



**Edital 009/2019 Apoio a Projetos de Pesquisa do  
IFC – CAMPUS LUZERNA**

## PROJETO PESQUISA

Desenvolvimento de processo e elaboração de procedimentos visando-se à homologação de consumíveis de solda para revestimento de caracol para aplicações em meios predominantemente corrosivos.

### Equipe

**Bolsista IC:** Diego Becker

**Coordenador:** Prof Aloysio A. B. Fogliatto, Dr. Eng.

**Professores colaboradores:** Prof Haroldo Gregório De Oliveira e Prof Mario Wolfart Jr.

# Objetivo Geral

---

Desenvolver melhorias no processo de revestimento da rosca sem fim helicoidal de um decanter centrífugo por meio do processo de soldagem FCAW (Flux Cored Arc Welding), visando-se obter procedimentos e parâmetros apropriados para a deposição de revestimentos metálicos com resistência à corrosão e diluição adequadas.

# Objetivos Específicos

---

- Desenvolver procedimentos e parâmetros para deposição de revestimento metálico em aço inoxidável com resistência à corrosão e diluição adequadas.
- Estudar os ambientes de corrosão aos quais o caracol é submetido e compreender os fenômenos que podem ocasionar reações de corrosão e/ou oxidação nas soldas de revestimentos.
- Caracterizar as soldas de revestimento por meio de ensaios qualitativos e quantitativos de corrosão.
- Elaborar artigo(s) técnico-científico(s).

# Revestimento Metálico em Aços Inoxidáveis Austeníticos

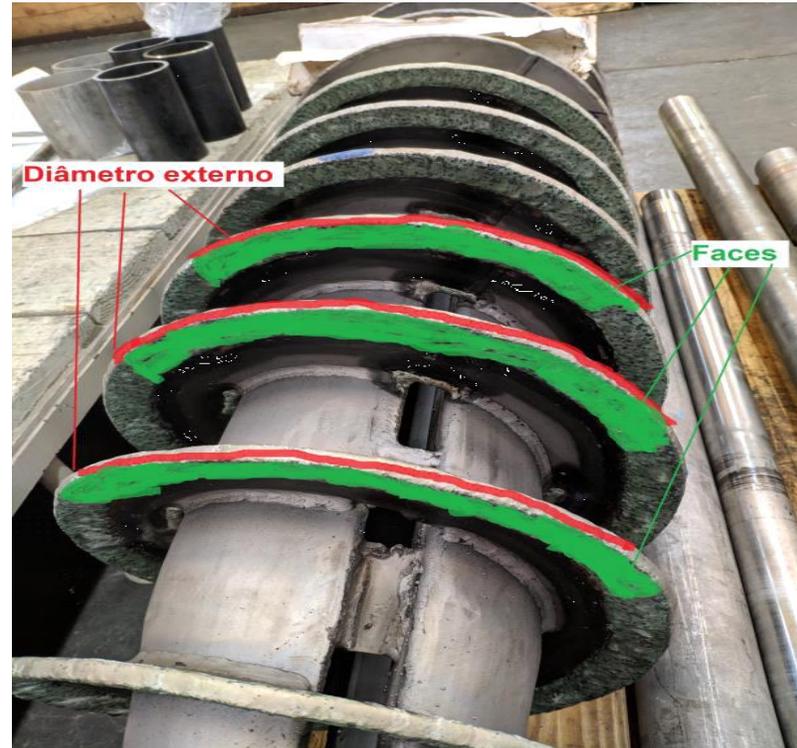


Figura 1: Caracol da empresta FAST a ser soldado

# Características e Tipos dos Aços Inoxidáveis

---

São chamados de aços inoxidáveis as ligas ferrosas que possuem as características a seguir [1]:

- Alta resistência à corrosão;
- Resistência mecânica elevada;
- Facilidade de limpeza/Baixa rugosidade superficial;
- Aparência higiênica/ Forte apelo visual ;
- Material inerte;
- Facilidade de conformação/ União;
- Material reciclável.

# Características e Tipos dos Aços Inoxidáveis

---

Modenesi [2] divide os aços inoxidáveis em quatro classes principais:

## 1. Aços inoxidáveis martensíticos:

- Ligas de Fe-Cr-C contendo entre 12 e 18% de cromo e entre 0,1 e 0,5 de carbono.
- Devido a este alto teor de liga possuem uma elevada temperabilidade e podem possuir uma estrutura completamente martensítica.
- Exemplos: AISI 410, AISI 420 e AISI 440A/B/C.

# Características e Tipos dos Aços Inoxidáveis



Figura 2: Matriz de aço inoxidável martensítico

Fonte: [3]

# Características e Tipos dos Aços Inoxidáveis

---

## 2. Aços Inoxidáveis Ferríticos:

- Ligas de Fe-C predominantemente ferríticas em qualquer temperatura até sua fusão.
- Possuem entre 12 e 30% de cromo e um baixo teor de carbono.
- Exemplos: AISI 405, AISI 409, e AISI 430.

