

Ivan de Luna Burgudgi

**COMPARAÇÃO DO EFEITO DO TEMPO DE TRATAMENTO
TÉRMICO DE ESTABILIZAÇÃO EM JUNTAS SOLDADAS DO
AÇO INOXIDÁVEL ASTM A213 TP347H.**

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

Fevereiro/2013

Ivan de Luna Burgudgi

(Engenheiro Mecânico, FACENS, 2010)

**COMPARAÇÃO DO EFEITO DO TEMPO DE TRATAMENTO
TÉRMICO DE ESTABILIZAÇÃO EM JUNTAS SOLDADAS DO
AÇO INOXIDÁVEL ASTM A213 TP347H.**

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 da Soldagem

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Duarte Brandi

São Paulo

Fevereiro/2013

"A beleza de Deus pode ser vista nos pequenos detalhes da vida"

Autoria própria.

DEDICATÓRIA

*Dedico esse trabalho a minha mãe, que é minha referência de vida;
quem me ensinou que independente das dificuldades que se
levantarem, com foco e muita força de vontade é possível ser um
vencedor.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a meus familiares e minha namorada que sempre me apoiaram e compreenderam a minha ausência em alguns momentos importantes.

Agradeço aos meus colegas de trabalho Edmilson Guimarães, Willian Santos, Alexandre de Paula, Francisco Pereira, Wanderson Moraes, Pedro Feitosa, Julio Vieira, André Leite, Agenor Lopes e Silvio Médici que me ajudaram diretamente na realização dos corpos de prova.

Agradeço a meu orientador Dr. Sérgio Brandi por me dar todo o suporte necessário para a realização desse trabalho. Luiz Rodrigues pela execução dos ensaios micrográficos, Danilo pelo apoio no tratamento térmico.

Agradeço a todos os colegas de turma por compartilhar suas experiências profissionais, acrescentado muito aos meus conhecimentos.

CURRICULUM VITAE

Formação Acadêmica:

- Graduação: Engenharia Mecânica - FACENS (Faculdade de Engenharia de Sorocaba) - 2010
- Pós-Graduação: Especialização em Engenharia de Soldagem - PECE/Poli - USP - 2013

Cursos:

Inspetor de Soldagem N1 - Dseed Engenharia - 2010

ISO 9001:2008 Interpretação e Implementação - Bureau Veritas – Março/2012;

Auditoria Interna da Qualidade ISO 9001:2008 - Bureau Veritas – Maio/2012;

Experiência Profissional:

Jaraguá Engenharia e Instalações Industriais Ltda. - Sorocaba-SP

Função: Engenheiro Trainee (Gestão da Qualidade do setor de Instalações Industriais).

Descrição dos Serviços: Desenvolvimento de procedimentos de Montagem, Condicionamento, Planejamento, Controle de Qualidade e SMS. Planejamento e execução de auditorias internas da qualidade. Elaboração de documentação para soldagem como, EPS e IEIS, levantamento de juntas com soldas de campo. Suporte técnico as equipes de obra.

Período: 03/01/2011 a ATUAL

Jaraguá Equipamentos Industriais Ltda. - Sorocaba-SP

Função: Estagiário (Atuando na área de Gestão da Qualidade do setor de Instalações Industriais).

Descrição dos Serviços: Auxílio no desenvolvimento de procedimentos de Fabricação, Montagem, Condicionamento, Planejamento, Controle de Qualidade e SMS. Apoio na elaboração de documentação de soldagem como, EPS e IEIS. Controle de documentação técnica.

Período: 12/01/2009 a 31/12/2010

COMAU do Brasil Ind. e Com. Ltda. (Grupo Fiat) - Sítio DANA Sorocaba-SP

Função: Estagiário (Atuando no setor de Engenharia de Manutenção)

Descrição dos Serviços: Responsável pela especificação, aquisição e destino de materiais para manutenção, planejamento, programação de serviços e participação em projetos de melhoria de máquinas e processos.

Período: 14/04/2008 a 08/01/2009

RESUMO

Os aços inoxidáveis austeníticos têm sido utilizados por diversos seguimentos da indústria mundial, prioritariamente pela sua capacidade de resistir a meios corrosivos, inclusive sob altas temperaturas. O Aço inoxidável austenítico tipo 347H faz parte de um grupo conhecido "aços estabilizados", e o sufixo "H" significa teor de carbono elevado, controlado de 0,040 a 0,1%.

O objetivo desse trabalho é comparar a resistência mecânica, a resistência à corrosão e a microestrutura de três juntas soldadas e submetidas a tratamentos térmicos de estabilização, em diferentes faixas de tempo.

O material utilizado foi um tubo sem costura ASTM A213 TP347H, os processos de soldagem selecionados para a realização das juntas foram TIG na raiz e Eletrodo Revestido no enchimento e acabamento da solda. Os corpos de prova foram submetidos a ensaios de líquido penetrante, dobramento lateral, tração, tração a quente, análise química, susceptibilidade a corrosão intergranular segundo ASTM A262 prática E, macrografia e micrografia.

Os resultados mostraram que o tratamento térmico de estabilização influi de maneiras diferentes nos valores de limite de resistência a tração quando o material é ensaiado na temperatura ambiente e ensaiado a quente. Os resultados da ASTM A262 Prática E mostraram que a realização do tratamento térmico não alterou a resistência a corrosão do material.

ABSTRACT

The austenitic stainless steels have been used by various segments of the worldwide industry, primarily for its ability to withstand corrosive environments, even under high temperatures. The austenitic stainless steel type 347H integrates the group called stabilized grades, and the suffix "H" means high carbon content, controlled from 0.040 to 0.1%.

The purpose of this work is compare the mechanical strength, corrosion resistance and microstructure of three welded joints subjected to stabilizing heat treatments at different time ranges.

The material used was a seamless tube ASTM A213 TP347H, the welding processes selected for the joining were GTAW on the root and SMAW on filling and finishing of the weld. The specimens were tested by liquid penetrant inspection, side bend, tension test, elevated temperature tension tests, chemical analysis, susceptibility to intergranular attack as ASTM A262 practice E, macrograph and micrograph.

The results showed that stabilizing heat treatment influences of different ways in values of tensile strength when the material is tested at room temperature and tested at elevated temperature. The results of ASTM A262 Practice E showed that heat treatment did not change the corrosion resistance of the material.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Diagrama de Schaeffler relacionando o cromo equivalente e o níquel equivalente com a microestrutura [2].	5
Figura 3.2 - Relação entre Famílias de Aços Inoxidáveis Austeníticos Padronizados [3].	14
Figura 3.3 - Diagrama de Fase Ferro-Cromo[6].	15
Figura 3.4 - Diagramas Ternários Sistema Fe-Cr-Ni. Seções Isotérmicas (a)1300°C, (b)1000°C, (c)900°C, (d)800°C e (e)650°C[6].	17
Figura 3.5 - Diagrama Pseudobinário para Fe-Cr-Ni[5].	19
Figura 3.6 - Curvas Típicas Tensão-Deformação para os Aços Inoxidáveis Tipos 304 e 301 [3].	22
Figura 3.7 - Esquema do Processo de Soldagem por Eletrodo Revestido [5].	30
Figura 3.8 - Visão Esquemática do Processo TIG [9].	32
Figura 3.9 - Curvas de Formação dos Carbonetos de Cromo e Nióbio. As Temperaturas de Início de Dissolução são Representadas por (a) para $Cr_{23}C_6$ e (b) para NbC [Adaptado da referência bibliográfica número 11].	38
Figura 4.1 - Croqui da Junta Preparada.	43
Figura 4.2 - (a) Junta Posicionada Sobre os Roletes. (b) Tamponamento e Acoplamento da Mangueira para a Purga.	44
Figura 4.3 - (a) Ajuste e Medição dos Parâmetros na Máquina de Solda. (b) Execução da Raiz da Solda - TIG.	44
Figura 4.4 - Mesa Giratória Utilizada nos Passes de Enchimento e Acabamento.	45
Figura 4.5 - Sequência de Passes e Camadas - 120HTT.	47
Figura 4.6 - Sequência de Passes e Camadas - SemTT.	49
Figura 4.7 - Sequência de Passes e Camadas - 1HTT.	51
Figura 4.8 - CP 120HTT Dentro do Forno.	54
Figura 4.9 - Realização do Ensaio de Dobramento.	56
Figura 4.10 - Preparação das Amostras para o Ensaio de Tração.	57
Figura 4.11 - Realização do Ensaio de Tração.	57
Figura 4.12 - (a) Posicionamento da Amostra. (b) Realização do Ensaio de Tração a Quente.	58
Figura 5.1 - Aplicação do Revelador Durante o Ensaio por Líquido Penetrante na Raiz dos CPs.	61
Figura 5.2 - Descontinuidade em Amostra de Dobramento do 1HTT.	62
Figura 5.3 - Valor Médio do Limite de Resistência a Tração por CP.	63
Figura 5.4 - Imagem do Metal de Base do CP 120HTT com Aumento de 100X.	64
Figura 5.5 - Imagem da Superfície Fraturada com Aumento de 500X da Amostra TP-1 do CP 120HTT.	65
Figura 5.6 - Imagem da Superfície Fraturada com Aumento de 500X da Amostra TP-2 do CP 120HTT.	65
Figura 5.7 - Imagem da Superfície Fraturada com Aumento de 1000X da Amostra TP-1 do CP 120HTT.	66

Figura 5.8 - Imagem da Superfície Fraturada com Aumento de 1000X da Amostra TP-2 do CP 120HTT.....	66
Figura 5.9 - Limite de Resistência à Tração Médio - Ensaiado a 350 °C.....	69
Figura 5.10 - Limite de Escoamento Médio do Metal Base - Ensaiado a 350 °C.....	70
Figura 5.11 - Porcentagem Média de Alongamento e Redução de Área para as Amostras do Metal de Solda - Ensaiado a 350 °C.	71
Figura 5.12 - Porcentagem Média de Alongamento e Redução de Área para as Amostras do Metal de Base - Ensaiado a 350 °C.	72
Figura 5.13 - Ensaio de Susceptibilidade a Corrosão Intergranular CP SemTT.	75
Figura 5.14 - Ensaio de Susceptibilidade a Corrosão Intergranular CP 1HTT. ...	76
Figura 5.15 - Ensaio de Susceptibilidade a Corrosão Intergranular CP 120HTT.	76
Figura 5.16 - Macrografia do CP SemTT.....	77
Figura 5.17 - Macrografia do CP 1HTT.	78
Figura 5.18 - Macrografia do CP 120HTT.	79
Figura 5.19 - Faixa Superior do CP SemTT com Aumento de 100X.	80
Figura 5.20 - Detalhe da ZAC da Faixa Superior do CP SemTT com aumento de 200X.	80
Figura 5.21 - Faixa Inferior do CP SemTT com Aumento de 100X.....	81
Figura 5.22 - Detalhe da ZAC da Faixa Inferior do CP SemTT com aumento de 200X.	81
Figura 5.23 - Metal de Base do CP SemTT com Aumento de 50X.....	82
Figura 5.24 - Raiz do cordão de Solda do CP SemTT com aumento de 200X. .	82
Figura 5.25 - Meio do cordão de Solda do CP SemTT com aumento de 200X.	83
Figura 5.26 - Topo do cordão de Solda do CP SemTT com aumento de 200X.	83
Figura 5.27 - Faixa Superior do CP 1HTT com Aumento de 100X.....	84
Figura 5.28 - Detalhe da Interface Metal de Solda com Metal de Base da Faixa Superior do CP 1HTT com aumento de 200X.....	85
Figura 5.29 - Faixa Inferior do CP 1HTT com Aumento de 100X.	85
Figura 5.30 - Detalhe da Interface Metal de Solda com Metal de Base da Faixa Inferior do CP 1HTT com aumento de 200X.	86
Figura 5.31 - Metal de Base do CP 1HTT com Aumento de 50X.....	86
Figura 5.32 - Raiz do cordão de Solda do CP 1HTT com aumento de 200X.....	87
Figura 5.33 - Meio do cordão de Solda do CP 1HTT com aumento de 200X....	87
Figura 5.34 - Topo do cordão de Solda do CP 1HTT com aumento de 200X. ..	88
Figura 5.35 - Faixa Superior do CP 120HTT com Aumento de 100X.	88
Figura 5.36 - Detalhe da Interface Metal de Solda com Metal de Base da Faixa Superior do CP 120HTT com aumento de 200X.	89
Figura 5.37 - Faixa Inferior do CP 120HTT com Aumento de 100X.....	89
Figura 5.38 - Detalhe da Interface Metal de Solda com Metal de Base da Faixa Inferior do CP 120HTT com aumento de 200X.....	90
Figura 5.39 - Metal de Base do CP 120HTT com Aumento de 50X.	90
Figura 5.40 - Raiz do cordão de Solda do CP 120HTT com aumento de 200X.	91
Figura 5.41 - Meio do cordão de Solda do CP 120HTT com aumento de 200X.	91
Figura 5.42 - Topo do cordão de Solda do CP 120HTT com aumento de 200X.....	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Composição dos Aços Inoxidáveis Padronizados [3].	6
Tabela 3.2 - Composição dos Aços Inoxidáveis Padronizados (Continuação) [3].	7
Tabela 3.3 - Composição dos Aços Inoxidáveis Não Padronizados [3].	8
Tabela 3.4 - Composição dos Aços Inoxidáveis Não Padronizados (Continuação) [3].	9
Tabela 3.5 - Composição dos Aços Inoxidáveis Não Padronizados (Continuação) [3].	10
Tabela 3.6 - Mínimas Propriedades Mecânicas para Aços Inoxidáveis Austeníticos em Temperatura Ambiente [3].	21
Tabela 3.7 - Teor de elementos estabilizantes [5].	25
Tabela 3.8 - Propriedades dos tipos 304 e 347 em Altas Temperatura [5].	26
Tabela 3.9 - Mateis de Adição Sugeridos para Aços Inoxidáveis Austeníticos [3].	36
Tabela 4.1 - Composição Química do Metal de Base.	40
Tabela 4.2 - Informações Sobre os Tratamentos Térmicos Realizados.	40
Tabela 4.3 - Resultados do Ensaio de Tração no Metal de Base.	40
Tabela 4.4 - Composição Química do Eletrodo E347-17.	41
Tabela 4.5 - Composição Química da Vareta ER347.	41
Tabela 4.6 - Parâmetros de Soldagem - 120HTT.	48
Tabela 4.7 - Parâmetros de Soldagem - SemTT.	50
Tabela 4.8 - Parâmetros de Soldagem - 1HTT.	52
Tabela 5.1 - Resultados do Ensaio de Tração.	63
Tabela 5.2 - Resultados dos Ensaio de Tração a Quente no Metal de Solda.	67
Tabela 5.3 - Resultados dos Ensaio de Tração a Quente no Metal de Base.	68
Tabela 5.4 - Análise Química Realizada via Combustão (LECO®) no Metal de Solda.	72
Tabela 5.5 - Análise Química Realizada via Espectrômetro no Metal de Solda.	73
Tabela 5.6 - Análise Química Realizada via Espectrômetro no Metal de Base.	74
Tabela 5.7 - Dimensões da Solda Verificadas na Macrografia do CP SemTT.	77
Tabela 5.8 - Dimensões da Solda Verificadas na Macrografia do CP 1HTT.	78
Tabela 5.9 - Dimensões da Solda Verificadas na Macrografia do CP 120HTT.	79

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS

GTAW	Gas Tungsten Arc Welding
SMAW	Shielded Metal Arc Welding
ASTM	American Society for Testing and Materials
TIG	Tungsten Inert Gas
AISI	American Iron and Steel Institute
SAE	Society of Automotive Engineers
UNS	Unified Numbering System
Fe	Ferro
Cr	Cromo
Ni	Níquel
Mo	Molibdênio
N	Nitrogênio
γ	Gama
CFC	Cúbica de Face Centrada
α	Alfa
ZAC	Zona Afetada Pelo Calor
Ti	Titânio
Nb	Nióbio
Ta	Tântalo

ASME	American Society of Mechanical Engineers
MIG	Metal Inert Gas
AWS	American Welding Society
Ø	Diâmetro
FBTS	Fundação Brasileira de Tecnologia da Soldagem
CC-	Corrente Contínua de Polaridade Direta
CC+	Corrente Contínua de Polaridade Inversa
CP	Corpo de Prova
END	Ensaio Não Destrutivo
VS	Visual de Solda
LP	Líquido Penetrante
MB	Metal de Base
Ad.	Adenda
Nb(C,N)	Carbonitreto de Nióbio
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	ii
AGRADECIMENTOS	iii
CURRICULUM VITAE.....	iv
RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE TABELAS.....	x
LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS	xi
SUMÁRIO.....	xiii
1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	1
2. OBJETIVO	2
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
3.1 AÇOS INOXIDÁVEIS.....	3
3.1.1 TIPOS	4
3.1.1.1 AÇOS INOXIDÁVEIS MARTENSÍTICOS	11
3.1.1.2 AÇOS INOXIDÁVEIS FERRÍTICOS	12
3.1.1.3 AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS	12
3.1.1.4 AÇOS INOXIDÁVEIS DUPLEX	13
3.1.1.5 AÇOS INOXIDÁVEIS ENDURECÍVEIS POR PRECIPITAÇÃO	13
3.1.2 AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS	13
3.1.2.1 DIAGRAMA TERNÁRIO PARA O SISTEMA FE-CR-NI	16
3.1.2.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS	20
3.1.2.3 RESISTÊNCIA A CORROSÃO	23
3.1.3 AÇOS INOXIDÁVEIS ESTABILIZADOS.....	25
3.1.4 AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS DE GRAU "H"	26
3.1.5 APLICAÇÃO	27
3.2 PROCESSOS DE SOLDAGEM	29
3.2.1 ELETRODO REVESTIDO.....	29
3.2.2 TIG	31
3.3 SOLDABILIDADE DOS AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS.....	33
3.3.1 ENERGIA DE SOLDAGEM	34
3.3.2 CONTAMINAÇÃO.....	35
3.3.3 TRINCAS A QUENTE.....	35
3.3.4 SELEÇÃO DE METAIS DE ADIÇÃO	36
3.4 TRATAMENTOS TÉRMICOS	37
4. MATERIAIS E MÉTODOS	40
4.1 MATERIAIS	40
4.1.1 METAL BASE.....	40
4.1.2 CONSUMÍVEL DE SOLDAGEM	41
4.2 EQUIPAMENTOS.....	42
4.3 SOLDAGEM	42
4.3.1 PROCEDIMENTOS UTILIZADOS	42
4.3.2 PARÂMETROS DE SOLDAGEM.....	46
4.3.2.1 PRIMEIRO CP SOLDADO - 120HTT.....	47
4.3.2.2 SEGUNDO CP SOLDADO - SemTT	49

4.3.2.3 TERCEIRO CP SOLDADO - 1HTT	51
4.4 TRATAMENTO TÉRMICO	53
4.4.1 METODOLOGIA.....	53
4.4.2 EXECUÇÃO	53
4.5 ENSAIOS REALIZADOS.....	55
4.5.1 LÍQUIDO PENETRANTE	55
4.5.2 DOBRAMENTO LATERAL.....	55
4.5.3 TRAÇÃO	56
4.5.4 TRAÇÃO A QUENTE.....	58
4.5.5 ANÁLISE QUÍMICA	59
4.5.6 ENSAIO DE CORROSÃO INTERGRANULAR - PRÁTICA E	59
4.4.7 MACROGRAFIA	60
4.4.8 MICROGRAFIA	60
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
5.1 ENSAIO POR LÍQUIDO PENETRANTE	61
5.2 DOBRAMENTO LATERAL	62
5.3 TRAÇÃO	62
5.4 TRAÇÃO A QUENTE	67
5.5 ANÁLISE QUÍMICA.....	72
5.6 ENSAIO DE CORROSÃO INTERGRANULAR - PRÁTICA E	75
5.7 RESULTADO DAS MACROGRAFIAS.....	77
5.8 RESULTADO DAS MICROGRAFIAS	80
5.8.1 CORPO DE PROVA - SemTT.....	80
5.8.2 CORPO DE PROVA - 1HTT	84
5.8.3 CORPO DE PROVA - 120HTT	88
6. CONCLUSÕES.....	93
SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	94
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	95

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

Os aços inoxidáveis austeníticos têm sido utilizados por diversos seguimentos da indústria mundial, prioritariamente pela sua capacidade de resistir a meios corrosivos, inclusive sob altas temperaturas. Estes aços podem ser encontrados em vários tipos, com composições químicas variadas, o que propicia a diversidade de aplicação.

Um dos grandes problemas do trabalho em altas temperaturas é faixa de sensitização, onde existe a grande possibilidade da precipitação de carbonetos de cromo, o que pode diminuir a resistência à corrosão e levar a falha do equipamento.

O tipo 347H faz parte de um grupo conhecido "aços estabilizados", onde são adicionados elementos estabilizantes. No caso do aço inoxidável tipo 347, esse elemento de liga é o nióbio. O sufixo "H" indica uma modificação do teor do elemento carbono no aço inoxidável que, no caso, o sufixo "H" significa teor de carbono elevado (0,040 a 0,1%). Essa combinação possibilita a aplicação em altas temperaturas, inclusive na faixa de temperaturas de sensitização e eleva a resistência à fluência do material. Os aços inoxidáveis austeníticos tipo 347H são fornecidos na condição solubilizado e estabilizado, por meio da realização de tratamentos térmicos.

Utilizando a soldagem como processo de fabricação pode-se alterar a composição e características originais do material, portanto entende-se que o controle dos parâmetros envolvidos na soldagem pode impactar diretamente na integridade do produto final.

2. OBJETIVO

Comparar a resistência mecânica, a resistência à corrosão e a microestrutura de três juntas do aço inoxidável ASTM A213 TP347H, soldadas pelos processos de TIG na raiz e Eletrodo Revestido no enchimento e no acabamento, sendo uma junta na condição como recebida (estabilizada por uma hora) e duas juntas submetidas ao tratamento térmico de estabilização por uma hora e 120 horas, após soldagem.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 AÇOS INOXIDÁVEIS

Atender as necessidades básicas dos seres humanos sempre foi a grande força impulsionadora para a descoberta de novos materiais. O avanço dos materiais marcou a história, denominando as eras vividas, começando pela idade da pedra, passando pela idade dos metais (cobre, bronze e ferro), até os dias atuais, onde podem ser utilizadas diversas ligas especiais de materiais metálicos e não-metálicos. Com a descoberta das técnicas de fundição, o homem passou a ter maior domínio sobre as características dos metais, deixando de apenas descobrir, para então poder desenvolver materiais, com as propriedades necessárias para suas diversas aplicações.

Até o final do Século XIX o ferro e as ligas de aço desenvolvidas, possuíam a resistência mecânica necessária para a época, porém não eram resistentes a corrosão. No início do Século XX iniciaram-se simultaneamente estudos em alguns países, o que seria posteriormente a resolução desse problema. Na Inglaterra Harry Brearley destaca-se por seus estudos com base em ligas contendo aproximadamente 12,8% de cromo e 0,24% de carbono. Nos Estados Unidos Christiam Dantsizen iniciou suas pesquisas com ligas contendo 14 a 16% de cromo e teores de carbono de 0,007 a 0,015%. Na Alemanha, no setor de física do laboratório da empresa Krupp, liderados pelos doutores Breno Straub e Eduard Maurer desenvolveram aços contendo de 13 a 14% de cromo e 35% de níquel.

A partir do ano de 1912 os aços inoxidáveis passaram a ser amplamente difundidos e utilizados por todos os setores da indústria mundial [1].

3.1.1 TIPOS

Os aços inoxidáveis são baseados fundamentalmente nos sistemas ferro-cromo, ferro-cromo-carbono e ferro-cromo-níquel, podendo também conter outros elementos que ligam que afetam o tipo de microestrutura e propriedades do material.

A natureza inoxidável ou sem manchas, do inglês 'stainless', desses aços, é obtida através de adições do elemento cromo em quantidades maiores do que 12%, garantindo que uma camada protetora contínua de óxido de cromo se forme sobre a superfície. Alguns aços inoxidáveis podem conter mais do que 30% de cromo em sua composição.

Historicamente, os aços inoxidáveis foram classificados por microestrutura e são descritos como ferríticos, austeníticos, martensíticos ou duplex (austenítico e ferrítico). A fim de descrever amplamente o efeito da composição sobre a microestrutura para uma vasta gama de aços inoxidáveis, foi desenvolvido o conceito de Cromo e Níquel equivalentes para normalizar os efeitos causados pela adição desses elementos de liga. Fazendo o gráfico do Cromo e do Níquel equivalentes em eixos perpendiculares obtém-se uma figura que descreve a relação entre a composição e a microestrutura dos aços inoxidáveis. O diagrama de Schaeffler, mostrado na Figura 3.1, tornou-se conhecido como um mapa de aços inoxidáveis.

As faixas de composição das ligas ferríticas, austeníticas, martensíticas e duplex foram sobrepostas neste diagrama [2].

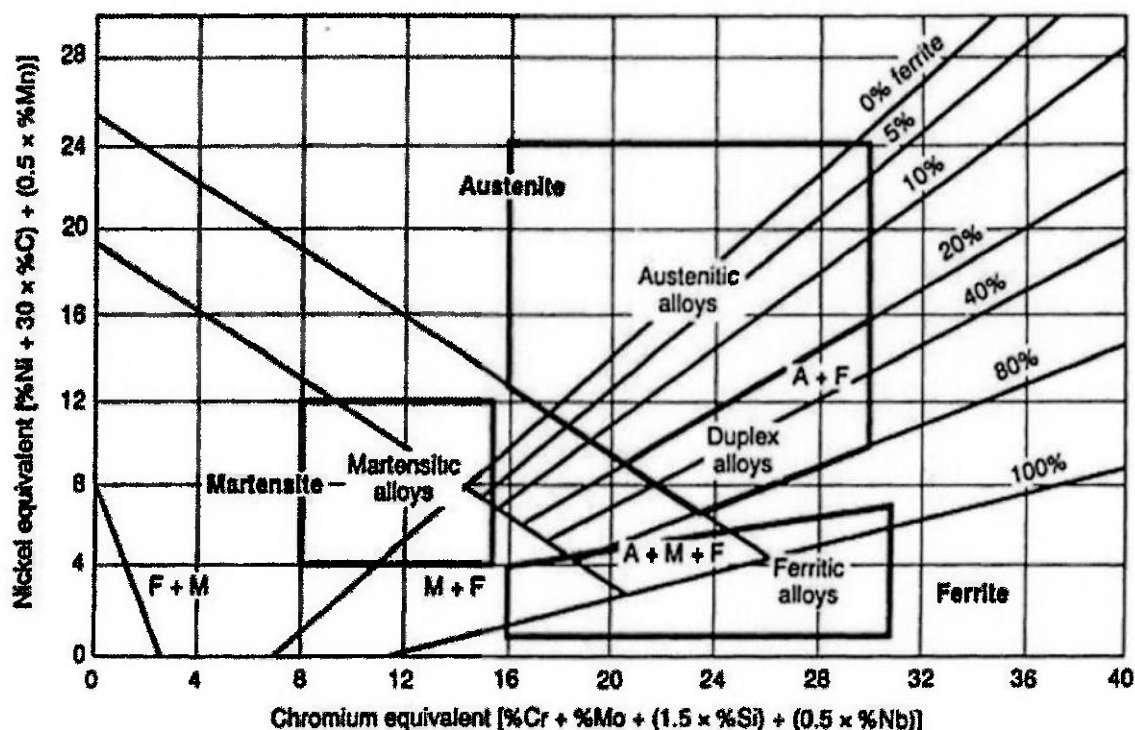


Figura 3.1 - Diagrama de Schaeffler relacionando o cromo equivalente e o níquel equivalente com a microestrutura [2].

Visando a padronização, o *American Iron and Steel Institute* (AISI) publica uma lista, onde aços inoxidáveis de diversas composições químicas são relacionados, e recebem uma identificação denominada Tipo ou Grau. Os critérios adotados para decidir qual o tipo de aço inoxidável será um tipo padronizado foram vagamente definidos, porém incluem tonelagem produzida durante um determinado período de tempo, número de fabricantes disponíveis e os limites de composição. Organizações como ASTM e SAE adotaram essa padronização para suas especificações. Uma lista de tipos de aços inoxidáveis padronizados, semelhante à originalmente publicada pelo AISI é mostrada abaixo nas Tabelas 3.1 e 3.2 [3].

Tabela 3.1 - Composição dos Aços Inoxidáveis Padronizados [3].

Type	UNS designation	Composition, %(a)							
		C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	Other
Austenitic Types									
201	S20100	0.15	5.5–7.5	1.00	16.0–18.0	3.5–5.5	0.06	0.03	0.25 N
202	S20200	0.15	7.5–10.0	1.00	17.0–19.0	4.0–6.0	0.06	0.03	0.25 N
205	S20500	0.12–0.25	14.0–15.5	1.00	16.5–18.0	1.0–1.75	0.06	0.03	0.32–0.40 N
301	S30100	0.15	2.00	1.00	16.0–18.0	6.0–8.0	0.045	0.03	...
302	S30200	0.15	2.00	1.00	17.0–19.0	8.0–10.0	0.045	0.03	...
302B	S30215	0.15	2.00	2.0–3.0	17.0–19.0	8.0–10.0	0.045	0.03	...
303	S30300	0.15	2.00	1.00	17.0–19.0	8.0–10.0	0.20	0.15 min	0.6 Mo(b)
303Se	S30323	0.15	2.00	1.00	17.0–19.0	8.0–10.0	0.20	0.06	0.15 min Se
304	S30400	0.08	2.00	1.00	18.0–20.0	8.0–10.5	0.045	0.03	...
304H	S30409	0.04–0.10	2.00	1.00	18.0–20.0	8.0–10.5	0.045	0.03	...
304L	S30403	0.03	2.00	1.00	18.0–20.0	8.0–12.0	0.045	0.03	...
304LN	S30453	0.03	2.00	1.00	18.0–20.0	8.0–12.0	0.045	0.03	0.10–0.16 N
302Cu	S30430	0.08	2.00	1.00	17.0–19.0	8.0–10.0	0.045	0.03	3.0–4.0 Cu
304N	S30451	0.08	2.00	1.00	18.0–20.0	8.0–10.5	0.045	0.03	0.10–0.16 N
305	S30500	0.12	2.00	1.00	17.0–19.0	10.5–13.0	0.045	0.03	...
308	S30800	0.08	2.00	1.00	19.0–21.0	10.0–12.0	0.045	0.03	...
309	S30900	0.20	2.00	1.00	22.0–24.0	12.0–15.0	0.045	0.03	...
309S	S30908	0.08	2.00	1.00	22.0–24.0	12.0–15.0	0.045	0.03	...
310	S31000	0.25	2.00	1.50	24.0–26.0	19.0–22.0	0.045	0.03	...
310S	S31008	0.08	2.00	1.50	24.0–26.0	19.0–22.0	0.045	0.03	...
314	S31400	0.25	2.00	1.5–3.0	23.0–26.0	19.0–22.0	0.045	0.03	...
316	S31600	0.08	2.00	1.00	16.0–18.0	10.0–14.0	0.045	0.03	2.0–3.0 Mo
316F	S31620	0.08	2.00	1.00	16.0–18.0	10.0–14.0	0.20	0.10 min	1.75–2.5 Mo
316H	S31609	0.04–0.10	2.00	1.00	16.0–18.0	10.0–14.0	0.045	0.03	2.0–3.0 Mo
316L	S31603	0.03	2.00	1.00	16.0–18.0	10.0–14.0	0.045	0.03	2.0–3.0 Mo
316LN	S31653	0.03	2.00	1.00	16.0–18.0	10.0–14.0	0.045	0.03	2.0–3.0 Mo; 0.10–0.16 N
316N	S31651	0.08	2.00	1.00	16.0–18.0	10.0–14.0	0.045	0.03	2.0–3.0 Mo; 0.10–0.16 N
317	S31700	0.08	2.00	1.00	18.0–20.0	11.0–15.0	0.045	0.03	3.0–4.0 Mo
317L	S31703	0.03	2.00	1.00	18.0–20.0	11.0–15.0	0.045	0.03	3.0–4.0 Mo
321	S32100	0.08	2.00	1.00	17.0–19.0	9.0–12.0	0.045	0.03	5 × %C min Ti
321H	S32109	0.04–0.10	2.00	1.00	17.0–19.0	9.0–12.0	0.045	0.03	5 × %C min Ti
330	N08330	0.08	2.00	0.75–1.5	17.0–20.0	34.0–37.0	0.04	0.03	...
347	S34700	0.08	2.00	1.00	17.0–19.0	9.0–13.0	0.045	0.03	10 × %C min Nb
347H	S34709	0.04–0.10	2.00	1.00	17.0–19.0	9.0–13.0	0.045	0.03	8 × %C min – 1.0 max Nb
348	S34800	0.08	2.00	1.00	17.0–19.0	9.0–13.0	0.045	0.03	0.2 Co; 10 × %C min Nb; 0.10 Ta
348H	S34809	0.04–0.10	2.00	1.00	17.0–19.0	9.0–13.0	0.045	0.03	0.2 Co; 8 × %C min – 1.0 max Nb; 0.10 Ta
384	S38400	0.08	2.00	1.00	15.0–17.0	17.0–19.0	0.045	0.03	...

