

**FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO PAULO**

**Tecnologia em Materiais**

**CARACTERIZAÇÃO DA LIGA SUPER DUPLEX UNS32750 SOLDADA POR  
LASER PULSADO DE Nd:YAG**

**Leandro Gusmão da Silva**

**Orientador:**

**Dr. Wagner de Rossi**

**São Paulo – 2013**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO PAULO**

**Tecnologia em Materiais**

**CARACTERIZAÇÃO DA LIGA SUPER DUPLEX UNS32750 SOLDADA POR  
LASER PULSADO DE Nd:YAG**

Monografia apresentada ao curso de  
Tecnologia de Materiais da Faculdade de  
Tecnologia de São Paulo como requisito para  
obtenção do título de Tecnólogo em Materiais.

Orientador: Dr. Wagner de Rossi

Leandro Gusmão da Silva

**São Paulo – 2013**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO PAULO**

**Tecnologia em Materiais**

**CARACTERIZAÇÃO DA LIGA SUPER DUPLEX UNS32750 SOLDADA POR  
LASER PULSADO DE Nd:YAG**

**São Paulo, 29 de Novembro de 2013**

---

**Dr. Wagner de Rossi**

---

**Dr. Maurício David Martins das Neves**

---

**Me. Marcos Domingos Xavier**

*Dedico este trabalho a meus pais e meus irmãos, que vejam como exemplo.*

## **AGRADECIMENTOS**

À minha esposa Camila, que me apoiou com compreensão e motivação em todos os bons e maus momentos que passei durante a graduação.

Ao Dr. Wagner de Rossi, pela confiança e orientação demonstrados durante o trabalho.

Ao Dr. Maurício David Martins das Neves, pela ajuda, conselho e tempo dedicado ao trabalho.

Aos professores da Fatec-SP que com grande eficiência, criaram em minha consciência o espírito e a profissão de Tecnólogo em Materiais.

Aos colegas Almir e Juliana, pelo ano em que compartilhamos o mesmo ambiente de ideias.

Aos colegas Caroline e Rodolfo, pelos conselhos e compartilhamentos de experiências e conhecimentos.

Aos colegas de classe (em ordem alfabética): André, Eric, Jefferson, Lucas, Mariana, Valdomiro, Rodrigo e Yasmim que me auxiliaram em diversos momentos, muitas vezes sem nem se dar conta do bem que me proporcionaram.

Aos meus pais, pela criação e confiança em todas as minhas decisões.

À empresa SGS Labmat, que não impediu, nem dificultou minha graduação e pela disponibilização de seu laboratório de caracterização para realização dos experimentos.

A todos que, de alguma forma, foram importantes para a realização deste trabalho.

*“Eu não sei usar espadas, não sei cozinhar, não sei navegar e não sei mentir. O que sei é que dependo de meus amigos se quiser continuar vivendo.”*

*Monkey D. Luffy*

**RESUMO**

Os aços dúplex e super-dúplex estão ganhando atenção especial por parte da indústria a cada dia, atenção essa justificada pelas altas propriedades mecânicas e químicas que o deixam com uma relação benefício / custo muito atrativa.

O processo de soldagem hoje em dia é fundamental para a manufatura de equipamentos complexos, entre eles estão os grandes extratores de óleo e gás presentes nas plataformas instaladas nos oceanos.

Neste trabalho, foram estudadas as propriedades químicas, mecânicas e metalúrgicas do aço inoxidável super-dúplex UNS32750 após o processo de soldagem a laser com laser pulsado de Nd:YAG com o objetivo de encontrar os melhores parâmetros de soldagem e com isso viabilizar a produção industrial deste tipo de soldagem nos aços duplex.

Para isso, foram soldados 12 cordões longitudinais em um tubo com 1,65 mm de espessura, alterando os parâmetros de soldagem como intensidade, largura temporal e distância focal.

Após a soldagem foram obtidas as propriedades de microdureza, corrosão e microestrutura da região soldada, utilizando normas específicas para cada ensaio.

Palavras-chave: aços, duplex, soldagem, laser.

## **ABSTRACT**

Duplex and super-duplex steels are gaining special attention for industry, this attention is justified by the high mechanical and chemical properties that provide a better benefit / cost relationship.

The welding process today is fundamental to complex equipment manufacturing, among them are the big extractors of oil and gas of platforms installed at oceans.

In the present work, were studied the chemical, mechanical and metallurgical properties of duplex stainless steel UNS 32750 after pulsed laser welding process with Nd:YAG laser, whose objective is to find better welding parameter and then, to enable the industrial laser welding in duplex stainless steels manufacturing

With this purpose, 12 fillets were welded on longitudinal direction on a pipe with 1,65mm of thickness, changing the welding parameters such as intensity, temporal width and focal length.

After welding microhardness, corrosion properties and microstructure of welding zone were obtained, using specific Standards in each test.

Keywords: duplex, stainless, steel, welding, laser.



Figura 1 - Representação da emissão de luz. (a) Excitação do elétron; (b) Emissão espontânea; (c) Emissão estimulada.....	14
Figura 2 - Modos de operação do laser, (a) tipo contínuo e (b) tipo pulsado.....	15
Figura 3 - Representação das poças de fusão pelos métodos de (a) condução e (b) penetração.....	18
Figura 4 - Evolução da poça de fusão em função das velocidades de soldagem com a formação de keyhole. $V(a) < V(b) < V(c)$ .....	20
Figura 5 - Diagrama ternário Fe-Cr-Ni. Projeção isotérmica a 1000° C.....	21
Figura 6 - Diagrama ternário Fe-Cr-Ni. Projeção isotérmica a 800° C.....	21
Figura 7 – Microestruturas dos aços duplex. (a) metal base. Aumento: 500x e (b) zona de fusão em soldagem. Aumento: 100x.....	22
Figura 8 - Diagrama TTT mostrando a faixa de precipitação das principais fases intermetálicas dos aços duplex.....	23
Figura 9: Comparação da curva de transição dúctil-frágil do aço duplex Fe22Cr-5.5Ni-3Mo-0.15N entre o metal base e diferentes processos de soldagem.....	25
Figura 10: Pites em um metal.....	27
Figura 11: Amostras Embutidas.....	29
Figura 12: Croqui de Microdureza utilizado.....	30
Figura 13: Corpo de prova soldado.....	30
Figura 14: Metalografias Amostra 1.....	35
Figura 15: Metalografias Amostra 2.....	38
Figura 16: Metalografias Amostra 3.....	38
Figura 17 - Média dos valores de microdureza.....	48
Figura 18: Superfícies da amostra após o ensaio de corrosão.....	50

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química nominal do aço UNS S32750 (% em massa).....	12
Tabela 2 - Tipos de LASER.....	15
Tabela 3 - Comparação entre a energia, eficiência e perfil de soldagem em diversos processos.....	17
Tabela 4: Propriedades mecânicas de alguns aços duplex, segundo norma ASTM A 790.....	24
Tabela 5: Parâmetros de soldagem.....	29
Tabela 6: Metrologia dos cordões.....	31

ZTA – Zona termicamente afetada.

LASER – Light Amplification by Stimulated emission of radiation.

CCC – Estrutura cristalina cúbica de corpo centrado.

CFC – Estrutura cristalina cúbica de faces centradas.

Nd:YAG – Cristal de Alumínio-Ítrio dopado com Neodímio.

TTT – Diagrama Tempo-Transformação-Temperatura.

HRC – Hardness Rockwell C.

ASTM – American Society for Testing and Materials.

TIG – Tungsten Inert Gas

## **SUMÁRIO**

1. INTRODUÇÃO.....	12
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
2.1 O Laser como ferramenta.....	13
2.1.1 Emissão estimulada.....	13
2.1.2 Propriedades da emissão estimulada da luz.....	14
2.1.3 Tipos de Laser.....	15
2.1.4 Interações do laser com a matéria.....	16
2.2 Soldagem a Laser.....	17
2.2.1 Técnicas de Soldagem a laser.....	18
2.2.1.1 Soldagem a laser por condução do calor.....	19
2.2.1.2 Soldagem a laser por penetração.....	19
2.3 Aços inoxidáveis Dúplex.....	20
2.3.1 Metalurgia física dos aços dúplex.....	20
2.3.2 Microestrutura.....	22
2.3.3 Propriedades mecânicas.....	24
2.3.4 Resistência à corrosão.....	25
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	27
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	31
4.1 Dimensionamento dos cordões.....	31
4.2 Microestrutura.....	32
4.3 Microdureza.....	41
4.4 Ensaio de Corrosão.....	48
5. CONCLUSÃO.....	50
6. REFERÊNCIAS .....	51

## 1. Introdução

Os aços inoxidáveis denominados dúplex constituem-se de sistemas compostos por Fe-Cr-Ni que possuem estabilidade termodinâmica regida por duas fases de iguais proporções, austenita (CFC) e ferrita (CCC). A união da resistência mecânica fornecida pela ferrita e resistência à corrosão fornecida pela austenita, tornam essa classe de aços altamente utilizados em tubulações submarinas de extração de óleo e gás [10].

O aço UNS S32750 enquadra-se nos chamados aços Super-Duplex, que possuem uma maior resistência à corrosão sob tensão e em meios contendo cloretos devido a presença do molibdênio como elemento de liga (Tabela 1). Esses aços também são apreciáveis por sua boa soldabilidade, sendo esse fator importantíssimo para a união de tubos utilizados na indústria de extração petroquímica.

**Tabela 1** - Composição química nominal do aço UNS 32750 (% em massa).

<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>	<b>Mo</b>	<b>N</b>
Máx. 0,03	Máx. 0,8	Máx. 1,2	Máx. 0,030	Máx. 0,015	25	7	4	0,3

Fonte: Sandvik.

Os trabalhos apresentados na literatura envolvendo a soldagem desses aços são, em sua grande maioria, decorrentes de processos a arco elétrico, que agriem demasiadamente a microestrutura do material, fazendo com que não haja a correta fração volumétrica das fases, o que provoca uma diminuição tanto nas propriedades físicas quanto químicas do aço [1]. Para esses tipos de tubulações faz-se necessário a utilização de um processo em que o aporte térmico seja de fácil controle. A soldagem a laser, adotada neste trabalho possui essa característica.

O laser é uma ferramenta flexível e poderosa com muitas aplicações relevantes na indústria. Seu uso está se difundindo cada vez mais como consequência do desenvolvimento de sistemas laser modernos, com maior confiabilidade e menor custo. Sua habilidade vem de suas características únicas de versatilidade, confiabilidade, velocidade e automação, tudo com flexibilidade e alta precisão [2].

Sua principal vantagem é o controle preciso da temperatura, que pode ser obtido através do preciso controle dos parâmetros envolvidos [2]. Para isso, o laser pulsado surge como uma ferramenta muito poderosa e versátil capaz de solucionar com

eficiência este problema. O fluxo de energia entregue à peça pode ser controlado com muita precisão e através de diferentes parâmetros. Assim, a intensidade (fluxo de energia) que é a energia do pulso laser por unidade de tempo e por unidade de área pode ser alterada através da variação destes parâmetros, em um infinito arranjo de combinações. Portanto, dentro das condições de contorno do processo (energia e potência máxima do sistema, diâmetro mínimo do ponto focal, etc.) inúmeras combinações destes parâmetros podem ser obtidas para uma mesma intensidade. Pode-se então, não só determinar uma intensidade ótima para controle da temperatura máxima do processo, como também, encontrar um arranjo de parâmetros que favoreça os outros aspectos importantes almejados.

Os parâmetros de soldagem devem ser adequados para garantir o correto aporte térmico no momento da soldagem, e com isso, garantir que a microestrutura e fração volumétrica das fases finais, tanto no cordão como na zona afetada termicamente sejam o mais próxima possível da microestrutura e fração volumétrica do material de base [2].

O objetivo do trabalho foi de avaliar as alterações metalúrgicas ocorridas no aço dúplex soldado a laser em diversos parâmetros e definir quais são os mais adequados metalurgicamente.

## **2. Revisão Bibliográfica**

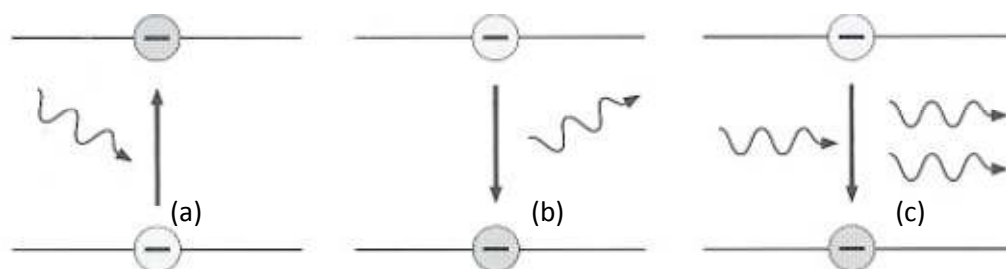
### **2.1 O Laser como ferramenta**

Dentre as várias formas de radiação eletromagnéticas existentes, encontra-se em particular o laser. “LASER” é uma sigla que significa “Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation”. Como o nome diz a palavra laser descreve um processo físico, a emissão estimulada de luz.

#### **2.1.1 Emissão estimulada**

Quando um fóton atinge um elétron no estado excitado, ele estimula o elétron a liberar uma pequena quantidade de energia e, portanto, emitir um outro fóton (Figura 1). Para que isso ocorra, é necessário que o fóton que estimulou o elétron tenha exatamente a mesma quantidade de energia que o fóton liberado. A energia

corresponde a diferença de energia entre o estado excitado e o estado de menor energia [11].



**Figura 1** - Representação da emissão de luz. (a) Excitação do elétron; (b) Emissão espontânea; (c) Emissão estimulada. Fonte: [11].

Após a emissão estimulada, os dois novos fótons continuam os “trajetos” juntos, na mesma direção. Quando esses fótons atingem outros elétrons eles estimulam a emissão de outros fótons nas mesmas condições dos primeiros emitidos, e assim a luz é amplificada.

### 2.1.2 Propriedades da emissão estimulada de luz

O grande interesse no estudo e aplicação do laser se deve a algumas propriedades que o tornam diferentes de uma luz comum, essas propriedades são: monocromatismo, coerência e direção.

**Monocromatismo:** Todos os fótons do laser possuem o mesmo comprimento de onda, que é determinada pela energia de transição das substâncias (átomos, íons ou moléculas) que emitem o laser. Luz monocromática é desejada em aplicações em que há trabalho com interferências, como por exemplo, CD's, DVD's e instrumentos de medição.

**Coerência:** Todos os fótons estão em fase, ou seja, os picos e vales coincidem uns com os outros. Desejada também na tecnologia de medições, CD's e DVD's.

**Direção:** Os fótons possuem a mesma direção e se movem paralelamente uns com os outros. Como resultado, o feixe de laser constitui-se de uma forma compacta e estreita, gerando um diâmetro focal muito pequeno. Propriedade essencial para processamento de materiais.

### 2.1.3 Tipos de Lasers

Na tabela 2 são listados os tipos de lasers existentes e algumas propriedades dos mesmos:

**Tabela 2** - Tipos de LASER

<b>Tipo de laser</b>	<b>Meio de obtenção do laser</b>	<b>Algumas Propriedades</b>
Gás	Gases ou vapores	CO <sub>2</sub> : $\lambda=10600\text{nm}$ ; utilizado em processamento de materiais HeNe: $\lambda= 633\text{nm}$ ; utilizado em tecnologias de medição
Estado Sólido	Cristais ou vidros dopados com íons opticamente ativos	Rubi: $\lambda=694\text{nm}$ ; 1º laser inventado. Nd:YAG: $\lambda=1060\text{nm}$ ; utilizado em processamento de materiais
Diodo	Semicondutores	GaInP: $\lambda=670\text{nm}$ GaAs: $\lambda=800\text{nm}$ ; Utilizados em telecomunicação; equipamentos eletrônicos.

