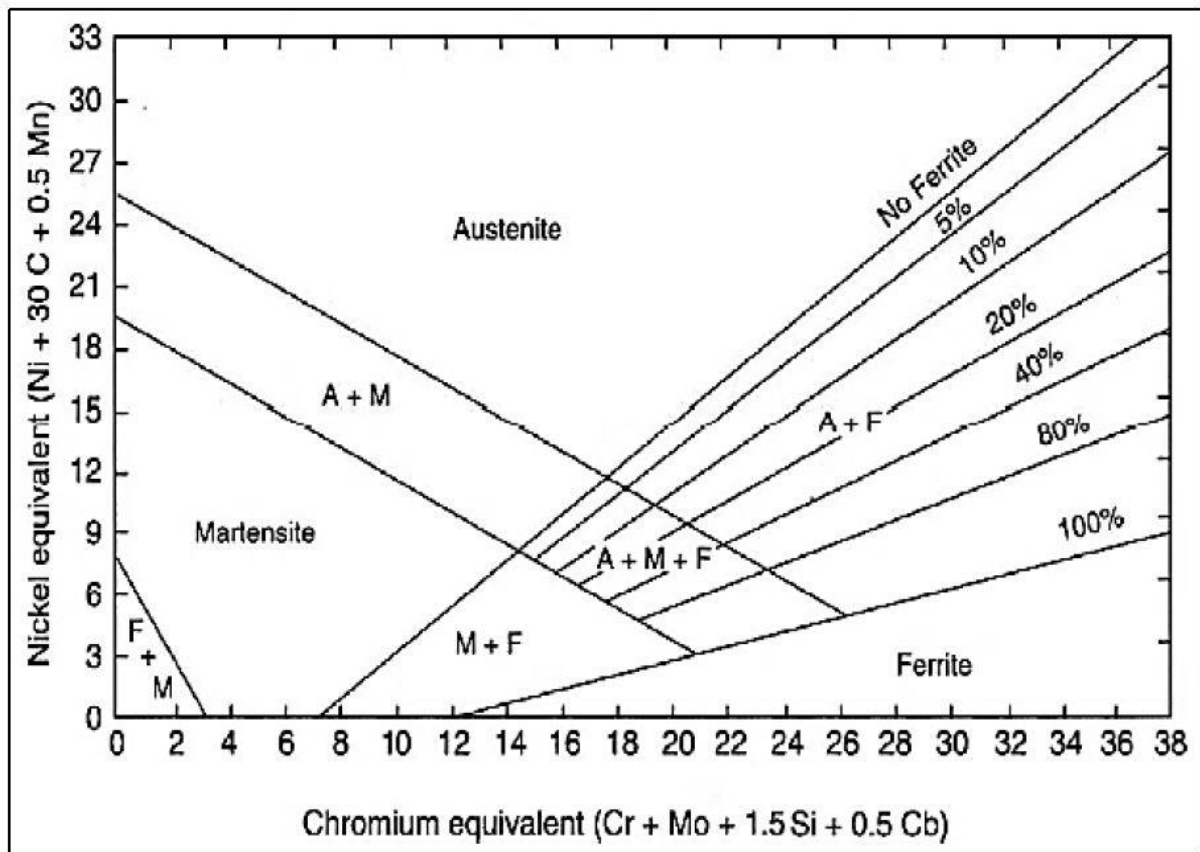
O primeiro é definido como a soma ponderada dos elementos alfaógenos e expressa sua influência de vários elementos químicos relativamente ao Cromo. Define-se pela equação 2 (LIPPOLD, 2005).

$$Creq = \%Cr + \%Mo + 1,5x\%Si + 0,5x\%Nb \quad (2)$$

O Níquel Equivalente é definido como a soma do teor de níquel e dos elementos gamaógenos, multiplicados pelo fator que expressa sua influência relativamente ao níquel. Define-se pela equação 3 (LIPPOLD, 2005).

$$Nieq = \%Ni + 30x \%C + 0,5x\%Mn \quad (3)$$

Figura 10 - Diagrama de Schaeffler



Fonte: LIPPOLD (2005)

### 3 METODOLOGIA

Esta pesquisa é de natureza aplicada, com abordagem quantitativa-qualitativa e caráter exploratório, utilizando-se procedimentos de forma experimental.

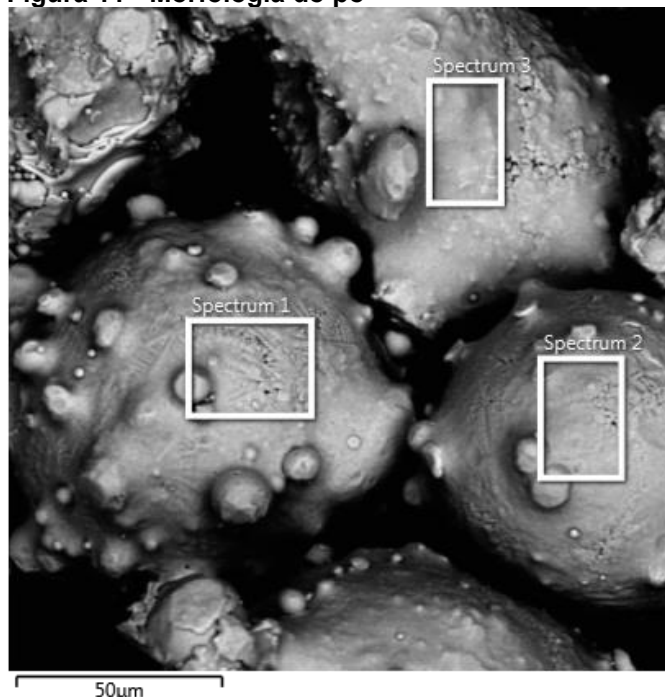
A metodologia do presente trabalho consiste em:

- Seleção da liga;
- Preparação dos Corpos de Prova;
- Deposição por Plasma PTA;
- Preparação e Análise Metalográfica das amostras;
- Ensaio de Microdureza Vickers;

#### 3.1 SELEÇÃO DA LIGA

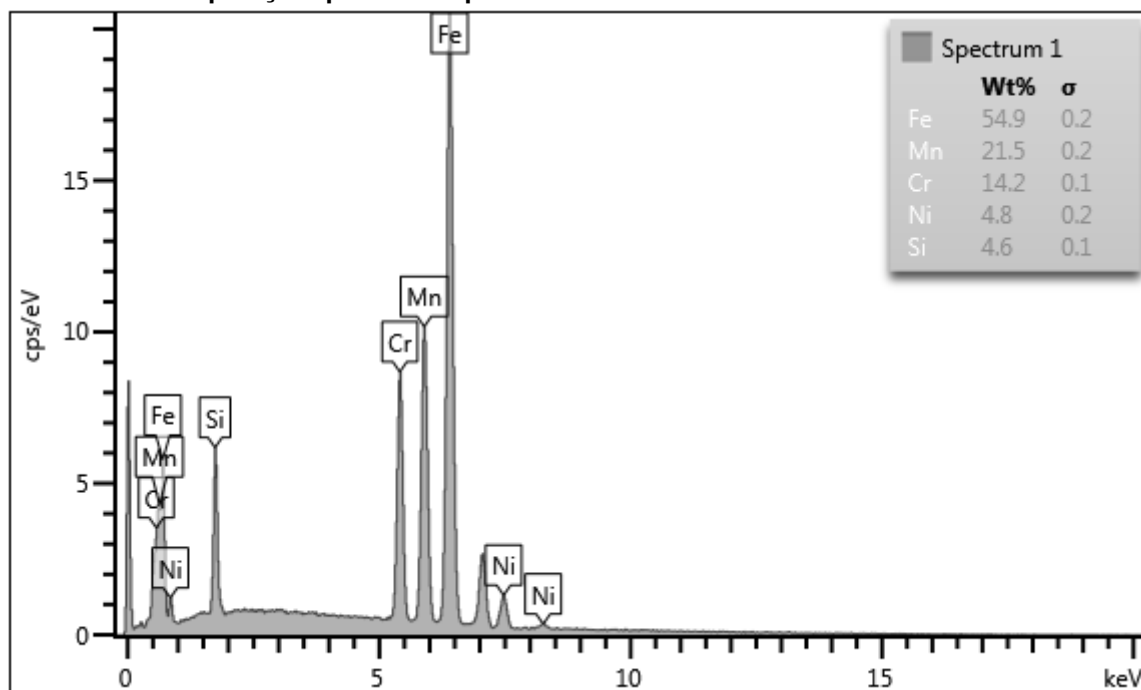
Optou-se pela Liga Fe-Mn-Cr-Si-B em formato de pó (granulometria +63 $\mu\text{m}$ -106 $\mu\text{m}$  e 0,5% de Boro), sendo essa uma derivação de uma liga desenvolvida por Pukasiewicz (2008). A figura 11 e o gráfico 1 apresentam sua morfologia e respectiva composição química, analisadas através de microscopia eletrônica de varredura (MEV).

