

ARY CARLOS DE OLIVEIRA

**ANÁLISE DA SUBSTITUIÇÃO DO AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO
AISI 304L PELO AISI 348 NA FABRICAÇÃO DE VARETA COMBUSTIVEL**

**Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia**

**CONSULTA
FD-3323
Ed.rev.**

**São Paulo
- 2003 -**

OK

ARY CARLOS DE OLIVEIRA

**ANALISE DA SUBSTITUIÇÃO DO AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO
AISI 304L PELO AISI 348 NA FABRICAÇÃO DE VARETA COMBUSTIVEL**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Engenharia
Naval – Tecnologia de Construção.

Orientador: Prof. Dr. Célio Taniguchi

São Paulo
- 2003 -

**Paciência,
Persistência e
Perseverança.**

AGRADECIMENTOS

- À Escola Politécnica da USP pela oportunidade de participar de seus cursos de graduação e pós-graduação.
- Ao Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo pela abertura de seus laboratórios para execução dos ensaios aqui descritos.
- Ao Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da EPUSP pela seção de suas instalações e equipamentos para que elaborasse este trabalho.
- Ao Prof. Dr. Célio Taniguchi pelo incentivo, orientação e exemplos de integridade recebidas neste período.
- Aos amigos que durante todo o tempo me apoiaram e incentivaram para atingir o objetivo maior.
- Aos meus pais que se tornaram cúmplices nesta jornada,
- Às minhas filhas pelos sorrisos reconfortantes e por entenderem a importância deste trabalho.
- Aos meus alunos pelo incentivo e apoio.
- Ao amor em executar um trabalho por mais árduo que possa parecer.
- Ao amor e por amor....obrigado a todos!

SUMÁRIO

	LISTA DE TABELAS	-
	LISTA DE FIGURAS	-
	LISTA DE ABREVIATURAS	-
	LISTA DE SIMBOLOS	-
	RESUMO	-
	“ABSTRACTS”	-
1.	INTRODUÇÃO	1
1.1.	Energia Nuclear como Fonte de Energia Elétrica	2
1.2.	Energia Nuclear na Propulsão de Embarcações	5
1.3.	Razão e Emoção em Torno da Tecnologia Nuclear	6
1.4.	Gestão da Qualidade na Industria Nuclear	9
1.5	Histórico do Desenvolvimento deste Projeto.	10
2.	OBJETIVO	12
3.	INTRODUÇÃO TEÓRICA	13
3.1	Conceitos de Energia Nuclear	13
3.1.1	Fissão Nuclear	13
3.2.2	Radiação	15
3.3.3	Interação da Radiação com a Matéria	16
3.2	O Reator Nuclear	19
3.2.1	Os reatores Nucleares do Tipo PWR	20
3.2.1.1	O Vaso de Pressão	20
3.2.1.2	O Elemento Combustível	21
3.2.1.3	A Vareta Combustível	23
3.3	Materiais	24

3.3.1	Materiais das Varetas Combustíveis	26
3.3.1.1	Características Nominais do AISI 304L	27
3.3.1.2	Características Nominais do AISI 348	28
3.3.1.3	Equivalência de Normas	29
3.4	Fragilização pela Radiação	30
3.4.1.	Fragilização nos Aços Inoxidáveis	31
3.4.1.1.	Nos Aços Inoxidáveis Ferríticos	31
3.4.1.2.	Nos Aços Inoxidáveis Austeníticos	31
3.4.2.	No Aço Inoxidável Austenítico AISI 304L	38
3.4.3.	No Aço Inoxidável Austenítico AISI 348	41
3.5	Processo de Soldagem	43
3.5.1	Histórico	43
3.5.2	Processos TIG e Plasma	45
3.5.3	Processo de Soldagem TIG	46
3.5.3.1	Corrente de Soldagem	47
3.5.3.2	Equações Básicas da Soldagem	49
3.5.3.3	Intensidade de Corrente e Tensão	50
3.5.3.4	Gás de Proteção	51
3.5.3.5	Eletrodo não Consumível	53
3.5.4	Soldabilidade dos Aços Austeníticos	56
3.5.4.1	Efeitos do Teor de Ferrita	57
3.5.4.2	Diagrama de Schaeffler	58
3.5.4.2.1	Elementos gamagênicos	59
3.5.4.2.2	Elementos alfa-gênicos	60
3.5.4.2.3	Definição de Níquel Equivalente	60

3.5.4.2.4.	Definição de Cromo Equivalente	61
3.5.4.3	Composição Desejável para a Zona Fundida	61
3.5.4.4	Exemplo de Aplicação di Diagrama da Schaeffler	63
3.5.4.5	Velocidade de Resfriamento e o Teor de Ferrita- δ	65
3.6	Ensaio para Qualificação das Soldas	66
3.6.1	Inspeção Visual	67
3.6.2	Inspeção Dimensional	67
3.6.3	Ensaio Radiográfico	68
3.6.4	Ensaio de Estanqueidade	69
3.6.5	Caracterização da Solda	69
3.6.5.1	Preparação Metalográfica	69
3.6.5.2	Observação Metalográfica	70
3.6.5.3	Avaliação Geral do Cordão de Solda	71
3.6.5.4	Verificação das Dimensões da Solda	71
3.6.5.5	Avaliação da Presença de Carbonetos	72
3.6.5.6	Avaliação da Ferrita- δ	72
3.6.5.6.1	Estima do teor de ferrita - δ antes da realização da solda	72
3.6.5.6.2	Avaliação quantitativa do teor de ferrita - δ	73
3.6.5.6.3	Medição direta	73
3.6.6	Ensaio de Arrebentamento	75
3.6.7	Ensaio de Corrosão Intergranular	76
4	MATERIAIS E MÉTODOS	77
4.1	Materiais	77
4.1.1	Tubo	77