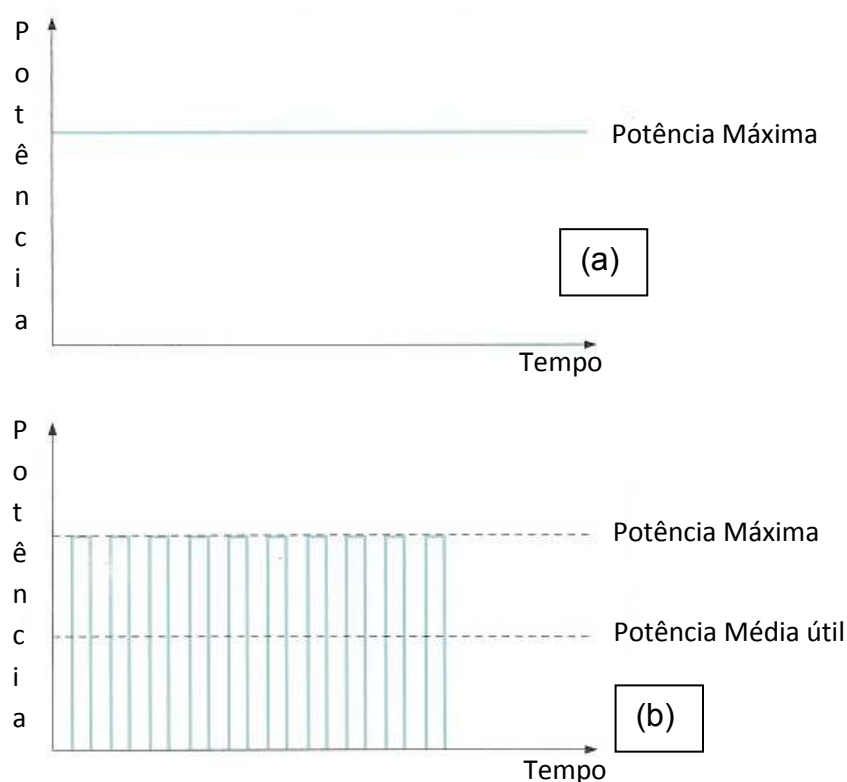
Fonte: [11]

Os lasers aplicados industrialmente podem ser utilizados com ondas contínuas ou pulsadas (Figura 2).

Na forma de onda contínua, o feixe de laser é lançado continuamente, ou seja, a potência de emissão é mantida constante durante o período de operação.

Na forma de onda pulsada, o feixe de laser é dividido em pequenos pulsos, e a emissão é intermitente. Cada pulso possui uma específica quantidade de energia, que é equivalente à potência do pulso multiplicada pelo tempo de duração do pulso.





**Figura 2** - Modos de operação do laser, (a) tipo contínuo e (b) tipo pulsado. Fonte: [11]

#### 2.1.4 Interações do laser com a matéria

Os materiais, quando em contato com a luz, absorvem uma parte de sua energia e refletem outra parte. Uma terceira parte atravessa o produto sem que haja interação (transmissão). A relação de transmissão, absorção e reflexão depende do tipo de material a ser trabalhado e do comprimento de onda utilizado. Por exemplo, em metais, não há transmissão para qualquer comprimento de onda de luz laser.

A interação mais importante é a absorção, cujo grau é determinado por vários fatores como: comprimento de onda do laser, polarização, ângulo de incidência, temperatura, geometria e superfície do material [11].

A energia absorvida pelo material causa um aquecimento no mesmo. Esse aquecimento é desejado, na maioria dos casos, sendo que cada processo de fabricação em que se utiliza o laser possui um ponto de absorção de energia ideal. Por exemplo, em um tratamento térmico é necessário apenas aquecer o material até

determinada temperatura, já em soldagens é necessário que se haja a fusão do material.

A condutividade térmica do material é de grande importância, já que uma menor condutividade térmica induz maior calor localizado.

Como ferramenta, o laser pode ser usado para:

- Aquecer o material para realização de tratamentos térmicos;
- Fundir o material para corte ou soldagem;
- Vaporizar ou vazar o material para furos e trabalhos estruturais;

## 2.2 Soldagem a LASER

Soldagem a laser é uma técnica de soldagem usada para unir componentes através da energia fornecida por um feixe contínuo ou pulsado de laser. Este feixe fornece uma fonte de calor concentrada permitindo um cordão de solda estreito e com boa profundidade com altas taxas de soldagem [2].

A capacidade de se obter altas intensidades de energia é o fator primário para a viabilidade de se usar o laser para soldagem (Tabela 3). Experimentos mostram que o laser fornece cordões de alta precisão, ou seja, alta qualidade de soldagem [6].

**Tabela 3** – Comparação entre a energia, eficiência e perfil de soldagem em diversos processos.

Processo de soldagem	Intensidade de energia (W/cm <sup>2</sup> )	Eficiência da junção (mm <sup>2</sup> /kJ)	Perfil da zona de fusão (único passe)
Oxiacetilênica	10 <sup>2</sup> - 10 <sup>3</sup>	0,2 – 0,5	Pouco profunda
Arco elétrico	5x10 <sup>2</sup> - 10 <sup>4</sup>	0,8 - 10	Pouco profunda
Arco de plasma	10 <sup>3</sup> - 10 <sup>6</sup>	5 - 10	Média profundidade
Feixe de elétrons	10 <sup>5</sup> - 10 <sup>8</sup>	20 – 30	Alta profundidade em alta energia
Feixe de LASER	10 <sup>5</sup> – 10 <sup>7</sup>	15 - 25	Alta profundidade em alta energia

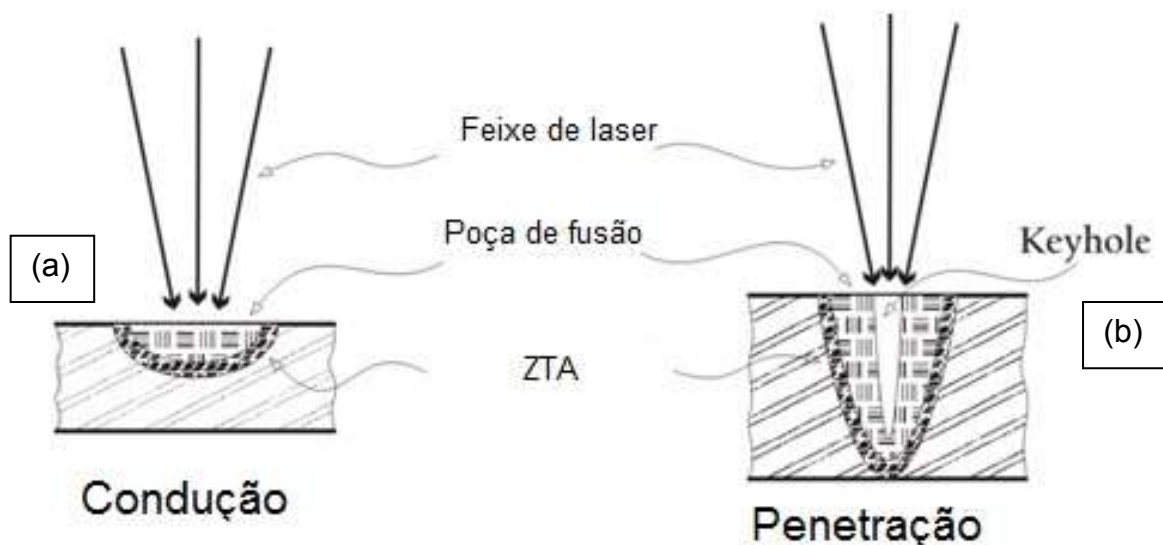
Fonte: [2]

Suas vantagens em relação aos processos convencionais à arco são:

- Energia seletiva em aplicações com baixa área de contato: Isso resulta em baixas tensões térmicas e uma ZTA baixa, livrando o material de oscilações microestruturais nas proximidades da região soldada;
- Costuras estreitas e superfícies suaves: Isso diminui a quantidade de trabalho de acabamento, ou até mesmo, elimina essa necessidade;
- Alta resistência associada com baixo volume de solda: Após o trabalho de soldagem, o produto pode passar por esforços de dobramento e testes de pressurização.
- Fácil capacidade de integração: soldagem a laser pode ser combinado com outras operações de produção.
- Apenas um lado do produto a ser juntado precisa ser acessível.
- Altas velocidades de processo;
- É facilmente automatizado;

### 2.2.1 Técnicas de Soldagem a LASER

Existem duas técnicas possíveis de desenvolvimento da solda a laser: soldagem por condução de calor e soldagem por penetração. A diferença entre os dois tipos é o formato da poça de fusão (Figura 3), sendo que na soldagem por penetração a poça de fusão é denominada “Keyhole” [7].



**Figura 3** - Representação das poças de fusão pelos métodos de (a) condução e (b) penetração. Fonte: [1]

### **2.2.1.1 Soldagem a laser por condução de calor**

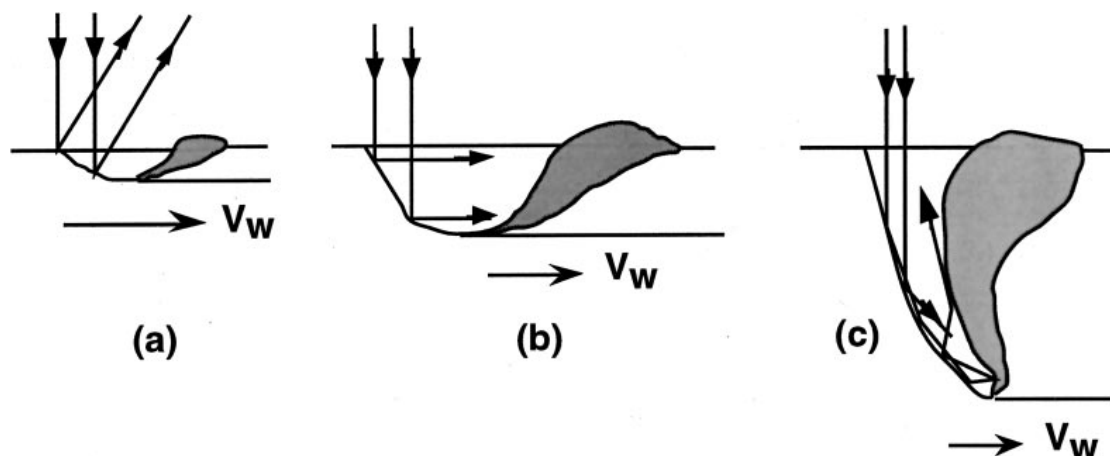
Neste modo de soldagem, o laser atinge a superfície do material que absorve a energia do laser, conduzindo-a até determinada profundidade e largura.

A convecção é a propriedade mais importante que afeta a geometria da poça de fusão. A convecção é também responsável por misturar e eventualmente afeta a composição da poça de fusão durante a soldagem pelo fato de a geometria e a composição da poça de fusão serem funções do número de Prandtl (viscosidade cinética / difusividade térmica) dos materiais [4]. Em materiais com baixo número de Prandtl (p.e. alumínio) a poça de fusão é esférica e é formada pela condução do calor fornecido pelo feixe de laser, já em materiais cujo número de Prandtl é alto (p.e. aços e suas ligas) a poça de fusão é larga e rasa devido à interferência das altas tensões de superfície do material.

### **2.2.1.2 Soldagem a laser por penetração**

Este mecanismo de soldagem a laser permite que, em um único passe de solda, haja uma grande penetração do cordão. O que torna isso possível é a formação do chamado *keyhole*. Ao incidir no material, o feixe de laser focalizado possui intensidade de potência suficiente não só para fundir o material, mas também para vaporiza-lo. A pressão criada favorece a formação de uma coluna de vapor nas paredes do metal sólido entrando em equilíbrio com a tensão superficial do metal fundido (Figura 4). O *Keyhole* age como um corpo negro, auxiliando na absorção do feixe de laser e distribuindo o calor de forma a aumentar a profundidade do cordão [7].

Um dos problemas envolvidos nesse método de soldagem é que, o vapor metálico formado se ioniza, tornando-se plasma, esse plasma em geral atrapalha na absorção total do feixe de laser, funcionando como se fosse um escudo de luz, absorvendo a energia antes de a mesma alcançar o material a ser soldado.



**Figura 4** - Evolução da poça de fusão em função das velocidades de soldagem com a formação de keyhole.  $V(a) < V(b) < V(c)$ . Fonte: [7]

### 2.3 Aços inoxidáveis Dúplex

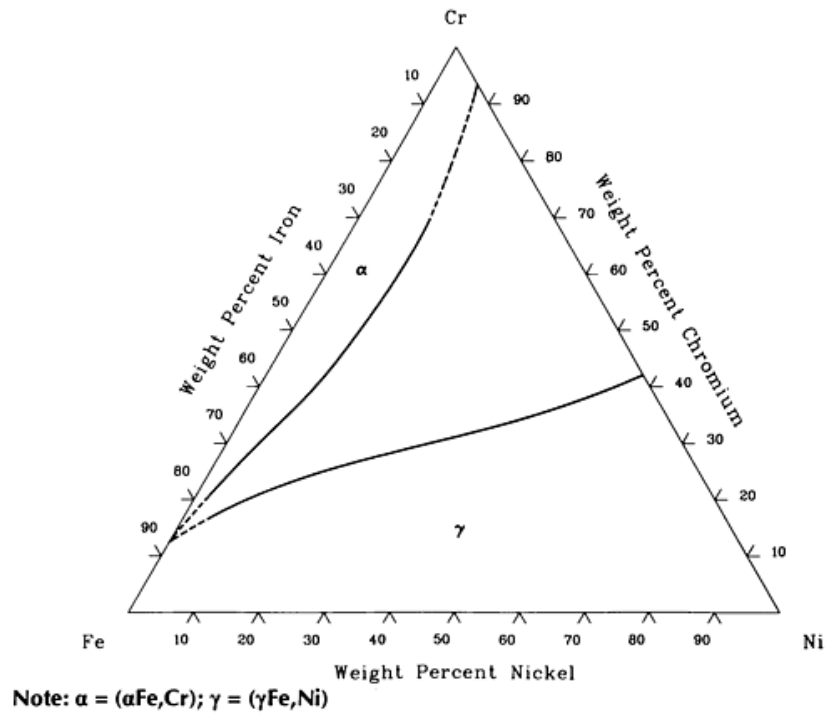
Aços inoxidáveis Dúplex são ligas com base ferro caracterizadas pela fração volumétrica das fases ferrita e austenita aproximadamente em 50%/50%. São ligas especiais contendo tipicamente de 20% a 30% de cromo e 5% a 10% de níquel, podendo possuir até 5% de molibdênio.

Os aços dúplex possuem vantagens como: resistência mecânica, resistência à corrosão sob tensão (principalmente em meios contendo cloretos) e resistência à corrosão por pitting. São usados em aplicações cuja faixa de temperatura varie entre  $-60^{\circ}\text{C}$  e  $300^{\circ}\text{C}$ . Quanto à soldabilidade, possuem rendimentos intermediários entre os aços inoxidáveis ferríticos e austeníticos, todavia, requerem cuidados especiais na soldagem, pois as altas energias utilizadas afetam notoriamente o balanceamento entre as fases, podendo ocasionar em perdas das propriedades desejadas para o aço [10].