**Figura 11 - Morfologia do pó**



Fonte: Autoria própria

Gráfico 1 - Composição química do pó



Fonte: Autoria própria

### 3.2 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Para o desenvolvimento deste estudo, foram utilizados corpos de prova de aço carbono SAE 1020 com cerca de 140mm de comprimento, 40mm de largura e 10mm de espessura.

### 3.3 DEPOSIÇÃO POR PLASMA PTA

Os corpos de prova foram depositados pelo método PTA, no Laboratório de Soldagem da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa (UTFPR-PG), utilizando-se Ligas Fe-Mn-Cr-Si-B em formato de pó como material de adição.

A seguir, na tabela 1, estão os parâmetros de soldagem utilizados para executar os quatro cordões de solda, onde se variou a taxa de pó e a corrente

(pulsada), a fim de verificar o que isso provoca às características da microestrutura formada.

**Tabela 1 - Parâmetros de Soldagem Utilizados**

Corpo de prova	Vazão Gás de arraste (l/min)	Vazão Gás Plasma (l/min)	Vazão Gás de Proteção (l/min)	Distância Bocal (mm)	Velocidade de Soldagem (cm/min)	Intensidade de Corrente (A)	Taxa de pó (kg/h)
1	3,0	3,0	12,5	8	10	120-100	0,3
2	3,0	3,0	12,5	8	10	140-100	0,3
3	3,0	3,0	12,5	8	10	120-100	0,5
4	3,0	3,0	12,5	8	10	140-100	0,5

Fonte: Autoria própria.

A deposição do material foi toda feita na posição 1G – plana, sendo que o deslocamento desta se deu através do equipamento Tartilope V1, que se movimenta em uma velocidade constante em x, o que possibilita uma soldagem uniforme.

Na fotografia 1, pode-se observar como fica o arranjo do processo em conjunto com o Tartilope V1, pronto para a deposição.

**Fotografia 1 – Arranjo do processo**



Fonte: Autoria Própria



O material de deposição foi transportado através do alimentador de pó (Fotografia 2). Utilizou-se Argônio para os três sistemas de gases (Arraste, Proteção e Plasma).

**Fotografia 2 - Alimentador de pó**



**Fonte: Autoria própria.**

Na fotografia 3, observa-se os corpos de provas após a deposição, apresentando revestimentos com boa qualidade superficial.

Fotografia 3 - Aspecto dos cordões de solda



Fonte: Autoria própria

### 3.4 ANÁLISE METALGRÁFICA

Após a deposição do revestimento, deu-se início à análise metalográfica, sendo esta executada no Laboratório de Materiais da UTFPR-PG.

#### 3.4.1 Preparação Das Amostras

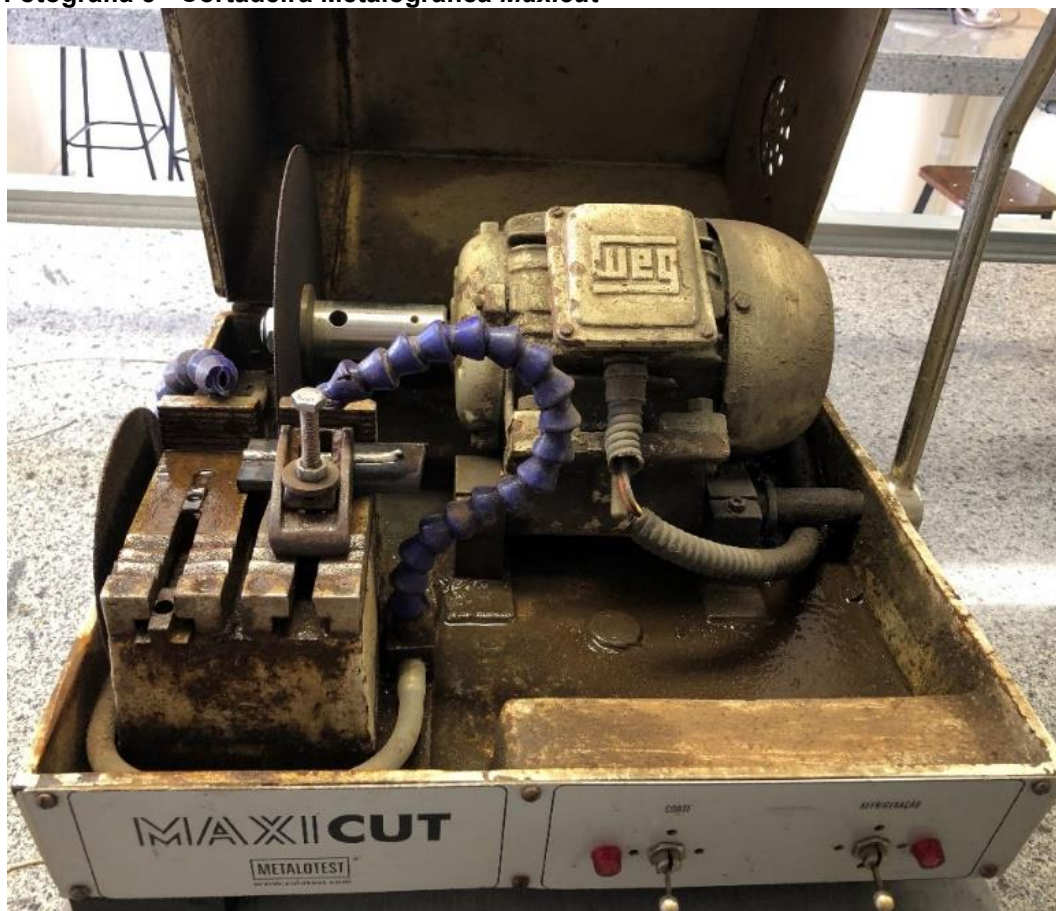
Os corpos de prova revestidos foram cortados na seção transversal ao comprimento do cordão de solda (fotografia 4), utilizando-se uma Cortadeira Metalográfica *Maxicut* (fotografia 5).

Fotografia 4 - Amostras cortadas



Fonte: Autoria própria

Fotografia 5 - Cortadeira Metalográfica *Maxicut*



Fonte: Autoria própria

Após essa etapa, foi-se realizado o embutimento em baquelite. A embutidora utilizada foi a SimpliMet XPS1, da Buehler (fotografia 6).

**Fotografia 6 - Embutimento das amostras**



Fonte: Autoria própria

### 3.4.2 Preparação Metalográfica

Em seguida ao embutimento, as amostras passaram pelo processo de lixamento e posterior polimento. Para o lixamento, utilizou-se lixas com granulometria de 240, 320, 600, 1200 e 2000 mesh com força de 15N e rotação de 250 RPM.

