

VAZIL SCHAPOWAL FILHO

**SOLDAGEM DE MANUTENÇÃO DO MATERIAL
ASTM A-240 TP 304H, NA CONDIÇÃO ENVELHECIDO EM
OPERAÇÃO, UTILIZANDO OS PROCESSOS
DE SOLDAGEM GTAW+SMAW COM OS CONSUMÍVEIS
308H E 347.**

Monografia apresentada ao Programa de
Educação Continuada em Engenharia da Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
Conclusão de curso de Especialização.

São Paulo
Março / 2016

VAZIL SCHAPOWAL FILHO

**SOLDAGEM DE MANUTENÇÃO DO MATERIAL
ASTM A-240 TP 304H, NA CONDIÇÃO ENVELHECIDO EM
OPERAÇÃO, UTILIZANDO OS PROCESSOS
DE SOLDAGEM GTAW+SMAW COM OS CONSUMÍVEIS
308H E 347.**

Monografia apresentada ao Programa de
Educação Continuada em Engenharia da Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
conclusão de curso de Especialização.

Área de Concentração: Engenharia de Soldagem
Orientador: Prof. Eng. Me. David Bellentani Rocha

São Paulo
Março / 2016

DEDALUS - Acervo - EPMT



31800009291

MBA/SO

2016

Sci 115

2803751

m 20.16 D

FICHA CATALOGRÁFICA

Soldagem de manutenção do material ASTM A-240 TP 304H, na condição envelhecido em operação, utilizando os processos de soldagem GTAW+SMAW com os consumíveis 308H e 347./ v.s. filho. -São Paulo, 2016.

84pp.

Monografia - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.
1. Soldagem 2. Aço Inox TP 304H 3.: Envelhecido. 4. Sensitizado
Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais II. t.

*“Tudo aquilo que o homem ignora não existe para ele.
Por isso o universo de cada um se resume ao tamanho do seu saber”
Albert Einstein.*

DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho aos meus filhos Eric e Yuri e também para
meus professores e orientadores.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me dado forças e saúde para elaboração deste trabalho.

Agradeço aos meus pais por terem me incentivado nos estudos.

Ao professor Dr. Sergio Duarte Brandi pelos conselhos e orientação no desenvolvimento do trabalho.

Ao professor Eng. Me. David Bellentani Rocha pelos conselhos e orientação no desenvolvimento do trabalho.

À empresa SUED pela doação dos materiais e a disposição do pessoal.

À todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

O material ASTM A240 TP-304 H, com o teor de carbono na faixa de 0,04 – 0.10%.com estrutura austenítica e são amplamente utilizados na construção de peças, equipamentos e componentes em indústrias do setor mecânica, químico, petroquímico, térmico, devido, em especial, à sua notável resistência à oxidação e propriedades mecânicas a alta temperatura. O objetivo deste trabalho é estudar a soldagem de manutenção sem a prévia solubilização e com restrição de deformação do aço inoxidável austenítico ASTM A-240 TP304H, na condição envelhecido em operação, comparando-se os consumíveis 308H e 347 com os processos de soldagem GTAW na raiz e SMAW no enchimento e acabamento. As juntas foram caracterizadas utilizando-se: análise química, metalografia e ensaios mecânicos tais como dobramento, tração à temperatura ambiente e tração a quente, ensaio de corrosão ASTM A262 prática A, determinação de ferrita delta e fase sigma. Foram utilizados como referência os requisitos técnicos das normas ASME Sec IX, Sec II Parte C, Sec II Parte D.

Foram soldados 4 corpos de prova utilizando metais de base no estado envelhecido em operação e 2 na condição novo como fornecido para efeito de comparação. Os consumíveis utilizados na soldagem dos corpos de prova foram ER308H, ER347, E308H-17 e E347-17.

Os resultados dos ensaios mostram que os parâmetros e técnica empregadas foram eficazes para a soldagem dos corpos de prova onde obteve-se resultados satisfatórios para os dois consumíveis de soldagem. Foi observado que o consumível de soldagem 347 supera em 22% os valores de resistência à tração a quente (800°C) em comparação com o consumível 308H.

Palavras-chave: Soldagem, 304H ,Fase sigma, Ferrita delta.

ABSTRACT

The ASTM A240 TP-304H material, with the carbon content in the range of 0.04 - 0.10 with austenitic structure are widely used in the construction of parts, components and equipment in mechanical, chemical, petrochemical industries, due in particular to their outstanding oxidation resistance and mechanical properties at high temperature. The objective of this study is the welding without prior solubilization treatment and deformation restriction of austenitic stainless steel ASTM A-240 TP304H in aged condition in operation, comparing the consumables 308H and 347 with the GTAW welding process in root and SMAW in the filling and finishing. The joints were characterized using up: chemical, metallographic and mechanical tests such as bending, tensile at room temperature and tensile at hot (800°C), corrosion test ASTM A262 Practice A, determination of delta ferrite and sigma phase. Were used as reference the technical requirements of ASME Section IX standards, Section II Part C, Section II Part D.

Four weld specimens were using base metals in the aged state in operation and two in new condition as provided for comparison purposes. The consumables used in welding the test pieces were ER308H, ER347, E308H-17 and E347-17.

The test results show that the parameters employed and technique were effective for the welding of test specimens which obtain satisfactory results for both welding consumables. It was observed that the welding consumable 347 exceeds by 22% the tensile strength values of hot (800°C) compared to the consumable 308H.

Keywords : Welding, 304H, Sigma Phase, Delta Ferrite.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	ii
AGRADECIMENTOS.....	iii
RESUMO	iv
ABSTRACT	v
LISTA DE FIGURAS:.....	viii
LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS	xii
1.0 Introdução e justificativa	1
2.0– Objetivo:.....	3
3.0– Revisão Bibliográfica	3
3.1 Aços inoxidáveis.....	3
3.2 Aços inoxidáveis martensíticos	4
3.3 Aços inoxidáveis ferríticos.....	5
3.4 Aços Inoxidáveis Austeníticos.....	6
3.5 Comparação 304H <i>versus</i> 304.....	9
3.6– Consumíveis de soldagem.....	10
3.7 Soldagem do aço Inoxidáveis	13
3.7.1 Solidificação das ligas do sistema Fe-Cr-Ni	14
3.7.2 Sequência de solidificação da solda.....	15
3.7.3 Influência da composição química (Diagramas de Schaeffler e de Delong).....	19
3.8 Precipitação de Carbonetos / Sensitização	22
3.9 Tensões admissíveis em função de material e temperatura:	24
3.10.1 Características:	26
3.11 Processo de soldagem GTAW.....	27
3.12 Soldagem de manutenção	28
4. Materiais e Métodos.....	29
4.1 Acompanhamento da soldagem.....	42
4.2 Ensaios Realizados:	50
5. Resultados e Discussão	50
5.1 Ensaios Macrográficos	50
5.2 Ensaios de tração à temperatura ambiente:	54

5.3 Ensaio de Dobramento.....	60
5.4 Ensaio de tração à quente:.....	61
5.5 Ensaio de Metalográficos	64
5.6 Ensaio de determinação do teor de Carbono:	75
5.7 Ensaio de medição de ferrita, antes e após tratamento térmico.....	76
5.8 Ataque metalográfico para determinação de fase sigma no metal de base e solda envelhecido:.....	77
6. Conclusões	80
Sugestões de trabalhos futuros	81
Bibliografia	82

LISTA DE FIGURAS:

Figura 1:Aços inoxidáveis austeníticos dos quais o 304 (18%Cr-8%Ni) é o mais popular. Detalhe (304H) (Carbó, 2001).....	9
Figura 2:Diagrama pseudo-binário Fe-Cr-Ni para um teor de 70% de ferro (Lippold, J. C., and Savage, W., 1979).....	15
Figura 3:Solidificação do tipo "A" totalmente austenítica (DAMIAN, LIPPOLD C. JOHN & KOTECK J., 2005).....	16
Figura 4 Resultado da microestrutura da zona de fusão para o tipo de solidificação AF / Ferrita Eutética (Katayama, 1985).....	17
Figura 5:Solidificação do tipo FA Ferrita / austenita (Katayama, 1985).....	18
Figura 6:Solidificação do tipo totalmente ferrítica (Katayama, 1985).....	18
Figura 7:Diagrama de Schaeffler (TWI Training & Examination Services, 2015).....	20
Figura 8:Diagrama de De Long - diagrama de constituição modificado para metais de solda de aço inoxidável (A.F., PADILHA; C., GUEDES L., 1994).....	21
Figura 9:Mostra-se uma curva temperatura-tempo-sensitização para os aços 304 com diferentes conteúdos de carbono (Peckner, 1977).....	22
Figura 10:Precipitados em contorno de grão, exemplo da ASTM A262 prática A, sem um grão completamente rodeado (ASTM A-240, 2004).....	23
Figura 11:Precipitados em contorno de grão, exemplo da ASTM A262 prática A, com grãos completamente rodeados (ASTM A-240, 2004).....	24
Figura 12:Processo de soldagem SMAW (ESAB, 2015).....	26
Figura 13:Processo de soldagem GTAW (Esab, 2015).....	27
Figura 14:Local de retirada dos corpos de prova	31
Figura 15:Diagrama de Schaeffler entre Tipo 304H com metal de adição ER308H....	35
Figura 16:Diagrama de Schaeffler entre Tipo 304H com metal de adição E308H-17 .	36
Figura 17:Diagrama de Schaeffler entre Tipo 304H com metal de adição ER347.....	37
Figura 18:Diagrama de Schaeffler entre Tipo 304H com metal de adição E347-17	38
Figura 19:Diagrama de DeLong entre Tipo 304H com metal de adição ER308H.....	39
Figura 20:Diagrama de DeLong entre Tipo 304H com metal de adição E308H-17	40
Figura 21:Diagrama de DeLong entre Tipo 304H com metal de adição ER347	41
Figura 22:Diagrama de DeLong entre Tipo 304H com metal de adição E347-17.....	42
Figura 23:Croquis da preparação dos corpos de prova – CP1 a CP6.....	42
Figura 24: Soldador soldando os corpos de prova	43
Figura 25:Posição de soldagem 1G- Plana (ASME Section IX -American Society of Mechanical Engineers Welding and Brazing Qualifications,, 2013).....	43
Figura 26:Ensaio Macrografico realizado no CP1	51
Figura 27:Ensaio Macrografico realizado no CP2	51

Figura 28 :Ensaio Macrografico realizado no CP3	52
Figura 29: Ensaio Macrografico realizado no CP4	53
Figura 30: Local para remoção dos corpos de prova conforme ASME IX [21]	54
Figura 31: Dimensões da amostra conforme QW-462.1(a).[21]	55
Figura 32: Ensaio de tração realizado no CP1	55
Figura 33: Ensaio de tração realizado no CP2 (Tração 1).....	56
Figura 34: Ensaio de tração realizado no CP2 (Tração 2).....	57
Figura 35: Amostra do ensaio de tração do CP3– Tração1.....	57
Figura 36: Amostra do ensaio de tração do CP3 – Tração 2.....	58
Figura 37: Amostra do ensaio de tração do CP4– Tração1.....	58
Figura 38: Amostra do ensaio de tração do CP4– Tração2.....	59
Figura 39: Local de remoção do CP de tração a quente.	62
Figura 40:Amostra do ensaio de tração à quente do CP5.....	63
Figura 41:Amostra do ensaio de tração à quente do CP6.....	63
Figura 42:Microscópio óptico utiliza para análise micrográfica dos corpos de prova...	65
Figura 43:Análise Micrográfica no metal de base do CP1 (500X)	66
Figura 44:Análise Micrográfica na ZAC do CP1 (500X)	66
Figura 45:Análise Micrográfica na consumível de soldagem SMAW do CP1 (500X) .	67
Figura 46:Análise Micrográfica na consumível de soldagem GTAW do CP1 (500X)...	67
Figura 47: Análise Micrográfica no metal de base do CP2(500X)	68
Figura 48:Análise Micrográfica na ZAC do CP2(500X)	68
Figura 49:Análise Micrográfica na consumível de soldagem SMAW do CP2(500X) ..	69
Figura 50:Análise Micrográfica na consumível de soldagem GTAW do CP2 (500X)...	69
Figura 51:Análise Micrográfica no metal de base do CP3 (500X)	70
Figura 52:Análise Micrografica na ZAC do CP3.....	71
Figura 53:Análise Micrográfica na consumível de soldagem SMAW do CP3 (500X) .	71
Figura 54:Análise Micrográfica na consumível de soldagem GTAW do CP3(500X)....	72
Figura 55: Análise Micrográfica no metal de base do CP4(500X)	73
Figura 56:Análise Micrográfica na ZAC do CP4 (500X)	73
Figura 57:Análise Micrográfica na consumível de soldagem SMAW do CP4 (Análise Micrográfica na consumível de soldagem SMAW do CP4(500X)	74
Figura 58:Análise Micrográfica na consumível de soldagem GTAW do CP4(500X)....	74
Figura 59 : Ensaio Micrografico na região do metal de base (100X)	77
Figura 60:Ensaio Micrografico na região do metal de base (500X).....	77
Figura 61:Ensaio Micrografico na região da solda (100X).....	78
Figura 62:Ensaio Micrografico na região da solda (500X).....	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 : Composição Nominal dos Aços Inoxidáveis Martensíticos (ASTM A-240, 2004)	5
Tabela 2: Composição Nominal dos Aços Inoxidáveis Ferríticos (ASTM A-240, 2004)	6
Tabela3: Composição Nominal dos Aços Inoxidáveis Austenítico (ASTM A-240, 2004)	8
Tabela 4: Análise química dos materiais 304 e 304H (ASTM A-240, 2004)	10
Tabela 5: Requisitos de composição química para eletrodo revestido E 308H-17 e E 347-17 (ASME SEC II PART-C, 2007)	12
Tabela 6: Requisitos das propriedades mecânicas para o metal de solda depositado E308H-17 e E-347-17 (ASME SEC II PART-C, 2007)	12
Tabela 7: Requisitos de composição química para a vareta ER 308H e ER 347 (ASME Sec II PART-C, 2007)	13
Tabela 8: Requisitos das propriedades mecânicas para a vareta TIG ER308H e ER-347 (ASME Sec II PART-C, 2007)	13
Tabela 9: Valores de tensões máximas admissíveis em MPa em relação a temperatura de projeto	25
Tabela 10: Detalhes dos corpos de prova.	30
Tabela 11: Composição química do metal de base dos CP3 e CP4	31
Tabela 12: Composição química conforme certificado de qualidade do material	32
Tabela 13: Análise química do consumível da vareta TIG AWS ER 308H	32
Tabela 14: Análise química do eletrodo-revestido AWS	32
Tabela 15: Análise química do consumível do eletrodo revestido AWS E 347-17	33
Tabela 16: Referente a composição química da vareta TIG ER 347	33
Tabela 17: Acompanhamento de soldagem CP1	44
Tabela 18: Acompanhamento de soldagem CP2	45
Tabela 19: Acompanhamento de soldagem CP3	46
Tabela 20 : Acompanhamento de soldagem CP4	47
Tabela 21: Acompanhamento de soldagem CP6	48
Tabela 22: Acompanhamento de soldagem CP5	49
Tabela 23: Resultados do ensaio macrografico no CP1	51
Tabela 24: Resultados do ensaio macrografico no CP2	52
Tabela 25: Resultados do ensaio macrografico no CP3	52
Tabela 26: Resultados do ensaio macrografico no CP4	53
Tabela 27: Valores do ensaio de tração realizados no CP1 (Tração 1)	55
Tabela 28: Valores do ensaio de tração realizados no CP1 (Tração 2)	56
Tabela 29: Valores do ensaio de tração realizados no CP2 (Tração 1)	56
Tabela 30: Valores do ensaio de tração realizados no CP2 (Tração 2)	57
Tabela 31: Resultados do ensaio de tração no CP3 (Tração 1)	58
Tabela 32: Resultados do ensaio de tração no CP3 (Tração 2)	58
Tabela 33: Resultados do ensaio de tração no CP4 (Tração 1)	59
Tabela 34: Resultados do ensaio de tração no CP4 (Tração 2)	59
Tabela35: Resultado do ensaio dobramento lateral do CP1,CP2,CP3,CP4	61
Tabela 36: Resultados do ensaio de tração à quente no CP5	63

Tabela 37: Resultados do ensaio de tração à quente no CP6.....	63
Tabela 38: Resultados do ensaio de determinação do teor de carbono	75
Tabela 39: Resultados do ensaio de medição de ferrita antes e após TT.	76
Tabela 40: Resultados do ensaio de medição de fase sigma e ferrita no material envelhecido	79

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS

ASME:	Asme Boiler & Pressure Vessel Code
ASTM:	American Society for Testing and Materials
AWS:	American Welding Society
CP:	Corpo de Prova
DL:	Dobramento Lateral
FN:	Número Ferrita
GTAW:	Gas Tungsten Arc Welding - TIG
SMAW:	Shielded Metal Arc Welding – Eletrodo Revestido
T.T.	Tratamento Térmico
ZAC:	Zona Afetada pelo Calor
γ :	Austenita
δ :	Ferrita Delta
σ	Fase Sigma

1.0 Introdução e justificativa

Os aços inoxidáveis austeníticos possuem boa resistência à corrosão atmosférica e à exposição em temperaturas elevadas (800°C) e criogênicas, possuindo uma boa soldabilidade com técnicas e parâmetros de soldagem adequados. Os aços inoxidáveis austeníticos mais utilizados pelas indústrias são os aços do tipo 304 (18%Cr – 8%Ni), tendo grande gama de utilização, tais como: fabricações de utensílios domésticos, aplicações em indústrias navais, aeronáutica, nuclear, papel e celulose, químicas em geral, petroquímicas, extração de petróleo e gás, etc. O aço tipo 304H é semelhante ao tipo 304, com a diferença que, no tipo "H", a faixa do teor de carbono é de 0,04 a 0,1% em massa, sendo indicado para uso em alta temperatura, reunindo boa propriedade mecânica e boa resistência à oxidação. Entretanto, nestas condições pode ocorrer a sensitização do aço, devido ao elevado teor de carbono (Carbó, 2001)

Existem cinco grandes famílias de aços inoxidáveis, baseado em sua microestrutura e propriedades: (Damian, Lippold C. John & Koteck J., 2005)

- ✓ Aços Inoxidáveis Martensíticos
- ✓ Aços Inoxidáveis Austeníticos
- ✓ Aços Inoxidáveis Ferríticos
- ✓ Aços Inoxidáveis Endurecidos por Precipitação
- ✓ Aços Inoxidáveis Duplex

O aço 304H é comumente utilizado em equipamentos de unidades de processo que operam em altas temperaturas (800°C). Estes equipamentos sofrem desgaste e geralmente são realizados reparos com solda nestes materiais na condição envelhecido em operação, pois eles operam em temperaturas elevadas por um longo período de tempo (aproximadamente 5 anos) em maneira ininterrupta.

Este tipo de aço (304H) quando envelhecido em operação pode apresentar problemas e/ou dificuldade de soldagem devido à precipitação de

carbonetos em contorno de grão e/ou formação de fase sigma, apresentando baixa ductilidade. Isto ocorre devido ao trabalho em alta temperatura por longo período de tempo ocasionando o envelhecimento do material necessitando, em alguns casos, realizar a solubilização antes da soldagem.

A execução deste tratamento nem sempre é possível devido às grandes dimensões dos equipamentos envolvidos, custo elevado, risco de empenamento, escoramento, quantidade de água desmineralizada para resfriamento e tempo despendido, entre outros.

Neste trabalho é estudado a soldagem de manutenção sem solubilização e com restrição, do aço inoxidável austenítico de especificação ASTM A-240, classificação TP304H, de 9,5 mm de espessura que foi envelhecido em operação submetido a um ciclo de trabalho de aproximadamente 5 anos ininterruptos na faixa de temperatura de aproximadamente 800°C. Os consumíveis de soldagem utilizados foram os de especificações SFA A5.9, classificação ER308H e ER347 e SFA A5.4, classificação E308H-17 e E347-17, utilizando-se os processos GTAW na raiz e SMAW no enchimento e acabamento. Para comparação, foram soldados metais de base de igual especificação e classificação na condição novo como fornecido.

Estes consumíveis foram escolhidos em função do tipo 308H ser o material especificado para manter as mesmas propriedades mecânicas, metalúrgicas e químicas semelhantes ao metal de base. Já a utilização do tipo 347 deveu-se em função da existência de elementos químicos estabilizantes de modo a prevenir as precipitações de carbonetos. Na prática, este consumível é indicado quando a soldagem com o consumível 308H apresenta defeitos, tais como, trincamento.

Dentro deste contexto, a soldagem de manutenção deste aço deve ser estudada e desenvolvida, sempre em atendimento às normas aplicáveis, considerando principalmente a possibilidade de execução sem a necessidade de um tratamento térmico prévio de solubilização conforme é comumente realizado em soldagens de reparo destes aços. Isto justifica o estudo da soldagem de manutenção do aço inoxidável A240 TP304H na condição envelhecido em operação.

2.0– Objetivo:

Estudar a soldagem de manutenção sem solubilização e com restrição do aço inoxidável austenítico ASTM A-240 TP304H, na condição envelhecido em operação, comparando-se os consumíveis 308H e 347 com os processos de soldagem GTAW na raiz e SMAW no enchimento e acabamento.