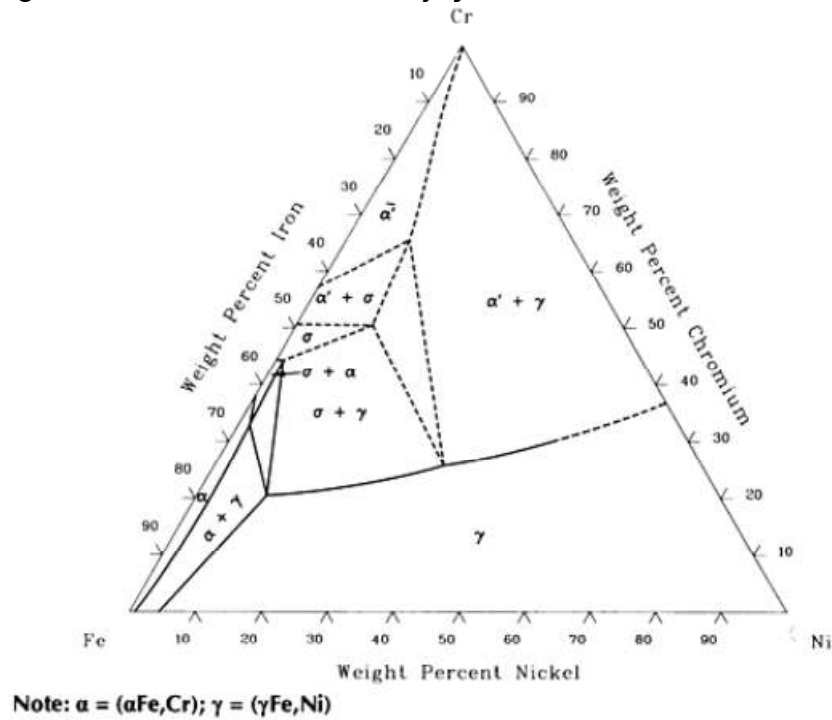
#### 2.3.1 Metalurgia Física dos aços duplex

A termodinâmica dos aços duplex se baseiam no diagrama ternário Fe-Cr-Ni (Figuras 5 e 6) o qual prevê em determinadas composições as fases  $\alpha$  e  $\gamma$ . A manutenção dessas fases em temperatura ambiente se dá pelo tratamento térmico de solubilização entre  $1050$  e  $1200^{\circ}\text{C}$  seguido pelo resfriamento em água. Esse resfriamento rápido, apesar de tornar a microestrutura metaestável, se justifica para

impedir a precipitação de fases intermetálicas, que diminuem significativamente as propriedades do aço [10].



**Figura 5** - Diagrama ternário Fe-Cr-Ni. Projeção isotérmica a 1000° C. Fonte [8].



**Figura 6** - Diagrama ternário Fe-Cr-Ni. Projeção isotérmica a 800° C. Fonte [8].

A solidificação dos aços duplex se inicia com a nucleação e crescimento da fase  $\alpha$ , que é uma solução sólida de Fe rica em Cr com estrutura cristalina CCC e energia suficiente para solubilizar os demais elementos de liga. Ao resfriar-se se nucleia nos contornos de grão  $\alpha$  a fase  $\gamma$  que é rica em Ni e possui estrutura cristalina CFC. A estabilidade isotérmica da liga depende muito da temperatura, como pode-se visualizar nos diagramas das figuras 5 e 6, onde pode-se observar que a 800°C já há precipitação de fases intermetálicas, como a fase  $\sigma$ .

### 2.3.2 Microestrutura

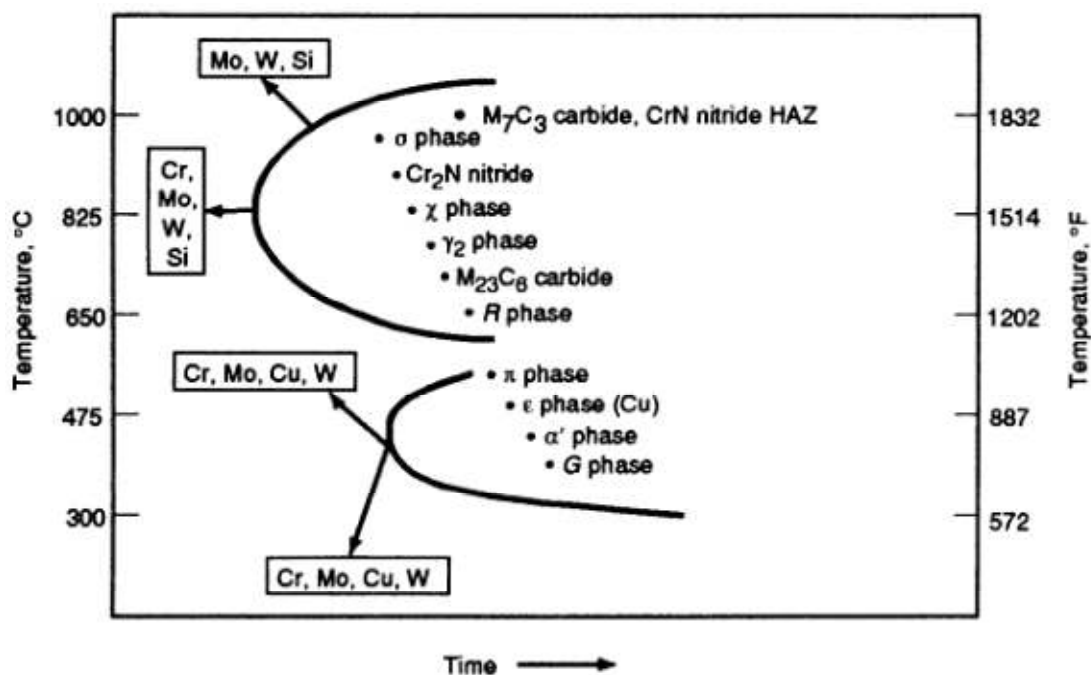
Os aços duplex, como já mencionado, possuem frações volumétricas de austenita e ferrita em proporções iguais, sendo que a matriz é a ferrita, ou seja, a austenita forma-se a partir dos grãos de ferrita que saem do equilíbrio por fatores termodinâmicos.

Por serem altamente resistentes à corrosão e possuírem duas fases distintas, o ataque químico para revelar a microestrutura para análise por microscopia óptica dos aços duplex é particularmente complicado. Ataques convencionais para aços inoxidáveis, como por exemplo, a água-régia revela os contornos dos grãos sem distingui-los, tornando a análise metalográfica limitada. Ataques eletrolíticos possuem a mesma limitação. Uma boa alternativa para o ataque químico da microestrutura é o reativo de Behara modificado (25ml de Ácido Clorídrico, 125ml de Água e 5g de Metabissulfito de Potássio) que tingem somente a ferrita, tornando possível distinguir as fases e calcular a fração volumétrica das mesmas (Figura 7).



**Figura 7** – Microestruturas dos aços duplex. (a) metal base. Aumento: 500x e (b) zona de fusão em soldagem. Aumento: 100x. Fonte: Autor

Além das fases ferrita e austenita, devido a variações termodinâmicas, elevados aquecimentos ou por presença de elementos químicos desbalanceadores, pode ocorrer a formação de fases indesejáveis na microestrutura dos aços duplex, são elas as fases  $\sigma$ ,  $\chi$ , fases de laves, entre outras (Figura 8).



**Figura 8** - Diagrama TTT mostrando a faixa de precipitação das principais fases intermetálicas dos aços duplex. Fonte: [2].

**Fase  $\sigma$ :** A fase sigma apresenta elevada dureza e consequentemente grande fragilidade. Possui estrutura cristalina tetragonal e é não magnética a temperatura ambiente. É uma fase com composição rica em cromo, molibdênio e silício, que são elementos estabilizadores da ferrita, o que justifica o fato de seu aparecimento na ferrita [10].

Sua precipitação ocorre em temperaturas entre 700 e 900°C. Quanto mais elementos estabilizadores de ferrita (de liga possuir, o aço duplex se torna mais susceptível ao surgimento da fase sigma).

**Fase  $\chi$ :** A fase chi possui estrutura cúbica e composição Fe-25%Cr-2%Ni-15%Mo-1%Mn. Também é uma fase dura e frágil. Apesar de sua presença ser associada a fase sigma, é mais rara de ocorrer pois sua precipitação se dá por períodos de 6 a 10 horas [10].



Fase de laves: Indesejada pelos mesmos motivos das fases sigma e chi, a fase de laves possui composição  $\text{Fe}_2\text{Mo}$ , precipita-se em temperaturas mais baixas, entre 500 e 700°C [10].

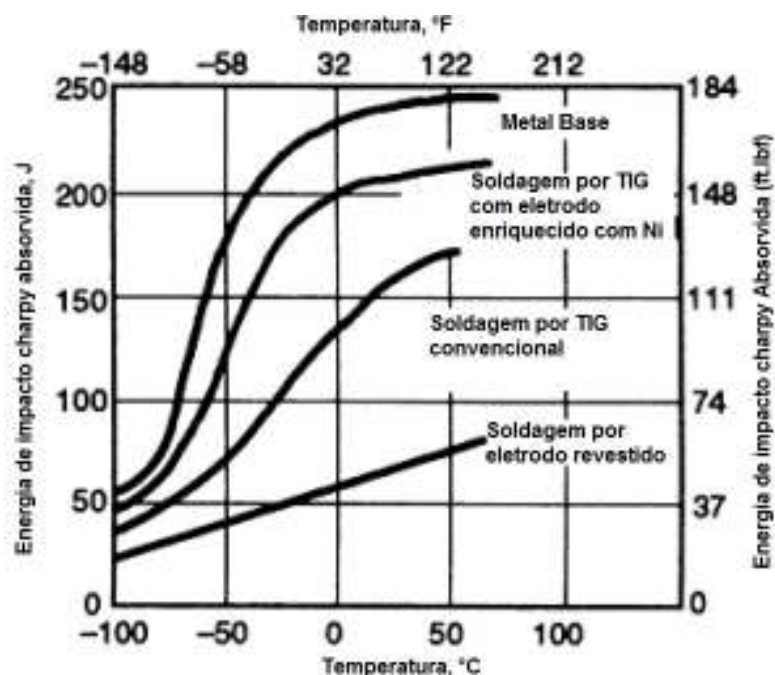
### 2.3.3 Propriedades mecânicas

Os aços duplex possuem propriedades mecânicas superiores aos aços inoxidáveis comuns. Devido ao seu alto limite de escoamento, é amplamente usado com finas espessuras em tubulações de altas pressões (Tabela 3). Outra propriedade que se destaca é a dureza, que fica na faixa dos 30 HRC sem a necessidade de tratamentos térmicos para endurecimento e aumento de tenacidade. Possuem também alta tenacidade, possuindo temperatura de transição dúctil-frágil em torno de -100°C (Figura 9). Um grande limitador de sua tenacidade é quando se trata de produtos soldados, sendo que a tenacidade na região de fusão e na zona termicamente afetada é ligeiramente inferior às do metal base.

**Tabela 4** - Propriedades mecânicas de alguns aços duplex.

<b>Grau UNS</b>	<b>Tensão de escoamento mínimo (MPa)</b>	<b>Limite de resistência mínimo (MPa)</b>	<b>Alongamento mínimo (%)</b>	<b>Dureza (HRC)</b>
S31200	450	690	25	28
S31500	440	630	30	30
S31803	450	620	25	30
S32304	400	600	25	30
S32550	550	760	15	31
S32750	550	800	15	32

Fonte: ASTM A790.



**Figura 9** - Comparação da curva de transição dúctil-frágil do aço duplex Fe22Cr-5.5Ni-3Mo-0.15N entre o metal base e diferentes processos de soldagem. Fonte [2]

#### 2.3.4 Resistência à Corrosão

Tratando-se de aços inoxidáveis em geral, resistência à corrosão é a capacidade que esses materiais possuem de passivar-se em meios corrosivos. A camada passiva é composta por óxidos dos elementos de liga do aço que se aderem à superfície formando um filme fino protetor, ou seja, a composição química do aço é diretamente relacionada à sua resistência à corrosão. Um dos elementos mais eficazes na formação da camada passiva é o Cr e como já mencionado, os aços duplex possuem ao menos 20% de Cr em sua composição, o que explica sua grande resistência à corrosão [8].

Outro fator importante para a resistência à corrosão é a taxa com a qual a camada passiva pode se solubilizar em determinado ambiente. Essa solubilização ocorre principalmente em ambientes contendo cloretos. Os íons cloretos possuem um elétron a mais em sua camada de ligação, portanto são altamente reativos. Quando entram em contato com a camada passiva criam cloretos de metais altamente voláteis, eliminando a camada passiva. Análises termodinâmicas mostram que a resistência a esse tipo de corrosão se dá pelo acréscimo de Ni, Cr e Mo na liga já

que os cloretos metálicos formados desses elementos são pouco voláteis, tornando a camada passiva mais resistente [8].

Os mecanismos de corrosão a qual os aços duplex mais comumente são aplicados são: corrosão por pite e corrosão sob tensão.

A camada passiva formada na superfície do aço possui espessuras em dimensões nanométricas, por ser tão fina está sujeita a possuir irregularidades em pontos aleatórios da superfície do metal. Quando há a degradação do metal nessas regiões deficientes da camada passiva ocorre o fenômeno chamado corrosão por pite (Figura 10). O grande risco ao material que sofre essa degradação é a aceleração da falha do componente, já que os pites são regiões iniciadoras de trincas. Fatores que afetam a cinética e potencial de formação de pites são: alta concentração de íons (principalmente cloretos), composição química do metal, temperatura e condição superficial do metal.

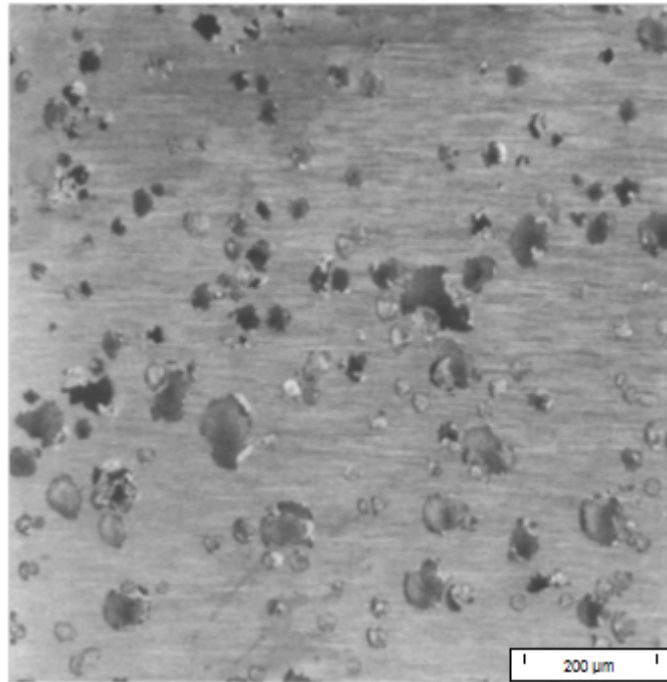
Já corrosão sob tensão é o termo usado para descrever falhas que ocorrem nos materiais em condições de baixa influência do ambiente. A propagação da falha é resultado da interação combinada de algum esforço mecânico e reações de corrosão. A trinca propaga nesse modo de corrosão em taxas muito baixas ( $10^{-6}$  m/s, por exemplo). A sequência de eventos acarretados pela corrosão sob tensão são:

- Iniciação da trinca e 1º estágio de propagação;
- Estágio 2 ou propagação em estado estacionário;
- Estágio 3 de propagação e falha final.

A distinção desses três estágios é difícil, já que a transição ocorre de maneira contínua e a divisão é feita a partir de testes experimentais que podem ser classificados em três categorias:

- Testes com carga estática em corpos de prova sem defeitos;
- Testes com carga estática com corpos de prova pré-trincados;
- Testes usando amostras com baixa tensão.

Maiores detalhes destes métodos podem ser encontrados em [7].



**Figura 10** - Pites em um metal. Fonte [8]

Os aços duplex podem ter sua resistência à corrosão diminuída pela presença das fases intermetálicas sigma, chi e laves, pois como essas fases são formadas de elementos como Cr e Mo elas criam uma região empobrecida desses elementos em volta de sua precipitação.