Para o polimento, utilizou-se suspensão de diamante de 3  $\mu\text{m}$  e 0,25  $\mu\text{m}$ , por cinco minutos cada, em rotação de 150 RPM e força de 20N, e sílica coloidal 0,4mm também por 5 minutos e força de 15N.

Para tais procedimentos, utilizou-se uma politriz automática Buehler, conforme fotografia 7.

**Fotografia 7- Lixamento e Polimento**



**Fonte: Autoria própria**

### 3.4.3 Estereoscopia Óptica

Para o início da análise metalográfica das amostras, utilizou-se o estereoscópio Zeiss Stemi (fotografia 8), com o qual é possível identificar possíveis descontinuidades superficiais.

Após uma primeira visualização, realizou-se ataque químico nas amostras. Utilizou-se o reagente Vilella (5ml HCl + 2gr Ácido Pícrico + 100ml Álcool Etílico), que identifica as fases Delta e Sigma. Com a utilização desse reagente, nota-se a

homogeneidade do revestimento e pode-se observar com mais exatidão a disposição da ZTA das amostras, bem como medi-las através do software *Zen 3.0 Blue Edition*.

**Fotografia 8 - Análise em Estereoscópio Zeiss**



**Fonte: Autoria própria**

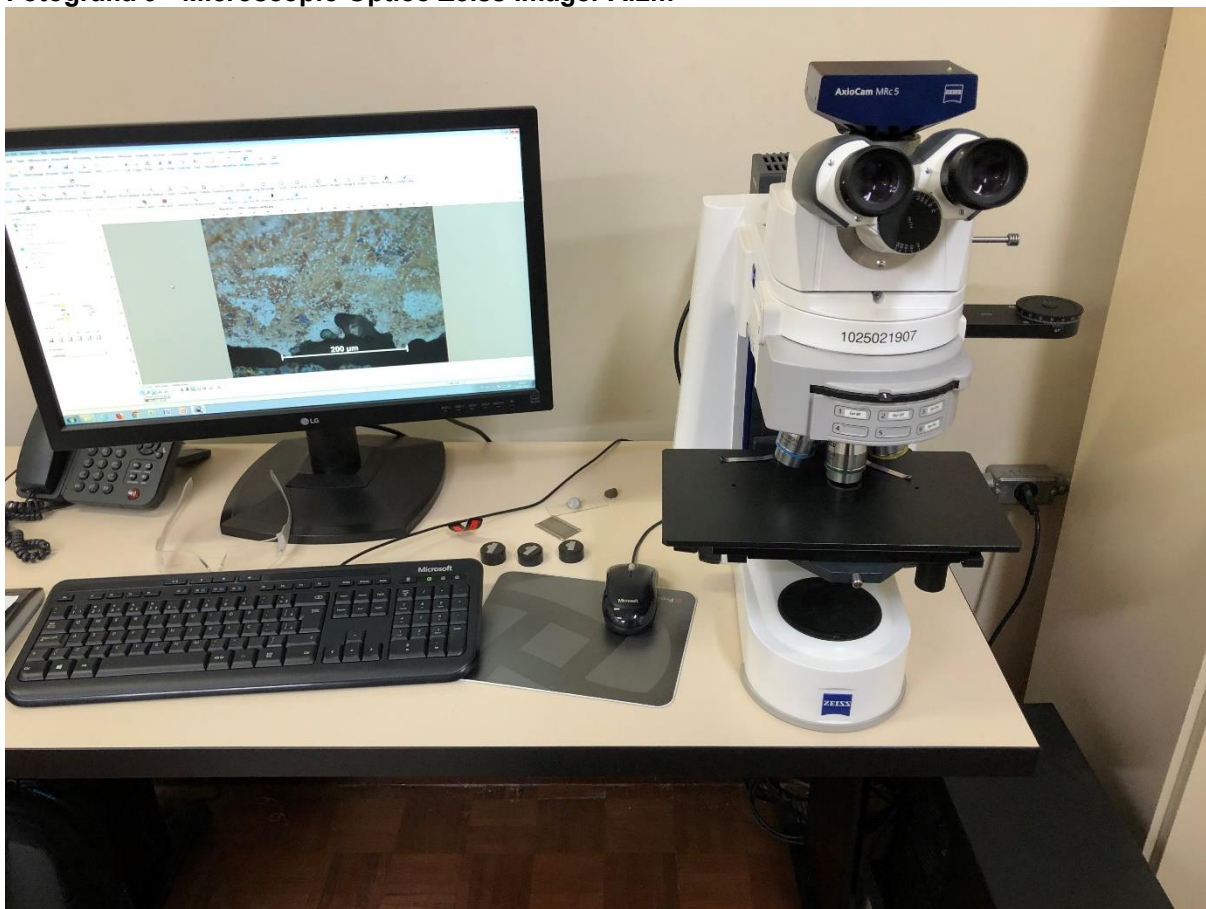
#### 3.4.4 Microscopia Óptica

Com a utilização de Microscópio Óptico *Zeiss Imager A.2m*, em conjunto com o ataque químico Vilella, fez-se a análise microestrutural das amostras, com aumentos de 200x e 500x.

Com o auxílio do software *Axio Vision* da *Zeiss*, pode-se verificar a presença ou não de defeitos como porosidade e trincas, bem como verificar variações na microestrutura formada e tamanho de grão.

De posse destes dados, pode-se determinar a influência dos parâmetros de solda variados durante o presente estudo.

**Fotografia 9 - Microscópio Óptico Zeiss Imager A.2m**



Fonte: Autoria própria

#### 3.4.5 Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura

Para análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV), utilizou-se o equipamento *Tescan model Vega 3*, o qual possibilitou verificar as variações na composição química das amostras, indicando a porcentagem em massa de cada constituinte.

Fotografia 10 - Análise por microscopia eletrônica de varredura



Fonte: Autoria própria

### 3.5 ENSAIO DE MICRODUREZA VICKERS

O ensaio de microdureza Vickers foi realizado em *Microdurômetro Shimadzu HMV-G20 Series*, com carga de 300gf, nas seguintes etapas:

- Posicionamento da amostra no microdurômetro;
- Centralizar sob a linha de fusão da amostra, como ponto de partida (distância 0mm);



- A partir do ponto de partida, faz-se as medidas das diagonais, obtendo-se o valor da microdureza;
- Repete-se o procedimento com intervalos de 0,5mm em direção ao revestimento, com espaçamento de 1mm para a última medida;
- Volta-se a linha de fusão, realizando medições em direção ao metal de base, com intervalos de 0,3mm;
- Os dois passos anteriores são repetidos, utilizando medidas de 1mm para a esquerda e para a direita da primeira medida efetuada (central).