# Características e Tipos dos Aços Inoxidáveis

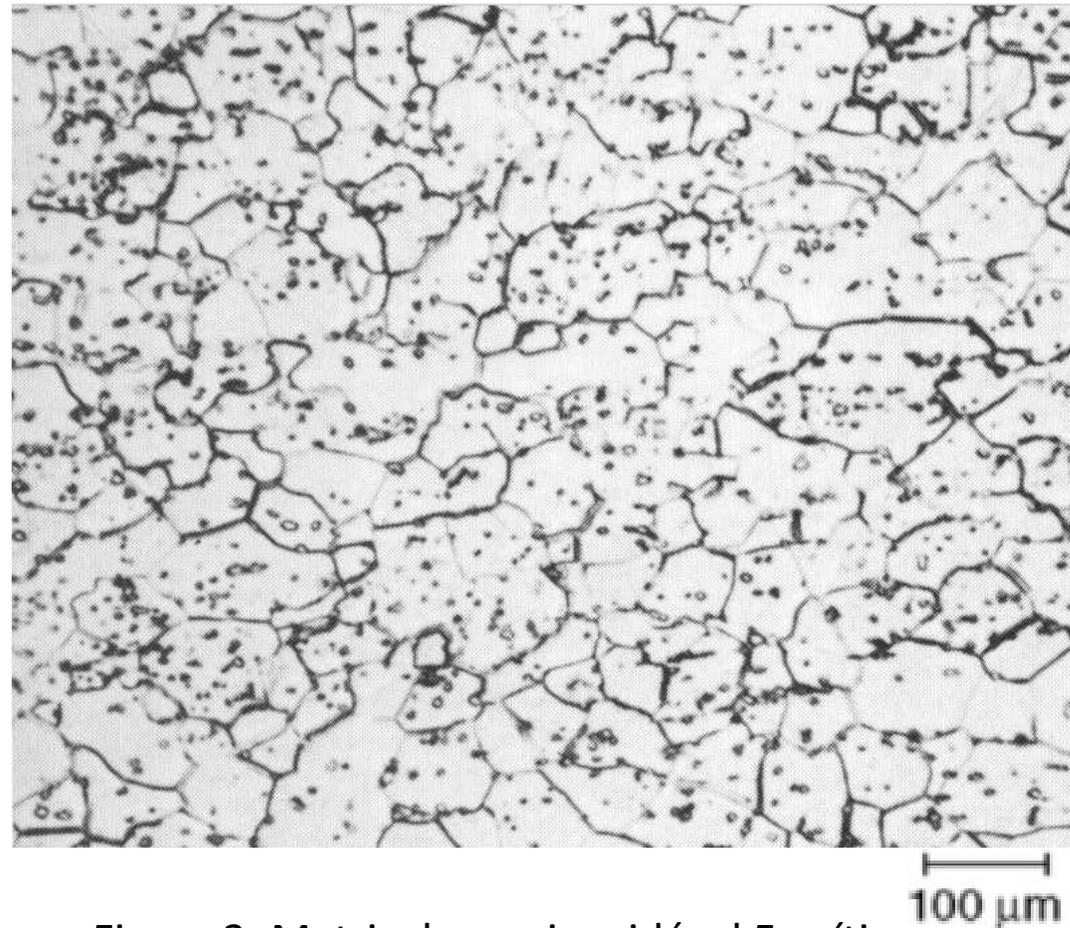


Figura 3: Matriz de aço inoxidável Ferríticos

Fonte: [3]

# Características e Tipos dos Aços Inoxidáveis

---

## 3. Aços Inoxidáveis Austeníticos:

- Ligas principalmente de Fe-Cr-Ni, entretanto existem ligas em que parte ou todo o níquel seja substituído por manganês e nitrogênio.
- Estes aços apresentam estrutura predominantemente austenítica.  
AISI 301, AISI 308, AISI 308L e AISI 330.

# Características e Tipos dos Aços Inoxidáveis



Figura 4- Matriz de um aço inoxidável austenítico

Fonte: [3]

# Características e Tipos dos Aços Inoxidáveis

---

## 4. Aços Inoxidáveis Duplex:

- Possuem entre 18 e 30% de Cr, 1,5 a 4,5% de Mo;
- Também possuem elementos capazes de estabilizar a austenita, para com isto possuir uma microestrutura, à temperatura ambiente, formada por partes iguais de austenita e ferrita.
- Exemplos: S31803, S30403, S31603 e N 08904.