### **3. Materiais e Métodos**

O aço super duplex utilizado foi o denominado UNS 32750, fabricado pela Sandivik com o código comercial SAF 2507 e foi adquirido em forma de tubo com 19,1 mm de diâmetro externo e 1,65 mm de espessura.

O processo de soldagem foi realizado com um laser pulsado de Nd:YAG acoplado a uma fresadora com comando numérico computadorizado (CNC) de três eixos, instalada no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN.

O laser de Nd:YAG possui comprimento de onda de emissão de  $\lambda=1,064 \mu\text{m}$  com fator de qualidade  $M^2 = 12$ .

Os parâmetros fixos utilizados na soldagem foram:

Energia dos pulsos:  $E = 6 \text{ J}$

Diâmetro do ponto de solda:  $d_1 = 0,8 \text{ mm}$

Velocidade de soldagem:  $v = 130 \text{ mm / min}$

Taxa de repetição dos pulsos:  $f = 9 \text{ Hz}$

Taxa de sobreposição: 70 %

Diversos parâmetros usados na soldagem com laser de Nd:YAG influenciam na geometria do cordão de soldagem, entre eles pode-se destacar: energia por pulso, largura temporal, diâmetro e distância do ponto focal, taxa de repetição, velocidade, vazão e composição do gás de proteção e sobreposição dos pulsos laser. Parâmetros do laser, tais como, energia do pulso, largura temporal, taxa de repetição e velocidade são regulados diretamente no equipamento antes da soldagem. Outras variáveis são dependentes das condições do experimento. Por exemplo, o diâmetro do ponto focal  $d_{min}$  de um feixe laser com diâmetro inicial  $d_0$ , fator de qualidade  $M^2$  e focalizado por uma lente de comprimento focal  $f$  é dado pela equação 1 (Johnston, 1990):

$$d_{min.} = \frac{4M^2\lambda f}{\pi d_0} \quad (1)$$

A variação deste diâmetro em relação à posição do ponto focal -  $Z$  é dada pela equação 2 (Hall, 1989):

$$w = w_0 \sqrt{1 + \left( \frac{M^2\lambda Z}{\pi w_0^2} \right)^2} \quad (2)$$

onde  $w$  e  $w_0$  são respectivamente, o raio do feixe na posição  $Z$  e no foco, onde  $w_0 = d_{min}$ .

Com esses parâmetros foram realizados 12 cordões de solda espaçados igualmente entre si, no sentido longitudinal do tubo, atentando-se para que não houvesse influência do calor de um cordão em seu subsequente. Como gás de proteção, utilizou-se argônio puro, com vazão de 10 l/min.

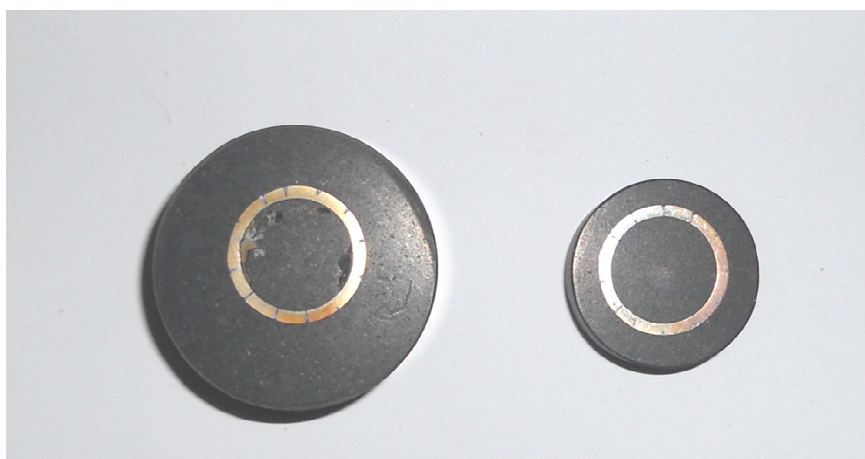
Na tabela 5 encontram-se todos os parâmetros variados em cada um dos 12 cordões soldados:

**Tabela 5** - Parâmetros de soldagem.

<b>Cordão de Solda</b>	<b>Diâmetro do feixe <math>2\omega</math>, <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>Largura temporal <math>T_p</math>, ms</b>	<b>Intensidade <math>1 \times 10^6</math>, <math>\text{W}/\text{cm}^2</math></b>	<b>Posição Focal, mm</b>
1	116	12	4,5	0,0
2	141	12	3,1	0,5
3	141	4	9,4	0,5
4	197	4	5,0	1,0
5	265	4	2,7	1,5
6	338	4	1,7	2,0
7	414	4	1,1	2,5
8	197	6	3,3	1,0
9	265	6	1,8	1,5
10	116	9	6,1	0,0
11	141	9	4,2	0,5
12	197	9	2,2	1,0

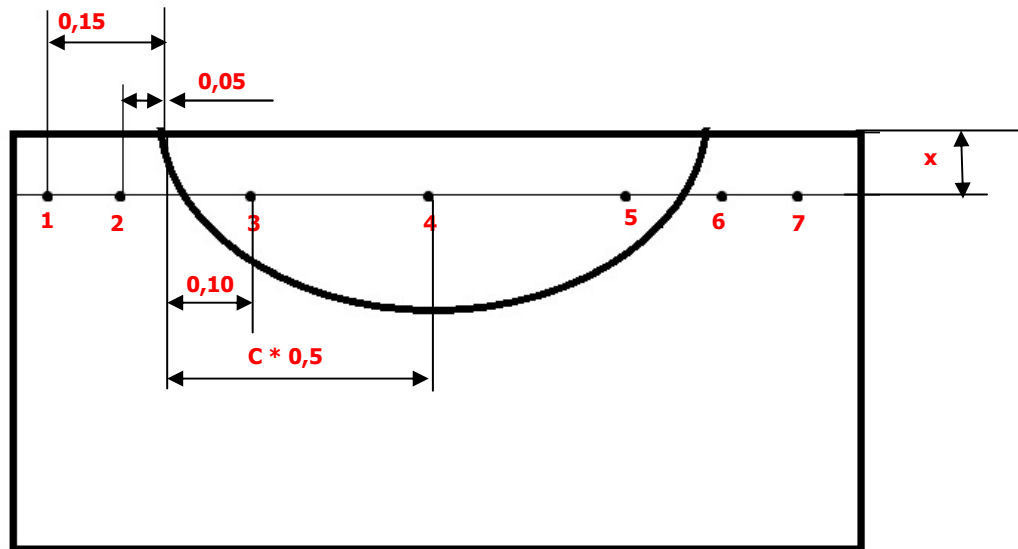
Fonte: [1]

Após a soldagem (Figura 13), retiraram-se três amostras da seção transversal do tubo por meio de disco abrasivo e refrigerado. As amostras foram embutidas a quente em baquelite e lixadas em lixadeira rotativa com granulações de 200 a 1200. Após o lixamento as amostras foram polidas em politriz rotativa utilizando-se alumina de  $1\mu\text{m}$  como agente abrasivo (Figura 11). Por fim, as amostras foram atacadas com o reagente Behara modificado a fim de se obter a microestrutura.



**Figura 11** - Amostras Embutidas. Fonte: Autor

Além da microestrutura, realizou-se medição de microdureza vickers de acordo com a figura 12 com carga de 200 gramas e tempo de aplicação de 10 segundos.



C = Largura do cordão ; x= variável

**Figura 12** - Croqui de Microdureza utilizado. Fonte: Autor

A superfície restante no tubo foi lixada até a lixa de granulação 1200, e exposta ao ambiente para passivação pelo tempo de 24 horas. Após esse tempo foi realizado ensaio de corrosão por pitte, conforme ASTM G48.



**Figura 13** - Corpo de prova soldado. Fonte: [1]

#### 4. Resultados e Discussões

Nesta parte do trabalho, são apresentados os resultados obtidos das caracterizações mencionadas no item 3.

##### 4.1 Dimensionamento dos cordões

A morfologia dos cordões apresentaram variações em função dos parâmetros utilizados. Foram realizadas medições em três regiões diferentes a fim de se verificar se houve alguma variação nas condições de soldagem ao decorrer do processo. A análise dimensional é apresentada na tabelas 6:

**Tabela 6** - Metrologia dos cordões.

<b>Cordão de Solda</b>	<b>Profundidade de Penetração (mm)</b>			<b>Largura média do Cordão (mm)</b>			<b>Formação de Keyhole</b>		
<b>Amostra</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>1</b>	0,50	0,43	0,55	0,74	0,54	0,59	Não	Não	Não
<b>2</b>	0,53	0,47	0,53	0,67	0,53	0,57	Não	Não	Não
<b>3</b>	Total	Total	Total	0,46	0,44	0,40	Sim	Sim	Sim
<b>4</b>	Total	Total	Total	0,51	0,42	0,40	Sim	Sim	Sim
<b>5</b>	Total	Total	Total	0,46	0,38	0,34	Sim	Sim	Sim
<b>6</b>	Total	Total	0,95	0,52	0,33	0,41	Sim	Sim	Sim
<b>7</b>	0,46	0,68	0,34	0,51	0,46	0,63	Não	Não	Não
<b>8</b>	1,37	Total	1,36	0,54	0,40	0,43	Sim	Sim	Sim
<b>9</b>	1,25	1,07	1,37	0,49	0,37	0,40	Sim	Sim	Sim
<b>10</b>	0,59	0,76	0,81	0,89	0,57	0,62	Não	Não	Não
<b>11</b>	0,81	0,75	0,89	0,54	0,55	0,55	Sim	Sim	Sim
<b>12</b>	0,81	0,75	0,85	0,51	0,50	0,52	Sim	Sim	Sim

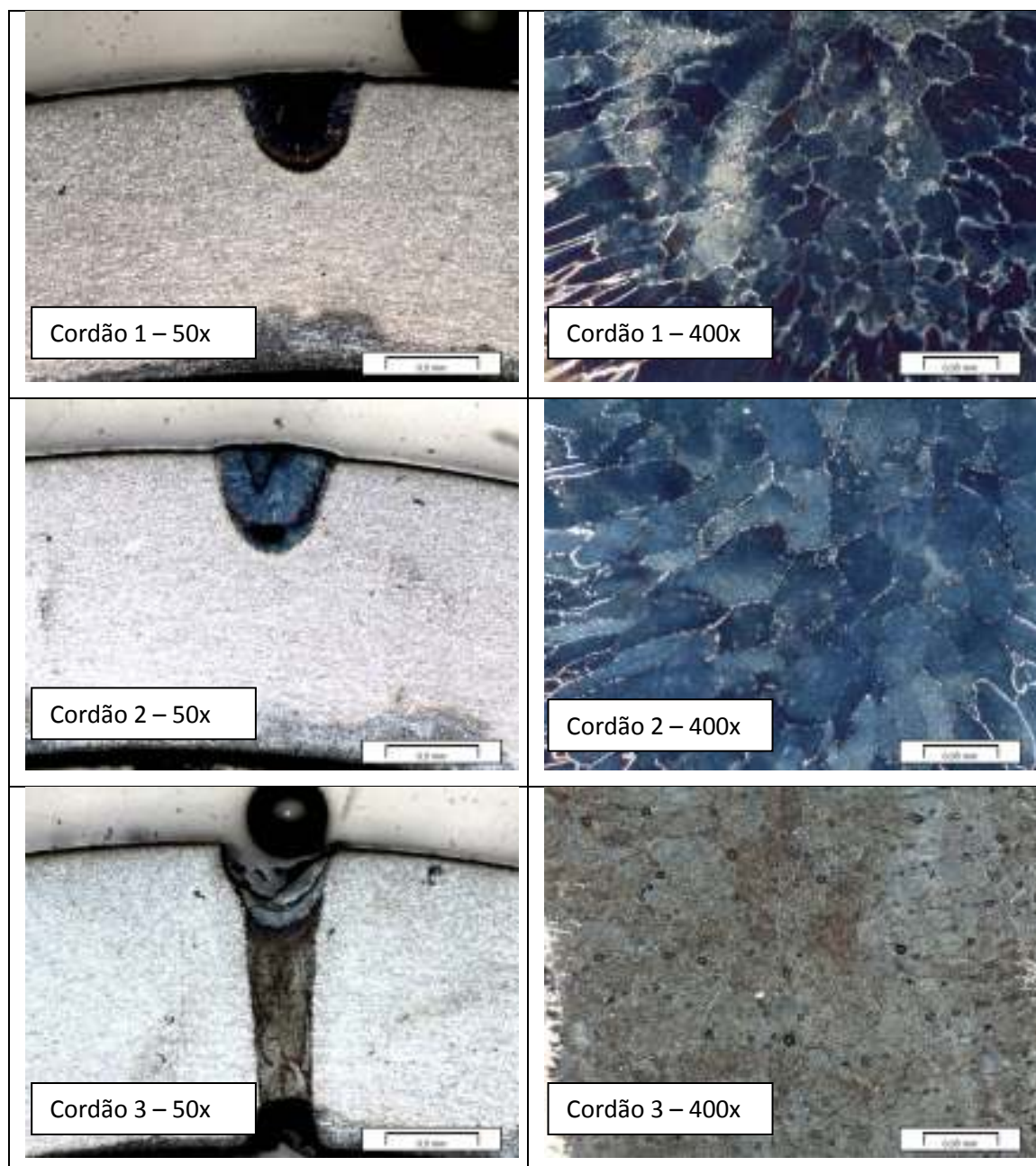
Fonte: Autor

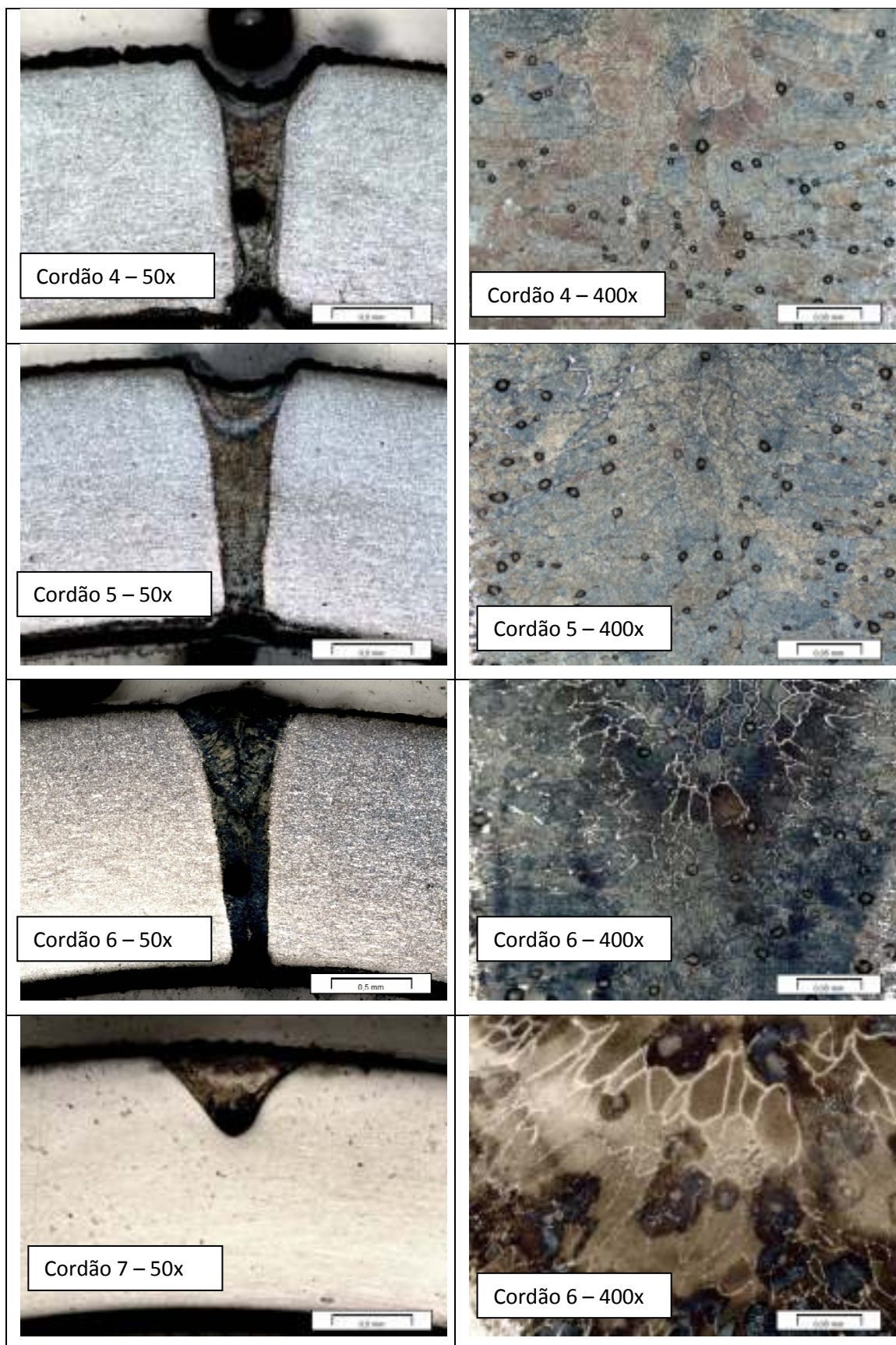
Pode-se notar nas análises dimensionais que os cordões 3, 4 e 5 apresentaram penetração total nas 3 regiões analisadas. O cordão 6 apresentou penetração total em 2 regiões. O cordão 8 apresentou penetração total em 1 região.