Tabela 3.2 - Composição dos Aços Inoxidáveis Padronizados (Continuação) [3].

Ferritic types									
405	S40500	0.08	1.00	1.00	11.5–14.5	...	0.04	0.03	0.10–0.30 Al
409	S40900	0.08	1.00	1.00	10.5–11.75	0.50	0.045	0.045	6 × %C min – 0.75 max Ti
429	S42900	0.12	1.00	1.00	14.0–16.0	...	0.04	0.03	...
430	S43000	0.12	1.00	1.00	16.0–18.0	...	0.04	0.03	...
430F	S43020	0.12	1.25	1.00	16.0–18.0	...	0.06	0.15 min	0.6 Mo(b)
430FSe	S43023	0.12	1.25	1.00	16.0–18.0	...	0.06	0.06	0.15 min Se
434	S43400	0.12	1.00	1.00	16.0–18.0	...	0.04	0.03	0.75–1.25 Mo
436	S43600	0.12	1.00	1.00	16.0–18.0	...	0.04	0.03	0.75–1.25 Mo; 5 × %C min – 0.70 max Nb
439	S43035	0.07	1.00	1.00	17.0–19.0	0.50	0.04	0.03	0.15 Al; 12 × %C min – 1.10 Ti
442	S44200	0.20	1.00	1.00	18.0–23.0	...	0.04	0.03	...
444	S44400	0.025	1.00	1.00	17.5–19.5	1.00	0.04	0.03	1.75–2.50 Mo; 0.025 N; 0.2 + 4 (%C + %N) min – 0.8 max (Ti + Nb)
446	S44600	0.20	1.50	1.00	23.0–27.0	...	0.04	0.03	0.25 N
Duplex (ferritic-austenitic) type									
329	S32900	0.20	1.00	0.75	23.0–28.0	2.50–5.00	0.040	0.030	1.00–2.00 Mo
Martensitic types									
403	S40300	0.15	1.00	0.50	11.5–13.0	...	0.04	0.03	...
410	S41000	0.15	1.00	1.00	11.5–13.5	...	0.04	0.03	...
414	S41400	0.15	1.00	1.00	11.5–13.5	1.25–2.50	0.04	0.03	...
416	S41600	0.15	1.25	1.00	12.0–14.0	...	0.06	0.15 min	0.6 Mo(b)
416Se	S41623	0.15	1.25	1.00	12.0–14.0	...	0.06	0.06	0.15 min Se
420	S42000	0.15 min	1.00	1.00	12.0–14.0	...	0.04	0.03	...
420F	S42020	0.15 min	1.25	1.00	12.0–14.0	...	0.06	0.15 min	0.6 Mo(b)
422	S42200	0.20–0.25	1.00	0.75	11.5–13.5	0.5–1.0	0.04	0.03	0.75–1.25 Mo; 0.75–1.25 W; 0.15–0.3 V
431	S43100	0.20	1.00	1.00	15.0–17.0	1.25–2.50	0.04	0.03	...
440A	S44002	0.60–0.75	1.00	1.00	16.0–18.0	...	0.04	0.03	0.75 Mo
440B	S44003	0.75–0.95	1.00	1.00	16.0–18.0	...	0.04	0.03	0.75 Mo
440C	S44004	0.95–1.20	1.00	1.00	16.0–18.0	...	0.04	0.03	0.75 Mo
Precipitation-hardening types									
PH 13-8 Mo	S13800	0.05	0.20	0.10	12.25–13.25	7.5–8.5	0.01	0.008	2.0–2.5 Mo; 0.90–1.35 Al; 0.01 N
15-5 PH	S15500	0.07	1.00	1.00	14.0–15.5	3.5–5.5	0.04	0.03	2.5–4.5 Cu; 0.15–0.45 Nb
17-4 PH	S17400	0.07	1.00	1.00	15.5–17.5	3.0–5.0	0.04	0.03	3.0–5.0 Cu; 0.15–0.45 Nb
17-7 PH	S17700	0.09	1.00	1.00	16.0–18.0	6.5–7.75	0.04	0.04	0.75–1.5 Al

(a)Os valores individuais são valores máximos, a menos que indicado o contrário. (b)Opcional.

Além dos tipos padronizados, muitos aços inoxidáveis patenteados são utilizados para aplicações específicas. As composições dos mais populares aços inoxidáveis não padronizados estão indicadas nas Tabelas 3.3, 3.4 e 3.5 [3].

Tabela 3.3 - Composição dos Aços Inoxidáveis Não Padronizados [3].

Designation(a)	UNS designation	Composition, %(b)							
		C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	Other
Austenitic stainless steels									
Gall-Tough	S20161	0.15	4.00–6.00	3.00–4.00	15.00–18.00	4.00–6.00	0.040	0.040	0.08–0.20 N
203 EZ (XM-1)	S20300	0.08	5.0–6.5	1.00	16.0–18.0	5.0–6.5	0.040	0.18–0.35	0.5 Mo; 1.75–2.25 Cu
Nitronic 50 (XM-19)	S20910	0.06	4.0–6.0	1.00	20.5–23.5	11.5–13.5	0.040	0.030	1.5–3.0 Mo; 0.2–0.4 N; 0.1–0.3 Nb; 0.1–0.3 V
Tenelon (XM-31)	S21400	0.12	14.5–16.0	0.3–1.0	17.0–18.5	0.75	0.045	0.030	0.35 N
Cryogenic Tenelon (XM-14)	S21460	0.12	14.0–16.0	1.00	17.0–19.0	5.0–6.0	0.060	0.030	0.35–0.50 N
Esshete 1250	S21500	0.15	5.5–7.0	1.20	14.0–16.0	9.0–11.0	0.040	0.030	0.003–0.009 B; 0.75–1.25 Nb; 0.15–0.40 V
Type 216 (XM-17)	S21600	0.08	7.5–9.0	1.00	17.5–22.0	5.0–7.0	0.045	0.030	2.0–3.0 Mo; 0.25–0.50 N
Type 216 L (XM-18)	S21603	0.03	7.5–9.0	1.00	17.5–22.0	7.5–9.0	0.045	0.030	2.0–3.0 Mo; 0.25–0.50 N
Nitronic 60	S21800	0.10	7.0–9.0	3.5–4.5	16.0–18.0	8.0–9.0	0.040	0.030	0.08–0.18 N
Nitronic 40 (XM-10)	S21900	0.08	8.0–10.0	1.00	19.0–21.5	5.5–7.5	0.060	0.030	0.15–0.40 N
21-6-9 LC	S21904	0.04	8.00–10.00	1.00	19.00–21.50	5.50–7.50	0.060	0.030	0.15–0.40 N
Nitronic 33 (18-3-Mn)	S24000	0.08	11.50–14.50	1.00	17.00–19.00	2.50–3.75	0.060	0.030	0.20–0.40 N
Nitronic 32 (18-2-Mn)	S24100	0.15	11.00–14.00	1.00	16.50–19.50	0.50–2.50	0.060	0.030	0.20–0.45 N
18-18 Plus	S28200	0.15	17.0–19.0	1.00	17.5–19.5	...	0.045	0.030	0.5–1.5 Mo; 0.5–1.5 Cu; 0.4–0.6 N
303 Plus X (XM-5)	S30310	0.15	2.5–4.5	1.00	17.0–19.0	7.0–10.0	0.020	0.25 min	0.6 Mo
MVMA(c)	S30415	0.05	0.60	1.30	18.5	9.50	...	...	0.15 N; 0.04 Ce
304BI(d)	S30424	0.08	2.00	0.75	18.00–20.00	12.00–15.00	0.045	0.030	0.10 N; 1.00–1.25 B
304 HN (XM-21)	S30452	0.04–0.10	2.00	1.00	18.0–20.0	8.0–10.5	0.045	0.030	0.16–0.30 N
Cronifer 1815 LCSi	S30600	0.018	2.00	3.7–4.3	17.0–18.5	14.0–15.5	0.020	0.020	0.2 Mo
RA 85 H(c)	S30615	0.20	0.80	3.50	18.5	14.50	...	...	1.0 Al
253 MA	S30815	0.05–0.10	0.80	1.4–2.0	20.0–22.0	10.0–12.0	0.040	0.030	0.14–0.20 N; 0.03–0.08 Ce; 1.0 Al
Type 309 S Cb	S30940	0.08	2.00	1.00	22.0–24.0	12.0–15.0	0.045	0.030	10 × %C min to 1.10 max Nb
Type 310 Cb	S31040	0.08	2.00	1.50	24.0–26.0	19.0–22.0	0.045	0.030	10 × %C min to 1.10 max Nb + Ta
254 SMO	S31254	0.020	1.00	0.80	19.50–20.50	17.50–18.50	0.030	0.010	6.00–6.50 Mo; 0.50–1.00 Cu; 0.180–0.220 N
Type 316 Ti	S31635	0.08	2.00	1.00	16.0–18.0	10.0–14.0	0.045	0.030	5 × %(C + N) min to 0.70 max Ti; 2.0–3.0 Mo; 0.10 N
Type 316 Cb	S31640	0.08	2.00	1.00	16.0–18.0	10.0–14.0	0.045	0.030	10 × %C min to 1.10 max Nb + Ta; 2.0–3.0 Mo; 0.10 N
Type 316 HQ	...	0.030	2.00	1.00	16.00–18.25	10.00–14.00	0.030	0.015	3.00–4.00 Cu; 2.00–3.00 Mo
Type 317 LM	S31725	0.03	2.00	1.00	18.0–20.0	13.5–17.5	0.045	0.030	4.0–5.0 Mo; 0.10 N
17-14-4 LN	S31726	0.03	2.00	0.75	17.0–20.0	13.5–17.5	0.045	0.030	4.0–5.0 Mo; 0.10–0.20 N
Type 317 LN	S31753	0.03	2.00	1.00	18.0–20.0	11.0–15.0	0.030	0.030	0.10–0.22 N
Type 370	S37000	0.03–0.05	1.65–2.35	0.5–1.0	12.5–14.5	14.5–16.5	0.040	0.010	1.5–2.5 Mo; 0.1–0.4 Ti; 0.005 N; 0.05 Co

Tabela 3.4 - Composição dos Aços Inoxidáveis Não Padronizados (Continuação) [3].

Designation(a)	UNS designation	Composition, %(b)							
		C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	Other
Austenitic stainless steels									
18-18-2 (XM-15)	S38100	0.08	2.00	1.5-2.5	17.0-19.0	17.5-18.5	0.030	0.030	...
19-9 DL	S63198	0.28-0.35	0.75-1.50	0.03-0.08	18.0-21.0	8.0-11.0	0.040	0.030	1.0-1.75 Mo; 0.1-0.35 Ti; 1.0-1.75 W; 0.25-0.60 Nb
20Cb-3	N08020	0.07	2.00	1.00	19.0-21.0	32.0-38.0	0.045	0.035	2.0-3.0 Mo; 3.0-4.0 Cu; 8 × %C min to 1.00 max Nb
20Mo-4	N08024	0.03	1.00	0.50	22.5-25.0	35.0-40.0	0.035	0.035	3.50-5.00 Mo; 0.50-1.50 Cu; 0.15-0.35 Nb
20Mo-6	N08026	0.03	1.00	0.50	22.00-26.00	33.00-37.20	0.03	0.03	5.00-6.70 Mo; 2.00-4.00 Cu
Sanicro 28	N08028	0.02	2.00	1.00	26.0-28.0	29.5-32.5	0.020	0.015	3.0-4.0 Mo; 0.6-1.4 Cu
AL-6X	N08366	0.035	2.00	1.00	20.0-22.0	23.5-25.5	0.030	0.030	6.0-7.0 Mo
AL-6XN	N08367	0.030	2.00	1.00	20.0-22.0	23.50-25.50	0.040	0.030	6.00-7.00 Mo; 0.18-0.25 N
JS-700	N08700	0.04	2.00	1.00	19.0-23.0	24.0-26.0	0.040	0.030	4.3-5.0 Mo; 8 × %C min to 0.5 max Nb; 0.5 Cu; 0.005 Pb; 0.035 S
Type 332	N08800	0.01	1.50	1.00	19.0-23.0	30.0-35.0	0.045	0.015	0.15-0.60 Ti; 0.15-0.60 Al
904L	N08904	0.02	2.00	1.00	19.0-23.0	23.0-28.0	0.045	0.035	4.0-5.0 Mo; 1.0-2.0 Cu
Cronifer 1925 hMo	N08925	0.02	1.00	0.50	24.0-26.0	19.0-21.0	0.045	0.030	6.0-7.0 Mo; 0.8-1.5 Cu; 0.10-0.20 N
Cronifer 2328	...	0.04	0.75	0.75	22.0-24.0	26.0-28.0	0.030	0.015	2.5-3.5 Cu; 0.4-0.7 Ti; 2.5-3.0 Mo
Ferritic stainless steels									
18-2 FM (XM-34)	S18200	0.08	1.25-2.50	1.00	17.5-19.5	...	0.040	0.15 min	1.5-2.5 Mo
Type 430 Ti	S43036	0.10	1.00	1.00	16.0-19.5	0.75	0.040	0.030	5 × %C min to 0.75 max Ti
Type 441	S44100	0.03	1.00	1.00	17.5-19.5	1.00	0.040	0.040	0.3 + 9 × (%C) min to 0.90 max Nb; 0.1-0.5 Ti; 0.03 N
E-Brite 26-1	S44627	0.01	0.40	0.40	25.0-27.0	0.50	0.020	0.020	0.75-1.5 Mo; 0.05-0.2 Nb; 0.015 N; 0.2 Cu
MONIT (25-4-4)	S44635	0.025	1.00	0.75	24.5-26.0	3.5-4.5	0.040	0.030	3.5-4.5 Mo; 0.2 + 4 (%C + %N) min to 0.8 max (Ti + Nb); 0.035 N
Sea-Cure (SC-1)	S44660	0.025	1.00	1.00	25.0-27.0	1.5-3.5	0.040	0.030	2.5-3.5 Mo; 0.2 + 4 (%C + %N) min to 0.8 max (Ti + Nb); 0.035 N
AL 29-4C	S44735	0.030	1.00	1.00	28.0-30.0	1.00	0.040	0.030	3.60-4.20 Mo; 0.20-1.00 Ti + Nb and 6 (%C + %N) min Ti + Nb; 0.045 N
AL 29-4-2	S44800	0.01	0.30	0.20	28.0-30.0	2.0-2.5	0.025	0.020	3.5-4.2 Mo; 0.15 Cu; 0.02 N; 0.025 max (%C + %N)
18 SR(c)	...	0.04	0.30	1.00	18.0	...	...	...	2.0 Al; 0.4 Ti
12 SR(c)	...	0.02	...	0.50	12.0	...	...	...	1.2 Al; 0.3 Ti
406	...	0.06	1.00	0.50	12.0-14.0	0.50	0.040	0.030	2.75-4.25 Al; 0.6 Ti
408 Cb	...	0.03	0.2-0.5	0.2-0.5	11.75-12.25	0.45	0.030	0.020	0.75-1.25 Al; 0.65-0.75 Nb; 0.3-0.5 Ti; 0.03 N
ALFA IV	...	0.03	0.50	0.60	19.0-21.0	0.45	0.035	0.005	4.75-5.25 Al; 0.005-0.035 Ce; 0.03 N
Sealmat 1	...	0.08	0.5-0.8	0.3-0.6	28.0-29.0	0.40	0.030	0.015	0.04 N
Duplex stainless steels									
44LN	S31200	0.030	2.00	1.00	24.0-26.0	5.50-6.50	0.045	0.030	1.20-2.00 Mo; 0.14-0.20 N
DP-3	S31260	0.030	1.00	0.75	24.0-26.0	5.50-7.50	0.030	0.030	2.50-3.50 Mo; 0.20-0.80 Cu; 0.10-0.30 N; 0.10-0.50 W
3RE60	S31500	0.030	1.20-2.00	1.40-2.00	18.00-19.00	4.25-5.25	0.030	0.030	2.50-3.00 Mo
2205	S31803	0.030	2.00	1.00	21.0-23.0	4.50-6.50	0.030	0.020	2.50-3.50 Mo; 0.08-0.20 N
2304	S32304	0.030	2.50	1.0	21.5-24.5	3.0-5.5	0.040	0.040	0.05-0.60 Mo; 0.05-0.60 Cu; 0.05-0.20 N

Tabela 3.5 - Composição dos Aços Inoxidáveis Não Padronizados (Continuação) [3].

Designation(a)	UNS designation	Composition, %(b)							
		C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	Other
Duplex stainless steels									
Uranus 50	S32404	0.04	2.00	1.0	20.5–22.5	5.5–8.5	0.030	0.010	2.0–3.0 Mo; 1.0–2.0 Cu; 0.20 N
Ferralium 255	S32550	0.04	1.50	1.00	24.0–27.0	4.50–6.50	0.04	0.03	2.00–4.00 Mo; 1.50–2.50 Cu; 0.10–0.25 N
7-Mo PLUS	S32950	0.03	2.00	0.60	26.0–29.0	3.50–5.20	0.035	0.010	1.00–2.50 Mo; 0.15–0.35 N
Martensitic stainless steels									
Type 410S	S41008	0.08	1.00	1.00	11.5–13.5	0.60	0.040	0.030	...
Type 410 Cb (XM-30)	S41040	0.15	1.00	1.00	11.5–13.5	...	0.040	0.030	0.05–0.20 Nb
E4	S41050	0.04	1.00	1.00	10.5–12.5	0.60–1.1	0.045	0.030	0.10 N
CA6NM	S41500	0.05	0.5–1.0	0.60	11.5–14.0	3.5–5.5	0.030	0.030	0.5–1.0 Mo
416 Plus X (XM-6)	S41610	0.15	1.5–2.5	1.00	12.0–14.0	...	0.060	0.15 min	0.6 Mo
Type 418 (Greek Ascolloy)	S41800	0.15–0.20	0.50	0.50	12.0–14.0	1.8–2.2	0.040	0.030	2.5–3.5 W
TrimRite	S42010	0.15–0.30	1.00	1.00	13.5–15.0	0.25–1.00	0.040	0.030	0.40–1.00 Mo
Type 420 F Se	S42023	0.3–0.4	1.25	1.00	12.0–14.0	...	0.060	0.060	0.15 min Se; 0.6 Zr; 0.6 Cu
Lapelloy	S42300	0.27–0.32	0.95–1.35	0.50	11.0–12.0	0.50	0.025	0.025	2.5–3.0 Mo; 0.2–0.3 V
Type 440 F	S44020	0.95–1.20	1.25	1.00	16.0–18.0	0.75	0.040	0.10–0.35	0.08 N
Type 440 F Se	S44023	0.95–1.20	1.25	1.00	16.0–18.0	0.75	0.040	0.030	0.15 min Se; 0.60 Mo
Precipitation-hardening stainless steels									
PH 14-4 Mo	S14800	0.05	1.00	1.00	13.75–15.0	7.75–8.75	0.015	0.010	2.0–3.0 Mo; 0.75–1.50 Al
PH 15-7 Mo (Type 632)	S15700	0.09	1.00	1.00	14.0–16.0	6.5–7.75	0.040	0.030	2.0–3.0 Mo; 0.75–1.5 Al
AM-350 (Type 633)	S35000	0.07–0.11	0.5–1.25	0.50	16.0–17.0	4.0–5.0	0.040	0.030	2.5–3.25 Mo; 0.07–0.13 N
AM-355 (Type 634)	S35500	0.10–0.15	0.5–1.25	0.50	15.0–16.0	4.0–5.0	0.040	0.030	2.5–3.25 Mo; 0.07–0.13 N
Custom 450 (XM-25)	S45000	0.05	1.00	1.00	14.0–16.0	5.0–7.0	0.030	0.030	1.25–1.75 Cu; 0.5–1.0 Mo; 8 × %C min Nb
Custom 455 (XM-16)	S45500	0.05	0.50	0.50	11.0–12.5	7.5–9.5	0.040	0.030	1.5–2.5 Cu; 0.8–1.4 Ti; 0.1–0.5 Nb; 0.5 Mo

(a)As designações XM nesta coluna são designações ASTM para as ligas listadas. (b)Os valores individuais são valores máximos, a menos que indicado o contrário. (c)Composição Nominal. (d)A designação UNS não foi especificada. Esta designação aparece na ASTM A 887 e apenas indica a forma de ser utilizada.

Um estudo conjunto entre a ASTM e a SAE resultou no sistema de numeração unificado (UNS - *Unified Numbering System*) para a designação e identificação de metais e ligas em uso comercial nos Estados Unidos. Na listagem UNS, os aços inoxidáveis são identificados pela letra "S", seguida por uma numeração de cinco dígitos.

Alguns aços inoxidáveis são classificados como ligas de níquel no sistema UNS, cuja identificação inicia-se pela letra N, devido ao seu alto teor de níquel e baixo teor de carbono (menos de 50%). O uso da numeração UNS e a padronização AISI asseguram que o consumidor sempre obtenha um material adequado, mesmo a partir de diferentes fabricantes ou fornecedores, contudo, algumas variações na fabricação e nas características de serviço podem ser esperadas, mesmo com o material sendo obtido a partir de um único produtor [3].

3.1.1.1 AÇOS INOXIDÁVEIS MARTENSÍTICOS

Os aços inoxidáveis martensíticos são ligas essencialmente compostas por cromo e carbono, possuem uma estrutura cristalina martensítica na condição endurecida. Esses aços são ferromagnéticos, endurecíveis por tratamento térmico e possuem resistência a ambientes corrosivos leves.

O cromo contido nesse material está em uma faixa de 10,5 a 18% da composição e o carbono pode chegar a 1,2%, o que é considerado alto carbono. Elementos de liga podem ser adicionados para melhorar as propriedades mecânicas, resistência à corrosão, usinabilidade, etc. [3].

3.1.1.2 AÇOS INOXIDÁVEIS FERRÍTICOS

São essencialmente ligas de cromo com uma estrutura cristalina cúbica de corpo centrado, com teor de cromo na faixa de 10,5 a 30%. Alguns graus podem conter molibdênio, silício, alumínio, titânio ou nióbio para fornecer características específicas, além de enxofre e selênio para melhorar a usinabilidade. As ligas ferríticas são ferromagnéticas, possuem boa ductilidade e moldabilidade, porém a resistência em altas temperaturas é relativamente baixa se comparada aos austeníticos [3].

3.1.1.3 AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS

Os aços inoxidáveis austeníticos são constituídos principalmente por ligas Fe-Cr-Ni. Essas ligas são essencialmente não magnéticas e não podem ser endurecidas por tratamento térmico. A composição química normalmente possui teores de Cr na faixa de 16 a 26%, Ni podendo chegar a 35% e carbono, normalmente abaixo de 0,15%, salvo algumas exceções onde esse valor pode até dobrar, além de outros elementos de liga que podem ser adicionados para atendimento de requisitos específicos. O aço inoxidável austenítico tipo 304 é o mais comumente utilizado. Altos níveis de resistência à corrosão, resistência mecânica e ductilidade são os principais motivos para a grande aplicação dessas ligas em diversos segmentos da indústria [3, 4].

3.1.1.4 AÇOS INOXIDÁVEIS DUPLEX

Aços inoxidáveis duplex possuem uma estrutura mista entre ferrita e austenita. A quantidade exata de cada fase é uma função da combinação da composição química (basicamente são ligas Fe-Cr-Ni-Mo-N) com o tratamento térmico, porém a maioria das ligas é projetada para conter aproximadamente 50% de cada fase. Elevada resistência mecânica e excelente resistência à corrosão são as principais características dessas ligas [3, 4].

3.1.1.5 AÇOS INOXIDÁVEIS ENDURECÍVEIS POR PRECIPITAÇÃO

São ligas cromo-níquel que contém elementos endurecíveis por precipitação tais como cobre, alumínio ou titânio. Esses aços inoxidáveis podem ser tanto austeníticos como martensíticos na condição solubilizado. Os austeníticos são frequentemente transformados em martensíticos através de tratamentos térmicos. Na maioria dos casos esses aços inoxidáveis atingem alta resistência devido ao endurecimento da estrutura martensítica [3].

3.1.2 AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS

Os aços inoxidáveis austeníticos representam o maior grupo (aproximadamente 70%) dos aços inoxidáveis em utilização, sendo as séries AISI 200 e AISI 300 os tipos mais comumente encontrados.

Coletivamente, essa posição dominante é devido a um elevado nível de fabricação, alta resistência a corrosão, possibilidade de aplicação em grande faixa de temperaturas de trabalho (de criogênicas até elevadas temperaturas), e também por uma variada combinação de propriedades específicas, que podem ser obtidas através de diferentes composições presentes no grupo (vide Figura 3.2), fornecendo opções úteis de materiais para diversas aplicações [5].

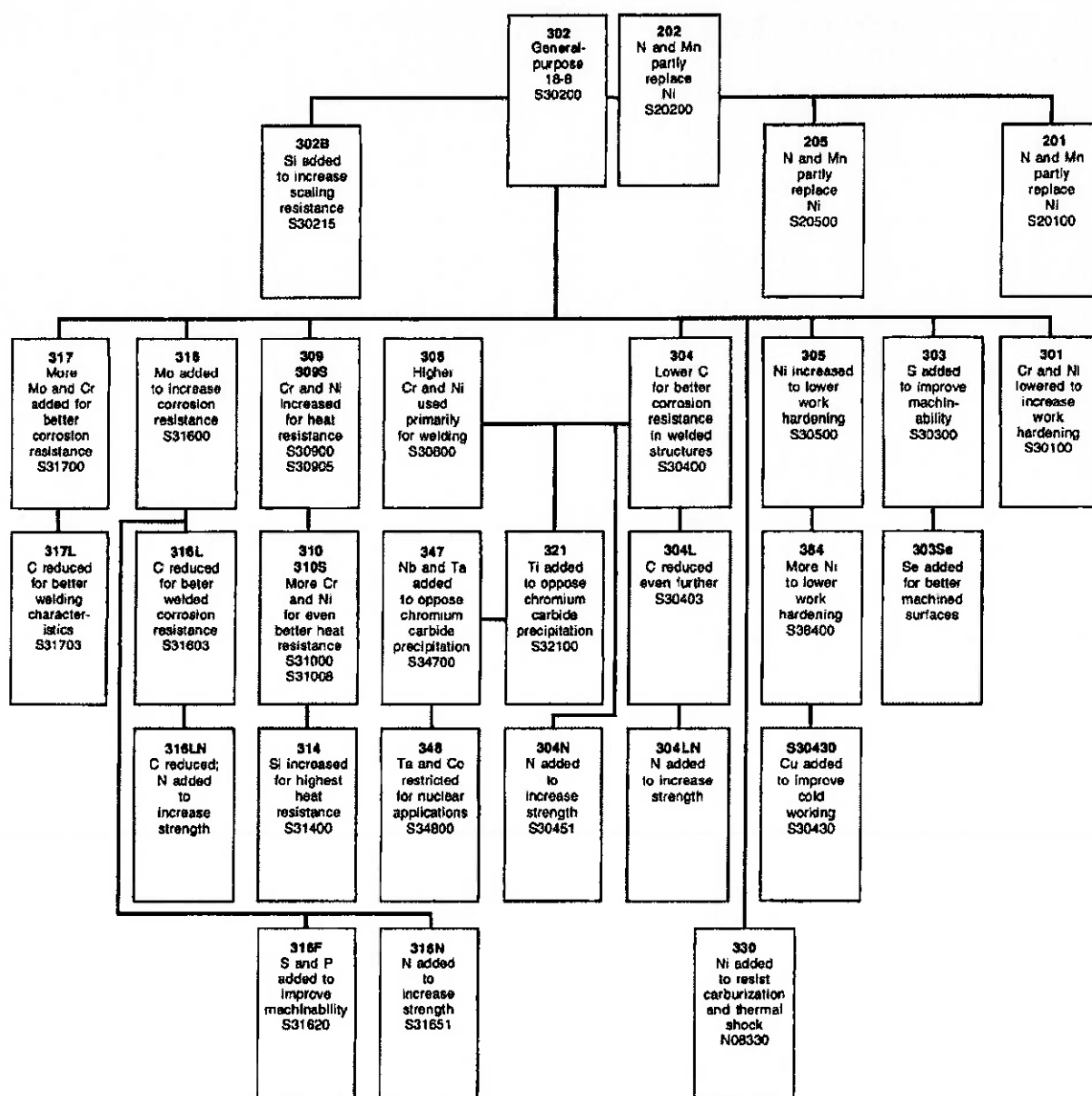


Figura 3.2 - Relação entre Famílias de Aços Inoxidáveis Austeníticos Padronizados [3].

Os aços inoxidáveis austeníticos são formados pela adição de elementos de liga, como níquel ou manganês, ao sistema ferro-cromo, conforme figura 3.3. O campo gama (γ) se expande em virtude da adição de elementos de liga de com estruturas cúbicas de face centrada (CFC) e isso resulta no reforço e ampliação da fase gama. Essa fase é chamada de austenita, quando adicionados níquel ou manganês suficiente para a transformação da austenita, suprimi-se então a formação da ferrita alfa (α) [5].

