

**FACULDADE DE TECNOLOGIA DE PINDAMONHANGABA**

**ANÁLISE MECÂNICA E MICROESTRUTURAL DE  
UMA JUNTA DE AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO  
304L, SOLDADA COM VARIAÇÃO DA PROTEÇÃO  
GASOSA – C25 / CO<sub>2</sub>**

**Diego Menezes da Silva  
João Gabriel da Silva Oliveira**

**Pindamonhangaba  
2017**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA DE PINDAMONHANGABA**

**ANÁLISE MECÂNICA E MICROESTRUTURAL DE  
UMA JUNTA DE AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO  
304L, SOLDADA COM VARIAÇÃO DA PROTEÇÃO  
GASOSA – C25 / CO<sub>2</sub>**

**Diego Menezes da Silva  
João Gabriel da Silva Oliveira**

Monografia apresentada à Faculdade de  
Tecnologia de Pindamonhangaba, para  
graduação no Curso Superior de Tecnologia em  
Processos Metalúrgicos.

Área de atuação: Metalúrgica  
Orientador: Prof. Dr. César Alves da Silva  
Leandro  
Coorientador: Prof<sup>a</sup>. Dra. Ana Beatriz Ramos  
Moreira Abrahão

**Pindamonhangaba  
2017**

S586a Silva, Diego Menezes da.  
Análise mecânica e microestrutural de uma junta de Aço Inoxidável Austenítico 304L, soldada com variação da proteção gasosa – C25 / CO2 / Diego Menezes da Silva; João Gabriel da Silva Oliveira / FATEC Pindamonhangaba, 2017.  
47f.; il.

Orientador: Professor Dr. César Alves da Silva Leandro  
Co-Orientadora: Profª Drª Ana Beatriz Ramos Moreira Abrahão  
Monografia (Graduação) – FATEC – Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba. 2017

1. Processos Metalúrgicos. 2. Aços Austeníticos. 3. Proteção Gasosa. 4. Descontinuidades. I. Silva, Diego Menezes da. II. Oliveira, João Gabriel da Silva. III. Leandro, César Alves da Silva. IV. Abrahão, Ana Beatriz Ramos Moreira. V. Título.

CDD 669

Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba

**“ANÁLISE MECÂNICA E MICROESTRUTURAL DE  
UMA JUNTA DE AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO  
304L, SOLDADA COM VARIAÇÃO DA  
PROTEÇÃO GASOSA – C25/CO<sub>2</sub>”.**

**DIEGO MENEZES DA SILVA  
JOÃO GABRIEL SILVA OLIVEIRA**

Monografia apresentada à Faculdade de  
Tecnologia de Pindamonhangaba, para  
graduação no Curso Superior de  
Tecnologia em Processos Metalúrgicos.

Comissão Examinadora

\_\_\_\_\_  
Orientador – Prof. Dr. Cesar Alves da Silva Leandro

\_\_\_\_\_  
Membro – Prof.<sup>a</sup> Dra. Ana Beatriz Ramos Moreira Abrahão

\_\_\_\_\_  
Membro – Sra. Rayana Marcela Izidoro da Silva Santos

**Pindamonhangaba, 18 de dezembro de 2017.**

## **DEDICÁTORIA**

Dedicamos este trabalho aos nossos familiares e a todos que, de alguma forma, influenciaram em nossas vidas para que chegássemos até aqui. A todos os professores e profissionais que nos auxiliaram ao longo desta jornada.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecemos primeiramente a Deus que iluminou todo o nosso caminho durante o curso.

Agradeço aos meus pais que me mostraram que somente através do conhecimento e dedicação é que conquistamos nossos objetivos. *(João Gabriel)*

Agradeço a minha esposa Bruna e minha filha Maria Eduarda, por todo apoio e compreensão nos momentos em que me fiz ausente durante as pesquisas. *(Diego M. Silva)*

Gratos aos nossos familiares que sempre nos apoiaram, acreditando que poderíamos concluir mais essa conquista na vida.

Aos colegas, professores e amigos que trouxeram sugestões, explicações e melhorias sugeridas ao trabalho.

Não há transição que não implique um ponto de partida, um processo e um ponto de chegada. Todo amanhã se cria num ontem, através de um hoje. De modo que o nosso futuro se baseia no passado e se corporifica no presente. Temos de saber o que fomos e o que somos, para sabermos o que seremos.

Paulo Freire

OLIVEIRA, J. G. S. SILVA, D. M. Análise mecânica e microestrutural de uma junta de Aço Inoxidável Austenítico 304L, soldada com variação da proteção gasosa – C25 / CO<sub>2</sub>. Pindamonhangaba, 2017. Monografia (Tecnologia em Processos Metalúrgicos). Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba.

## RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo fazer uma análise mecânica e microestrutural de juntas de aço inoxidável austenítico soldadas pelo processo FCAW com variação do gás de proteção. Hoje em dia existem várias possibilidades de combinações de proteção gasosas diferentes para processos de soldagem. O processo FCAW utiliza proteção gasosa, e algumas das mais comumente utilizadas nas indústrias são o C25 (mistura binária de gases composta de 25% de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e 75% de Argônio (Ar)) e o CO<sub>2</sub> (Dióxido de carbono puro). A pesquisa converge na hipótese de uma modificação da estrutura obtida do metal depositado e um possível aumento de carbonetos e ou nitretos de cromo nas margens da solda (ZAC – Zona Afetada pelo Calor), fases mais duras em comparação com a estrutura habitual do material, que poderá ocorrer quando soldada com o gás mais reativo. Também foi avaliada a formação de descontinuidades como inclusões de escórias, porosidade, características como diluição, dureza, geometria de filetes e características mecânicas. Para comparações da utilização dos diferentes gases foram executados ensaios destrutivos e não destrutivos, qualitativos, quantitativos e microscopia óptica a fim de analisar as possíveis transformações ocorridas.

**Palavras-chave:** Processos Metalúrgicos, Aços Austeníticos, Descontinuidades, Proteção Gasosa.

OLIVEIRA, J. G. S. SILVA, D. M. *Mechanical and microstructural analysis of a 304L Austenitic Stainless Steel gasket welded with varying gas protection - C25 / CO<sub>2</sub>. Pindamonhangaba, 2017. Monography (Technology in Metallurgical Processes). Faculty of Technology of Pindamonhangaba.*

### **ABSTRACT**

*This work has the objective to microstructural characterization of austenitic stainless steel welded joints by FCAW process with variation of the shielding gas. Nowadays there are several different possible combinations protective gas for welding processes. The FCAW process uses shielding gas, and some of the most commonly used in industry are C25 (binary gas mixture composed of 25% carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) and 75% Argon (Air) and CO<sub>2</sub> (carbon dioxide pure). The research converges in the event of a modification obtained from the deposited metal structure and a possible increase of carbides and or chromium nitrides in the weld margins (HAZ - heat affected zone), the toughest stages compared to the usual structure of the material, that may occur when welded with the most reactive gas. Also evaluated was the formation of discontinuities such as slag inclusions, porosity characteristics such as dilution, hardness, geometry threads, and mechanical characteristics. For comparisons of the use of different gases were executed destructive testing and non-destructive, qualitative, quantitative and optical microscopy to analyze the possible changes that have occurred.*

**Keywords:** *Austenitic steels, discontinuities, gas protection.*

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Croqui esquemático do cordão de solda sobre uma chapa .....	16
<b>Figura 2</b> – Variações de temperatura durante a soldagem.....	17
<b>Figura 3</b> - Migração do cromo para os contornos de grãos .....	17
<b>Figura 4</b> - Ilustração de deposição de material pelo processo FCAW, com gás de proteção..	20
<b>Figura 5</b> - Corpos de prova soldados com gás C-25 e com gás CO <sub>2</sub> .....	26
<b>Figura 6</b> - Corpos de prova soldados com áreas de interesse cortadas para ensaios .....	26
<b>Figura 7</b> - Máquina de ensaio dobramento, computador e sistema de dobramento guiado ....	27
<b>Figura 8</b> - Corpos de prova ensaiados .....	28
<b>Figura 9</b> - Macrografia com áreas de estudo, soldagem com gás C-25 e com gás CO <sub>2</sub> . Microscópio estéreo 6,7x.....	29
<b>Figura 10</b> - Metal base x margem da solda no Microscópio Óptico 50X.....	29
<b>Figura 11</b> - Metal base x margem da solda no Microscópio Óptico 100X.....	30
<b>Figura 12</b> - ZAC x metal depositado no Microscópio Óptico 200X .....	30
<b>Figura 13</b> - ZAC x metal depositado no Microscópio Óptico 500X .....	30
<b>Figura 14</b> - ZAC, linha de fusão e metal depositado no Microscópio Óptico 1000X.....	31
<b>Figura 15</b> - Metal depositado, centro da solda no Microscópio Óptico 50X .....	31
<b>Figura 16</b> - Metal depositado, centro da solda no Microscópio Óptico 200X .....	31
<b>Figura 17</b> - Metal depositado, centro da solda no Microscópio Óptico 500X .....	32
<b>Figura 18</b> - Metal depositado, centro da solda no Microscópio Óptico 1000X .....	32
<b>Figura 19</b> - Corpos de prova, detalhe da área soldada depois do ensaio de dobramento .....	33
<b>Figura 20</b> - Esquema de sequência, medição e fórmula para cálculo de alongamento .....	33
<b>Figura 21</b> - Croqui de diluição de filete de solda .....	34
<b>Figura 22</b> - Macrografias dos filetes de solda com marcações de cotas para cálculo de diluição. Microscópio estéreo 6,7X.....	35
<b>Figura 23</b> - Croqui e exemplo para cálculos de áreas em juntas soldadas .....	35
<b>Figura 24</b> - Macrografia das juntas soldadas com marcações dos pontos de coleta da dureza. .....	36
<b>Figura 25</b> - Metal base x ZAC x metal depositado, solda executada com o gás C-25. Microscópio Óptico 200X .....	38
<b>Figura 26</b> - Metal base x ZAC x metal depositado, solda executada com o gás C-25. Microscópio Óptico 500X .....	38

<b>Figura 27</b> - Metal depositado, linha de fusão e ZAC, solda executada com o gás CO <sub>2</sub> . Microscópio Óptico 200X .....	38
<b>Figura 28</b> - Metal depositado, linha de fusão e ZAC, solda executada com o gás CO <sub>2</sub> . Microscópio Óptico 500X .....	39
<b>Figura 29</b> - Metal depositado, centro da solda. Microscópio Óptico 200X .....	39
<b>Figura 30</b> - Metal depositado, centro da solda. Microscópio Óptico 500X .....	40
<b>Figura 31</b> - Metal depositado, centro da solda executada com gás C-25. Microscópio Óptico 1000X .....	40
<b>Figura 32</b> - Metal depositado, centro da solda executada com gás CO <sub>2</sub> . Microscópio Óptico 1000X .....	40

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Classificação de gases de proteção.....	22
<b>Tabela 2</b> - Classificação dos Gases.....	22
<b>Tabela 3</b> - Composição química de materiais.....	25
<b>Tabela 4</b> - Classificação de gases de proteção.....	33
<b>Tabela 5</b> - Dimensões das faces das juntas.....	36
<b>Tabela 7</b> - Valores dos pontos de dureza.....	37

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	12
1. 1 Objetivos.....	13
1. 2 Justificativa.....	13
1. 3 Metodologia.....	13
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	14
2. 1 Aços Inoxidáveis .....	14
2. 1. 1 Aços Inoxidáveis Austeníticos .....	15
2. 2 Soldagem .....	18
2. 2. 1 Processos de Soldagem.....	18
2. 2. 2 Processo de soldagem FCAW .....	19
2. 3 Gases de proteção .....	21
2. 3. 1 Dióxido de Carbono e Argônio (Gás C-25) .....	23
2. 3. 2 Dióxido de Carbono puro (Gás CO <sub>2</sub> ) .....	23
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	24
3. 1 Materiais .....	24
3. 2 Métodos .....	25
3. 2. 1 Ensaio destrutivo (Dobramento).....	26
3. 2. 2 Ataque químico .....	28
3. 2. 3 Macrografia e Micrografia.....	299
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	32
4. 1 Análise mecânica.....	32
4. 2 Análise Macroestrutural (Diluição).....	34
4. 3 Microdureza Vickers HV .....	36
4. 4 Análise microestrutura.....	37
<b>5 CONCLUSÃO</b> .....	41
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	43
<b>ANEXO 1 - Aplicação dos aços inoxidáveis em diferentes meios corrosivos</b> .....	45
<b>ANEXO 2 – Cálculo de Diluição</b> .....	47

## 1 INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis são amplamente utilizados em vários setores das indústrias, para fabricação de grandes máquinas, equipamentos, tanques, vasos de pressão ou até mesmo ferramentas, eletrodomésticos e utensílios de cutelaria. São ligas multifuncionais, geralmente utilizadas em locais onde requer grande resistência à corrosão, resistência mecânica e ductilidade.

Porém, quando expostos a elevadas temperaturas, seja na fabricação de diversos produtos e equipamentos, ou em sua operação no campo, depois de fabricados, algumas ligas (a grande maioria) fica susceptível a sensitização (deficiência de cromo na região vizinha ao contorno de grão), o que o leva a perda de parte de suas características antioxidantes, tornando-os vulneráveis a alguns tipos de corrosão.

Possuem boa soldabilidade, apesar de algumas ligas terem elementos que dificultam alguns processos de soldagem. Na fabricação de diversos equipamentos que utilizam como base os aços inoxidáveis a etapa de soldagem é de suma importância, pois os processos de soldagem precisam de calor para serem executados. Este calor, em muitos casos, deriva do aporte de energia elétrica, que pode gerar pontos muito forte *heath in put* durante a soldagem, fazendo com que a temperatura chegue a picos altíssimos e se resfrie rapidamente.