$\gamma$

$\alpha$

# Características e Tipos dos Aços Inoxidáveis

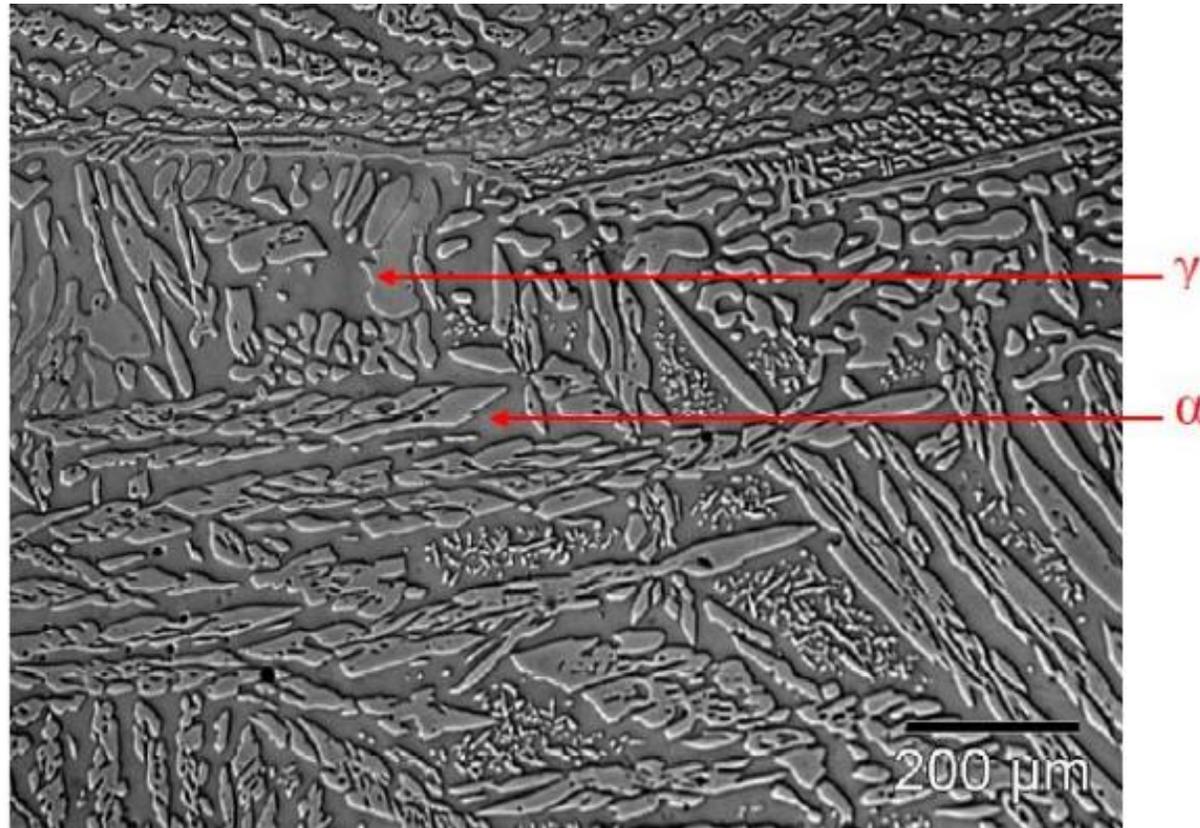


Figura 5: Micrografia ótica de aço inoxidável duplex, evidenciando as ilhas de austenita ( $\gamma$ ) presentes na matriz ferrítica ( $\alpha$ )

Fonte: [3]

# Metal de Base

---

- Para este trabalho, o metal de base é um aço inoxidável austenítico AISI 304, que apresenta a seguinte composição:

C	Cr	Ni	Mn	Si
0,08%	18-20%	8-11%	máx 2%	máx 1%

Tabela 1-Composição do Aço AISI 204

# Características e Tipos dos Aços Inoxidáveis

---

- Representam 70% dos aços inoxidáveis produzidos;
- Ligas de Fe-Cr-Ni;
- Microestrutura predominantemente austenítica;
- Baixo limite de escoamento, limite de resistência alto e elevada ductilidade mesmo em temperatura ambiente;
- Apresentam boa soldabilidade e resistência a corrosão;
- Normalmente utilizados na indústria alimentícia, química, refino de petróleo, entre outros [2].

# Soldabilidade dos Aços Inoxidáveis Austeníticos

No diagrama pseudo-binário do sistema Fe-Cr-Ni com 70% de Fe e com diferentes quantidades de Cr e Ni, nota-se a presença das fases:

- $\gamma$ , que corresponde a austenita;
- $\delta$ , que corresponde a ferrita e
- $\sigma$ , que corresponde a uma fase constituída por FeCr.

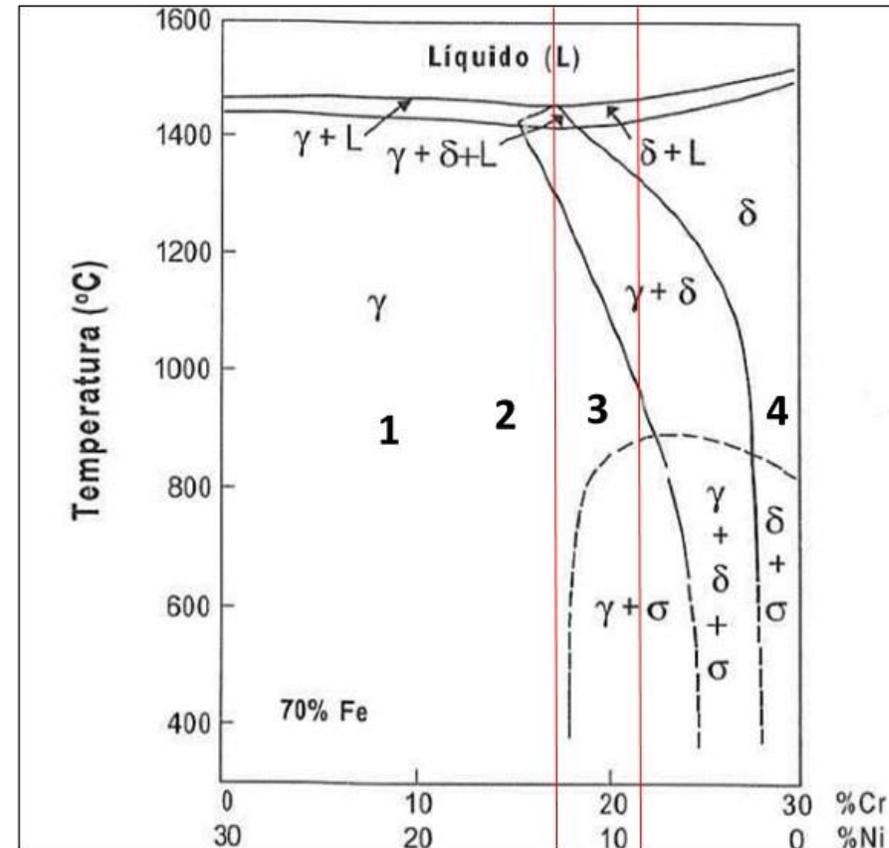


Figura 6- Diagrama pseudo-binário do sistema Fe-Cr-Ni com 70% de Fe

Fonte: Modenesi [2]

# Soldabilidade dos Aços Inoxidáveis Austeníticos

Segundo Padilha e Guedes [4], a solidificação de um aço inoxidável austenítico ocorre por meio de quatro modos, que variam de acordo com a sua composição química e da velocidade de resfriamento:

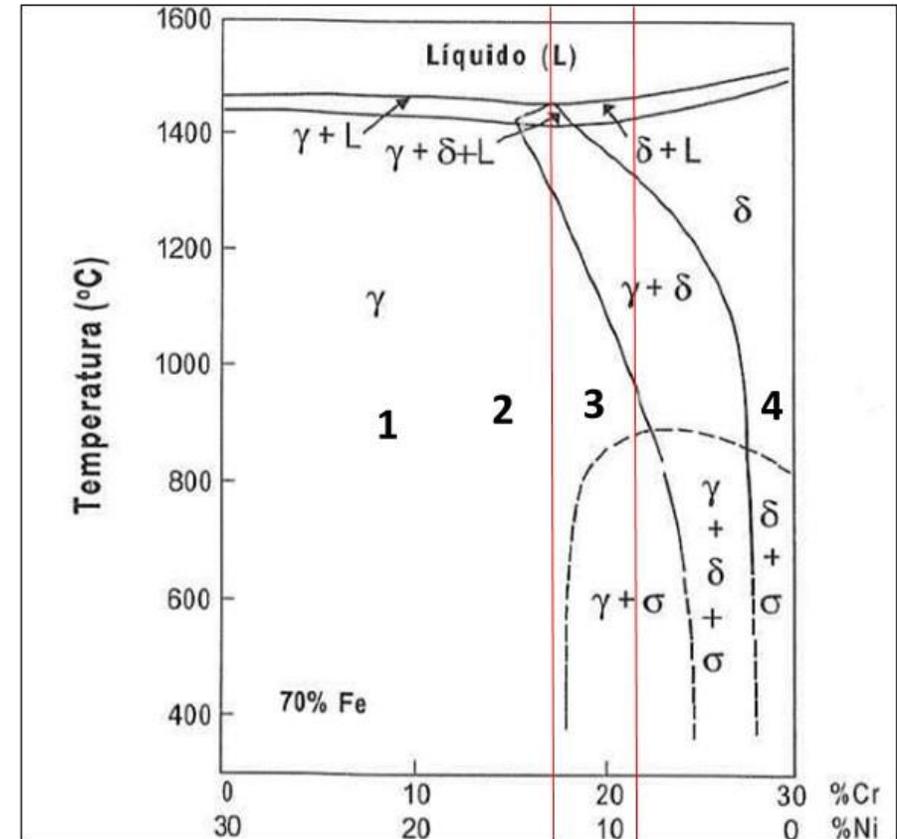


Figura 7- Diagrama pseudo-binário do sistema Fe-Cr-Ni com 70% de Fe

Fonte: Modenesi [2]

# Soldabilidade dos Aços Inoxidáveis Austeníticos

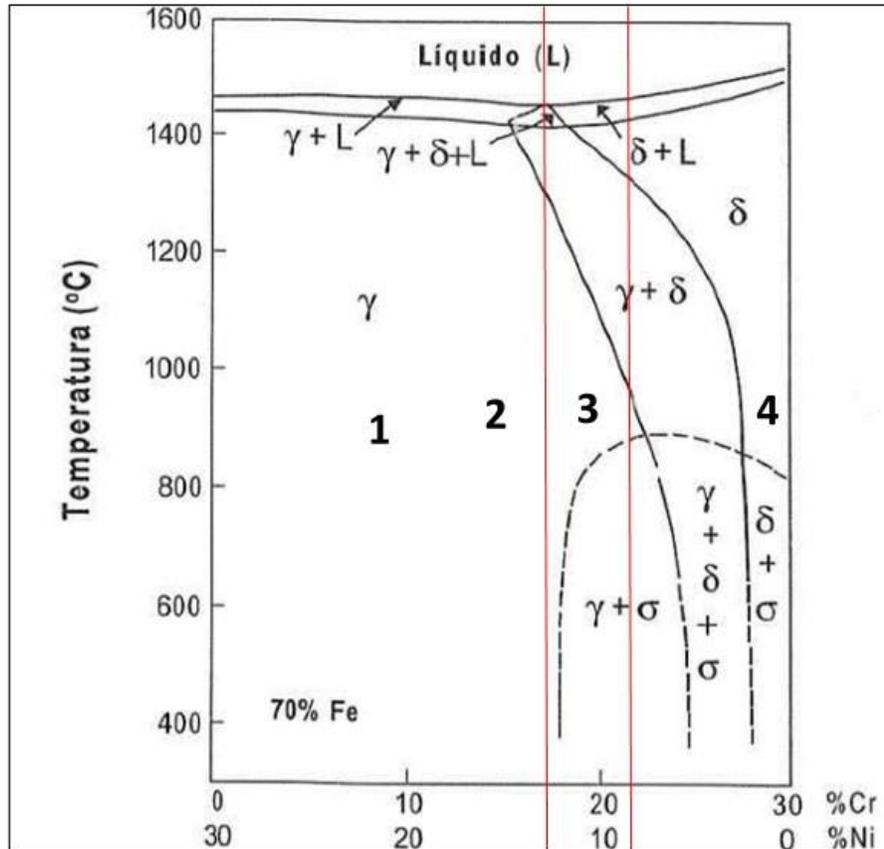


Figura 8- Diagrama pseudo-binário do sistema Fe-Cr-Ni com 70% de Fe

Fonte: Modenesi [2]

1. A solidificação começa a partir da formação de dendritas de austenita e ao final da solidificação apresenta apenas esta fase.
2. A solidificação começa a partir da formação de dendritas de austenita e ao decorrer da solidificação há a formação de ferrita.
3. A solidificação começa a partir da formação de dendritas de ferrita e ao decorrer da solidificação há a formação de austenita.
4. A solidificação começa a partir da formação de dendritas de ferrita e ao final da solidificação apresenta apenas esta fase.

# Soldabilidade dos Aços Inoxidáveis Austeníticos

---

Apesar de apresentarem uma boa soldabilidade, cuidados devem ser tomados na soldagem destes aços, devido às sequências possíveis de solidificação, pois podem ocorrer problemas como:

- Fissuração;
- Corrosão galvânica;
- Corrosão intergranular.

# Metal de Adição

O revestimento da rosca sem fim helicoidal, produzida pela empresa é realizado pelo processo de soldagem oxi-acetilênica, utilizando o consumível Eutectic Elastodur 7888T.