Fotografia 11 - Ensaio de Microdureza Vickers



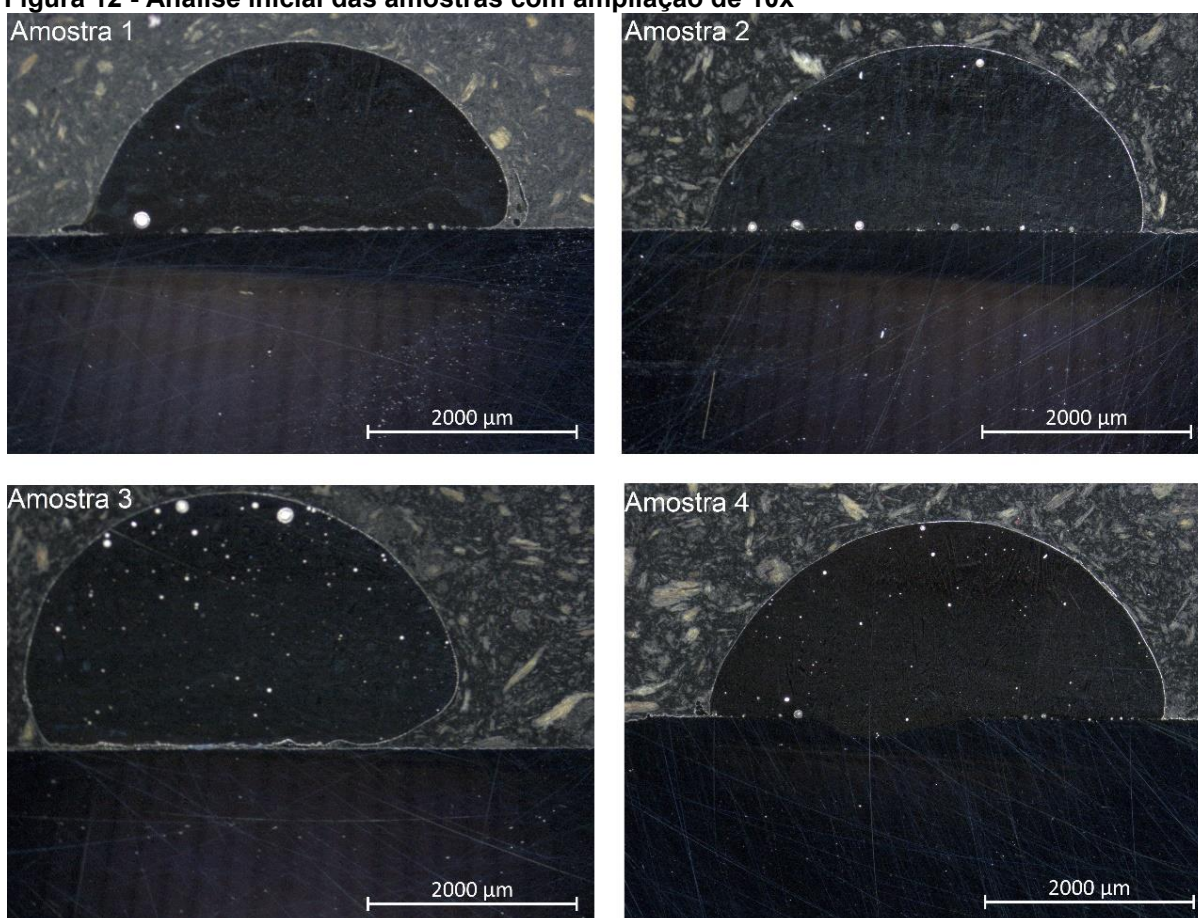
Fonte: Autoria própria

## 4 RESULTADOS

### 4.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS

Com a análise inicial no estereoscópio, foi possível identificar algumas descontinuidades, com destaque para a falta de fusão, com exceção apenas da amostra 4, bem como o surgimento de poros.

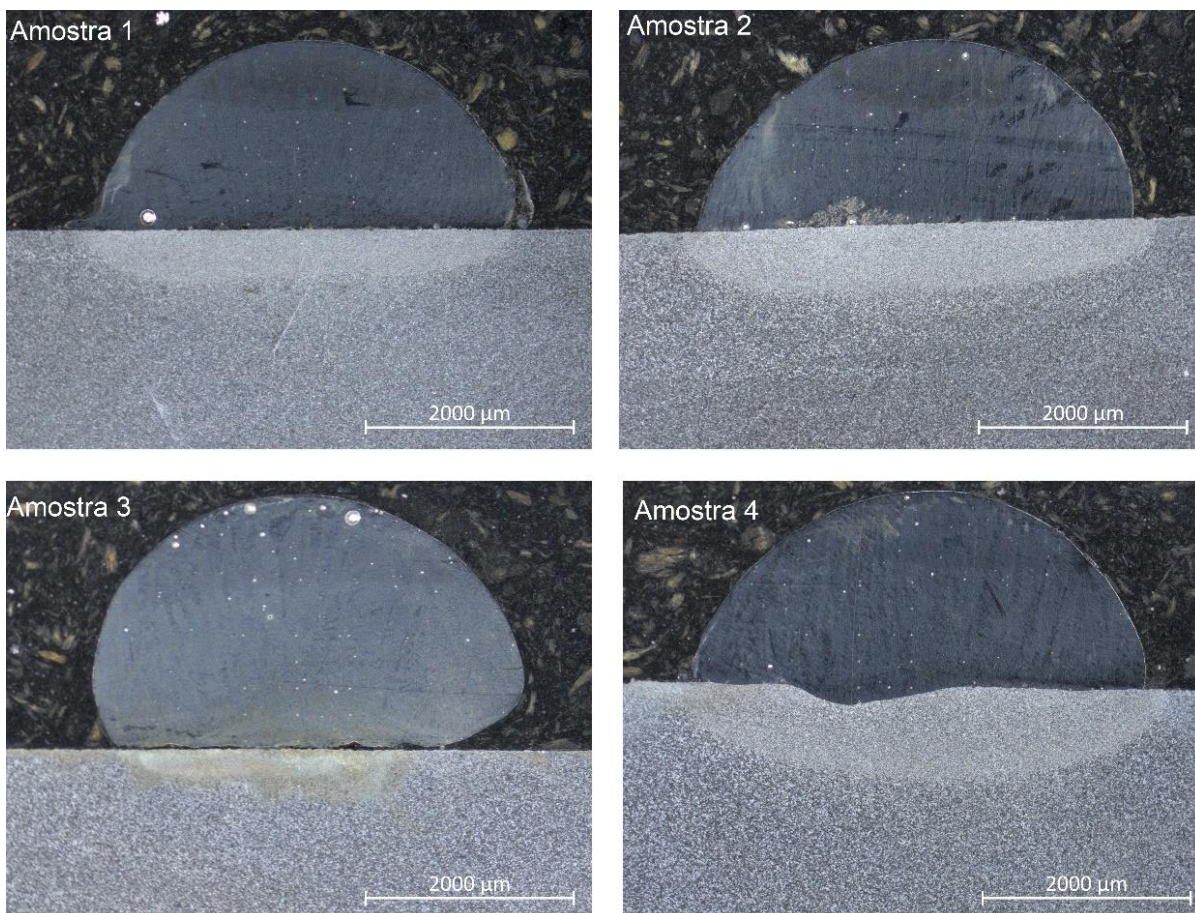
**Figura 12 - Análise inicial das amostras com ampliação de 10x**



Fonte: Autoria própria

Utilizando-se o reagente Vilella, obteve-se uma visualização mais clara da ZTA das amostras, sendo estas então medidas a fim de comparar a influência da intensidade e taxa de pó sobre este aspecto.