3.0– Revisão Bibliográfica

3.1 Aços inoxidáveis

A invenção dos aços inoxidáveis iniciou-se em 1820, pelos ingleses Stoddard e Farraday e pelos franceses em 1821 Pierre Berthier devido à falta de conhecimento da influência do baixo teor de carbono nessas ligas. Em 1872 os ingleses Wood & Clark pediram a patente de um aço contendo 30 – 35 %Cr e 2%W foi a primeira patente de um aço próximo do aço inoxidável. Em 1875 o francês Brustlein estudou e definiu a importância do baixo teor de carbono nos aços inoxidáveis, ele definiu que o teor de carbono ideal deve estar abaixo de 0,15% (Damian, Lippold C. John & Koteck J., 2005)

Os aços inoxidáveis foram definidos em 1912, pelo inglês Harry Brearly. Brearly, o inventor do aço inoxidável no início denominou o aço como Rustless Steel, foi alterado para “stainless steel”, que traduzindo quer dizer “aço que não mancha”. Esse nome se deve à sua singular resistência às ações de corrosão atmosférica e à grandes variações de temperatura. (Damian, Lippold C. John & Koteck J., 2005)

Geralmente esses aços possuem o teor de cromo de, no mínimo, 12%. Também é encontrado níquel nestes materiais, que melhora a resistência mecânica e oxidação da liga a alta e baixa temperatura. (GEORGE, 1983) Os aços inoxidáveis formam um grupo de aços de alta liga, baseado nos seguintes sistemas: (Damian, Lippold C. John & Koteck J., 2005)

Fe-Cr-,
Fe-Cr-C,
Fe-Cr-Ni.

Os aços inoxidáveis tem como principais características a resistência à ações corrosivas dos ambientes, tendo assim à formação de uma fina camada de óxido na superfície do aço. (Damian, Lippold C. John & Koteck J., 2005) A formação desta fina camada é favorecida pela presença de meios oxidantes. (Carbó, 2001)

3.2 Aços inoxidáveis martensíticos

O aço martensítico foi desenvolvido com teor de cromo relativamente baixo (12 a 14 em massa%), e teor de carbono elevado (quando comparado com outros aços inoxidáveis com maior resistência à corrosão). Esses aços são industrializados no estado recozido, com estrutura ferrítica, baixa dureza e boa ductilidade. Após um tratamento térmico de têmpera, terão uma estrutura martensítica com elevada dureza e pouca ductilidade. Nessas condições (temperados) o aço obtém boas propriedades de resistência à corrosão. (Carbó, 2001)

Tabela 1 : Composição Nominal dos Aços Inoxidáveis Martensíticos
(ASTM A-240, 2004)

Composição Nominal dos Aços Inoxidáveis Martensíticos					
ASTM	C	Mn	Cr	Ni	Outros
403	0.015 max	1.0	11.5-13		
410	0.015 max	1.0	11.5-13		
416	0.015 max	1.2	12-14		0.15%S min
420	0.015 max	1.0	12-14		
431	0.015 min	1.0	15-17	1.2-2.5	
440 A	0.20 max	1.0	16-18		0,75%Mo max
440 B	0.60-0.75	1.0	16-18		0,75%Mo max
440 C	0.95-1.20	1.0	16-18		0,75%Mo max

3.3 Aços inoxidáveis ferríticos

A classificação dos aços inoxidáveis ferríticos se dá pelo fato de sua microestrutura metalúrgica ser predominantemente constituída de ferrita. Sua estrutura cristalina é cubica de corpo centrado. No geral, a quantidade de cromo encontrada nos aços inoxidáveis ferríticos é superior em relação ao tipo martensítico. O fato desta quantidade ser maior, faz com que a sua resistência à corrosão seja mais eficaz, porém, a resistência ao impacto é inferior devido à granulação grosseira.

Entre os aços ferríticos, o mais conhecido é o 430. Seu cromo é superior a 16%, tornando-o um material com extrema resistência à corrosão. (Raynor & Rivlin, 1988)

Tabela 2: Composição Nominal dos Aços Inoxidáveis Ferríticos

(ASTM A-240, 2004)

Composição Nominal dos Aços Inoxidáveis Ferríticos					
ASTM	C	Mn	Cr	Ni	Outros
405	0.08 max	1.0	11.5-14-5		0.1-0.3%Al
430	0.15 max	1.0	14-18		
446	0.20 max	1.5	23-27		

3.4 Aços Inoxidáveis Austeníticos

Essa linha de aço apresenta alta resistência à corrosão e excelente usinabilidade. É amplamente utilizada na fabricação de peças resistentes a corrosão. (Damian, Lippold C. John & Koteck J., 2005).

Os aços austeníticos possuem um alto coeficiente de expansão térmica (acima de 50%) maior que os aços carbono, por isso necessitam de parâmetros e técnicas de soldagem adequadas para minimizar as distorções e empenamentos das partes soldadas. (A.F., Padilha; C., Guedes L., 1994)

Os aços inoxidáveis apresentam limite de escoamento, equivalente aos aços de carbono, de aproximadamente 210Mpa ou 30ksi. (ASTM A-240, 2004)

Estes materiais apresentam excelente resistência ao impacto em baixa temperatura, o que os tornam úteis para aplicações criogênicas.

O limite da resistência e da oxidação da maioria destes aços depende da temperatura de trabalho, portanto, a temperatura de operação pode ser de até 760°C, ou até mesmo mais elevadas. (N, F., & FAULKNER, 2008) e (SEDRIKS, 1996). Sua utilização se dá, muitas vezes, em aplicações que necessitam de uma boa resistência à corrosão atmosférica e à exposição sob temperaturas elevadas.

Eles possuem uma boa soldabilidade, porém, algumas precauções devem ser tomadas, tais como: controle de energia de soldagem, temperatura de interpasse, não utilização de pré-aquecimento, abertura de chanfro, projeto da junta, entre outros.

Por possuir elevado teor de níquel (no mínimo de 8%), possuem estrutura austenítica. Podemos citar outros agentes gamagênicos, como os elementos C, N e Cu. Carbono e nitrogênio também são fortes agentes de formação da austenita.

Em função do teor de carbono, a classificação do aço inoxidável 304 recebe o sufixo "L" de *Low Carbon* ou o sufixo "H" de *High Carbon*. O tipo "L" é indicado para aplicações em geral onde exige-se resistência a corrosão, propriedades mecânicas a baixa temperatura (criogenia). O tipo 304 sem sufixo é de aplicação geral, de propriedades intermediárias entre os tipos "L" e "H". Já o tipo "H" é indicado para aplicações em alta temperatura (400 a 800°C). O carbono é utilizado com o intuito de aumentar a resistência à deformação a alta temperatura e resistência à oxidação (Damian, Lippold C. John & Koteck J., 2005). Nesta faixa de temperatura pode ocorrer o fenômeno de sensitização ambos os tipos 304 e 304H. No caso do 304H o material trabalha praticamente na condição sensitizado, devido ao elevado teor de carbono, ciclo térmico de soldagem e a faixa de temperatura de aplicação.

Uma outra diferença tipo "H" é em relação ao tamanho de grão do material, no qual esta é mais grosseira em comparação com o tipo 304, de modo a aumentar a resistência à fluência. Na figura 1, é apresentada a família dos aços inoxidáveis austeníticos. (Carbó, 2001)

Tabela3: Composição Nominal dos Aços Inoxidáveis Austenítico
(ASTM A-240, 2004)

Composição Nominal dos Aços Inoxidáveis Austeníticos					
ASTM	C	Mn	Cr	Ni	Outros
301	0.015 max	2.0	16-18	6-8	
302	0.015 max	2.0	17-19	8-10	
304	0.08 max	2.0	18-20	8-12	
304L	0.03 max	2.0	18-20	8-12	
309	0.20 max	2.0	22-24	12-15	
310	0.25 max	2.0	24-26	19-22	
316	0.08 max	2.0	16-18	10-14	2-3 %Mo
316L	0.03 max	2.0	16-18	9-12	2-3% Mo
321	0.08 max	2.0	17-19	9-13	(5x %C)Ti min
347	0.08 max	2.0	17-19		(10x%C)Nb- Ta min

Tabela 4: Análise química dos materiais 304 e 304H (ASTM A-240, 2004)

Material	C %	Cr%	Ni%	Mo%	Al%	Mn%	Si%	P%	Cu%
ASTM A240 TP-304H	0,04- 0,10	18,00- 20,00	8,0- 10,5	---	---	1,30 máx	0,75 máx	0,045 máx	---
ASTM A240 TP-304	0,08 max	18,00- 20,00	8,0- 10,5	---	---	1,30 máx	0,75 máx	0,045 máx	---

Em geral a escolha do aço 304H é dada por questões econômicas, sendo muito utilizado quando se requer boa propriedade mecânica em trabalhos com temperaturas elevadas, em conjunto com microestrutura austenítica, com concentrações mínimas de cromo e níquel. (Carbó, 2001)

3.6– Consumíveis de soldagem

Os eletrodos revestidos e varetas mais utilizados para o material de base TP 304H são os consumíveis E308H-17 e ER308H devido a composição química do metal de base ser similar ao do consumível. Portanto não existem consumíveis de soldagem E304H classificado na norma ASME II Part C.

Eletrodos revestidos e varetas E308H-17 e ER308H são especialmente desenvolvidos para aplicações em alta temperatura em indústrias químicas e petroquímicas. As tabelas 5 e 6 apresentam a composição química e propriedades mecânicas destes consumíveis na condição como soldado. Estes consumíveis possuem a mesma composição do eletrodo E308, exceto que o teor de carbono do metal de solda requerido, deve estar entre 0,04 – 0,08%, de modo propiciar melhor propriedade mecânica em trabalhos em alta temperatura. O consumível normalmente possui controle do teor de ferrita delta, máximo para minimizar os efeitos da formação de da fase sigma em alta temperatura de serviço e consequente falha durante o resfriamento do equipamento após exposição prolongada em alta temperatura. (ASME SEC II PART-C, 2007) Por outro lado, um teor baixo de ferrita delta ocasiona trinca de solidificação. Para

isto é especificado um teor mínimo e máximo de ferrita delta em função da temperatura de aplicação do material.

Conforme PETROBRAS N-133 revisão M, o teor de ferrita mínimo nos depósitos devem ser 3FN, o teor máximo deve ser 9FN para temperaturas acima de 360°C (Petroleo Brasileiro S/A, 2015)

Os consumíveis E347-17 e ER347 possuem a mesma composição química do E308, exceto a adição de estabilizantes Nb ou Nb + Ta. As adições desses estabilizantes reduzem a probabilidade de precipitação de carbonetos e assim aumentam a resistência a corrosão intergranular da solda. Para estes consumíveis não existe o sufixo "H" e "L". As tabelas 5 e 6 apresentam a composição química e propriedades mecânicas destes consumíveis na condição como soldado. Se a diluição entre o metal base e solda produzir uma baixa porcentagem de ferrita com uma microestrutura totalmente austenítica no depósito o risco de trinca de solidificação pode aumentar substancialmente. Para algumas aplicações em altas temperaturas o teor de ferrita não deve ser demasiadamente elevado. (ASME Sec II PART-C, 2007)

Conforme N-133 revisão M, o teor de ferrita mínimo nos depósitos devem ser 5FN, o teor máximo deve ser 9FN para temperaturas acima de 360°C (Petroleo Brasileiro S/A, 2015)

Na tabela 5 apresenta a composição química requerida para o eletrodo revestido E 308H-17 e E-347-17, e na tabela 6 apresenta os requisitos de propriedades mecânicas conforme ASME II part C.

Tabela 5: Requisitos de composição química para eletrodo revestido E 308H-17 e E 347-17 (ASME SEC II PART-C, 2007)

AWS	Nº UNS	C %	Cr %	Ni %	Mo %	Nb(Cb) Plus Ta %	Mn %	Si %	P %	S %	N %	Cu %	Outros
E308H-17	W30810	0.04-0.08	18.0-21.0	9.0-11.0	0.75 max	---	0.5-2.5	1.00 max	0.04 max	0.03 max	---	0.75 max	---
E 347-17	W34710	0,08 máx	18.0-21.0	9.0-11.0	0.75 max	8 X C min 1,0 máx.	0.5-2.5	1.00 max	0.04 max	0.03 max	---	0.75 max	---

Tabela 6: Requisitos das propriedades mecânicas para o metal de solda depositado E308H-17 e E-347-17 (ASME SEC II PART-C, 2007)

AWS	UNS	Limite de Resistência (MPa) Mínimo	Alongamento (%) Mínimo
E308H-17	W30810	550	35
E 347-17	W34710	520	30

Na tabela 7 apresenta a composição química requerida para a vareta ER 308H e ER-347, e na tabela 8 apresenta os requisitos de propriedades mecânicas conforme ASME II part C.

Tabela 7: Requisitos de composição química para a vareta ER 308H e ER 347 (ASME Sec II PART-C, 2007)

AWS	Nº UNS	C %	Cr %	Ni %	Mo %	Mn %	Si %	P %	S %	N %	Cu %	Outros
ER 308H	S30880	0.04-0.08	19.5-22.0	9.0-11.0	0.50 max.	1.0-2.5	0.30-0.65	0.03 max.	0.03 max.	--	0.75	---
ER 347	S34780	0.08 max	19.0 – 21,5	9,0-11,0	0,75 max	1.0-2.5	0.30-0.65	0.03 max.	0.03 max.	--	0.75	Nb 1XC Min. 1,0 Max

Tabela 8: Requisitos das propriedades mecânicas para a vareta TIG ER308H e ER-347 (ASME Sec II PART-C, 2007)

AWS	UNS	Limite de Resistência (MPa) Mínimo	Alongamento (%) Mínimo
ER 308H	S30880	550	35
ER 347	S34780	520	30

3.7 Soldagem do aço Inoxidáveis

A soldabilidade dos aços inoxidáveis é função do aço ou combinação de aços que serão soldados. O aço inoxidável possui uma particularidade com relação ao tipo de fragilização que pode ocorrer (Lippold, J. C., and Savage, W., 1979)

O aço 304 possui entre os aços inoxidáveis, a melhor soldabilidade. (Cary, 1979)

Os aços austeníticos apresentam o risco de trinca de solidificação. Este risco é minimizado com a composição química sendo ajustada para um modo de

solidificação "FA" (Ferrita-Austenita). Os contaminantes enxofre e fósforo, entre outros, formam eutéticos que tendem a se concentrar no centro do cordão de solda, pois esta é a última parte a solidificar, e em conjunto com tensões residuais ocorre o trincamento. Este trincamento ocorre imediatamente após a solidificação, denominando-se desta forma como trinca de solidificação.

3.7.1 Solidificação das ligas do sistema Fe-Cr-Ni

A solidificação do sistema Fe-Cr-Ni começa com o desenvolvimento da ferrita e/ou da austenita. Sua solidificação depende de alguns fatores, dentre eles o fator principal é a composição química ou, mais especificamente, do equilíbrio entre os elementos que causam a formação da ferrita ou austenita. (A.F., Padilha; C., Guedes L., 1994)

A figura 7 mostra o diagrama pseudo-binário Fe-Cr-Ni para 70% de Fe. Para diversos teores de Cr e Ni, a solidificação pode resultar na formação de ferrita ou austenita como fase primária a medida que os teores de cromo ou níquel aumentam ao mesmo tempo.

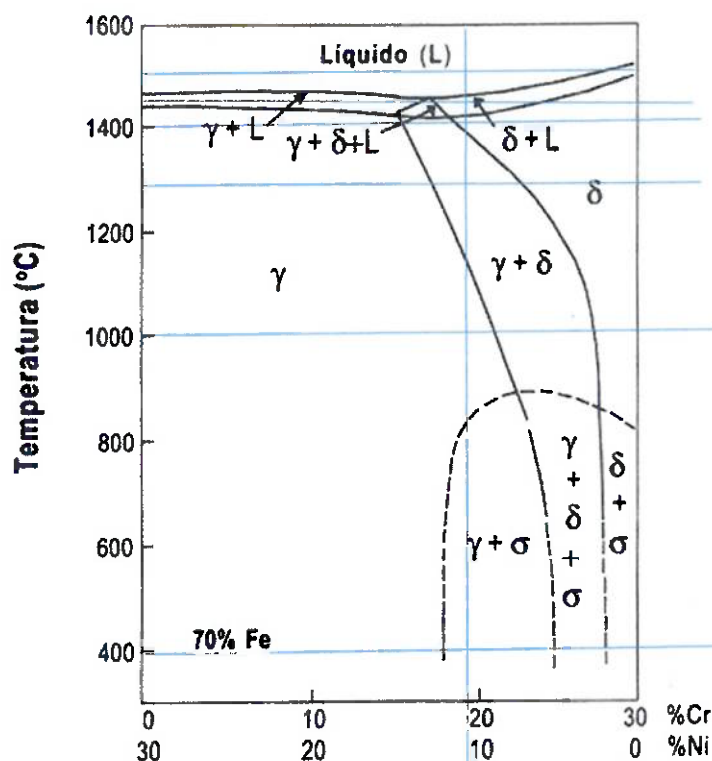


Figura 2: Diagrama pseudo-binário Fe-Cr-Ni para um teor de 70% de ferro (Lippold, J. C., and Savage, W., 1979).

3.7.2 Sequência de solidificação da solda

Os tipos de solidificação foram estudados por vários autores, porém, é unanimidade os quatro a seguir:

TIPO A – Solidificação totalmente austenítica (fig.3): O começo e o fim da solidificação do metal de solda cria uma microestrutura totalmente austenítica. Nos contornos de grãos podem gerar trincas, devido segregação de impurezas a temperaturas menores que geram trincas a baixas tensões devido à redução de temperatura desta segregação. Possui alta probabilidade de ocorrência de trinca de solidificação (A., Brooks J.; W., Thompson A.; Williams J. C. a, March 1984).

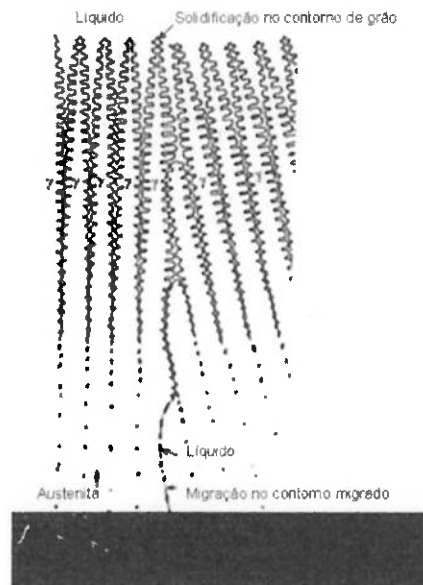


Figura 3: Solidificação do tipo "A" totalmente austenítica (Damian, Lippold C. John & Koteck J., 2005).

TIPO AF –Solidificação do tipo austenita primária com ferrita eutética (fig. 4): Quando ocorre a solidificação da austenita primária com a formação da ferrita na fase final, reduz em parte a probabilidade de trinca a quente, devido a solubilidade das impurezas no contorno de grão. A solubilidade das impurezas ocorre através dos elementos alfacênicos como cromo e molibdênio. Formando uma estrutura estável e resistente durante o resfriamento (A., Brooks J.; W., Thompson A.; Williams J. C. a, March 1984)

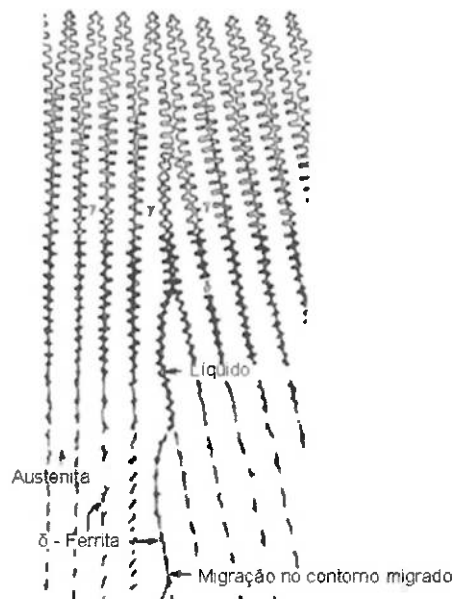


Figura 4: Resultado da microestrutura da zona de fusão para o tipo de solidificação AF / Ferrita Eutética (Katayama, 1985)

TIPO FA –Solidificação do tipo ferrita austenita (fig. 5): A solidificação acontece como ferrita primária. Uma reação peritética-eutética procede na formação da austenita ao longo dos limites das células dendríticas. Em algumas vezes ocorrendo variação dependendo da taxa de resfriamento. (Damian, Lippold C. John & Koteck J., 2005) Neste caso, ocorre o aprisionamento de elementos contaminantes nos contornos de grãos dendríticos, minimizando a probabilidade de trinca de solidificação. O ideal é que este teor de ferrita situe-se entre 3 a 9FN.

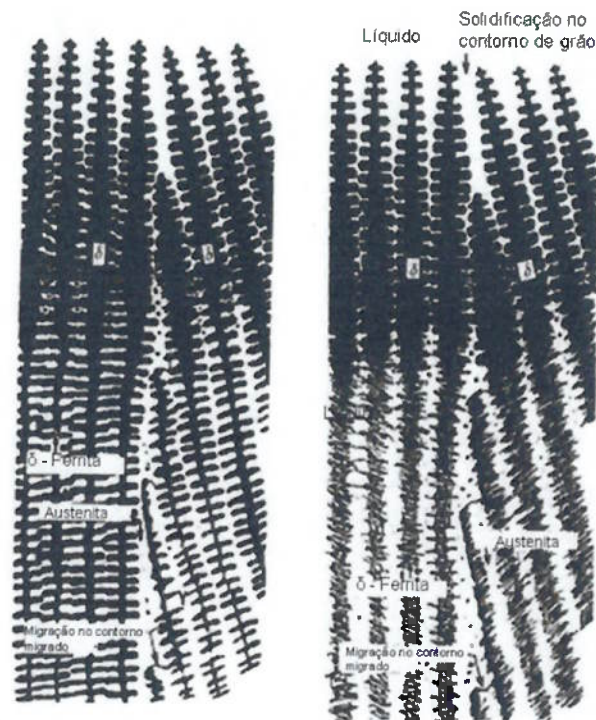


Figura 5: Solidificação do tipo FA Ferrita / austenita (Katayama, 1985).