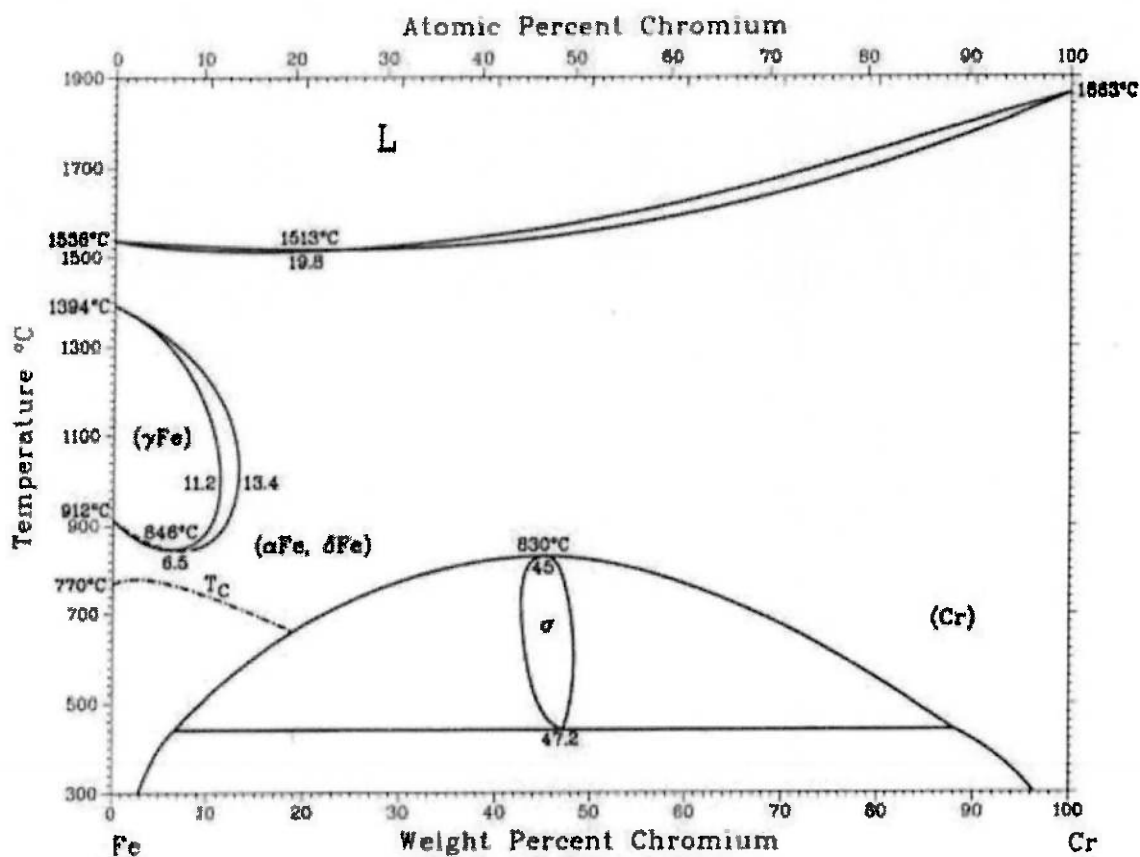


Figura 3.3 - Diagrama de Fase Ferro-Cromo[6].

É, portanto, possível ligar aços ferro-cromo com um mínimo de 8% de níquel para se obter uma estrutura austenítica estável à temperatura ambiente.

Os aços inoxidáveis austeníticos são portanto, ligas de ferro e cromo que foram suficientemente ligadas com níquel ou manganês e nitrogênio para ter uma estrutura austenítica à temperatura ambiente [5].

3.1.2.1 DIAGRAMA TERNÁRIO PARA O SISTEMA FE-CR-NI

Diagramas de fase, assim como mostrado anteriormente na figura 3.3, são apenas aproximações das fases que podem ser encontradas em um aço inoxidável com uma composição química particular. Normalmente os níveis comerciais de outros elementos além do ferro, cromo e níquel não são os mesmos presentes nas ligas utilizadas na determinação dos diagramas, da mesma forma, os tempos de aquecimento empregados experimentalmente na determinação de diagramas de fase em equilíbrio, estão muito longe dos usados nas práticas comerciais. Apesar dessas limitações, os diagramas são úteis para descrever como os sistemas ligados se comportam, e assim, permitir prever o efeito de alterações (composição ou tratamento térmico) dentro do próprio sistema. Diagramas ternários do sistema Fe-Cr-Ni para seções isotérmicas de 1300°C, 1000°C, 900°C, 800°C e 650°C estão demonstrados nas figura 3.4 [1, 5].

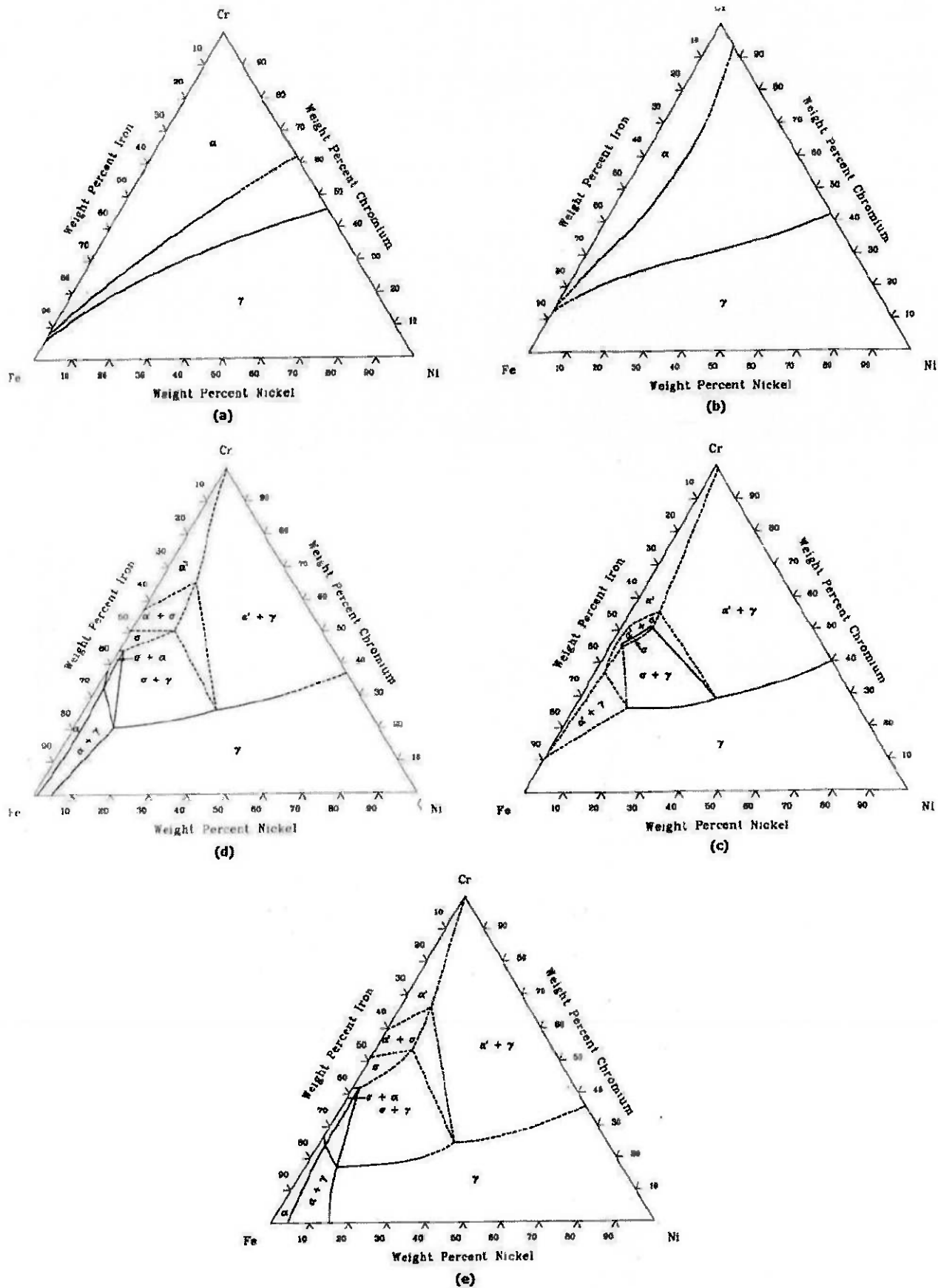


Figura 3.4 - Diagramas Ternários Sistema Fe-Cr-Ni. Seções Isotérmicas (a)1300°C, (b)1000°C, (c)900°C, (d)800°C e (e)650°C[6].

Composições aproximadas aos aços inoxidáveis mais simples da série AISI 300 (16 a 19% Cr, 6 a 12% Ni), poderiam ser previstos cair tanto dentro como fora do campo $\alpha + \gamma$, dependendo da composição específica. Porém, conforme citado anteriormente, o diagrama ternário é uma aproximação não levando em conta outros elementos, sendo uma representação razoável para situações observadas na prática. As ligas mais simples da série 300 normalmente contém ferrita (α) como um constituinte secundário em elevadas temperaturas.

A quantidade exata de ferrita dependerá da composição, do nível de homogeneidade e o quão próximo o ciclo térmico está de uma situação de equilíbrio. Já os aços de alta liga dentro da série AISI 300, são deslocados suficientemente para a direita do diagrama, onde uma estrutura completamente austenítica normalmente é obtida.

Uma alternativa para visualizar as relações de fase é a utilização de seções transversais do diagrama ternário, chamados de pseudobinários, elaborados de tal forma que um dos elementos é mantido constante. A Figura 3.5 mostra seções para teores de ferro constantes de 50, 60, 70, 80 e 90%. Estes são diagramas em equilíbrio [5].

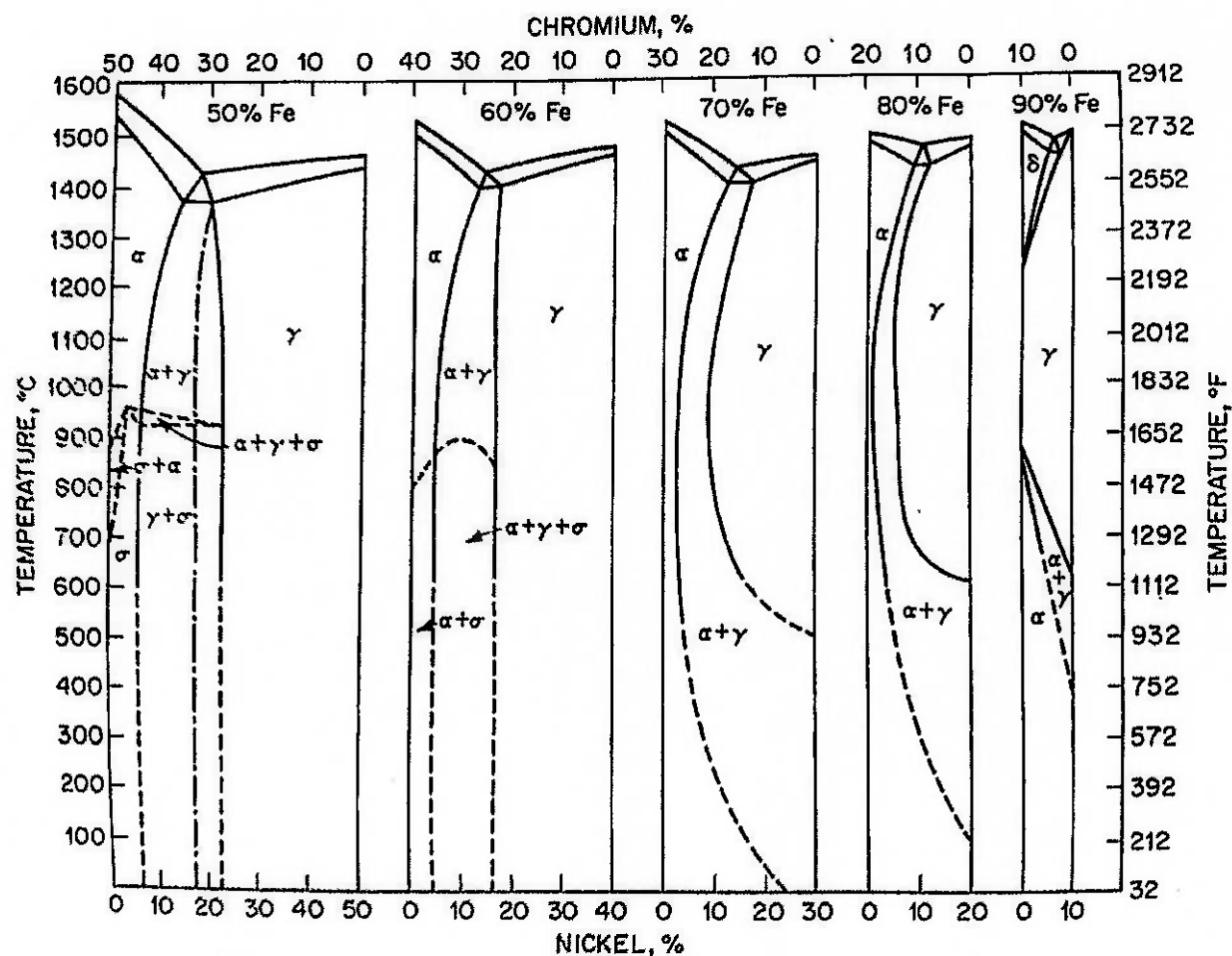


Figura 3.5 - Diagrama Pseudobinário para Fe-Cr-Ni[5].

As linhas tracejadas usadas para separar os campos das fases em baixas temperaturas significam que as transformações não são observadas em condições práticas. Uma liga resfriada do campo γ , que cruzar as linhas tracejadas, permanecerá austenítica. A Figura 3.5 demonstra como o formato do campo austenítico é alterado com a adição conjunta de níquel e cromo. Com 70, 80 e 90% de ferro, os limites dos campos $\gamma / (\alpha + \gamma)$ inclinam-se para trás de tal forma que, uma liga completamente austenítica próxima ao limite do campo a 1000°C pode conter ferrita quando aquecida. A presença de ferrita pode ser útil em questões práticas, como na integridade de soldas [5].

3.1.2.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS

As propriedades mecânicas da maioria dos aços inoxidáveis austeníticos, especialmente ductilidade e tenacidade, são maiores se comparadas às mesmas propriedades dos aços carbono. Resistência e dureza podem ser elevadas através de trabalho a frio. Propriedades em temperatura ambiente para alguns aços inoxidáveis austeníticos padronizados são mostradas na tabela 3.6 [3].

Tabela 3.6 - Mínimas Propriedades Mecânicas para Aços Inoxidáveis Austeníticos em Temperatura Ambiente [3].

Product form(a)	Condition	Tensile strength		0.2% yield strength		Elonga- tion, %	Reductio n in area, %	Hardness, HRB	ASTM specification
		MPa	ksi	MPa	ksi				
Type 301 (UNS S30100)									
B	Annealed	620	90	205	30	40	...	95 max	A 666
B, P, Sh, St	Annealed	515	75	205	30	40	...	92 max	A 167
B, P, Sh, St	$\frac{1}{4}$ hard	860	125	515	75	25	...	...	A 666
B, P, Sh, St	$\frac{1}{2}$ hard	1030	150	760	110	18	...	...	A 666
B, P, Sh, St	$\frac{3}{4}$ hard	1210	175	930	135	12	...	...	A 666
B, P, Sh, St	Full hard	1280	185	965	140	9	...	...	A 666
Type 304 (UNS S30400)									
B, F(f)	Hot finished and annealed	515	75	205	30	40	50	...	A 276, A 473
B	Cold finished(b) and annealed	620	90	310	45	30	40	...	A 276
B	Cold finished(c) and annealed	515	75	205	30	30	40	...	A 276
W	Annealed	515	75	205	30	35(d)	50(d)	...	A 580
W	Cold finished	620	90	310	45	30(d)	40	...	A 580
P, Sh, St	Annealed	515	75	205	30	40	...	92 max	A 167
B, P, Sh, St	$\frac{1}{8}$ hard	690	100	380	55	35	...	...	A 666
B, P, Sh, St	$\frac{1}{4}$ hard	860	125	515	75	10	...	...	A 666
B, P, Sh, St	$\frac{1}{2}$ hard	1035	150	760	110	7	...	...	A 666
Types 309 (UNS S30900), 309S (UNS S30908), 310 (UNS S31000) and 310S (UNS S31008)									
B, F	Hot finished and annealed	515	75	205	30	40	50	...	A 276, A 473
B	Cold finished(b) and annealed	620	90	310	45	30	40	...	A 276
B	Cold finished(c) and annealed	515	75	205	30	30	40	...	A 276
W	Annealed	515	75	205	30	35(d)	50(d)	...	A 580
W	Cold finished	620	90	310	45	30(d)	40	...	A 580
P, Sh, St	Annealed	515	75	205	30	40	...	95 max	A 167
Types 347 (UNS S34700) and 348 (UNS S34800)									
B, F	Hot finished and annealed	515	75	205	30	40	50		A 276, A 473
B	Cold finished(b) and annealed	620	90	310	45	30	40	...	A 276
B	Cold finished(c) and annealed	515	75	205	30	30	40	...	A 276
W	Annealed	515	75	205	30	35(d)	50(d)	...	A 580
W	Cold finished	620	90	310	45	30(d)	40	...	A 580
P, Sh, St	Annealed	515	75	205	30	40	...	92 max	A 167, A 240

(a) B, Barra; F, Forjados; P, Chapa; Pi, Duto; Sh, Folha; St, Tira; T, Tubo; W, Arame. (b) Até 13 mm (0.5 in.) de espessura. (c) Acima de 13 mm (0.5 in.) de espessura. (d) Para arames com até 3.96mm (5=32in.), alongamento e redução de área devem ser 25 e 40%, respectivamente. (f) Para seções forjadas a partir de 127 mm (5 in.), a resistência a tração deve ser 485 MPa (70 ksi).

Alguns aços inoxidáveis austeníticos, chamados de metaestáveis, podem desenvolver maiores níveis de resistência e dureza quando trabalhados a frio, do que outros, os chamados estáveis.

Nos metaestáveis a deformação desencadeia a transformação da austenita para ferrita, o efeito dessa transformação na resistência está ilustrado na figura 3.6, que compara a curva tensão-deformação do aço inoxidável tipo 304, estável, com o metaestável tipo 301. O formato da curva para o tipo 304 indica que o encruamento ocorre em toda a duração da aplicação de tensão, mas que o nível de encruamento diminui com o aumento da tensão [1, 3].

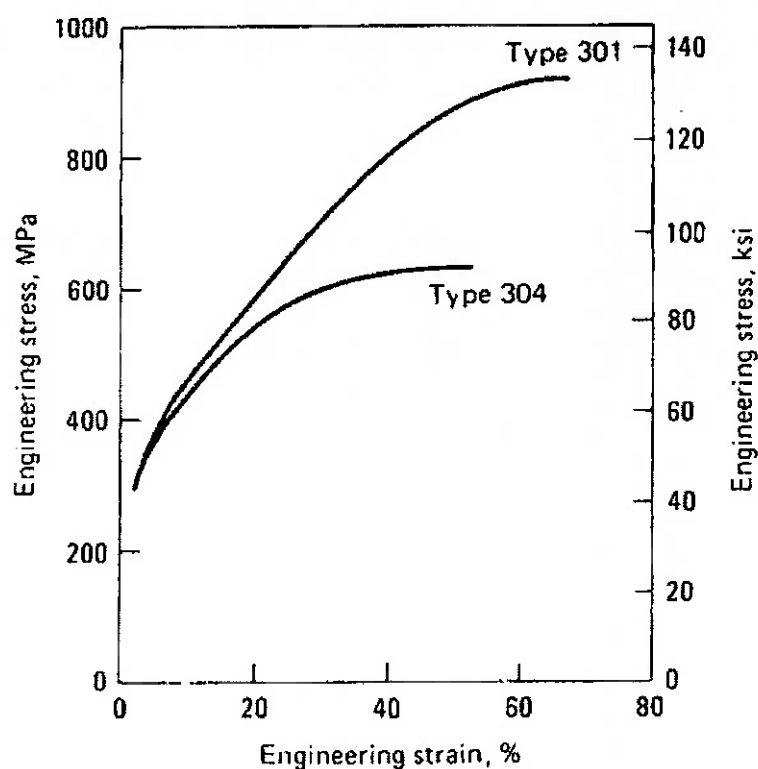


Figura 3.6 - Curvas Típicas Tensão-Deformação para os Aços Inoxidáveis Tipos 304 e 301 [3].

Por outro lado a relação tensão-deformação para o tipo 301 indica uma acelerada taxa de encruamento após um aumento inicial de 10 a 15% na deformação plástica. Esse acelerado encruamento é resultado direto da transformação microestrutural para martensita [1, 3].

3.1.2.3 RESISTÊNCIA A CORROSÃO

A resistência à corrosão dos aços inoxidáveis varia consideravelmente de acordo com a composição, estrutura e tratamento térmico. Dentro de sua classe, os inoxidáveis austeníticos são considerados os de melhor resistência em meios corrosivos. Um austenítico de tipo básico, 18% Cr e 8% Ni, com superfície polida a metal brilhante, se mantido livre de acúmulo de contaminantes, se manterá brilhante sob a maioria das condições ambientais. Em condições mais severas (elevadas temperaturas, meios altamente corrosivos, etc.) serão requeridas maiores ligas.

Adição de molibdênio (acima de 2%) eleva a resistência de corrosão por pites, AISI tipo 316 é a mais popular liga com adição de molibdênio. Altas concentrações de cloretos, ou falta de circulação do meio, podem corroer até mesmo o tipo 316, para esses casos serão requeridas ligas com alto teor de níquel e molibdênio.

Uma grande desvantagem para a utilização dos aços inoxidáveis austeníticos é que, certos tratamentos térmicos, na chamada faixa de sensibilização, causam uma suscetibilidade a corrosão intergranular no material quando submetido a meios corrosivos. A faixa de temperatura de sensibilização está entre 593 a 871°C. O grau de suscetibilidade após o aquecimento nessa faixa está em função do tempo, temperatura e composição.

O aço tipo 304 é facilmente suscetível após uma hora a 677°C, porem provavelmente não será gravemente afetado em uma hora a 593°C ou 871°C. Reduzindo o teor de carbono a sensitização será amplamente evitada. O efeito nocivo do carbono, normalmente é explanado pela teoria de empobrecimento de cromo. A sensitização leva a formação e precipitação de carbonetos ricos em cromo, com a fórmula $M_{23}C_6$, para os contornos de grão. As áreas adjacentes ao precipitado são empobrecidas em cromo, uma vez que a taxa de difusão do cromo é menor do que a do carbono. Além da redução de carbono, a série dos aços inoxidáveis estabilizados, contendo nióbio ou titânio, também são válidos para resistir a sensitização. O elemento estabilizante liga-se preferencialmente com o carbono em excesso na solução solida, prevenindo assim sua precipitação como $M_{23}C_6$.

Um fenômeno conhecido como corrosão em faca, tem sido observado em componentes soldados dos aços estabilizados. Sua ocorrência está associada a um ataque localizado na zona afetada pelo calor (ZAC). Em temperaturas acima de 1150°C, parte dos carbonetos de nióbio ou titânio podem dissolver-se, liberando carbono. Durante o resfriamento ou no reaquecimento da liga até a faixa de temperatura de sensitização, ocorre a precipitação de carbonetos de cromo do tipo $M_{23}C_6$. Posteriormente, se exposto a um meio corrosivo, pode resultar em uma corrosão intergranular extremamente localizada. Além dos citados anteriormente, outros fenômenos de corrosão podem ser observados nos aços inoxidáveis austeníticos, para aplicações específicas [1, 2, 5, 7, 8].

3.1.3 AÇOS INOXIDÁVEIS ESTABILIZADOS

Titânio e nióbio, conforme discutido anteriormente, são adicionados aos aços inoxidáveis austeníticos para eliminar a suscetibilidade a corrosão intergranular (causada pela precipitação de carbonetos de cromo), devido ao empobrecimento de cromo nas regiões adjacentes aos carbonetos. A razão para essa adição é que, tanto titânio como nióbio formam mais carbonetos estáveis do que o cromo. Esses elementos resistem à solubilização a temperaturas acima de 1038°C, prevenindo assim a precipitação dos nocivos carbonetos de cromo se o aço posteriormente for exposto à faixa de temperatura de sensitização, como pode ser o caso, por exemplo, durante um processo de soldagem.

Dois aços padronizados AISI, tipos 321 e 347, são estabilizados com titânio e nióbio, respectivamente. Outros aços austeníticos também podem ser estabilizados pela adição desses elementos. O teor de elementos estabilizantes está relacionado com o teor de carbono contido na liga, conforme demonstrado na tabela 3.7.

Tabela 3.7 - Teor de elementos estabilizantes [5].

$Ti \geq 4 \times C\%$
$Nb \geq 8 \times C\%$
$Ta \geq 16 \times C\%$

Tântalo normalmente não é utilizado sozinho, porém está presente em combinação com nióbio.

Além de ser usado como elemento estabilizante em aços inoxidáveis austeníticos, o nióbio também concede uma maior resistência em altas temperaturas.

Tabela 3.8 - Propriedades dos tipos 304 e 347 em Altas Temperatura [5].

<u>Tipo</u>	<u>Limite de Resistência,</u> ksi(MPa)		<u>Limite de Escoamento,</u> ksi(MPa)		<u>Tensão para Ruptura,</u> ksi(MPa), 1000h	
	650°C	815°C	650°C	815°C	650°C	815°C
304	45(310.3)	22(151.7)	16(110.3)	12(82.74)	15(103.4)	3.7(25.5)
347	52(358.8)	25(172.4)	20(137.9)	17(117.2)	22(151.7)	4.8(33.1)

A tabela 3.8 compara as propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis tipo 304 e 347 em temperaturas de 650 e 815°C. A maior resistência do tipo 347 é atribuída à presença do nióbio [5].

3.1.4 AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS DE GRAU "H"

Aços inoxidáveis utilizados para serviços em altas temperaturas foram desenvolvidos inicialmente visando mais as propriedades de resistência à corrosão do que propriamente a resistência ao calor, uma vez que a composição desses graus poderia não ser a ideal para questões como fluência e resistência a ruptura. Novos estudos foram realizados enfatizando essas propriedades.

No passado, programas de testes indicaram consideráveis dispersões nos comportamentos de vários graus dos inoxidáveis austeníticos, com relação a fluência e tensão de ruptura. Em particular, problemas encontrados em tubulações do tipo 321 utilizadas em fornos, levaram a pesquisas patrocinadas pela ASTM e ASME. Observações iniciais mostraram uma correlação entre altas taxas de deformação com um pequeno tamanho de grão. Pesquisas indicaram, todavia, que o tratamento térmico foi o fator mais importante do que o tamanho de grão resultante. Anteriormente algumas ligas entraram em serviço na condição estabilizada para reduzir problemas de sensitização, tais tratamentos reduzem a resistência à fluência. Um teor de carbono mínimo de 0,04% também foi considerado necessário para garantir maior resistência à ruptura por deformação.

Assim, uma modificação chamada grau "H" foi aplicada a maioria dos aços inoxidáveis da série 300, em todas as formas de produto. Esses graus têm o teor de carbono controlado entre 0,04% e 0,10% e são aplicados na condição solubilizada [5].

3.1.5 APLICAÇÃO

Com o passar dos anos os aços inoxidáveis tem se estabelecido firmemente como materiais para diversas aplicações como utensílios domésticos, cutelaria, arquitetura, indústrias petroquímica, petroleira, farmacêutica, transporte além de equipamentos para plantas alimentícias, papel e celulose, têxtil, etc.

Algumas dessas aplicações envolvem a exposição a temperaturas elevadas ou criogênicas. Os aços inoxidáveis são adequados para qualquer um dos tipos de serviço.

Aplicações que utilizam os benefícios da capacidade de resistência ao calor dos aços inoxidáveis austeníticos incluem fornos, trocadores de calor, linhas de vapor, sistemas de exaustão, turbinas e peças similares onde requerido resistência mecânica e a oxidação. O Tipo 304 tem boa resistência à corrosão atmosférica e oxidação. Os tipos 309 e 310 são os melhores para essas propriedades devido ao seu alto teor de cromo e níquel, esses tipos são usados para partes tais como paredes de fornos, defletores de caldeiras, termopares, etc. O tipo 310 é eficiente em situações de aquecimento e resfriamento intermitentes. Devido a corrosão intergranular, os tipos 321 e 347 podem ser usados onde um tratamento de solubilização após a soldagem for impraticável, como em linhas de vapor, tubulação de fornos e sistemas de exaustão que operem em temperaturas de 425 a 870 °C. Os graus com baixo teor de carbono, tipo 304L e 316L podem ser usados para aplicações similares, porem são mais suscetíveis à corrosão intergranular durante longa exposição a elevadas temperaturas. O aço inoxidável tipo 316 possui melhores propriedades mecânicas do que o 304 e 321 e é mais resistente à corrosão em certos meios como, ácidos graxos em elevadas temperaturas e soluções suaves de ácido sulfúrico [3].

3.2 PROCESSOS DE SOLDAGEM

Os processos mais utilizados para a soldagem de aços inoxidáveis são Eletrodo Revestido, TIG e MIG, embora outros processos também possam ser usados. O processo Eletrodo Revestido é muito versátil, podendo ser utilizado em diversas situações, tanto na fabricação como na montagem de campo. O processo TIG normalmente é utilizado para a soldagem de peças com menor espessura, ou onde um bom acabamento da solda é requerido. Ao contrário do TIG, o processo MIG é usado em maiores espessuras, sendo um processo de maior produtividade. Nos últimos anos tem-se aumentado a utilização do processo Arame Tubular para a soldagem de aços inoxidáveis [4].

3.2.1 ELETRODO REVESTIDO

Esse é um processo manual onde um arco é formado entre o eletrodo, que é um eletrodo consumível coberto por um fluxo(revestimento), e a peça a ser soldada. A poça de fusão é protegida da oxidação atmosférica por um gás protetor oriundo da queima do revestimento do eletrodo, bem como por uma camada de escória fundida, fornecida pela decomposição do revestimento durante a fusão. Um desenho esquemático desse processo pode ser visto na figura 3.7 [5].

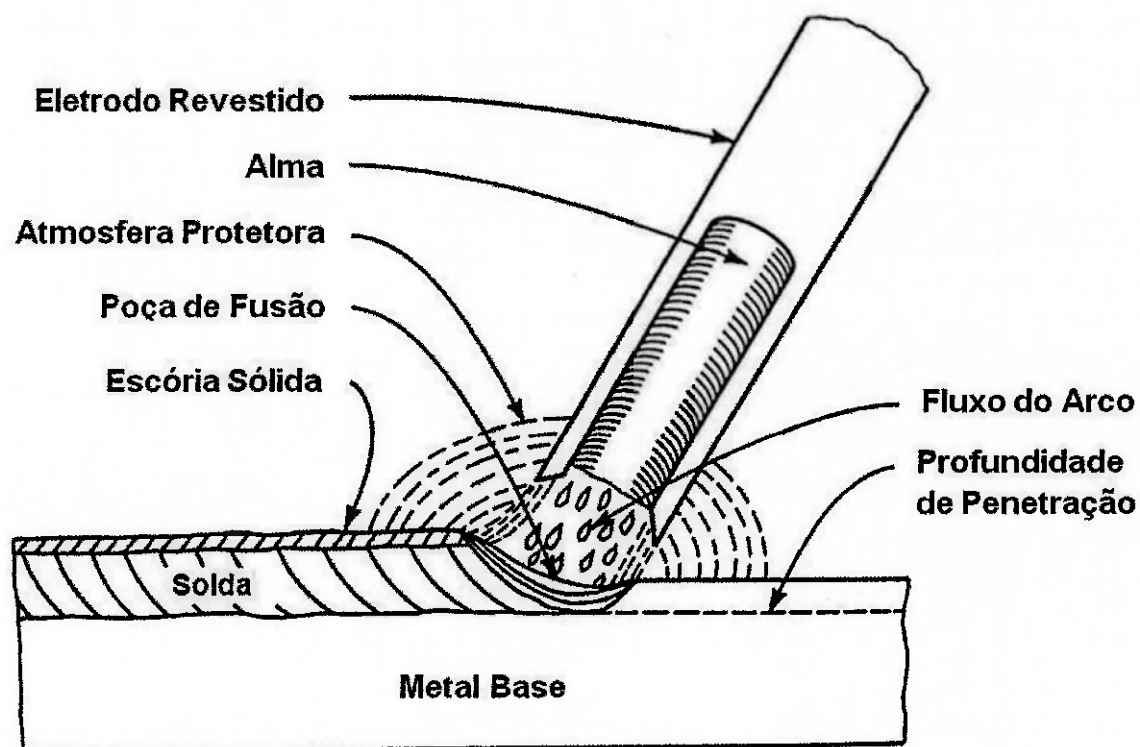


Figura 3.7 - Esquema do Processo de Soldagem por Eletrodo Revestido [5].