O processo com que a soldagem será executada, também contribui com a variação da temperatura durante a soldagem, pois há uma gama de processos disponíveis hoje no mercado, que possibilitam maiores velocidades de soldagem e alta produção, o que envolve diretamente o aporte de calor aplicado na peça ou metal base a ser soldado.

Outro fator que contribui fortemente para o aumento e manutenção da temperatura durante a soldagem são os gases de proteção. Alguns processos dependem deles para a formação de uma atmosfera que protege a poça de fusão da atmosfera ambiente, evitando a contaminação por gases como Hidrogênio e Nitrogênio, por exemplo, e ajudam na ionização e manutenção do arco elétrico necessário para realização da soldagem.

Com todas as possibilidades de contribuições de aporte de calor durante a soldagem, para este estudo o parâmetro de temperatura foi muito bem monitorado fazendo com que a temperatura ficasse dentro da faixa recomendada para o tipo de liga utilizada. Com tudo, o destaque desta pesquisa é sobre os gases de proteção, com foco principalmente em dois gases ativos (C<sub>2</sub>5 e CO<sub>2</sub>) como veremos mais adiante.

## **1. 1 Objetivos**

A pesquisa tem por objetivo investigar por meio de testes e ensaios quais influências a mudança dos gases de proteção (C25 e CO<sub>2</sub>) utilizados no processo soldagem FCAW, causam ao material depositado e suas áreas adjacentes. Através do estudo do comportamento mecânico e microestrutural das juntas soldadas, buscar por mais informações e melhor entendimento da importância e das modificações que podem ocorrer devido as diferentes características de cada gás.

## **1. 2 Justificativa**

A pesquisa justifica-se pelo fato de não ter sido encontrado nenhum tema de estudo com tais especificações, e pelo grande valor de informações que podem contribuir para a literatura já existente, bem como mostrar se é viável a utilização de gás CO<sub>2</sub> puro na soldagem de aços austeníticos, visto que é um gás mais barato e aumenta velocidade de soldagem.

## **1. 3 Metodologia**

O método de pesquisa foi a experimental, observando os fenômenos referentes a mudança dos gases através da execução de soldagem de dois corpos de prova, sendo cada junta produzida com a utilização de um dos gases, e após a soldagem a retirada de amostras para exames em laboratório como macrografia, micrografia e ensaios mecânicos, contando também com pesquisa nas literaturas disponíveis em livros, artigos, internet e etc.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Aços Inoxidáveis

São considerados aços inoxidáveis, de forma genérica, ligas de aços de composição básica de ferro-carbono-cromo (Fe-C-Cr) ou ferro-carbono-cromo-níquel (Fe-C-Cr-Ni), que possuam teor de Cromo maior que 10% em sua composição total, e não se oxidam mesmo em exposição prolongada à atmosfera normal. Porém com a necessidade de desenvolvimento de novas ligas e a adição de elementos químicos específicos, buscando aprimorar ou desenvolver melhores características e desempenho a certas condições, hoje em dia também estão sendo bem desenvolvidos e utilizados os aços inoxidáveis duplex, super duplex e aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação.

Segundo Moreira (2008), em virtude da multiplicidade de composições químicas e das características microestruturais que estas lhes conferem após o resfriamento, os aços inoxidáveis foram divididos nas seguintes categorias:

- Aços inoxidáveis martensíticos;
- Aços inoxidáveis austeníticos;
- Aços inoxidáveis ferríticos;
- Aços inoxidáveis duplex;
- Aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação.

Os principais tipos de aços inoxidáveis austeníticos são:

- Resistentes à corrosão;
- Resistentes ao calor;
- Resistentes ao desgaste;
- Criogênicos.

De acordo com Jesus (2012), os tipos convencionais de aço inox, mais antigos, costumam ser classificados em três grandes grupos de acordo com sua estrutura metalúrgica predominante em temperatura ambiente. Nestas condições, subdividem-se basicamente em austeníticos, ferríticos e martensíticos. O Anexo 1 apresenta uma referência sobre as aplicações dos aços inoxidáveis em diferentes meios corrosivos (METAL HANDBOOK, 1980).

## 2. 1. 1 Aços Inoxidáveis Austeníticos

Os aços inoxidáveis austeníticos são ligas não-magnéticas de ferro-cromo-níquel contendo tipicamente 18% de cromo e 8% de níquel em média, com baixo teor de carbono. São mais utilizados e produzidos entre a gama de aços considerados inoxidáveis, chegando a cerca de 65% a 70% do total produzido. As principais características dos aços inoxidáveis austeníticos envolvem:

- São ligas do sistema ternário Fe-Cr-Ni;
- Entre os aços inoxidáveis conformados, é a classe que apresenta maior resistência à corrosão e, conseqüentemente, são os mais utilizados em componentes industriais sujeitos à corrosão;
- Apresentam microestrutura austenítica (CFC) na temperatura ambiente;
- Não são ferromagnéticos;
- Não são endurecíveis por têmpera;
- Apresentam aumento de dureza quando encruados e são os mais propensos a sofrer corrosão intergranular.

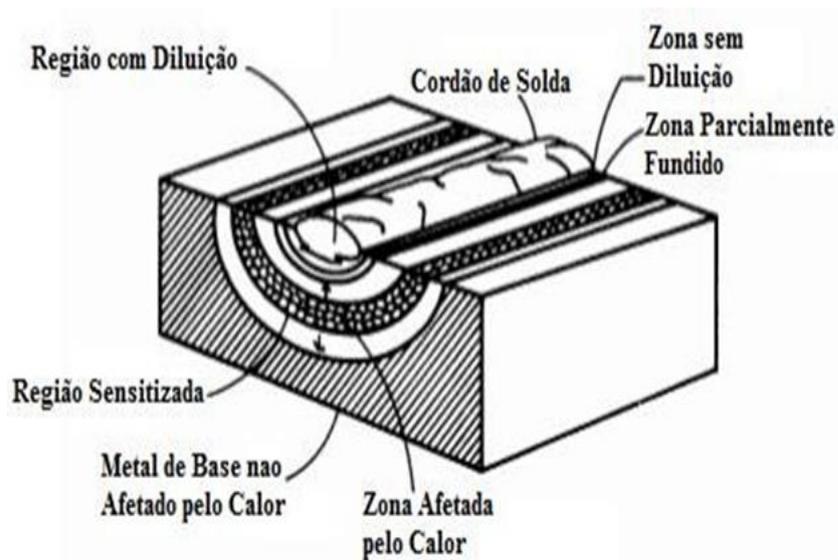
De acordo com Moreira (2008), essa classe de aços inoxidáveis possui as seguintes propriedades:

- Tenacidade e ductilidade superiores à da maioria dos aços, devido a presença de uma estrutura CFC (Cúbica de Faces Centradas) o aço inox austenítico não se fragiliza e sempre apresenta comportamento dúctil, qualquer que seja a temperatura de serviço, estado de tensões ou taxa de carregamento. Estas propriedades são mantidas até em temperaturas muito baixas, viabilizando sua utilização em sistemas de criogenia;
- Boa resistência mecânica e à corrosão a temperaturas elevadas, o que permite a sua utilização em temperaturas consideravelmente superiores à temperatura máxima de serviço de aços baixa liga ou de aços inoxidáveis martensíticos e ferríticos;
- Elevada capacidade de endurecimento por deformação plástica com baixa perda de ductilidade. A medida que o aço inox austenítico sofre deformação ocorre o encruamento da estrutura austenítica e o material vai aumentando sua resistência e dureza. Adicionalmente, os baixos valores de limite de escoamento, próximo de 40%, fazem com que em serviço, quando ocorre a união entre os esforços previstos em projeto e as tensões residuais oriundas da soldagem, o material se deforme e alivie o tensionamento interno, de forma que, para a maioria

das aplicações os aços inoxidáveis austeníticos não precisam de tratamentos térmicos pós-soldagem para alívio de tensões.

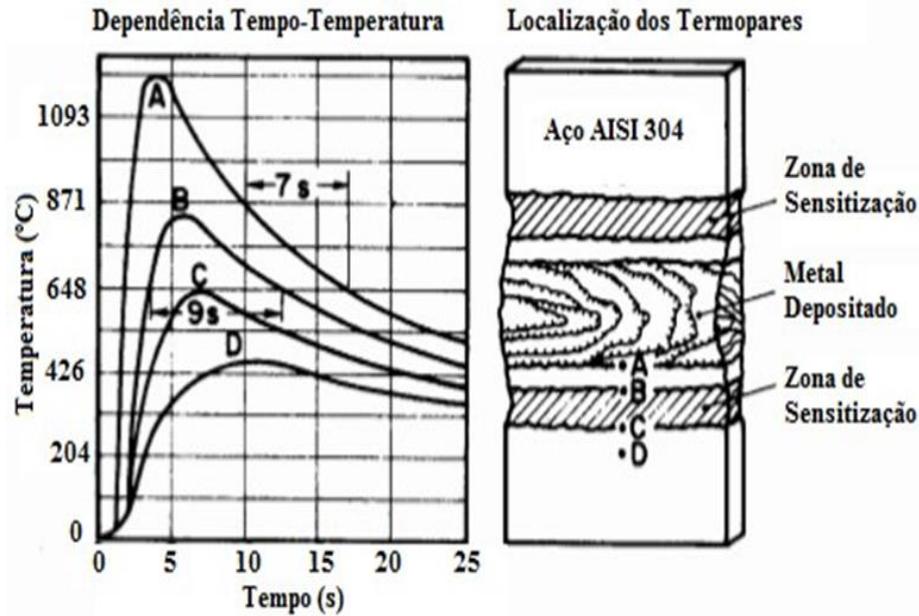
- Soldabilidade relativamente boa. A ausência de transformação martensítica durante a soldagem e sua boa tenacidade implicam em insensibilidade à fissuração por Hidrogênio;
- Não possuem propriedades magnéticas.

Os aços austeníticos possuem maior resistividade elétrica e menor condutividade térmica, devido a essas características necessitam de uma menor energia de soldagem, cerca de 20% a 30% menores do que a energia empregada para soldagem de aços carbono comum. Durante o processo de soldagem, com o aumento da temperatura e o resfriamento rápido, pode haver transformações indesejadas na microestrutura, uma delas é a precipitação de carbonetos de Cromo no contorno dos grãos, o que é chamado de sensitização. Nas Figuras 1 e 2 podemos ver esquematicamente as áreas envolvidas na soldagem e onde pode haver a sensitização.



**Figura 1** - Croqui esquemático do cordão de solda sobre uma chapa

Fonte - Moreira e Lebrão (2008)

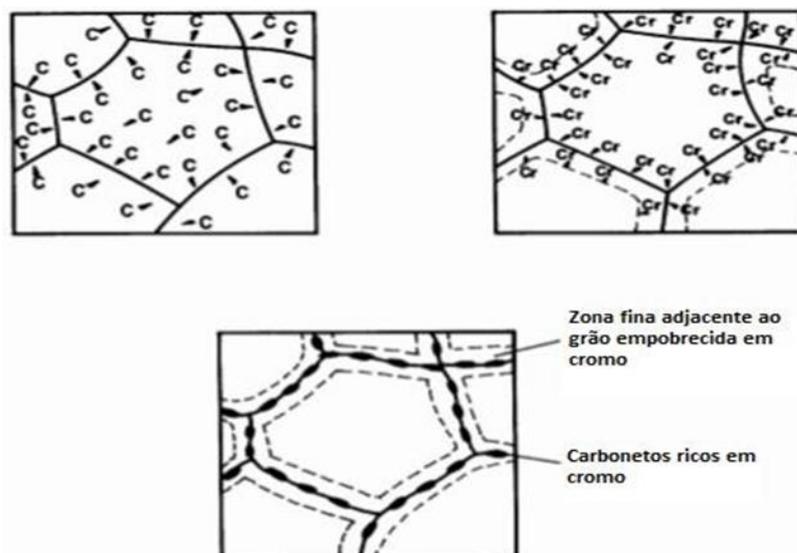


**Figura 2** – Variações de temperatura durante a soldagem

Fonte - Moreira e Lebrão (2008)

A sensitização ocorre principalmente nas áreas adjacente a soldagem, no metal base, na região conhecida como zona afetada pelo calor (ZAC).

O fenômeno da sensitização, precipitação de carbonetos e nitretos de cromo, ocorrem quando aços inoxidáveis austeníticos comuns sofrem aporte de calor numa faixa de temperatura de 425°C a 870°C, o que faz com que os grãos na região próxima aos seus contornos fiquem com uma deficiência de cromo, o que pode facilitar a corrosão. Como mostra a Figura 3.



**Figura 3** - Migração do cromo para os contornos de grãos

Fonte - Moreira e Lebrão (2008)

Desse modo, recomenda-se realizar a soldagem com processos de alta intensidade e baixo aporte de calor a fim de se evitar o aquecimento de certas regiões da junta a temperaturas que possibilitem a precipitação.

## 2. 2 Soldagem

Existem na literatura algumas formas de definição de soldagem. Uma que exprime a forma mais conceitual baseada no tipo de forças responsáveis pela união dos materiais é “Processo de união de materiais baseado no estabelecimento de forças de ligação química de natureza similar às atuante no interior dos próprios materiais, na região de ligação entre os materiais que estão sendo unidos” (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2009). Porém a mais difundido entre os meios didáticos é a adotada pela AWS – *American Welding Society*, onde a soldagem é definida como sendo “Processo de união de materiais usados para obter coalescência (união) localizada de metais e não-metais, produzida por aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem utilização de pressão e/ou material de adição”.