Tipo F – Solidificação do tipo ferrita (fig. 6): A solidificação acontece completamente como ferrita sendo a ferrita a única fase formada na solidificação, tendo-se formação posterior de austenita somente no estado sólido. (Damian, Lippold C. John & Koteck J., 2005)

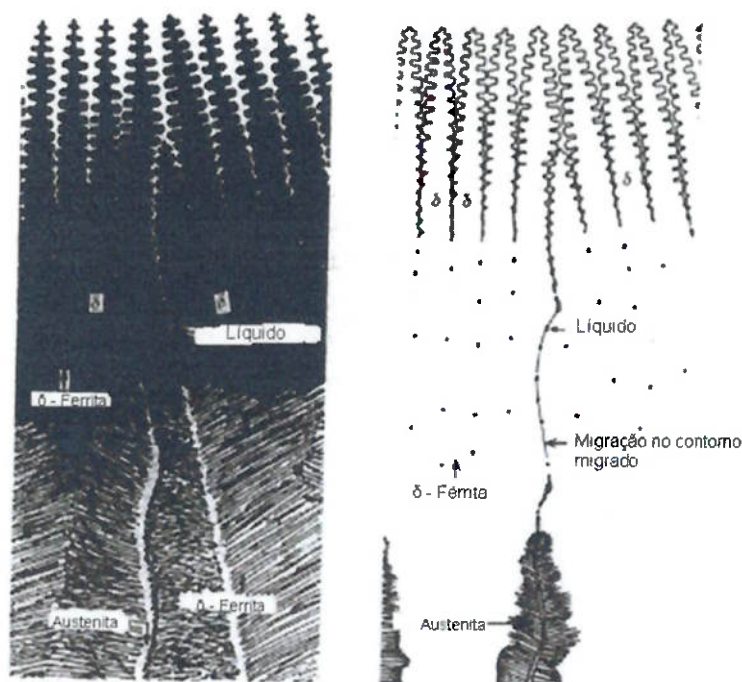


Figura 6: Solidificação do tipo totalmente ferrítica (Katayama, 1985).

Comumente, na liga Fe-Cr-Ni as possíveis sequências de solidificação podem ocorrer: (Katayama, 1985)

TIPO A: $Liq > Liq + \gamma > \gamma$

TIPO AF: $Liq > Liq + \gamma + \delta > \gamma + \delta$

TIPO FA: $Liq > Liq + \delta > Liq + \delta + \gamma > \delta + \gamma$

TIPO F: $Liq > Liq + \delta > \delta$ (Katayama, 1985)

3.7.3 Influência da composição química (Diagramas de Schaeffler e de Delong)

Schaeffler propõe em seu diagrama, publicado em 1949, uma relação entre os elementos de liga para que promova a formação de ferrita (Cromo equivalente, Creq) e elementos de liga que promovam a formação da Austenita (Níquel equivalente, Nieq). (Davis J., 1994)

O diagrama de Schaeffler é bastante útil para analisar o que pode ocorrer na soldagem de um aço inoxidável, mas pode não ser suficiente no caso da soldagem dos aços inoxidáveis austeníticos. Neste caso deve-se levar em conta a presença de elementos residuais, como o enxofre e o fósforo, que favorecem a formação da trinca de solidificação

Porém, o diagrama de Schaeffler possui algumas limitações, como não prever, no cálculo de Nieq, a porcentagem de nitrogênio que promove a austenita. Este diagrama contém campos que permitem prever a porcentagem de ferrita (magnética) no metal de solda depositado. Considerado um método impreciso, ao invés de ferrita os gráficos adiante levam em consideração o número de ferrita "NF". (Davis J., 1994)

Geralmente recomenda-se um teor de fósforo e enxofre máximo de 0,04%, combinados com um teor máximo de ferrita no cordão de solda ao redor de 9FN. A ferrita tem a função de dissolver parte desses elementos, aliviar as

tensões residuais durante o resfriamento e aumentar o número de interfaces para distribuir o eventual líquido formado durante a solidificação. (A.F., Padilha; C., Guedes L., 1994)

O diagrama pode ser utilizado em soldagem de materiais dissimilares. Assim verificando a porcentagem de ferrita, é necessário calcular o cromo e o níquel equivalente para o metal base e o metal de solda, adicionando esses valores e verificando no gráfico e traçando uma linha entre os pontos. (A.F., Padilha; C., Guedes L., 1994)

Na figura 7 é apresentado um exemplo de diagrama de Schaeffler, com os pontos de CrEq e NiEq de alguns aços inoxidáveis.

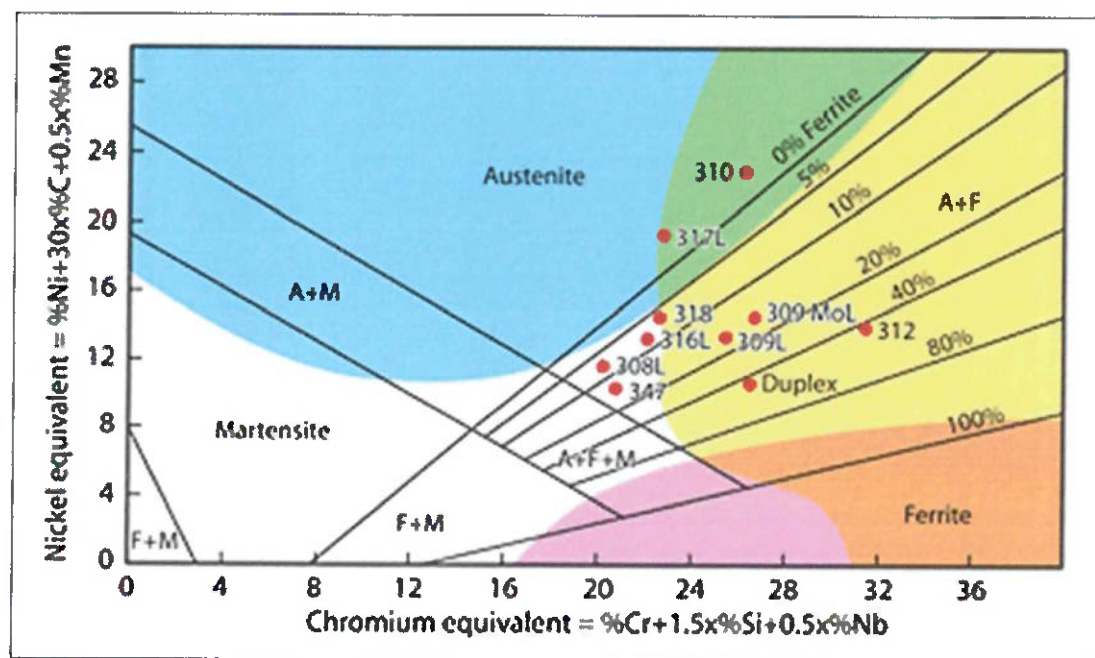


Figura 7: Diagrama de Schaeffler (TWI Training & Examination Services, 2015)

DeLong, em 1956, desenvolveu um diagrama de constituição, concentrando-se na região do aço inoxidável austenítico série 300 e obtendo uma previsão mais precisa e detalhada do teor de ferrita no metal de solda no aço inoxidável austenítico, tornando possível a análise da ação do nitrogênio na microestrutura do metal de solda e mostrando que este tem uma grande influência no teor de

ferrita, o nitrogênio, como referência para cálculo, foi adicionado como elemento de liga ao níquel equivalente, sendo um gamagênico estabilizante da austenita. (TWI Training & Examination Services, 2015)

$$Nieq = Ni + 0.5Mn + 30C + 30N$$

Em 1973 DeLong propôs novas mudanças para melhorar a capacidade de prever a ferrita delta. Introduziu o conceito de adição das linhas do diagrama com o número de ferrita. Esta expressão gerou uma dificuldade para efetuar a quantificação do número de ferrita no metal de solda.

Sendo possível quantificar o número de ferrita através das medições magnéticas, pois a ferrita delta é magnética e a austenita não é magnética (Davis J., 1994)

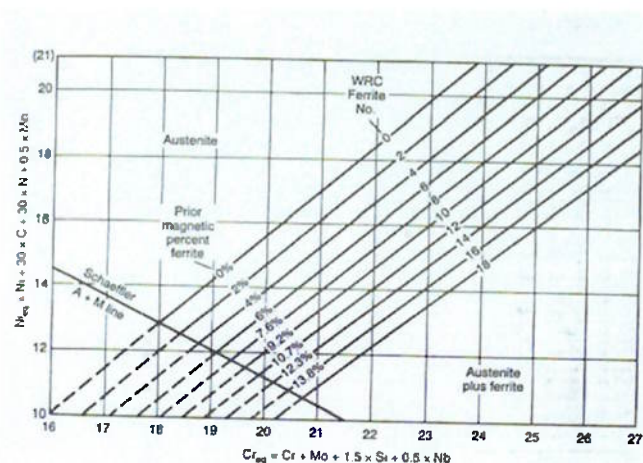


Fig. 2 DeLong constitution diagram for stainless steel weld metal. The Schaeffler austenite-martensite boundary is included for reference.

Figura 8: Diagrama de De Long - diagrama de constituição modificado para metais de solda de aço inoxidável (A.F., Padilha; C., Guedes L., 1994)

3.8 Precipitação de Carbonetos / Sensitização

Nos aços inoxidáveis pode ocorrer o fenômeno de sensitização (formação de precipitados $M_{23}C_6$ em contorno de grão) (Magri, M.; Alonso, N., 1995)

A forma mais aceita para explicar a sensitização dos aços inoxidáveis está na precipitação de carbonetos ricos em cromo nos contornos de grão. O crescimento elevado destes carbonetos empobrece nas regiões adjacentes uma zona empobrecida em cromo. Quando estes permanecem por um determinado tempo na faixa de 550 °C a 850 °C ficam susceptível ao ataque preferencial num meio corrosivo (oxidante) (Sheir, 1995)

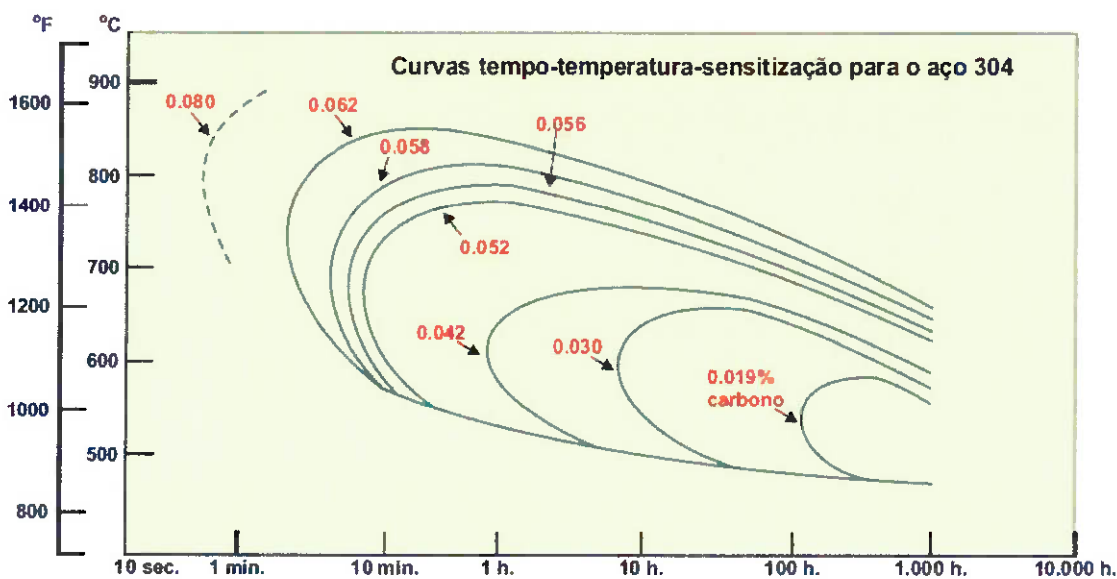


Figura 9:Mostra-se uma curva temperatura-tempo-sensitização para os aços 304 com diferentes conteúdos de carbono (Peckner, 1977)

Existem três formas de prevenir a sensitização. São elas:

- Tratar termicamente o aço inox, depois de soldado, a uma temperatura de austenitização por volta de 1050 °C, resfriando-o rapidamente, também conhecido solubilização.
- Adicionar elementos com maior afinidade pelo carbono, como o nióbio (Nb, tipo 347) e o titânio (Ti, tipo 321), também conhecidos por aços estabilizados.
- Reduzir o teor de carbono a limites inferiores ao de solubilidade com o Cromo. Este limite oscila ao redor de 0,03%. Dessa forma, nascem os aços inoxidáveis conhecidos pelo sufixo "L" (*Low Carbon*) e que correspondem às ligas AISI 304L; 316L e 317L.

As figuras 10 e 11 abaixo apresentam micrografias de aços inoxidáveis austeníticos com precipitação de carbonetos em contorno de grão em materiais sensitizados. (ASTM A-240, 2004)

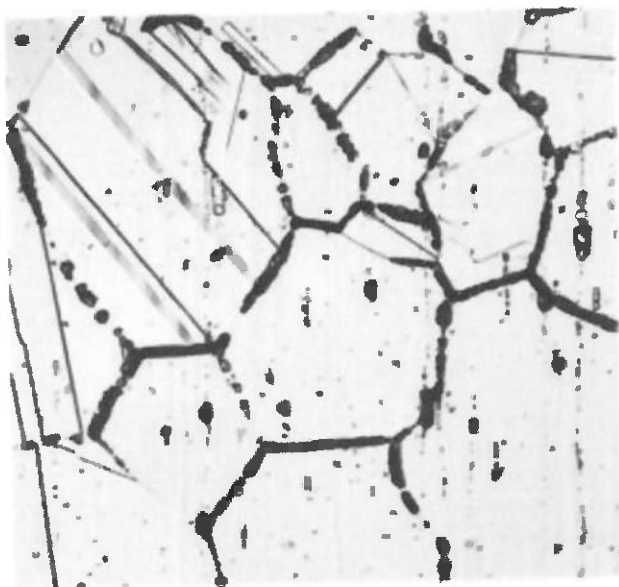


Figura 10: Precipitados em contorno de grão, exemplo da ASTM A262 prática A, sem um grão completamente rodeado (ASTM A-240, 2004)

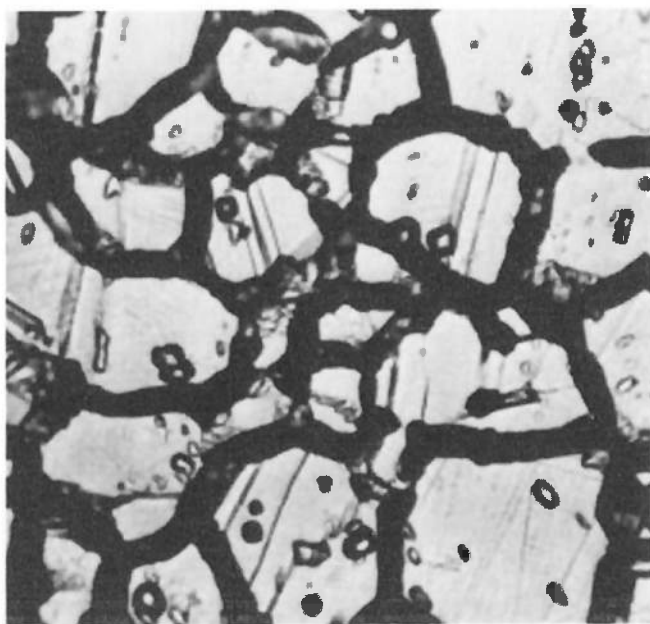


Figura 11: Precipitados em contorno de grão, exemplo da ASTM A262 prática A, com grãos completamente rodeados (ASTM A-240, 2004)

3.9 Tensões admissíveis em função de material e temperatura:

Na tabela 9, apresenta os valores de tensões máximas admissíveis para o material A 240 TP 304H para cada faixa de temperatura de trabalho. Nesta tabela os valores de tensões admissíveis baseado no ASME SEC II Part D, já está acrescido o coeficiente de segurança a ser aplicado no cálculo de projeto da espessura do vaso de pressão.

Tabela 9: Valores de tensões máximas admissíveis em MPa em relação a temperatura de projeto.

Máximas tensões admissíveis em MPa em relação a cada temperatura de projeto do metal de base.										
Temperatura °C	-30 a 40	100	200	300	400	500	600	700	800	825
Máx. Tensão admissível MPa	138	113	95,7	88,9	79,2	73,6	65,4	26,5	11,1	8,73

3.10 Processo de soldagem SMAW

A soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido (*Shielded Metal Arc Welding – SMAW*), também é conhecida como soldagem a arco elétrico com eletrodos revestidos é realizada com o calor de um arco elétrico mantido entre duas partes metálicas, a extremidade de um eletrodo metálico revestido e a peça de trabalho/metal base. O calor produzido pelo arco elétrico é suficiente para fundir o metal de base, a alma do eletrodo e o revestimento (W., Oates R., 2006). Quando as gotas de metal fundido são transferidas através do arco para a poça de fusão, são protegidas da atmosfera pelos gases produzidos durante a decomposição do revestimento. A escória líquida flutua em direção à superfície da poça de fusão, onde protege o metal de solda da atmosfera durante a solidificação (Folkhard, E. Springer, 1988).

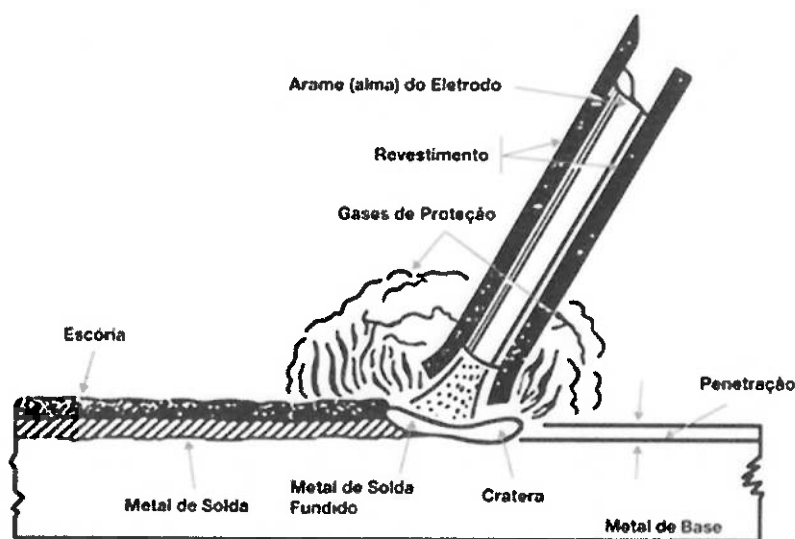


Figura 12: Processo de soldagem SMAW (ESAB, 2015)

3.10.1 Características:

O processo de soldagem com eletrodo revestido é o mais amplamente utilizado. Possui a maior flexibilidade entre todos os processos de soldagem uma vez que a maioria dos metais pode ser unida ou revestida pela soldagem.

Existe uma grande variedade de eletrodos revestidos, facilmente encontrados no mercado, cada eletrodo contendo no seu revestimento a capacidade de produzir os próprios gases de proteção dispensando o suprimento adicional de gases, necessário em outros processos de soldagem. (W., Oates R., 2006)

Eletrodos revestidos podem ser usado em todas as posições (plana, vertical, horizontal, sobre cabeça), como em praticamente todas as espessuras de metal de base e em áreas de acesso limitado. Também é usado para revestimentos duros, corte e goivagem.

É mais simples em termos de necessidades de equipamentos com custo do investimento relativamente baixo. (ESAB, 2015)

3.11 Processo de soldagem GTAW

Soldagem TIG (*Tungsten Inert Gas*) ou GTAW (*Gas-Shielded Tungsten Arc Welding*) este processo utiliza eletrodo sólido de tungstênio não consumível. O eletrodo, o arco e a área em volta da poça de fusão da solda são protegidos por uma atmosfera protetora de gás inerte. Se um metal de enchimento é necessário, ele é adicionado no limite da poça de fusão.

A soldagem TIG produz uma solda limpa e de alta qualidade. Como não é gerada escória, a chance de inclusão da mesma no metal de solda é eliminada, e a solda não necessita de limpeza no final do processo. (W., Oates R., 2006)

Soldagem TIG pode ser usada para quase todos os metais e o processo pode ser manual ou automático. A soldagem TIG é largamente utilizada para solda com alumínio e com ligas de aço inoxidável onde a integridade da solda é de extrema importância. É também utilizada para juntas de alta qualidade em indústrias nucleares, químicas, aeronáuticas e de alimentos. (Esab, 2015)

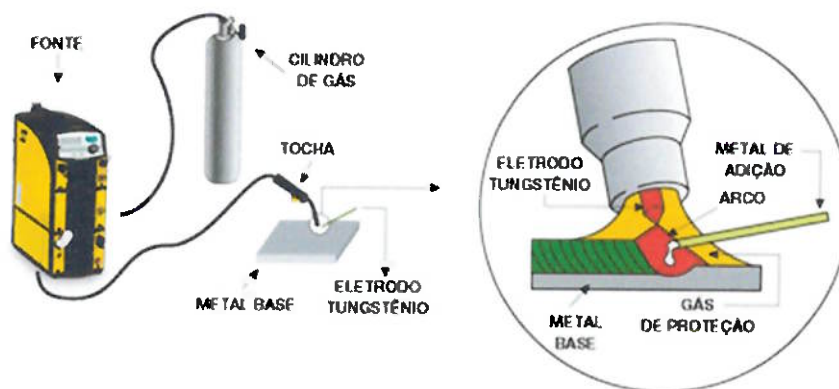


Figura 13: Processo de soldagem GTAW (Esab, 2015)

3.12 Soldagem de manutenção

Na soldagem de produção geralmente é realizada nas melhores condições possíveis, visando o aumento da produção e qualidade. Para isso são adotadas técnicas, equipamentos, dispositivos, materiais, mão de obra e condições ambientais adequadas para cada serviço.