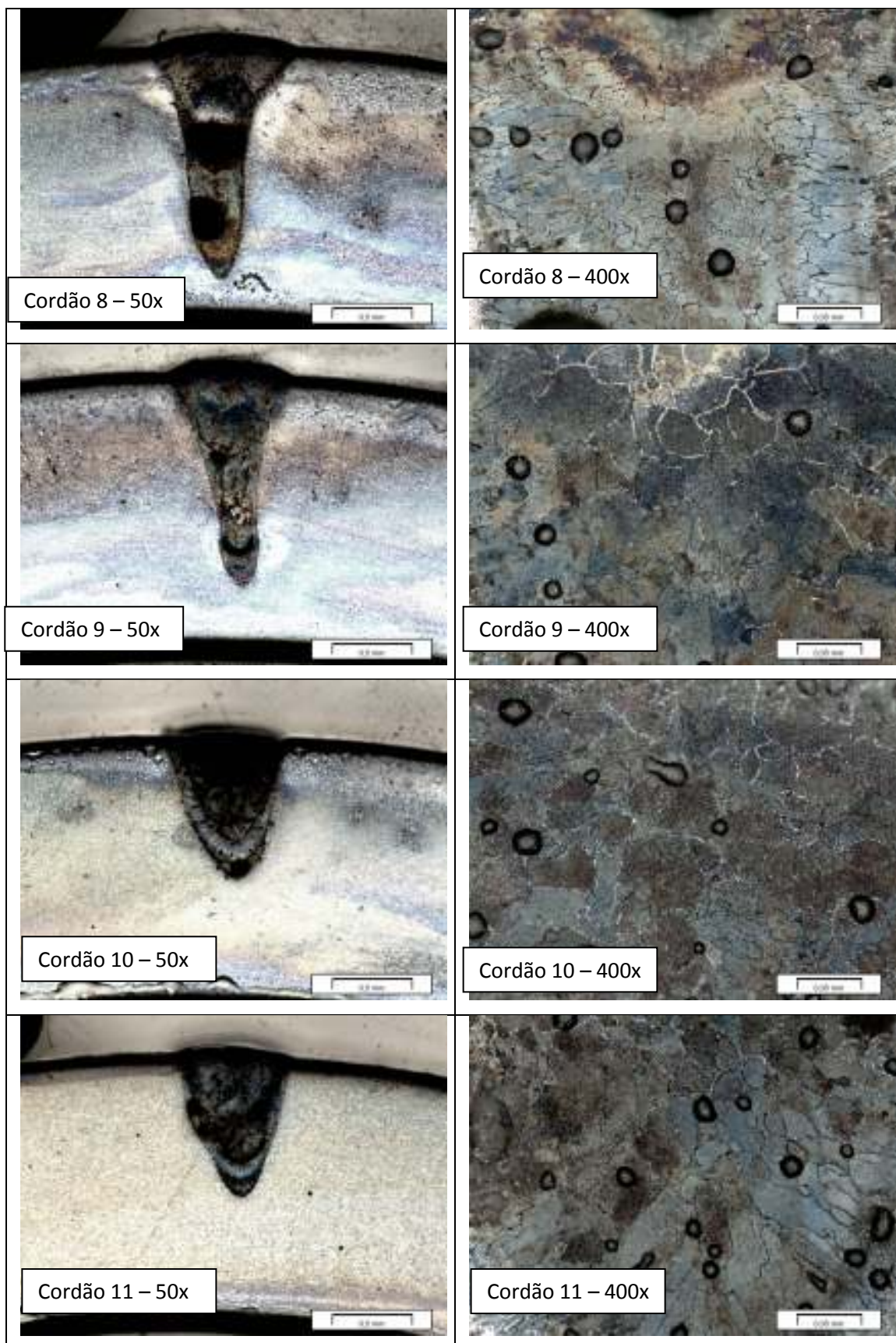
## 4.2 Microestrutura

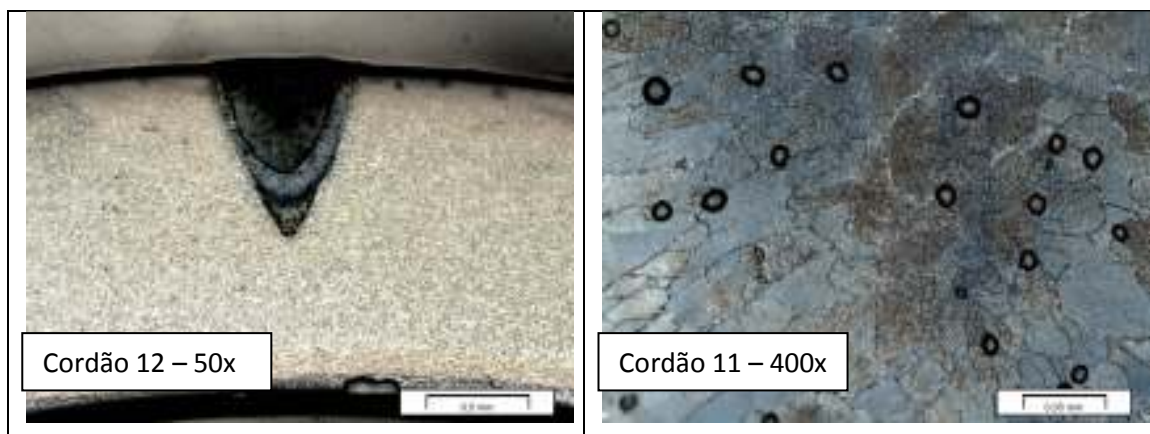
A seguir, na figura 14, estão dispostas as metalografias dos cordões obtidos em 50x e 400x por microscopia óptica.