4.1.2	Tampão	77
4.1.3	Material dos Tubos e Tampões	78
4.1.3.1	Aço Inoxidável Austenítico 304L	78
4.1.3.2	Aço Inoxidável Austenítico 348	79
4.1.4	Gases de Proteção	80
4.1.5	Eletrodo não Consumível	80
4.1.6	Produtos Químicos	81
4.2	Equipamentos	81
4.2.1	Bancada de Soldagem	81
4.2.2	Fonte de Corrente Contínua	81
4.2.3	Ferritoscópio	82
4.2.4	Corpos de Provas	82
4.3	Processo de Soldagem dos Corpos de Provas	82
4.3.1	Parâmetros de Soldagem	82
4.3.1.1	Ciclo de Soldagem	82
4.3.2	Posição do Eletrodo não-Consumível	83
4.3.3	Parâmetros de Soldagem dos Corpos de Provas	84
4.4	Ensaio Realizados	86
4.4.1	Verificação Visual	86
4.4.2	Ensaio Dimensional	86
4.4.3	Verificação das Dimensões do Cordão de Solda	87
4.4.4	Ensaio de Dureza	87
4.4.5	Avaliação da ferrita- δ	87
4.4.6	Ensaio de Arrebatamento	88
4.4.7	Ensaio de Corrosão Intergranular	88

5	RESULTADOS	89
5.1	Avaliação Dimensional	89
5.2	Controle das Dimensões do Cordão de Solda	89
5.3	Valores de Dureza	93
5.4	Avaliação do Teor de Ferrita- δ	97
5.5	Ensaio de Arrebentamento	98
5.6	Ensaio de Corrosão Intergranular	98
5.7	Corrente de Soldagem	99
6.	ANÁLISE DOS RESULTADOS	101
6.1	Avaliação Dimensional	101
6.2	Dimensões do Cordão de Solda	101
6.3	Metalografia e Dureza	104
6.4	Teor de ferrita- δ	106
6.5	Ensaio de Arrebentamento	109
6.6	Ensaio de Corrosão Intergranular	110
6.7	Instabilidade de Corrente	110
7.	CONCLUSÃO	111
8.	ANEXOS	112
ANEXO A	Tabela com os principais tipos de reatores nucleares	113
ANEXO B	Tabela com os principais parâmetros operacionais do reator nuclear de Angra-II	115
ANEXO C	Fluxograma de relacionamento entre aços inoxidáveis austeníticos da série 300	117
ANEXO D	Descrição da bancada de soldagem	119
ANEXO E	Diagrama de Ishikawa	126

ANEXO F Parâmetros de soldagem para fabricação dos corpos de 128
provas.

LISTA DE REFERÊNCIAS

130

LISTA DE TABELAS

Tabela	Descrição	Pag.
1.	Quadro apresentando o estágio de desenvolvimento das usinas nucleares destinadas a geração de energia elétrica, no biênio de 2000-01.(Adaptado da referência 6).	4
2:	Quadro da distribuição das embarcações militares com propulsão nuclear por país, em 2002. (Adaptado da referência 4)	6
3	Relação dos principais materiais utilizados na fabricação de um reator nuclear e respectiva aplicação.(Adaptado das referências 11 e 17)	24
4	Efeitos da radiação nas propriedades dos materiais estruturais de um reator nuclear.(Adaptado da referência 11)	26
5	Equivalência entre normas internacionais para identificação dos aços inoxidáveis austeníticos AISI 304L e 348. (Adaptado da referência 63)	29
6	Exemplos numéricos de propriedades mecânicas de materiais metálicos alteradas devido a irradiação.(Adaptado da referência 17)	31
7	Atividade total para cada elemento componente do Aço-304L após irradiação. (Adaptado da referência 27)	39
8	Propriedades do Argônio e do Hélio.(Adaptado das referências 36 e 37)	52
9	Tipos de eletrodos e características (Adaptado da referência 37)	53
10	Identificação e composição química dos eletrodos de acordo com AWS (Adaptado da referência 37)	54
11	Intensidade de corrente e diâmetro de eletrodo para corrente contínua (Adaptado da referência 37)	54
12	Parâmetros de soldagem aplicados ao processo e que	83

complementam a fig. 20

13	Avaliação dimensional	89
14	Dimensões do cordão de solda dos corpos de prova do grupo I e III, fabricados com AISI 348, gás de proteção é o Argônio e corrente de soldagem de 35 A.	90
15	Dimensões do cordão de solda dos corpos de prova do grupo V-a, fabricados com AISI 304L, gás de proteção é o Argônio e com variação da corrente de soldagem .	91
16	Dimensões do cordão de solda dos corpos de prova do grupo V-b, fabricados com AISI 348, gás de proteção é o Argônio e com variação da corrente de soldagem .	91
17	Dimensões do cordão de solda dos corpos de prova do grupo V-c, fabricados com AISI 304L, gás de proteção é o Hélio e com variação da corrente de soldagem	91
18	Dimensões do cordão de solda dos corpos de prova do grupo V-d, fabricados com AISI 348, gás de proteção é o Hélio e com variação da corrente de soldagem .	92
19	Dimensões do cordão de solda dos corpos de prova do grupo VII, fabricados com AISI 348, gás de proteção é o Hélio e com variação da corrente de soldagem e pressão de 1,5 bar no interior da câmara	92
20	Valores de dureza Vickers dos cordões de solda dos corpos de prova do grupo I e III, fabricados com AISI 348, gás de proteção é o Argônio e corrente de soldagem de 35 A.	93
21	Valores de dureza Vickers do cordão de solda dos corpos de prova do grupo V-a, fabricados com AISI 304L, gás de proteção é o Argônio e com variação da corrente de soldagem .	94
22	Valores de dureza Vickers do cordão de solda dos corpos de prova do grupo V-b, fabricados com AISI 348, gás de proteção é	94

	o Argônio e com variação da corrente de soldagem	
23	Valores de dureza Vickers do cordão de solda dos corpos de prova do grupo V-c, fabricados com AISI 304L, gás de proteção é o Hélio e com variação da corrente de soldagem .	95
24	Valores de dureza Vickers do cordão de solda dos corpos de prova do grupo V-d, fabricados com AISI 304L, gás de proteção é o Hélio e com variação da corrente de soldagem .	95
25	Valores de dureza Vickers do cordão de solda dos corpos de prova do grupo VII, fabricados com AISI 348, gás de proteção é o Hélio e com variação da corrente de soldagem e pressão de 1,5 bar no interior da câmara	96
26	Valores dos teores de ferrita- δ obtidos no ferritoscópio e na análise quantitativa.	97
27	Corrente de soldagem nominal e parâmetros reais.	99
ANEXO F	Tabela de parâmetros de soldagem	129