Na soldagem de manutenção geralmente se apresentam os materiais na condição de envelhecidos em operação que geralmente se apresentam com defeitos de fadiga, oxidação dos materiais, perda de espessuras e contaminações de fluidos ou gases. Por isso para cada soldagem de manutenção, deve-se utilizar as melhores práticas com a preocupação de observar o motivo da ocorrência do defeito, deve-se realizar uma análise de falha para determinar a causa primaria do defeito.

A primeira etapa do processo de recuperação de peças é a elaboração de um procedimento de reparo, onde é analisado todo conjunto a ser soldado para obtenção de um reparo perfeito.

O procedimento de reparo estabelece os parâmetros de soldagem tais como, o tipo de material de base, tipo de consumível de soldagem, temperatura de pré-aquecimento, pós-aquecimento, tratamento térmico, projeto de junta, tensão, corrente, velocidade de soldagem, posição de soldagem, sequência de soldagem e deformação.

4. Materiais e Métodos

Para soldagem dos corpos de prova foram utilizados os seguintes consumíveis:

No CP1 foi soldado com o processo GTAW na raiz e SMAW no enchimento e acabamento, aplicando os consumíveis SFA 5.9 AWS ER308H + SFA 5.4 E308H-17. Para o CP1 o material de base utilizado foi o ASTM A240 TP-304H na condição novo como recebido e o CP2 foi soldado com SFA 5.9 AWS ER347 + SFA 5.4 AWS E347-17, em chapas ASTM A240 TP-304H novas. Estes corpos de prova foram confeccionados para base de comparação com os metais de base na condição envelhecidos em operação.

Para soldagem dos CPS 3 e 4 os metais de base utilizados foram removidos de uma parte de um equipamento de processo que trabalhou na faixa de temperatura de operação de aproximadamente 800°C em um período ininterrupto de 5 anos. Para soldagem do CP 3 foi utilizado o processo GTAW na raiz e SMAW no enchimento e acabamento, aplicando os consumíveis SFA 5.9 AWS ER308H + SFA 5.4 E308H-17. Para o CP 4 foi soldado com SFA 5.9 AWS ER347 + SFA 5.4 E347-17.

Para os ensaios de determinação da variação do teor de ferrita após simulação de operação e tração a quente, foram soldados os corpos de prova com os mesmos parâmetros e consumíveis dos CP's 3 e 4.

Tabela 10: Detalhes dos corpos de prova.

Corpo de prova	Material	Consumíveis de soldagem	
		GTAW	SMAW
CP1	ASTM A240 TP-304H Condição : Novo	ER308H	E308H-17
CP2	ASTM A240 TP-304H Condição : Novo	ER347	E347-17
CP3	ASTM A240 TP-304H Condição: Envelhecido em Operação	ER308H	E308H-17
CP4	ASTM A240 TP-304H Condição: Envelhecido em Operação	ER347	E347-17
CP5	ASTM A240 TP-304H Condição: Envelhecido em Operação	ER308H	E308H-17
CP6	ASTM A240 TP-304H Condição: Envelhecido em Operação	ER347	E347-17

As chapas utilizadas nos CP1 CP2, foram utilizados nos corpos de prova na condição de novo como recebido.

Para os corpos de prova utilizados nos CP3 ,CP4 , CP5 e CP6 foram retiradas de um segmento do equipamento, conforme figura 14 com as chapas envelhecidas em operação, aproximadamente 800°C por 5 anos ininterruptos.



Figura 14: Local de retirada dos corpos de prova

Na tabela 11 abaixo apresenta a composição química (% massa) do Metal de Base na condição envelhecido em operação utilizado para soldagem do CP3 e CP4.

Composição química encontrada no material de base dos CP3 e CP4.

Tabela 11: Composição química do metal de base dos CP3 e CP4

Material	C %	Cr%	Ni%	Mo%	Nb%	Zn%	Cu%
ASTM A240 TP-304H	0,060	18,66	8,11	0,092	0,003	0,017	0,225

Na tabela 12 apresenta a composição química (% massa) do material Tipo 304H, utilizado nos corpos de prova soldados na condição de novo.

Tabela 12: Composição química conforme certificado de qualidade do material

Material	C %	Cr%	Ni%	Mo%	Al%	Mn%	Si%	P%	Cu%
ASTM A240 TP-304H	0,044	18,09	8,01	0,142	0,0032	1,30	0,390	0,036	0,2654

Na tabela 13 é apresentada a composição análise química da vareta TIG AWS -ER 308H conforme certificado de qualidade, utilizados nos corpos de prova CP1 na condição do metal de base novo e CP3 e CP5 na condição do metal de base envelhecido em operação.

Tabela 13: Análise química do consumível da vareta TIG AWS ER 308H

Consumível	SFA	Ø	C%	Cr%	Ni%	Mo%	Mn%	Si%	P%	S%	Cu%
ER 308H	5.9	2,4	0,06	19,830	9,180	0,080	1,940	0,410	0,016	0,011	0,060

Na tabela 14 apresenta a composição química do eletrodo revestido AWS -E 308H-17 conforme certificado de qualidade, utilizados nos corpos de prova CP1 na condição do metal de base novo e CP3 e CP5 na condição do metal de base envelhecido em operação.

Tabela 14: Análise química do eletrodo-revestido AWS

Consumível	SFA	Ø	C%	Cr%	Ni%	Mo%	Mn%	Si%	P%	S%	Cu%
E 308H-17	5.4	3,25	0.059	19,83	9,80	0,075	0,900	0.680	0.018	0.011	0.047

Na tabela 15 apresenta a composição química do eletrodo revestido AWS -E 347-17 conforme certificado de qualidade, utilizados nos corpos de prova CP2 na condição do metal de base novo e CP4 e CP6 na condição do metal de base envelhecido em operação

Tabela 15:Análise química do consumível do eletrodo revestido AWS E 347-17

Consumível	SFA	Ø	C%	Cr%	Ni%	Mo%	Mn%	Si%	P%	S%	Cu%
E 347-17	5.4	3,25	0,024	19,880	9,330	0,043	0,790	0,656	0,021	0,011	0,230

Na tabela 16 apresenta a composição química da vareta TIG AWS -ER 347 conforme certificado de qualidade, utilizados nos corpos de prova CP2 na condição do metal de base novo e CP4 e CP6 na condição do metal de base envelhecido em operação

Tabela 16:Referente a composição química da vareta TIG ER 347.

Consumível	SFA	Ø	C%	Cr%	Ni%	Mo%	Mn%	Si%	P%	S%	Cu%
ER 347	5.9	2,4	0,052	19,220	9,350	0,040	1,700	0,390	0,022	0,002	0,100

Através do uso do diagrama de Schaeffler foi possível fazer uma análise teórica da microestrutura obtida no corpos de prova dos consumíveis e do metal base, sendo utilizado o cálculo de Níquel equivalente (Ni_{eq.}), elementos austenitizantes e o cálculo Cromo Equivalente (Cr_{eq.}), elementos ferritizantes, conforme figuras 15,16,17 e 18 abaixo. Foi considerada uma diluição de 30% para utilização no diagrama para todos os corpos de prova.

Na figura 15 foi prevista a porcentagem da solda utilizando o cromo equivalente e níquel equivalente do consumível de soldagem ER308H com o metal de base Tipo 304H representados no diagrama de Schaeffler.

Calculo teórico de metal de base representado na figura 15 na linha de cor vermelha:

$$\text{Ni}_{\text{eq.}} = 8,01 + 30 \times 0,044 + 0,5 \times 1,30 = 9,98$$

$$\text{Cr}_{\text{eq.}} = 18,09 + 0,142 + 1,5 \times 0,390 + 0,5 \times 0 = 18,817$$

Calculo teórico metal de adição ER308H representado na figura 15 na linha de cor verde

$$\text{Ni}_{\text{eq.}} = 9,180 + 30 \times 0,046 + 0,5 \times 1,940 = 11,53$$

$$\text{Cr}_{\text{eq.}} = 19,830 + 0,080 + 1,5 \times 0,410 + 0,5 \times 0 = 20,52$$

Observa-se que no campo da linha isoferrita do diagrama de Schaeffer apresentou resultado de 10FN.

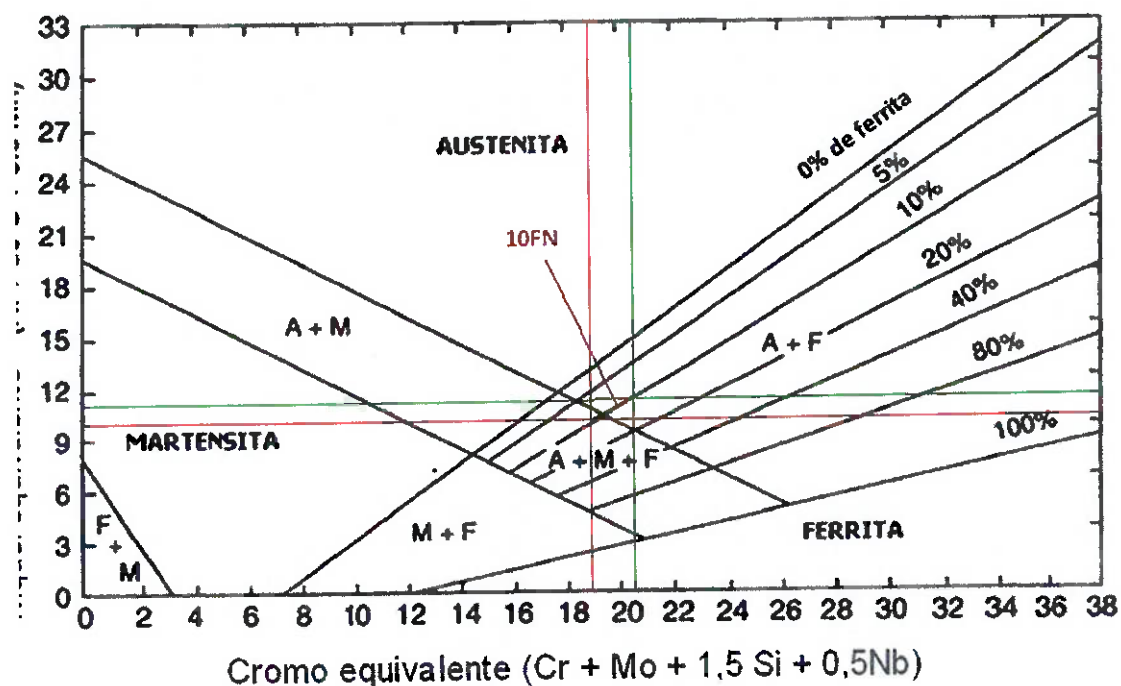


Figura 15: Diagrama de Schaeffler entre Tipo 304H com metal de adição ER308H

Na figura 16 foi prevista a porcentagem da solda utilizando o cromo equivalente e níquel equivalente do consumível de soldagem E308H-17 com o metal de base Tipo 304H representados no diagrama de Schaeffler.

Calculo teórico de metal de base representado na figura 16 na linha de cor vermelha:

$$Ni_{eq.} = 8,01 + 30 \times 0,044 + 0,5 \times 1,30 = 9,98$$

$$Cr_{eq.} = 18,09 + 0,142 + 1,5 \times 0,390 + 0,5 \times 0 = 18,817$$

Calculo teórico metal de adição E308H-17 representado na figura 16 na linha de cor verde

$$Ni_{eq.} = 9,80 + 30 \times 0,059 + 0,5 \times 0,075 = 11,60$$

$$Cr_{eq.} = 19,83 + 0,075 + 1,5 \times 0,680 + 0,5 \times 0 = 20,92$$

Observa-se que no campo da linha isoferrita do diagrama de Schaeffer apresentou resultado de 7FN.

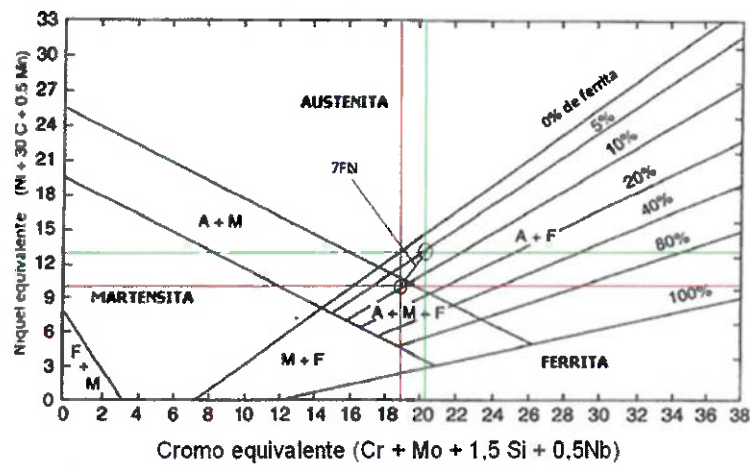


Figura 16: Diagrama de Schaeffer entre Tipo 304H com metal de adição E308H-17

Na figura 17 foi prevista a porcentagem da solda utilizando o cromo equivalente e níquel equivalente do consumível de soldagem ER347 com o metal de base Tipo 304H representados no diagrama de Schaeffer.

Calculo teórico de metal de base representado na figura 17 na linha de cor vermelha:

$$Ni_{eq.} = 8,01 + 30 \times 0,044 + 0,5 \times 1,30 = 9,98$$

$$Cr_{eq.} = 18,09 + 0,142 + 1,5 \times 0,390 + 0,5 \times 0 = 18,817$$

Calculo teórico metal de adição ER347 representado na figura 17 na linha de cor verde

$$Ni_{eq.} = 9,350 + 30 \times 0,052 + 0,5 \times 1,700 = 11,76$$

$$Cr_{eq.} = 19,220 + 0,040 + 1,5 \times 0,390 + 0,5 \times 0 = 19,84$$

Observa-se que no campo da linha isoferrita do diagrama de Schaeffer apresentou resultado de 9FN.

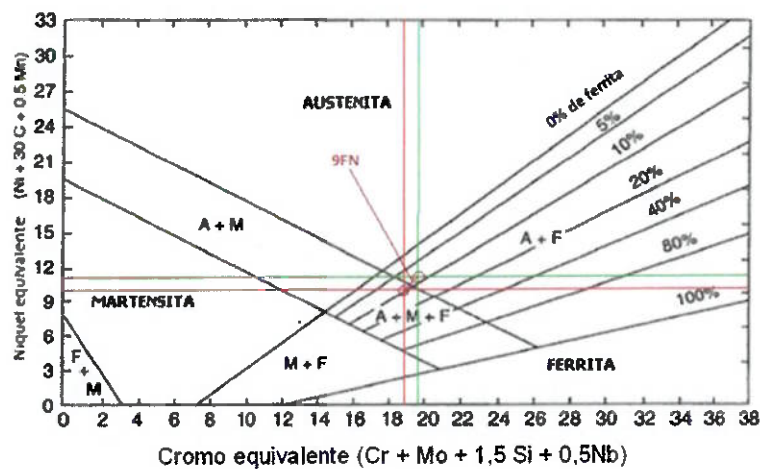


Figura 17: Diagrama de Schaeffler entre Tipo 304H com metal de adição ER347

Na figura 18 foi prevista a porcentagem da solda utilizando o cromo equivalente e níquel equivalente do consumível de soldagem E347-17 com o metal de base Tipo 304H representados no diagrama de Schaeffler.

Calculo teórico de metal de base representado na figura 18 na linha de cor vermelha:

$$Ni_{eq.} = 8,01 + 30 \times 0,044 + 0,5 \times 1,30 = 9,98$$

$$Cr_{eq.} = 18,09 + 0,142 + 1,5 \times 0,390 + 0,5 \times 0 = 18,817$$

Calculo teórico metal de adição E347-17 representado na figura 18 na linha de cor verde

$$Ni_{eq.} = 9,330 + 30 \times 0,024 + 0,5 \times 0,790 = 10,44$$

$$Cr_{eq.} = 19,880 + 0,043 + 1,5 \times 0,656 + 0,5 \times 0 = 20,02$$

Observa-se que no campo da linha isoferrita do diagrama de Schaeffer apresentou resultado de 10FN.

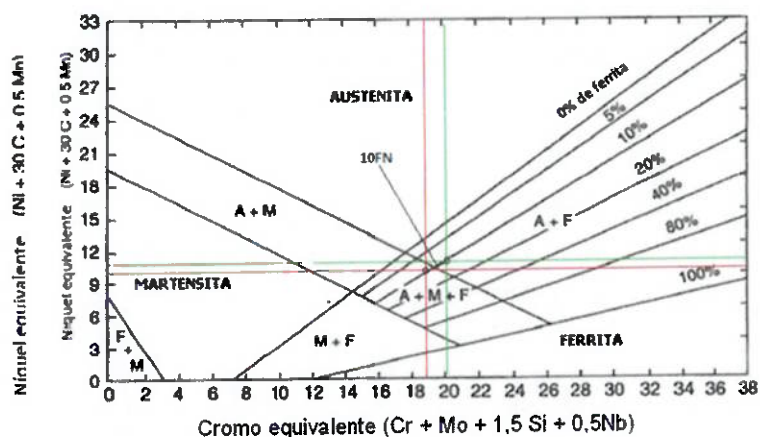


Figura 18: Diagrama de Schaeffler entre Tipo 304H com metal de adição E347-17

Pelo diagrama de DeLong, além de verificar a estrutura obtida na solidificação do metal de adição, verifica-se também o número de ferrita, neste diagrama DeLong adicionou o nitrogênio como referência para cálculo de níquel equivalente.

Na figura 19 foi prevista a porcentagem da solda utilizando o cromo equivalente e níquel equivalente do consumível de soldagem ER308H com o metal de base Tipo 304H representados no diagrama de DeLong.

Calculo teórico de metal de base representado na figura 19 na linha de cor vermelha:

$$Ni_{eq.} = 8,01 + 30 \times 0,044 + 0,5 \times 1,30 = 9,98$$

$$Cr_{eq.} = 18,09 + 0,142 + 1,5 \times 0,390 + 0,5 \times 0 = 18,817$$

Calculo teórico metal de adição ER308H representado na figura 19 na linha de cor verde

$$Ni_{eq.} = 9,180 + 30 \times 0,046 + 0,5 \times 1,940 = 11,53$$

$$Cr_{eq.} = 19,830 + 0,080 + 1,5 \times 0,410 + 0,5 \times 0 = 20,52$$

Observa-se que no campo da linha isoferrita do diagrama de DeLong apresentou resultado de 10FN.

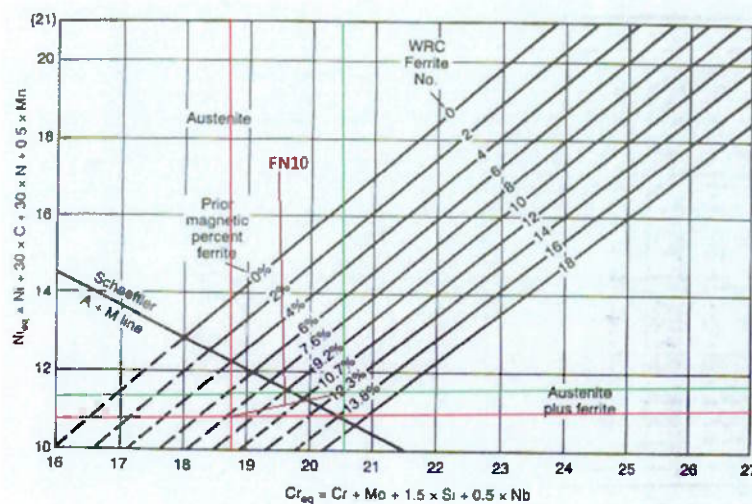


Figura 19: Diagrama de DeLong entre Tipo 304H com metal de adição ER308H

Na figura 20 foi prevista a porcentagem da solda utilizando o cromo equivalente e níquel equivalente do consumível de soldagem E308H-17 com o metal de base Tipo 304H representados no diagrama de DeLong.

Calculo teórico de metal de base representado na figura 20 na linha de cor vermelha:

$$Ni_{eq.} = 8,01 + 30 \times 0,044 + 0,5 \times 1,30 = 9,98$$

$$Cr_{eq.} = 18,09 + 0,142 + 1,5 \times 0,390 + 0,5 \times 0 = 18,817$$

Calculo teórico metal de adição E308H-17 representado na figura 20 na linha de cor verde

$$Ni_{eq.} = 9,80 + 30 \times 0,059 + 0,5 \times 0,075 = 11,60$$

$$Cr_{eq.} = 19,83 + 0,075 + 1,5 \times 0,680 + 0,5 \times 0 = 20,92$$

Observa-se que no campo da linha isoferrita do diagrama de DeLong apresentou resultado de 10FN.

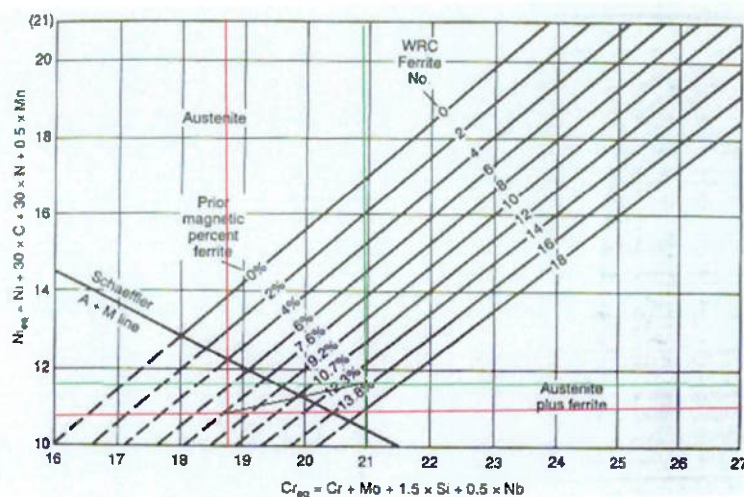


Figura 20: Diagrama de DeLong entre Tipo 304H com metal de adição E308H-17

Na figura 21 foi prevista a porcentagem da solda utilizando o cromo equivalente e níquel equivalente do consumível de soldagem ER347 com o metal de base Tipo 304H representados no diagrama de DeLong.