### 2. 2. 1 Processos de Soldagem

Segundo Wainer *et al.* (1992), para obtenção da solda, produto da soldagem, é necessário que haja uma fonte de energia, e essa pode ser classificada da seguinte forma:

- Fonte mecânica: O calor é gerado por atrito ou por ondas de choque, ou por deformação plástica do material.
- Fonte Química: O calor é gerado por reações químicas exotérmicas como, por exemplo, a queima de um combustível (chama) ou reação de oxidação.
- Fonte Elétrica: O calor é gerado ou pela passagem de corrente elétrica ou com a formação de um arco elétrico. No primeiro caso, o aquecimento é realizado por efeito Joule, enquanto no segundo é através do potencial de ionização, corrente e outros parâmetros de soldagem.
- Fonte Radiante: O calor é gerado por radiação eletromagnética (laser) ou por um feixe de elétrons acelerados através de um potencial.

Conforme Marques, Modenesi e Bracarense (2009), foram desenvolvidos diversos processos, que podem ser divididos em dois grandes grupos os processos de soldagem por pressão ou deformação, que inclui os processos de soldagem por forjamento, por ultrassom, por

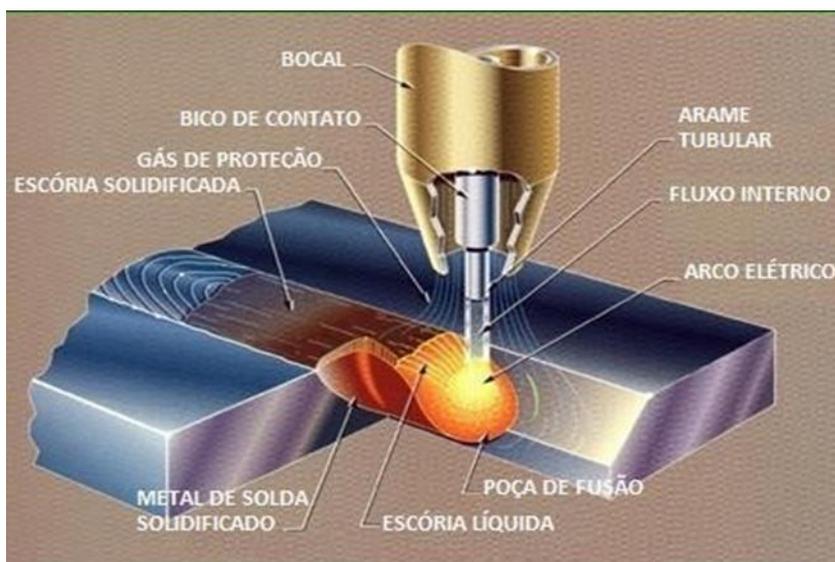
fricção, por difusão, entre outros, e os processos de soldagem por fusão, estes podendo ser divididos em subgrupos de acordo com suas características. O mais comumente usados entre os dois grandes grupos são os processos de soldagem por fusão, e dentre os subgrupos deste, os mais popularmente usados são os processos de soldagem a arco elétrico, e que podemos destacar o processo FCAW, que é um dos pilares de nossa pesquisa.

## 2. 2. 2 Processo de soldagem FCAW

De acordo com Fortes (2004), o processo de soldagem por arames tubulares com gás de proteção FCAW, hoje em dia é muito popular e utilizado na indústria, devido sua facilidade de manuseio e alta produtividade, inicialmente foi desenvolvido para a soldagem de aços carbono na década de 50. Nos anos posteriores (décadas de 60 e 70) foi observado um substancial crescimento desse processo nos Estados Unidos, o mesmo ocorrendo no Japão na década de 80.

Esse processo foi desenvolvido para combinar as melhores características da soldagem por arco submerso e a soldagem empregando o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) como gás de proteção. A combinação dos ingredientes do fluxo no núcleo do arame tubular aliada à proteção externa proporcionada pelo  $\text{CO}_2$  produz soldas de alta qualidade e um arco estável com um baixo nível de respingos. Inicialmente esses arames estavam disponíveis somente em grandes diâmetros (2,0 mm a 4,0 mm) e eram empregados nas posições plana e horizontal na soldagem de peças pesadas. Em 1972 foram desenvolvidos arames tubulares de pequeno diâmetro, constituídos de fluxo não metálico (*flux-cored wires*), para a soldagem em todas as posições, e isso aumentou sobremaneira o campo de aplicações para os arames tubulares (FORTES, 2004).

Existem basicamente duas variações desse processo, uma em que a proteção gasosa e totalmente gerada apenas pelo fluxo contido no interior do arame que são chamados de arames auto protegidos, e outro que necessita de um complemento de gás externo, o que é utilizado em nossa pesquisa. A Figura 4, mostra como funciona esquematicamente a deposição de material através do processo FCAW com a utilização de proteção gasosa.



**Figura 4** - Ilustração de deposição de material pelo processo FCAW, com gás de proteção  
Fonte - Candido (2012)

A composição dos consumíveis utilizados neste processo tende a atender as necessidades como compatibilidade química com metal base e condições de soldagem, além de outras características como, (FORTES, 2004):

O fluxo em seu interior pode conter minerais, ferros-liga e materiais que forneçam gases de proteção, desoxidantes e materiais formadores de escória. Os ingredientes do fluxo promovem estabilidade ao arco, influenciando nas propriedades mecânicas do metal de solda, bem como no perfil da solda. Muitos arames tubulares são desenvolvidos para serem usados com uma proteção externa adicional. Os gases ricos em CO<sub>2</sub> são os mais comuns. O metal de solda pode ser depositado a taxas de deposição maiores, e os cordões de solda podem ser mais largos e com melhor perfil do que os produzidos com arames sólidos, mesmo tendo como gás de proteção o CO<sub>2</sub>.

Como supracitado, segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2009), uma das principais vantagens do processo quando comparado à soldagem com outros processos manuais/semiautomáticos é a alta produtividade, que se deriva nas seguintes vantagens: alta taxa de deposição e alto fator de ocupação do soldador, grande versatilidade quanto ao tipo de material e espessuras aplicáveis, não existência de fluxos (externos) de soldagem e, fácil remoção de escórias e limpeza final e entre passes, exigência de menor habilidade do soldador. Também segundo Fortes (2004), da fabricante de consumíveis ESAB, o processo combina as melhores características do processo de soldagem SAW com a utilização do gás de proteção CO<sub>2</sub>.

## 2.3 Gases de proteção

A maioria das operações de soldagem requer uma atmosfera protetora. Os gases de proteção são utilizados para proteção do metal líquido durante o processo de soldagem para evitar que se contamine com o ar ambiente, também ajudam na estabilização do arco elétrico e transferência metálica. Os gases empregados na soldagem podem ter origem de duas formas, através da queima e fusão de elementos presentes em fluxos, internos ou externos, de revestimentos ou por um fluxo de gás adicional que provem de algum reservatório específico para soldagem.

Assim, em soldagem, os gases de proteção, segundo sua natureza e composição, têm uma influência preponderante na estabilidade do arco, no tipo de transferência de metal do eletrodo à peça, nas perdas por projeções, na geração de fumos e sobre as características geométricas e propriedades mecânicas do cordão. Além disto, o gás também tem influência nas perdas de elementos químicos, na temperatura da poça de fusão, na sensibilidade à fissuração e porosidade, na facilidade de execução da soldagem em diversas posições e no rendimento da solda, o que pode ser traduzido em custos de soldagem (MOREIRA, 2008).

Conforme Moreira (2008), para proteção durante a soldagem a arco elétrico, podem ser utilizados gases inertes ou ativos (reativos). Os gases inertes não interagem ou reagem com o metal líquido (elementos químicos) da poça de fusão, porém influenciam no tipo de transferência metálica e na estabilidade do arco elétrico, o Argônio (Ar) e o Hélio (He) são os gases inertes mais utilizados nos processos de soldagem.

Segundo Moreira (2008), os gases de proteção ativos (reativos) podem ser oxidantes ou redutores, reagem com metal líquido da poça de fusão, principalmente os oxidantes que reagem com os elementos químicos que são antioxidantes, como o Manganês (Mn) e o Silício (Si), estes elementos reagem fortemente com o oxigênio, este processo de reações químicas são exotérmicos que aumenta ainda mais a temperatura durante o processo de soldagem. Isso pode influenciar nas propriedades mecânicas e metalúrgicas do metal depositado e suas áreas adjacentes, os gases ativos mais utilizados em processos de soldagem são o Hidrogênio (H<sub>2</sub>) como redutor, o Oxigênio (O<sub>2</sub>) e o Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) com oxidantes.

A norma AWS A 5.32 se aplica aos gases de proteção utilizados nos processos de soldagem MIG/MAG, TIG, FCAW e PLASMA, conforme a American Welding Society (AWS), os gases de proteção podem ser de um único tipo de gás (puro) ou de mistura de gases, conforme a Tabela 1.

**Tabela 1 - Classificação de gases de proteção**

<b>Classificação AWS</b>	<b>Mistura Típica de Gás (%)</b>	<b>Gases de Proteção</b>
SG-AC-25	75 / 25	Argônio + CO <sub>2</sub>
SG-AO-2	98 / 2	Argônio + Oxigênio
SG-AHe-10	90 / 10	Argônio + Hélio
SG-AH-5	95 / 5	Argônio + Hidrogênio
SG-HeA-25	75 / 25	Hélio + Argônio
SG-HeAC-7.5/2.5	90 / 7.5 / 2.5	Hélio + Argônio + CO <sub>2</sub>
SG-ACO-8/2	90 / 8 / 2	Argônio + CO <sub>2</sub> + Oxigênio
SG-A-G	Especial	Argônio + Mistura
Tolerância de +/- 10% para o gás de menor valor.		
Classificação AWS A 5.32 para os Gases de Soldagem.		

Fonte - ESAB, (2007)

“Os gases de proteção adicionais para soldagem também podem ser classificados em grupos conforme o IIW (*International Institute of Welding*) de acordo com a composição e conteúdo de oxigênio no metal de solda depositado” (TESKE, 2006), como segue na tabela 2 abaixo.

**Tabela 2 - Classificação dos Gases**

GRUPO	ÍNDICE	Nº DE GASES	Gases %					TIPO	Conteúdo Típico De O <sub>2</sub> No Metal De Solda
			CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	Ar	He	H <sub>2</sub>		
I1	1	1	—	—	—	—	100	REDUTORES	—
	2	2	—	—	85 a 95	—	R*		
I2	1	1	—	—	100	—	—	INERTE	< 0,02 %
	2	1	—	—	—	100	—		
	3	2	—	—	25 a 75	R	—		
M1	1	2	—	> 0 a 2	R	—	—	POUCO OXIDANTES	< 0,025 %
	2	2	> 0 a 4		R	—	—		
	3	3	> 0 a 4	> 0 a 2	R	—	—		
M2	1	2	—	> 2 a 5	R	—	—	OXIDANTES	< 0,035 %
	2	2	>4 a 10		R	—	—		
	3	3	>0 a 10	> 2 a 5	R	—	—		
M3	1	2	—	> 5 a 12	R	—	—	MAIS OXIDANTES	< 0,045 %
	2	2	10 a 25		R	—	—		
	3	3	10 a 25	> 0 a 12	R	—	—		
M4	1	2	—	> 12	R	—	—	MAIS OXIDANTES	< 0,054 %
	2	2	>25		R	—	—		
	3	3	0 a > 26	0 a > 12	R	—	—		
C1	1	1	100	—	—	—	—	MUITO OXIDANTES	~ 0,06 a 0,07 %

Fonte – TESKE (2006)

### 2. 3. 1 Dióxido de Carbono e Argônio (Gás C-25)

Conforme muitos estudos e testes realizados por fabricantes de gases e clientes que utilizam os gases em processos de soldagem, a mistura de um gás inerte com uma porcentagem de gás ativo mostra grandes resultados, no que tange a união dos benefícios dos dois gases. Segundo a ESAB, quando adicionadas pequenas quantidades de dióxido de carbono ao argônio, este produz transferência em aerosol, assim como as pequenas adições de oxigênio puro. As adições de argônio ao dióxido de carbono diminuem os níveis de respingo normalmente experimentados com o dióxido de carbono puro. Pequenas adições de dióxido de carbono ao argônio produzem as mesmas características de transferência em aerosol que as pequenas adições de oxigênio.

Grande parte das vezes a diferença se nota em maiores correntes de transição para transferência em aerosol das misturas de argônio/dióxido de carbono. Quando acrescentado o oxigênio reduz se a corrente de transição e ela passa a ser transferência por aerosol. Com cerca de 20% de CO<sub>2</sub>, aproximadamente, a transferência metálica em aerosol torna-se instável, e transferências por curto circuito começam a surgir aleatoriamente.

A mistura C25, composta de argônio com 21% a 25% de CO<sub>2</sub>, e universalmente conhecida como gás utilizado na soldagem MAG com transferência por curto-circuito. Sua fórmula nessa composição, foi produzida com o objetivo de maximizar a frequência de curto-circuito em arames sólidos, e ao longo dos anos, com o desenvolvimento dos arames tubulares também foi adotada para este processo, assim bem como para uma gama de diâmetros diferentes. Tem como características alta produtividade, boa estabilidade de arco, melhor controle da poça de fusão, melhor aspecto visual dos filetes de solda e tem boa aplicação a materiais espessos e altas correntes.

### 2. 3. 2 Dióxido de Carbono puro (Gás CO<sub>2</sub>)

O dióxido de carbono puro é um gás inerte livre no meio ambiente, porém, quando exposto ao calor do arco elétrico se dissocia em monóxido de carbono e oxigênio livre, como mostra a seguinte equação;  $2\text{CO}_2 + (\text{calor}) = 2\text{CO} + \text{O}_2$ .