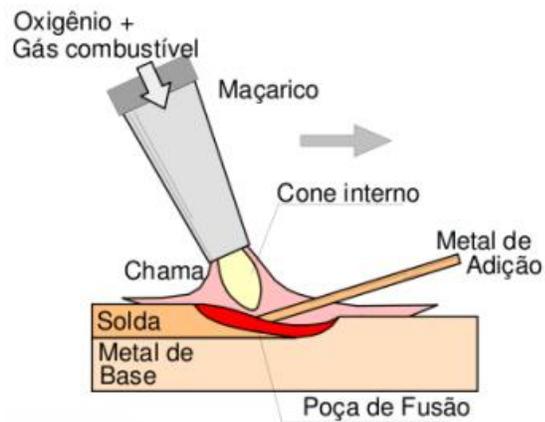


Figura 9- Soldagem Oxi-acetilênica  
Fonte: Modenesi [6]



Figura 10- Soldagem atual, Oxi-acetilênica  
Fonte: Empresa FAST.

# Metal de Adição

---

Entretanto a empresa busca substituir este processo pelo processo de soldagem *GMAW/FCAW*. Neste projeto busca-se explorar novas modalidades do processo de soldagem, envolvendo:

- Técnicas
- Procedimentos
- Parâmetros para a deposição de revestimentos metálicos.

# Metal de Adição

---

Conseqüentemente à alteração do processo, existe a necessidade da substituição do metal de adição.

Seguindo-se a mesma lógica dos metais de base, normalmente são utilizados arames com ligas de:

- Cromo;
- Níquel;
- Molibdênio;
- Ligas de elementos nobres, que irão proporcionar um revestimento resistente à abrasão e aos tipos de corrosão citados anteriormente.

# Metal de Adição

Algumas possibilidades já foram pré-selecionadas para aprimorar o processo de revestimento da rosca sem fim, além de fazer uma economia de custos, como por exemplo:

- **Arame tubular AWS 5.21 ERCCoCr-A**, tendo sua composição química na Tabela 2.

C	Mn	Si	Cr	W	Fe	Ni	Co	Mo	OET
0,7-1,4	2,0 máx	2,0 máx	25-32	3,0 - 6,0	5,0 máx	3,0 máx	Balanço	1,0 máx	1,0 máx

Tabela 2-Composição Química do arame tubular AWS 5.21 ERCCoCr-A  
Fonte: WELD-INOX[6].

# Metal de Adição

- **Arame AWS/ASME SFA 5.22 E 308L T1 ¼;**
- Tratando-se de um arame contínuo tubular “Flux cored” com baixo teor de carbono;
- Indicado para soldagem de aços inoxidáveis, o depósito de solda resiste à corrosão intergranular e pode ser submetido a baixas temperaturas de trabalho, tendo sua composição química na Tabela 3.

C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S	Cu
0,04 Máx.	18,0-21,0	9,0-11,0	0,75 Máx.	0,50-2,50	1,00 Máx.	0,04 Máx.	0,03 Máx.	0,75 Máx.

Tabela 3 - Composição química do AWS/ASME SFA 5.22 E 308L T1 ¼

Fonte: WELD-INOX[6].

# Metal de Adição

- Utilizando-se dados como a composição química tanto do metal de base (MB) como do metal de adição (MA) e a diluição, é possível estimar a porcentagem de ferrita que a zona fundida apresentará por meio do Diagrama de Schaeffler.

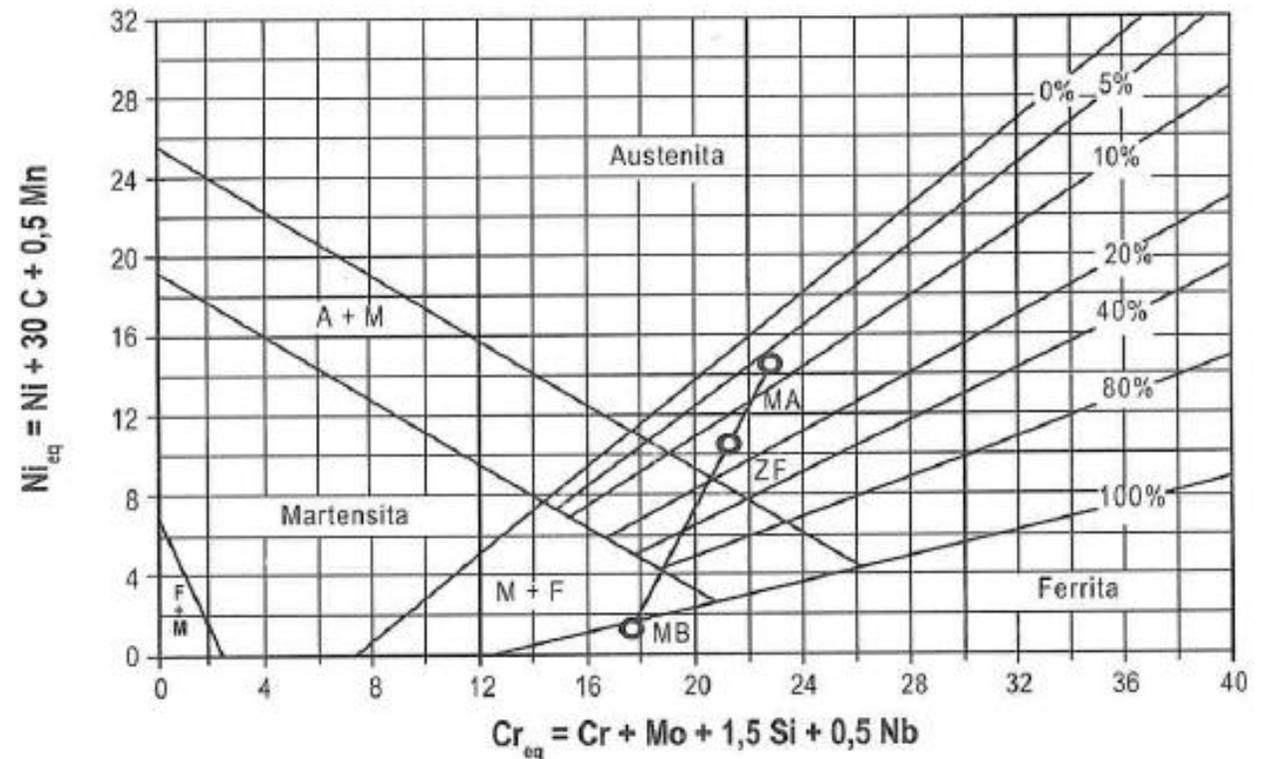


Figura 11- Diagrama de Schaeffler

Fonte: Modenesi [2]