Eletrodo revestido é o mais versátil e amplamente usado de todos os processos de soldagem. Pode ser usado em praticamente qualquer posição e qualquer tipo de junta, entretanto, existem algumas desvantagens, por exemplo, requer maior habilidade para se produzir um cordão de solda sem defeitos se comparado a processos com proteção gasosa externa. Dificuldade para visualizar o cordão durante a soldagem devido à camada de escória. A escória gerada pelo processo pode ser uma fonte de inclusões. Deve ser feita a remoção de escória entre passes.

A soldagem de aços inoxidáveis martensíticos por esse processo é semelhante a soldagem de aço carbono, podendo ser requerido preaquecimento ou tratamento térmico adequando após a soldagem para prevenir trincas.

Os aços austeníticos tem um coeficiente de expansão maior que os martensíticos e ferríticos, e por essa razão tem uma maior tendência a distorção e deformação. Aços inoxidáveis austeníticos são soldados na condição solubilizada e tanto pré como pós-aquecimento não são comumente utilizados [5].

3.2.2 TIG

TIG é um processo de soldagem que ser feito de forma manual ou automatizada. Nesse processo o calor é fornecido através de um arco elétrico gerado entre a peça e um eletrodo não consumível. Metal de adição pode, ou não, ser utilizado, dependendo da configuração da junta. A proteção contra oxidação é provida por um fluxo de gás inerte ou mistura de gases. O processo TIG não utiliza fluxos para a proteção da poça de fusão (como é o caso do processo por eletrodo revestido), portanto o gás escolhido deve evitar a contaminação, uma vez que, mesmo uma pequena quantia de ar poderá contaminar a solda. Um desenho esquemático desse processo pode ser visto na figura 3.8.

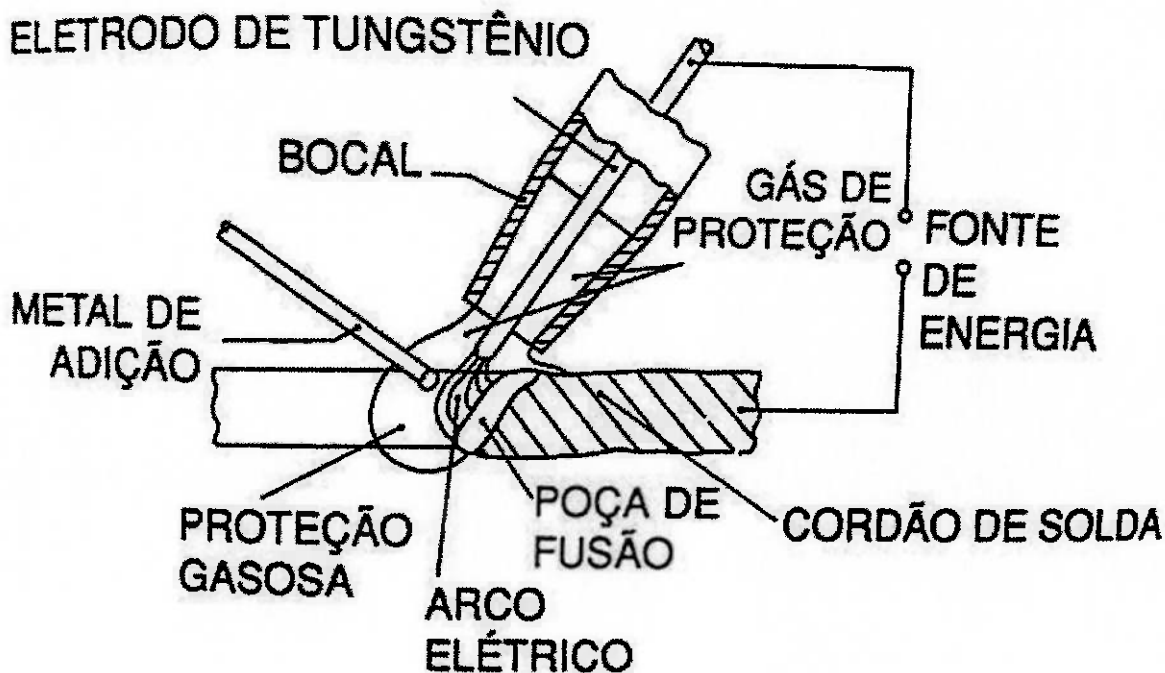


Figura 3.8 - Visão Esquemática do Processo TIG [9].

O processo TIG pode ser utilizado em todas as posições de soldagem. É muito eficiente na soldagem de seções finas, por causa do calor concentrado do arco. Normalmente não é utilizado para soldar grandes espessuras, devido a sua relativamente baixa velocidade de soldagem. Todavia, quando o produto soldado demanda limpeza extrema ou trabalhos de alta qualidade solicitada (como em programas aeroespaciais) esse processo é utilizado.

Os gases utilizados para a proteção são argônio e hélio, ou uma combinação dos dois. Os mesmos gases são utilizados para purga interna em soldagem de tubulações. A seleção dos gases depende de alguns fatores, o argônio, por exemplo, geralmente é preferido pelas seguintes razões, fornece melhor proteção com uma menor vazão. Produz baixo impacto devido ao calor, adequado para soldagem de seções finas. Possibilita uma maior estabilização do arco. Disponibilidade abundante para fornecimento.

O hélio eleva a tensão do arco, gerando um maior impacto devido ao calor e maior penetração, podendo ser utilizado com eficiência na soldagem de seções mais espessas.

Mateis de adição em diversas composições químicas para soldagem dos aços inoxidáveis, são designados pela *American Welding Society* (AWS), na especificação A5.9. Na seleção de consumíveis itens como, composição química, bem como a difusão dos elementos de liga do metal de adição para a ZAC e para o metal de base, devem ser levados em consideração [5].

3.3 SOLDABILIDADE DOS AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS

A maioria dos aços inoxidáveis apresentam boa soldabilidade e podem ser soldados por diversos processos, incluindo os processos a arco, resistência, laser, feixe de elétrons, soldagem por fricção e brasagem. Um dos requisitos em comum para todos esses processos é que, a superfícies da junta e o metal de adição devem estar limpos. O coeficiente térmico de expansão para os aços inoxidáveis austeníticos é aproximadamente 50% maior que dos aços carbono e isso deve ser considerado para minimizar possíveis distorções [10].

As diferenças de composição entre os tipos padronizados de aços inoxidáveis austeníticos afetam na soldabilidade e desempenho em serviço. Com exceção dos aços adicionados de enxofre ou selênio para melhorar a usinabilidade, os austeníticos são os tipos mais fáceis de soldar, produzindo assim juntas caracterizadas por um alto grau de tenacidade. Juntas podem ser facilmente produzidas se a composição e as propriedades físicas e mecânicas forem adequadas para o processo e condições de soldagem. Energia de soldagem, contaminação, precipitação de carbonetos, trincas e porosidade devem ser considerados antes, durante e após a soldagem [3].

3.3.1 ENERGIA DE SOLDAGEM

Elevados valores de energia de soldagem podem resultar em trincas na solda, perda de resistência à corrosão, deformação e alterações indesejadas nas propriedades mecânicas. A soldagem de aços inoxidáveis normalmente requer de 20 a 30% menos energia do que em aços carbono, porque os aços inoxidáveis tem baixa condutividade térmica e elevada resistividade elétrica, concentrando o calor na região da solda, por esses motivos normalmente não é indicada a aplicação de preaquecimento na soldagem desses aços [3].

3.3.2 CONTAMINAÇÃO

Elementos contaminantes não só dificultam o sucesso da soldagem, mas também podem fazer com que uma solda não atinja um desempenho satisfatório em serviço. Uma solda contaminada possui propriedades mecânicas e resistência à corrosão inferiores, podendo falhar prematuramente [3].

3.3.3 TRINCAS A QUENTE

Trincas a quente são aquelas que ocorrem na região soldada antes do resfriamento do metal à temperatura ambiente, sua formação está relacionada à microestrutura do metal de solda solidificado, composição do metal de solda (especialmente o teor de certos elementos residuais), acúmulo de tensões devido à configuração da junta e à velocidade de resfriamento, ductilidade do metal de solda em altas temperaturas e presença de entalhes.

A suscetibilidade a trincas a quente pode ser evitada ou minimizada através de um controle adequado do teor de ferrita no metal de solda, pequenos acréscimos nos teores de elementos como carbono, nitrogênio ou manganês e um controle nos processos de fabricação visando minimizar o acúmulo de tensões residuais [3].

3.3.4 SELEÇÃO DE METAIS DE ADIÇÃO

A seleção de metais de adição para a soldagem de aços inoxidáveis austeníticos deve levar em consideração os constituintes microestruturais do metal de solda como depositado, estes, determinam as propriedades mecânicas, sensibilidade a trincas e resistência a corrosão da solda.

Os constituintes de principal preocupação são austenita, ferrita, e carbonetos precipitados. Eletrodos e varetas adequados para a utilização como metais de adição na soldagem de aços inoxidáveis austeníticos estão mostrados na tabela 3.9 [3].

Tabela 3.9 - Metais de Adição Sugeridos para Aços Inoxidáveis Austeníticos [3].

AISI No.	Recommended filler metal(a)		Remarks
	First choice	Second choice	
Chromium-nickel-manganese austenitic nonhardenable			
201	308	308L	Substitute for 301
202	308	308L	Substitute for 302
301	308	308L	
302	308	308L	
302B	308	309	High silicon
303	...	...	Free-machining stainless steel: welding not recommended—312
303Se	...	...	Free-machining stainless steel: welding not recommended—312
Chromium-nickel austenitic nonhardenable			
304	308	308L	
304L	308L	347	Extralow carbon
305	308	...	
308	308	...	
309	309	...	
309S	309	...	Low carbon
310	310	...	
310S	310	...	Low carbon
314	310	...	
316	316	309Cb	
316L	316L	309Cb	Extralow carbon
317	317	309Cb	
321	347	308L	
347	347	308L	Difficult to weld in heavy sections
348	347	...	

(a) Utilizam-se os prefixos E - para Eletrodos Revestidos e ER - para Varetas.

3.4 TRATAMENTOS TÉRMICOS

Aços inoxidáveis podem ser submetidos a vários tratamentos térmicos, dependendo do tipo e dos requisitos de cada aplicação. Esses tratamentos podem ser para solubilização, endurecimento, alívio de tensões, restaurar propriedades desejadas como a resistência à corrosão e a ductilidade de metais alterados pelas operações prévias de fabricação. Tratamentos térmicos são frequentemente realizados em atmosferas controladas para prevenir efeitos prejudiciais a superfície do material.

Todos os tipos de aços inoxidáveis podem ser solubilizados, características específicas determinam o processo a ser utilizado. Os tipos se diferenciam na temperatura de patamar requerido, taxa de aquecimento, tempo de tratamento, processo de resfriamento usado e taxa de resfriamento. O tratamento de solubilização para os tipos austeníticos, não apenas recristaliza os grãos e diminui a dureza do metal, mas também solubiliza os carbonetos de cromo na austenita. As temperaturas devem exceder uma faixa intermediária para evitar a sensitização devido a precipitação de carbonetos nos contornos de grão. Temperaturas de solubilização usualmente são acima de 1040 °C, entretanto algumas ligas podem ser solubilizadas com um controle da temperatura próximo a 1010 °C, quando for importante à obtenção de um fino tamanho de grão. Na solubilização dos aços inoxidáveis austeníticos, inclusive para os tipos estabilizados e de baixo carbono, o metal deve ser resfriado rapidamente para evitar a sensitização [12].

Algumas vezes um tratamento de estabilização é realizado após o tratamento convencional de solubilização para os tipos 321, 347 e 348. A maior parte do teor de carbono é combinada com o titânio no tipo 321 ou com o nióbio nos tipos 347 e 348 quando esses tipos são solubilizados de uma maneira convencional. Um reaquecimento adicional de aproximadamente 900 °C, de duas a quatro horas seguido de um rápido resfriamento, possibilita a precipitação de todo carbono em carboneto de titânio ou carboneto de nióbio, prevenindo posteriormente a precipitação de carbonetos de cromo [12].

A figura 3.9 mostra uma curva esquemática das temperaturas de precipitação e início de dissolução dos carbonetos de cromo e carbonetos de nióbio para aços inoxidáveis austeníticos.

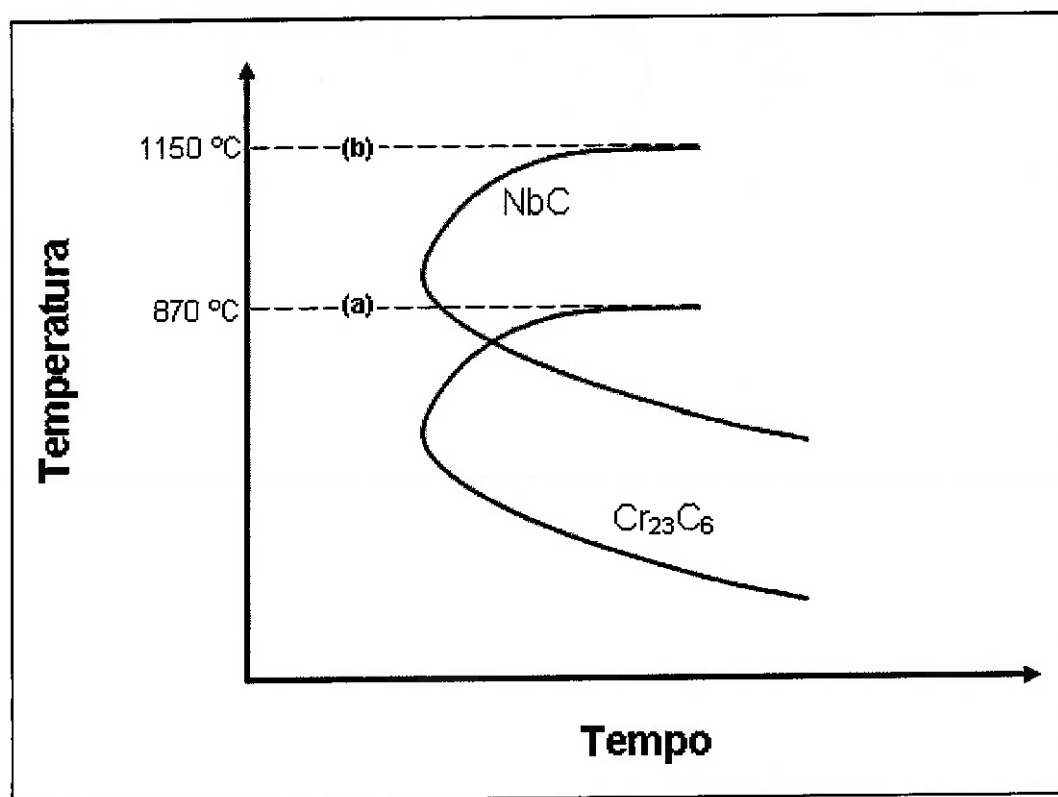


Figura 3.9 - Curvas de Formação dos Carbonetos de Cromo e Nióbio. As Temperaturas de Início de Dissolução são Representadas por (a) para Cr₂₃C₆ e (b) para NbC [Adaptado da referência bibliográfica número 11].

Esse tratamento protetor especial é útil quando as condições de serviço são altamente corrosivas, especialmente quando o serviço também envolve temperaturas de 400 a 870 °C aproximadamente.

Antes da solubilização ou qualquer outra operação de tratamento térmico para os aços inoxidáveis austeníticos ser realizada, o material deve ser limpo, removendo óleo, graxa e outros resíduos. Tais resíduos podem elevar o teor de carbono na superfície durante a realização do tratamento térmico, o que reduz a resistência à corrosão [12].

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATERIAIS

4.1.1 METAL BASE

Para esse experimento, foi utilizado um tubo sem costura da especificação ASTM A213 TP347H com as dimensões $\varnothing$ 168,28 x 1442 x 12,95mm, acabado a quente. Informações sobre a composição química, tratamentos térmicos e ensaio de tração de acordo com o certificado do material, podem ser verificadas nas tabelas 4.1, 4.2 e 4.3 respectivamente.

Tabela 4.1 - Composição Química do Metal de Base.

COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)								
C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Nb	Ta
0,042	1,36	0,330	0,028	0,0010	9,60	17,30	0,540	0,015

Tabela 4.2 - Informações Sobre os Tratamentos Térmicos Realizados.

TRATAMENTO TÉRMICO
Solubilizado - 1100 °C, Tempo de manutenção $\geq$ 1,5 min/mm, Resfriamento em água; Estabilizado - 900 °C a 920 °C por 1h.

Tabela 4.3 - Resultados do Ensaio de Tração no Metal de Base.

ENSAIO DE TRAÇÃO					
T (°C)	Rp0.2 (N/mm²)	Rp1.0 (N/mm²)	Rm (N/mm²)	A2" (%)	A5 (%)
20	271	303	522	56	49

4.1.2 CONSUMÍVEL DE SOLDAGEM

Foram utilizados como metais de adição, Eletrodo Revestido de especificação AWS A5.4, classificação E347-17, com diâmetro de 3,25mm e Vareta de especificação AWS A5.9, classificação ER347, com diâmetro de 2,40mm. A composição química de acordo com os certificados dos consumíveis pode ser verificada nas tabelas 4.4 e 4.5.

Tabela 4.4 - Composição Química do Eletrodo E347-17.

COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)									
C	Mn	Cr	Si	Mo	Ni	P	S	Cu	Nb
0,044	0,77	19,07	1,00	0,04	9,97	0,027	0,011	0,11	0,45

Tabela 4.5 - Composição Química da Vareta ER347.

COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)									
C	Mn	Cr	Si	Mo	Ni	P	S	Cu	Nb
0,043	1,41	19,15	0,36	0,080	9,56	0,018	0,009	0,060	0,59
Ti	N	Co	Al	B	V				
0,010	0,052	0,030	0,008	0,0009	0,050				

4.2 EQUIPAMENTOS

As fontes de energia utilizadas foram um retificador de soldagem de corrente contínua fabricante Bambozzi® para o processo por Eletrodo Revestido e um inversor do fabricante Lincoln Electric®, modelo Invertec V270-S para o processo TIG. Para a realização da medição da tensão e corrente de soldagem, foi utilizado um Alicata Amperímetro Digital Minipa®, modelo ET-3860 e para medição de temperatura foi utilizado um Termômetro digital sem contato (Infravermelho) Minipa®, modelo MT-350. Para a realização de medições dimensionais foram utilizados Paquímetro, Calibre de solda tipo Hi-Lo e Calibre de solda tipo FBTS.

4.3 SOLDAGEM

4.3.1 PROCEDIMENTOS UTILIZADOS

Os processos de soldagem escolhidos para esse experimento foram TIG para execução da raiz da junta, e o processo de soldagem por Eletrodo Revestido para enchimento e acabamento. Em ambos os processos foi utilizada corrente de soldagem do tipo contínua, com polaridade direta (CC-) para o processo TIG e polaridade inversa (CC+) para Eletrodo Revestido.

Para a preparação das juntas, o tubo foi cortado em seções de 155mm de comprimento através do processo de corte por serra de fita, sendo submetidas posteriormente a usinagem.

Após a usinagem as seções preparadas ficaram com as seguintes dimensões: 150mm de comprimento, bisel com ângulo de 35° e face de raiz igual a 1,0mm. As seções foram montadas aos pares e ponteadas com uma abertura de raiz de 5,0mm, concluindo assim a preparação dos corpos de prova (CP). Para esse experimento foram montadas três juntas. Um desenho esquemático da junta preparada pode ser verificado na figura 4.1.

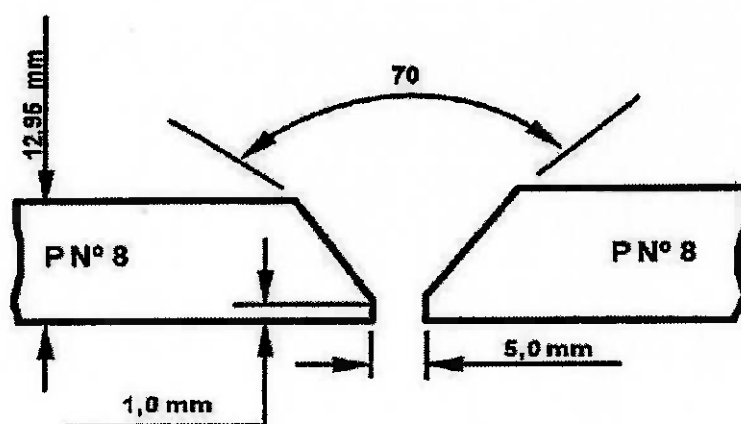


Figura 4.1 - Croqui da Junta Preparada.

Os CP's foram posicionados sobre roletes para facilitar a rotação (manual) durante a soldagem, mantendo a junta sempre na posição plana. Os CP's foram tamponados por meio de fita, e a mangueira de gás argônio foi acoplada para garantir a purga na raiz da solda. Após a medição da temperatura inicial da peça e ajustes dos parâmetros da máquina de solda, iniciou-se a soldagem. As figuras 4.2 e 4.3 mostram as etapas citadas anteriormente.

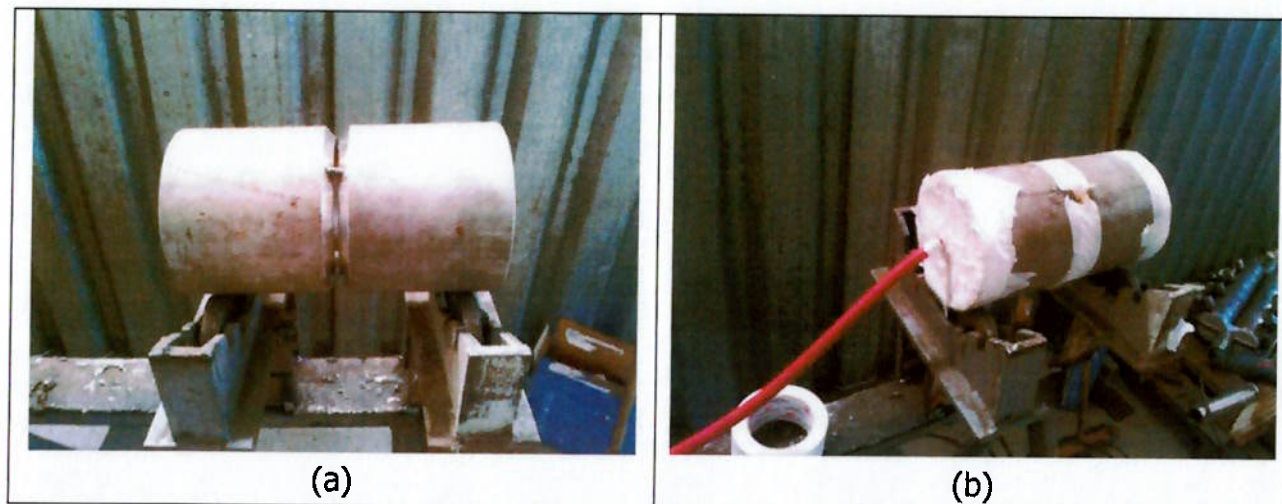


Figura 4.2 - (a) Junta Posicionada Sobre os Roletes. (b) Tamponamento e Acoplamento da Mangueira para a Purga.

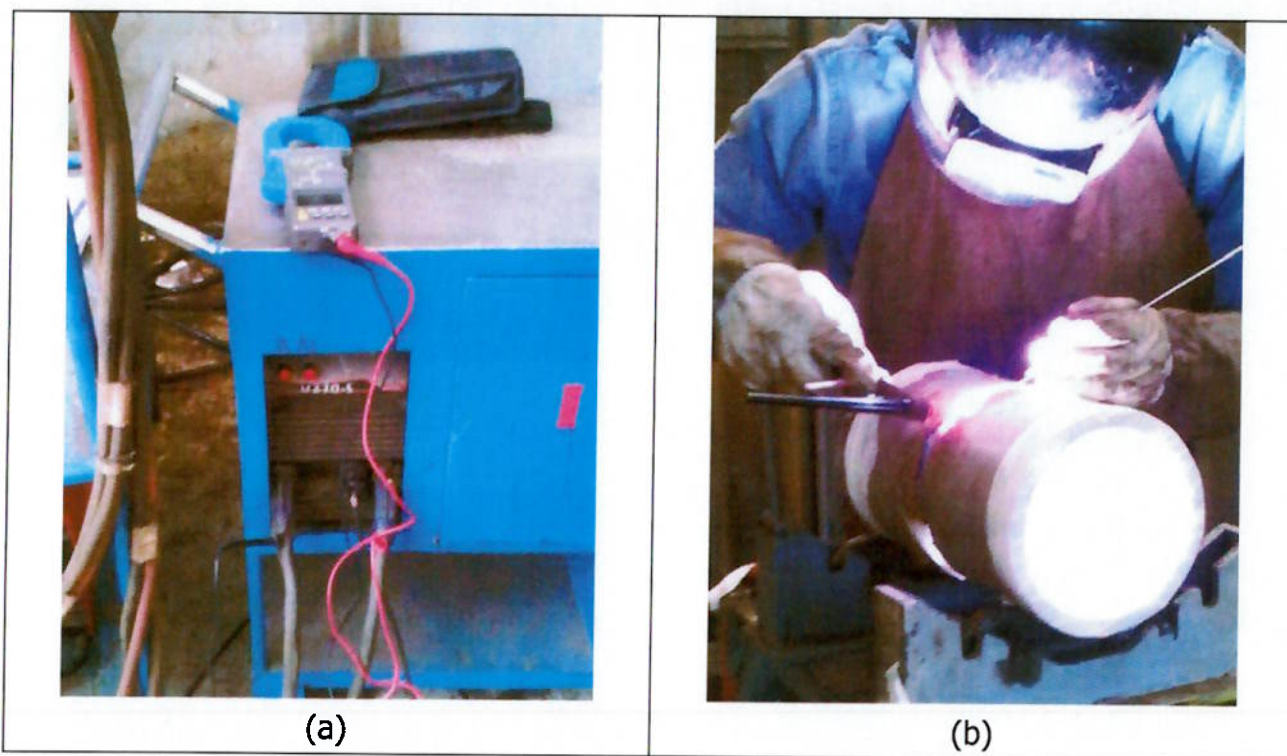


Figura 4.3 - (a) Ajuste e Medição dos Parâmetros na Máquina de Solda. (b) Execução da Raiz da Solda - TIG.

Durante a soldagem da raiz da junta foram monitorados os seguintes parâmetros: Velocidade de soldagem, Temperatura interpasse, Largura do passe, Tensão e Corrente de soldagem. Todos os parâmetros envolvidos na soldagem serão descritos no item 4.3.2 desse capítulo.

Após a conclusão da soldagem da raiz, foi feita a medição da espessura do metal depositado e posteriormente os três CP's foram submetidos aos ensaios não destrutivos (END) de Visual de Solda (VS) e Líquido Penetrante (LP).

Dando continuidade ao processo, os CP's foram afixados em uma mesa giratória (mecanizada), garantindo a manutenção da posição plana para os passes de enchimento e acabamento, conforme mostrado na figura 4.4.



Figura 4.4 - Mesa Giratória Utilizada nos Passes de Enchimento e Acabamento.

Após ser feita a regulagem dos parâmetros de soldagem na máquina de solda e a medição da temperatura da junta, iniciou-se a soldagem, agora pelo processo Eletrodo Revestido. Durante a soldagem foram monitorados os mesmos parâmetros citados anteriormente na execução da raiz. Após a conclusão da soldagem, os CP's foram submetidos aos ensaios não destrutivos (END) de Visual de Solda (VS) e Líquido Penetrante (LP).

É importante ressaltar que a limpeza das juntas ao longo de todo o processo de soldagem foi realizada com escova e esmerilhadeira apropriadas para a aplicação em aços inoxidáveis.

Após o laudo dos END's, dois CP's foram submetidos a um tratamento térmico e posteriormente os três CP's foram encaminhados para a realização de uma série de ensaios em uma empresa especializada, conforme descrito nos itens 4.4 e 4.5.

Cada CP recebeu um código próprio para identificação, visando facilitar o controle das amostras. Os códigos identificadores adotados foram SemTT, 1HTT e 120HTT.

4.3.2 PARÂMETROS DE SOLDAGEM

Todos os parâmetros de soldagem que foram monitorados serão mostrados nos itens abaixo, respeitando a sequência na qual os CP's foram soldados.

4.3.2.1 PRIMEIRO CP SOLDADO - 120HTT

a) Temperatura do MB antes do início da soldagem: 31,5 °C.

b) Gás de proteção

1. Tipo: Argônio;
2. Composição: 99,99 %;
3. Vazão na tocha: 8 L/min;
4. Vazão na raiz (Purga): 10 L/min.

c) Eletrodo de Tungstênio (TIG): EW Th-2, Ø 3,2 mm

d) Parâmetros elétricos, velocidade de soldagem e a sequência de soldagem podem ser verificados na tabela 4.6 em conjunto com a figura 4.5.

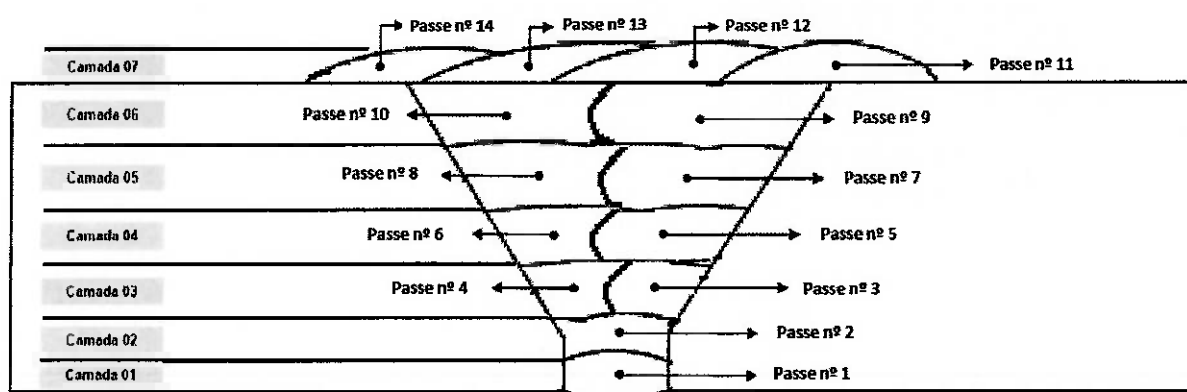


Figura 4.5 - Sequência de Passes e Camadas - 120HTT.

Tabela 4.6 - Parâmetros de Soldagem - 120HTT.