Como também afirma Fortes, (2008) da fabricante de consumíveis ESAB, neste caso, o oxigênio livre irá se combinar com elementos em transferência através do arco, formando óxidos que serão liberados na poça de fusão formando carepas ou escórias. Apesar do gás CO<sub>2</sub>

ser fortemente ativo quando aplicado à soldagem com grande efeito oxidante, soldas integras sem a presença de porosidades ou outras descontinuidades, podem ser obtidas facilmente e com grande qualidade quanto a requisitos mecânicos.

O dióxido de carbono é largamente empregado na soldagem de aços. Sua popularidade é devida a sua disponibilidade e à boa qualidade da solda, bem como pelo seu baixo custo e instalações simples. Deve ser mencionado que o baixo custo do gás não necessariamente se traduz num baixo custo por metro linear de solda, sendo fortemente dependente da aplicação. A baixa eficiência de deposição que o CO<sub>2</sub> proporciona, causada pela perda por respingos, influencia no custo final da solda.

Suas características principais são:

- Boa velocidade de soldagem;
- Alta energia de ionização;
- Alta condutividade térmica;
- Ideal para soldagem de chapas grossas;
- Excelente penetração;
- Grande quantidade de respingos;
- Arco instável.

No uso deste gás a difusão de carbono e a oxidação, tem grande relação com o tipo e quantidade de elementos químicos que estão presentes no metal de base e no consumível de soldagem e que irão constituir o metal de solda e como eles reagem com o oxigênio monoatômico, formando óxidos ou com o próprio carbono, promovendo sua entrada ou saída do metal de solda.

## **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

### **3.1 Materiais**

Para análise dos diversos fenômenos ocorridos durante o processo de soldagem por FCAW com a variação dos gases de proteção, foram utilizadas chapas de aço inoxidável austenítico AISI 304 com dimensões 10x100x300 mm, e arame tubular classificação AWS A 5.22, E308LT-1, de diâmetro 1,2 mm, ambos com as respectivas composições conforme Tabela 3.

**Tabela 3** - Composição química de materiais

COMPOSIÇÃO QUÍMICA									
METAL BASE – AISI 304									
C (máx.)	Mn (máx.)	P (máx.)	S (máx.)	Si (máx.)	Cr (mín.)(máx.)	Ni (mín.)(máx.)	Mo	N	OUTROS ELEMENTOS
0,08	2,00	0,045	0,030	0,75	18,00-20,00	8,00-10,50	-	0,10	-
CONSUMÍVEL – Arame Tubular									
<0,03	<1,5	-	-	<0,09	19,5	10,5	-	-	-

Fonte: (KESTRA, 2015)

Para a preparação e solda das amostras foram utilizadas as seguintes máquinas:

- Máquina de Solda (Fonte Lincoln Electric DC600 e cabeçote Lincoln Electric LF33);
- Máquina Embutidora (Arotec – Pre 30mi);
- Disco de Corte abrasivo (Arotec – Cut-Off 40);
- Lixadeiras, (Arotec 180 a 2000 mesh);
- Politrizes (Alumina de 1 $\mu$ m e Alumina de 0,3 $\mu$ m);
- Microscópio Óptico (Olympus SZ2-ET 6,7 a 45X e Olympus BX51M 1000X);
- Computador.

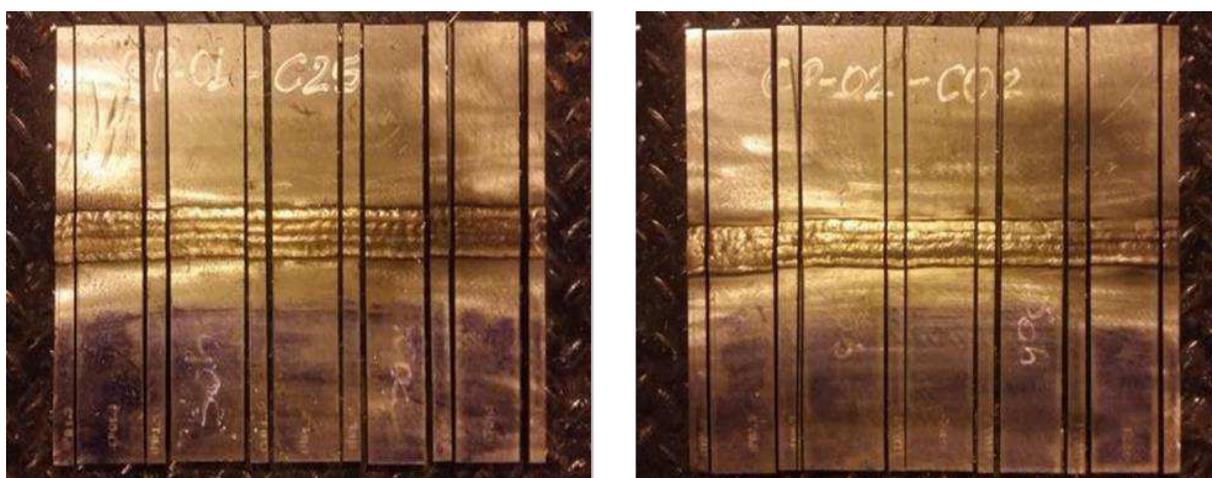
### 3. 2 Métodos

Para garantir que não haveria pré-transformações na estrutura no metal a ser soldado, o chanfro foi executado por usinagem, a um ângulo de 30°. A configuração da junta escolhida foi um chanfro em “V”, com abertura de 1,5mm, durante toda soldagem foi acompanhado os parâmetros amperagem e voltagem, bem como o aquecimento interpasse que foi mantido abaixo de 150°C. A partir daí houve a execução de soldagem onde obteve-se as juntas soldadas, conforme figura 5.



**Figura 5** - Corpos de prova soldados com gás C-25 e com gás CO<sub>2</sub>  
Fonte – Elaborado pelos autores

Após a soldagem foram traçadas as áreas de interesse para estudo, sendo delimitadas áreas para as amostras de dobramento de face e lateral e para macro e micrografia conforme figura 6.



**Figura 6** - Corpos de prova soldados com áreas de interesse cortadas para ensaios  
Fonte – Elaborado pelos autores

### 3. 2. 1 Ensaio destrutivo (Dobramento)

Os ensaios destrutivos, apesar de fornecerem apenas resultados qualitativos são muito usados para qualificação de procedimentos, qualificações de soldadores e qualificação de materiais. O ensaio de dobramento é um meio bastante simples e eficaz para detectar problemas metalúrgicos e de compacidade que podem afetar o comportamento dos materiais em serviço. Conforme norma ASME IX, os ensaios de dobramento guiados podem ser de cinco diferentes tipos em função do eixo de solda, os corpos de prova podem ser confeccionados paralelos ou

transversalmente ao eixo da solda, que são os seguintes: dobramento transversal de face, dobramento transversal de raiz, dobramento transversal lateral, dobramento longitudinal de face e dobramento longitudinal de raiz.

Existem três possibilidades de ensaios de dobramento como, dobramento livre, dobramento semi-guiado e dobramento guiado. O grau de severidade de cada ensaio de dobramento é determinado pelo ângulo que o corpo de prova é dobrado, podendo ser em 90°, 120° e 150°. A Figura 7 mostra o sistema de prensa e computador utilizados para o ensaio.



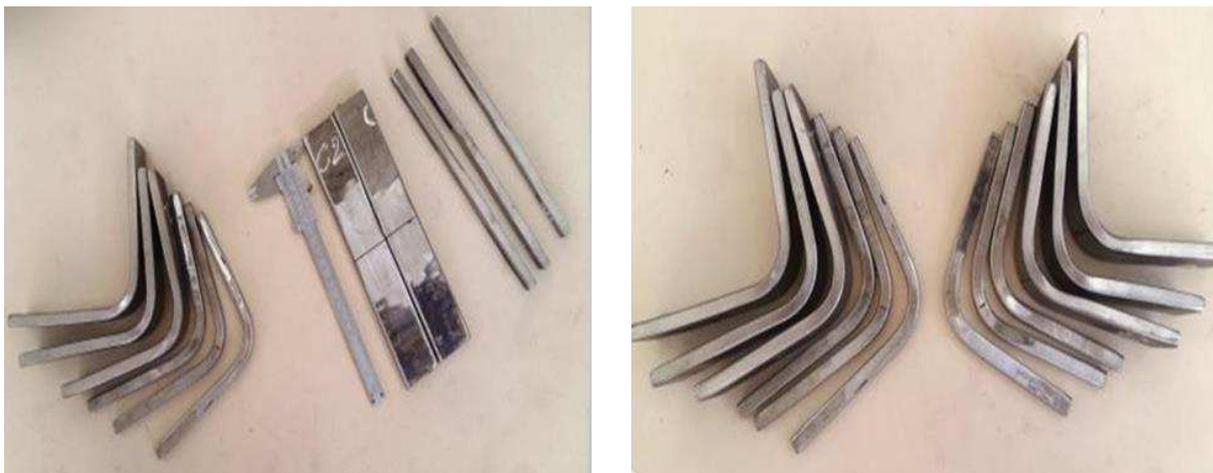
**Figura 7** - Máquina de ensaio dobramento, computador e sistema de dobramento guiado  
Fonte – Elaborado pelos autores

No caso de nossos estudos foi utilizado o dobramento guiado, como mostra a Figura 7. Foi utilizado um cutelo de 40mm e o corpo de prova foi deformado a um ângulo de dobramento a 90°. Os corpos de prova tiveram as seguintes dimensões:

Dobramento transversal de face: 10x40x200mm;

Dobramento transversal de raiz: 10x10x200mm.

De cada corpo de prova soldado com o gás C-25 e com o gás CO<sub>2</sub>, foram tiradas 3 (três) amostras para ensaio de dobramento transversal de face, e 3 (três) amostras para ensaio de dobramento transversal lateral (Figura 8). As amostras foram retiradas no início, no meio e no final das juntas soldadas.



**Figura 8** - Corpos de prova ensaiados

Fonte – Elaborado pelos autores

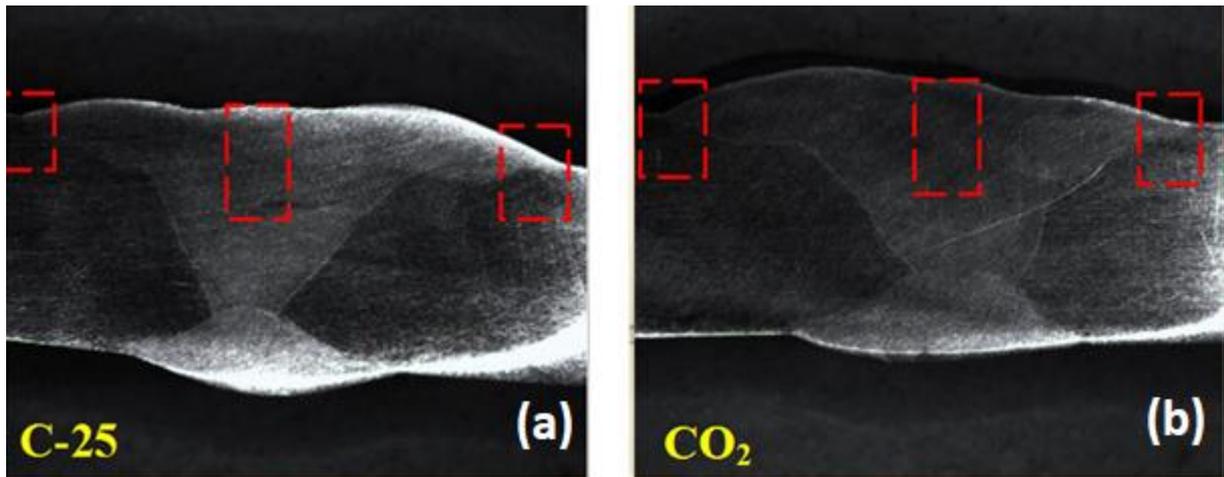
Para a provação do corpo de prova a área tracionada não deve conter nenhuma descontinuidade, caso aconteça o surgimento de descontinuidades, as mesmas são analisadas conforme a norma que está sendo utilizada, podendo ser aprovadas dependendo do critério de aceitação. Segundo norma ASME IX, conforme item QW- 163, é considerado aprovado o ensaio cujo corpo de prova não apresente descontinuidades maiores que 3,2mm, na solda ou entre a zona de ligação, medidos em qualquer direção. Trincas com origem a partir das bordas do corpo de prova ensaiado devem ser desconsideradas, a menos que evidenciem a presença de outras descontinuidades. Os corpos de prova e critério de aceitação de resultados foram analisados conforme norma ASME XI QW-161, QW-162 e QW-163.

### 3. 2. 2 Ataque químico

Com o objetivo de tornar as estruturas do material estudado nítidas as lentes do microscópio, foi executado um ataque químico visando a oxidação superficial de alguns elementos no metal base e também no metal depositado, possibilitando a observação de contornos de grãos e a diferenciação entre fases do material. O reagente químico utilizado foi o Glicirégia composto dos seguintes elementos: 30ml de glicerol/glicerina, 40ml de ácido clorídrico e 10ml de ácido nítrico. A técnica utilizada foi a de imersão, com o tempo de reação em torno de 45 segundos.

### 3. 2. 3 Macrografia e Micrografia

As macrografias foram preparadas para avaliação visual da solda e também para a demarcação das áreas de interesse para posteriormente serem analisadas por microscópio óptico. A Figura 9 mostra as macrografias das amostras retiradas transversalmente ao eixo da junta soldada.