**Figura 13 - ZTA das amostras com ampliação de 10x**



Fonte: Autoria própria

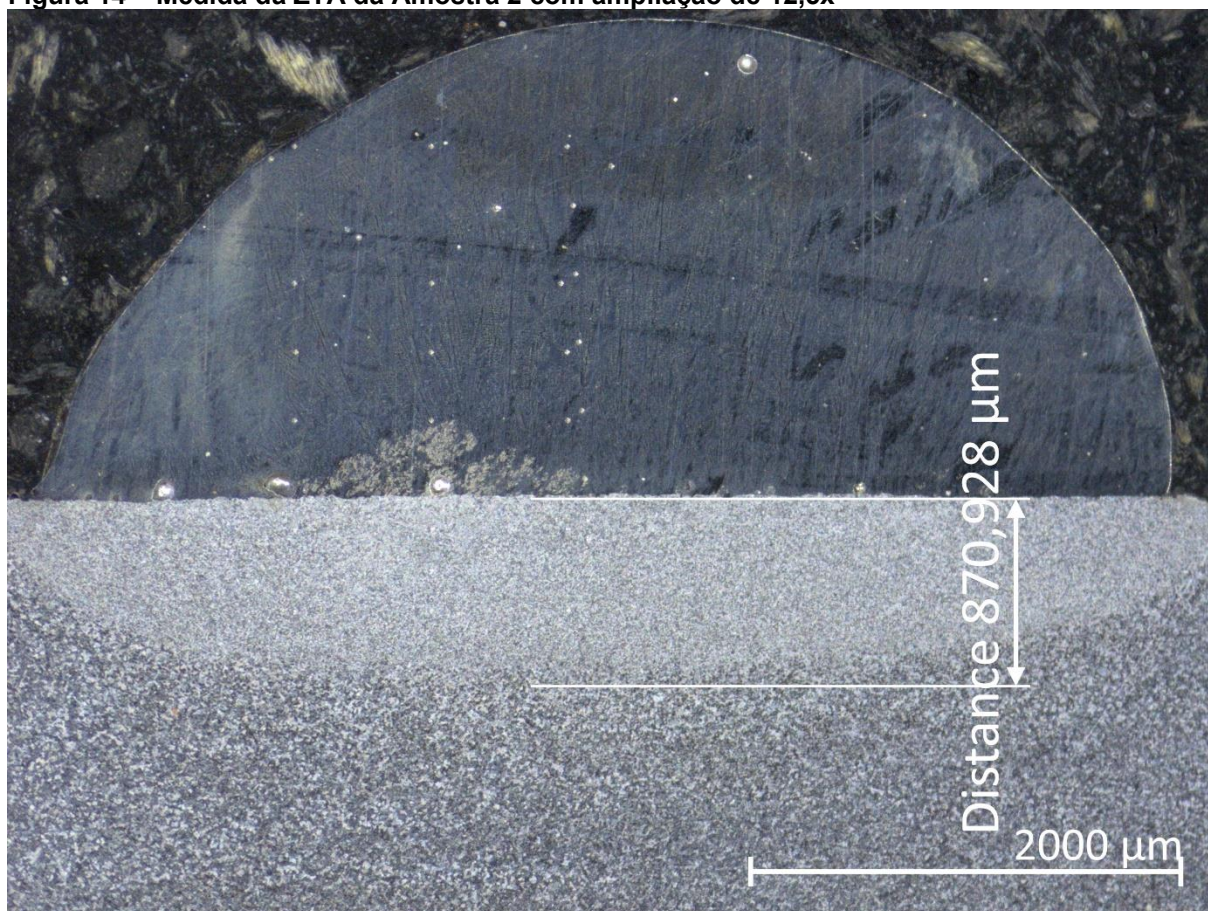
Em seguida, na tabela 2, tem-se os valores das medições encontradas da zona termicamente afetada (ZTA), podendo-se notar uma maior ZTA para intensidades de corrente maiores. Para a mesma corrente, a taxa de pó de 0,3 kg/h acarreta menor ZTA quando comparada à taxa de 0,5 kg/h.

**Tabela 2 – Medição ZTA**

Amostra	Corrente (A)	Taxa de pó (kg/h)	Medida ZTA (μm)
1	120-100	0,3	747,546
2	140-100	0,3	870,928
3	120-100	0,5	653,236
4	140-100	0,5	1204,784

Fonte: Autoria própria

Figura 14 – Medida da ZTA da Amostra 2 com ampliação de 12,5x



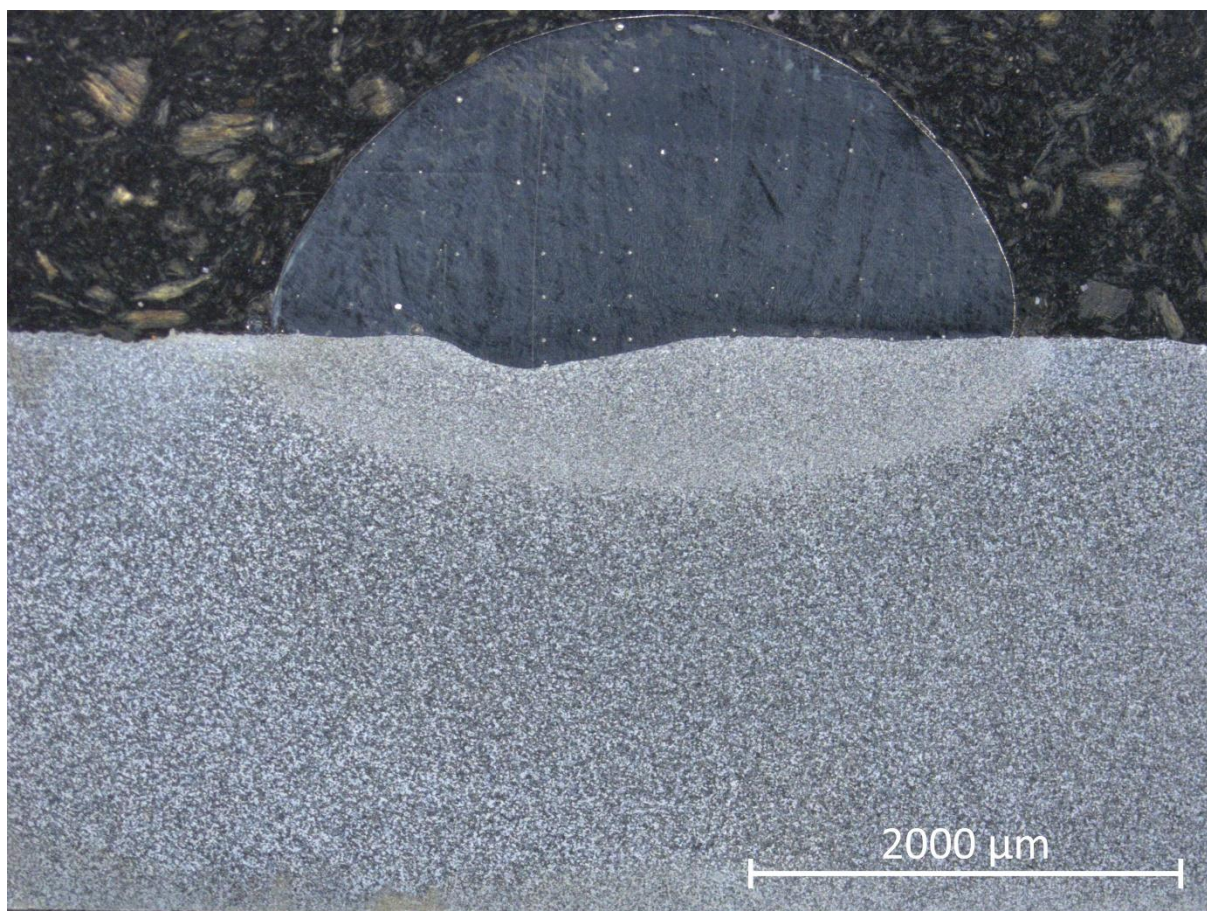
Fonte: Autoria própria

#### 4.1.1 Cálculo da Diluição

O cálculo da diluição foi executado através da equação 1 apenas para a amostra 4 (figura 15), a única que se obteve fusão entre o material de adição e o substrato.

Com auxílio de software para medida das áreas, obteve-se uma diluição aproximada de 2,8%.

Figura 15 – Amostra 4 para cálculo de diluição.