Passe N°	Camada N°	Consumível	$\varnothing$ (mm)	Tensão (V)	Corrente		Intensidade (A)	Velocidade (cm/min)	Energia de Soldagem Média (kJ/mm)
					Tipo	Polaridade			
1	1	ER 347	2,4	8,5 - 32,0	CC	Direta	79,0 - 111,0	1,55	7,4
2	2	ER 347	2,4	12,2 - 21,7	CC	Direta	155,0 - 175,0	5,68	3,0
3	3	E 347 - 17	3,25	26,4 - 35,0	CC	Inversa	84,0 - 120,0	23,76	0,8
4	3	E 347 - 17	3,25	26,0 - 39,1	CC	Inversa	123,0 - 148,0	23,76	1,1
5	4	E 347 - 17	3,25	25,0 - 33,4	CC	Inversa	123,5 - 150,6	23,76	1,0
6	4	E 347 - 17	3,25	26,8 - 33,0	CC	Inversa	128,0 - 144,7	23,76	1,0
7	5	E 347 - 17	3,25	28,6 - 38,0	CC	Inversa	120,0 - 145,6	23,76	1,1
8	5	E 347 - 17	3,25	24,8 - 37,1	CC	Inversa	96,6 - 151,0	23,76	1,0
9	6	E 347 - 17	3,25	25,5 - 34,4	CC	Inversa	130,1 - 152,0	23,76	1,1
10	6	E 347 - 17	3,25	25,1 - 35,3	CC	Inversa	127,2 - 147,7	23,76	1,0
11	7	E 347 - 17	3,25	27,9 - 34,7	CC	Inversa	136,8 - 158,0	23,76	1,2
12	7	E 347 - 17	3,25	24,8 - 31,3	CC	Inversa	139,3 - 162,8	23,76	1,1
13	7	E 347 - 17	3,25	26,3 - 36,7	CC	Inversa	139,1 - 160,1	23,76	1,2
14	7	E 347 - 17	3,25	28,8 - 37,4	CC	Inversa	137,3 - 155,8	23,76	1,2

e) Máxima temperatura interpasse: 150 °C (Temperatura verificada no centro e na margem da solda).

f) Espessura depositada: TIG - 7,0 mm; Eletrodo Revestido - 5,95 mm.

g) Altura do reforço da solda: 3 mm.

h) Largura do Passe: TIG - 10,1 mm; Eletrodo Revestido - 9,6 mm

4.3.2.2 SEGUNDO CP SOLDADO - SemTT

a) Temperatura do MB antes do início da soldagem: 31,5 °C.

b) Gás de proteção

1. Tipo: Argônio;
2. Composição: 99,99 %;
3. Vazão na tocha: 8 L/min;
4. Vazão na raiz(Purga): 10 L/min.

c) Eletrodo de Tungstênio (TIG): EW Th-2, Ø 3,2 mm.

d) Parâmetros elétricos, velocidade de soldagem e a sequência de soldagem podem ser verificados na tabela 4.7 em conjunto com a figura 4.6.

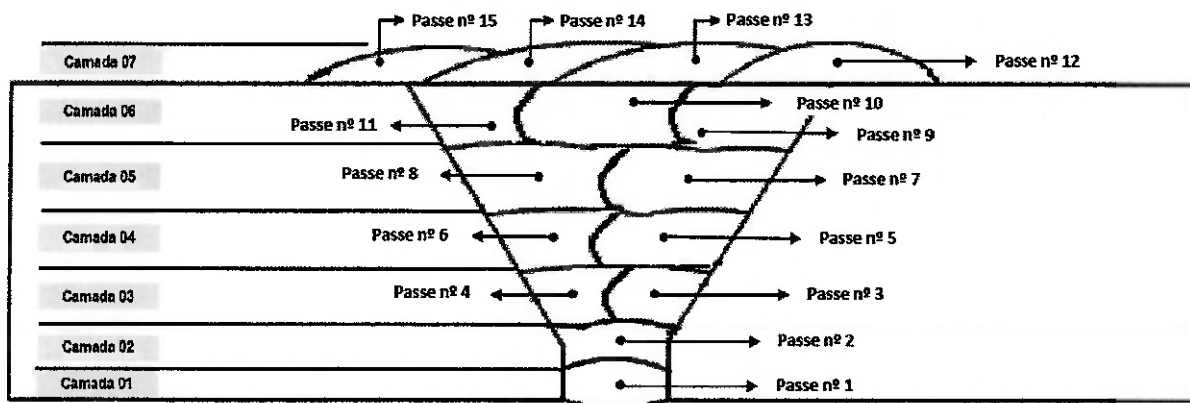


Figura 4.6 - Sequência de Passes e Camadas - SemTT.

Tabela 4.7 - Parâmetros de Soldagem - SemTT.

Passe Nº	Camada Nº	Consumível	Ø (mm)	Tensão (V)	Corrente		Intensidade (A)	Velocidade (cm/min)	Energia de Soldagem Média (kJ/mm)
					Tipo	Polaridade			
1	1	ER 347	2,4	11,9 - 20,6	CC	Direta	103,0 - 112,0	1,80	5,8
2	2	ER 347	2,4	13,1 - 24,5	CC	Direta	129,0 - 174,0	1,80	9,5
3	3	E 347 - 17	3,25	27,6 - 33,7	CC	Reversa	143,8 - 171,0	22,85	1,3
4	3	E 347 - 17	3,25	21,1 - 34,5	CC	Reversa	130,8 - 172,0	22,85	1,1
5	4	E 347 - 17	3,25	21,4 - 36,0	CC	Reversa	148,3 - 169,0	22,85	1,2
6	4	E 347 - 17	3,25	22,8 - 34,6	CC	Reversa	144,3 - 166,2	22,85	1,2
7	5	E 347 - 17	3,25	25,4 - 36,8	CC	Reversa	145,5 - 168,2	22,85	1,3
8	5	E 347 - 17	3,25	27,1 - 36,6	CC	Reversa	140,1 - 159,9	22,85	1,3
9	6	E 347 - 17	3,25	24,8 - 36,6	CC	Reversa	145,3 - 165,9	22,85	1,3
10	6	E 347 - 17	3,25	25,3 - 36,1	CC	Reversa	146,3 - 167,3	22,85	1,3
11	6	E 347 - 17	3,25	25,8 - 32,2	CC	Reversa	142,6 - 163,4	22,85	1,2
12	7	E 347 - 17	3,25	24,7 - 34,9	CC	Reversa	145,4 - 160,8	22,85	1,2
13	7	E 347 - 17	3,25	26,1 - 33,8	CC	Reversa	145,1 - 164,5	22,85	1,2
14	7	E 347 - 17	3,25	22,5 - 35,1	CC	Reversa	143,9 - 165,1	22,85	1,2
15	7	E 347 - 17	3,25	24,5 - 35,7	CC	Reversa	147,1 - 162,5	22,85	1,2

e) Máxima temperatura interpasse: 149 °C (Temperatura verificada no centro e na margem da solda).

f) Espessura depositada: TIG - 7,4 mm; Eletrodo Revestido - 5,55 mm.

g) Altura do reforço: 3 mm.

h) Largura do Passe: TIG - 9,6 mm; Eletrodo Revestido - 10,23 mm.

4.3.2.3 TERCEIRO CP SOLDADO - 1HTT

a) Temperatura do MB antes do início da soldagem: 24,5 °C.

b) Gás de proteção

1. Tipo: Argônio;
2. Composição: 99,99 %;
3. Vazão na tocha: 8 L/min;
4. Vazão na raiz(Purga): 15 L/min.

c) Eletrodo de Tungstênio (TIG): EW Th-2, Ø 3,2 mm.

d) Parâmetros elétricos, velocidade de soldagem e a sequência de soldagem podem ser verificados na tabela 4.8 em conjunto com a figura 4.7.

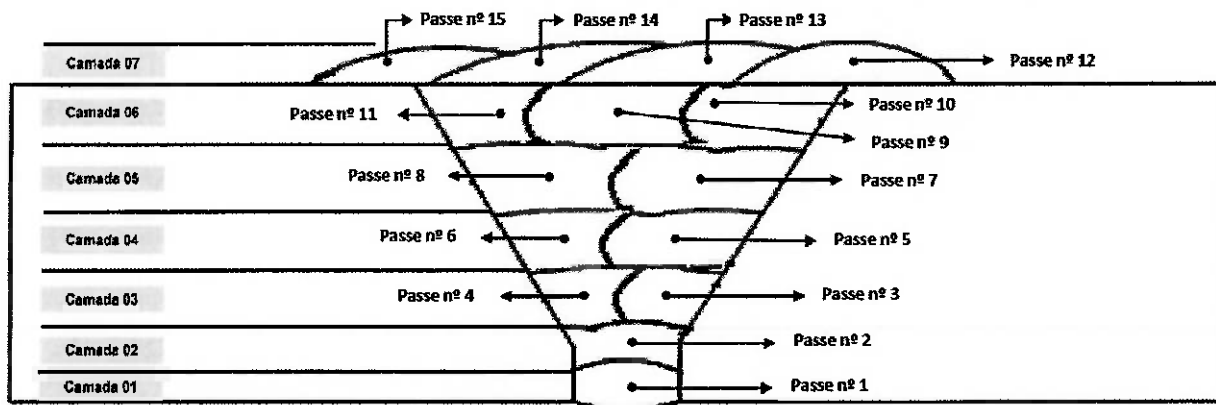


Figura 4.7 - Sequência de Passes e Camadas - 1HTT.

Tabela 4.8 - Parâmetros de Soldagem - 1HTT.

Passe Nº	Camada Nº	Consumível	Ø (mm)	Tensão (V)	Corrente		Intensidade (A)	Velocidade (cm/min)	Energia de Soldagem Média (kJ/mm)
					Tipo	Polaridade			
1	1	ER 347	2,4	11,8 - 22,1	CC	Direta	103,0 - 112,0	1,66	6,6
2	2	ER 347	2,4	13,8 - 22,6	CC	Direta	103,0 - 181,0	1,66	9,3
3	3	E 347 - 17	3,25	26,0 - 32,8	CC	Reversa	148,7 - 183,3	21,36	1,4
4	3	E 347 - 17	3,25	25,3 - 32,2	CC	Reversa	147,9 - 167,9	21,36	1,3
5	4	E 347 - 17	3,25	23,8 - 34,5	CC	Reversa	142,7 - 164,5	21,36	1,3
6	4	E 347 - 17	3,25	22,7 - 32,9	CC	Reversa	149,0 - 170,0	21,36	1,2
7	5	E 347 - 17	3,25	24,3 - 33,4	CC	Reversa	146,2 - 168,8	21,36	1,3
8	5	E 347 - 17	3,25	27,8 - 33,6	CC	Reversa	110,6 - 160,9	21,36	1,2
9	6	E 347 - 17	3,25	28,2 - 33,7	CC	Reversa	144,3 - 161,8	21,36	1,3
10	6	E 347 - 17	3,25	22,2 - 31,6	CC	Reversa	147,9 - 164,3	21,36	1,2
11	6	E 347 - 17	3,25	27,7 - 35,3	CC	Reversa	142,2 - 161,4	21,36	1,3
12	7	E 347 - 17	3,25	23,9 - 32,5	CC	Reversa	147,7 - 165,9	21,36	1,2
13	7	E 347 - 17	3,25	24,7 - 35,2	CC	Reversa	143,3 - 166,2	21,36	1,3
14	7	E 347 - 17	3,25	25,2 - 35,2	CC	Reversa	147,1 - 167,1	21,36	1,3
15	7	E 347 - 17	3,25	25,8 - 31,2	CC	Reversa	143,8 - 170,0	21,36	1,3

e) Máxima temperatura interpasse: 149 °C (Temperatura verificada no centro e na margem da solda).

f) Espessura depositada: TIG - 7,3 mm; Eletrodo Revestido – 5,65 mm.

g) Altura do reforço: 2,5 mm.

h) Largura do Passe: TIG - 10,3 mm; Eletrodo Revestido - 10,6 mm.

4.4 TRATAMENTO TÉRMICO

4.4.1 METODOLOGIA

Os CP's 1HTT e 120HTT foram submetidos a um tratamento térmico de estabilização, onde a temperatura de patamar variou em uma faixa de 893 a 924 °C, para tal foi utilizado um forno mufla do fabricante Brasimet operando com atmosfera inerte de nitrogênio. Para uma medição mais precisa das temperaturas durante o tratamento térmico, foi utilizado um termômetro digital, cuja haste do termopar foi inserida dentro do forno através de um orifício para respiro.

4.4.2 EXECUÇÃO

Os dois CP's foram colocados horizontalmente dentro do forno. O forno foi ligado e ajustado para uma temperatura de patamar de 910 °C, posteriormente foi liberado o fluxo de nitrogênio com uma vazão de 600 NI/h.

Aproximadamente uma hora após o forno ser ligado, atingiu-se a temperatura de 910 °C, iniciando o controle e a contagem de tempo para o tratamento térmico nos dois CP's.

Mesmo com o forno regulado para 910 °C a temperatura real, medida através no termômetro digital, continuou subindo até atingir a casa dos 920 °C, a temperatura regulada no forno foi então reduzida para 904 °C.

O termômetro digital registrou temperatura máxima de 924 °C, até reduzir e estabilizar em 904 °C. Uma hora após o início do controle do tratamento térmico, o CP 1HTT foi retirado do forno, e resfriado ao ar ambiente.

Após o fechamento do forno a temperatura baixou para a casa dos 893 °C. A temperatura regulada no forno foi elevada para 906 °C e a vazão de nitrogênio para 650 NI/h. A temperatura medida estabilizou na casa dos 913 °C.

Cento e vinte horas após o início do tratamento térmico o CP 120HTT foi retirado do forno e seu resfriamento foi feito ao ar ambiente. A figura 4.8 mostra o CP 120HTT momentos antes de ser retirado do forno.



Figura 4.8 - CP 120HTT Dentro do Forno.

4.5 ENSAIOS REALIZADOS

4.5.1 LÍQUIDO PENETRANTE

Para a realização do END por líquido penetrante na raiz da solda, a junta foi limpa por escovamento manual, e para a realização do ensaio após o acabamento, o metal de solda e uma área de 50 mm adjacentes em ambos os lados foi submetida à escovamento rotativo.

Para limpeza prévia das juntas foi utilizado o removedor E-59. Após os CP's estarem secos e isentos de resíduos foi aplicado o penetrante VP-30, com tempo de penetração de 15 min. A remoção do excesso de líquido penetrante foi feita por meio de pulverização de água, e a secagem feita com pano absorvente limpo. Após a secagem da junta, foi aplicado o revelador D-70. O tempo aguardado para atuação do revelador nos CP's foi de 10 a 20 min, após isso foi realizado o processo de avaliação. A avaliação e laudo final foram feitos sob iluminação natural.

Os materiais citados acima como, removedor E-59, penetrante VP-30 e Revelador D-70 são todos do fabricante Metal-Chek® e foram aplicados na forma de aerosol.

4.5.2 DOBRAMENTO LATERAL

Foram realizados para cada CP, quatro testes de dobramento lateral a 180°, utilizando cutelo de 38,1 mm e distância entre roletes de 60,4 mm.

A preparação das amostras foi realizada conforme ASME IX Ad. 2011a - QW-462.2, com dimensões de 10,0 x 12,95 x 200,0. O método de ensaio e o critério de avaliação também foram conforme ASME IX Ad. 2011a itens QW-162 e QW-163 respectivamente. Os ensaios foram realizados em uma máquina universal de ensaio Riehle® MTR-004, 30T, calibrada em 01/11/2012. A figura 4.9 mostra a realização do ensaio de dobramento.



Figura 4.9 - Realização do Ensaio de Dobramento.

4.5.3 TRAÇÃO

Para cada CP foram realizados dois ensaios de tração da seção transversal da solda. A preparação das amostras (seção reduzida) foi realizada conforme norma ASME IX Ad. 2011a - QW-462.1b.

As dimensões de cada amostra serão descritas no capítulo 5. O método de ensaio e o critério de avaliação também foram conforme ASME IX Ad. 2011a itens QW-152 e QW-153 respectivamente. Os ensaios foram realizados em laboratório com temperatura ambiente de 24 °C, através de uma máquina universal de ensaios Tinus Olsen® MTR-006, escala 60T, calibrada em 24/05/12, com uma incerteza de medição de $\pm 1\%$ do valor indicado. As figuras 4.10 e 4.11 mostram a preparação das amostras e a realização do ensaio de tração.



Figura 4.10 - Preparação das Amostras para o Ensaio de Tração.



Figura 4.11 - Realização do Ensaio de Tração.

4.5.4 TRAÇÃO A QUENTE

O ensaio de tração a quente foi realizado em quatro amostras por CP, sendo duas aplicadas ao metal de base e duas na seção transversal da solda. Utilizando como referência a temperatura máxima de operação de um forno de hidrotreatamento de diesel, com serpentinas de aço inoxidável tipo 347H, a temperatura escolhida para a realização do ensaio foi de 350 °C.

As amostras de forma cilíndrica com aproximadamente 6,00 mm de diâmetro, foram preparadas conforme norma ASTM E 8/2011. O método de ensaio utilizado foi conforme norma ASTM E 21/2009. Os ensaios foram realizados em laboratório com temperatura ambiente de 24 °C, através de uma máquina universal de ensaios Tinus Olsen® MTR-006, escala 60T, calibrada em 24/05/12, com uma incerteza de medição de $\pm 1\%$ do valor indicado. A figura 4.12 mostra a realização do ensaio de tração a quente.

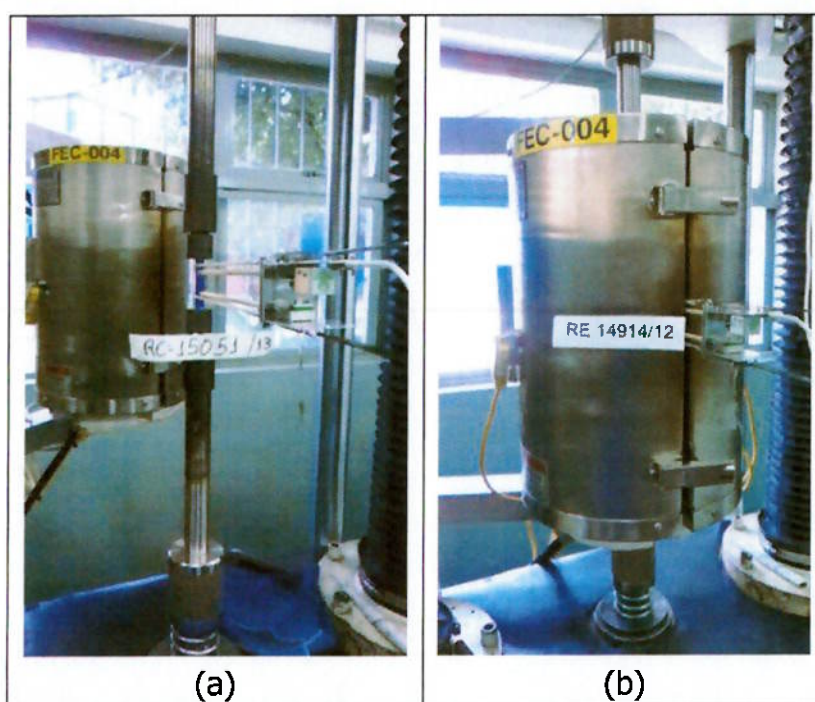


Figura 4.12 - (a) Posicionamento da Amostra. (b) Realização do Ensaio de Tração a Quente.

4.5.5 ANÁLISE QUÍMICA

Cada CP foi submetido a uma análise química na região do metal de solda. Foram utilizados dois métodos para essa análise, um através de aparelho espectrômetro de emissão ótica da marca ARL modelo 3460 conforme norma ASTM E1086-08, para a identificação da maior parte dos elementos, e outro através de técnicas de combustão por meio de aparelhos analisadores da marca LECO modelos CS-230 e TC-400 conforme norma ASTM E1019-08, para análise específica dos elementos carbono, enxofre, nitrogênio e oxigênio.

Foi realizada uma análise adicional via espectrômetro no metal de base, a fim de comparar a composição química obtida com a informada no certificado do material.

4.5.6 ENSAIO DE CORROSÃO INTERGRANULAR - PRÁTICA E

Foram realizadas duas amostras de teste de susceptibilidade a corrosão intergranular para cada CP, sendo uma aplicada à face e outra a raiz da solda. Os métodos de ensaio e critérios de avaliação foram conforme a norma ASTM A262-10 Prática E. As amostras foram preparadas com as dimensões 5 x 25 x 70mm. Os dobramentos foram realizados a 180°, utilizando cutelo de 20mm para o lado da raiz e cutelo de 12mm para o lado da face e a distância entre roletes de 33mm e 20mm, respectivamente.

4.4.7 MACROGRAFIA

Foi realizado um exame macrográfico para cada CP. A preparação da amostra e o método de ensaio foram feitos conforme norma ASME IX Ad. 2011a - QW-470/471, as dimensões das amostras serão descritas no capítulo 5. Foi realizado ataque com Nital 10% e a inspeção feita com lupa de 10x.

4.4.8 MICROGRAFIA

Para obter as micrografias das três situações aqui analisadas, foram utilizadas as amostras do ensaio macrográfico e se fez necessário a preparação das superfícies das mesmas.

Foram feitas seções (uma de cada condição) de aproximadamente 35x20 mm, e embutidas a quente com baquelite, após embutidas iniciou-se o processo de preparação da superfície para o polimento. A primeira etapa foi o lixamento, utilizando lixas diversas granulometrias, da menor para a maior. A sequência de lixas foi 180, 220, 320, 400, 600 e 1200 *mesh*. A segunda etapa consistiu no polimento, utilizando suspensões de diamante monocristalino; iniciou-se com um polimento mais grosseiro com suspensão de 9µm, depois um polimento intermediário com suspensão de 6 e 3 µm e, finalmente, o polimento final com suspensão de 1 µm. Com a superfície polida, as amostras foram submetidas a um ataque eletrolítico em solução aquosa com 10% de ácido "oxilálico" ($H_2C_2O_4 \cdot 2H_2O$). As condições deste ensaio foram as seguintes: foi utilizada uma tensão de 3 V durante 180 segundos. O equipamento utilizado neste ensaio foi o POLECTROL da STRUERS.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 ENSAIO POR LÍQUIDO PENETRANTE

O ensaio por líquido penetrante não apresentou nenhum defeito para os três CPs ensaiados tanto na face, quanto na raiz. Foi encontrada apenas uma marcação de abertura de arco na face do chanfro do CP 120HTT, quando ensaiada a raiz no mesmo, provavelmente causada por um descuido do soldador na realização de um dos passes da raiz. Foi solicitada a remoção da descontinuidade por esmerilhamento antes de dar continuidade à soldagem, nos passes de enchimento. A figura 5.1 mostra a realização do ensaio.



Figura 5.1 - Aplicação do Revelador Durante o Ensaio por Líquido Penetrante na Raiz dos CPs.

5.2 DOBRAMENTO LATERAL

Das doze amostras submetidas ao ensaio de dobramento lateral (quatro amostras para cada CP), apenas uma amostra do CP 1HTT apresentou uma abertura de 1,0 mm na linha de fusão. Essa descontinuidade ocorreu na região de interface entre os processos TIG e Eletrodo, conforme mostrado na figura 5.2, porem pela sua dimensão, não é considerada uma descontinuidade relevante.



Figura 5.2 - Descontinuidade em Amostra de Dobramento do 1HTT.

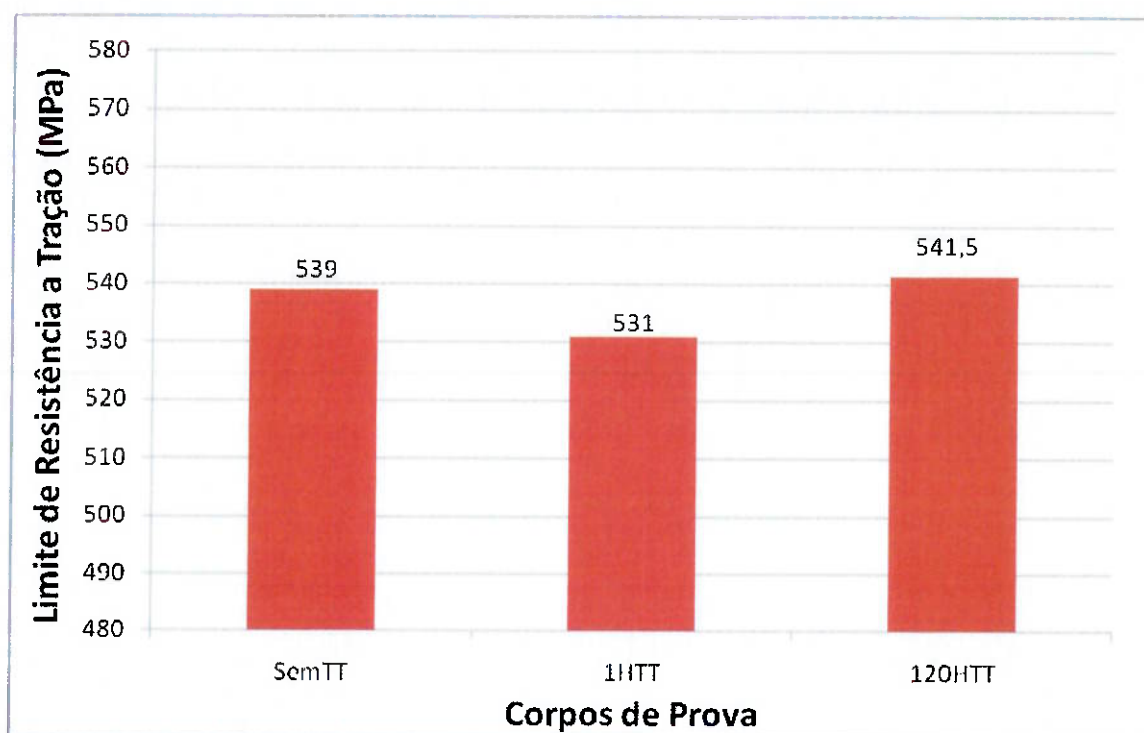
5.3 TRAÇÃO

O valor dos limites de resistência, resultados obtidos e as dimensões para cada amostra estão descritas abaixo na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Resultados do Ensaio de Tração.

CP	Amostra	Dimensões	Seção	Limite Resistência Tração		Resultados
		{mm}	{mm ² }	{Carga Kgf}	{MPa}	
SemTT	TP1	10,88 x 19,21	209	11528	541	Rompeu no Metal Base.
	TP2	11,05 x 19,23	212,49	11634	537	Rompeu no Metal Base.
1HTT	TP1	10,38 x 19,14	198,67	10814	534	Rompeu no Metal Base.
	TP2	10,55 x 19,32	203,83	10970	528	Rompeu no Metal Base.
120HTT	TP1	11,30 x 19,49	219,22	11470	513	Rompeu no Metal Base.
	TP2	11,22 x 19,52	219,01	12740	570	Rompeu no Metal Base.

A figura 5.3 mostra uma relação entre o valor médio do limite de resistência versus o tempo de tratamento térmico para cada CP. Verifica-se que não houve grande diferença entre os resultados, evidenciando a não influência do tratamento térmico no limite de resistência a tração para os CPs desse trabalho, quando ensaiados a temperatura ambiente.

**Figura 5.3** - Valor Médio do Limite de Resistência a Tração por CP.

Conforme mostrado na tabela 5.1, verificou-se uma grande dispersão entre os dois valores medidos para o limite de resistência a tração das amostras do CP 120HTT. Para tentar explicar tal dispersão, foram feitas análises de microscopia ótica no metal de base, conforme mostrado na figura 5.4, e microscopia eletrônica de varredura na região fraturada das amostras, conforme mostrado nas figuras 5.5, 5.6, 5.7 e 5.8.



Figura 5.4 - Imagem do Metal de Base do CP 120HTT com Aumento de 100X.

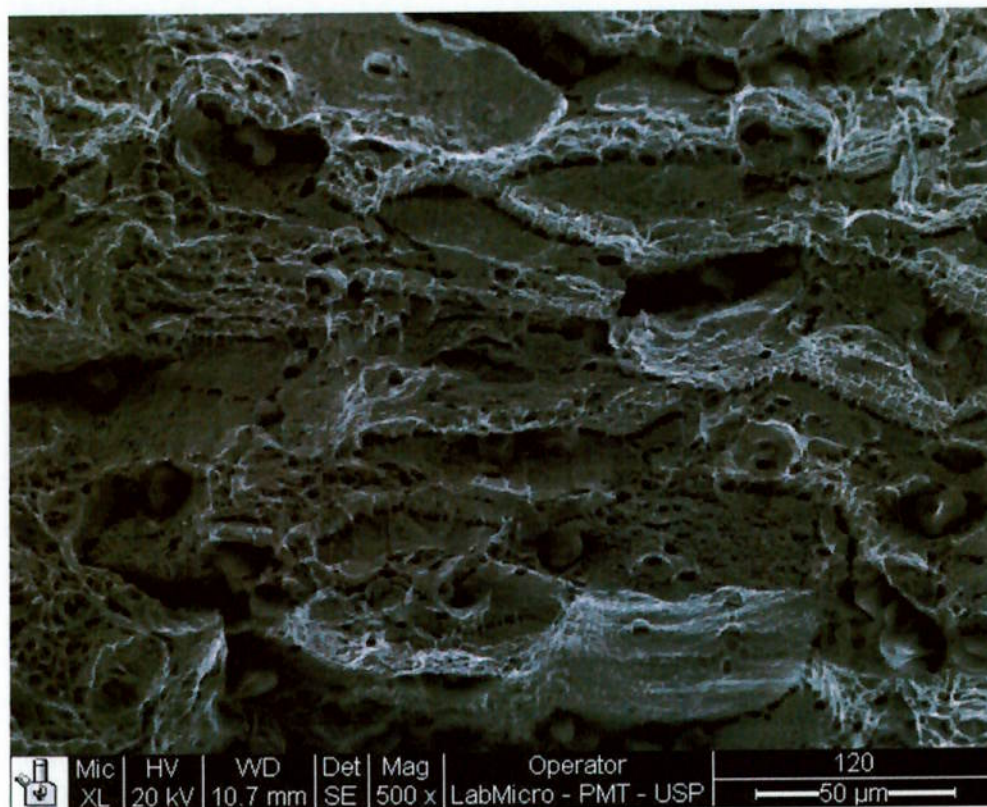


Figura 5.5 - Imagem da Superfície Fraturada com Aumento de 500X da Amostra TP-1 do CP 120HTT.

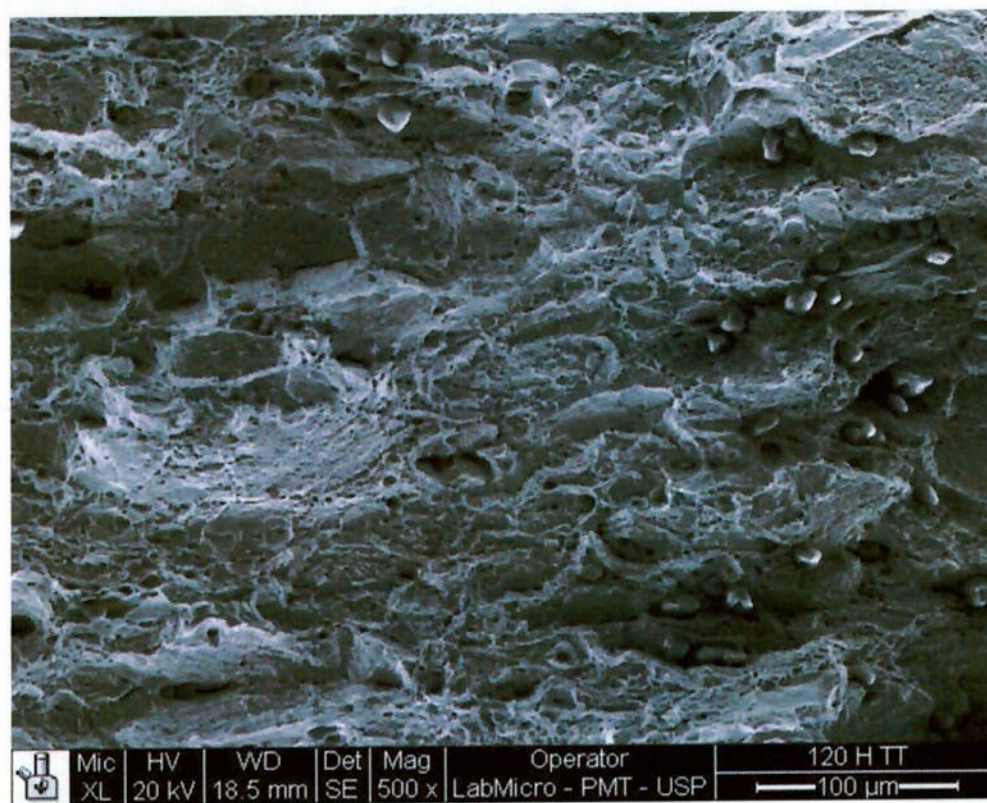


Figura 5.6 - Imagem da Superfície Fraturada com Aumento de 500X da Amostra TP-2 do CP 120HTT.