Calculo teórico de metal de base representado na figura 21 na linha de cor vermelha:

$$Ni_{eq.} = 8,01 + 30 \times 0,044 + 0,5 \times 1,30 = 9,98$$

$$Cr_{eq.} = 18,09 + 0,142 + 1,5 \times 0,390 + 0,5 \times 0 = 18,817$$

Calculo teórico metal de adição ER347 representado na figura 21 na linha de cor verde

$$Ni_{eq.} = 9,350 + 30 \times 0,052 + 0,5 \times 1,700 = 11,76$$

$$Cr_{eq.} = 19,220 + 0,040 + 1,5 \times 0,390 + 0,5 \times 0 = 19,84$$

Observa-se que no campo da linha iso ferrita do diagrama de DeLong apresentou resultado de 9FN.

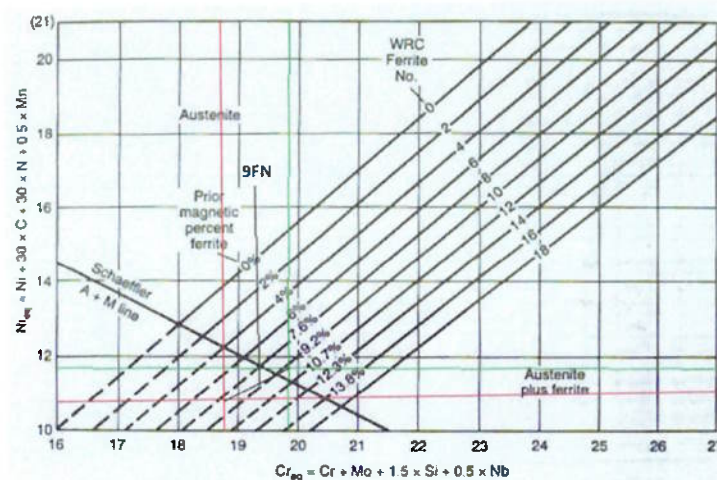


Figura 21: Diagrama de DeLong entre Tipo 304H com metal de adição ER347

Na figura 22 foi prevista a porcentagem da ferrita utilizando o cromo equivalente e níquel equivalente do consumível de soldagem E347-17 com o metal de base Tipo 304H representados no diagrama de DeLong.

Calculo teórico de metal de base representado na figura 22 na linha de cor vermelha:

$$Ni_{eq.} = 8,01 + 30 \times 0,044 + 0,5 \times 1,30 = 9,98$$

$$Cr_{eq.} = 18,09 + 0,142 + 1,5 \times 0,390 + 0,5 \times 0 = 18,817$$

Calculo teórico metal de adição E347-17 representado na figura 22 na linha de cor verde

$$Ni_{eq.} = 9,330 + 30 \times 0,024 + 0,5 \times 0,790 = 10,44$$

$$Cr_{eq.} = 19,880 + 0,043 + 1,5 \times 0,656 + 0,5 \times 0 = 20,02$$

Observa-se que no campo da linha isoferrita do diagrama de DeLong apresentou resultado de 9,5FN.

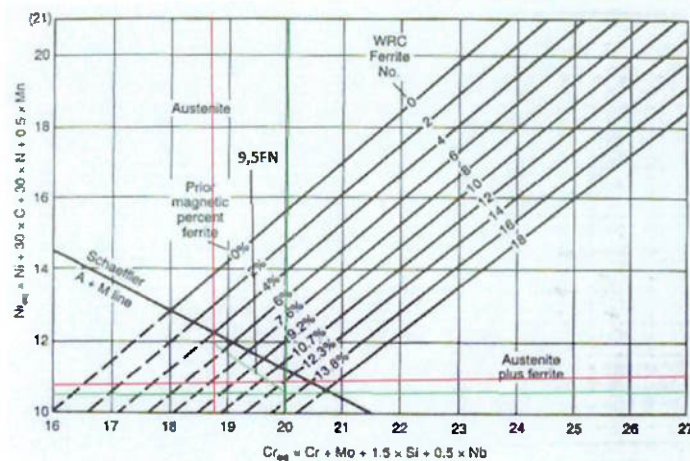


Figura 22:Diagrama de DeLong entre Tipo 304H com metal de adição E347-17

4.1 Acompanhamento da soldagem

Foram verificadas as condições ambientais, as condições de segurança e higiene, os equipamentos de soldagem, os instrumentos de medição e os consumíveis a serem utilizados pelo soldador.

Os soldadores são qualificados conforme ASME Sec IX.. (Petroleo Brasileiro S/A, 2015)

As soldagens dos corpos de prova foram preparados conforme figura 23 e soldados sem pré-aquecimentos e temperatura de interpasse não excedendo 150 °C.

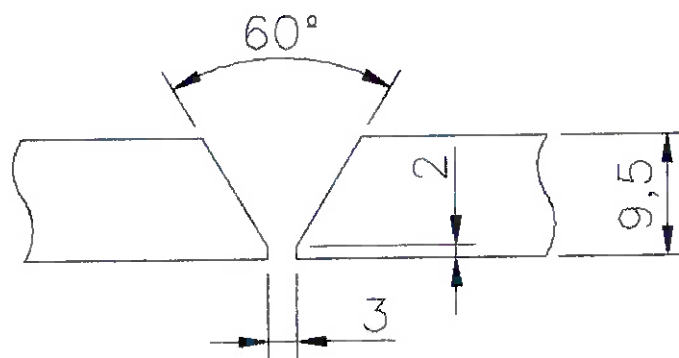


Figura 23:Croquis da preparação dos corpos de prova – CP1 a CP6



Figura 24: Soldador soldando os corpos de prova

A soldagem foi realizada na posição plana – 1G, conforme ASME SEÇÃO IX edição 2013 ilustrada na figura 25 (ASME Section IX -American Society of Mechanical Engineers Welding and Brazing Qualifications,, 2013)

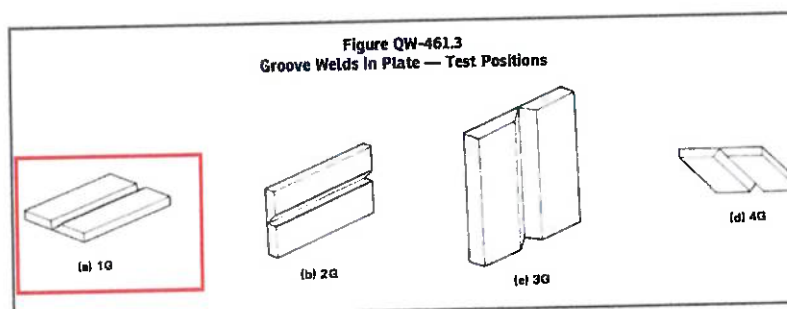


Figura 25: Posição de soldagem 1G- Plana (ASME Section IX -American Society of Mechanical Engineers Welding and Brazing Qualifications,, 2013)

Acompanhamento de soldagem dos CP1, CP2 , CP3 , CP4 , CP5 e CP6, conforme tabelas 17 a 22 abaixo

Tabela 17: Acompanhamento de soldagem CP1

ACOMPANHAMENTO DE SOLDAGEM CP 1 METAL DE BASE - NOVO

CP1 – Utilizando **ER308H + E308H-17**

PASSE (PASS) Nº.	CAMADA (LAYER) Nº.	CLASSIF.AWS (AWS CLASSIF.)	Ø (Ø) mm	TENSÃO (TENSION) V	AMPER. (AMPER.) A	VELOC. (SPEED) cm/min	* Aporte Térmico Heat Input (kJ/cm)	TEMPER. (TEMP.) °C	VAZÃO GÁS TOCHA (FLOW SHIELDING) L/min	VAZÃO GÁS PURGA (FLOW BACKING) L/min
1	1	ER 308H	2,4	12	138	11	0,90	20	14 Argônio 99,99%	12 Argônio 99,99%
2	2	ER 308H	2,4	12	135	13	0,74	45	14 Argônio 99,99%	12 Argônio 99,99%
3-4	3	ER 308H	2,4	12	135	13	0,74	55	14 Argônio 99,99%	12 Argônio 99,99%
5-7	4	E 308H-17	3,2	30	120	22,3	0,96	80	N/A	N/A
8-11	5	E 308H-17	3,2	30	125	23	0,97	80	N/A	N/A

APÓS ABERTURA COM LIXADEIRA PELO LADO OPOSTO

12	1	ER 308H	2,4	12	117	9,3	0,90	100	14 Argônio 99,99%	12 Argônio 99,99%
----	---	---------	-----	----	-----	-----	------	-----	----------------------	----------------------

Instrumentos de medição :

AMPERIMETRO / VOLTÍMETRO - MINIPA ET-3388:

Certificado Nº AL-00150856/14 – Validade: 17/12/2015

TERMOPAR – Tipo K – MINIPA- TP-001 -

Certificado Nº TP-00150856/14 – Validade: 17/12/2015

Calibre de Solda – FBTS –

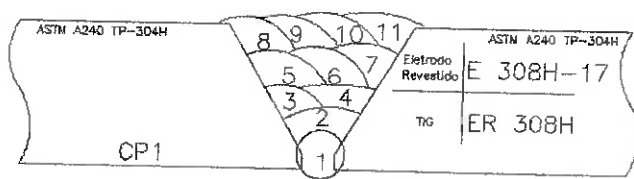
Certificado Nº CS-00150856/14 – Validade: 17/12/2015

Metal de Base :

ASTM A240 TP-304H

$$* \text{Heat Input (Aporte Térmico)} = \frac{\text{tensão (V)} \times \text{corrente (A)} \times 60}{\text{velocidade de soldagem} \left(\frac{\text{cm}}{\text{min}} \right)} = \text{KJ/cm}$$

Lado 1



Lado 2 – Após abertura com lixadeira no lado oposto

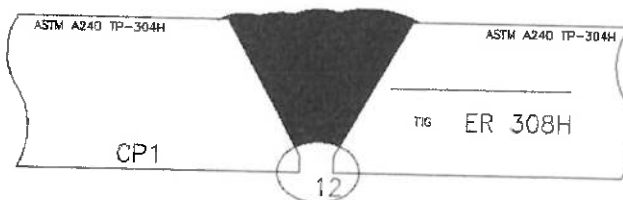


Tabela 18: Acompanhamento de soldagem CP2

ACOMPANHAMENTO DE SOLDAGEM CP 2 – METAL DE BASE – NOVO

CP2 – Utilizando **ER347 + E347-17**

PASSE (PASS) Nº.	CAMADA (LAYER) Nº.	CLASSIF.AWS (AWS CLASSIF.)	Ø (Ø) mm	TENSÃO (TENSION) V	AMPER. (AMPER.) A	VELOC. (SPEED) cm/min	* Aporte Térmico Heat Input (kJ/cm)	TEMPER. (TEMP.) °C	VAZÃO GÁS TOCHA (FLOW SHIELDING) L/min	VAZÃO GÁS PURGA (FLOW BACKING) L/min
1	1	ER 347	2,4	11	127	8,7	0,96	20	14 Argônio 99,99%	12 Argônio 99,99%
2	2	ER 347	2,4	12	140	11,8	0,85	45	14 Argônio 99,99%	12 Argônio 99,99%
3-4	3	ER 347	2,4	12	145	13	0,8	55	14 Argônio 99,99%	12 Argônio 99,99%
5-7	4	E 347-17	3,2	29	135	23	0,90	80	N/A	N/A
8-11	5	E 34717	3,2	29	135	24	0,97	80	N/A	N/A

APÓS ABERTURA COM LIXADEIRA PELO LADO OPOSTO

12	1	ER 347	2,4	12	136	9	1,0	100	14 Argônio 99,99%	12 Argônio 99,99%
----	---	--------	-----	----	-----	---	-----	-----	----------------------	----------------------

Instrumentos de medição :

AMPERIMETRO / VOLTIMETRO - MINIPA ET-3388:

Certificado Nº. AL-00150856/14 – Validade: 17/12/2015

TERMOPAR – Tipo K – MINIPA- TP-001 -

Certificado Nº. TP-00150856/14 – Validade: 17/12/2015

Calibre de Solda – FBTS –

Certificado Nº. CS-00150856/14 – Validade: 17/12/2015

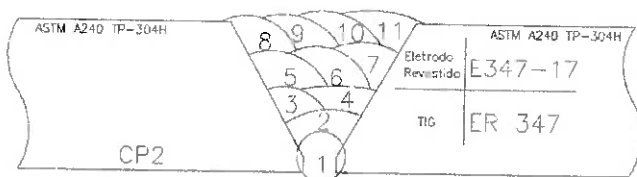
Certificados :

Metal de Base :

ASTM A240 TP-304H

* Heat Input (Aporte Térmico) = $\frac{\text{tensão (V)} \times \text{corrente (A)} \times 60}{\text{velocidade de soldagem} \left(\frac{\text{cm}}{\text{min}}\right)} = \text{Kj/cm}$

Lado 1



Lado 2 – Após abertura com lixadeira no lado oposto

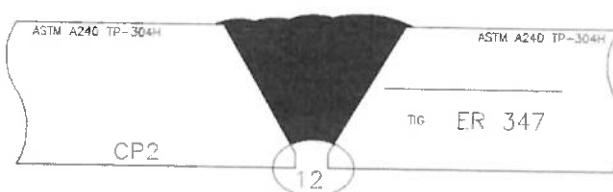


Tabela 19: Acompanhamento de soldagem CP3

ACOMPANHAMENTO DE SOLDAGEM CP 3 – METAL DE BASE ENVELHECIDO

CP3 – Utilizando **ER308H + E308H-17**

PASSE (PASS) Nº.	CAMADA (LAYER) Nº.	CLASSIF.AWS (AWS CLASSIF.)	Ø (Ø) mm	TENSÃO (TENSION) V	AMPER. (AMPER.) A	VELOC. (SPEED) cm/min	* Aporte Térmico Heat Input (kJ/cm)	TEMPER. (TEMP.) °C	VAZÃO GÁS TOCHA (FLOW SHIELDING) L/min	VAZÃO GÁS PURGA (FLOW BACKING) L/min
1	1	ER 308H	2,4	11	103	9,2	0,738	20	14 Argônio 99,99%	12 Argônio 99,99%
2	2	ER 308H	2,4	11	110	9,5	0,76	45	14 Argônio 99,99%	12 Argônio 99,99%
3-4	3	ER 308H	2,4	12	130	10	0,93	45	14 Argônio 99,99%	12 Argônio 99,99%
5-6	4	E 308H-17	3,2	29	130	21,6	1,04	80	N/A	N/A
7-8	5	E 308H-17	3,2	30	142	26,6	0,96	80	N/A	N/A

APÓS ABERTURA COM LIXADEIRA PELO LADO OPOSTO

9	1	ER 308H	2,4	12	115	9,4	0,88	100	14 Argônio 99,99%	12 Argônio 99,99%
---	---	---------	-----	----	-----	-----	------	-----	----------------------	----------------------

Instrumentos de medição :

AMPERIMETRO / VOLTÍMETRO - MINIPA ET-3368:

Certificado Nº. AL-00150856/14 – Validade: 17/12/2015

TERMOPAR -- Tipo K – MINIPA- TP-001 -

Certificado Nº. TP-00150856/14 – Validade: 17/12/2015

Calibre de Solda – FBTS –

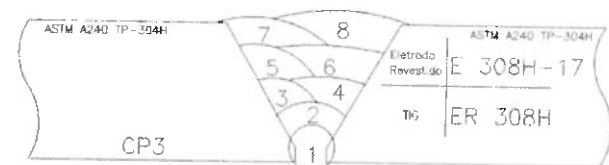
Certificado Nº. CS-00150856/14 – Validade: 17/12/2015

Metal de Base :

ASTM A240 TP-304H

* Heat Input (Aporte Térmico) = $\frac{\text{tensão (V)} \times \text{corrente (A)} \times 60}{\text{velocidade de soldagem } \left(\frac{\text{cm}}{\text{min}}\right)} = \text{KJ/cm}$

Lado 1



Lado 2 – Após abertura com lixadeira no lado oposto

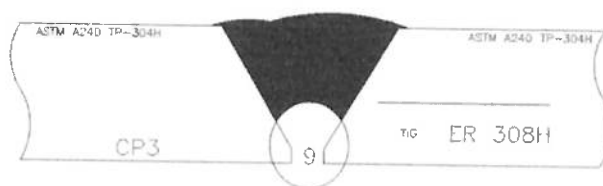


Tabela 20 :Acompanhamento de soldagem CP4

ACOMPANHAMENTO DE SOLDAGEM CP 4 – METAL DE BASE ENVELHECIDO

CP4 – Utilizando **ER347 + E347-17**

PASSE (PASS) Nº.	CAMADA (LAYER) Nº.	CLASSIF.AWS (AWS CLASSIF.)	Ø (Ø) mm	TENSÃO (TENSION) V	AMPER. (AMPER.) A	VELOC. (SPEED) cm/min	* Aporte Térmico Heat Input (kJ/cm)	TEMPER. (TEMP.) °C	VAZÃO GÁS TOCHA (FLOW SHIELDING) L/min	VAZÃO GÁS PURGA (FLOW BACKING) L/min
1	1	ER 347	2,4	11	115	10,3	0,73	20	14 Argônio 99,99%	12 Argônio 99,99%
2	2	ER 347	2,4	11	120	10	0,79	45	14 Argônio 99,99%	12 Argônio 99,99%
3-4	3	ER 347	2,4	12	137	9,8	1,0	45	14 Argônio 99,99%	12 Argônio 99,99%
5-6	4	E 347-17	3,2	29	147	22	1,16	80	N/A	N/A
7-8	5	E 34717	3,2	29	150	24	1,08	80	N/A	N/A

APÓS ABERTURA COM LIXADEIRA PELO LADO OPOSTO

9	1	ER 347	2,4	12	125	9,8	0,91	100	14 Argônio 99,99%	12 Argônio 99,99%
---	---	--------	-----	----	-----	-----	------	-----	----------------------	----------------------

Instrumentos de medição :

AMPERIMETRO / VOLTÍMETRO - MINIPA ET-3388

Certificado Nº. AL-00150856/14 – Validade: 17/12/2015

TERMOPAR – Tipo K – MINIPA- TP-001 -

Certificado Nº. TP-00150856/14 – Validade: 17/12/2015

Calibre de Solda – FBTS –

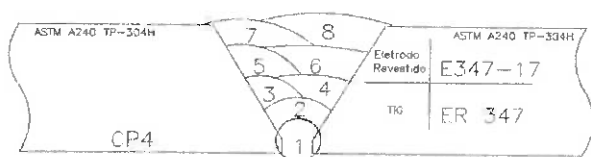
Certificado Nº. CS-00150856/14 – Validade: 17/12/2015

Metal de Base :

ASTM A240 TP-304H

$$\text{Heat Input (Aporte Térmico)} = \frac{\text{tensão (V)} \times \text{corrente (A)} \times 60}{\text{velocidade de soldagem} \left(\frac{\text{cm}}{\text{min}} \right)} = \text{KJ/cm}$$

Lado 1



Lado 2 – Após abertura com lixadeira no lado oposto

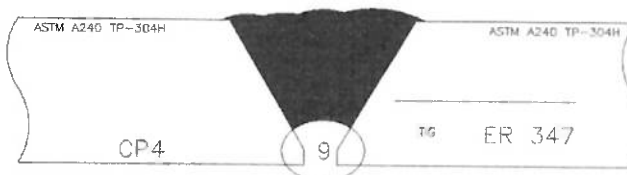


Tabela 21: Acompanhamento de soldagem CP6

ACOMPANHAMENTO DE SOLDAGEM CP 6 – METAL DE BASE ENVELHECIDO

CP6 – Utilizando **ER347 + E347-17**

PASSE (PASS)	CAMADA (LAYER)	CLASSIF.AWS (AWS CLASSIF.)	Ø (Ø)	TENSÃO (TENSION)	AMPER. (AMPER.)	VELOC. (SPEED)	* Aporte Térmico Heat Input (kJ/cm)	TEMPER. (TEMP.)	VAZÃO GÁS TOCHA (FLOW SHIELDING)	VAZÃO GÁS PURGA (FLOW BACKING)
Nº.	Nº.		mm	V	A	cm/min		°C	L/min	L/min
1	1	ER 347	2,4	10	90	4,0	1,35	20	14 Argônio 99,99%	12 Argônio 99,99%
2	2	ER 347	2,4	10	111	7,0	0,95	50	14 Argônio 99,99%	12 Argônio 99,99%
3	3	E 347-17	3,2	29-30	125	16,0	1,4	60	N/A	N/A
5-6	4	E 347-17	3,2	29-30	115	17,0	1,21	80	N/A	N/A
7-9	5	E 347-17	3,2	29-30	115	17,0	1,21	80	N/A	N/A

APÓS ABERTURA COM LIXADEIRA PELO LADO OPOSTO

N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Instrumentos de medição :

AMPERIMETRO / VOLTÍMETRO - MINIPA ET-3388:

Certificado Nº. AL-00150856/14 – Validade: 17/12/2015

TERMOPAR – Tipo K – MINIPA- TP-001 -

Certificado Nº. TP-00150856/14 – Validade: 17/12/2015

Calibre de Solda – FBTS –

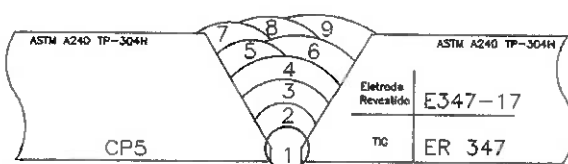
Certificado Nº. CS-00150856/14 – Validade: 17/12/2015