Fonte: Autoria própria

#### 4.2 ANÁLISE DA MICROESTRUTURA EM MICROSCÓPIO ÓPTICO

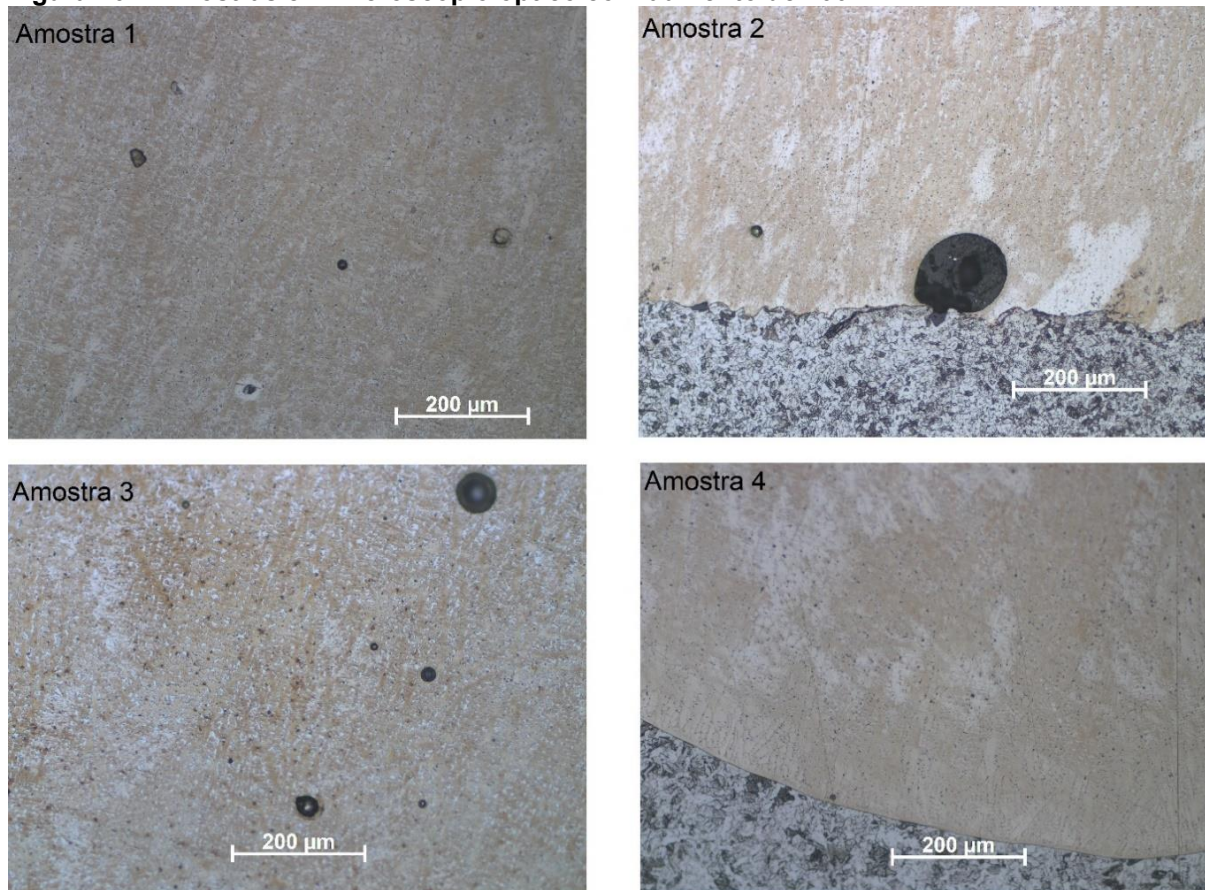
A microestrutura de solidificação foi calculada previamente através do Diagrama de Schaeffler, conforme equações (2) e (3) e com os dados do gráfico 1. Foi-se determinado então valores de  $Cr_{eq}$  de aproximadamente 20,7 e  $Ni_{eq}$  igual a 10,8.

Sendo assim, com o auxílio do Diagrama de Schaeffler (figura 10), tem-se que a microestrutura de solidificação é de Austenita + Ferrita, com porcentagens de ferrita delta aproximadas entre 10 e 15%.

Observa-se na figura 16, que intensidades de corrente menores (Amostras 1 e 3) trazem consigo uma microestrutrua mais definida e refinada. Um dos motivos para isso ocorrer, é o fato do material de adição em formato de pó nao ter se fundido com o substrato. Para as mesmas amostras, também se nota a maior presença de poros, o que está relacionado ao fato de que no processo de soldagem PTA, tem-se baixa

diluição e baixo aporte térmico, onde em intensidades de corrente menores, essas características se acentuam ainda mais.

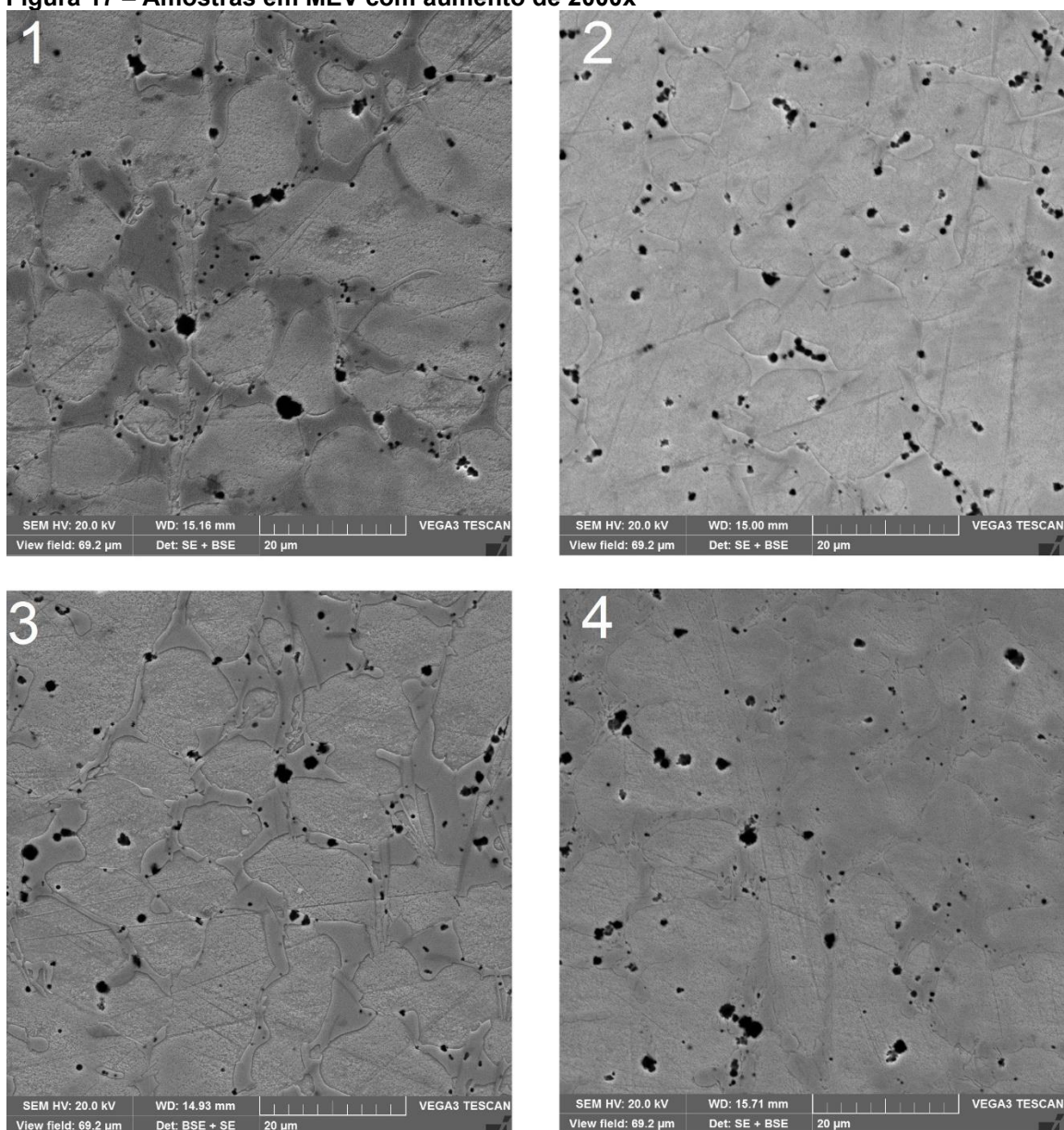
**Figura 16 – Amostras em microscópio óptico com aumento de 200x**