LISTA DE FIGURAS

Figura	Descrição	Pág.
1	Evolução mundial da participação da energia nuclear destinada a geração de energia elétrica, de 1971 a 2001.(Adaptado da referência 6)	2
2	Participação percentual das fontes energéticas na matriz energética mundial no ano de 2001. (Adaptado da referência 14)	3
3	Primeiro reator nuclear de pesquisa do mundo inaugurado em 1942 na Universidade de Chicago. (Retirado da referência 13)	13
4	Corte apresentando o interior de um reator nuclear do tipo PWR (Retirado da referência 11)	21
5	Vista em perspectiva do conjunto elemento combustível utilizado em reatores nucleares do tipo PWR (Retirado da referência 16)	22
6	Vareta combustível de reator nuclear tipo PWR (Retirado da referência 11)	23
7	Esquema demonstrando os efeitos causados pela passagem de um nêutron por um cristal metálico. (Retirado da referência 48)	30
8	Efeito da temperatura sobre a ductilidade de um aço inoxidável austenítico AISI 316L, sob fluência neutrônica de $3 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$ ($E > 0,1 \text{ Mev}$) e temperatura de teste de $50 \text{ }^\circ\text{C}$. (Adaptado da referência 25)	33
9	Propriedades mecânicas do aço inoxidável austenítico AISI 316 irradiado entre $400\text{-}600 \text{ }^\circ\text{C}$ e testados a $430 \text{ }^\circ\text{C}$. (Adaptado da referência 25)	35
10	Fluência induzida pela irradiação em aço inoxidável austenítico AISI 304L irradiado a $380 \text{ }^\circ\text{C}$. (Adaptado da referência 27)	39
11	Propriedades mecânicas de tração do aço inoxidável austenítico AISI 304L irradiado a $400 \text{ }^\circ\text{C}$. (Adaptado da referência 27)	40

12	Propriedades mecânicas de tração do aço inoxidável austenítico AISI 348 com amostras irradiadas entre 330 e 400 °C e testadas na faixa de temperatura de 310 a 450 °C. (Adaptado da referência 25)	41
13	Inchamento de aço inoxidável austenítico AISI 348 recozido a temperaturas entre 330-390 °C. (Adaptado da referência 27)	42
14	Fluência induzida pela irradiação em aço inoxidável austenítico AISI 348. (Adaptado da referência 27)	42
15	Desenho do equipamento apresentado por <i>de Meritens</i> para patentear o processo de soldagem a arco em 1981 (Obtido na referência 30)	44
16	Diagrama esquemático do processo TIG com a tocha sendo resfriada a água. (adaptada da ref. 46)	47
17	Perfil do cordão de solda para cada um dos três tipos de corrente elétrica possíveis no processo TIG. (adaptado da referencia 46)	48
18	Corte apresentando as dimensões básicas a serem observadas em um cordão de solda.(adaptado da ref. 56)	49
19	Relação entre intensidade de corrente e tensão do arco elétrico (Adaptado da referência 38)	51
20	Posicionamento correto para executar a tarefa de esmerilhar o eletrodo de tungstênio. (Adaptado da referência 46)	56
21	Diagrama de Schaeffler com indicação das zonas de estrutura cristalina a ser formada. (Adaptado da referência 65)	59
22	Altura máxima permitida para o cordão de solda do tampão ao tubo na fabricação da vareta combustível.	68
23	Dimensões principais que podem ser observadas em cordão de solda através da microscopia ótica.	71
24	Micrografia com aumento de 500x de aço inoxidável austenítico	72

	AISI 304L apresentando a presença de carbonetos de cromo no contorno de grão. (Foto cedida por Elisa B. de Lima)	
25	Fator de correção para um tubo de diâmetro externo de 10 mm com a medida da ferrita- δ realizada pelo lado externo. (Adaptado da referência 68)	74
26	Gráfico para converter de FN pra percentagem de ferrita- δ . (Adaptado da referência 68)	74
27	Desenho dimensional do tampão utilizado na fabricação das varetas combustível e nos corpos de provas.	78
28	Ciclo de soldagem indicando os passos do programa.	83
29	Posicionamento do eletrodo em relação às peças a serem soldadas.	84
30	Posicionamento dos pontos de medida de dureza.	87
31	Posicionamento adotado para os pontos de medição dos teores de ferrita- δ com o ferritoscópio.	88
32	Micrografia com aumento de 500x apresentando resultado de ensaio de corrosão em solda de aço inoxidável austenítico AISI 348.	98
33	Microestrutura para verificação do teor de ferrita- δ em aço inoxidável austenítico AISI 304L após processo de soldagem TIG. (Aumento de 1000x – ataque Murakami modificado)	100
34	Microestrutura para verificação do teor de ferrita- δ em aço inoxidável austenítico AISI 348 após processo de soldagem TIG. (Aumento de 1000x – ataque Murakami modificado)	100
35	Comparação entre zonas fundidas do AISI 304L e AISI 348 soldados sob atmosfera de Argônio	102
36	Comparação entre zonas fundidas do AISI 304L e AISI 348 soldados sob atmosfera de Hélio	103

37	Comparação da variação de dureza Vickers no AISI 304L e no 348 soldados nas mesmas condições.	105
38	Perfil da dureza média para a solda tubo-tampão de AISI-348	105
39	Perfil típico de cordão de solda do AISI-348 na união tubo-tampão.	106
40	Valores de Cromo e Níquel equivalentes dos aços AISI-304L e 348 plotados para obtenção do teor previsto de ferrita- δ	107
ANEXO E Diagrama de Ishikawa		127