Metal de Base :

ASTM A240 TP-304H

$$\text{* Heat Input (Aporte Térmico) = } \frac{\text{tensão (V)} \times \text{corrente (A)} \times 60}{\text{velocidade da soldagem } \left(\frac{\text{cm}}{\text{min}} \right)} = \text{KJ/cm}$$

Lado 1



Lado 2 – Após abertura com lixadeira no lado oposto



Tabela 22: Acompanhamento de soldagem CP5

ACOMPANHAMENTO DE SOLDAGEM CP 5 – METAL DE BASE ENVELHECIDO

CP5 – Utilizando **ER308H + E308H-17**

PASSE (PASS)	CAMADA (LAYER)	CLASSIF.AWS (AWS CLASSIF.)	Ø (Ø)	TENSÃO (TENSION)	AMPER. (AMPER.)	VELOC. (SPEED)	* Aporte Térmico Heat Input (kJ/cm)	TEMPER. (TEMP.)	VAZÃO GÁS TOCHA (FLOW SHIELDING)	VAZÃO GÁS PURGA (FLOW BACKING)
Nº.	Nº.		mm	V	A	cm/min		°C	L/min	L/min
1	1	ER 308H	2,4	10	92	5,0	1,10	20	14 Argônio 99,99%	12 Argônio 99,99%
2	2	ER 308H	2,4	10	111	8,0	0,83	45	14 Argônio 99,99%	12 Argônio 99,99%
3	3	E 308H-17	3,2	29-30	111	16,0	1,24	55	N/A	N/A
4-5	4	E 308H-17	3,2	29	107	15,0	1,24	80	N/A	N/A
6-8	5	E 308H-17	3,2	29	107	15,0	1,24	90	N/A	N/A

APÓS ABERTURA COM LIXADEIRA PELO LADO OPOSTO

N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Instrumentos de medição :

AMPERIMETRO / VOLTÍMETRO - MINIPA ET-3388:

Certificado Nº. AL-00150856/14 – Validade: 17/12/2015

TERMOPAR – Tipo K – MINIPA- TP-001 -

Certificado Nº. TP-00150856/14 – Validade: 17/12/2015

Calibre de Solda – FBTS –

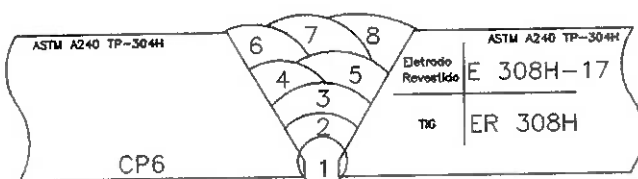
Certificado Nº. CS-00150856/14 – Validade: 17/12/2015

Metal de Base :

ASTM A240 TP-304H

$$* \text{Heat Input (Aporte Térmico)} = \frac{\text{tensão (V)} \times \text{corrente (A)} \times 60}{\text{velocidade de soldagem} \left(\frac{\text{cm}}{\text{min}} \right)} = \text{Kj/cm}$$

Lado 1



Lado 2 – Após abertura com lixadeira no lado oposto



4.2 Ensaios Realizados:

Foram realizados os ensaios macrografia, micrografia, teste de corrosão ASTM A262 prática A, dobramento, tração à temperatura ambiente nos corpos de prova 1 a 4. Para os corpos de prova 5 e 6 foram realizados os ensaios de tração à quente longitudinal, ferrita antes e após tratamento térmico de simulação de operação (800°C em 60h) e ensaio para determinação do teor de fase sigma do metal de base e solda envelhecidos (solda original de fabricação do equipamento).

5. Resultados e Discussão

5.1 Ensaios Macrográficos

Os ensaios macrográficos foram realizados e avaliados de acordo com as exigências da norma ASME IX-2013, conforme QW-183 e QW-473.3-1 para realização dos procedimentos dos ensaios macrograficos bem como os tipos de ataques químicos. Este ensaio possibilita o dimensionamento dos reforços de face e raiz, localização de pontos com falta de fusão, falta de penetração, possíveis inclusões de escória, trincas no metal soldado ou na ZAC e outras descontinuidades. (ASME Section IX -American Society of Mechanical Engineers Welding and Brazing Qualifications,, 2013)

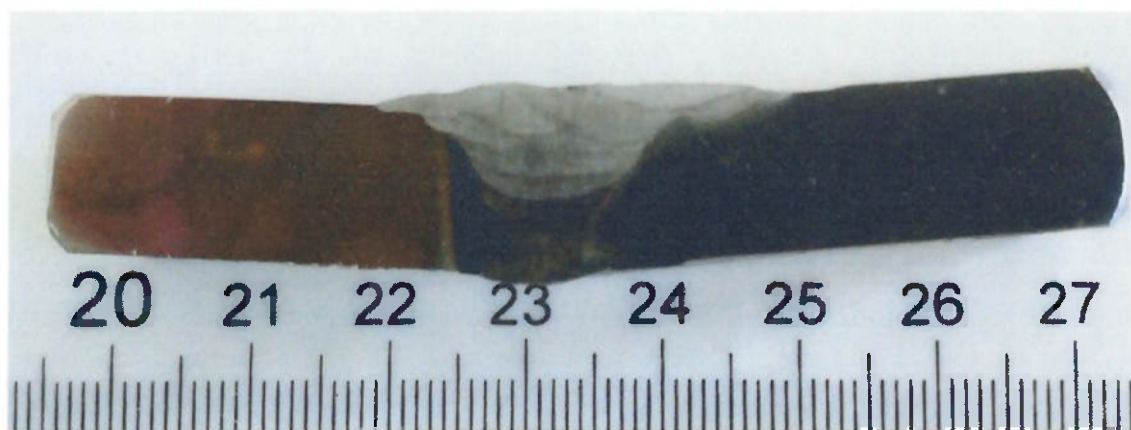


Figura 26:Ensaio Macrografico realizado no CP1

Tabela 23: Resultados do ensaio macrografico no CP1

Avaliação das Descontinuidades no CP1	
Fusão	Isento
Mordedura	Isento
Porosidade	Isento
Trincas	Isento
Outros	Isento



Figura 27:Ensaio Macrografico realizado no CP2

Tabela 24: Resultados do ensaio macrografico no CP2

Avaliação das Descontinuidades no CP2	
Fusão	Isento
Mordedura	Isento
Porosidade	Isento
Trincas	Isento
Outros	Isento

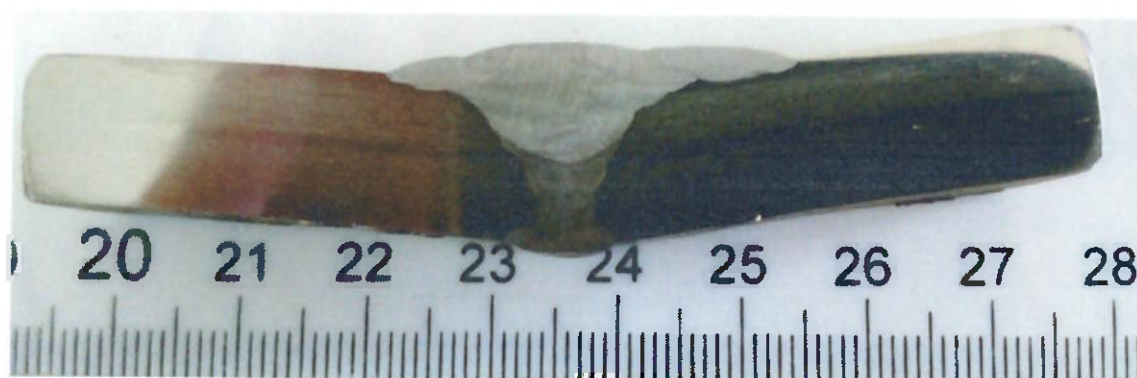


Figura 28 :Ensaio Macrografico realizado no CP3

Tabela 25: Resultados do ensaio macrografico no CP3

Avaliação das Descontinuidades no CP3	
Fusão	Isento
Mordedura	Isento
Porosidade	Isento
Trincas	Isento
Outros	Isento



Figura 29: Ensaio Macrografico realizado no CP4

Tabela 26: Resultados do ensaio macrografico no CP4

Avaliação das Descontinuidades no CP4	
Fusão	Isento
Mordedura	Isento
Porosidade	Isento
Trincas	Isento
Outros	Isento

Os corpos de prova 5 e 6 apresentaram resultados semelhantes aos de 1 a 4.

Os resultados mostram que não houve descontinuidades aparentes nas macrografias, bem como todos os Corpos de prova apresentaram fusão e deposição completas.

5.2 Ensaios de tração à temperatura ambiente:

Foi adotado o critério para retirada dos corpos de prova conforme norma ASME Sec. IX QW-463.1(b) A Figura nº 30 abaixo mostra os locais indicados pela norma para remoção dos corpos de prova para ensaios de tração e dobramento.

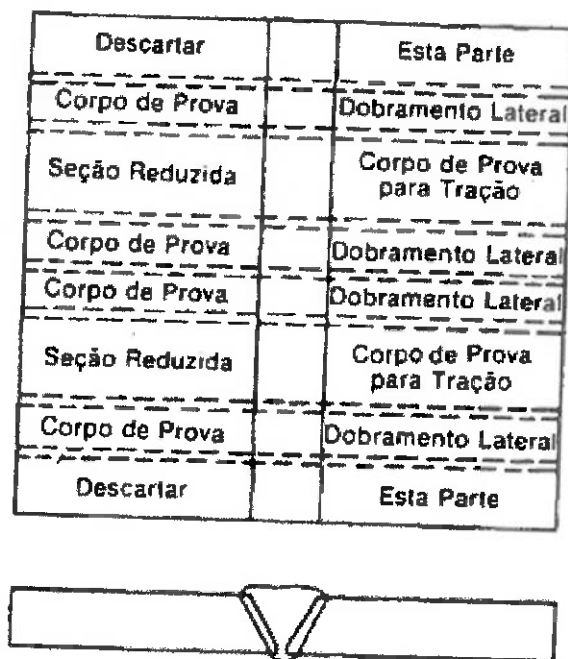


Figura 30: Local para remoção dos corpos de prova conforme ASME IX

Todos os corpos de provas ensaiados atendem a especificação do ASTM A-240 TP 304H que requer um limite de resistência mínimo de 515 MPa e um limite de escoamento mínimo de 205 MPa. Essas especificações estão previstas conforme norma ASTM. Foram realizadas 2 trações e 4 dobramentos em cada CP.

Os corpos de prova foram usinados e preparados seguindo os padrões da norma: ASME IX Ed.2013

Ensaio Código ASME Seção IX Ed. 2013 – QW 150/152

Preparação dos CP's Código ASME Seção IX Ed. 2013 – QW 462.1(a)

Critério de Aceitação Código ASME Seção IX Ed. 2013 – QW 153

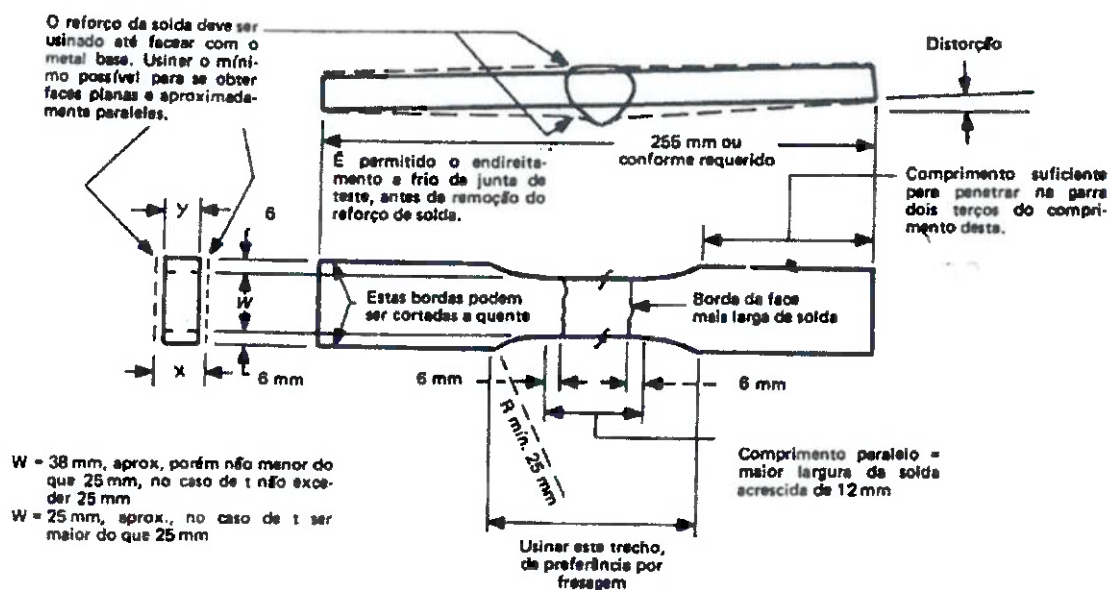


Figura 31: Dimensões da amostra conforme QW-462.1(a)



Figura 32: Ensaio de tração realizado no CP1 tração 1

Tabela 27: Valores do ensaio de tração realizados no CP1 (Tração 1)

AMOSTRAS	LARGURA, mm	ESPESSURA, mm	ÁREA (mm ²)	LIMITE DE RESISTÊNCIA, MPa	FORÇA MÁXIMA, KN	LOCALIZAÇÃO / TIPO DE FRATURA
CP1Tração1	20,03	9,77	195,69	670	130,74	Metal Base / Dúctil



Figura 33: Ensaio de tração CP1 (Tração 2)

Tabela 28: Valores do ensaio de tração realizados no CP1(Tração 2)

AMOSTRAS	LARGURA, mm	ESPESSURA, mm	ÁREA (mm ²)	LIMITE DE RESISTÊNCIA, MPa	FORÇA MÁXIMA, KN	LOCALIZAÇÃO / TIPO DE FRATURA
CP1 Tração2	19,31	8,90	171,86	635	N/A	Metal Base / Dúctil



Figura 34: Ensaio de tração realizado no CP2 (Tração 1)

Tabela 29: Valores do ensaio de tração realizados no CP2 (Tração 1)

AMOSTRAS	LARGURA, mm	ESPESSURA, mm	ÁREA (mm ²)	LIMITE DE RESISTÊNCIA, MPa	FORÇA MÁXIMA, KN	LOCALIZAÇÃO / TIPO DE FRATURA
CP2Tração1	19,31	8,84	186,40	634	N/A	Rompeu na solda



Figura 35: Ensaio de tração realizado no CP2 (Tração 2)

Tabela 30: Valores do ensaio de tração realizados no CP2(Tração 2)

AMOSTRAS	LARGURA, mm	ESPESSURA, mm	ÁREA (mm ²)	LIMITE DE RESISTÊNCIA, MPa	FORÇA MÁXIMA, KN	LOCALIZAÇÃO / TIPO DE FRATURA
CP2 Tração2	19,89	10,00	202,28	675	138,00	Rompeu na solda

Registro fotográfico das amostras após ensaios de tração do CP3 – Tração1



Figura 36: Amostra do ensaio de tração do CP3– Tração1

Tabela 31: Resultados do ensaio de tração no CP3 (Tração 1)

AMOSTRAS	LARGURA, mm	ESPESSURA, mm	ÁREA (mm ²)	LIMITE DE RESISTÊNCIA, MPa	FORÇA MÁXIMA, Kgf	LOCALIZAÇÃO / TIPO DE FRATURA
CP3 Tração 1	19,23	8,79	169,03	640	11032	Rompeu na solda



Figura 37: Amostra do ensaio de tração do CP3 – Tração 2

Tabela 32: Resultados do ensaio de tração no CP3 (Tração 2)

AMOSTRAS	LARGURA, mm	ESPESSURA, mm	ÁREA (mm ²)	LIMITE DE RESISTÊNCIA, MPa	FORÇA MÁXIMA, Kgf	LOCALIZAÇÃO / TIPO DE FRATURA
CP3 Tração 2	19,17	8,83	169,27	650	11226	Rompeu na solda



Figura 38: Amostra do ensaio de tração do CP4– Tração1

Tabela 33: Resultados do ensaio de tração no CP4 (Tração 1)

AMOSTRAS	LARGURA, mm	ESPESSURA, mm	ÁREA (mm ²)	LIMITE DE RESISTÊNCIA, MPa	FORÇA MÁXIMA, Kgf	LOCALIZAÇÃO / TIPO DE FRATURA
CP4 Tração 1	19,25	8,69	167,28	664	11334	Rompeu na solda



Figura 39: Amostra do ensaio de tração do CP4– Tração2

Tabela 34: Resultados do ensaio de tração no CP4 (Tração 2)

AMOSTRAS	LARGURA, mm	ESPESSURA, mm	ÁREA (mm ²)	LIMITE DE RESISTÊNCIA, MPa	FORÇA MÁXIMA, Kgf	LOCALIZAÇÃO / TIPO DE FRATURA
CP4 Tração 2	19,16	9,09	174,16	657	11660	Rompeu na solda

Os resultados obtidos mostram que todos os corpos de prova foram aprovados acima do mínimo especificado conforme norma do metal de base. No corpo de prova 1, em ambos os ensaios de tração, houve ruptura no metal de base, enquanto que em todos os outros houve ruptura no metal de solda. Em todos os casos o limite de resistência obtido foi similar em todos os corpos de prova e superior ao critério de aceitação do ASME IX.

Foi possível observar também que nos corpos de prova de tração 2 do CP1 e 2 não houve estricção na região de ruptura dos corpos de prova, apresentando aspecto frágil em comparação com os demais corpos de prova.

Deste modo pode-se observar que ambos os metais de base e soldas apresentam boa propriedade mecânica, com boa ductilidade, exceto nos corpos de prova de tração nº2 dos CP1 e 2.

5.3 Ensaio de Dobramento

O ensaio de dobramento, segundo a ASME BPVC IX (2013), tem o propósito de determinar se a junta soldada está em boas condições e possui ductilidade adequada. O metal de solda e a zona afetada pelo calor de todas as amostras estavam dentro da porção dobrada assim como recomendam as normas. A seguir são apresentadas na figura 39 para preparação das amostras e os resultados cada peça de teste na tabela 35.



Figura 39: Registro fotográfico da amostra após ensaio de dobramento

CP1

Realizados dois testes de dobramento lateral {DL} a 180°, utilizando-se cutelo de 40 mm e distância entre roletes de 63 mm

Tabela35: Resultado do ensaio dobramento lateral do CP1,CP2,CP3,CP4

Dobramento	Espessura (mm)	Largura(mm)	Mandril	Abertura de Base	Ângulo	Resultado
Lateral CP1- A/B	10	9,5	40	63	180°	ISENTO
Lateral CP2- A/B	10	9,5	40	63	180°	ISENTO
Lateral CP3- A/B	10	9,5	40	63	180°	ISENTO
Lateral CP4- A/B	10	9,5	40	63	180°	ISENTO

Equipamentos utilizados para o ensaio de dobramento:

Preparação do CP: Conforme Norma ASME IX Ed. 2013 QW 462.2

Método de Ensaio: Conforme Norma ASME IX Ed. 2013 QW 162

Critério de Aceitação: Conforme Norma ASME IX Ed. 2013 QW 163

De acordo com os resultados foi possível observar que todos os corpos de prova apresentaram resultados satisfatórios, não apresentando descontinuidades aparentes. Isto demonstra que ambos os metais de base apresentavam boa ductilidade.

5.4 Ensaio de tração à quente:

Os corpos de prova dos CPs 5 e 6 foram submetidos a ensaio de tração a quente, realizado a 800°C, conforme temperatura de operação do equipamento de onde foram extraídos os corpos de prova. O ensaio foi realizado no metal de solda no sentido longitudinal com o objetivo de ensaiar única e exclusivamente

o metal de solda. As figuras 41 e 42 apresentam os corpos de prova após o ensaio e a tabela 36 e 37 apresentam os resultados do ensaio.

Foi adotado o critério para retirada dos corpos de prova conforme norma ASME II Parte C, SFA A5.4. A Figura nº 40 abaixo mostra os locais indicados pela norma para remoção dos corpos de prova para ensaios de tração e dobramento. Como critério de aceitação, foi utilizado o ASME II part D para tensões admissíveis na temperatura de 800°C.

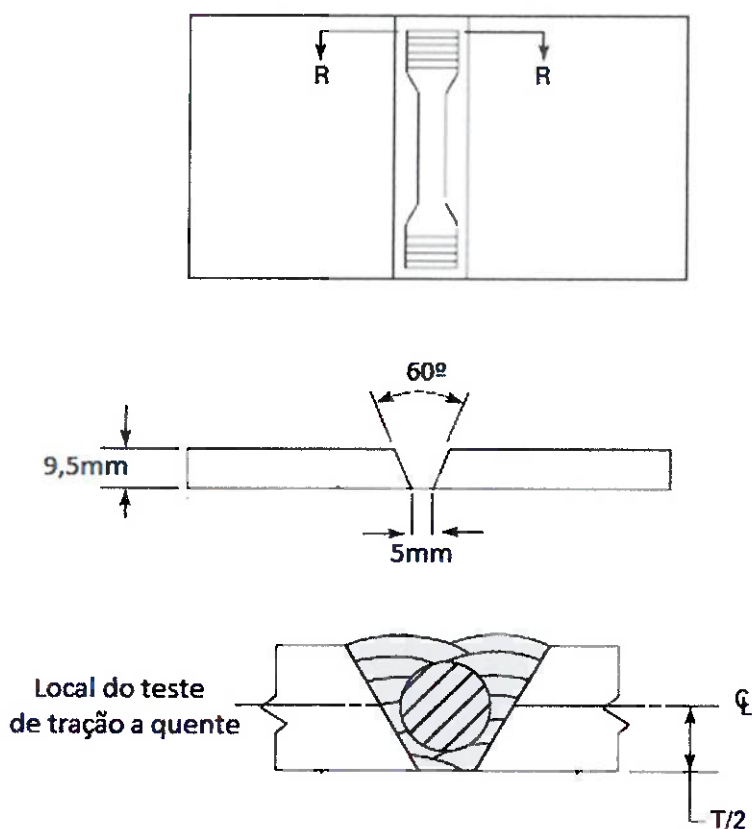


Figura 40: Local de remoção do CP de tração a quente.