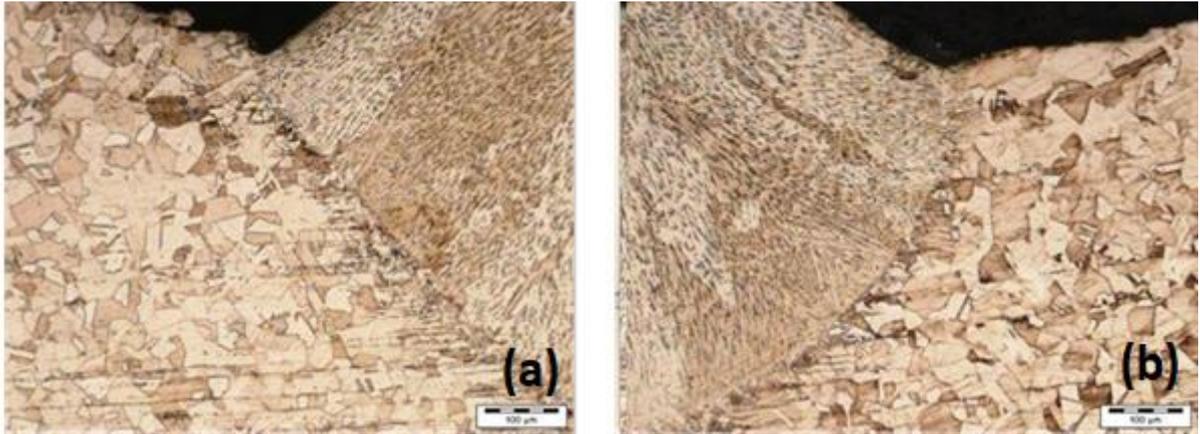


**Figura 9** - Macrografia com áreas de estudo, (a) soldagem com gás C-25 e (b) com gás CO<sub>2</sub>.  
Microscópio estéreo 6,7x  
Fonte – Elaborado pelos autores

Com as áreas de interesse demarcadas, amostras destas foram retiradas para análise em microscópio óptico, como podemos ver nas figuras de 10 a 18, onde foram fotografadas as margens e o centro das juntas soldadas ponto a ponto aumentando gradativamente a ampliação. As imagens a seguir caracterizam o ensaio de microscopia óptica, as imagens capturadas bem como sua morfologia serão discutidas mais adiante em 4.4 Análise da Microestrutura.

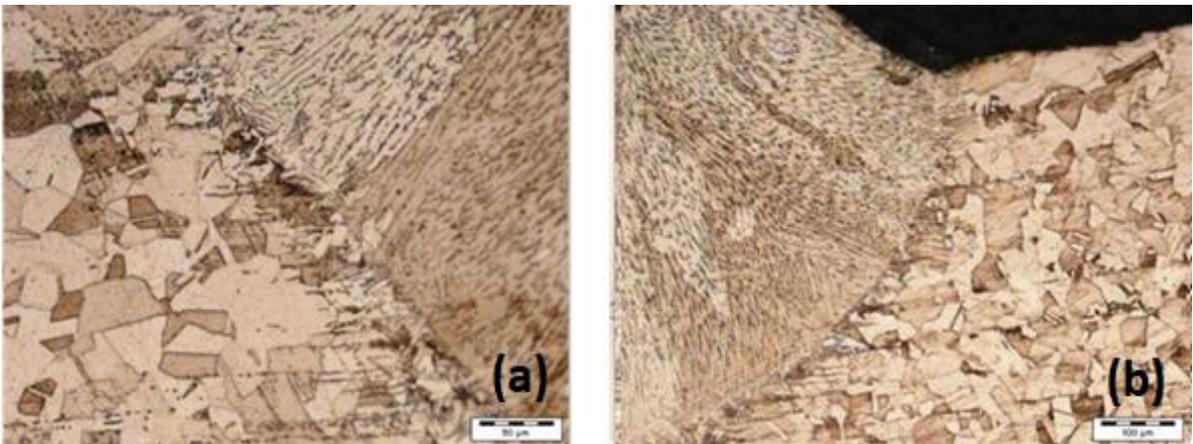


**Figura 10** – Metal base x margem da solda no Microscópio Óptico 50X, (a) soldagem com gás C25 e (b) soldagem com gás CO<sub>2</sub>.  
Fonte – Elaborado pelos autores



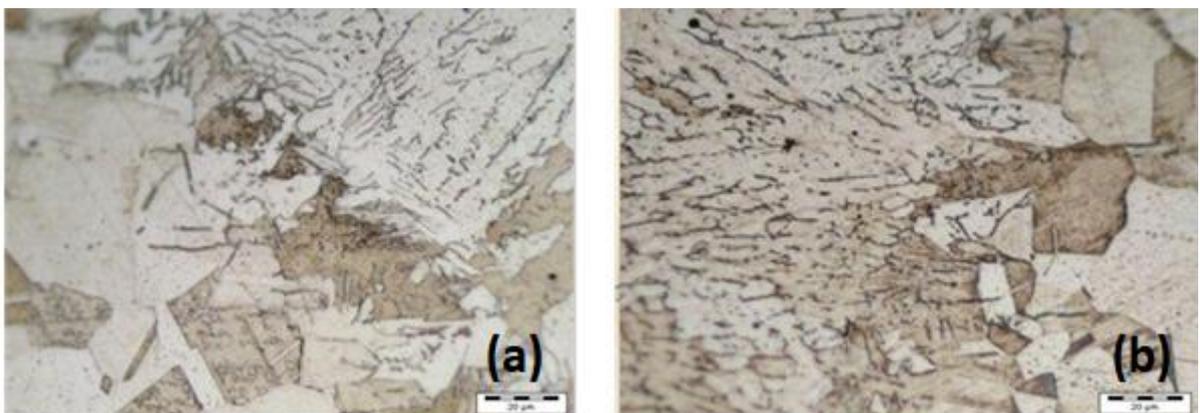
**Figura 11** - Metal base x margem da solda no Microscópio Óptico 100X, (a) soldagem com gás C25 e (b) soldagem com gás CO<sub>2</sub>.

Fonte – Elaborado pelos autores



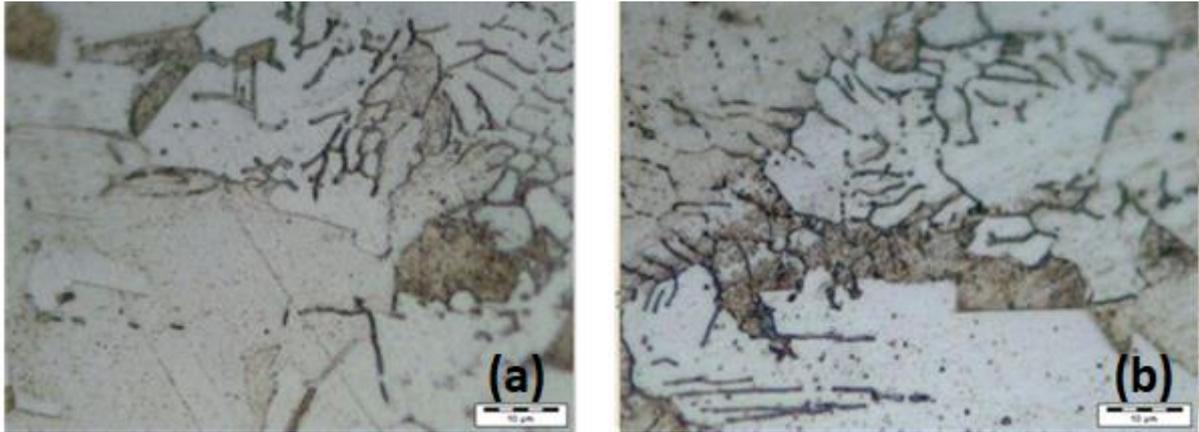
**Figura 12** - ZAC x metal depositado no Microscópio Óptico 200X, (a) soldagem com gás C25 e (b) soldagem com CO<sub>2</sub>.

Fonte – Elaborado pelos autores

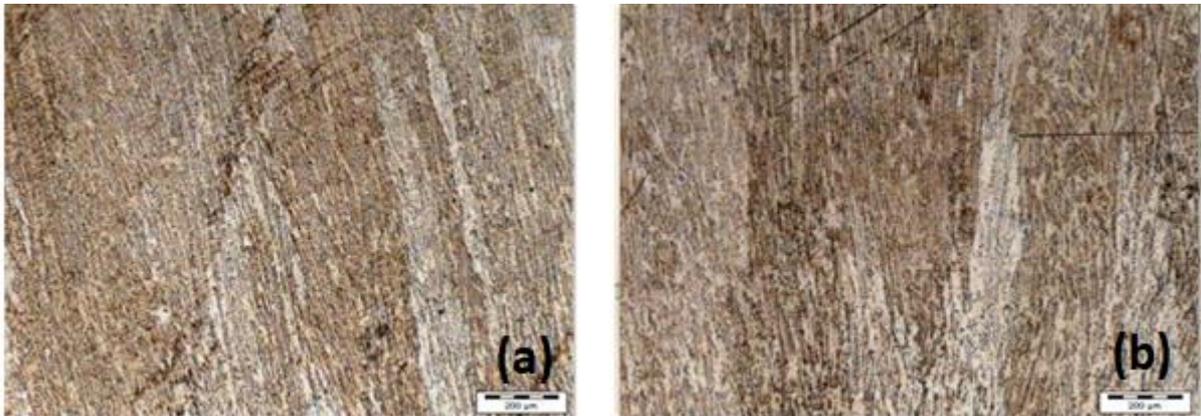


**Figura 13** - ZAC x metal depositado no Microscópio Óptico 500X, (a) soldagem com gás C25 e (b) soldagem com CO<sub>2</sub>.

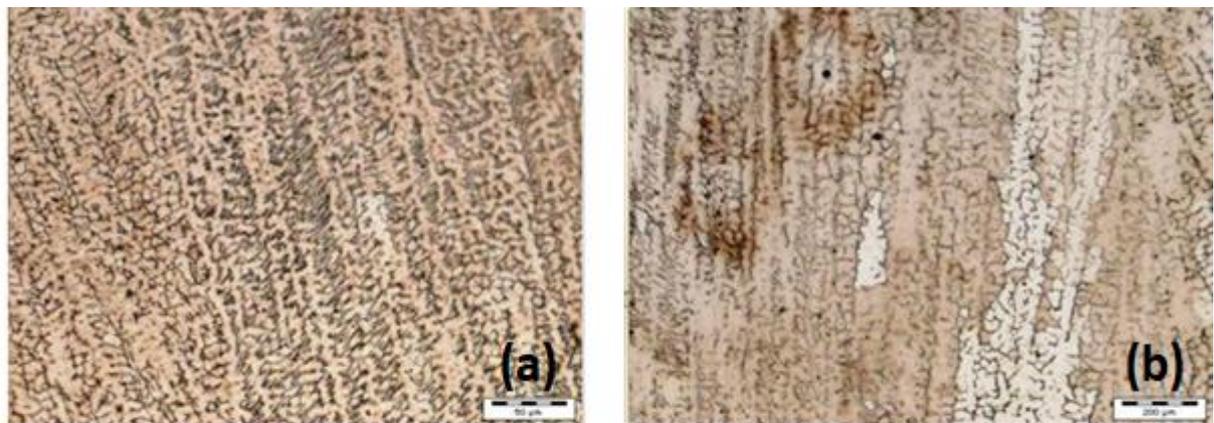
Fonte – Elaborado pelos autores



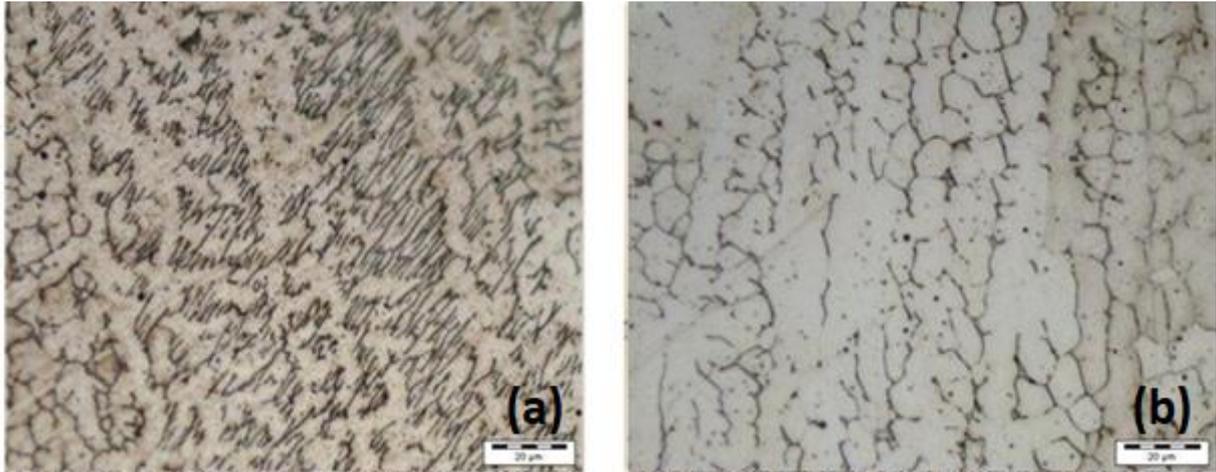
**Figura 14** – ZAC, linha de fusão e metal depositado no Microscópio Óptico 1000X, (a) soldagem com gás C25 e (b) soldagem com gás CO<sub>2</sub>.  
 Fonte – Elaborado pelos autores



**Figura 15** – Metal depositado, centro da solda no Microscópio Óptico 50X, (a) soldagem com gás C25 e (b) soldagem com gás CO<sub>2</sub>.  
 Fonte – Elaborado pelos autores