LISTA DE ABREVIATURAS

a.C	Antes de Cristo
AGR	Agged Gás Reactor
AISI	American Iron and Steel Institute
bar	Unidade de pressão
BWR	Boiling Water Reactor
CANDU	Canadian Deuterium Uranium
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
CTM-SP	Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo
d.C	Depois de Cristo
FBR	Fast Breeder Reactor
HWR	Heavy Water Reactor
IPEN	Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
kWh	Quilowatt-hora
LWR	Low Water Reactor
Mev	Mega eletron-volt
mCi	Micro Curie
MWe	Megawatt-eletron
N	Quantidade de ...
PuO ₂	Dióxido de Plutônio
PWR	Pressure Water Reactor ou Reator Refrigerado a Água Pressurizada
RBMK	Reator Moderado a Grafita
TIG	Soldagem a Arco Elétrico com Eletrôdo de Tungstênio e Proteção Gasosa
TWh	Tonelada Watt-hora
UC ₂	Dicarbeto de Urânio
UO ₂	Dióxido de Urânio

LISTA DE SIMBOLOS

σ	Seção de choque
σ_a	Seção de choque de absorção
σ_e	Seção de choque de espalhamento
Σ	Seção de choque macroscópica
C	Símbolo do elemento químico “Carbono”
U	Símbolo do elemento químico “Urânio”
Th	Símbolo do elemento químico
n	Neutron
°C	Graus centígrados
Pu	Símbolo do elemento químico “Plutônio”
c	Velocidade da luz
E	Energia liberada
m	Massa ou diferença de massa
σ_{rup}	Tensão de ruptura
D_m	Diâmetro médio

RESUMO

Este trabalho descreve a utilização de aços inoxidáveis austeníticos na fabricação de vareta combustível para reatores nucleares. Dois materiais foram observados: AISI-304L e 348.

O objetivo é a qualificação da solda do tubo e tampão do mesmo material.

O processo utilizado foi o TIG autogeno, sendo estudadas a influência de vários fatores: gás de proteção, corrente e comprimento do arco.

As soldas foram avaliadas com a realização de testes destrutivos e não destrutivos.

"ABSTRACTS"

This dissertation describes the austenitic stainless steel clad fuel rod for nuclear reactors. Two materials have been observed: AISI 304L and 348.

The traget is the qualification of welds of pipe to end plugs of the same alloy.

The TIG process of welding was used. The influence of several welding parameters were studied: inert gas, current and arc length.

The welds were evalueted with the aid of destructive and non destructive tests..

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da humanidade está intimamente ligado ao desenvolvimento das fontes de energia. Pode-se dizer que há uma interdependência entre ambos, ou seja, o progresso econômico resulta da descoberta de novas fontes energéticas, que, por sua vez, ocorre devido às necessidades da economia.

Com efeito, a necessidade energética de um país é diretamente proporcional ao seu grau de industrialização. Assim, economias altamente industrializadas são as maiores consumidoras de energia e, freqüentemente, precisam importar recursos energéticos para suprir suas necessidades. O alto consumo em geral exige também a utilização de diversas fontes.

Depois da própria força, a primeira fonte de energia que o homem utilizou foi o fogo. A técnica de utilização do fogo foi descoberta por volta de 50000 a.C., com o uso de pedra e madeira. Entre 10000 e 5000 a.C. ocorreu a chamada Revolução Neolítica, com o homem domesticando certos animais, que passaram a servir como fonte de energia, e também certos vegetais, surgindo a agricultura e a possibilidade de uso da biomassa como fonte de energia.

A utilização da força do vento, principalmente para a navegação, deve ter começado em torno do ano 2000 a.C. O aproveitamento da água, da força hidráulica para mover moinhos, iniciou-se por volta do século II a.C. A partir do ano 1000 d.C., ocorre a exploração mais intensa do carvão mineral.

No século XVIII, a partir de 1700, surgem importantes inovações, ligadas à Revolução Industrial, como a invenção da máquina a vapor, que foi seu acontecimento mais importante no que se refere às fontes de energia.

Por volta do final do século XIX, verificou-se o aparecimento da eletricidade, o desenvolvimento dos motores de combustão interna utilizando como combustível os produtos derivados do petróleo e, dessa forma, promovendo notável desenvolvimento nas explorações petrolíferas.(3)

O século XX pode ser identificado como o século da energia, no qual o consumo teve um crescimento exponencial com o adensamento populacional. O tal adensamento se entende por grandes aglomerados e cidades com indústrias de

transformação de matérias primas requerendo grande densidade energética, fazendo com que os países e governos procurassem alternativas de fonte de energia para a suprir a crescente demanda. (3)

Inicialmente o século XX teve como fontes básicas de energia o combustível fóssil e as hidrelétricas. Em meados do século XX, surge a energia nuclear; sendo que a fissão nuclear, princípio de obtenção da energia nuclear, foi utilizada inicialmente para fins militares, durante a Segunda Guerra Mundial.(3)

A aplicação da fonte de energia está direcionada para o setor civil e é gerada em usinas nucleares para fornecimento de energia elétrica e para a área militar servindo como unidade fornecedora de energia para a propulsão de embarcações.

1.1. Energia Nuclear como Fonte de Energia Elétrica

O início da aplicação da energia nuclear para a geração de energia elétrica foi na década de 1950 com a inauguração do primeiro reator nuclear. A evolução da utilização da energia nuclear como fonte de energia elétrica pode ser observado no gráfico da figura 1 (6), onde está apresentada a evolução da energia gerada, em TWh, e a porcentagem que esta representa no total da energia gerada no mundo.