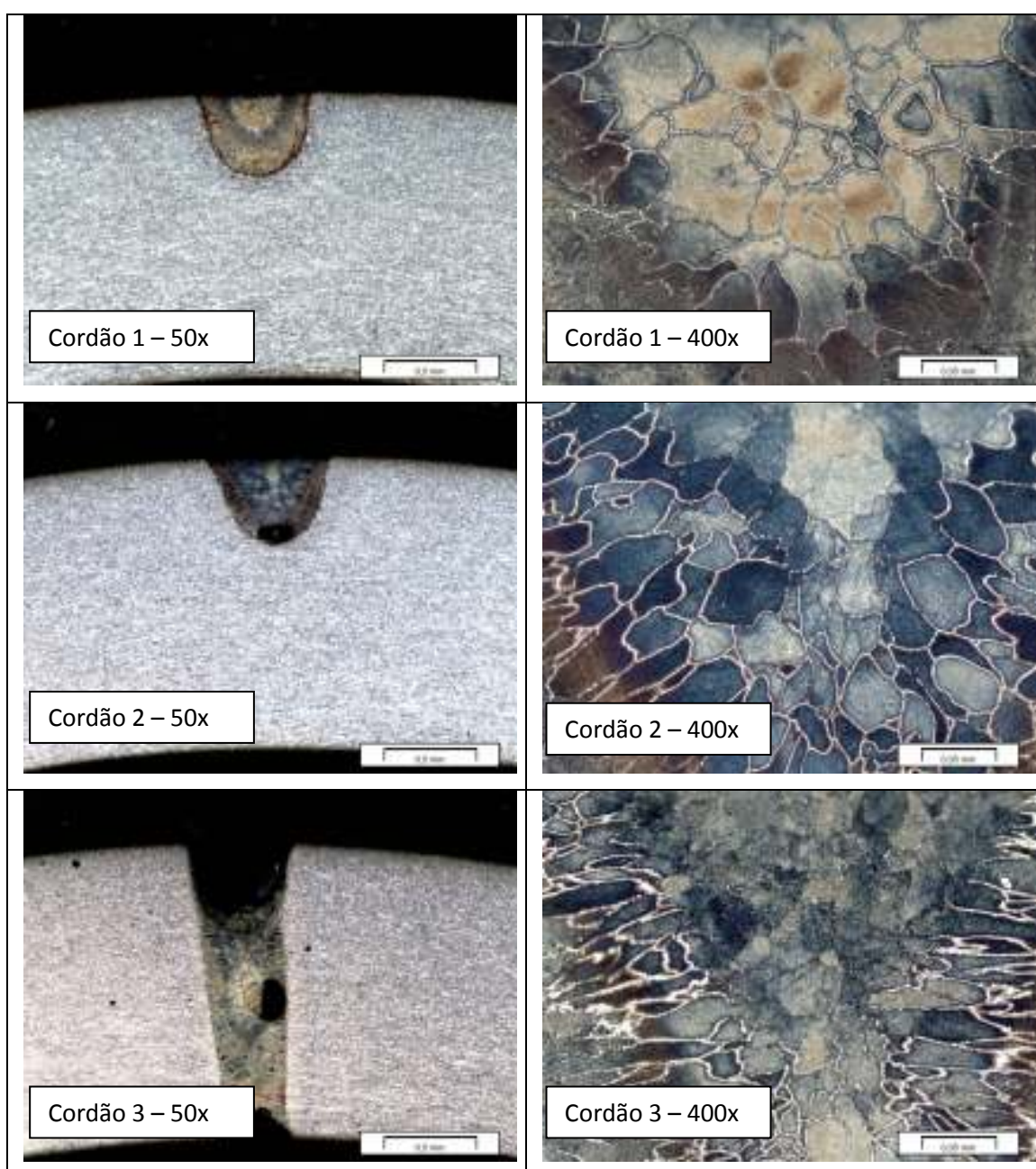




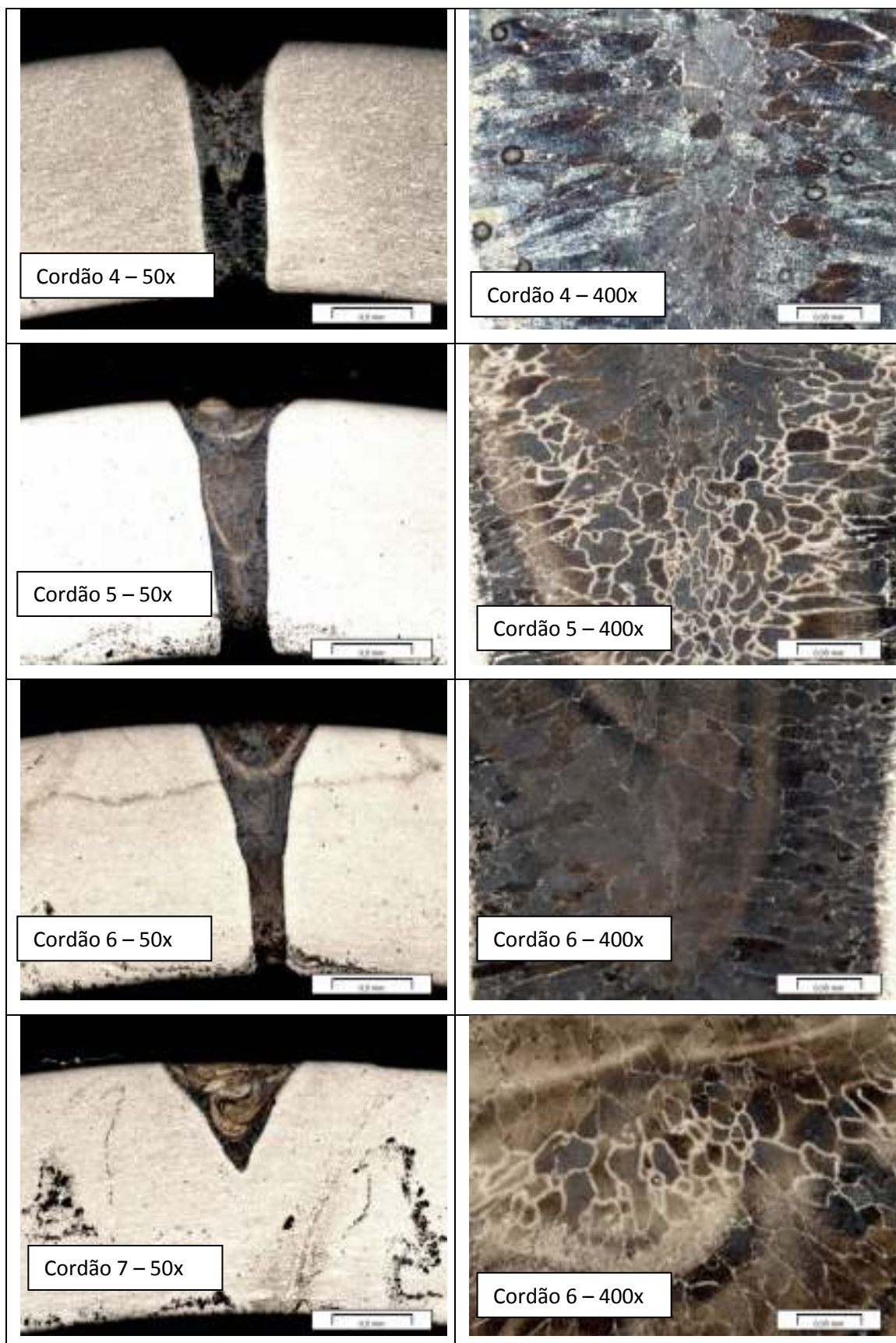


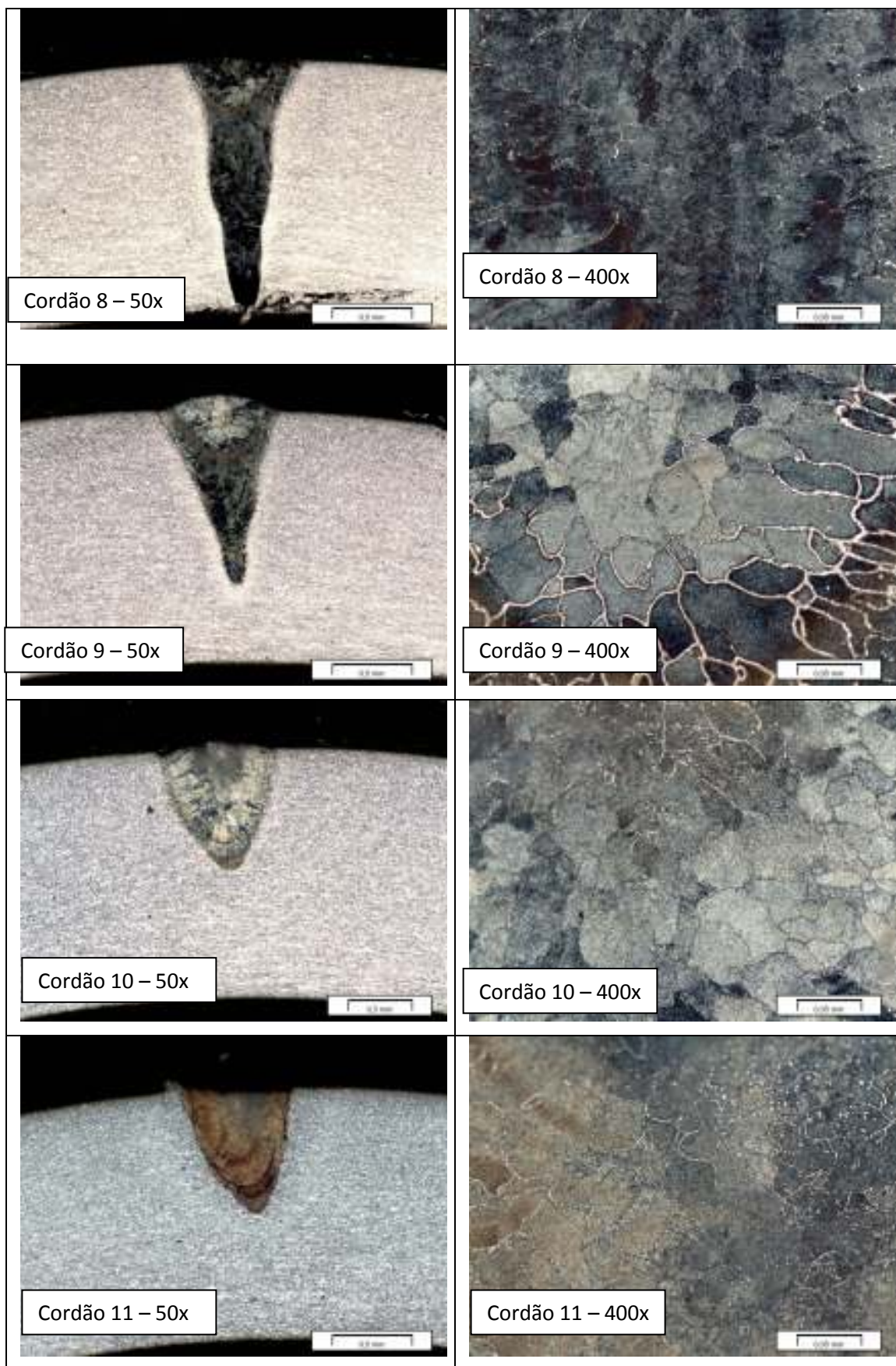


**Figura 14** - Metalografias Amostra 1. Fonte: Autor

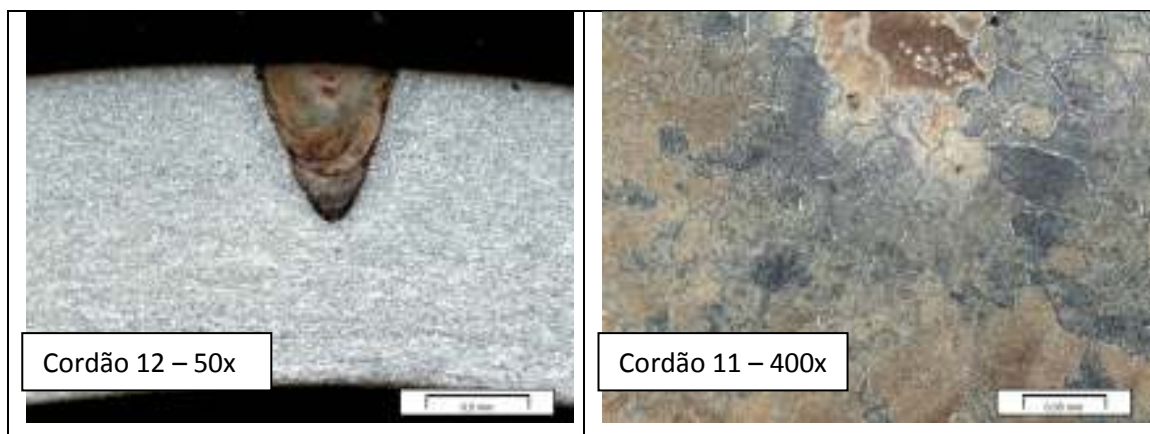




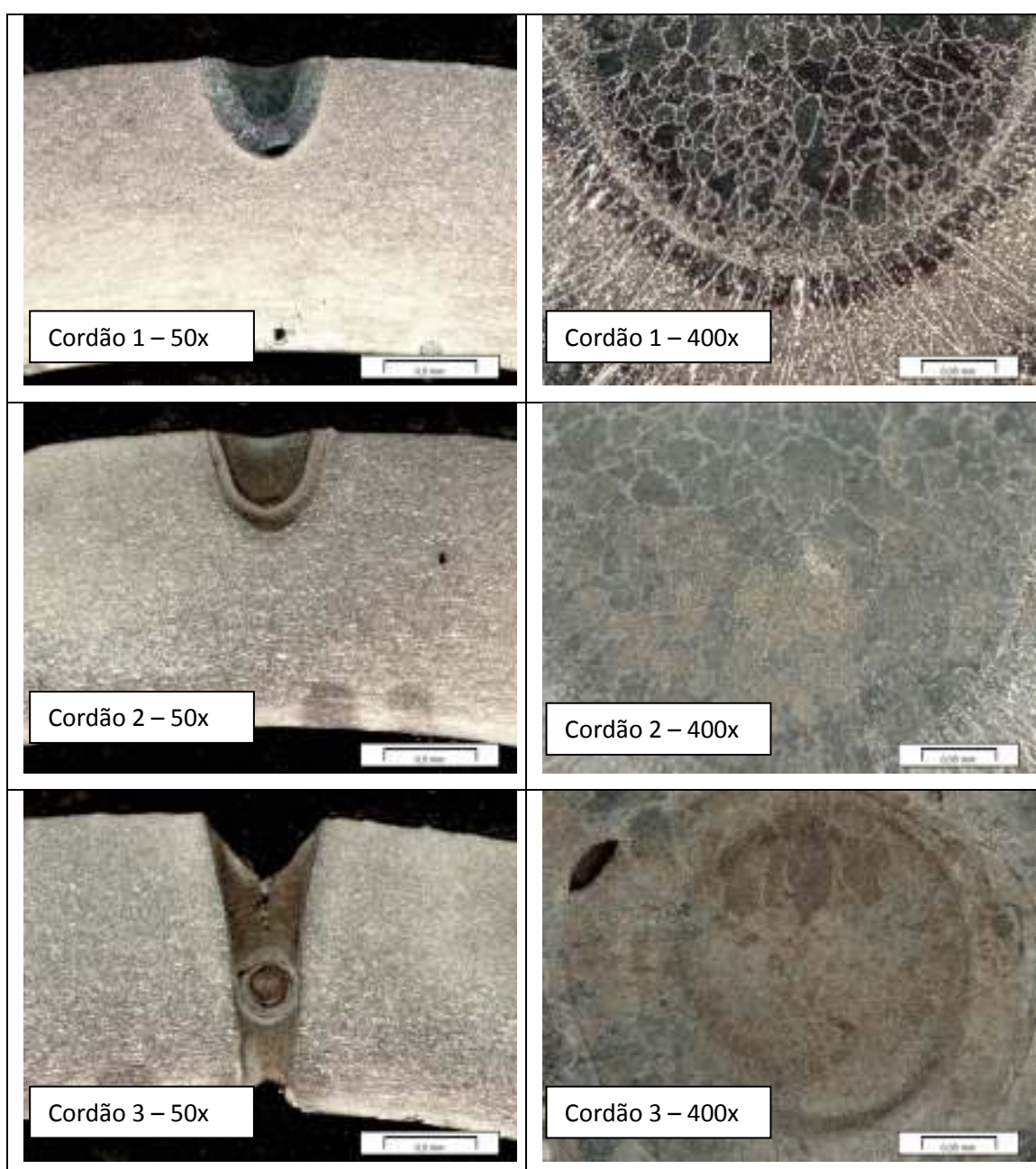


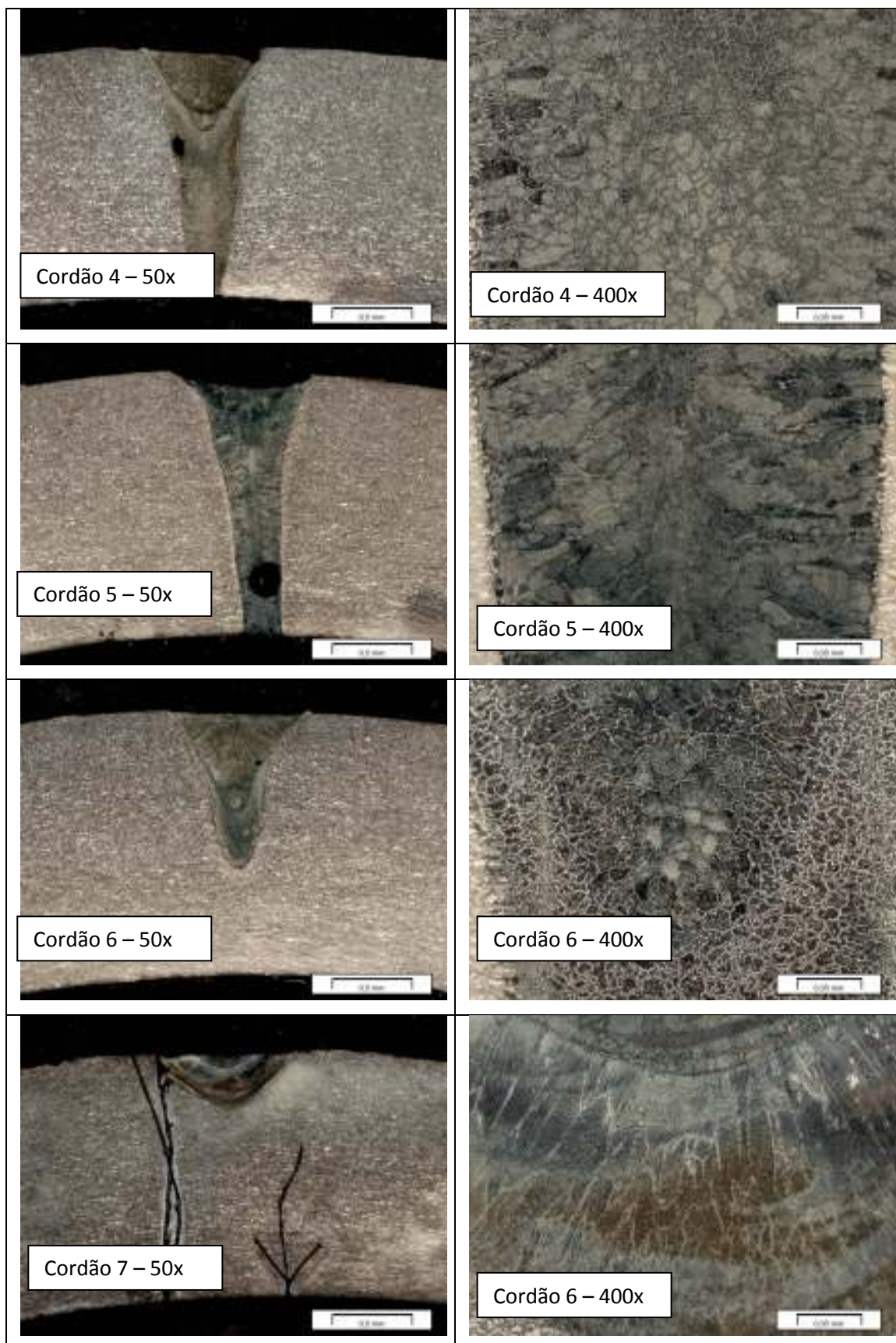




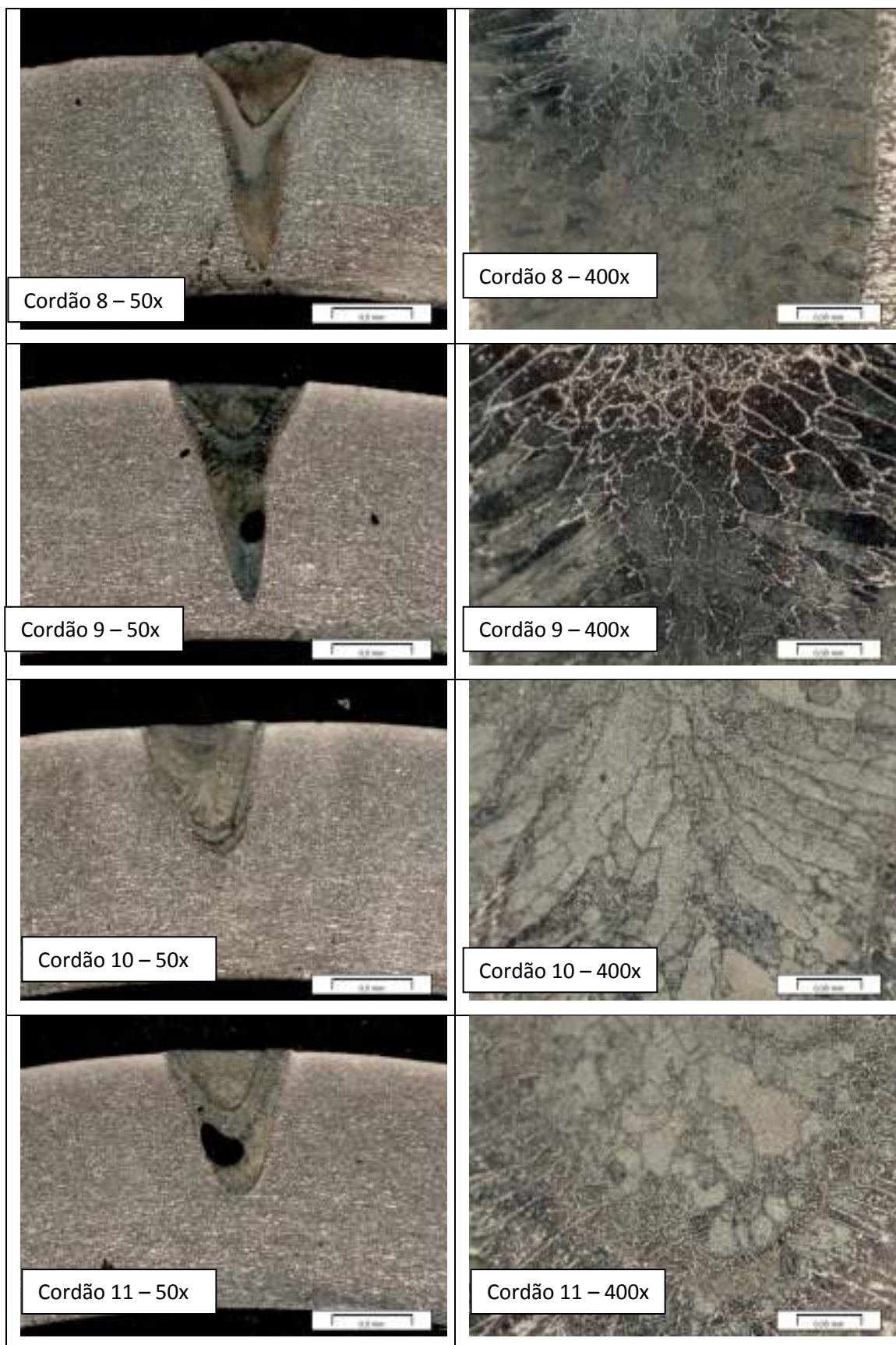


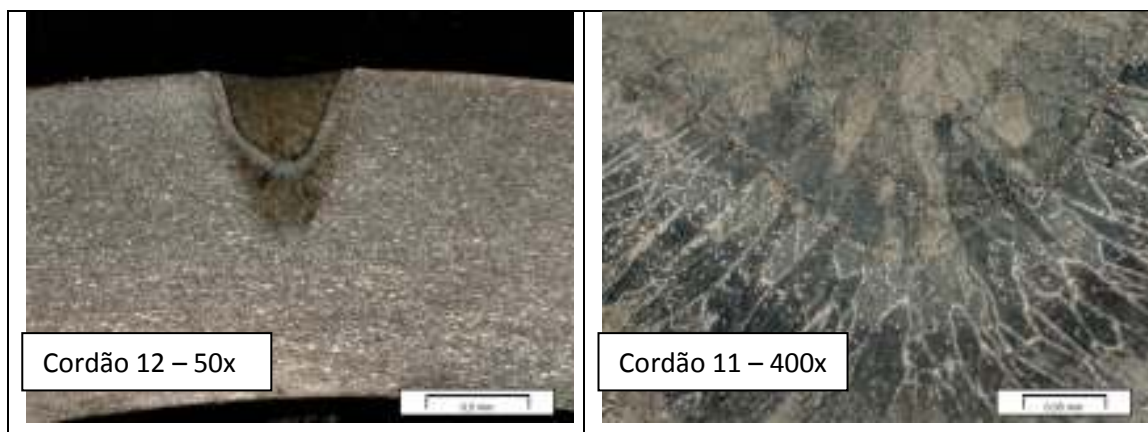
**Figura 15** - Metalografias Amostra 2. Fonte: Autor











**Figura 16** - Metalografias Amostra 3. Fonte: Autor

Com as análises micrográficas pode-se observar que o cordão 4 apresentou descontinuidades nas 3 regiões analisadas. Os cordões 2 e 3 apresentaram descontinuidades em 2 regiões. Os cordões 1, 5, 6, 7, 8, 9 e 11 apresentaram descontinuidades em 1 região.