Figura 41:Amostra do ensaio de tração à quente do CP5

Tabela 36:Resultados do ensaio de tração à quente no CP5

AMOSTRAS	Temperatura	Ø mm	ÁREA (mm ²)	LIMITE DE RESISTÊNCIA, MPa	CARGA Kgf	LOCALIZAÇÃO / TIPO DE FRATURA
CP5 (308H)	800°C	6,08	29,03	156	462	Solda Longitudinal / Frágil

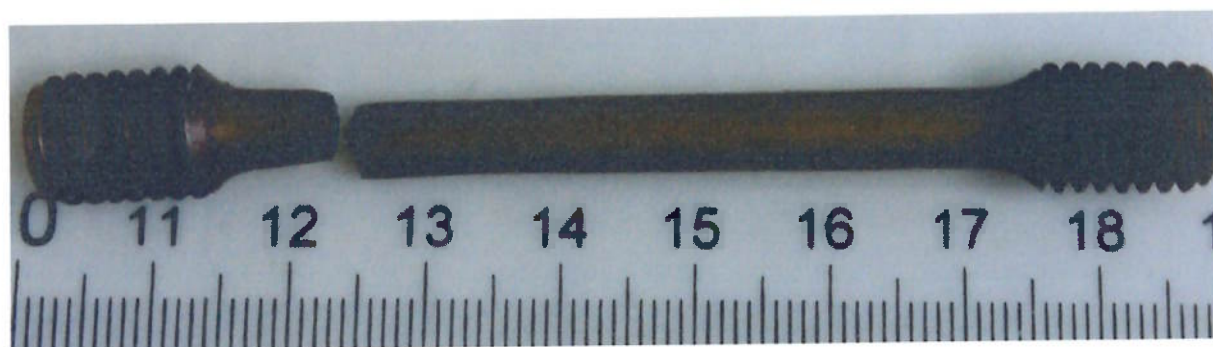


Figura 42:Amostra do ensaio de tração à quente do CP6

Tabela 37:Resultados do ensaio de tração à quente no CP6

AMOSTRAS	Temperatura	Ø mm	ÁREA (mm ²)	LIMITE DE RESISTÊNCIA, MPa	CARGA Kgf	LOCALIZAÇÃO / TIPO DE FRATURA
CP6 (347)	800°C	6,09	29,13	199	590	Solda Longitudinal / Frágil

Os resultados obtidos mostram que o CP6, que foi soldado com o metal de adição 347, apresentou resultado de ensaio de tração a quente 22% (199 e 156 Mpa, respectivamente) maior que o CP 5 (308H). Ambos os valores obtidos foram aprovados acima do mínimo especificado conforme norma ASME II Parte D para as tensões mínimas admissíveis para a temperatura de 800°C e em relação ao metal de base 304H é de 11,1 MPa.

Foi possível observar também que nos corpos de prova CP5 e 6 não houve estricção na região de ruptura dos corpos de prova, apresentando aspecto frágil

Deste modo pode-se observar que ambos os metais de base e soldas apresentam boa propriedade mecânica de resistência à tração na temperatura de operação do equipamento.

5.5 Ensaio de Metalográficos

No ensaio micrográfico das amostras extraídas das peças de testes soldadas com, após ataque químico, conforme ASTM A262 Prática A, foi possível identificar os passes, observar a área de refino de grão, a estrutura de solidificação e o metal de base afetado pelo calor (ZAC). Baseado nas informações da norma ASTM A-262 – 04 (ASTM A-240, 2004)



Figura 43: Microscópio óptico utiliza para análise micrográfica dos corpos de prova

Na figura 44 é possível observar a microestrutura do metal de base novo do cp1 onde é possível observar poucos contornos de grãos, caracterizando baixo ataque intergranular provocado pelo ácido oxálico. É possível observar também veios de ferrita delta alongado. por meio do ensaio de medição de ferrita foi possível obter um teor de 0,9FN.

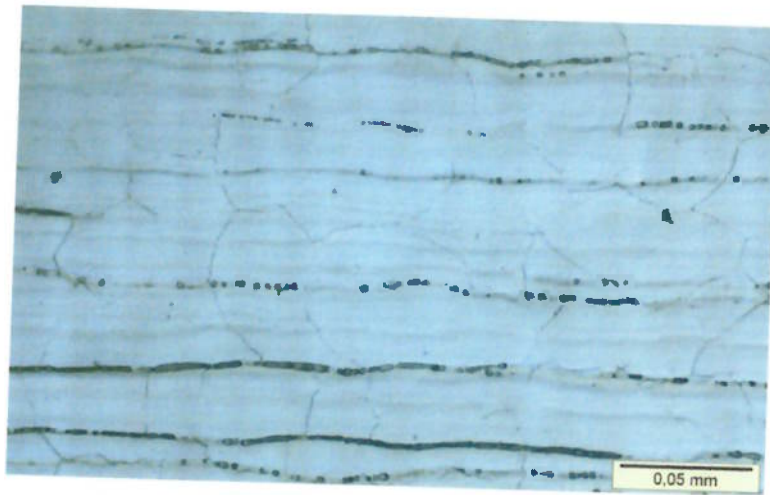


Figura 44:Análise Micrográfica no metal de base do CP1 (500X)

Na figura 45 é possível observar a microestrutura da ZAC no CP1 onde é possível observar poucos contornos de grãos, caracterizando baixo ataque intergranular provocado pelo ácido oxálico. É possível observar também que o metal de solda possui solidificação tipo FA, observando-se as dendritas de ferrita ao longo do metal de solda. Não foi possível observar precipitação de carbonetos em contorno de grão na ZAC.

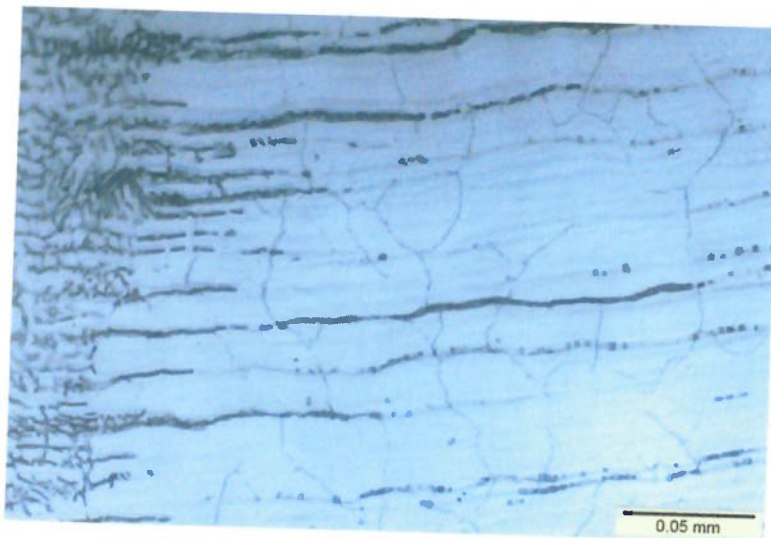


Figura 45:Análise Micrográfica na ZAC do CP1 (500X)

Na figura 46 abaixo foi realizado o ensaio de micrografia na região soldada no processo SMAW utilizando o consumível E308H-17. O ensaio apresentou no metal de solda, uma estrutura dendritica, de modo de solidificação FA.

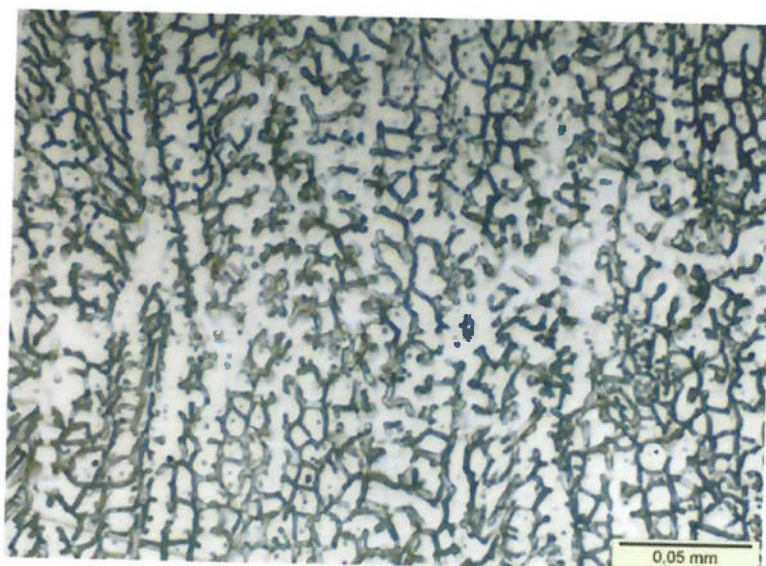


Figura 46:Análise Micrográfica na consumível de soldagem SMAW do CP1 (500X)

Na figura 47, abaixo, foi realizado o ensaio de micrografia na região soldada no processo GTAW utilizando o consumível ER308H do CP1. O ensaio apresentou baixa precipitação de carbonetos. O modo de solidificação é FA.

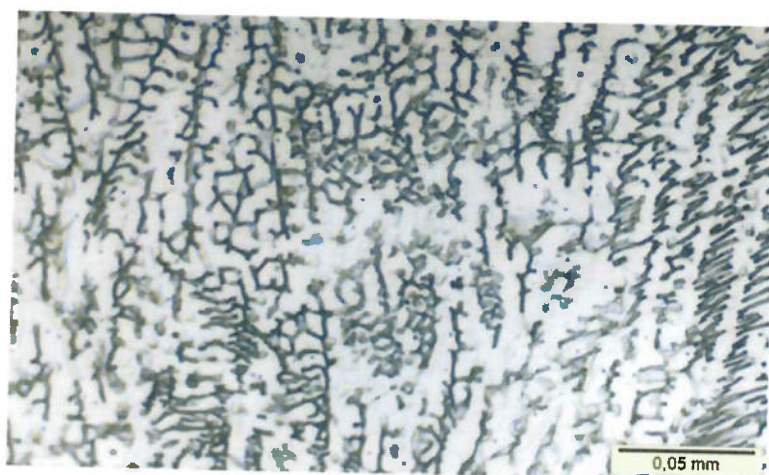


Figura 47:Análise Micrográfica na consumível de soldagem GTAW do CP1 (500X)

Os mesmos ensaios pontos de micrografia realizados no CP1 foram realizados no CP2

Na figura 48 é possível observar a microestrutura do metal de base novo CP2, semelhante ao do CP1, onde é possível observar poucos contornos de grãos, caracterizando baixo ataque intergranular provocado pelo ácido oxálico.



Figura 48: Análise Micrográfica no metal de base do CP2(500X)

Na figura 49 é possível observar a microestrutura da ZAC no CP2 onde é possível observar poucos contornos de grãos, caracterizando baixo ataque intergranular provocado pelo ácido oxálico. No metal de solda, pode-se observar a estrutura dendrítica formada pela ferrita delta em matriz austenítica.



Figura 49: Análise Micrográfica na ZAC do CP2(500X)

Na figura 50 abaixo foi realizado o ensaio de micrografia na região soldada no processo SMAW utilizando o consumível E347-17. O ensaio apresentou no metal de solda, uma estrutura dendritica, formada pela ferrita delta, em matriz austenítica, formada pelo modo de solidificação FA.

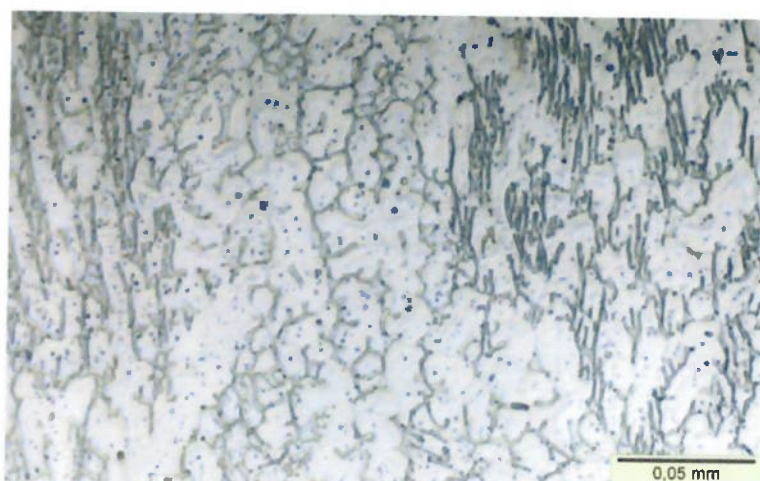


Figura 50:Análise Micrográfica na consumível de soldagem SMAW do CP2(500X)

Na figura 51 abaixo foi realizado o ensaio de micrografia na região soldada no processo GTAW utilizando o consumível ER347. O ensaio apresentou baixa precipitação de carbonetos.

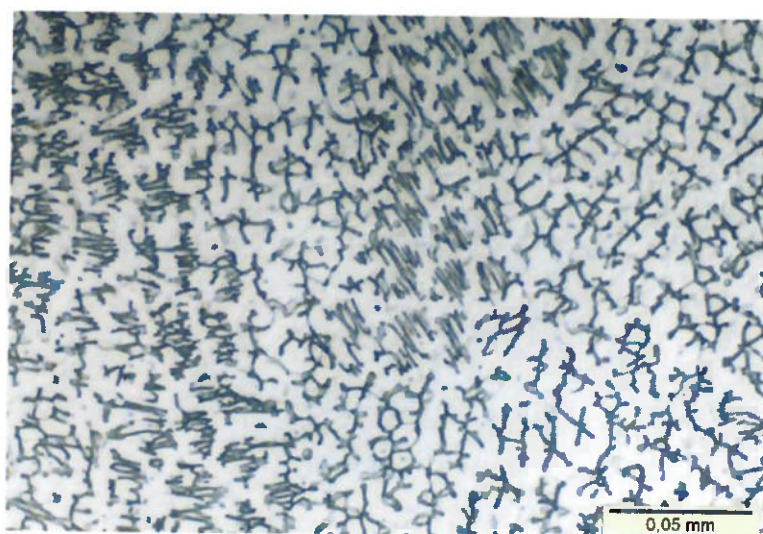


Figura 51:Análise Micrográfica na consumível de soldagem GTAW do CP2 (500X)

Na figura 52 abaixo é possível observar a microestrutura do metal de base CP3, abaixo onde pode ser observado forte ataque preferencial nos contornos de grão. Fica evidenciando o ataque intergranular provocado pelo ácido oxálico, apesar de alguns grãos não apresentar valetas em todo o contorno, entretando, pode-se afirmar com segurança que o material está sensitizado. Devido a condição de trabalho na temperatura de operação de 800°C no período de ininterrupto por 5 anos.

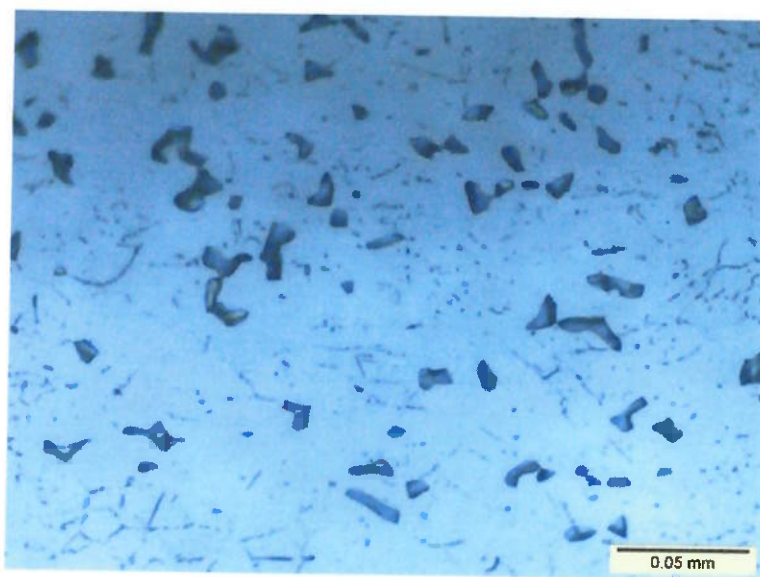


Figura 52:Análise Micrográfica no metal de base do CP3 (500X)

:

Microestrutura composta por matriz austenítica, carbonetos e fases intermetálicas, com característica "DUAL". O material apresenta resistência à corrosão intergranular parcial.

Na figura 53 abaixo a região da ZAC também apresentou grãos com precipitação de carbonetos, ZAC com microestrutura composta por matriz austenítica, carbonetos e fases intermetálicas, com característica "DUAL". O material apresenta resistência à corrosão intergranular parcial.

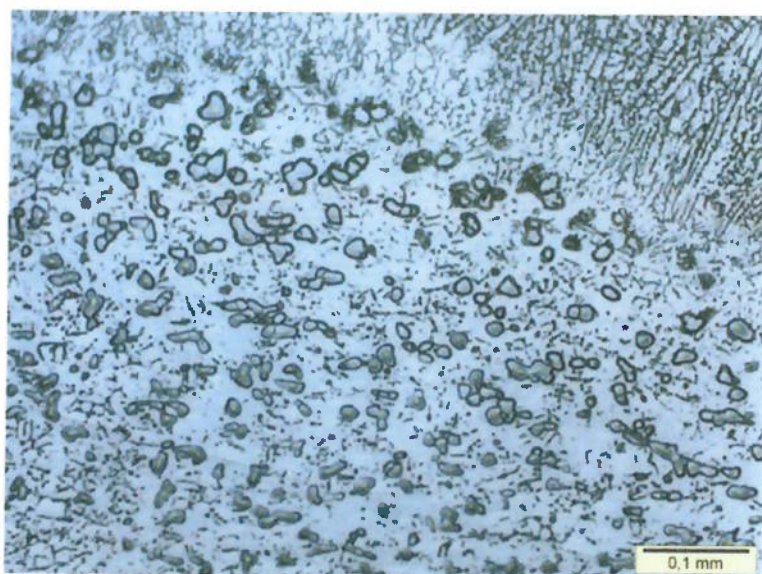


Figura 53: Análise Micrográfica na ZAC do CP3

Na figura 54 foi realizado o ensaio de micrografia na região soldada no processo SMAW utilizando o consumível E308H-17

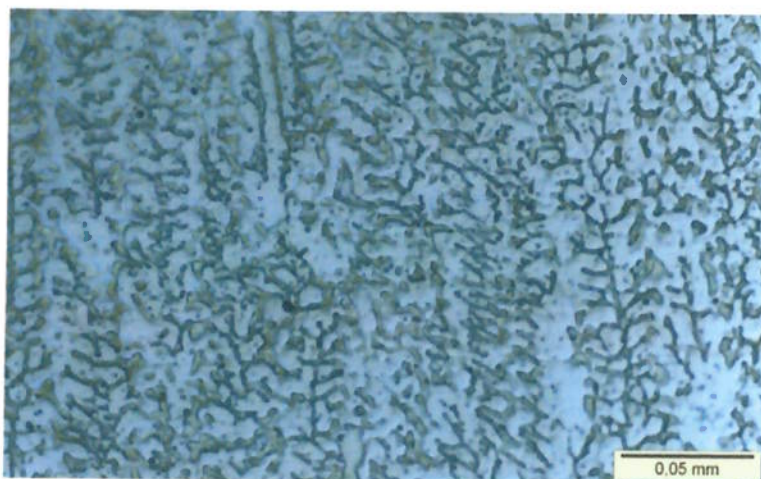


Figura 54: Análise Micrográfica na consumível de soldagem SMAW do CP3 (500X)

Na figura 55 foi realizado o ensaio de micrografia na região soldada no processo GTAW utilizando o consumível ER308H. O ensaio apresentou baixa precipitação de carbonetos.

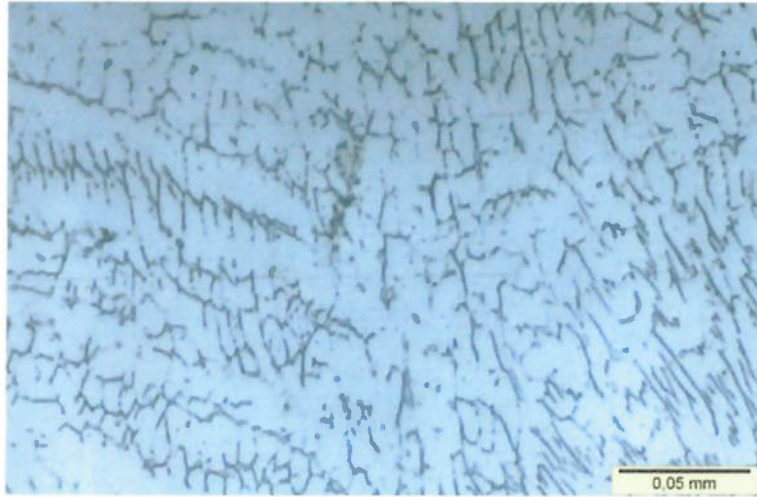


Figura 55:Análise Micrográfica na consumível de soldagem GTAW do CP3(500X)

Os mesmos ensaios de micrografia foram realizados no CP4, com o intuito de comparar os consumíveis de soldagem aplicados

Microestrutura do metal de base CP4, abaixo onde pode ser observado forte ataque preferencial nos contornos de grão. Fica evidenciando o ataque intergranular provocado pelo ácido oxálico, apesar de alguns grãos não apresentar valetas em todo o contorno, entretando, pode-se afirmar com segurança que o material está sensitizado. Devido a condição de trabalho na temperatura de operação de 760°C no período de ininterrupto por 5 anos.