Fonte: Autoria própria

### 4.3 ANÁLISE MICROESTRUTURAL MEV

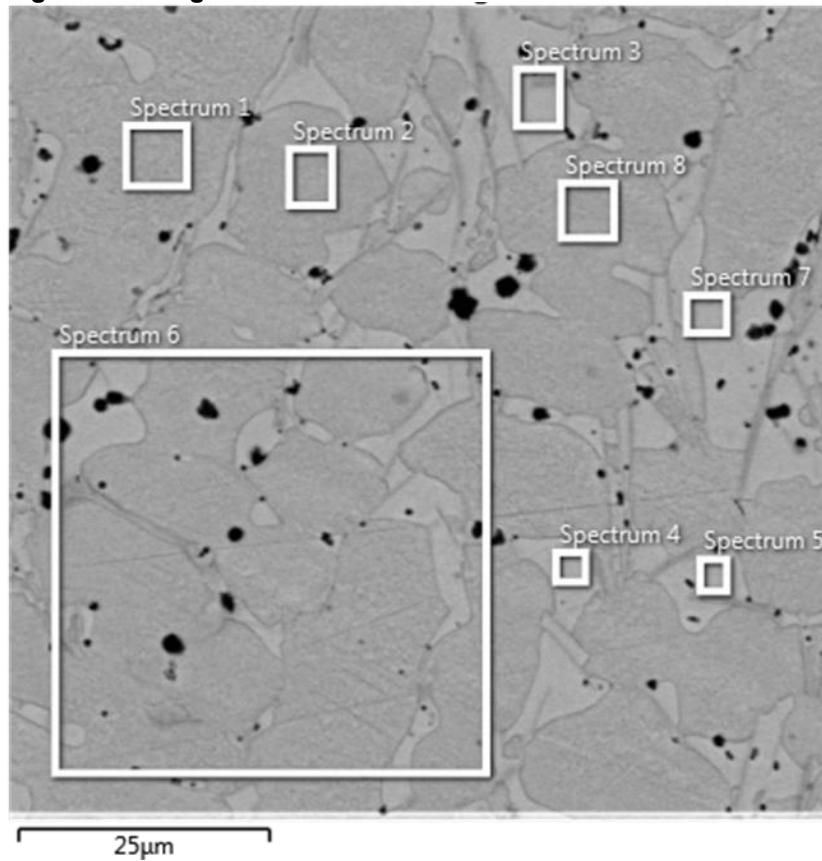
Utilizando-se o microscópio eletrônico de varredura (MEV), foi possível observar com mais exatidão as regiões dendríticas e interdendríticas (figura 17), realizando-se então análises da composição química presente nestas regiões. Nota-se que para as amostras 2 e 4, tem-se aumento da região interdendrítica quando comparado com as amostras 1 e 3. Os pontos pretos presentes nas amostras, foram originados por corrosão após o ataque químico realizado.

**Figura 17 – Amostras em MEV com aumento de 2000x**

**Fonte: Autoria própria**

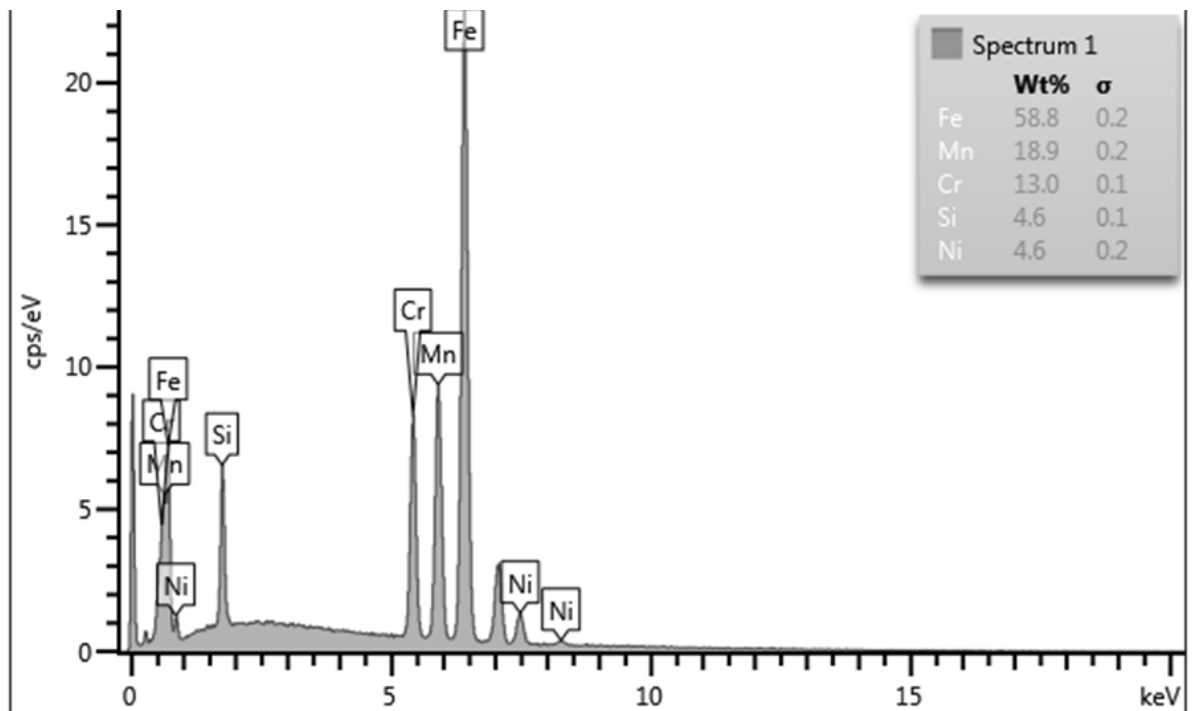
Na sequência, nas figuras 18, 19 e 20, observa-se a amostra 3 com análise da composição química das regiões dendríticas e interdendríticas e sua respectiva composição química. Vale ressaltar que o Boro não é quantificado por ser um átomo leve.

Figura 18 – Regiões dendríticas e interdendríticas da amostra 3



Fonte: Autoria própria

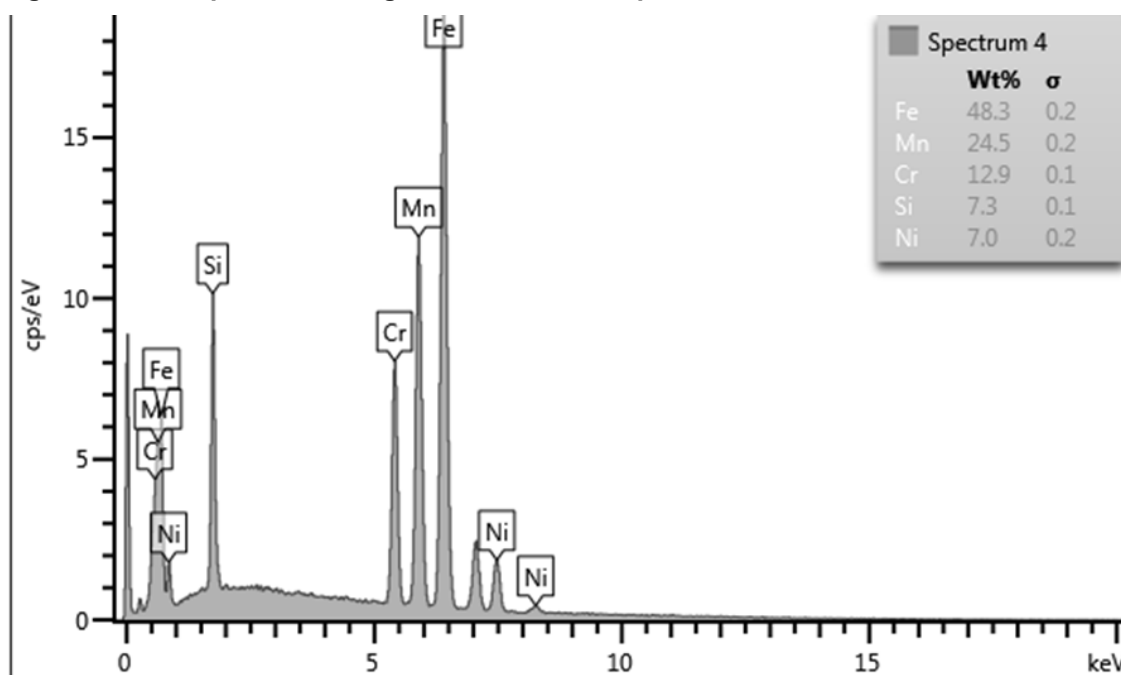
Figura 19 - Composição química de região dendrítica presente na amostra 3