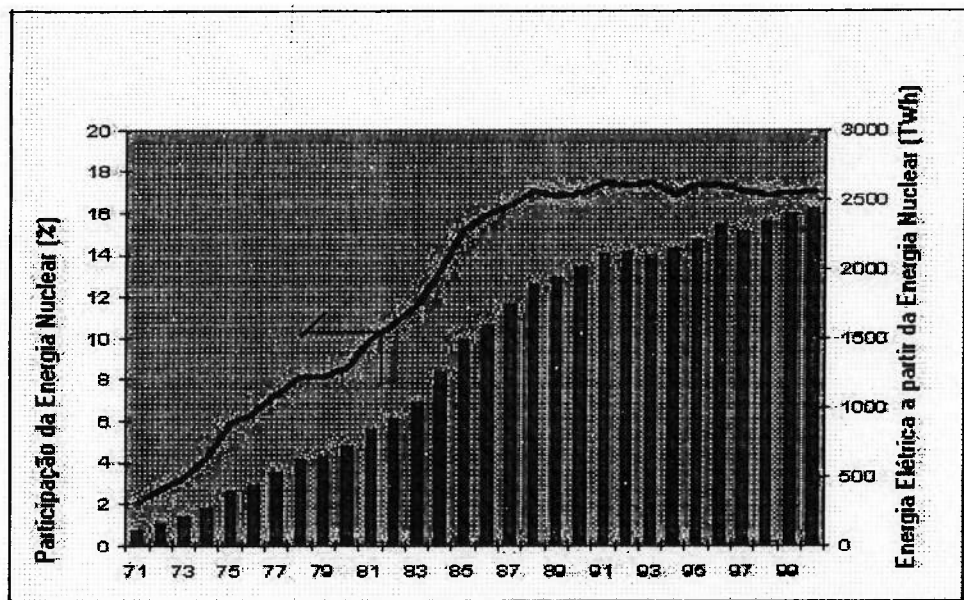


Figura 1. Evolução mundial da participação da energia nuclear destinada a geração de energia elétrica, de 1971 a 2001.(Adaptado da referência 6)

Em 2001, a participação das fontes não-renováveis na oferta mundial de energia foi de 65% conforme pode ser observado na figura 2, colocando a sociedade diante do desafio de buscar por fontes alternativas de energia. A busca por fontes alternativas de energia não pode demorar a ocorrer, sob o risco de o mundo, literalmente, entrar em colapso, isto se for mantido o atual modelo de vida, em que o petróleo tem uma importância vital.

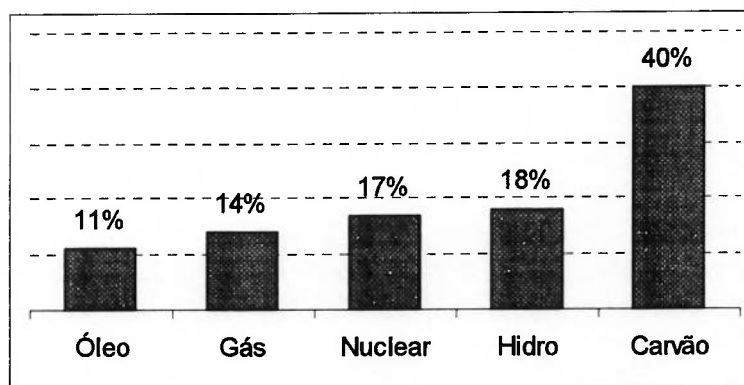


Figura 2: Participação percentual das fontes energéticas na matriz energética mundial no ano de 2001. (Adaptado da referência 14)

Hoje, ano base 2001, existem 439 reatores em operação em 33 países, representando 17% da geração mundial de energia elétrica e 33 novas usinas estão sendo construídas representando 7,5% da capacidade atual, e outras 33, equivalentes a 9,9% da capacidade atual, estão planejadas ou em processo de licitação. Estas informações estão detalhadas na tabela 1. Quinze países tem em seu balanço energético a energia nuclear representando mais de 25% de suas necessidades. França e Lituânia obtêm 75% de sua energia de fontes nucleares. Embora a quantidade de plantas nucleares construídas atualmente seja menor do que as construídas nas décadas de 70 e 80, as que estão em operação apresentam maior produtividade. Em 2000 foram produzidos 2447 bilhões de kWh representando um aumento de 15% sobre os seis anos anteriores. Este valor é equivalente à entrada de 30 novas usinas nucleares em operação. Entretanto, entre 1995 e 2000, foram entregues somente cinco novos reatores. O aumento de produção foi devido ao melhor desempenho operacional das usinas existentes. (6)

Tabela 1. Quadro apresentando o estágio de desenvolvimento das usinas nucleares destinadas a geração de energia elétrica, no biênio de 2000-01.(Adaptado da referência 6).

País	Energia Elétrica Gerada em Usinas Nucleares		Usinas em Operação		Usinas em Construção		Usinas Planejadas	
	10 ⁹ kWh	%	N	MWe	N	MWe	N	MWe
Argentina	5.7	7.3	2	935	0	0	1	692
Armênia	1.8	33	1	376	0	0	0	0
Bélgica	45	57	7	5728	0	0	0	0
Brasil	5.6	1.5	2	1855	0	0	1	900
Bulgária	18	45	6	3538	0	0	0	0
Canada	69	12	14	9998	6	3598	0	0
China Continental	16	1.2	5	3702	6	4835	0	0
Formosa	37	24	6	4884	2	2600	0	0
Republica Checa	14	19	5	2560	1	912	0	0
Finlândia	21	32	4	2656	0	0	0	0
França	395	76	59	63203	0	0	0	0
Alemanha	160	31	19	21141	0	0	0	0
Hungria	15	42	4	1755	0	0	0	0
Índia	14	3.1	14	2548	6	3526	3	1400
Irã	0	0	0	0	1	950	0	0
Japão	305	34	54	44301	3	3696	12	15858
Coréia do Norte	0	0	0	0	0	0	2	1900
Coréia do Sul	104	41	17	13920	3	2850	8	9200
Lituânia	8.4	74	2	2370	0	0	0	0
México	7.9	3.9	2	1310	0	0	0	0
Holanda	3.7	4.0	1	452	0	0	0	0
Paquistão	1.1	1.7	2	425	0	0	0	0
Romênia	5.1	11	1	655	0	0	1	620
Rússia	120	15	30	20793	3	2625	3	2950
Eslováquia	16	53	6	2472	2	840	0	0
Eslovênia	4.5	3.7	1	679	0	0	0	0
África do sul	13	6.7	2	1842	0	0	0	0
Espanha	59	28	9	7345	0	0	0	0
Suécia	55	39	11	9460	0	0	0	0
Suíça	24	36	5	3170	0	0	0	0
Ucrânia	72	47	13	11195	0	0	2	1900
Reino Unido	78	22	31	12282	0	0	0	0
Estados Unidos	754	20	104	98406	0	0	0	0
Total Mundial	2447	17	439	355.956	33	26.432	33	35.420

1.2. Energia Nuclear na Propulsão de Embarcações

Desde que Cornelius Drebbel, em 1622, fabricou um submarino primitivo no qual navegou durante duas horas pelo rio Tâmsa, inspirado nas caixas idealizadas por Leonardo da Vinci e que tinham o objetivo de prolongar a estada dos homens sob a água, esta tem sido a figura de mérito seguida por todos os projetistas navais.