# Metal de Adição

---

- Segundo Modenesi [2] quando o processo e o metal de adição não são os adequados para a soldagem, juntamente com um meio oxidante, a corrosão ocorre de forma prematura.
- Esta corrosão ocorre a partir dos mecanismos químicos devido ao meio ao qual está em serviço, e eletroquímicos quando o processo e o metal de adição não estão adequados.

# Corrosão

---

Gentil [8] afirma que no processo de corrosão são considerados:

- Reações químicas heterogêneas;
- Reações eletroquímicas, que geralmente ocorrem na superfície de separação entre o metal e o meio corrosivo.

# Corrosão

---

- Materiais metálicos, como o aço inoxidável austenítico, estão sujeitos à deterioração devido a fatores físico-químicos que determinam que sistemas pouco estáveis energeticamente tendem a sofrer transformações que os levam a patamares de maior estabilidade, ou seja, levando ao menor nível energético possível, menor energia livre de Gibbs [8, 9].

# Corrosão

---

Gentil [8] assegura que pode-se ter corrosão segundo:

1. A morfologia;
2. As causas ou mecanismos;
3. Os fatores mecânicos;
4. O meio corrosivo;
5. A localização do ataque;

# Corrosão

---

## 1. A morfologia:

- Uniforme, por placas, alveolar, puntiforme ou por pite, intragranular (ou cristalina), intragranular (ou transgranular ou transcristalina), filiforme, por esfoliação, grafítica, dezincificação, em torno de cordão de solda e empolamento pelo hidrogênio.

# Corrosão

---

## 2. As causas ou mecanismos;

- Por aeração diferencial, eletrolítica ou por correntes de fuga, galvânica, associada a solicitações mecânicas (corrosão sob tensão fraturante), em torno de cordão de solda, seletiva (grafítica e dezincificação), empolamento ou fragilização pelo hidrogênio.

# Corrosão

---

## 3. Os fatores mecânicos:

- Sob tensão;
- Sob fadiga;
- Por atrito, associada à erosão.

# Corrosão

---

## 4. O meio corrosivo:

- Atmosfera;
- Pelo solo, induzida por microrganismos, pela água do mar, por sais fundidos, etc;

# Corrosão

---

## 5. A localização do ataque;

- Por pite;
- Uniforme;
- Intergranular;
- Transgranular.

# Corrosão

Gentil [8] define alguns tipos de corrosão como:

- **Uniforme;**
- **Por placas;**
- **Alveolar;**
- **Puntiforme ou por pite.**

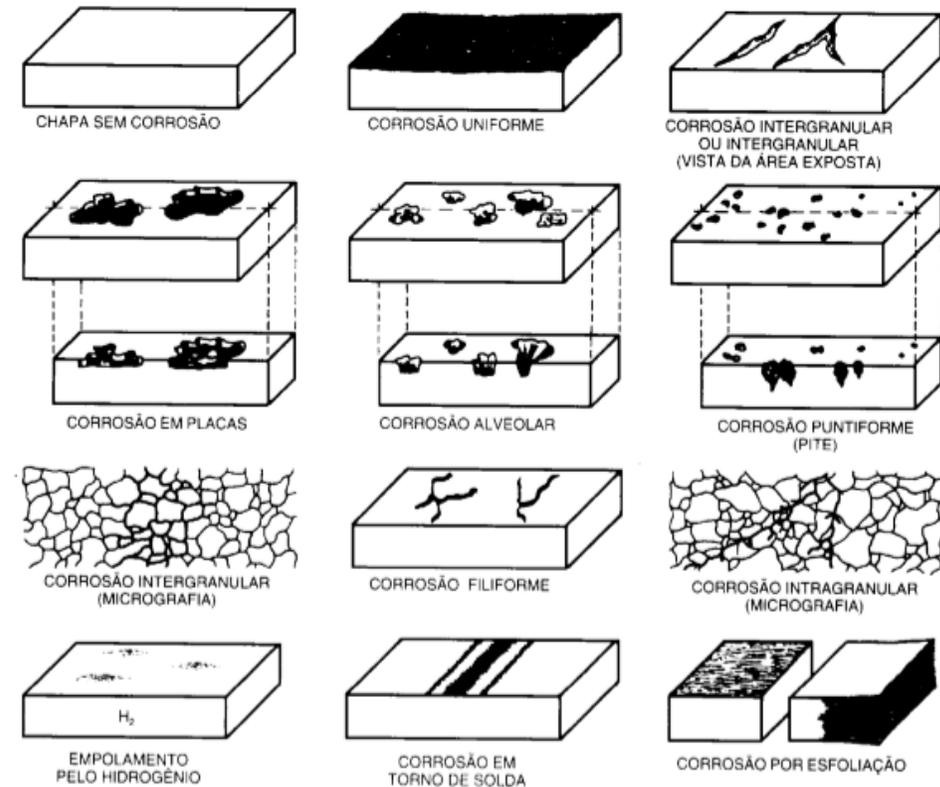


Figura 12-Tipos de Corrosão

Fonte Gentil [8]

# Corrosão

---

- Segundo Callister e Rethwisch [9], para os materiais metálicos, o processo de corrosão é normalmente eletroquímico, isto é, uma reação química na qual existe uma transferência de elétrons de um componente químico para outro.