As morfologias das fases finais obtidas na região soldada são provavelmente ferrita (fase de coloração escura) e austenita (fase de coloração clara). Uma análise mais específica deve ser realizada a fim de se comprovar as fases formadas.

#### 4.3 Microdureza

Abaixo seguem resultados das medições de microdureza realizados conforme figura 8, realizado nas 3 amostras em que foram analisadas as micrografias.

##### Cordão 1

Profundidade  $x = 0,2 \text{ mm}$

Região	ZTA		Cordão de solda			ZTA	
Ponto	1	2	3	4	5	6	7
Dureza – Amostra 1	338	328	399	436	397	346	333
Dureza – Amostra 2	350	385	485	494	503	368	352
Dureza – Amostra 3	332	367	385	425	400	370	345
Média	340	360	423	452	433	361	343
Desvio Padrão	9	29	54	37	60	13	9

**Profundidade x = 0,4 mm**

<b>Região</b>	<b>ZTA</b>		<b>Cordão de solda</b>			<b>ZTA</b>	
<b>Ponto</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>
<b>Dureza – Amostra 1</b>	<b>343</b>	<b>339</b>	<b>422</b>	<b>426</b>	<b>441</b>	<b>378</b>	<b>352</b>
<b>Dureza – Amostra 2</b>	<b>360</b>	<b>374</b>	<b>447</b>	<b>450</b>	<b>496</b>	<b>370</b>	<b>358</b>
<b>Dureza – Amostra 3</b>	<b>331</b>	<b>360</b>	<b>395</b>	<b>369</b>	<b>420</b>	<b>366</b>	<b>340</b>
<b>Média</b>	<b>345</b>	<b>358</b>	<b>421</b>	<b>415</b>	<b>452</b>	<b>371</b>	<b>350</b>
<b>Desvio</b>	<b>15</b>	<b>18</b>	<b>26</b>	<b>42</b>	<b>39</b>	<b>6</b>	<b>9</b>

**Cordão 2**

**Profundidade x = 0,2 mm**

<b>Região</b>	<b>ZTA</b>		<b>Cordão de solda</b>			<b>ZTA</b>	
<b>Ponto</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>
<b>Dureza – Amostra 1</b>	<b>367</b>	<b>354</b>	<b>458</b>	<b>369</b>	<b>371</b>	<b>380</b>	<b>356</b>
<b>Dureza – Amostra 2</b>	<b>350</b>	<b>333</b>	<b>441</b>	<b>435</b>	<b>480</b>	<b>345</b>	<b>325</b>
<b>Dureza – Amostra 3</b>	<b>342</b>	<b>400</b>	<b>425</b>	<b>452</b>	<b>396</b>	<b>397</b>	<b>386</b>
<b>Média</b>	<b>353</b>	<b>362</b>	<b>441</b>	<b>419</b>	<b>416</b>	<b>374</b>	<b>356</b>
<b>Desvio</b>	<b>13</b>	<b>34</b>	<b>17</b>	<b>44</b>	<b>57</b>	<b>27</b>	<b>31</b>

**Profundidade x = 0,4 mm**

<b>Região</b>	<b>ZTA</b>		<b>Cordão de solda</b>			<b>ZTA</b>	
<b>Ponto</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>
<b>Dureza – Amostra 1</b>	<b>400</b>	<b>391</b>	<b>455</b>	<b>516</b>	<b>571</b>	<b>399</b>	<b>396</b>
<b>Dureza – Amostra 2</b>	<b>338</b>	<b>388</b>	<b>416</b>	<b>416</b>	<b>455</b>	<b>364</b>	<b>346</b>
<b>Dureza – Amostra 3</b>	<b>353</b>	<b>395</b>	<b>447</b>	<b>439</b>	<b>413</b>	<b>419</b>	<b>371</b>
<b>Média</b>	<b>364</b>	<b>391</b>	<b>439</b>	<b>457</b>	<b>480</b>	<b>394</b>	<b>371</b>
<b>Desvio</b>	<b>32</b>	<b>4</b>	<b>21</b>	<b>52</b>	<b>82</b>	<b>28</b>	<b>25</b>

### **Cordão 3**

**Profundidade x = 0,4 mm**

<b>Região</b>	<b>ZTA</b>		<b>Cordão de solda</b>			<b>ZTA</b>	
<b>Ponto</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>
<b>Dureza – Amostra 1</b>	416	405	490	549	518	465	397
<b>Dureza – Amostra 2</b>	336	369	433	405	422	372	350
<b>Dureza – Amostra 3</b>	388	405	478	480	445	385	374
<b>Média</b>	<b>380</b>	<b>393</b>	<b>467</b>	<b>478</b>	<b>462</b>	<b>407</b>	<b>374</b>
<b>Desvio</b>	<b>41</b>	<b>21</b>	<b>30</b>	<b>72</b>	<b>50</b>	<b>50</b>	<b>24</b>

### **Cordão 4**

**Profundidade x = 0,2 mm**

<b>Região</b>	<b>ZTA</b>		<b>Cordão de solda</b>			<b>ZTA</b>	
<b>Ponto</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>
<b>Dureza – Amostra 1</b>	360	339	457	468	483	374	345
<b>Dureza – Amostra 2</b>	348	343	465	483	483	393	374
<b>Dureza – Amostra 3</b>	381	383	432	461	476	430	423
<b>Média</b>	<b>363</b>	<b>355</b>	<b>451</b>	<b>471</b>	<b>481</b>	<b>399</b>	<b>381</b>
<b>Desvio</b>	<b>17</b>	<b>24</b>	<b>17</b>	<b>11</b>	<b>4</b>	<b>28</b>	<b>39</b>

### **Cordão 5**

**Profundidade x = 0,4 mm**

<b>Região</b>	<b>ZTA</b>		<b>Cordão de solda</b>			<b>ZTA</b>	
<b>Ponto</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>
<b>Dureza – Amostra 1</b>	343	359	442	458	418	362	354
<b>Dureza – Amostra 2</b>	351	298	429	430	445	385	364
<b>Dureza – Amostra 3</b>	359	382	423	453	452	391	359
<b>Média</b>	<b>351</b>	<b>346</b>	<b>431</b>	<b>447</b>	<b>438</b>	<b>379</b>	<b>359</b>
<b>Desvio</b>	<b>8</b>	<b>43</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>18</b>	<b>15</b>	<b>5</b>

### **Cordão 6**

**Profundidade x = 0,2 mm**

<b>Região</b>	<b>ZTA</b>		<b>Cordão de solda</b>			<b>ZTA</b>	
<b>Ponto</b>	1	2	3	4	5	6	7
<b>Dureza – Amostra 1</b>	339	348	430	408	423	372	343
<b>Dureza – Amostra 2</b>	415	453	492	490	483	470	442
<b>Dureza – Amostra 3</b>	390	399	461	480	449	418	390
<b>Média</b>	<b>381</b>	<b>400</b>	<b>461</b>	<b>459</b>	<b>452</b>	<b>420</b>	<b>392</b>
<b>Desvio</b>	<b>39</b>	<b>53</b>	<b>31</b>	<b>45</b>	<b>30</b>	<b>49</b>	<b>50</b>

**Profundidade x = 0,4 mm**

<b>Região</b>	<b>ZTA</b>		<b>Cordão de solda</b>			<b>ZTA</b>	
<b>Ponto</b>	1	2	3	4	5	6	7
<b>Dureza – Amostra 1</b>	328	348	408	397	404	358	339
<b>Dureza – Amostra 2</b>	363	368	418	425	439	390	380
<b>Dureza – Amostra 3</b>	385	423	475	494	494	413	403
<b>Média</b>	<b>359</b>	<b>380</b>	<b>434</b>	<b>439</b>	<b>446</b>	<b>387</b>	<b>374</b>
<b>Desvio</b>	<b>29</b>	<b>39</b>	<b>36</b>	<b>50</b>	<b>45</b>	<b>28</b>	<b>32</b>

### **Cordão 7**

**Profundidade x = 0,2 mm**

<b>Região</b>	<b>ZTA</b>		<b>Cordão de solda</b>			<b>ZTA</b>	
<b>Ponto</b>	1	2	3	4	5	6	7
<b>Dureza – Amostra 1</b>	366	390	450	458	444	385	361
<b>Dureza – Amostra 2</b>	383	396	507	507	475	387	353
<b>Dureza – Amostra 3</b>	360	390	475	499	490	385	355
<b>Média</b>	<b>370</b>	<b>392</b>	<b>477</b>	<b>488</b>	<b>470</b>	<b>386</b>	<b>356</b>
<b>Desvio</b>	<b>12</b>	<b>3</b>	<b>29</b>	<b>26</b>	<b>23</b>	<b>1</b>	<b>4</b>

### **Cordão 8**

**Profundidade x = 0,2 mm**

<b>Região</b>	<b>ZTA</b>		<b>Cordão de solda</b>			<b>ZTA</b>	
<b>Ponto</b>	1	2	3	4	5	6	7
<b>Dureza – Amostra 1</b>	359	381	438	483	453	372	355
<b>Dureza – Amostra 2</b>	349	370	392	450	435	400	377
<b>Dureza – Amostra 3</b>	380	388	465	425	445	380	367
<b>Média</b>	<b>363</b>	<b>380</b>	<b>432</b>	<b>453</b>	<b>444</b>	<b>384</b>	<b>366</b>
<b>Desvio</b>	<b>16</b>	<b>9</b>	<b>37</b>	<b>29</b>	<b>9</b>	<b>14</b>	<b>11</b>

**Profundidade x = 0,4 mm**

<b>Região</b>	<b>ZTA</b>		<b>Cordão de solda</b>			<b>ZTA</b>	
<b>Ponto</b>	1	2	3	4	5	6	7
<b>Dureza – Amostra 1</b>	369	404	435	442	428	407	361
<b>Dureza – Amostra 2</b>	332	369	494	460	476	374	351
<b>Dureza – Amostra 3</b>	375	400	433	453	435	354	346
<b>Média</b>	<b>359</b>	<b>391</b>	<b>454</b>	<b>452</b>	<b>446</b>	<b>378</b>	<b>353</b>
<b>Desvio</b>	<b>23</b>	<b>19</b>	<b>35</b>	<b>9</b>	<b>26</b>	<b>27</b>	<b>8</b>

### **Cordão 9**

**Profundidade x = 0,2 mm**

<b>Região</b>	<b>ZTA</b>		<b>Cordão de solda</b>			<b>ZTA</b>	
<b>Ponto</b>	1	2	3	4	5	6	7
<b>Dureza – Amostra 1</b>	380	403	430	490	450	422	383
<b>Dureza – Amostra 2</b>	351	356	439	422	433	388	387
<b>Dureza – Amostra 3</b>	377	381	404	447	418	388	385
<b>Média</b>	<b>369</b>	<b>380</b>	<b>424</b>	<b>453</b>	<b>434</b>	<b>399</b>	<b>385</b>
<b>Desvio</b>	<b>16</b>	<b>24</b>	<b>18</b>	<b>34</b>	<b>16</b>	<b>20</b>	<b>2</b>

**Profundidade x = 0,4 mm**

<b>Região</b>	<b>ZTA</b>		<b>Cordão de solda</b>			<b>ZTA</b>	
<b>Ponto</b>	1	2	3	4	5	6	7
<b>Dureza – Amostra 1</b>	368	404	435	449	455	401	401
<b>Dureza – Amostra 2</b>	351	356	439	422	433	388	387
<b>Dureza – Amostra 3</b>	411	421	433	377	428	391	367
<b>Média</b>	<b>377</b>	<b>394</b>	<b>436</b>	<b>416</b>	<b>439</b>	<b>393</b>	<b>385</b>
<b>Desvio</b>	<b>31</b>	<b>34</b>	<b>3</b>	<b>36</b>	<b>14</b>	<b>7</b>	<b>17</b>

**Cordão 10**

**Profundidade x = 0,2 mm**

<b>Região</b>	<b>ZTA</b>		<b>Cordão de solda</b>			<b>ZTA</b>	
<b>Ponto</b>	1	2	3	4	5	6	7
<b>Dureza – Amostra 1</b>	372	405	487	503	478	386	387
<b>Dureza – Amostra 2</b>	393	407	458	432	435	366	336
<b>Dureza – Amostra 3</b>	370	413	392	387	385	388	378
<b>Média</b>	<b>378</b>	<b>408</b>	<b>446</b>	<b>441</b>	<b>433</b>	<b>380</b>	<b>367</b>
<b>Desvio</b>	<b>13</b>	<b>4</b>	<b>49</b>	<b>58</b>	<b>47</b>	<b>12</b>	<b>27</b>

**Profundidade x = 0,4 mm**

<b>Região</b>	<b>ZTA</b>		<b>Cordão de solda</b>			<b>ZTA</b>	
<b>Ponto</b>	1	2	3	4	5	6	7
<b>Dureza – Amostra 1</b>	377	378	548	489	483	367	359
<b>Dureza – Amostra 2</b>	355	375	478	441	460	355	355
<b>Dureza – Amostra 3</b>	395	413	436	413	420	401	377
<b>Média</b>	<b>376</b>	<b>389</b>	<b>487</b>	<b>448</b>	<b>454</b>	<b>374</b>	<b>364</b>
<b>Desvio</b>	<b>20</b>	<b>21</b>	<b>57</b>	<b>38</b>	<b>32</b>	<b>24</b>	<b>12</b>