Na aplicação naval e no caso de embarcações militares a instalação nuclear mostrou determinadas vantagens insuperáveis em comparação com as instalações de propulsão convencionais, sobretudo no caso dos submarinos. Uma das vantagens é a independência energética, pois devido ao longo período entre “reabastecimentos”, 5 a 10 anos, a embarcação tem uma autonomia infinita, limitada apenas pelas necessidades da tripulação e por desgastes das máquinas, podendo se deslocar para uma zona de conflito sem necessidade de uma embarcação de apoio ou base para reabastecimento. Outra vantagem da propulsão nuclear, que é vital quando se fala em submarinos, é a independência do ar, que torna o submarino praticamente invisível pois não necessita subir à cota periscópica para recarregar as baterias, situação onde o submarino fica vulnerável a um ataque.(2)

A história dos submarinos nucleares foi iniciada em 1955, com a construção do USS Nautilus pela marinha americana. Nos dois primeiros anos navegou 62.562 milhas. Em julho de 1958 realizou a navegação, inédita, por baixo da calota de gelo do Polo Norte. (2)

Em aplicação na propulsão de embarcações comerciais, a energia nuclear se mostrou operacionalmente competitiva para as linhas de carga rápidas, considerando-se que os primeiros projetos tiveram caráter experimental. Estas embarcações foram testadas nas décadas de 60 e 70 com os navios Savannah (EUA – 1962 a 1970), Otto Hahn (Alemanha – 1968) e Mutsu (Japão – 1973). Tendo sofrido dificuldades de atracação em inúmeros portos e protestos de vários setores da sociedade, os projetos foram descontinuados.(2) e (10)

Atualmente, mesmo com as alterações no cenário político, as instalações propulsoras nucleares continuam em desenvolvimento, adequando-se às novas filosofias de emprego das embarcações militares, prevendo zonas de conflito localizadas, em

regiões bem definidas e não mais um conflito de amplitude global como era previsto anteriormente.

Os submarinos com propulsão nuclear estão divididos em duas categorias(4) e (10)

- Submarinos Nucleares de Ataque: a propulsão tem como fonte de energia um reator nuclear, mas o armamento carregado a bordo **não** é nuclear.
- Submarinos Nucleares Balísticos: a propulsão tem como fonte de energia um reator nuclear, e o armamento carregado a bordo **são** mísseis balísticos com ogivas nucleares.

Os países que possuem embarcações militares com propulsão nuclear são os Estados Unidos, Rússia, China, França e Inglaterra com as quantidades apresentadas na tabela 2.

Tabela 2: Quadro da distribuição das embarcações militares com propulsão nuclear por país, em 2002. (Adaptado da referência 4)

País	Submarinos Nucleares		Navios de Superfície
	de Ataque	Balísticos	
Estados Unidos	97	44	16
Rússia	124	70	7
China	5	1	0
Inglaterra	13	5	0
França	6	7	2
Total	245	127	25

1.3. Razão e Emoção em Torno da Tecnologia Nuclear.

O início da utilização da energia proveniente da fissão nuclear foi marcada pela explosão de duas bombas lançadas sobre as cidades japonesas de Hiroshima e Nagasaki, a fim de abreviar o fim da II Guerra Mundial, que provocou a morte de milhares de pessoas da população civil.

Este tipo de atitude marcou negativamente a energia nuclear, relacionando a sua existência à tragédia e à catástrofe e não ao progresso e ao desenvolvimento. Isto tem ocasionado, ao longo do tempo, nos países onde se pretende instalar usinas e reatores nucleares, o protesto e longas discussões sobre a necessidade de utilizar esta fonte de energia.

Neste processo discursivo existe o lado dos opositores, que é constituído por pessoas e grupos organizados que combatem argumentando que os benefícios advindos desta tecnologia não compensam os riscos envolvidos. Em que pese o conhecimento e domínio da tecnologia na fase de projeto, construção e operação, os rejeitos originados pós-operação, mais precisamente o plutônio com meia-vida de 10000 anos, seriam um legado muito pesado e injusto para as gerações posteriores à nossa, além de ser a matéria prima necessária para a construção de artefatos para uso militar e de destruição em massa.(7)

Os defensores baseiam-se nos argumentos científicos, técnicos e estatísticos para racionalizar os riscos de operação envolvidos em uma usina nuclear, minimizando-os através de normas rígidas de projeto, pesquisa e aplicação de novas tecnologias, treinamento de pessoal e controle das instalações existentes.

Na direção do desenvolvimento científico, investe-se em pesquisas de novos materiais, processo de fabricação e controle que venham a diminuir as possibilidades de se ocorrer desastres ou falhas durante a operação.(7)

Nas estatísticas internacionais, o setor nuclear está classificado como uma das atividades industriais com menor índice de acidentes, apesar da complexidade dos processos que lhe são inerentes.(6)

Várias razões explicam esse cenário, principalmente a prioridade concedida à medidas preventivas e mitigatórias, que se traduzem, na prática, em normas de segurança rigorosas a serem observadas durante a construção, operação e desativação de usinas nucleares.(6)

Para efeito de comparação, um levantamento detalhado dos desastres que causaram, oficialmente, mais de 90 mortes cada um, ocorridos no mundo todo ao longo do século XX, é consequência das mais diversas atividades industriais e, sem

contabilizar acidentes de transportes ou resultantes de falhas estruturais, não inclui qualquer acidente em instalações nucleares.(6)

Por outro lado, este mesmo levantamento aponta:

- Dezoito desastres envolvendo explosões de gases ou líquidos inflamáveis derivados de petróleo;
- Doze desastres resultantes da manipulação negligente de explosivos, munições ou fogos de artifício;
- Cinco desastres causados por explosões em fábricas, indústrias químicas, depósitos de produtos químicos e instalações portuárias;
- Cinco desastres causados por poluição atmosférica, envenenamento por mercúrio e vazamento de substâncias tóxicas, incluindo nesta o mais grave desastre industrial do século XX, ocorrido no ano de 1984, na cidade de Bhopal, Índia, causado pelo vazamento da substância tóxica isocianato de metila a partir de uma fábrica de inseticidas, resultando em 3.849 mortes;
- Três desastres desencadeados por explosões de nitrato de amônio, que é uma substância utilizada em alguns países como fertilizante ou matéria-prima para explosivos;
- Também se incluindo neste levantamento os desastres ocorridos em atividades de mineração, constatam-se oito ocorrências que resultaram em mais de 400 mortos cada uma, sendo seis delas em minas de carvão. (6)

Até hoje, ano de 2002, foram registrados apenas seis acidentes em instalações nucleares com vítimas fatais, totalizando 90 mortos, número menor que o verificado, portanto, em um dos desastres não nucleares citados. Os que apresentaram maior número de vítimas foram os ocorridos:

- Em 1957 na cidade de Windscale, Reino Unido quando ocorreu um incêndio em um reator nuclear destinado a produzir plutônio para fins militares, causando um número estimado de 39 mortes;
- Em 1986 em Chernobyl, Ucrânia com a explosão e incêndio no reator nuclear 4 daquela usina nucleoeletrica, decorrentes de violações grosseiras das normas de

segurança durante a operação, provocando, até o momento, um número oficial de mortos igual a 45, dos quais 31 morreram nos três primeiros meses depois do acidente e 14 morreram ao longo dos dez anos seguintes.(6)

O risco à sociedade representado por uma usina nuclear é menor que o risco decorrente de outras atividades industriais com as quais esta mesma sociedade já está acostumada a conviver e que, não obstante, seguem normas de segurança bem menos rigorosas.(6)

1.4.Gestão da Qualidade na Industria Nuclear.

A aplicação e utilização da energia nuclear estão presentes em nossos dias, com aplicações civis e militares, e sujeita à rejeição da população. A tecnologia nuclear pode ser considerada recente, não amadurecida completamente, com a comunidade científica ainda pesquisando e desenvolvendo-a para minimizar os riscos e melhorar a sua utilização, diminuindo a vulnerabilidade.(1)

Os equipamentos e instalações destinados às usinas nucleares recebem o mais rígido e intensivo controle, tendo em vista que a comunidade científica e tecnológica conhece e entende o alto poder de destruição que há nestas instalações devido a sua elevada densidade energética.(6)

Existem entidades internacionais que têm a finalidade reguladora e de inspeção para garantir o projeto, perfeito funcionamento e estado de manutenção das instalações, tendo como representante no Brasil a CNEN–Comissão Nacional de Energia Nuclear.(1) e (9)

Quando se desenvolve o procedimento de fabricação de um equipamento, seja de grandes ou pequenas dimensões, todas as verificações exigidas pela norma adotada devem ser realizadas para garantir que não haverá interferência na qualidade do produto final. Se no transcorrer do projeto há a necessidade de efetuar-se alteração neste procedimento, as verificações realizadas no projeto original devem ser realizadas novamente.(9)

O Diagrama de Ishikawa (8) é ferramenta da qualidade amplamente utilizado na indústria, servindo como parâmetro de orientação para os trabalhos destinados à

indústria nuclear e um destes diagramas está apresentado no Anexo E. Este Diagrama estabelece que se alguma coisa tiver que apresentar erro será originado em um dos seis itens indicados a seguir:

- Meio-ambiente: temperatura, iluminação, pressão, ruído, etc.
- Método de fabricação: processo, controle, rastreabilidade, ações corretivas, etc.
- Mão-de-obra: treinamento, qualificação, motivação, especialização, etc.
- Máquinas e equipamentos: manutenção, precisão, características, estado, etc.
- Matéria-prima: fornecedor, qualificação, produção, garantia de especificação, etc.
- Medidas: registro, controle, equipamentos de medição, etc.

Com o apoio desta ferramenta, se, por exemplo, for realizada a substituição da matéria-prima destinada à fabricação de um componente de equipamento de usina nuclear, que já tenha passado pelo processo de caracterização e desenvolvimento do processo, o procedimento deverá ser, novamente, avaliado para se manter a rastreabilidade do processo.

O projeto e fabricação da vareta e elemento de combustível têm os requisitos de qualidade estabelecidos pela CNEN e apresentados em norma interna (9) e requer:

“Controle de fabricação da vareta: controle de fabricação da vareta com relação às características da coluna de pastilhas de combustível, teor de hidrogênio, enriquecimento, integridade das soldas, pressão interna, análise do gás interno e dimensões.”

1.5. Histórico do Desenvolvimento deste Projeto.

O projeto fonte deste trabalho teve o início em 1985 utilizando-se como material básico o aço inoxidável austenítico AISI 304L para a fabricação do elemento combustível de reatores nucleares do tipo PWR. Este material foi adotado como alternativa inicial por estar disponível no mercado nacional, por ser viável

tecnicamente para ser utilizado na fabricação de varetas combustível e ser acessível economicamente.

Os processos de fabricação, usinagem e soldagem, metodologia de ensaios, equipamentos especiais foram desenvolvidos apresentando resultados que atenderam as rígidas especificações nucleares.

Posteriormente, após ter obtido a confiabilidade e capacidade técnica de fabricação, foi realizada a opção em substituir o aço inoxidável austenítico 304L pelo aço inoxidável austenítico 348, por este apresentar melhor desempenho quando submetido às condições de irradiação por nêutrons existentes no interior do reator nuclear. Este material não foi adquirido no mercado, mas foi parte de uma encomenda especial, sendo fornecido com certificado e registro de qualidade assegurada.

A participação do autor neste projeto ocorre desde 1988, quando iniciou as atividades de engenheiro naval no projeto do submarino nuclear brasileiro, e, diretamente, no projeto da vareta combustível a partir de 1998 quando foi incorporado ao grupo responsável pela análise da substituição de material e re-qualificação do processo de soldagem.