# Trabalhos relacionados

---

Melo *et al* [10] verificaram o efeito do processo de soldagem na microestrutura, microdureza e composição química de revestimentos de aço inoxidável aplicados pelo processo ao arco elétrico com arame tubular (FCAW-Flux Cored Arc Welding) e ao arco submerso (SAW – Submerged Arc Welding).

- Metal de base ASTM A36;
- Metal de adição, Arame AWS E 308 L T1;
- Inclinação da tocha ( $\theta=15^\circ$  com a vertical), sentido de soldagem “empurrando”;
- Sobreposição no revestimento de 1/3 em relação à largura do primeiro cordão.

# Trabalhos relacionados

Estes autores concluíram que a composição química variou de acordo com alguns parâmetros, como:

- Tensão;
- Velocidade de alimentação.

Sendo que velocidades maiores resultaram em maiores valores de Cromo equivalente, entretanto para menores valores de tensão resultaram em menores valores de Níquel equivalente.

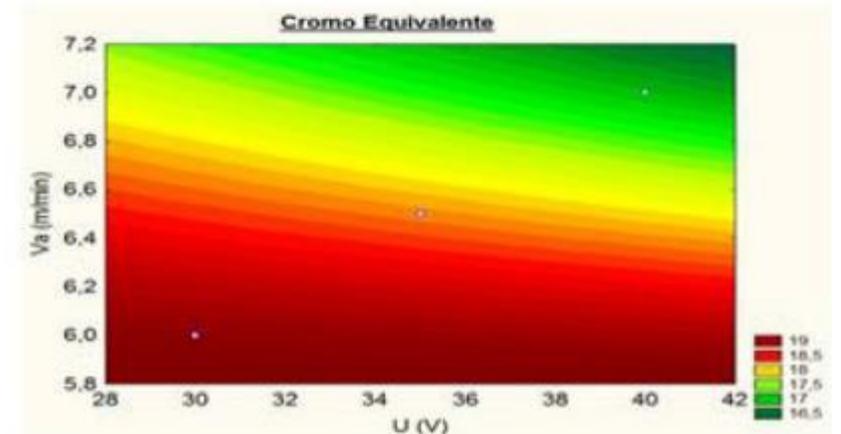
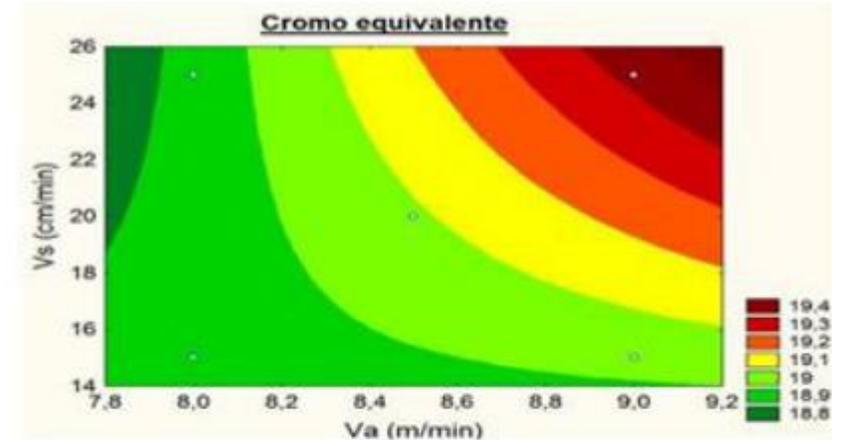


Figura 13-Cr Equivalente vs.  $V_a$ (m/mm) e  $U$ (V)

Fonte: Melo *et al* [10]

# Trabalhos relacionados

---

- A microestrutura observada no metal de solda de forma geral foi austenítica com ferrita delta em espinha e laminar, entretanto, a fração volumétrica de ferrita delta foi influenciada pela energia de soldagem, ou seja, quanto maior a energia maior a fração volumétrica.

# Trabalhos relacionados

---

Baumgaertner Filho e Gonzalez [11] investigaram os efeitos dos parâmetros da polaridade negativa da curva de corrente no resultado da diluição dos cordões de solda no processo de soldagem MIG/MAG polaridade variável, visando buscar um conjunto de parâmetros que ofereça uma menor diluição, os quais são fundamentais para soldagem para revestimento.

- Metal de Base Aço SAE 1020;
- Metal de adição um aço inoxidável ER308LSi;
- Gás de proteção Ar + 2%O<sub>2</sub>.

# Trabalhos relacionados

Visando um maior entendimento dos efeitos da polaridade negativa no processo, três parâmetros de controle variaram em três níveis, sendo eles:

- Corrente negativa ( $I_n$ );
- Tempo na polaridade negativa ( $T_n$ );
- Tempo de base positiva ( $T_b$ ).