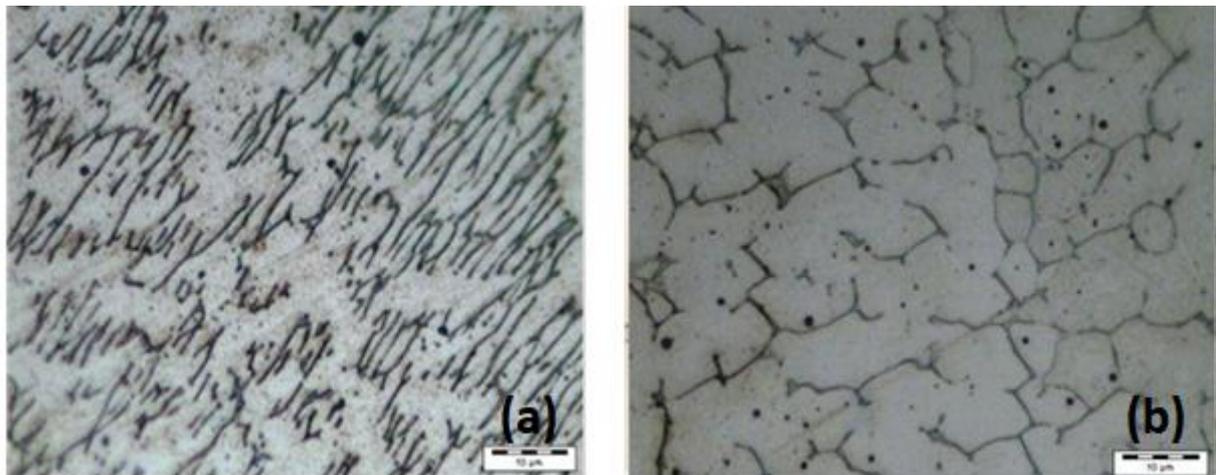


**Figura 16** – Metal depositado, centro da solda no Microscópio Óptico 200X, (a) soldagem com gás C25 e (b) soldagem com gás CO<sub>2</sub>.  
 Fonte – Elaborado pelos autores



**Figura 17** – Metal depositado, centro da solda no Microscópio Óptico 500X, (a) soldagem com gás C25 e (b) soldagem com gás CO<sub>2</sub>.

Fonte – Elaborado pelos autores



**Figura 18** – Metal depositado, centro da solda no Microscópio Óptico 1000X, (a) soldagem com gás C25 e (b) soldagem com gás CO<sub>2</sub>.

Fonte – Elaborado pelos autores

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Análise mecânica

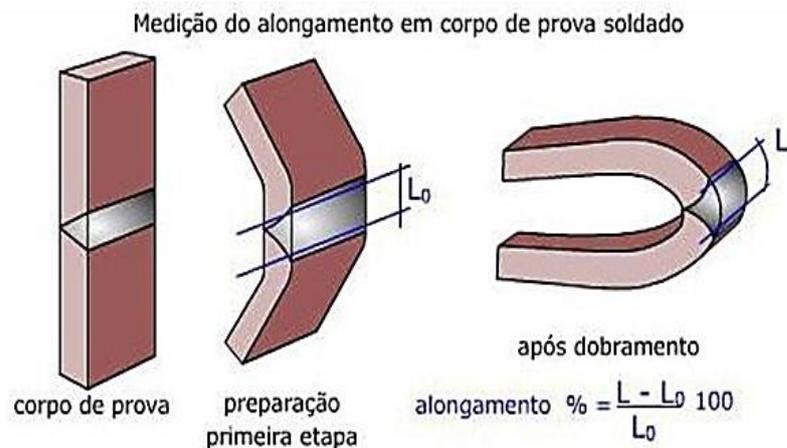
A análise dos corpos de prova após o ensaio mecânico de dobramento foi executada a olho nu, onde não apresentaram na área dobrada o surgimento de trincas ou alguma descontinuidade que pudessem reprovar o corpo de prova ou conseqüentemente o ensaio. As figuras 19a e 19b, mostram a superfície dos corpos de prova com dobramento transversal de face e transversal lateral.



**Figura 19** – Corpos de prova, detalhe da área soldada depois do ensaio de dobramento

Fonte – Elaborado pelos autores

Para avaliação do alongamento dos corpos de prova após dobramento foi executado as medições conforme representação esquemática da Figura 20.



**Figura 20** – Esquema de sequência, medição e fórmula para cálculo de alongamento

Fonte – CIMM (2010)

A Tabela 4 mostra as dimensões das faces das soldas colhidas na pré-deformação e após a deformação final, dimensões estas que serão utilizadas para encontrar a porcentagem de alongamento de cada corpo de prova.

**Tabela 4** - Classificação de gases de proteção

DIMENSÕES DAS FACES DAS SOLDAS (mm)							
JUNTA GÁS C-25				JUNTA GÁS CO <sub>2</sub>			
AMOSTRAS	PRÉ-DEFOR.	DEFOR. FINAL	ALONGAMENTO	AMOSTRAS	PRÉ-DEFOR.	DEFOR. FINAL	ALONGAMENTO
AM1-INÍCIO	25,00	28,00	10,71%	AM1-INÍCIO	24,50	27,00	9,25%
AM2-MEIO	25,50	29,00	12,06%	AM2-MEIO	25,00	29,00	13,79%
AM3-FINAL	26,00	30,00	13,33%	AM3-FINAL	25,50	29,00	12,06%

Fonte – Elaborado pelos autores

Não houve diferenças relevantes quanto ao alongamento sofrido pelos corpos de prova visto que a junta soldada com o gás C-25 teve uma taxa média de alongamento de 11,70% em

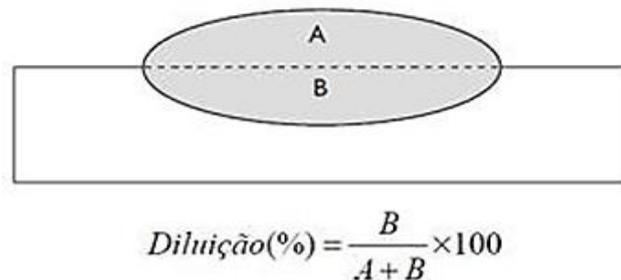
relação a largura inicial e a junta soldada com o gás CO<sub>2</sub> teve uma taxa média de alongamento de 12,03% em relação em relação a largura inicial, dando uma pequena diferença entre as duas juntas de 0,33%, o que pode ser considerado irrelevante.

Apesar da soldagem ter sido executada com gases diferentes, o ensaio de dobramento não apresentou variações relevantes quanto ao quesito deformação por estiramento, também não foi observado nenhum tipo de descontinuidade que pudesse reprovar as amostras e conseqüentemente o ensaio. Desta forma, após a avaliação das juntas soldadas com os gases C-25 e CO<sub>2</sub> através de ensaio com acionamento mecânico por dobramento transversal de face e transversal lateral, ambas as juntas foram consideradas aprovadas, podendo ser considerada satisfatória a utilização de ambos os gases para soldagem desta configuração de junta, baseando nos critérios de aceitação conforme norma aplicada.

#### 4. 2 Análise Macroestrutural (Diluição)

Após preparação e ataque químico das amostras retiradas com corte transversal ao eixo da solda, pôde se executar uma análise da diluição na soldagem.

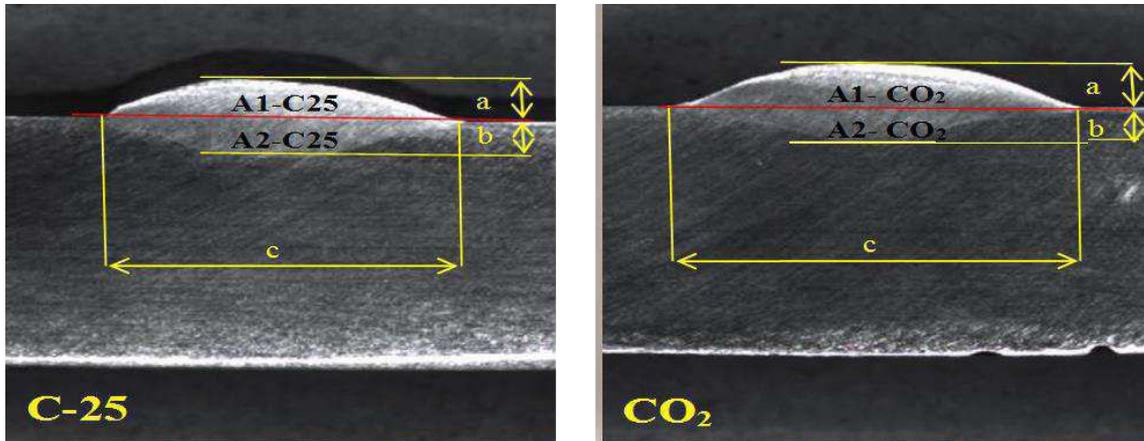
“Diluição na soldagem por fusão significa a parte do metal de base que entra na composição da zona fundida” (ZEEMANN, 2003). O que também influencia fortemente na diluição, é o quanto o material depositado penetrou na metal base, e isso está intimamente ligado aos parâmetros de soldagem. Para comparação desse fenômeno entre os dois gases, foi executado sobre o metal base um único passe, utilizando os parâmetros que foram empregados durante a soldagem da junta. A Figura 21 mostra como a diluição é calculada:



**Figura 21** – Croqui de diluição de filete de solda  
Fonte – Böhler Welding Group (s/d)

A análise macrográfica também forneceu base para verificação sobre qual a influência dos gases na geometria dos filetes de solda. Os parâmetros de soldagem como corrente, tensão e vazão de gás foram os mesmos utilizados para soldagem de ambos os corpos de prova para

os testes, tanto quanto para a junta que utilizou o gás C-25, quanto para junta soldada com o gás CO<sub>2</sub>, bem como para os passes únicos, também foram utilizados os mesmos parâmetros. A Figura 22 mostra o perfil dos filetes únicos executados para análise da diluição dos materiais.

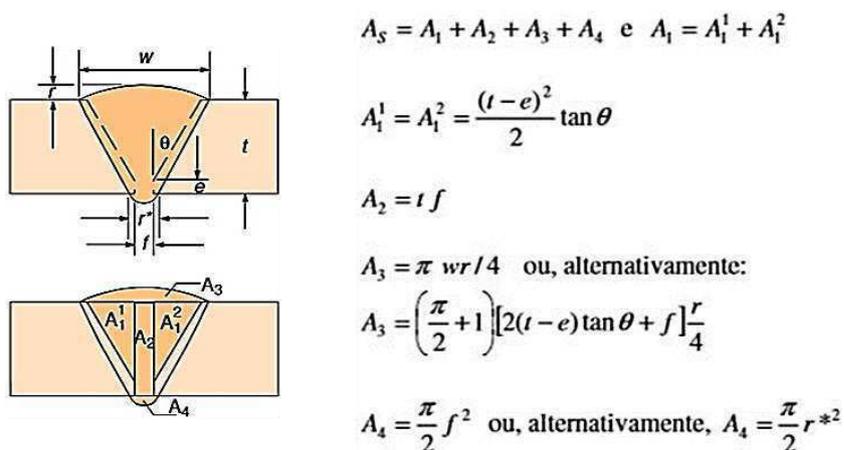


**Figura 22** – Macrografias dos filetes de solda com marcações de cotas para cálculo de diluição.  
Microscópio estéreo 6,7X  
Fonte – Elaborado pelos autores

Para auxiliar no cálculo das áreas do metal depositado sobre o metal base e as áreas de penetração do metal depositado no metal de base utilizou-se a fórmula para cálculo das áreas das calotas dos filetes depositados a seguir:

$$\text{Área} = \pi w r / 4 \quad (1)$$

A Figura 23, mostra exemplos de cálculos de áreas de metal depositado utilizado em custos de soldagem.



**Figura 23** – Croqui e exemplo para cálculos de áreas em juntas soldadas  
Fonte – Modenesi (2001)

As dimensões dos filetes de solda e a diluição foram as seguintes, conforme tabela 5.

**Tabela 5** - Dimensões das faces das juntas

DIMENSÕES DOS FILETES DE SOLDADA (mm)					
FILETE GÁS C-25			FILETE GÁS CO2		
Cotas a, b, c			Cotas a, b, c		
Altura	a	1,95	Altura	a	2,05
Profundidade	b	1,50	Profundidade	b	1,75
Largura	c	11,00	Largura	c	13,00
Diluição		43,47%	Diluição		46,06%

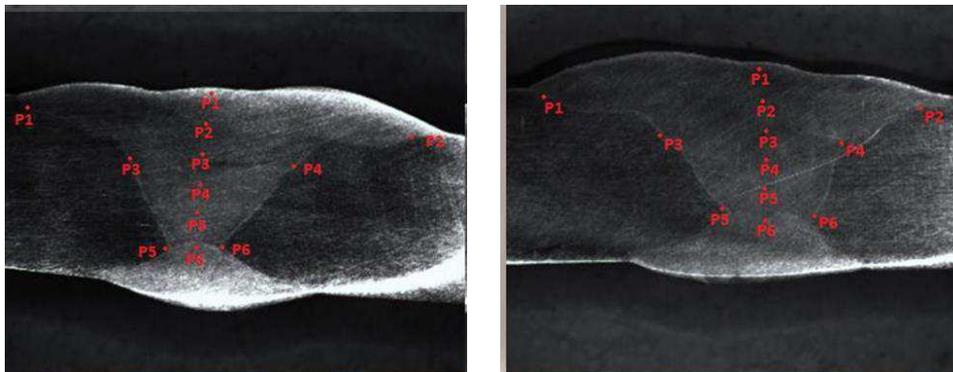
Fonte – Elaborado pelos autores

Através dos cálculos de diluição da metal base no metal de solda depositado que estão registrados nos anexos, podemos ver que o filete executado com o gás C-25 teve uma diluição de 43,47% enquanto a diluição do filete executado com o gás CO<sub>2</sub> foi de cerca de 46,06%, dando neste experimento uma margem de 3,13% de diferença na diluição. No quesito diluição a diferença entre a soldagem com os dois gases teve pouca relevância, porém na molhagem da poça de fusão sobre a metal base conseguimos ver uma diferença mais significativa, pois o espalhamento da poça de fusão entre a soldagem dos dois gases chegou a uma diferença de cerca de 18,18%, considerando que com o gás C-25 a largura do filete de solda ficou com 11mm, enquanto que a largura do filete executado com o gás CO<sub>2</sub> ficou com cerca de 13mm de largura.