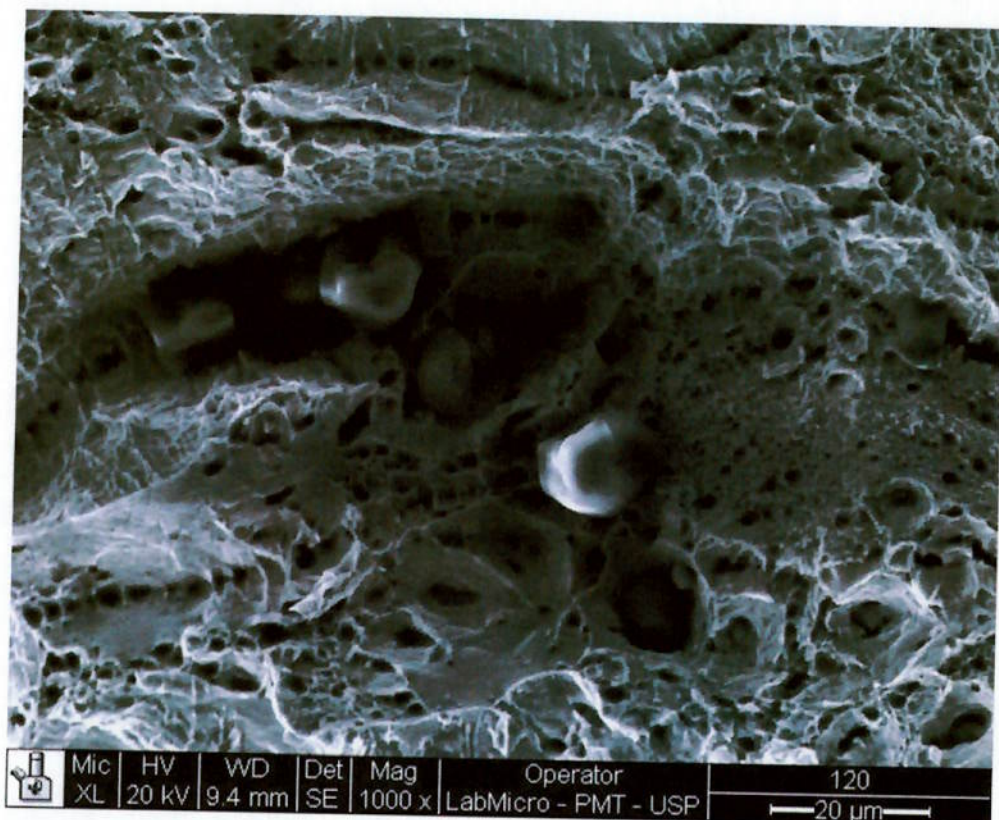


Figura 5.7 - Imagem da Superfície Fraturada com Aumento de 1000X da Amostra TP-1 do CP 120HTT.

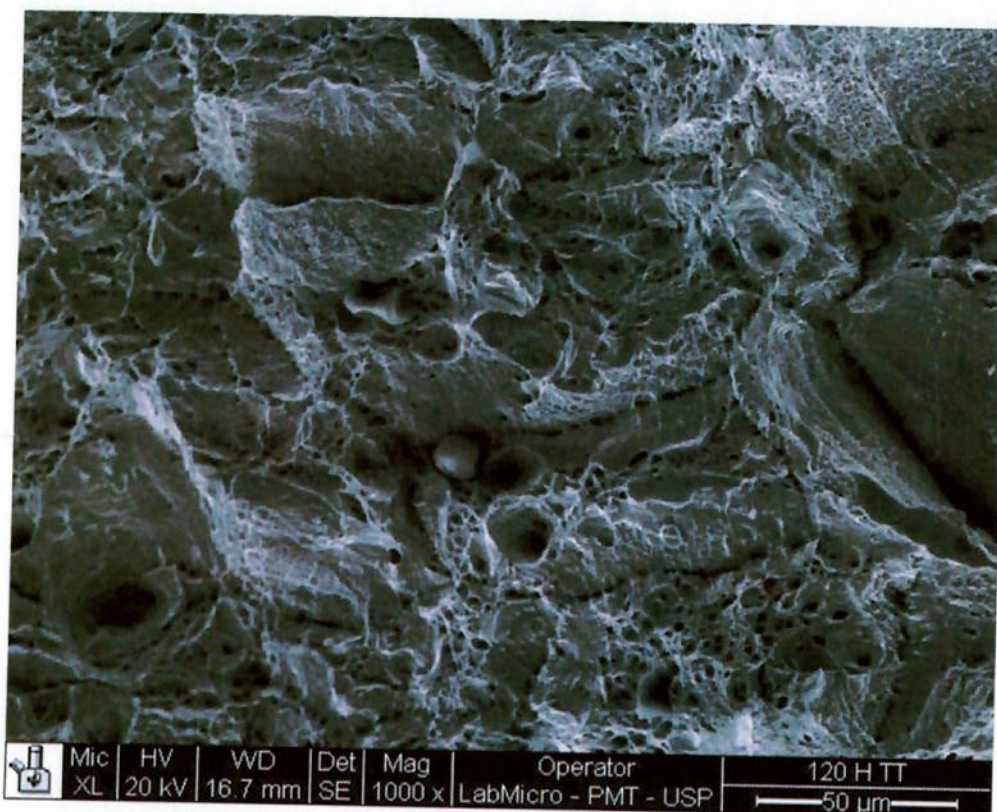


Figura 5.8 - Imagem da Superfície Fraturada com Aumento de 1000X da Amostra TP-2 do CP 120HTT.

A dispersão nos valores pode ser explicada pelo caminho livre médio de discordâncias de cada amostra. Conforme pode ser verificado nas imagens feitas pelo microscópio eletrônico de varredura (MEV), a amostra TP-1 apresenta menor número de precipitados e de tamanho maior, permitindo com que as discordâncias se movam com maior facilidade dentro do material, resultando em um menor nível de resistência. Já na amostra TP-2, pode ser verificado um maior número de precipitados finos, o que dificulta a movimentação das discordâncias pelo material, proporcionando maior dureza e maior resistência à tração. A diferença entre as amostras pode estar relacionada com o processo de fabricação do material e a região do tubo onde cada uma delas foi retirada.

5.4 TRAÇÃO A QUENTE

Os valores de limite de resistência, limite de escoamento (somente para o metal de base), alongamento e redução de área para cada amostra submetida ao ensaio de tração a 350 °C podem ser verificados na tabela 5.2, para as amostras do metal de solda (seção transversal) e tabela 5.3 para o metal de base.

Tabela 5.2 - Resultados dos Ensaios de Tração a Quente no Metal de Solda.

CP	Amostra	Dimensões	Seção	Limite Resistência Tração		Alongamento		Redução de Área
		{mm}	{mm ² }	{Carga Kgf}	{MPa}	{Lo mm}	{ % }	{ % }
SemTT	1	Ø 6,02	28,46	1076	371	24	22	77
	2	Ø 5,91	27,43	1034	370	24	23	75
1HTT	1	Ø 6,00	28,37	1052	365	24	24	74
	2	Ø 5,98	28,09	1026	358	24	26	78
120HTT	1	Ø 6,01	28,37	1015	352	24	35	82
	2	Ø 6,01	28,37	984	340	24	41	79

Tabela 5.3 - Resultados dos Ensaio de Tração a Quente no Metal de Base.

CP	Amostra	Dimensões	Seção	Limite Resistência Tração		Limite de Escoamento		Alongamento		Redução de Área
		{mm}	{mm ² }	{Carga Kgf}	{MPa}	{Carga Kgf}	{MPa}	{Lo mm}	{ % }	{ % }
SemTT	1	Ø 6,00	28,27	1019	354	602	209	24	37	79
	2	Ø 6,00	28,27	1007	349	631	219	24	35	79
1HTT	1	Ø 6,01	28,37	1039	359	605	209	24	38	74
	2	Ø 6,05	28,75	1043	356	606	207	24	38	78
120HTT	1	Ø 6,00	28,27	1012	351	677	235	24	42	84
	2	Ø 5,97	27,99	1004	352	627	220	24	44	75

Todas as amostras submetidas ao ensaio de tração na seção transversal da solda, conforme resultados da tabela 5.2, romperam no metal de base. A figura 5.9 exibe uma relação do limite de resistência à tração a quente para cada CP, diferenciando entre as amostras retiradas da seção transversal do metal de solda, mantendo o cordão na região central da amostra, e as retiradas apenas do metal de base. Os valores descritos no gráfico são a média feita para as duas amostras de cada CP.

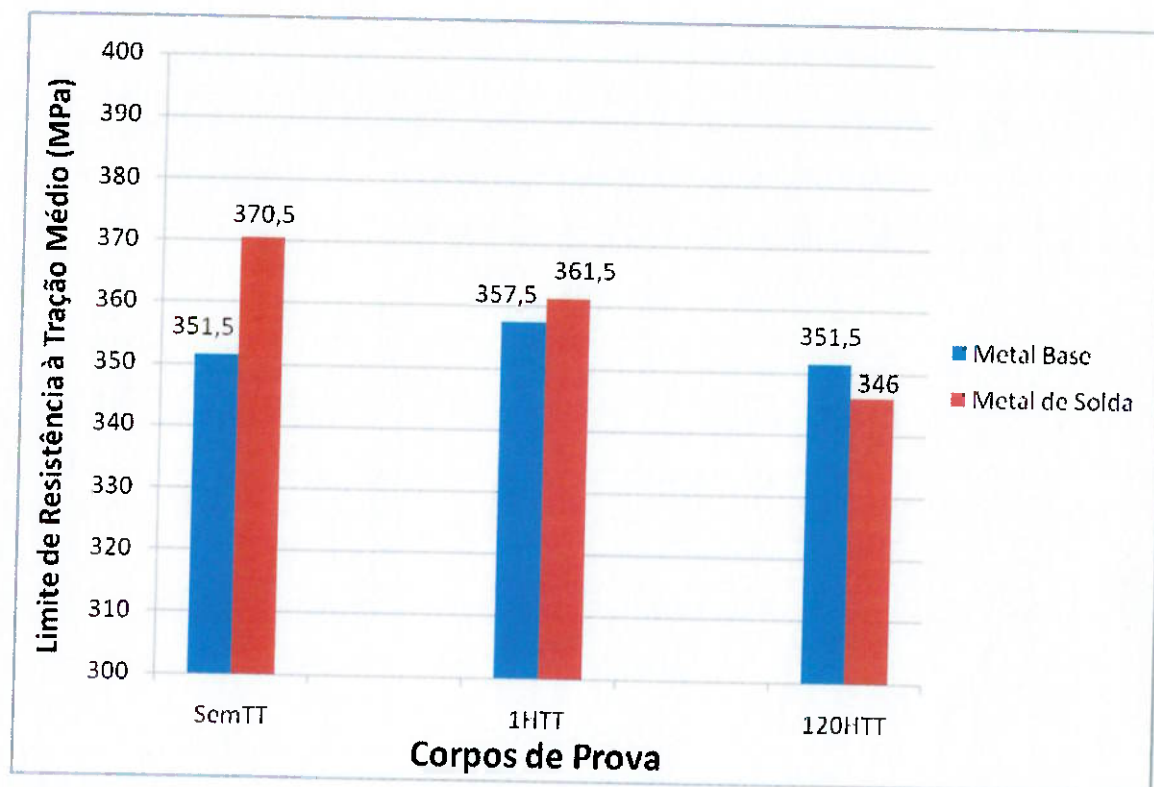


Figura 5.9 - Limite de Resistência à Tração Médio - Ensaiado a 350 °C.

Houve uma redução no limite de resistência para as amostras ensaiadas (350 °C) no metal de solda à medida que se aumentou o tempo de tratamento térmico. Essa redução é possivelmente explicada por uma relação da quantidade, tamanho e distribuição dos precipitados numa região próxima ao metal de solda. A medida que o tempo de tratamento térmico aumenta, o tamanho dos precipitados aumenta e a fração volumétrica diminui, com isso tem-se um ancoramento menos eficiente dos contornos de grão, reduzindo assim a resistência mecânica a quente do material.

Já para as amostras do metal de base, os valores dos limites de resistência se mantiveram equilibrados, com uma pequena elevação para o CP 1HTT.

A figura 5.10 exibe o valor médio do limite de escoamento do metal de base para cada CP ensaiado a 350 °C. Verifica-se que não houve grandes variações nos resultados do limite de escoamento, mesmo sendo submetidos a tempos de tratamentos térmicos diferentes.

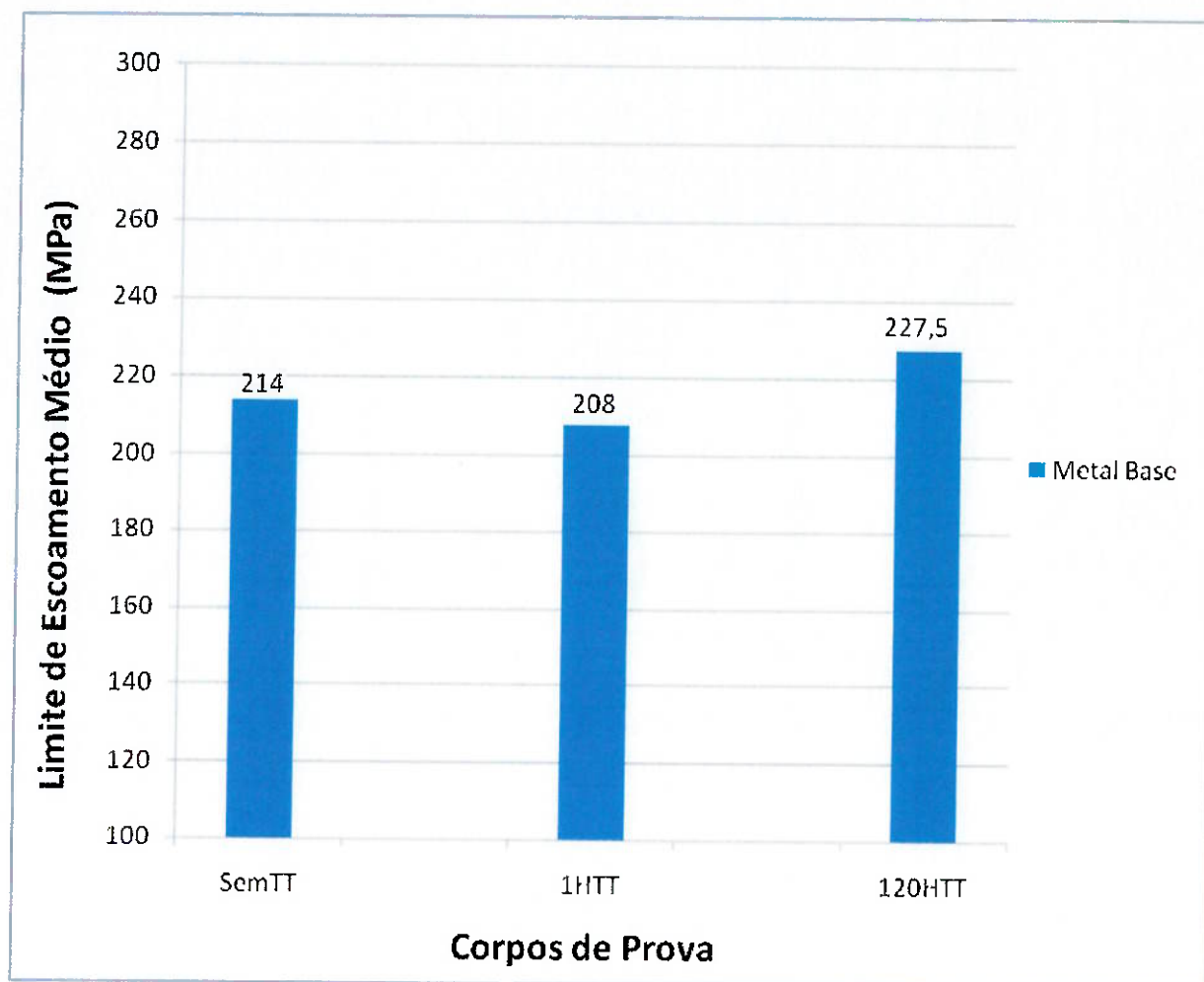


Figura 5.10 - Limite de Escoamento Médio do Metal Base - Ensaiado a 350 °C.

As figuras 5.11 e 5.12 mostram as porcentagens médias de alongamento e redução de área para as amostras do metal de solda (seção transversal) e para o metal de base respectivamente.

Para a redução de área não houve uma variação significativa entre os resultados dos CPs. Para o alongamento, houve uma tendência de aumento das porcentagens a medida que se aumentou o tempo de tratamento térmico, tendo assim, os maiores valores registrados para as amostras do CP 120HTT, provavelmente causado pelo crescimento de tamanho dos precipitados e dos grãos.

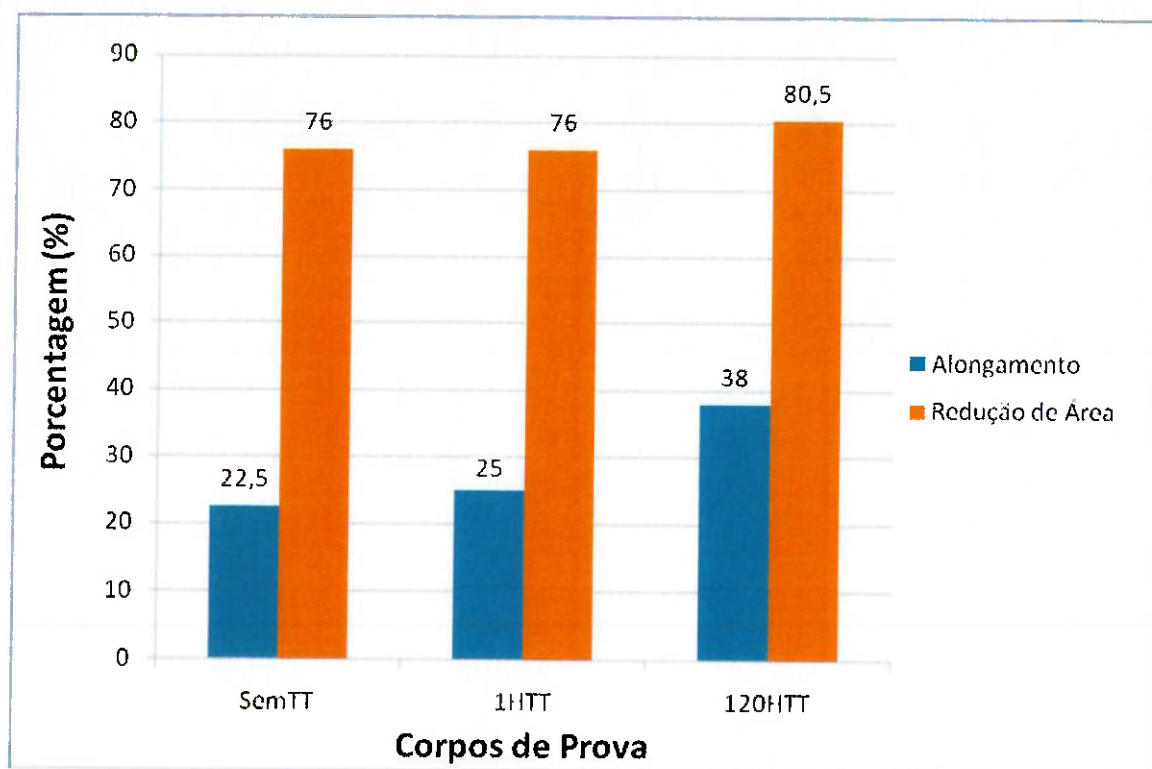


Figura 5.11 - Porcentagem Média de Alongamento e Redução de Área para as Amostras do Metal de Solda - Ensaiado a 350 °C.

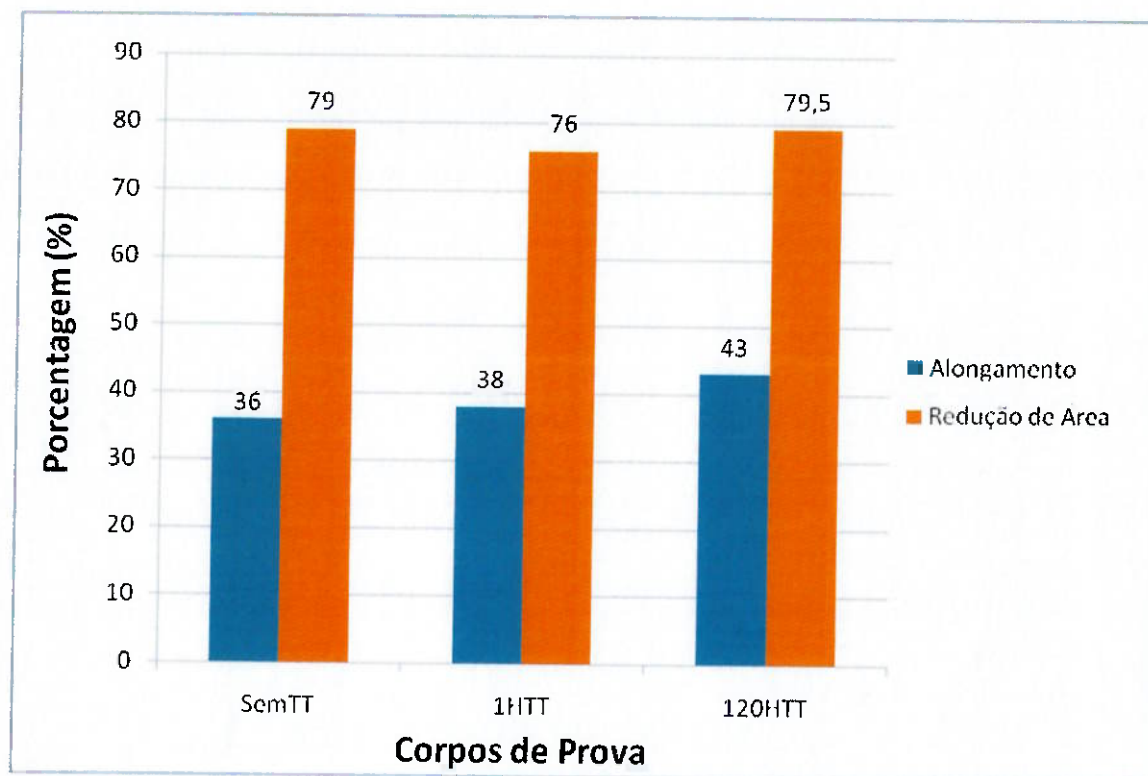


Figura 5.12 – Porcentagem Média de Alongamento e Redução de Área para as Amostras do Metal de Base - Ensaiado a 350 °C.

5.5 ANÁLISE QUÍMICA

As tabelas 5.4 e 5.5 mostram os resultados das análises de composição química realizados no metal de solda dos três CP's.

Tabela 5.4 - Análise Química Realizada via Combustão (LECO®) no Metal de Solda.

Composição Química - Via Combustão			
Elementos	Valores em %		
	SemTT	1HTT	120HTT
C	0,029	0,027	0,030
S	0,041	0,037	0,022
N	0,080	0,084	0,070
O	0,062	0,062	0,065

Tabela 5.5 - Análise Química Realizada via Espectrômetro no Metal de Solda.

Composição Química - Via Espectrômetro			
Elementos	Valores em %		
	SemTT	1HTT	120HTT
C	0,029	0,028	0,034
Mn	0,864	0,871	1,077
Si	1,059	1,101	0,762
P	0,039	0,031	0,032
S	0,041	0,037	0,022
Cr	19,058	19,078	18,189
Ni	9,574	9,633	9,736
Mo	0,077	0,071	0,183
Al	0,003	0,003	0,003
Cu	0,138	0,124	0,147
Ti	0,011	0,011	0,007
V	0,046	0,067	0,042
Nb	0,459	0,452	0,457

Devido a maior precisão das análises químicas realizadas nos métodos via combustão, os valores para os elementos carbono e enxofre serão adotados conforme descritos na tabela 5.4.

Observou-se que os teores de carbono medidos no metal de solda ficaram abaixo de 0,04%, que é considerado o limite inferior para os aços de grau "H". Esse baixo teor de carbono pode ter sido ocasionado por uma divergência na composição dos metais de adição, ou pela elevada tensão de soldagem a os passes de raiz foram submetidos.

A redução do carbono pode aumentar a resistência à corrosão, porém se o material fosse submetido a trabalho em altas temperaturas poderia não atingir os requisitos esperados com relação à resistência a fluência, que é a principal concepção dos aços inoxidáveis austeníticos de grau "H".

Verificou-se também uma redução do teor do elemento cromo para o CP 120HTT, provavelmente oriundo da precipitação de carbonetos de cromo ou fase sigma.

A tabela 5.6 mostra os resultados da análise química via espectrômetro realizada no metal base. Se comparados os resultados com a composição química do certificado do metal de base, representado na tabela 4.1, verificam-se diferenças nos teores dos elementos químicos, porém em ambos os casos a composição está dentro dos padrões delimitados pela especificação ASME Sec.II, Part A, SA-213 [13].

Tabela 5.6 - Análise Química Realizada via Espectrômetro no Metal de Base.

COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)									
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Cu
0,051	1,351	0,369	0,025	0,002	17,144	9,790	0,363	0,004	0,215
Ti	V	Nb	N	Ta	Fe				
0,002	0,050	0,513	0,059	0,006	69,94				

5.6 ENSAIO DE CORROSÃO INTERGRANULAR - PRÁTICA E

As figuras 5.13, 5.14 e 5.15 exibem as amostras após serem submetidas ao ataque químico e ao ensaio de dobramento.

Observa-se que nenhuma das amostras apresentou as trincas características da corrosão intergranular, sendo consideradas aprovadas no ensaio de prática E, comprovando a eficácia para esse quesito, dos parâmetros envolvidos na produção desses CPs.

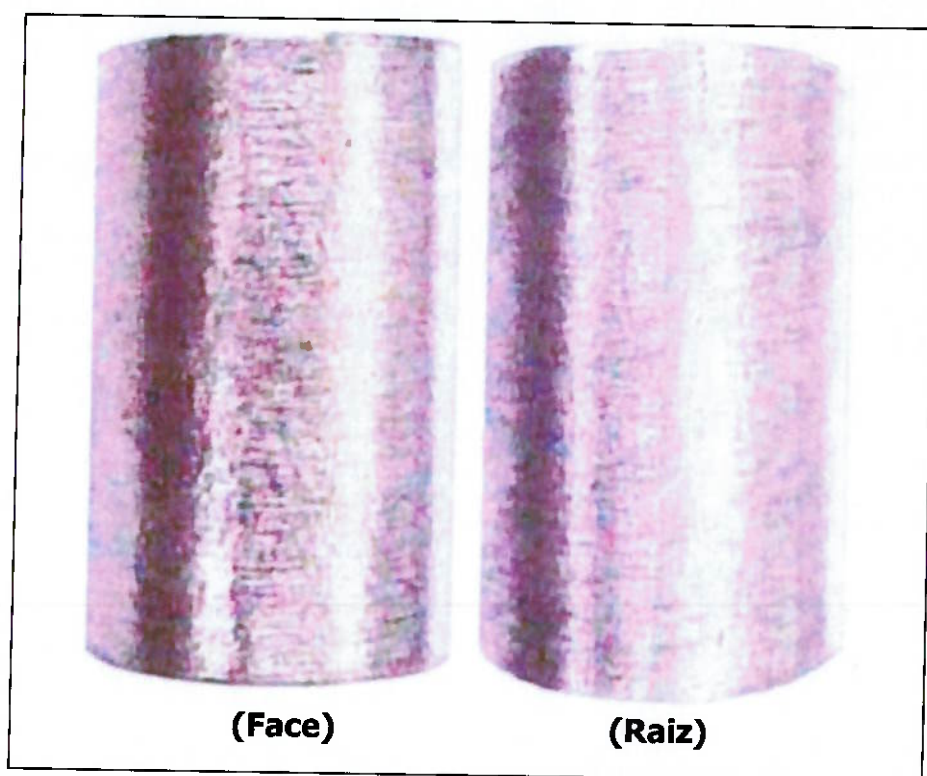


Figura 5.13 - Ensaio de Susceptibilidade a Corrosão Intergranular CP SemTT.

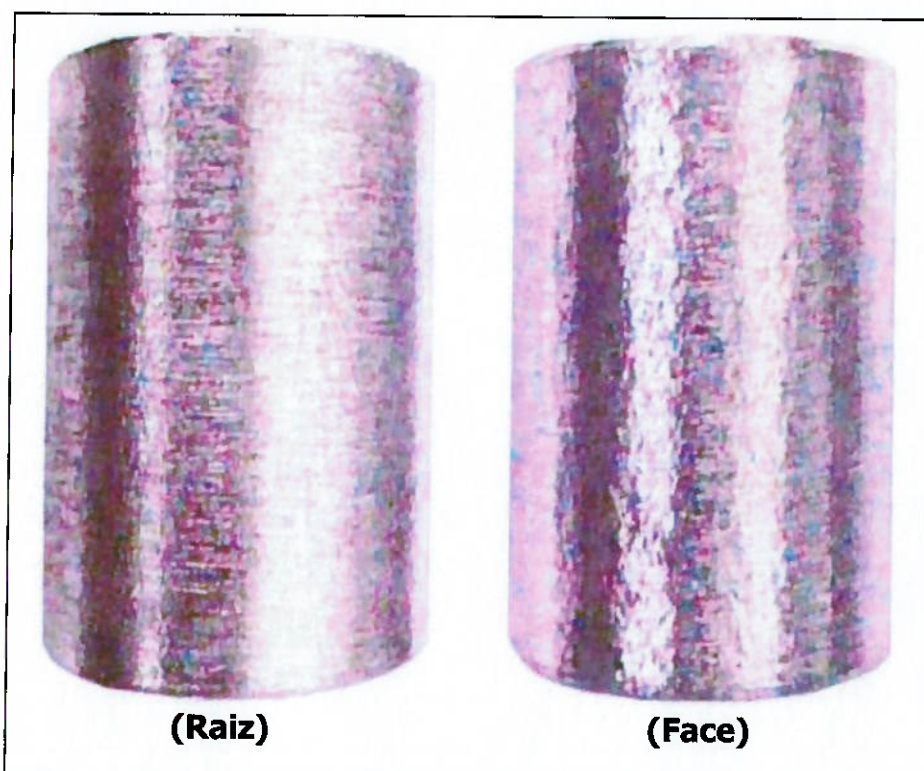


Figura 5.14 - Ensaio de Susceptibilidade a Corrosão Intergranular CP 1HTT.