Fonte: Autoria própria



Figura 20 – Composição de região interdendrítica presente em amostra 3



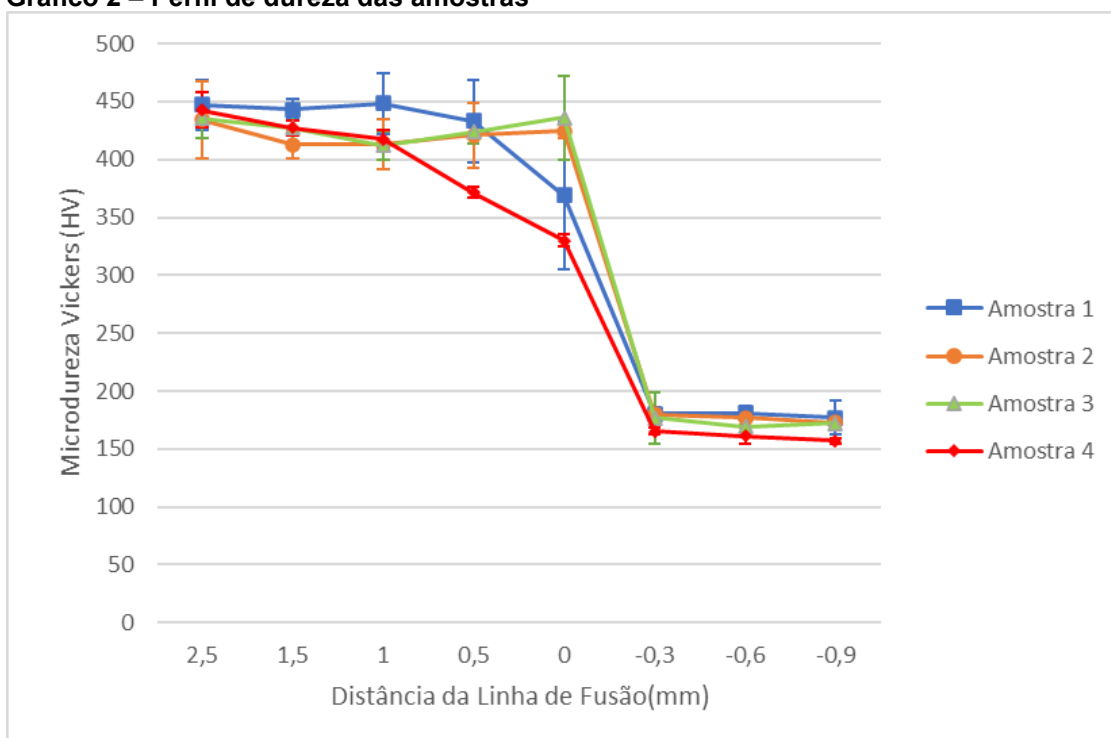
Fonte: Aatoria própria

Foram coletados dados da mesma forma para todas as amostras, obtendo-se comportamentos semelhantes em suas composições, onde se notou que nas regiões interdendríticas, geralmente os valores de Si, Cr, Mn e Ni se elevam.

Comparando-as com a composição inicial do pó escolhido, observa-se poucas variações das composições químicas, mantendo suas características semelhantes.

#### 4.4 ANÁLISE DA MICRODUREZA VICKERS

O gráfico 2 traz a disposição dos resultados obtidos na leitura da microdureza Vickers. Maior refinamento causada pela corrente pulsada de menores intensidades de corrente, conforme observado anteriormente, fez o revestimento possuir levemente maior dureza em média. Observa-se também que a taxa de pó menor com a mesma intensidade de corrente, tende a apresentar maior dureza.

**Gráfico 2 – Perfil de dureza das amostras**

Fonte: Autoria própria

## 5 CONCLUSÃO

A utilização de correntes e taxas de alimentação de pó mais baixas, mostraram uma microestrutura mais definida e refinada, ocasionando um leve aumento na dureza do revestimento.

As intensidades de corrente escolhidas (140-100A; 120-100A) foram insuficientes para fundir a quantidade de pó empregada junto ao substrato de forma homogênea, com valores de diluição muito baixos ou nulos. A baixa corrente também ocasionou maior presença de poros nos revestimentos.

A falta de fusão identificada nas amostras ocasionou pouca variação nas propriedades e composição das Ligas Fe-Mn-Cr-Si-B depositadas, visto que o substrato não teve influência significativa nos revestimentos.

## 6 REFERÊNCIAS

AWS. American Welding Society. Welding. **Science and Technology**: Test methods for evaluating welded joints. 9. ed. Miami. 2000. Cap. 6, p. 240.

BATISTA *et al.* Efeito dos parâmetros de soldagem sobre a geometria e diluição de revestimentos de liga de níquel aplicados em aço API 5L Gr B. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**. V.6.3. 2011

BOND, D. **Avaliação de revestimentos soldados processados com materiais atomizados**. 2008. 151 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

DIAZ, V. V.; DUTRA, J. C.; D'OLIVEIRA, A. S. C. M. Deposição por plasma com arco transferido. **Soldagem & Inspeção**. v.1. 2010.

KOU, Sindo. **Welding metallurgy**. 2. ed. Nova Jersey: Willey, 2002.

LIPPOLD, John C. **Welding metallurgy and weldability**. SE. Nova Jersey: Willey, 2015.

LIPPOLD, John C; KOTECKI, Damian J. **Welding metallurgy and weldability of stainless steels**. SE. Nova Jersey: Willey, 2005.

MARQUES, Paulo V; MODENESI, Paulo J; BRACARENSE, Alexandre Q. **Soldagem**: Fundamentos e tecnologia. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2011.

PUKASIEWICZ, A. G. M. **Desenvolvimento de revestimentos Fe-Mn-Cr-Si-Ni resistentes à cavitação depositadas por aspersão APS**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2008.

RIBEIRO, H. O. **Desenvolvimento de ligas para revestimentos por PTA resistentes à cavitação**. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais. UFSC. Florianópolis. 2007.

SANTOS, Ricardo Luiz Cardoso Dos. **Deposição por plasma de arco transferido com corrente contínua pulsada**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2003.

SILVA, Régis Henrique Gonçalves e; DUTRA, Jair Carlos. Processo PTA-P - uma revisão da literatura como base para inovações. Parte 1 de 2: elementos construtivos. **Soldagem & Inspeção**. São Paulo, v. 17, n. 1, p. 76-85, mar.2012. Disponível em <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0104-92242012000100011&lng=pt&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-92242012000100011&lng=pt&nrm=iso)>. Acessos em 20 Março 2021.

SHYNE, J.C., MORGAN, E.R., FREY, D.N. **Trans. Metall. Soc.** ASM 48, p. 265, 1956.

TAKANO, E. H.; QUEIROZ, D.; D´OLIVEIRA, A. S. C. M. Avaliação dos parâmetros de processamento por PTA nas superfícies processadas. **Soldagem & Inspeção**. São Paulo, v. 13, n. 3, p. 210-218, mai. 2008.

TIGRINHO, J.J. **Superfícies enriquecidas por carbonetos de tungstênio depositados a plasma por arco transferido**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais e Processos-PIPE, UFPR, 2005.

UNIVERSIDADE TECNOLOGIA FEDERAL DO PARANÁ. Sistema de bibliotecas. Normas para elaboração de trabalhos acadêmicos. Curitiba: UTFPR, 2009.