### 4.3 Microdureza Vickers HV

O ensaio de microdureza foi executado com o objetivo de comparar a variação entre as margens da solda e o metal depositado do mesmo corpo de prova, bem como a comparação entre as juntas soldadas entre os gases C-25 e CO<sub>2</sub>.

Na Figura 24 são mostrados os pontos onde foram coletados os valores de dureza.



**Figura 24** – Macrografia das juntas soldadas com marcações dos pontos de coleta da dureza. Microscópio estéreo 6,7X

Fonte – Elaborado pelos autores

Como o próprio nome cita, a micro dureza produz uma impressão microscópica no material, empregando uma carga menor que 1 kgf, com penetrador de diamante. Os parâmetros de cargas e tempo utilizados para realização do ensaio foram de 0,05kgf e 5 segundos respectivamente, o penetrador utilizado foi de diamante com formato piramidal de base quadrada. Os resultados obtidos foram os seguintes, conforme demonstrado na Tabela 7.

**Tabela 7 - Valores dos pontos de dureza**

MICRODUREZA VICKERS HV					
JUNTA SOLDADA C-25			JUNTA SOLDADA CO <sub>2</sub>		
PONTO	ZAC	SOLDA	PONTO	ZAC	SOLDA
P1	181,0	190,0	P1	194,0	194,0
P2	182,0	180,0	P2	222,0	196,0
P3	189,0	173,0	P3	203,0	196,0
P4	192,0	181,0	P4	193,0	172,0
P5	213,0	194,0	P5	214,0	192,0
P6	203,0	180,0	P6	201,0	191,0
MÉDIA	193,3	183,0	MÉDIA	204,5	190,2

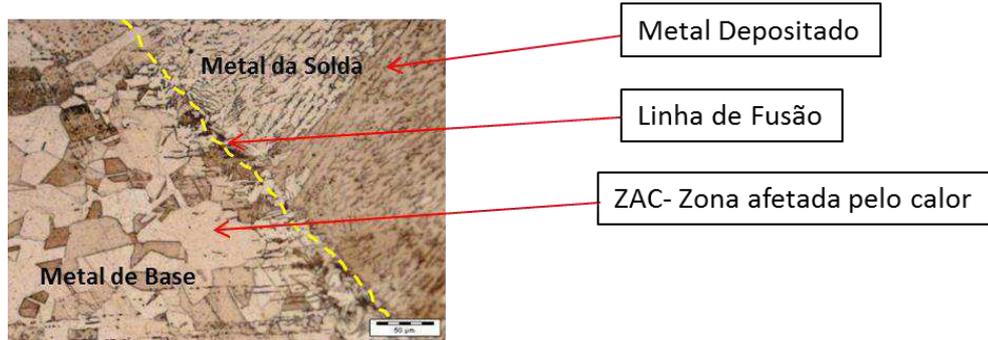
Fonte – Elaborado pelos autores

Houve alguns pontos com variação superior de dureza, porém, não relevantes. A área que obteve maior dureza é a região da ZAC da amostra da junta soldada de CO<sub>2</sub>, apesar de ser um aço que não é temperável, desta maior dureza pode ter relação com o maior *heat in put* sofrido pela junta e resfriamento ao ar livre, levando-a a altas temperaturas e resfriamento rápido, fazendo com que as estruturas sofram dilatação e contração em frações de segundo, deformando e recristalizando muito rápido os reticulados cristalinos do material, gerando tensões nos planos cristalinos das estruturas.

#### 4. 4 Análise microestrutura

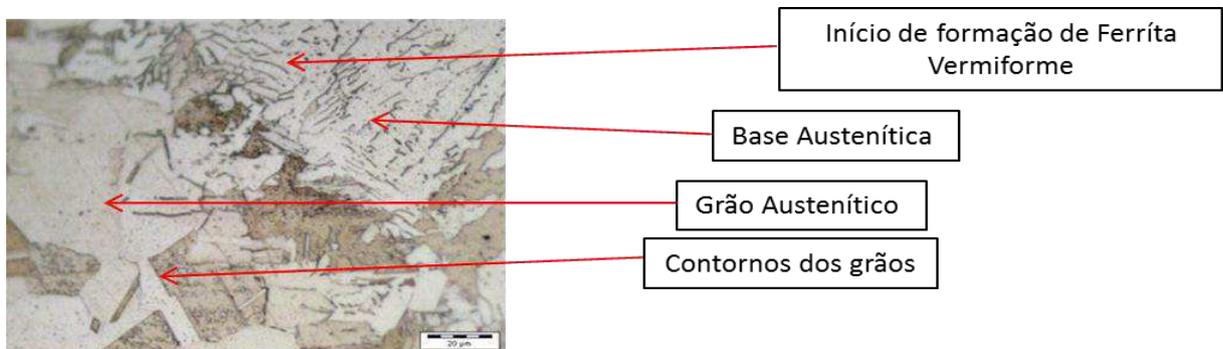
De todos os ensaios realizados e das análises feitas, o que apresentou maior diferença entre a soldagem com o gás C-25 e o gás CO<sub>2</sub>, foram as microestruturas obtidas em cada junta. Foram feitas comparações entre as mesmas regiões de cada junta soldada como visto nas Figuras 25 a 28.

O material aço inoxidável 304, e tipicamente austenítico e susceptível a sensitização, ou seja, formação de segunda fase em sua estrutura, caracterizada pela formação de carbonetos de cromo no contorno dos grãos austeníticos. Neste estudo foram analisadas as áreas que possivelmente poderiam apresentar este fenômeno, que é a ZAC, e linha de ligação entre metal base e metal depositado como podemos ver nas Figuras 25 e 27.



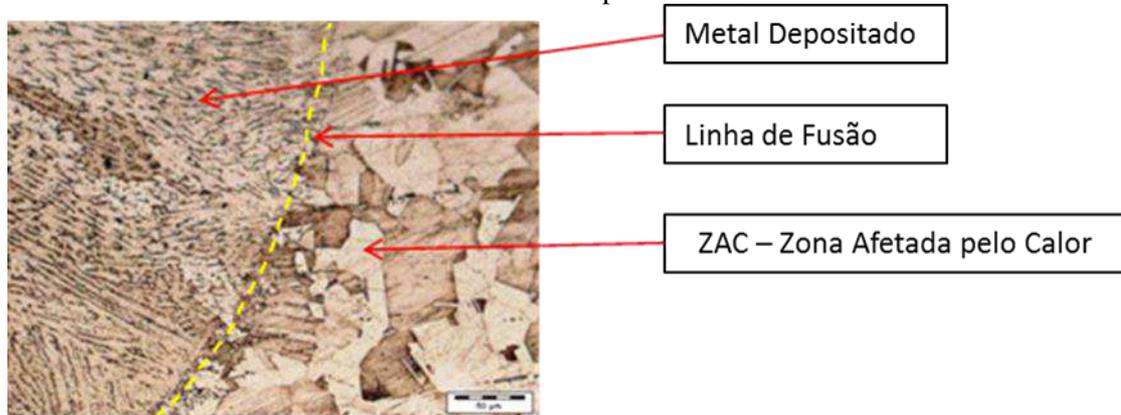
**Figura 25** - Metal base x ZAC x metal depositado, solda executada com o gás C-25. Microscópio Óptico 200X

Fonte – Elaborado pelos autores



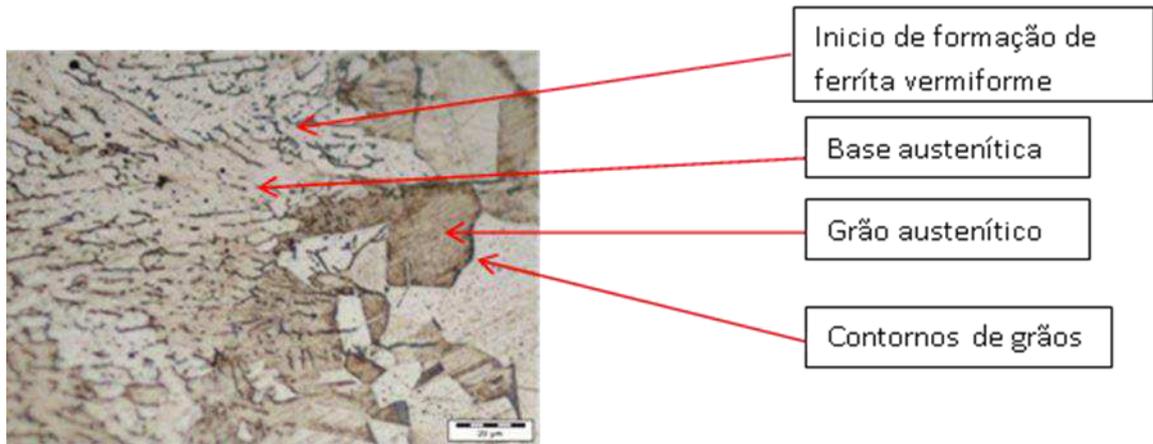
**Figura 26** - Metal base x ZAC x metal depositado, solda executada com o gás C-25. Microscópio Óptico 500X

Fonte – Elaborado pelos autores



**Figura 27** - Metal depositado, linha de fusão e ZAC, solda executada com o gás CO<sub>2</sub>. Microscópio Óptico 200X

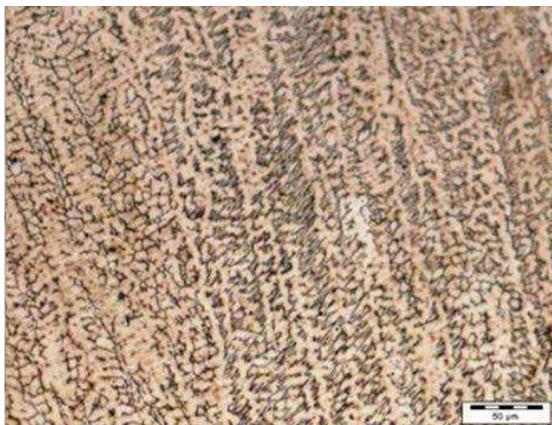
Fonte – Elaborado pelos autores



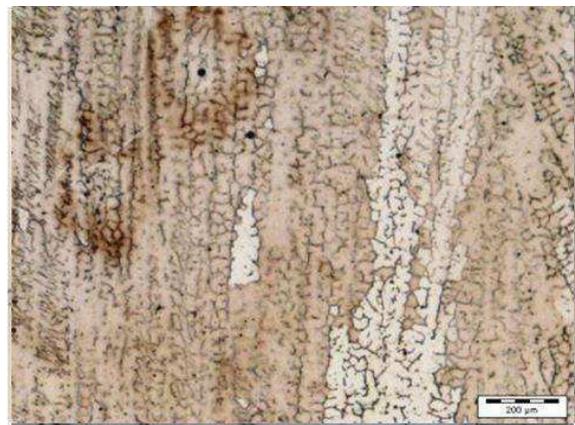
**Figura 28** - Metal depositado, linha de fusão e ZAC, solda executada com o gás CO<sub>2</sub>. Microscópio Óptico 500X  
 Fonte – Elaborado pelos autores

Pela análise das fotos metalográficas tiradas das áreas as margens das soldas que compreende a região da ZAC, linha de fusão e metal depositado das amostras das juntas soldadas com o gás C-25 e com o CO<sub>2</sub> não foi encontrado precipitados de carbonetos de cromo e nitretos de cromo, o que não evidencia a sensitização do material pelo processo de soldagem FCAW com a utilização dos dois diferentes gases. Mas, vale ressaltar que para haver risco de sensitização o aço inoxidável tem que sofrer um aporte de calor numa faixa de temperatura de 425°C a 870°C, o que não ocorreu durante a soldagem das juntas, pois mesmo o aporte de calor do gás CO<sub>2</sub> sendo maior, as juntas foram mantidas com a temperatura de interpasse inferior a 150°C.

Conforme as Figuras 29, e 30 pode se observar que há uma maior densidade de ferrita vermiforme e ferrita em rede na solda executada com o gás C-25 em comparação com a mesma área da junta soldada com o gás CO<sub>2</sub>.