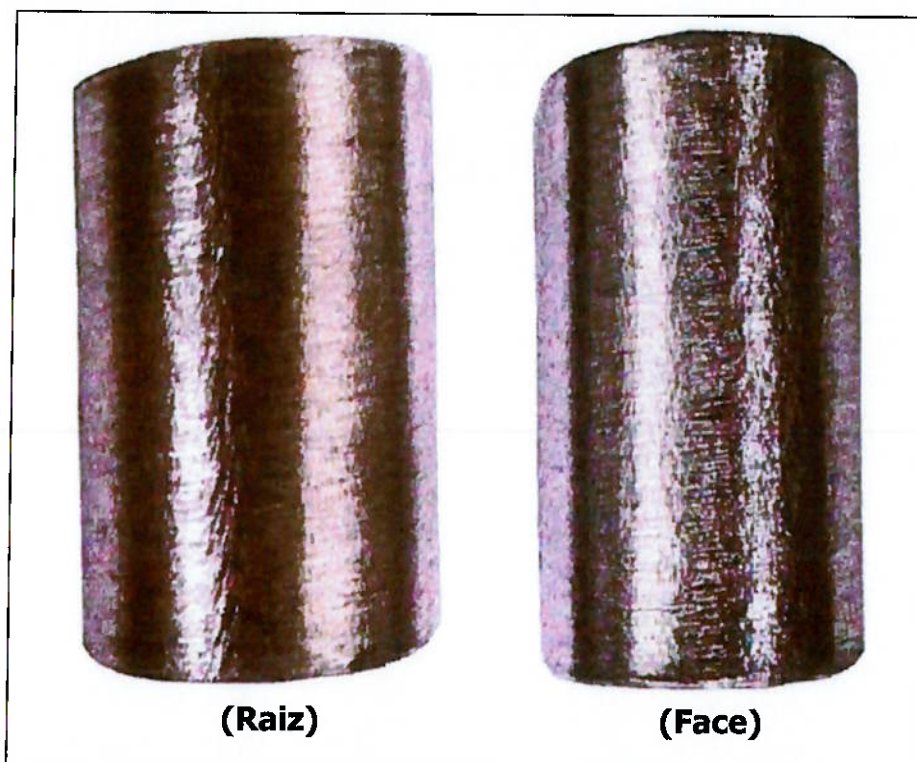


Figura 5.15 - Ensaio de Susceptibilidade a Corrosão Intergranular CP 120HTT.

5.7 RESULTADO DAS MACROGRAFIAS

A macrografia realizada no CP SemTT é apresentada na figura 5.16, onde é possível observar os cordões de solda realizados pelos processos TIG e Eletrodo Revestido. As dimensões da solda podem ser verificadas na tabela 5.7.

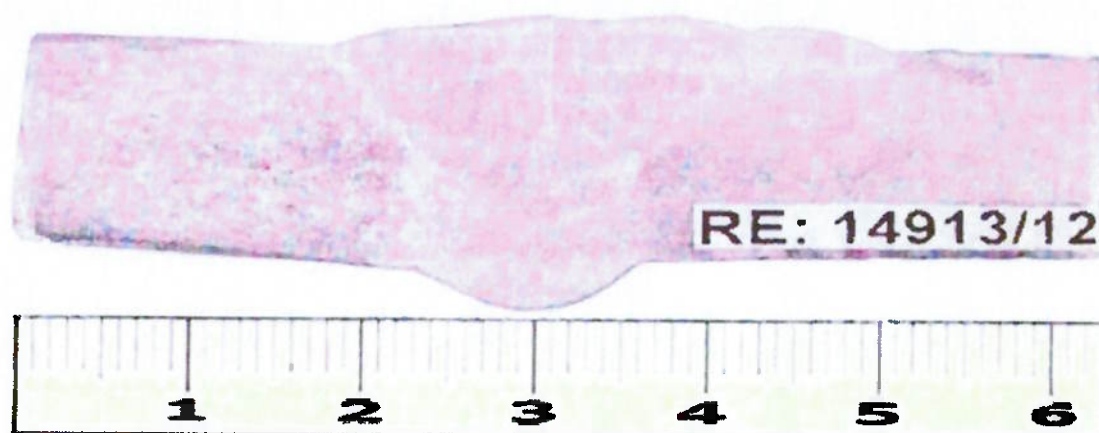


Figura 5.16 - Macrografia do CP SemTT.

Na figura 5.16 observa-se também uma ZAC bem definida para este CP, representada por uma faixa mais clara em uma região adjacente ao metal de solda.

A junta não apresentou defeitos no metal de base nem no metal de solda, comprovando a integridade dessa junção.

Tabela 5.7 - Dimensões da Solda Verificadas na Macrografia do CP SemTT.

Dimensionamento da Solda		
Lado	Largura (mm)	Reforço (mm)
Externo	28,0	2,0
Interno	11,0	3,0

A macrografia realizada para o CP 1HTT está apresentada na figura 5.17, e as dimensões da solda podem ser verificadas na tabela 5.8.

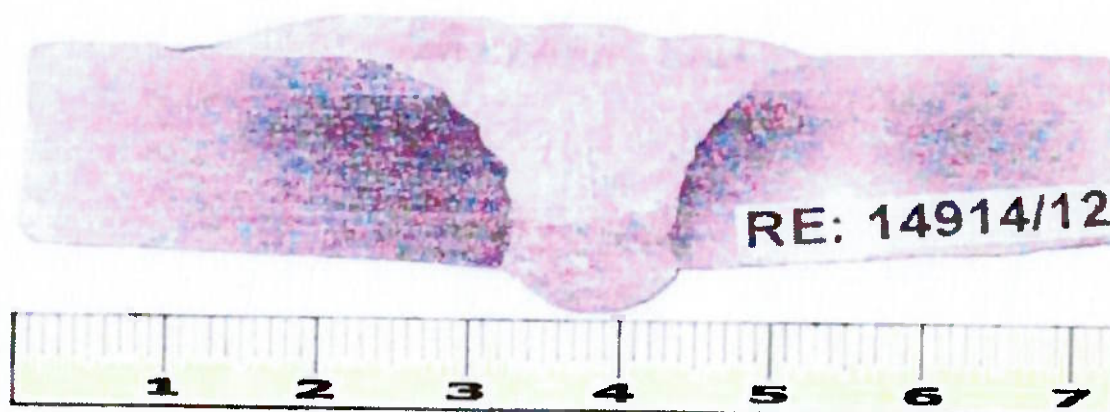


Figura 5.17 - Macrografia do CP 1HTT.

Diferentemente do caso anterior, na figura 5.17 não é possível verificar a ZAC. Devido à realização do tratamento térmico, todo o CP é aquecido de forma homogênea, uniformizando as microestruturas (distintas) do metal base e do metal de solda, a interface dessas partes é definida por uma linha escura.

A junta não apresentou defeitos no metal de base nem no metal de solda, comprovando a integridade dessa junção.

Tabela 5.8 - Dimensões da Solda Verificadas na Macrografia do CP 1HTT.

Dimensionamento da Solda		
Lado	Largura (mm)	Reforço (mm)
Externo	31,0	2,0
Interno	9,0	3,0

A macrografia realizada para o CP 120HTT está apresentada na figura 5.18, e as dimensões da solda podem ser verificadas na tabela 5.9.

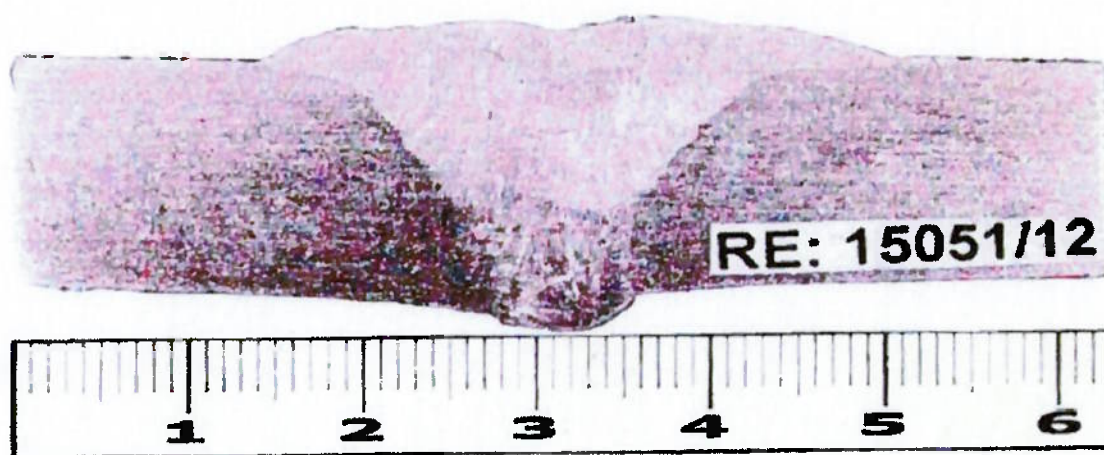


Figura 5.18 - Macrografia do CP 120HTT.

Na figura 5.18 não é possível observar uma ZAC, devido à realização do tratamento térmico. A transição microestrutural do metal de base para o metal de solda é mais suave se comparada com a figura 5.17. A interface das partes é definida por uma linha estreita.

A junta não apresentou defeitos no metal de base nem no metal de solda, comprovando a integridade dessa junção.

Tabela 5.9 - Dimensões da Solda Verificadas na Macrografia do CP 120HTT.

Dimensionamento da Solda		
Lado	Largura (mm)	Reforço (mm)
Externo	32,0	3,0
Interno	8,0	2,0

5.8 RESULTADO DAS MICROGRAFIAS

5.8.1 CORPO DE PROVA - SemTT

A figura 5.19 mostra a faixa superior da amostra, partindo do metal de solda até o metal de base. Um detalhe da ZAC dessa faixa com aumento de 200 vezes pode ser visto na figura 5.20.

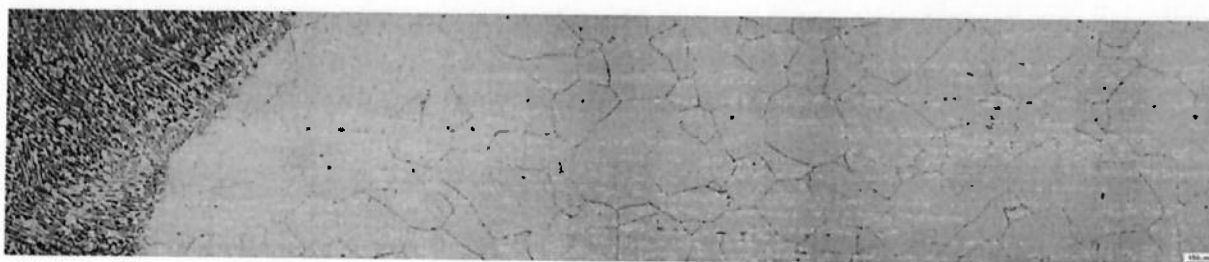


Figura 5.19 - Faixa Superior do CP SemTT com Aumento de 100X.

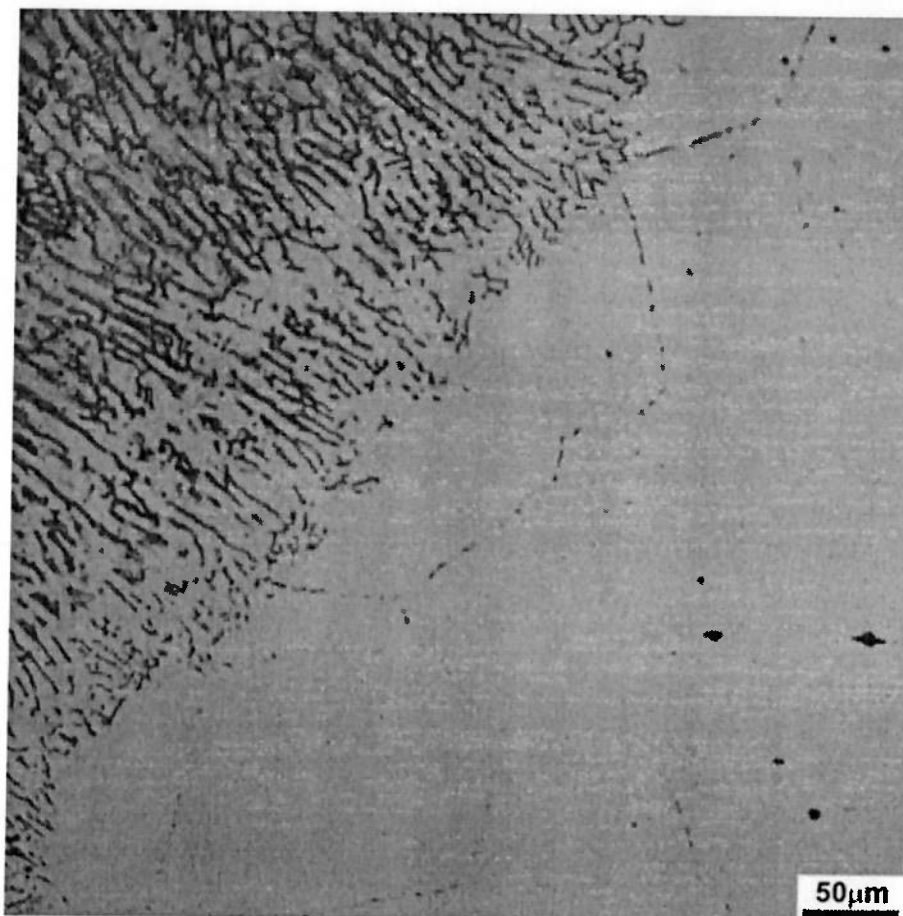


Figura 5.20 - Detalhe da ZAC da Faixa Superior do CP SemTT com aumento de 200X.

A figura 5.21 mostra a faixa inferior da amostra (raiz), partindo do metal de solda até o metal de base. Um detalhe da ZAC dessa faixa com aumento de 200 vezes pode ser visto na figura 5.22.

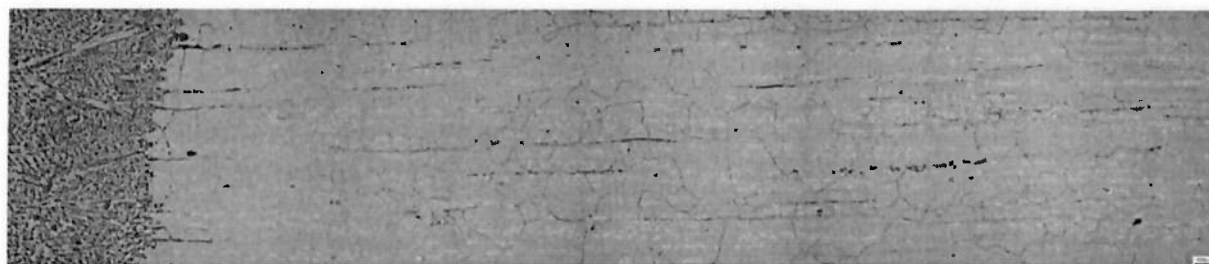


Figura 5.21 - Faixa Inferior do CP SemTT com Aumento de 100X.

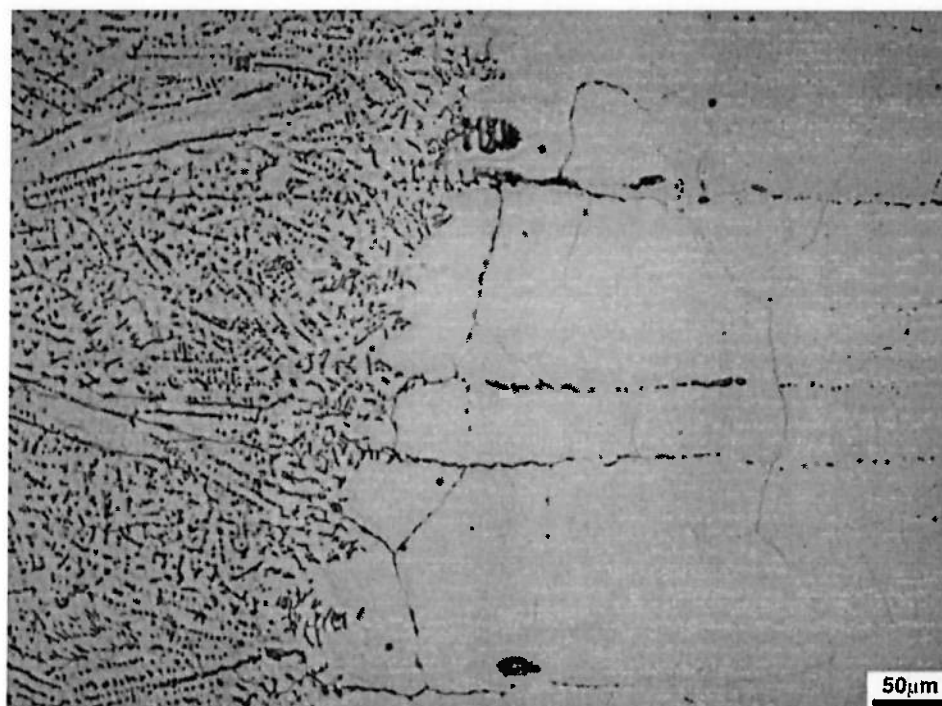


Figura 5.22 - Detalhe da ZAC da Faixa Inferior do CP SemTT com aumento de 200X.

A figura 5.23 mostra o metal de base do CP SemTT com um aumento de 50X e as figuras 5.24, 5.25 e 5.26 mostram a raiz, o meio e o topo do cordão de solda com um aumento de 200X.



Figura 5.23 - Metal de Base do CP SemTT com Aumento de 50X.

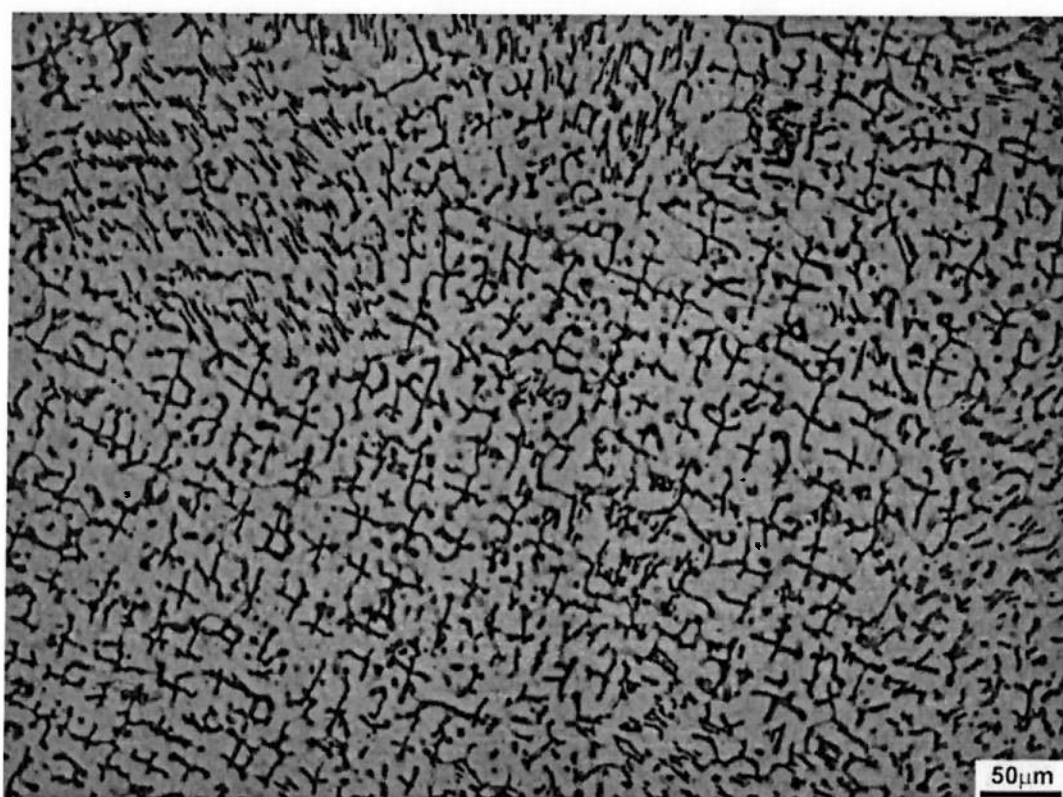


Figura 5.24 - Raiz do cordão de Solda do CP SemTT com aumento de 200X.

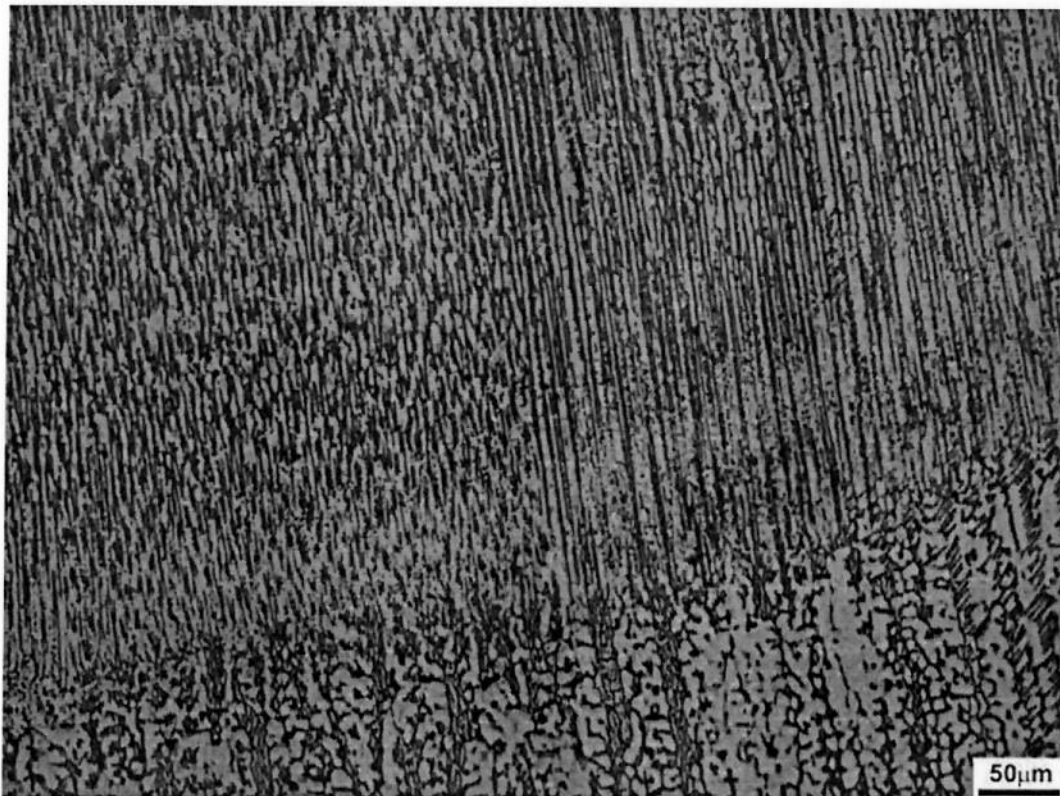


Figura 5.25 - Meio do cordão de Solda do CP SemTT com aumento de 200X.

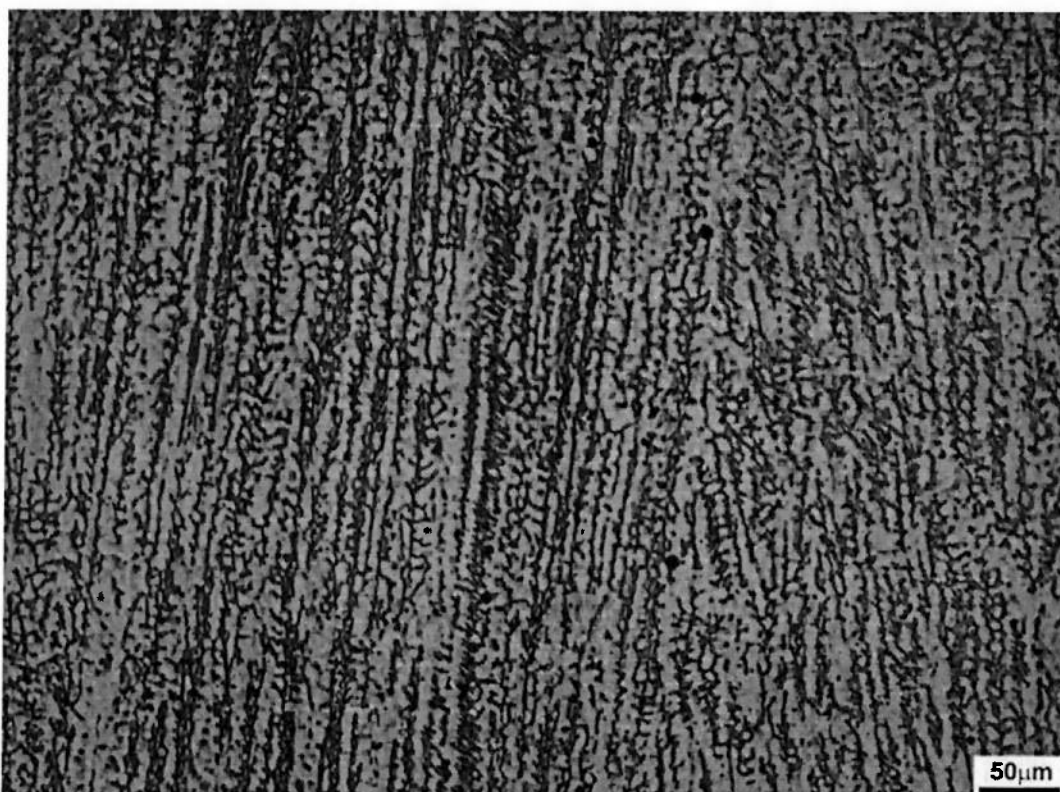


Figura 5.26 - Topo do cordão de Solda do CP SemTT com aumento de 200X.

No CP SemTT é possível visualizar uma ZAC bem definida, sendo caracterizada por uma faixa clara entre o metal de solda e o metal de base, onde os contornos de grão podem ser vistos em linhas bem finas.

5.8.2 CORPO DE PROVA - 1HTT

A figura 5.27 mostra a faixa superior da amostra, partindo do metal de solda até o metal de base. Um detalhe da interface entre o metal de solda e o metal de base dessa faixa com aumento de 200 vezes pode ser visto na figura 5.28.

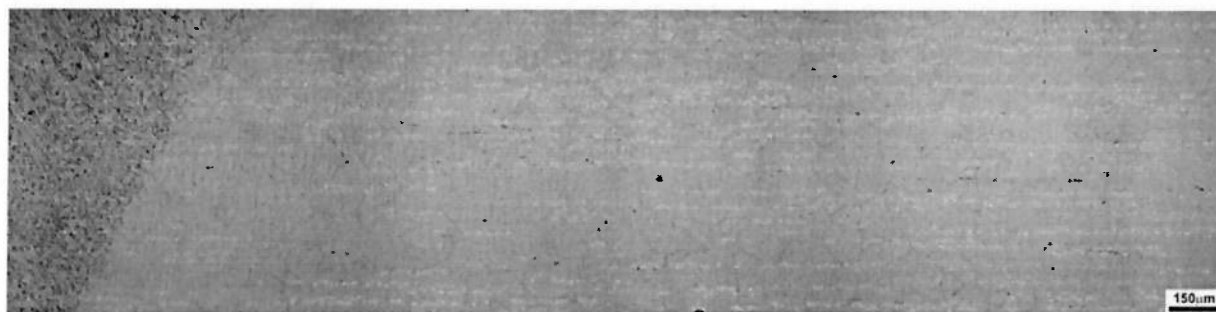


Figura 5.27 - Faixa Superior do CP 1HTT com Aumento de 100X.

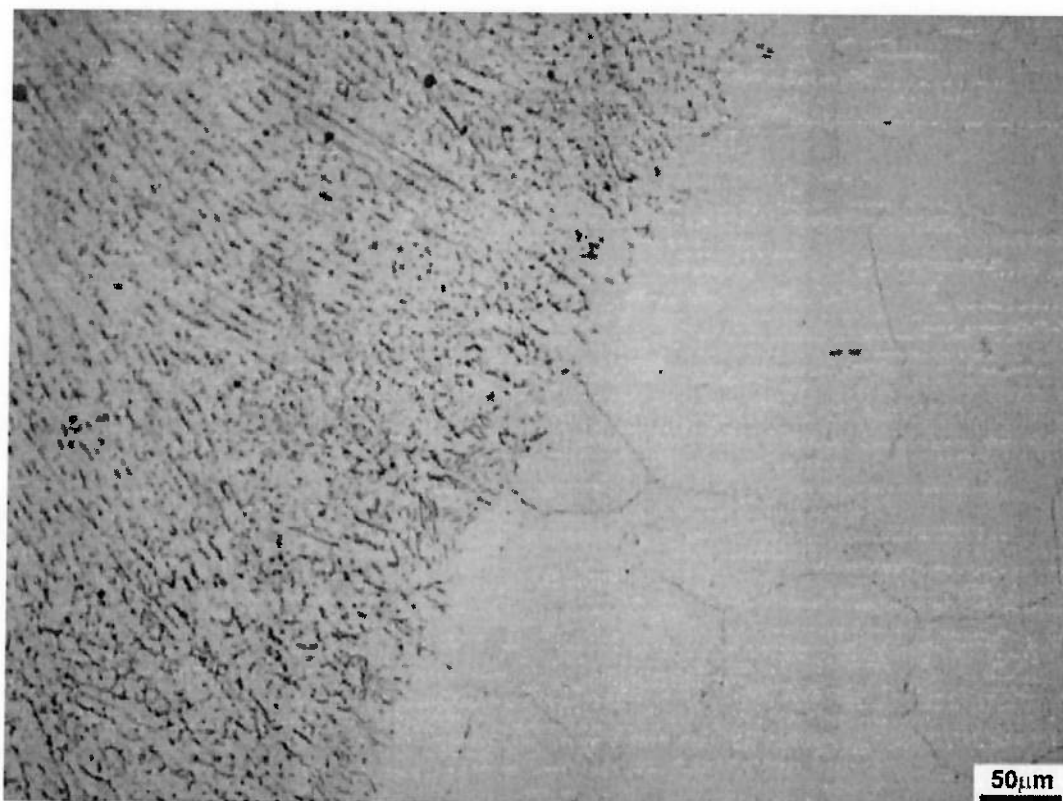


Figura 5.28 - Detalhe da Interface Metal de Solda com Metal de Base da Faixa Superior do CP 1HTT com aumento de 200X.

A figura 5.29 mostra a faixa inferior da amostra (raiz), partindo do metal de solda até o metal de base. Um detalhe da interface entre o metal de solda e o metal de base dessa faixa com aumento de 200 vezes pode ser visto na figura 5.30.



Figura 5.29 - Faixa Inferior do CP 1HTT com Aumento de 100X.

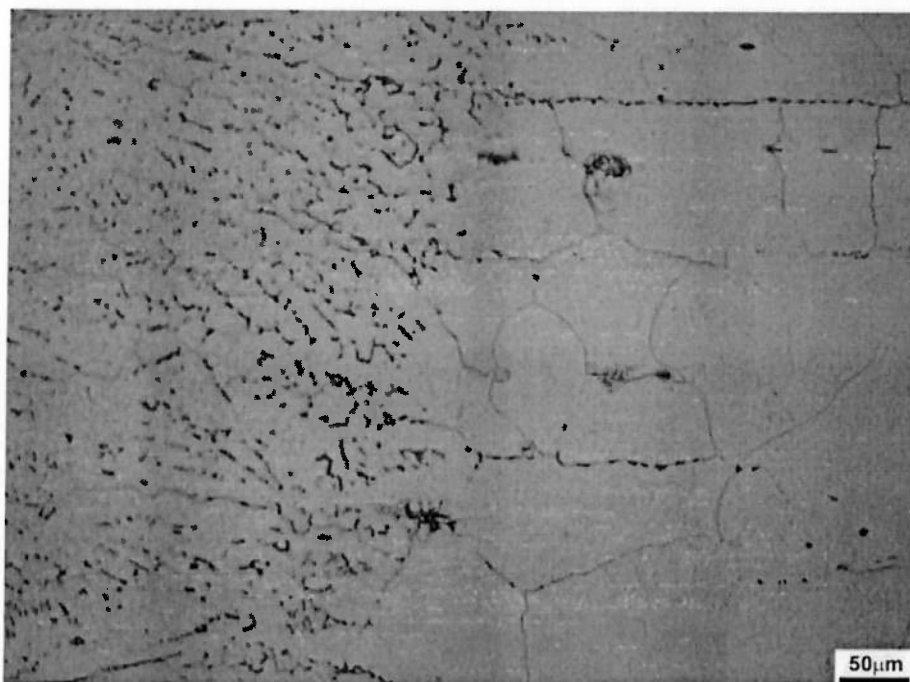


Figura 5.30 - Detalhe da Interface Metal de Solda com Metal de Base da Faixa Inferior do CP 1HTT com aumento de 200X.