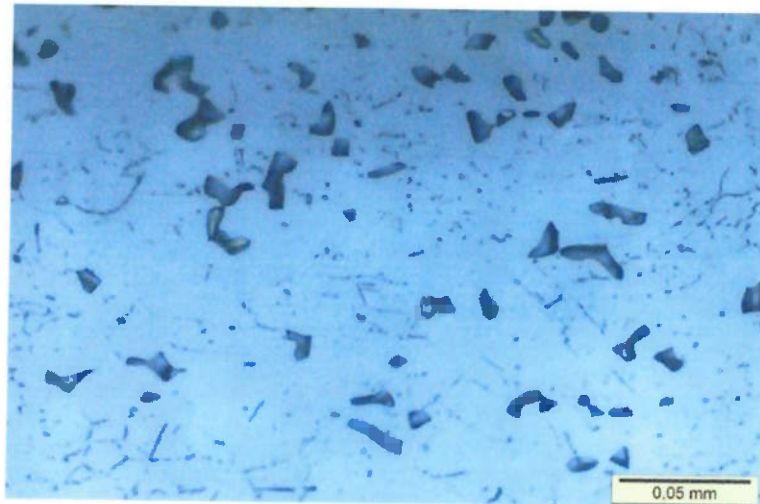


Figura 56: Análise Micrográfica no metal de base do CP4(500X)

Na região da ZAC não foi apresentado grãos com precipitação de carbonetos

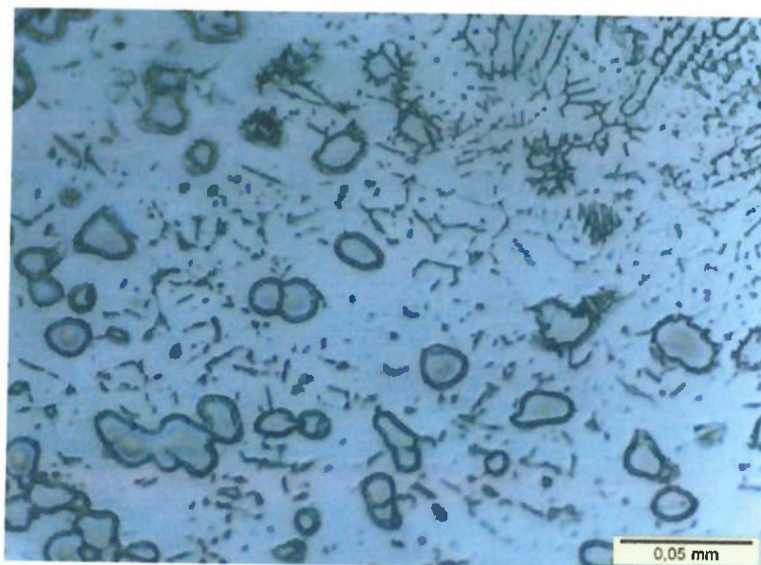


Figura 57:Análise Micrográfica na ZAC do CP4 (500X)

Na figura 58 foi realizado o ensaio de micrografia na região soldada no processo SMAW utilizando o consumível E347-17. O ensaio apresentou baixa precipitação de carbonetos.

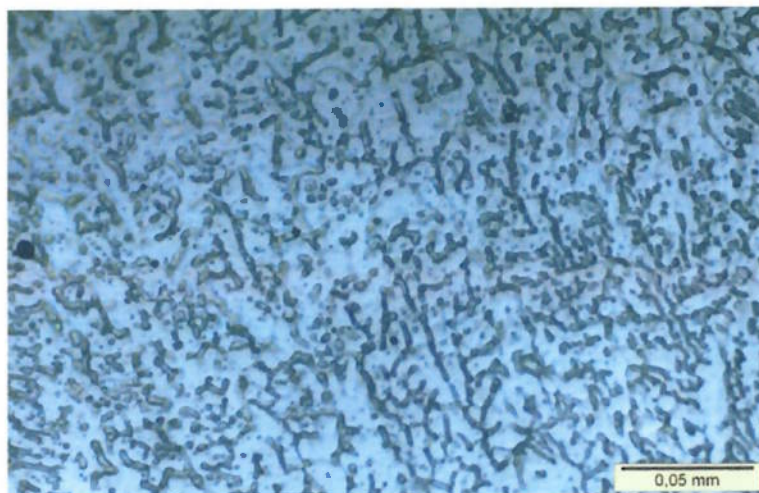


Figura 58: Análise Micrográfica na consumível de soldagem SMAW do CP4 (Análise Micrográfica na consumível de soldagem SMAW do CP4(500X))

Na figura 59 foi realizado o ensaio de micrografia na região soldada no processo GTAW utilizando o consumível ER347. O ensaio apresentou baixa precipitação de carbonetos.

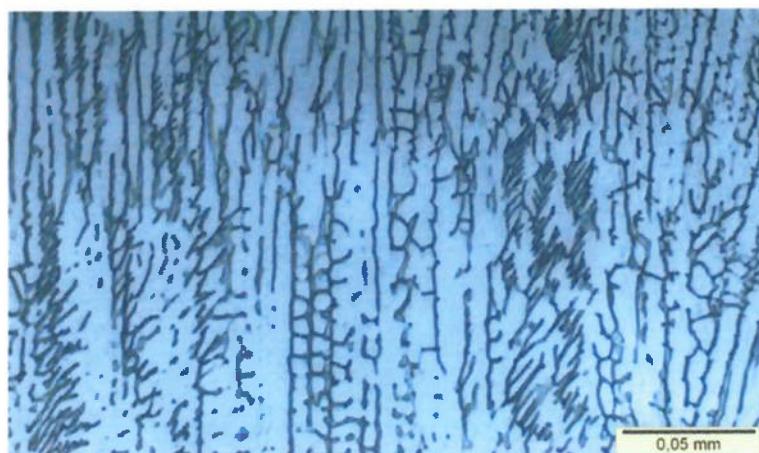


Figura 59 : Análise Micrográfica na consumível de soldagem GTAW do CP4(500X)

5.6 Ensaio de determinação do teor de Carbono:

Foi realizado o ensaio "LECO" para determinação do teor de carbono dos corpos de prova 5 e 6, para verificação se realmente o teor de carbono do metal de base encontrava-se dentro do especificado para o material 304H, e verificar se o teor de carbono do consumível 308H também se encontrava dentro do especificado. Para o CP 6, soldado com o consumível 347, o ensaio também foi realizado com o objetivo de verificar o teor de carbono do metal de solda, uma vez que o teor de carbono especificado em norma é menor que o do 308H. Os resultados são apresentados na tabela 38.

Tabela 38: Resultados do ensaio de determinação do teor de carbono

AMOSTRAS	Região	Valor % (médio)
Metal de Base	-	0,060%
CP5 (308H)	Raiz	0,058
	Face	0,059
CP6 (347)	Raiz	0,042
	Face	0,047

Os resultados da tabela acima mostram que o teor de carbono para o metal de base está dentro do especificado, portanto, levando-se em consideração somente o teor de carbono, enquadra-se como 304H.

O teor de carbono do CP 6 foi menor do que o do CP5, em função do consumível possuir menor teor de carbono especificado em norma. Deste modo, o teor de carbono para o CP 5 e 6 estão dentro do esperado.

5.7 Ensaio de medição de ferrita, antes e após tratamento térmico

Foi realizado o tratamento térmico das amostras do CP 5 e 6 à 800°C por 60h com o objetivo de simular as condições de operação do equipamento e avaliar a redução no teor de ferrita, comparando-se o valor da medido antes e após o tratamento térmico. Os resultados são apresentados na tabela 39.

Tabela 39: Resultados do ensaio de medição de ferrita antes e após TT.

AMOSTRAS	Região	Ferrita antes TT (FN)	Ferrita após TT (FN)
CP5 (308H)	Metal de Solda	4,2 a 5,3	1,4 a 1,7
CP6 (347)	Metal de Solda	6,1 a 7,3	1,9 a 2,5

Foi possível observar que o teor de ferrita encontrado antes do TT encontrava-se dentro do esperado (3 a 9FN para 308H e 5 a 9FN para 347). De acordo com a tabela acima, é possível observar que houve uma redução significativa no teor de ferrita após TT em ambos os corpos de prova. Provavelmente a ferrita se transformou em fase sigma. O CP 6 apresentou teor de ferrita ligeiramente acima do que o CP 5 após o TT.

Verifica-se também que o tempo e temperatura do tratamento térmico foi eficaz em alterar o valor da ferrita.

5.8 Ataque metalográfico para determinação de fase sigma no metal de base e solda envelhecido:

Foi realizado o ataque metalográfico em amostras retiradas da mesma região da figura 14, com o objetivo de avaliar a quantidade de fase sigma presente no metal de base e solda existente do equipamento. Ambos metais de base e solda foram envelhecidos em operação. As micrografias dos ensaios são apresentadas nas figuras 60 a 63.

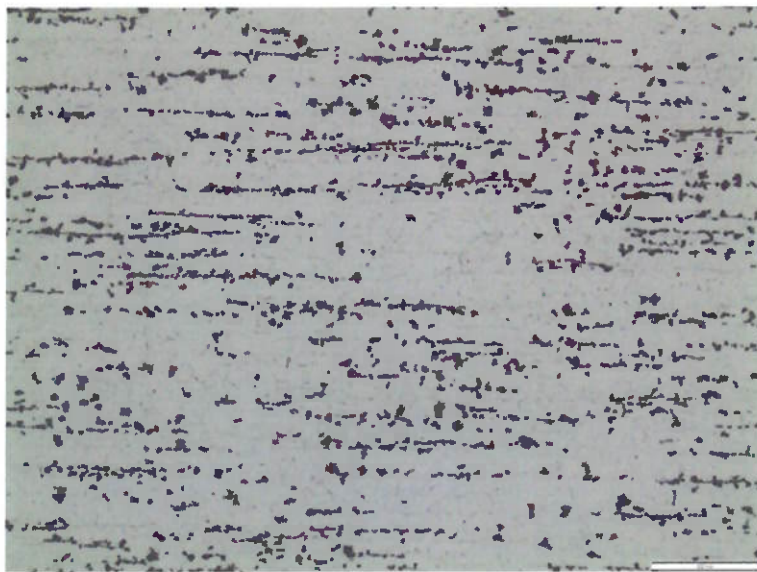


Figura 60 : Ensaio Micrografico na região do metal de base (100X)

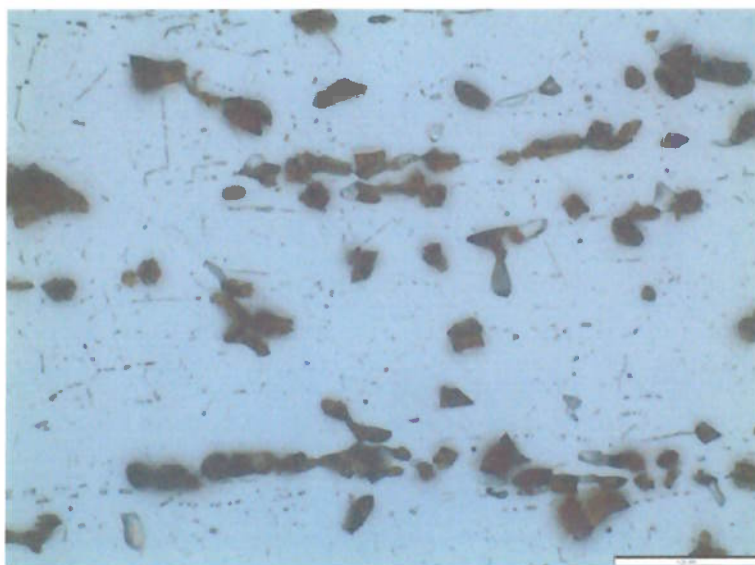


Figura 61:Ensaio Micrografico na região do metal de base (500X)

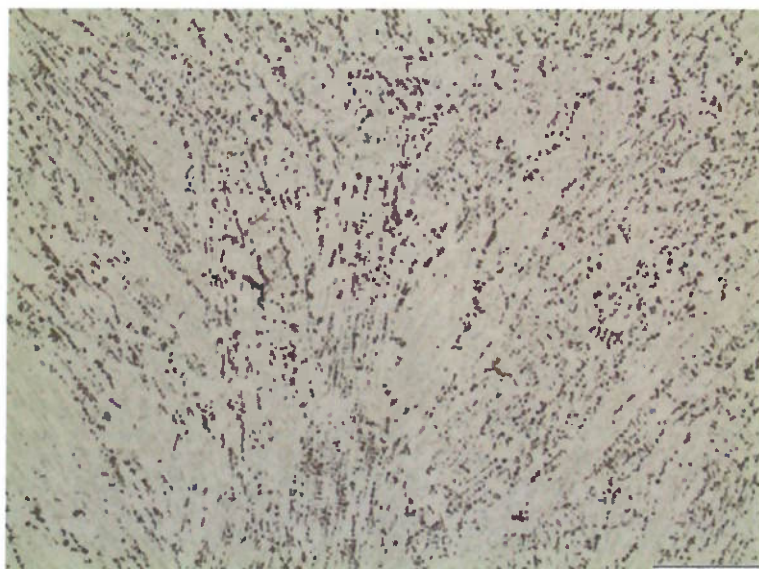


Figura 62:Ensaio Micrografico na região da solda (100X)

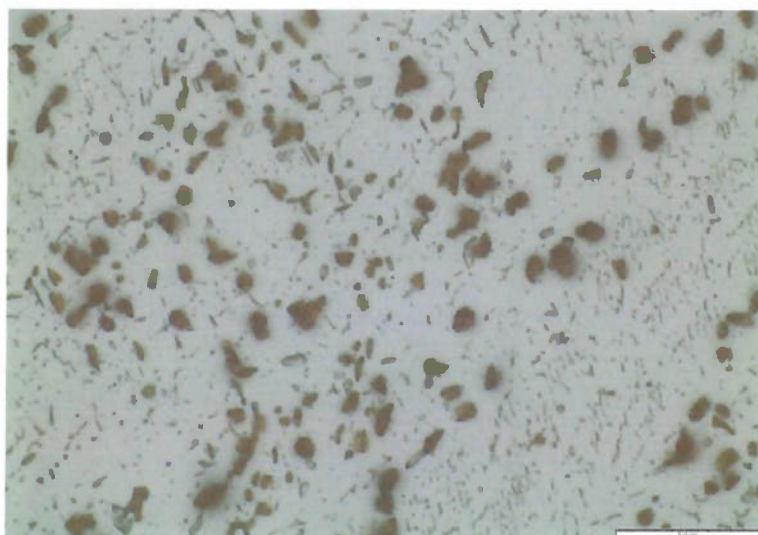


Figura 63:Ensaio Micrografico na região da solda (500X)

Conforme as figuras 60 a 63, o metal de base apresentou ferrita delta, precipitados em contorno de grão e aproximadamente 15% de fase sigma. Foi também realizado a medição de ferrita com o ferritoscópio para avaliação. Os resultados são apresentados na tabela 40.

Tabela 40: Resultados do ensaio de medição de fase sigma e ferrita no material envelhecido

AMOSTRAS	Tipo	Ferrita (FN)	Quantidade fase sigma (%)
Metal de Base	304H	0,10 a 0,12	15%
Metal de Solda	308H	0,10 a 0,15	10%

De acordo com a tabela acima, é possível verificar que tanto o metal de base quanto o metal de solda envelhecido apresentaram teor muito baixo de ferrita e significativa quantidade de fase sigma. Provavelmente o teor baixo de ferrita encontrado deve-se ao envelhecimento do material em operação. Uma hipótese para a presença de fase sigma é que a mesma tenha se originado da transformação da ferrita durante a operação do equipamento.

Pode-se também comparar os resultados obtidos de teor de ferrita com as amostras em que foi realizado tratamento térmico. Pode-se observar que o mesmo não foi tão rigoroso quanto o ciclo de operação do equipamento.

6. Conclusões

1. Foi possível observar que, de acordo com as macrografias, os parâmetros e técnicas empregadas foram eficazes para a soldagem dos corpos de prova, obtendo-se uma solda isenta de descontinuidades.

2. De acordo com os ensaios de tração à temperatura ambiente, foi possível verificar que todos os corpos de prova apresentaram resultados satisfatórios.

3. As microestruturas de ambos os consumíveis são praticamente idênticas, levando-se em consideração a morfologia apresentada.

4. De acordo com os resultados do ensaio de tração à quente foi possível verificar que o corpo de prova soldado com o consumível 347 apresentou um limite de ruptura a 800°C de 199 MPa, resultado 22% superior ao corpo de prova soldado com o consumível 308H.

Sugestões de trabalhos futuros

- Analisar as superfícies de fratura para avaliar os mecanismos de deformação e fratura à quente;
- Realizar ensaios de fluência de ambas juntas soldadas, com os respectivos consumíveis;
- Avaliar a quantidade de precipitação de carbonetos em contorno de grão no material como soldado, antes e após ciclo térmico de operação do equipamento.

Bibliografia

ASME SEC II PART-C. (2007). SFA 5.4.

DAVIS J. (1994). *Stainless Steels Asm Specialty Internationa*. ASM INTERNATIONAL HANDBOOK COMMITTEE.

A., Brooks J.; W., Thompson A.; Williams J. C. a. (March 1984). Fundamental study of the beneficial effects of delta ferrite in reducing weld. *Welding Journal*,.

A.F., PADILHA; C., GUEDES L. (1994). *Aços Inoxidáveis Austeníticos Microestrutura e propriedades – 1 ed.* São Paulo: Hemus.

ASME Boiler & Pressure Vessel Code. Sec II. Part D. Appendix 1 . (2010). New York: American Society of Mechanical Engineers.

ASME Sec II PART-C. (2007). SFA 5.9.

ASME Section IX -American Society of Mechanical Engineers Welding and Brazing Qualifications,. (2013). *American Society of Mechanical Engineers Welding and Brazing Qualifications*,.

ASTM A-240. (2004). *Standard Specification for Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels and for General Applications*.

CALLISTER, W. D. (2010). *Materials science and engineering: an introduction*. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc.

CARBÓ, E. H. (2001). AÇO INOXIDÁVEL-Aplicações e Especificação. *NÚCLEO INOX*, 15-49.

CARY, H. B. (1979). *Modern Welding Technology*. Prentice-Hall.

DAMIAN, LIPPOLD C. JOHN & KOTECK J. (2005). *Welding Metallurgy and Weldability of Stainless steels*. New Jersey: Wiley interscience.

ESAB. (2015, Fevereiro 17). *Centro de Conhecimento ESAB* . Retrieved from ESAB:
http://www.esab.com.br/br/pt/education/blog/processo_soldagem_eletrod_o_revestido_mma_smaw.cfm

ESAB. (2015, Fevereiro 17). *ESAB- Centro de Conhecimento -ESAB*. Retrieved from ESAB:

http://www.esab.com.br/br/pt/education/blog/processo_soldagem_tig_gta_w.cfm

- FOLKHARD, E. Springer. (1988). *Welding Metallurgy of Stainless Steels*. New York: Verlag Wien.
- GEORGE, L. E. (1983). *Welding Metallurgy Vol 1. Third Edition*. Ohio: American Welding Society.
- J., P. W. (1967). *The Science and Practice of Welding*. New Jersey: Prentice-Hall International, INC, Englewood Cliffs.
- KATAYAMA, S. F. (1985). *Correlation among solidification process, microstructure, microsegregation and solidification cracking susceptibility in stainless steel weld metals*. Transactions of JWRI.
- LIPPOLD, J. C., and Savage, W. (1979). Solidification of austenitic stainless steel weldments. *Welding Journal*, 58.
- MAGRI, M.; ALONSO, N. (1995). *Métodos eletroquímicos para a avaliação da sensibilização em aços inoxidáveis martensíticos*. São Paulo: Congresso ABM.
- MARQUES, P.V. & Modenesi, P.J. . (2006). *Introdução aos Processos de Soldagem*. Belo Horizonte.
- MAYER, K., & MASUYAMA, F. (2008). *The Development of Creep Resistant Steel*. Viswanathan: Woodhead.
- N, Y. I., F., Y., & FAULKNER, R. G. (2008). *Physical and Elastic Behaviour of Creep Resistant Steels. Creep Resistant Steel*. KERN, T.U: Woodhead Publishing.
- Peckner, D. a. (1977). *Handbook of Stainless Steels*. New York: McGraw-Hill.
- PETROLEO BRASILEIRO S/A. (2015). *N-0133-M*. Petrobras .
- RAYNOR, G. V., & RIVLIN, V. G. (1988). *Phase equilibrium in iron ternary alloys*. London: Institute of Metals.
- SADEGHBEIGI, R. (2000). *Fluid Catalytic Cracking Handbook, 2ª Edição*. GPP-Gul.
- SEDRICKS, A. J. (1996). *Corrosion of stainless steel*. John Wiley. New York.
- SHREIR, L. (1995). *Corrosion. Vol 1. Seção 3.3 Stainless Steels*. Oxford : Third edition. Butterworth.
- TWI Training & Examination Services. (2015, Agosto 25). *TWI Ltd*. Retrieved from TWITRAINING: www.twitraining.com

W., OATES R. (2006). *Welding Handbook Materials and Applications -Eighth Edition*. American Welding Society.

YAGI, K., MERCKLING, T., & KERN, U. (2004). *Creep Properties of Heat Resistant Steels and Superalloys Advanced Materials and Technologies Volume 2. Group VIII*.