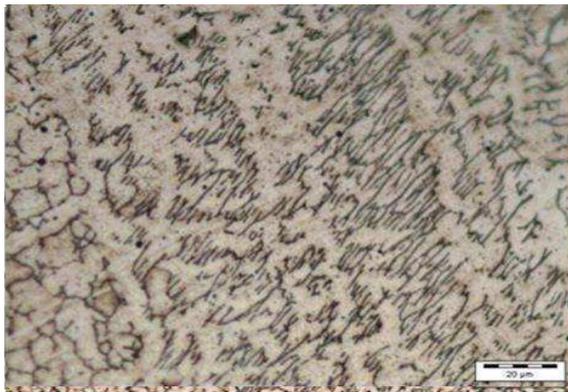


Solda executada com gás C-25. Microscópio Óptico

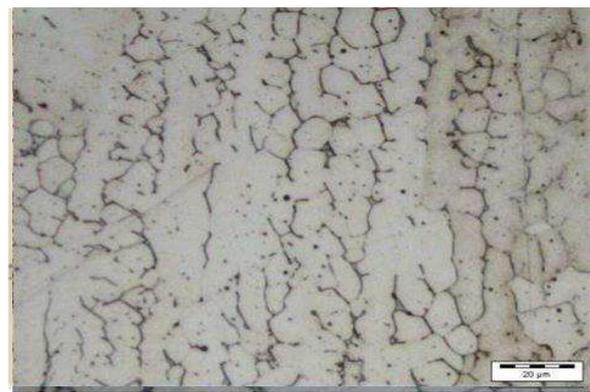


Solda executada com gás CO<sub>2</sub>. Microscópio Óptico

**Figura 29** - Metal depositado, centro da solda. *Microscópio Óptico 200X*  
 Fonte – Elaborado pelos autores



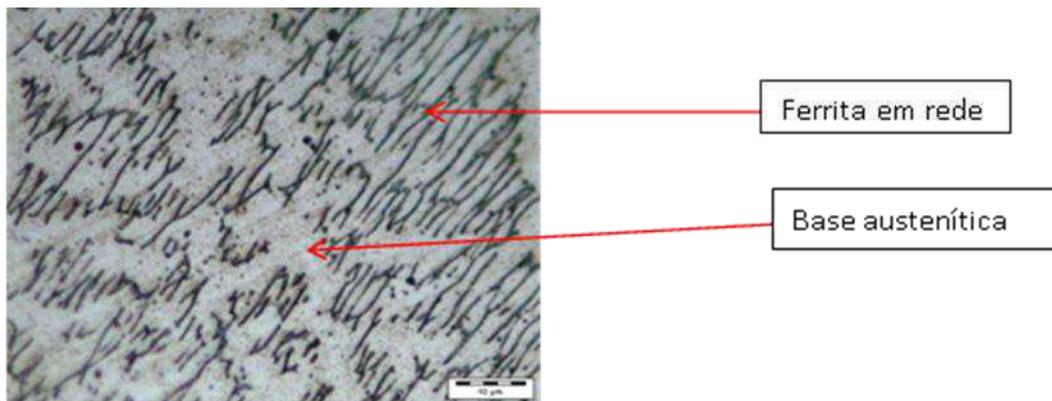
Solda executada com gás C-25. Microscópio Óptico



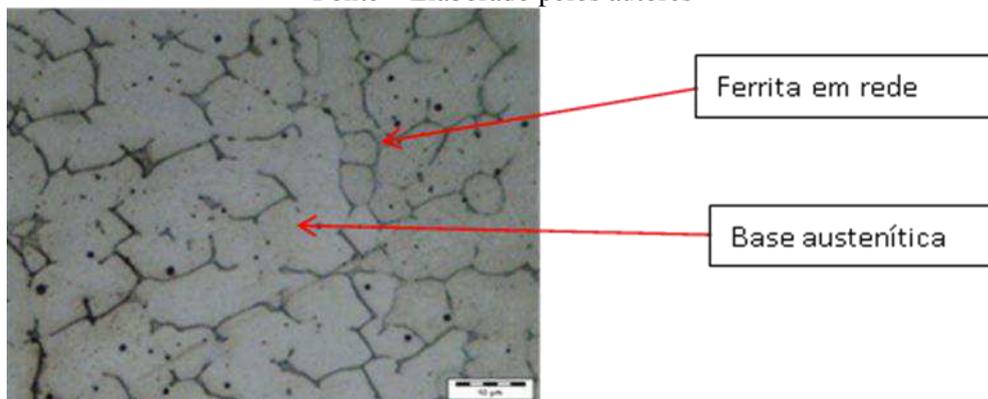
Solda executada com gás CO<sub>2</sub>. Microscópio Óptico

**Figura 30** - Metal depositado, centro da solda. Microscópio Óptico 500X  
Fonte – Elaborado pelos autores

As figuras 31 e 32 mostram nitidamente as formações de ferrita vermiciforme e ferrita em rede na matriz austenítica.



**Figura 31** - Metal depositado, centro da solda executada com gás C-25. Microscópio Óptico 1000X  
Fonte – Elaborado pelos autores



**Figura 32** - Metal depositado, centro da solda executada com gás CO<sub>2</sub>. Microscópio Óptico 1000X  
Fonte – Elaborado pelos autores

O que pode explicar a menor quantidade de ferrita na solda executada com o gás CO<sub>2</sub> é um maior aporte de calor que o gás imprime na peça através das reações químicas, e uma maior atividade ou reatividade do gás com o componente cromo que fortemente influencia na formação da ferrita.

Nos ensaios de dobramento executado a ferrita não houve diferenças relevantes nos resultados que pudessem ser atribuídos a estrutura ferrítica, porém, se vê necessário maior severidade no ensaio e ou mais ensaios complementares como o de tração ou de charpy, para determinar melhor a influência da ferrita nesta condição.

## 5 CONCLUSÃO

A hipótese de uma modificação da estrutura do metal depositado na comparação da utilização dos dois gases pode ser observada e comprovada pela diferença da formação e aumento de ferrita, onde se apresenta em maior quantidade e em formação de rede na junta soldada com C-25, e em menor quantidade e em formato vermiforme na junta soldada com CO<sub>2</sub>, porém não foram observadas as margens da solda na região da ZAC formação de carbonetos de cromo ou nitretos de cromo nem precipitados de segunda fase em nenhuma das juntas soldadas. Todos os testes realizados entre as juntas soldadas com os ambos os gases apresentaram se satisfatórios.

O gás CO<sub>2</sub> possui a vantagem de ser mais barato, dá uma melhor condição de molhabilidade da poça de fusão sobre a superfície da metal base, e maior velocidade na soldagem, porém, respingos ocorrem com maior frequência e quantidade. Outro fator que deve ser levado em consideração é que por ser um gás mais reativo eleva a *heat in put* a gradientes mais altos o que deve ser monitorado rigorosamente devido à possibilidade de aumento de temperatura indevidas durante a soldagem que poderiam levar a uma modificação da estrutura do material e até surgimento de segunda fase e sensitização, apesar de não ter sido encontrada neste estudo. Já o gás C-25, dá um melhor aspecto nos filetes de solda principalmente no acabamento final da solda, com uma solda mais limpa e com menor ocorrência de respingos. Conforme pesquisa apresentada neste trabalho entre a comparação dos gases C-25 e CO<sub>2</sub>, pôde se avaliar pelos resultados que ambos foram considerados satisfatórios para soldagem de aço inoxidável austenítico 304, não sendo observado nenhum fenômeno que pudesse considerar algum dos gases inaptos para este tipo de processo de soldagem.

Para continuação deste estudo recomenda-se fortemente que sejam feitas análises de resistência à corrosão em juntas soldadas com os gases C-25 e CO<sub>2</sub>, avaliando principalmente as margens da solda, na zona de ligação entre metal base e metal depositado, ZAC, e também mais testes destrutivos a fim de avaliar a resistência mecânica dos corpos de prova em função da quantidade de ferrita.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASM International. **Metal Handbook, Properties and selection**: stainless steels, tool materials and special, purpose metals v.3, 9th edition, 1980.

\_\_\_\_\_. **Metals Handbook**: Atlas of Microstructures of Industrial Alloys. AMERICAN SOCIETY FOR MATERIALS, v.7. United States of America. 1972.

AIR PRODUCTS. **Dióxido de carbono**. Disponível em: <http://www.airproducts.com.br/products/Gases/Carbon-Dioxide.aspx>. Acesso em: 12 maio de 2016.

CIMM. Centro de Informação Metal Mecânica. **A aplicabilidade dos ensaios de dobramento**. Disponível em: [http://www.cimm.com.br/portal/noticia/exibir\\_noticia/7526-a-aplicabilidade-dos-ensaios-de-dobramento](http://www.cimm.com.br/portal/noticia/exibir_noticia/7526-a-aplicabilidade-dos-ensaios-de-dobramento). Acesso em: 25 junho de 2016.

FORTES, C. ARAÚJO, W. **Apostila de Arames Tubulares**. ESAB, 2004. Disponível em: [http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901098rev1\\_apostilaaramestubulares\\_ok.pdf](http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901098rev1_apostilaaramestubulares_ok.pdf). Acesso em: 25 de junho de 2016.

JESUS E. R. B. Materiais Para Fabricação de Equipamentos de Processo. In: **Revista Iuminart**, Sertãozinho, Ano IV, nº 9, Nov. 2012. Disponível em: <http://www.cefetsp.br/edu/sertaozinho/revista/iluminart.htm/>. Acesso em: 12 maio de 2016.

MARQUES, P.V.; MODENESI, P.J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem**: Fundamentos e Tecnologia. Belo Horizonte: UFMG, 2005.

MARTINS, W. **Introdução aos Processos de Soldagem**. Instituto Federal De Educação, Ciência E Tecnologia Do Maranhão, Departamento de Mecânica e Materiais. Disponível em: <https://pt.scribd.com/doc/18934502/Apostila-de-Soldagem>. Acesso em: 09 julho, 2016.

MODENESI, P.J. Soldabilidade dos aços inoxidáveis, Belo horizonte: ABS, 2001.

MOREIRA, A. F. **Influência da Atmosfera Protetora no Cordão de Solda Obtido Através dos Processos De Soldagem GMAW e FCAW**. Universidade Estadual Paulista “Júlio De Mesquita Filho”, Câmpus De Ilha Solteira Unesp. Programa de Pós- Graduação em Engenharia Mecânica. Ilha Solteira – SP. 2008. 147p. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/94492>. Acesso em: 21 de junho de 2016.

PADILHA, A.F.; GUEDES, L.C. **Aços Inoxidáveis Austeníticos**: Microestrutura e Propriedades. Hemus Ltda., 1994, p. 63-75.

PAREDES, Ramón S. Cortés. **Soldagem de Aços Inoxidáveis**: Conceito de Soldabilidade Previsão da soldabilidade. Disponível em: <http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/EME733/>> Acesso em: 22 abril de 2016.

SCHAEFFLER, A. L. **Constitution diagram for stainless steel weld metal**. Metal Progress. v. 56, n. 11, 1949.

SEDRIKS, A. J. **Corrosion of stainless steels**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1996  
Soldagem de Aços Inoxidáveis, Conceito de Soldabilidade Previsão da soldabilidade.  
Disponível em: <http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/EME733/>. Acesso em: 22 abril, 2016.

TESKE, M. **Influência da composição do gás de proteção na soldagem do aço ASTM A516 pelo processo GMAW**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e de Materiais) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba. 2006.

UNISANTA. **Apostila de Soldagem MIG/MAG**, capítulo 8. Disponível em: <http://cursos.unisanta.br/mecanica/ciclo10/CAPIT8.pdf>. Acesso em: 12 maio de 2016

WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. **Soldagem: Processos e Metalurgia**. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda. 1992.

ZEEMANN, A. **Diluição**. 2003 Disponível em: <http://www.infosolda.com.br/images/Downloads/Artigos/metaldiluio.pdf>. Acesso em: 22 abril de 2016.

## ANEXO 1 - Aplicação dos aços inoxidáveis em diferentes meios corrosivos

AÇO	ATMOSFERA BRANDA E ÁGUAPURA	ATMOSFERA AGRESSIVA		ÁGUA SALGADA	MEIOS QUÍMICOS		
		INDUSTRIAL	MARINHA		BRANDO	OXIDANTE	REDUTOR
<b>AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS</b>							
201							
202							
205							
301							
302							
302B							
303							
303Se							
304							
304H							
304L							
304N							
S30430							
305							
308							
309							
309S							
310							
310S							
314							
316							
316F							
316H							
316L							
316N							
317							
317L							
321							
21H							
329							
330							
347							
347H							
348							
348H							
384							

AÇO	ATMOSFERA BRANDA E ÁGUAPURA	ATMOSFERA AGRESSIVA		ÁGUA SALGADA	MEIOS QUÍMICOS		
		INDUSTRIAL	MARINHA		BRANDO	OXIDANTE	REDUTOR
<b>AÇOS INOXIDÁVEIS FERRÍTICOS</b>							
405							
409							
429							
430							
430F							
430FSe							
434							
436							
442							
446							
<b>AÇOS INOXIDÁVEIS MARTENSÍTICOS</b>							
403							
410							
414							
416							
416Se							
420							
420F							
422							
431							
440A							
440B							
440C							

## ANEXO 2 – Cálculo de Diluição

Amostra soldada com gás C-25

$$A1(C25) = \pi c a /4 \rightarrow A1(C25) = 11,00 \times 1,95 \pi /4 = 16,85\text{mm}^2$$

$$A2(C25) = \pi c b /4 \rightarrow A2(C25) = 11,00 \times 1,50 \pi /4 = 12,96\text{mm}^2$$

$$\text{Diluição (\%)} = \frac{A2(C25)}{A1(C25)+A2(C25)} \times 100 \Rightarrow \frac{12,96}{16,85 + 12,96} \times 100 = 43,47\%$$

Amostra soldada com gás CO<sub>2</sub>

$$A1(\text{CO}_2) = \pi c a /4 \rightarrow A1(\text{CO}_2) = 13,00 \times 2,05 \pi /4 = 20,93\text{mm}^2$$

$$A2(\text{CO}_2) = \pi c b /4 \rightarrow A2(\text{CO}_2) = 13,00 \times 1,75 \pi /4 = 17,87\text{mm}^2$$

$$\text{Diluição (\%)} = \frac{A2(\text{CO}_2)}{A1(\text{CO}_2)+A2(\text{CO}_2)} \times 100 \Rightarrow \frac{17,87}{20,93 + 17,87} \times 100 = 46,06\%$$