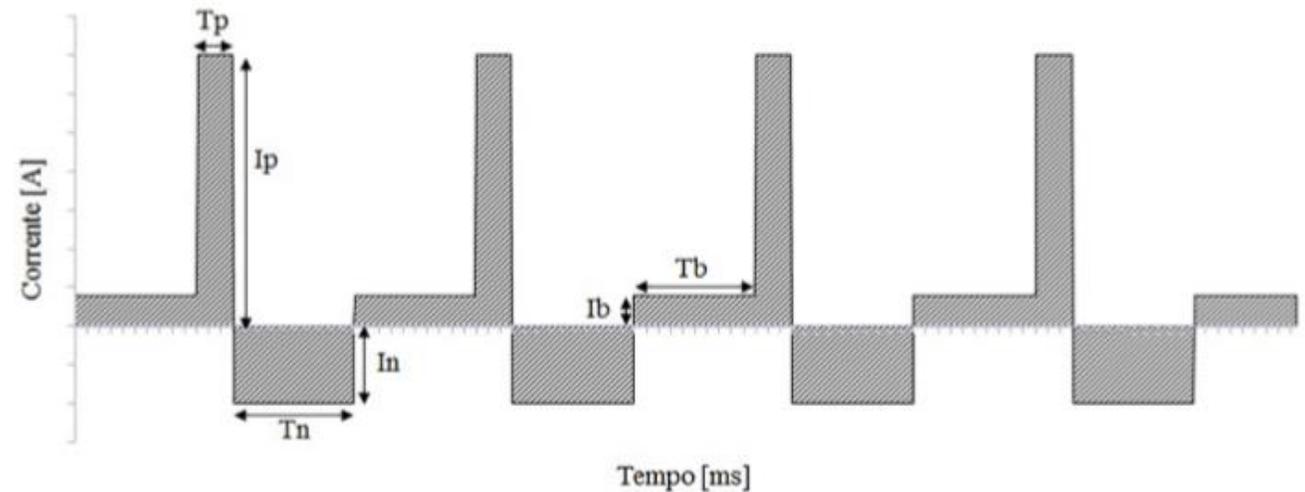


Figura 14-Curva de Corrente MIG/MAG Polaridade Variável

Fonte: Baumgaertner Filho e Gonzalez [11]

# Trabalhos relacionados

- Estes pesquisadores concluíram que neste processo foi possível obter uma diluição no intervalo entre 12% e 15%, estando de acordo com o recomendado para revestimentos utilizando o processo de soldagem.
- A corrente negativa em seu menor nível resultou em menores níveis de diluição.



Figura 15-Grafico da Diluição para cada ensaio.

Fonte: Baumgaertner Filho e Gonzalez [11]

# Trabalhos relacionados

---

De Souza [12] avaliou os mecanismos eletroquímicos de corrosão em aços inoxidáveis austeníticos AISI 304 e AISI 316 em meio salino. Seus estudos tiveram como objetivo avaliar a relação eletroquímica entre três materiais diferentes imersos em uma solução salina, sendo:

- Aço carbono AISI 1020 – material de referência;
- Aço inoxidáveis AISI 304;
- Aço inoxidáveis AISI 316.

# Trabalhos relacionados

---

- Estas amostras foram imersas em uma solução de NaCl a 0,5M, tendo 1cm<sup>2</sup> de área exposta. De Souza, com base nos resultados, verificou que o aço carbono AISI 1020 é menos resistente de todos à corrosão.
- Verificou que o mecanismo de corrosão predominante foi do tipo por pite.
- Tendo concluído que o aço AISI 316 teve melhor desempenho diante do mecanismo de degradação observado.

# Referências Bibliográficas - Imagens

---

- [1] ACESITA, Página na INTERNET: <http://www.acesita.com.br>
- [2] MODENESI, Paulo J. Soldabilidade dos Aços Inoxidáveis. São Paulo, SENAI-SP, 2001. 100 p. ;il. (Coleção Tecnologia da Soldagem Vol.1).
- [3] ASM METALS HANDBOOK, vol. 9. Metallography and Microstructure, 2004.
- [4] PADILHA, Angelo Fernando; GUEDES, Luis Carlos. **AÇOS INOXIDÁVEIS**: austeníticos. Curitiba: Hemus, 2004. 170 p.
- [5] MODENESI, Paulo J. Soldabilidade dos Aços Inoxidáveis. São Paulo, SENAI-SP, 2001. 100 p. ;il. (Coleção Tecnologia da Soldagem Vol.1).
- [6] WELD-INOX: WI TUB SB 308L T1 1/4. WI TUB SB 308L T1 1/4. 2020. Disponível em: <http://www.weldinox.com.br/produto-informacoes?id=382>. Acesso em: 21 maio 2020.
- [7] MOREIRA, Rogaciano Maia. Avaliação da Resistência à Corrosão dos Aços Inoxidáveis 13Cr e 13Cr-5Ni-2Mo em Meios Úmidos de CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S Presentes em Colunas de Produção de Petróleo. 2014. 202 f. Tese (Doutorado) - Curso de Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/86858>. Acesso em: 14 maio 2020.
- [8] GENTIL, Vicente. Corrosão. 3. ed. Rio de Janeiro: Abdr, [1995]. ABDR.

# Referências Bibliográficas - Imagens

---

[9] CALLISTER, W. D. Jr., RETHWISCH, D. G. Fundamentos da ciência e engenharia de materiais: uma abordagem integrada. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015. [15] MELO, R. H. F. de et al. Efeito do processo de soldagem na microestrutura, microdureza e composição química de revestimentos de aço inoxidável aplicados por soldagem. Revista Eletrônica de Materiais e Processos, Online, v. 3, n. 7, p. 192-204, fev. 2012. Anual. Disponível em: [www.dema.ufcg.edu.br](http://www.dema.ufcg.edu.br). Acesso em: 21 maio 2020.

[10] BAUMGAERTNER FILHO, Alexandre José; GONZALEZ, Arnaldo Ruben. Estudo dos Parâmetros de Polaridade Negativa na Soldagem MIG/MAG Polaridade Variável para Revestimento. Soldagem & Inspeção, [s.l.], v. 22, n. 1, p. 46-58, mar. 2017. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0104-9224/si2201.0>

[11]BAUMGAERTNER FILHO, Alexandre José; GONZALEZ, Arnaldo Ruben. Estudo dos Parâmetros de Polaridade Negativa na Soldagem MIG/MAG Polaridade Variável para Revestimento. Soldagem & Inspeção, [s.l.], v. 22, n. 1, p. 46-58, mar. 2017. FapUNIFESP (SciELO).

[12] DE SOUZA, Lídia Beatriz Oliveira, “Avalização eletroquímica do mecanismo de corrosão dos aços