A figura 5.31 mostra o metal de base do CP 1HTT com um aumento de 50X e as figuras 5.32, 5.33 e 5.34 mostram a raiz, o meio e o topo do cordão de solda com um aumento de 200X.

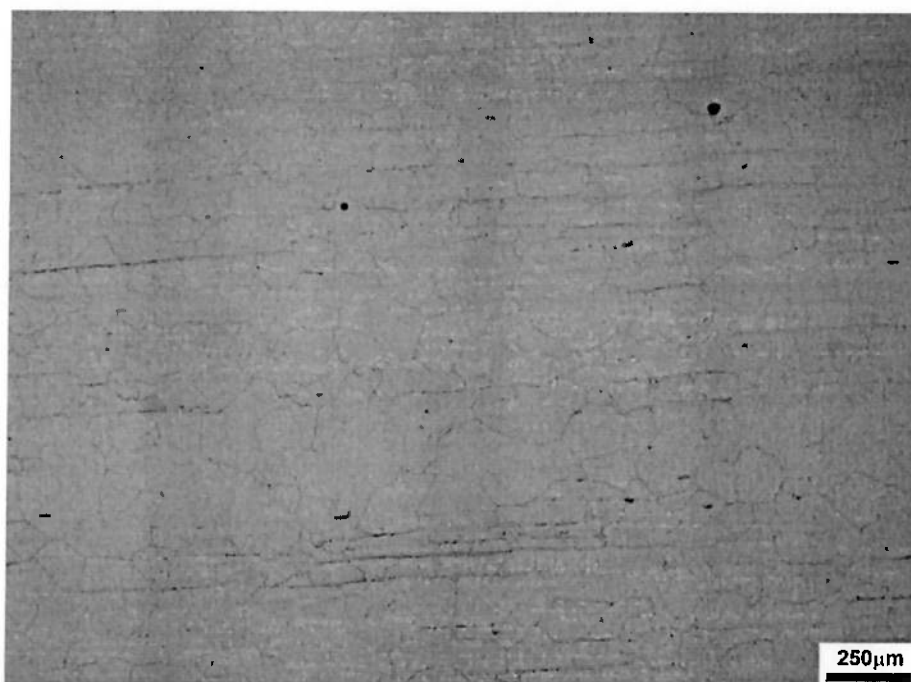


Figura 5.31 - Metal de Base do CP 1HTT com Aumento de 50X.

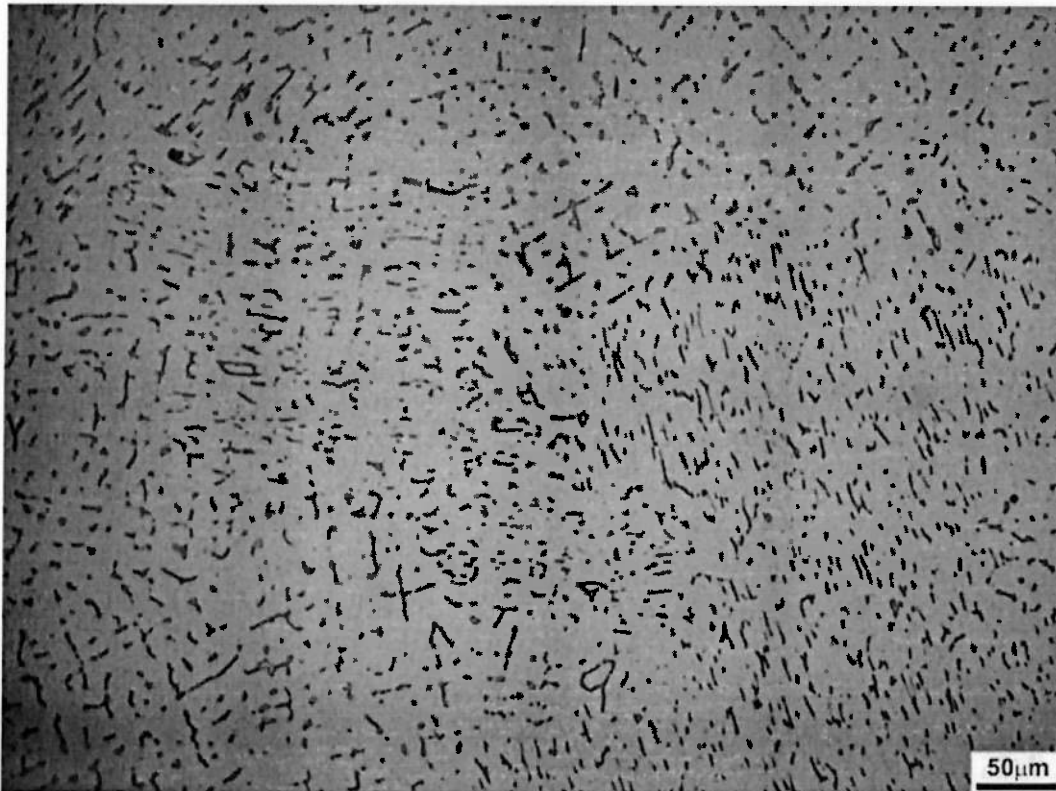


Figura 5.32 - Raiz do cordão de Solda do CP 1HTT com aumento de 200X.

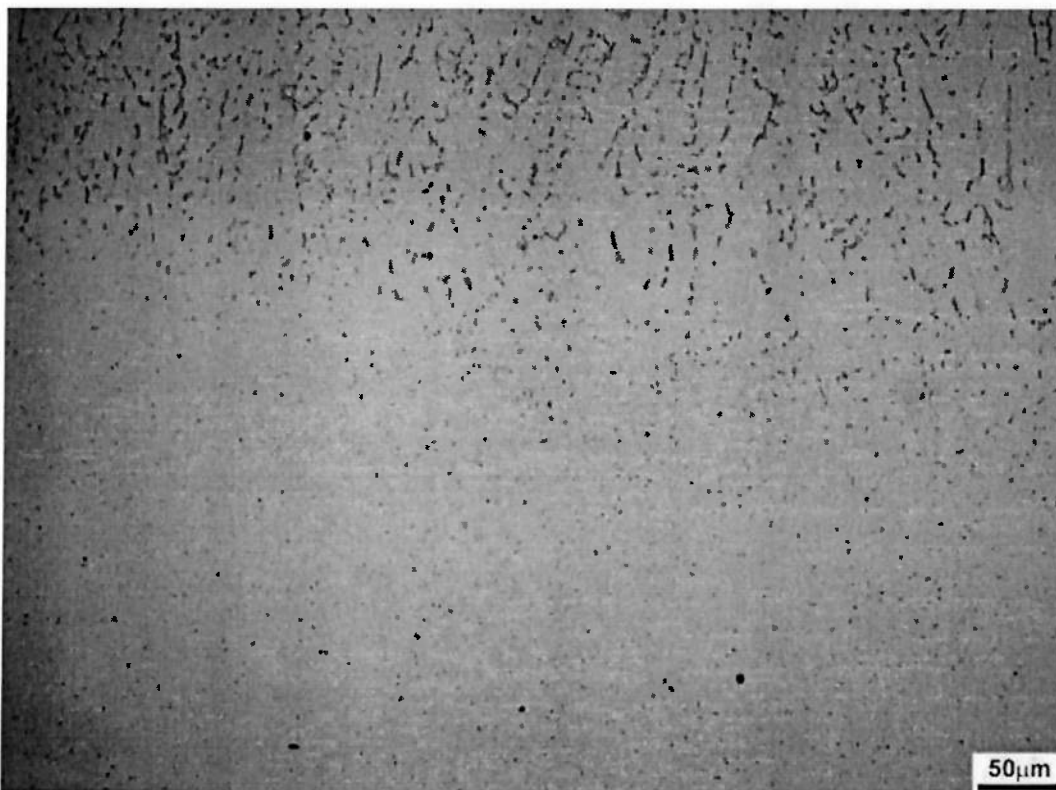


Figura 5.33 - Meio do cordão de Solda do CP 1HTT com aumento de 200X.

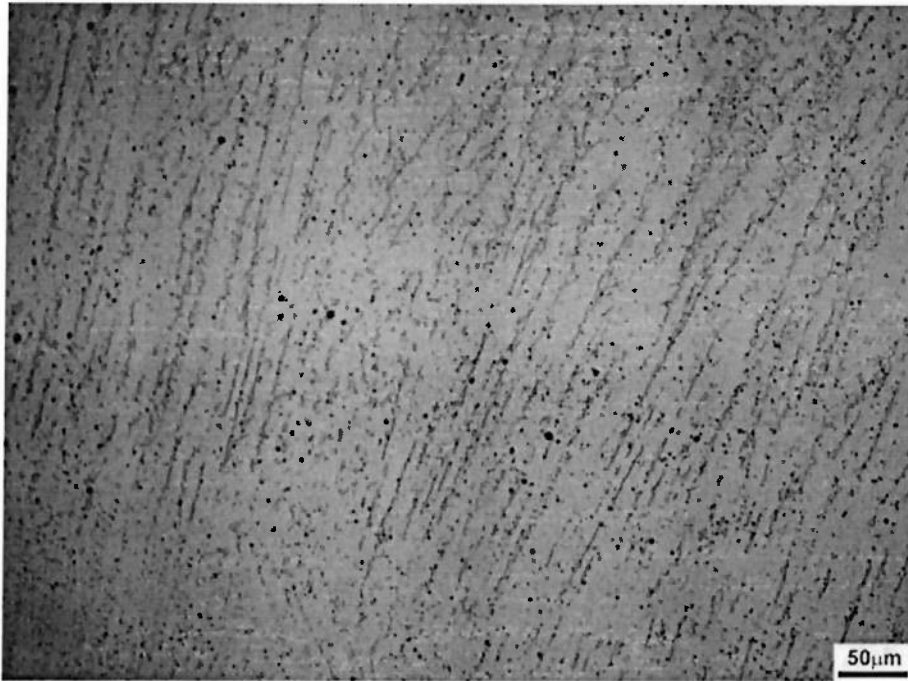


Figura 5.34 - Topo do cordão de Solda do CP 1HTT com aumento de 200X.

5.8.3 CORPO DE PROVA - 120HTT

A figura 5.35 mostra a faixa superior da amostra, partindo do metal de solda até o metal de base. Um detalhe da interface entre o metal de solda e o metal de base dessa faixa com aumento de 200 vezes pode ser visto na figura 5.36.

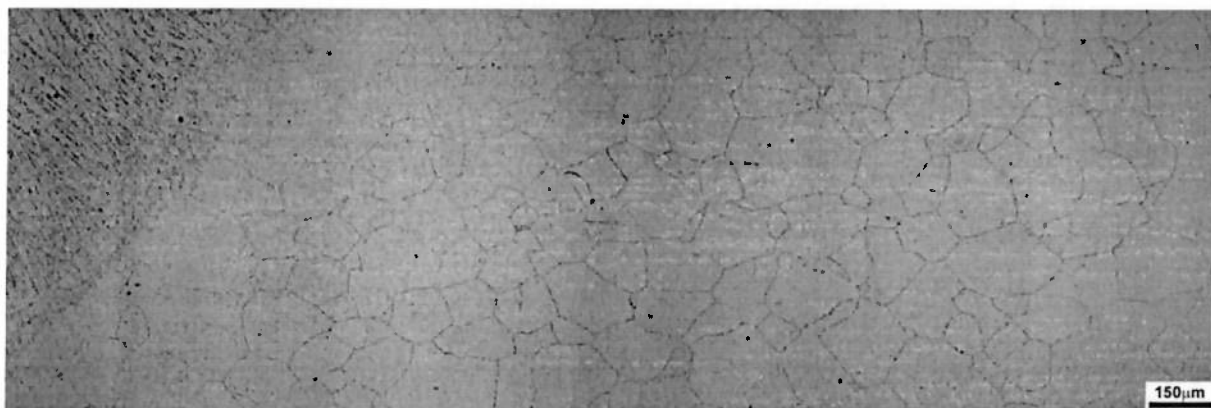


Figura 5.35 - Faixa Superior do CP 120HTT com Aumento de 100X.

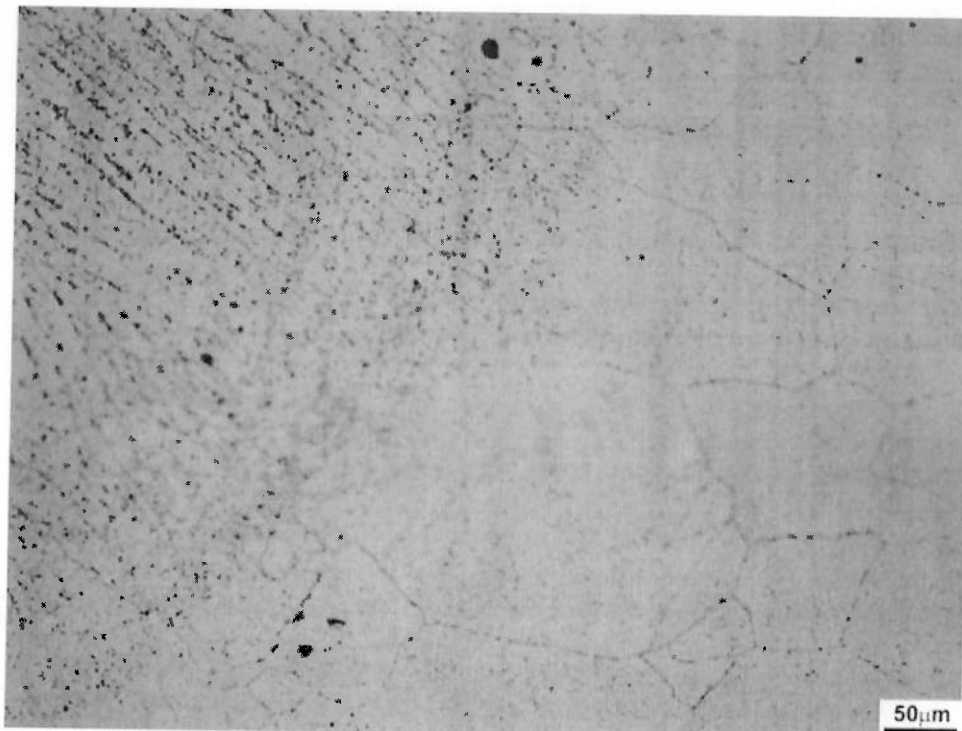


Figura 5.36 - Detalhe da Interface Metal de Solda com Metal de Base da Faixa Superior do CP 120HTT com aumento de 200X.

A figura 5.37 mostra a faixa inferior da amostra (raiz), partindo do metal de solda até o metal de base. Um detalhe da interface entre o metal de solda e o metal de base dessa faixa com aumento de 200 vezes pode ser visto na figura 5.38.



Figura 5.37 - Faixa Inferior do CP 120HTT com Aumento de 100X.

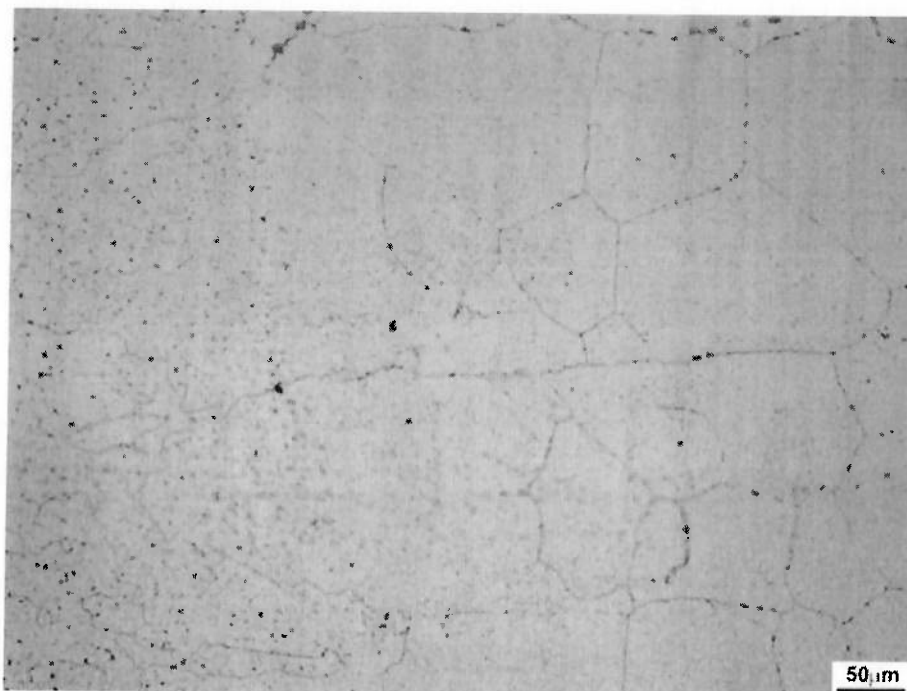


Figura 5.38 - Detalhe da Interface Metal de Solda com Metal de Base da Faixa Inferior do CP 120HTT com aumento de 200X.

A figura 5.39 mostra o metal de base do CP 120HTT com um aumento de 50X e as figuras 5.40, 5.41 e 5.42 mostram a raiz, o meio e o topo do cordão de solda com um aumento de 200X.

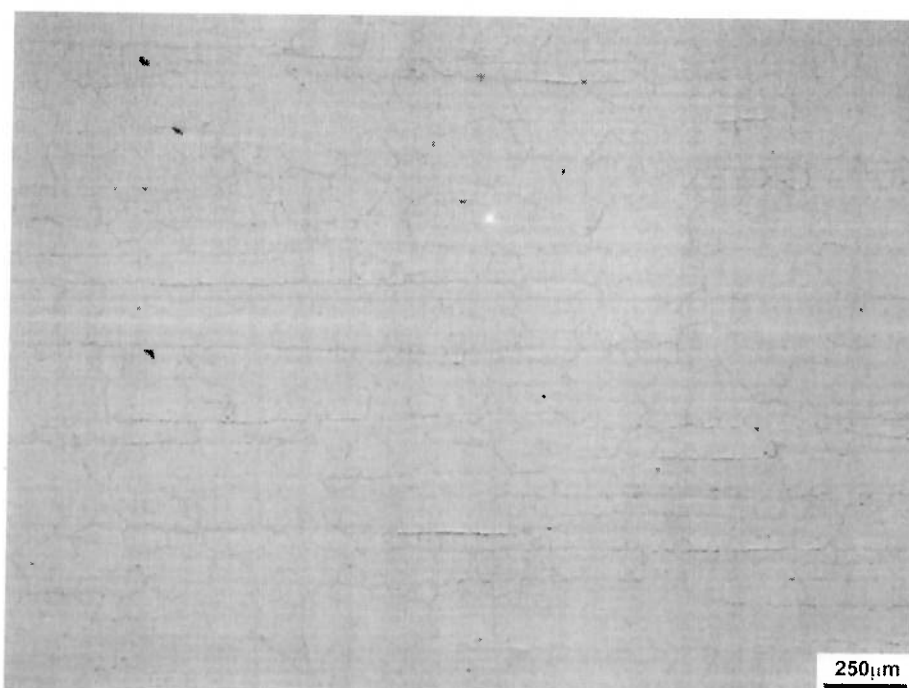


Figura 5.39 - Metal de Base do CP 120HTT com Aumento de 50X.

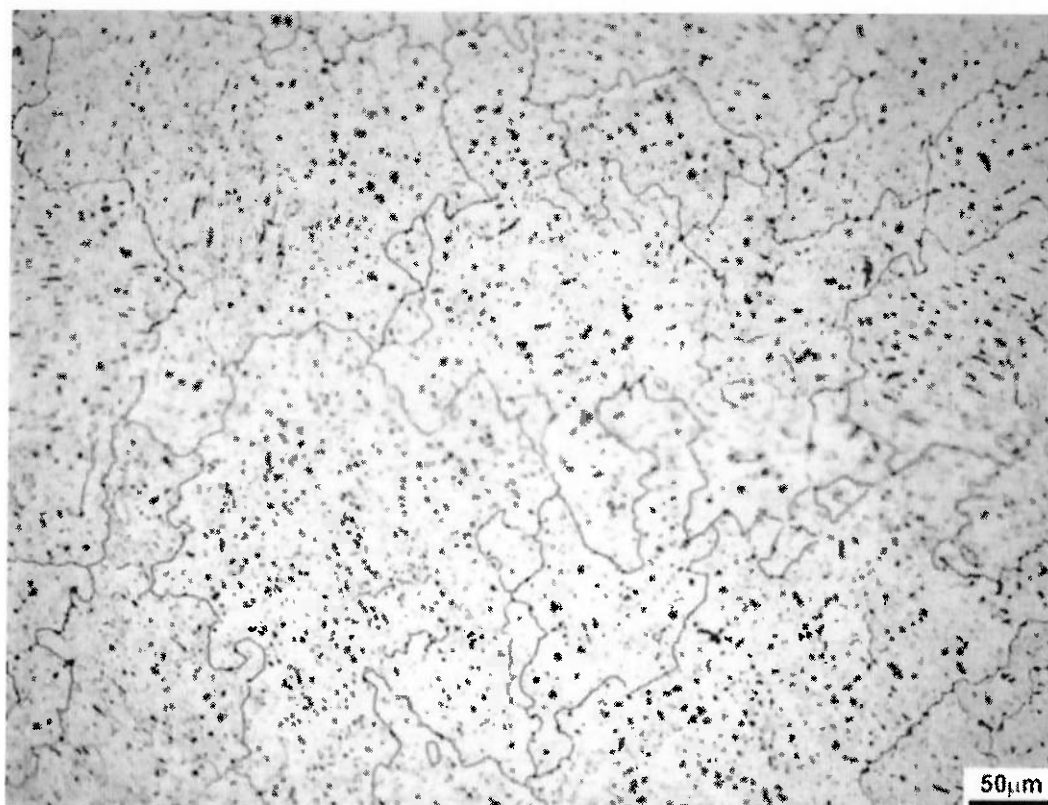


Figura 5.40 - Raiz do cordão de Solda do CP 120HTT com aumento de 200X.

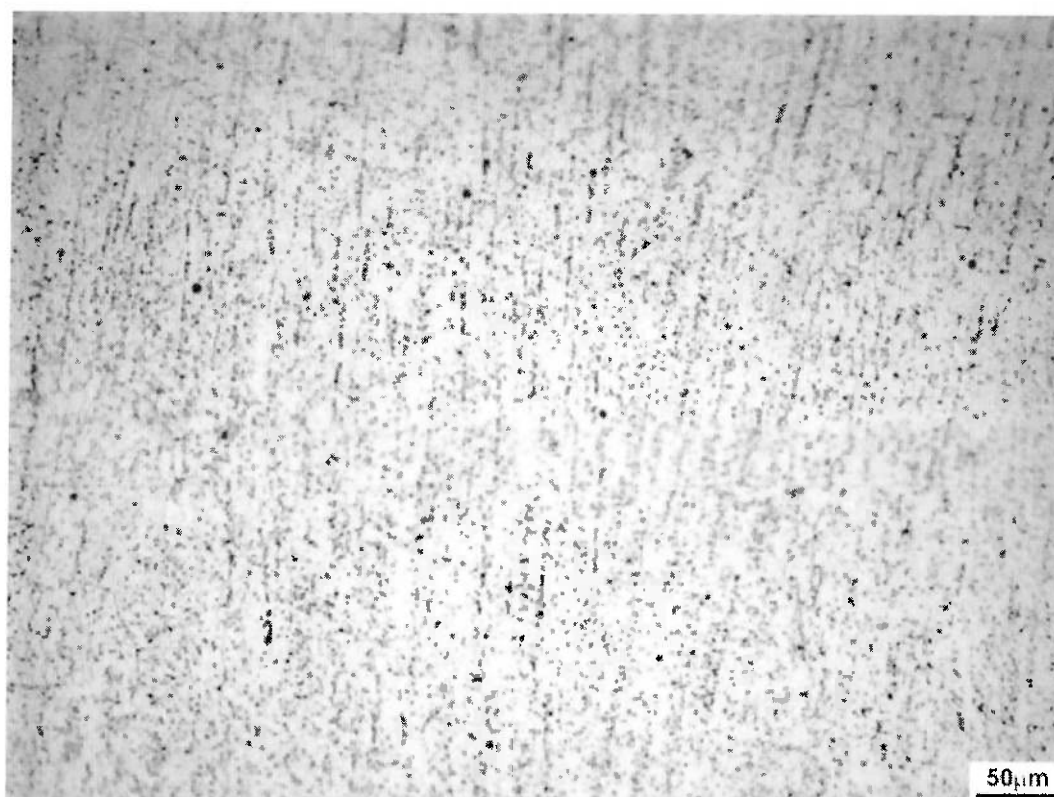


Figura 5.41 - Meio do cordão de Solda do CP 120HTT com aumento de 200X.

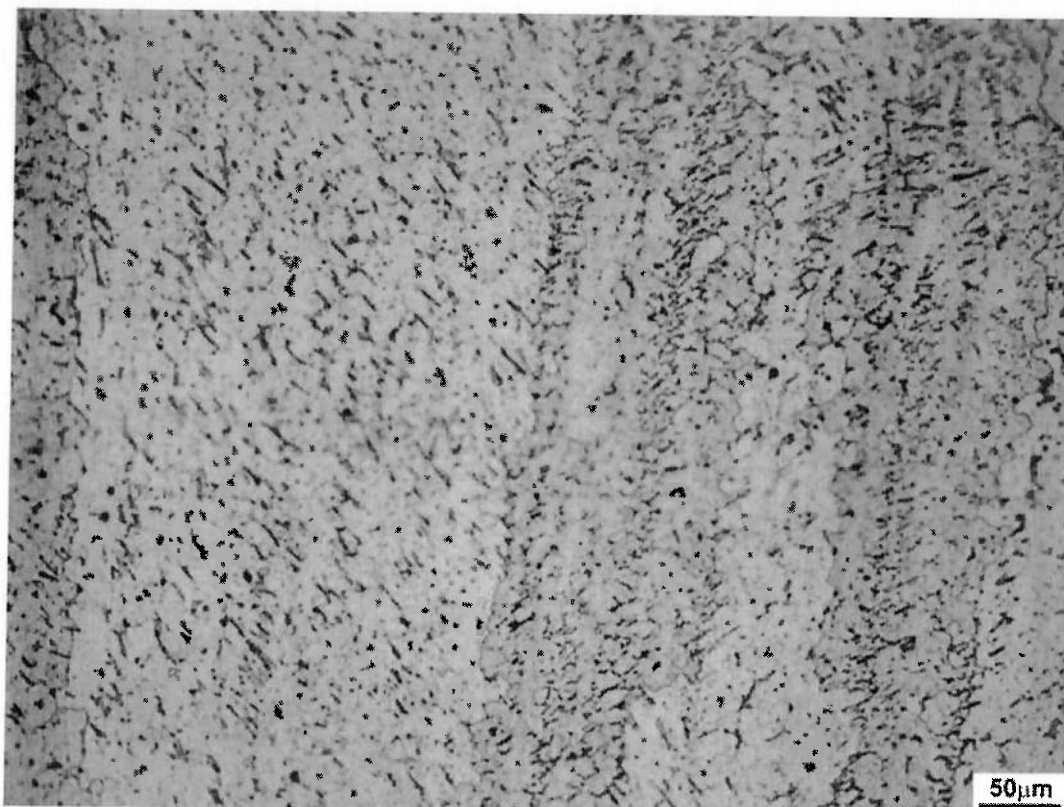


Figura 5.42 - Topo do cordão de Solda do CP 120HTT com aumento de 200X.

6. CONCLUSÕES

Com base nos estudos realizados pode-se concluir que:

1. O tempo de tratamento térmico não influenciou nos resultados de limite de resistência a tração dos corpos de prova, quando ensaiados em temperatura ambiente.
2. O limite de resistência a tração das juntas soldadas cai a medida que se aumenta o tempo de tratamento térmico, quando o ensaio for realizado na temperatura de 350 °C.
3. A realização do tratamento térmico de estabilização não alterou na resistência a corrosão do aço inoxidável tipo 347H.
4. A realização do tratamento térmico de estabilização elimina a zona afetada pelo calor das juntas soldadas.

SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

1. Realizar maior número de amostras de ensaio de tração nos CPs.
2. Analisar a composição química do metal de adição.
3. Controlar criteriosamente a velocidade de soldagem passe a passe.
4. Analisar o teor de ferrita no metal de base.
5. Realizar ensaios de resistência à fluência.
6. Realizar ensaio de dureza e medição de tamanho de grão nos CPS.
7. Realizar a medição das porcentagens de alongamento durante os ensaios de tração, quando realizados à temperatura ambiente.
8. Realizar o Ensaio de corrosão ASTM A262 Prática A na zona de ligação.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. PADILHA, A. F.; GUEDES, L. C. Aços Inoxidáveis Austeníticos Microestrutura e Propriedades, pg. 11 – 16; 133 - 163, São Paulo, 1994.
2. AMERICAN SOCIETY FOR METALS - ASM. Metals Handbook: Welding, brazing, and soldering. Volume 6, pg. 1110-1268, Ohio, 1993.
3. AMERICAN SOCIETY FOR METALS - ASM. Metals Handbook: Properties and selection: Iron, steels, high-performance alloys. Volume 1, pg. 1303-1408; 1443-1477, Ohio, 1990.
4. MODENESI, P. J. Soldabilidade de Algumas Ligas Metálicas, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Pg. 10-15, UFMG: Belo Horizonte, 2008.
5. PECKNER, D.; BERNSTEIN, I. M. Handbook of stainless steels. Pg. 1.1-1.10; 4.1-4.13; 14.11; 15.2-15.3; 21.10-21.11; 26.1-26.3. New York: McGraw-Hill, 1977.
6. AMERICAN SOCIETY FOR METALS - ASM. Metals Handbook: Alloy phase diagrams. Volume 3, pg. 2.152; 3.43-44, Ohio, 1990.
7. AMERICAN SOCIETY FOR METALS - ASM. Metals Handbook: Corrosion. Volume 13, pg. 1327-1381, Ohio, 1990.
8. AOKI, Idalina Vieira. Precipitação. Corrosão intergranular, Corrosão sob tensão e sob fadiga - SLD-027, 2012 (Material de Aula).
9. WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELO, F. D. H. Soldagem: Processos e Metalurgia. Pg. 60-63. São Paulo: Edgar Blücher, 1995.

10. KOTECKI, D.; ARMAO, F. Stainless steel: Properties – How to weld them – Where to use them, The Lincoln Electric Company. Pg. 2, 2003.
11. GRONG, Øystein. Metallurgical Modelling of Welding. Pg. 528, Londres: The Institute of Materials, 1994.
12. AMERICAN SOCIETY FOR METALS - ASM. Metals Handbook: Properties and selection: Stainless steels, tool materials and special-purpose metals. Volume 3, pg. 46-47, Ohio, 1978.
13. SPECIFICATION For Seamless Ferritic and Austenitic Alloy-Steel Boiler, Superheater, and Heat-Exchanger Tubes: SA-213/SA-213M, American Society of Mechanical Engineers, Section II, Part A. 2008a.