**Cordão 11****Profundidade x = 0,2 mm**

<b>Região</b>	<b>ZTA</b>		<b>Cordão de solda</b>			<b>ZTA</b>	
<b>Ponto</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>
<b>Dureza – Amostra 1</b>	<b>375</b>	<b>121</b>	<b>430</b>	<b>416</b>	<b>478</b>	<b>415</b>	<b>399</b>
<b>Dureza – Amostra 2</b>	<b>358</b>	<b>366</b>	<b>423</b>	<b>441</b>	<b>428</b>	<b>364</b>	<b>313</b>
<b>Dureza – Amostra 3</b>	<b>325</b>	<b>339</b>	<b>346</b>	<b>346</b>	<b>351</b>	<b>332</b>	<b>312</b>
<b>Média</b>	<b>353</b>	<b>275</b>	<b>400</b>	<b>401</b>	<b>419</b>	<b>370</b>	<b>341</b>
<b>Desvio</b>	<b>25</b>	<b>134</b>	<b>47</b>	<b>49</b>	<b>64</b>	<b>42</b>	<b>50</b>

**Profundidade x = 0,4 mm**

<b>Região</b>	<b>ZTA</b>		<b>Cordão de solda</b>			<b>ZTA</b>	
<b>Ponto</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>
<b>Dureza – Amostra 1</b>	<b>351</b>	<b>395</b>	<b>494</b>	<b>501</b>	<b>522</b>	<b>392</b>	<b>376</b>
<b>Dureza – Amostra 2</b>	<b>315</b>	<b>353</b>	<b>450</b>	<b>444</b>	<b>433</b>	<b>396</b>	<b>368</b>
<b>Dureza – Amostra 3</b>	<b>313</b>	<b>349</b>	<b>359</b>	<b>364</b>	<b>335</b>	<b>336</b>	<b>336</b>
<b>Média</b>	<b>326</b>	<b>366</b>	<b>434</b>	<b>436</b>	<b>430</b>	<b>375</b>	<b>360</b>
<b>Desvio</b>	<b>21</b>	<b>25</b>	<b>69</b>	<b>69</b>	<b>94</b>	<b>34</b>	<b>21</b>

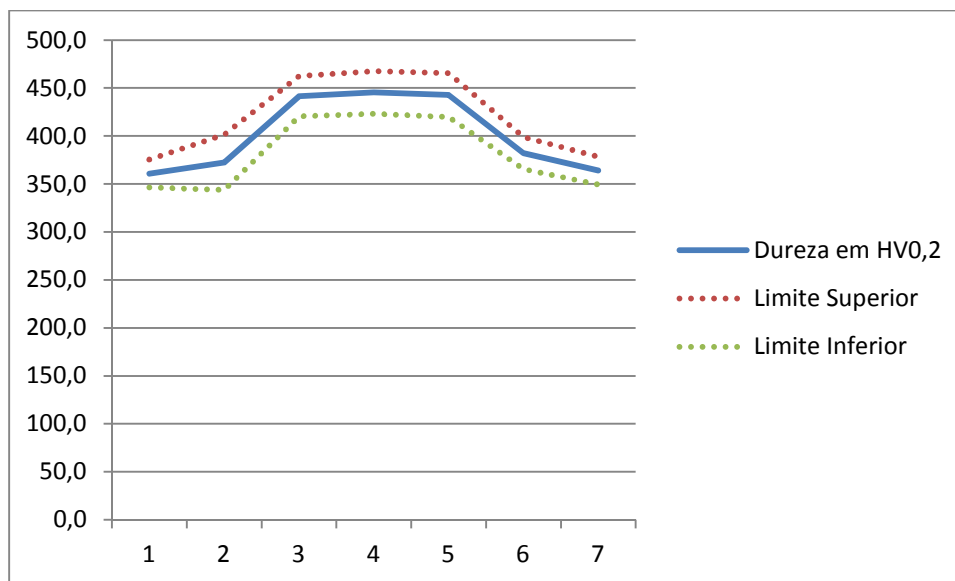
**Cordão 12****Profundidade x = 0,2 mm**

<b>Região</b>	<b>ZTA</b>		<b>Cordão de solda</b>			<b>ZTA</b>	
<b>Ponto</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>
<b>Dureza – Amostra 1</b>	<b>383</b>	<b>400</b>	<b>451</b>	<b>514</b>	<b>392</b>	<b>408</b>	<b>377</b>
<b>Dureza – Amostra 2</b>	<b>375</b>	<b>395</b>	<b>428</b>	<b>432</b>	<b>433</b>	<b>335</b>	<b>362</b>
<b>Dureza – Amostra 3</b>	<b>315</b>	<b>329</b>	<b>376</b>	<b>320</b>	<b>316</b>	<b>315</b>	<b>322</b>
<b>Média</b>	<b>358</b>	<b>375</b>	<b>418</b>	<b>422</b>	<b>380</b>	<b>353</b>	<b>354</b>
<b>Desvio</b>	<b>37</b>	<b>40</b>	<b>38</b>	<b>97</b>	<b>59</b>	<b>49</b>	<b>28</b>



**Profundidade x = 0,4 mm**

Região	ZTA		Cordão de solda			ZTA	
Ponto	1	2	3	4	5	6	7
Dureza – Amostra 1	375	376	575	584	528	407	391
Dureza – Amostra 2	381	368	468	470	483	352	356
Dureza – Amostra 3	297	324	319	322	325	317	293
Média	351	356	454	459	445	359	347
Desvio	47	28	129	131	107	45	50

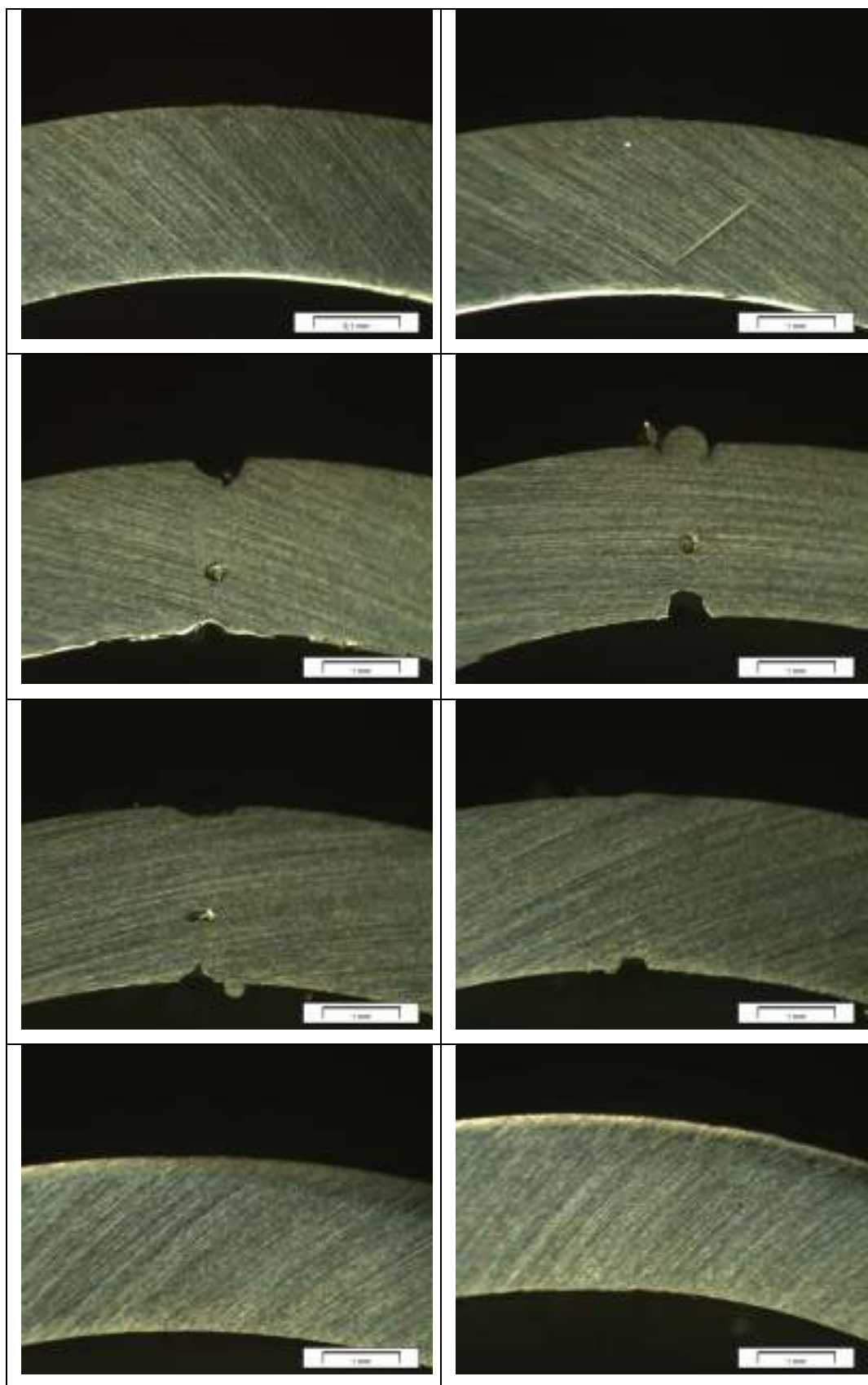


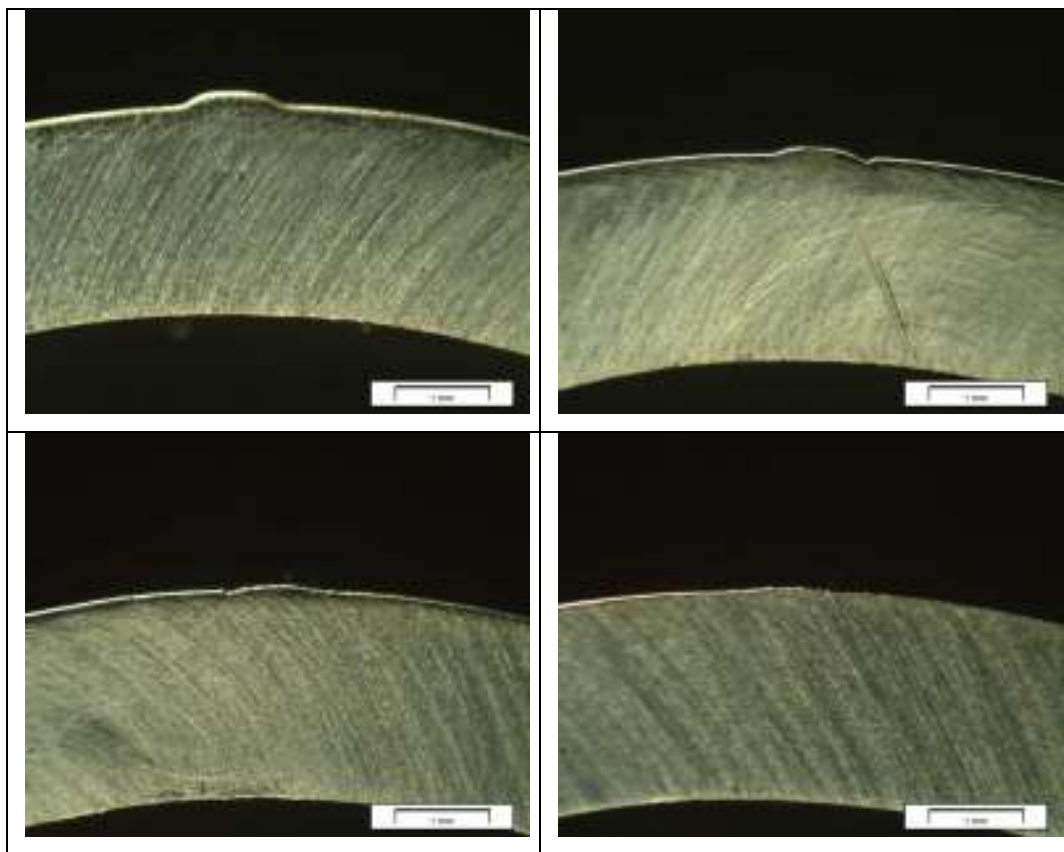
**Figura 17** - Média dos valores de microdureza. Fonte: Autor

Com os resultados de microdureza pode-se observar um aumento de 30% na dureza na região de fusão do cordão de solda em relação ao metal base (Gráfico 1). Não houve aumento de dureza significativo na região afetada pelo calor (ZTA).

#### 4.4 Ensaio de Corrosão

O ensaio de corrosão foi realizado em uma amostra com superfície preparada, passivada e imersa em um reagente com 100g de  $\text{FeCl}_3$  dissolvidos em 900 ml de água destilada. Após o tempo de imersão de 48 horas a superfície da amostra foi analisada (figura 17) para verificar a ocorrência de corrosão por pitting.





**Figura 18** - Superfícies da amostra após o ensaio de corrosão. Fonte: Autor

As macrografias pós ataque foram comparadas com imagens obtidas das mesmas regiões antes do ataque químico para evitar erros de interpretação.

## **5. Conclusão**

Após as análises, conclui-se que é possível obter cordões com alta penetração ou mesmo penetração total neste aço utilizando parâmetros adequados, como os de número 3, 4, 5, 6 e 8 da tabela 4.

As microestruturas em todos os parâmetros apresentaram-se iguais, possuindo indicações de que há grande fração volumétrica de ferrita.

A microdureza na região de fusão tornou-se em média 30% maior do que no metal de base. Esse aumento de dureza pode ter origem na microestrutura ferrítica possivelmente formada (já que a ferrita é quem fornece resistência mecânica nos aços duplex) e nas tensões criadas durante a solidificação e mudança de fases durante o processo de soldagem.

A resistência à corrosão manteve-se em conformidade com o esperado para o aço, sendo que a ausência de pittings na avaliação das superfícies após o ensaio de corrosão mostra que apesar do cordão de solda não possuir uma microestrutura favorável, ele foi capaz de produzir uma camada de passivação aderente e resistente a meios contendo íons cloretos.

Para ter a certeza das fases formadas estão sendo realizadas análises da microestrutura por meio de microscopia eletrônica e da composição química das fases por EDX. Estão também sendo realizadas análises de corrosão em cada cordão separadamente por meio da técnica de polarização cíclica.

## 6 Referências

- 1- De Rossi, W. , Rocha, G.A., Neves, M.D.M. Soldagem de Aço Inoxidável Super Duplex UNS S32750 com Laser Pulsado de Nd:YAG. 7º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Rio de Janeiro, abr. 2013.
- 2- Metals handbook – 9th Editon – vol. 6, Welding, Brazing and Soldering.
- 3- SENATORE, M., FINZETTO, L., PEREA, E. Estudo comparativo entre os aços inoxidáveis dúplex e os inoxidáveis AISI 304L/316L. R. Esc. Minas, Ouro Preto, 60(1): 175-181, jan. mar. 2007.
- 4- C.L. CHAN, J. MAZUMDER, AND M.M. CHAN, *METALL. TRANS. A*, VOL 15, 1982, P 2175
- 5 - Hewitt, G. F., Shires, G. L., and Bott, T. R. (1994) *Process Heat Transfer*, CRC Press, Boca Raton, FL.
- 6 – SIQUEIRA, Gabriel. Soldagem a laser autógena da liga de alumínio aeronáutico AA6013: Otimização dos parâmetros e Análise microestrutural. 2007. 105f. Dissertação de Mestrado – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.
- 7 – FABBRO, R., CHOUF, K. Keyhole modeling during laser welding. *Journal of Applied Physics*. Vol. 87. 2000.
- 8 - Metals handbook – 9th Editon – vol. 13A, Corrosion Fundamentals, Testing and Protection.
- 9 - Metals handbook – 9th Editon – vol. 3, Alloy Phase Diagrams.
- 10 - Metals handbook – 9th Editon – vol. 2, Properties and Selection Irons Steels and High Performance Alloys.

11 – Buchfink, G. The Laser as a Tool. 1 ed. Würzburg: Vogel Buchverlag, 2007, 280p.