2. OBJETIVO

Os procedimentos de trabalho adotados nas indústrias nucleares determinam a rastreabilidade de todo o processo produtivo com a documentação de todas as etapas e alterações realizadas.

O objetivo principal deste trabalho é avaliar e justificar a utilização do aço inoxidável austenítico AISI 348 em substituição ao 304L, em um processo de soldagem TIG autogeno, aplicado em vareta combustível de usina nuclear.

3. INTRODUÇÃO TEÓRICA

A teoria inicial que possibilitou o desenvolvimento nuclear foi formulada em 1789 quando o físico Max Klaproth isolou um óxido de urânio. Posteriormente, a formulação da teoria da relatividade por Albert Einstein produziu as condições teóricas para o desenvolvimento prático, culminando em 1942 com a inauguração do primeiro reator nuclear, ilustrado na figura 3, na Universidade de Chicago em projeto desenvolvido por Enrico Fermi.(12) e (13)

A base da energia nuclear está centrada na fissão de núcleos de determinados isótopos de Urânio e Plutônios através de nêutrons, gerando uma grande quantidade de energia.(10)

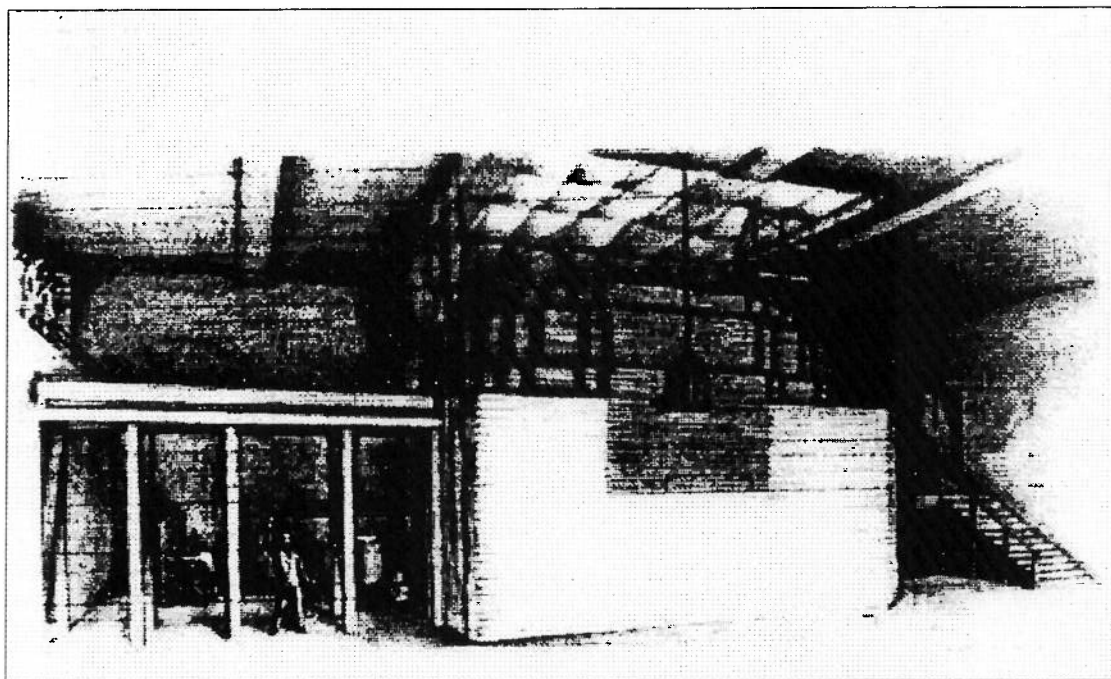


Figura 3: Primeiro reator nuclear de pesquisa do mundo inaugurado em 1942 na Universidade de Chicago. (Retirado da referência 13)

3.1 Conceitos de Energia Nuclear

3.1.1 A Fissão Nuclear (2), (11) e (14)

A fissão é o resultado da interação entre nêutrons e átomos pesados, e o controle da potência é efetuado através do balanço na quantidade de nêutrons livres para iniciar o

processo de fissão, dos neutrons perdidos através do processo de captura, e da fuga de nêutrons do núcleo.

O conhecimento dos três modos de interação entre o nêutron livre e o átomo é importante para o entendimento dos processos envolvidos na física dos reatores. Os três modos são:

a) Espalhamento: o neutron é refletido ou capturado pelo átomo sendo em seguida emitido com menor energia cinética, da ordem de 1eV , em conjunto com raios gama. O nêutron já com menor energia é chamado de nêutron lento ou térmico. O espalhamento é considerado elástico quando a energia do nêutron é transferida para o átomo sob a forma de energia cinética e inelástica quando parte da energia do nêutron é transferida para o átomo na forma de energia interna, excitando o átomo. Este processo de interação é de grande importância nos reatores nucleares, pois a obtenção de nêutrons térmicos está diretamente relacionada com a manutenção da reação em cadeia da fissão.

b) Captura: o nêutron é capturado pelo átomo, dando origem a um isótopo deste e emitindo o excesso de energia na forma de radiação gama. Esta forma de interação tem grande importância no controle de reatores, pois determina a quantidade de nêutrons livres para a continuidade da reação, sendo mais provável ocorrer quando a interação é realizada com nêutrons de baixa energia do que com os de alta energia.

c) Fissão: após a absorção do nêutron, o núcleo formado parte-se em dois elementos excitados com massas denominados de produtos da fissão, normalmente, na proporção de dois para três. Estes produtos de fissão liberam partículas alfa e beta, nêutrons e raios gama para atingirem o equilíbrio.

Somente U^{235} , U^{233} e Pu^{239} são estáveis o suficiente para serem armazenados por períodos longos e fissionáveis por nêutrons de qualquer energia, rápidos ou térmicos.

Somente o U^{235} é encontrado na natureza: o U^{233} tem origem do Th^{232} e o Pu^{239} tem origem no U^{238} .

Uma grande quantidade energia é emitida na fissão e com a liberação de neutrons, permitindo a auto sustentação da reação em cadeia. A energia provém do chamado

“defeito de massa”, onde a massa total (átomo + neutron) antes da fissão é maior que a massa total final. Esta energia é calculada pela eq.(1):

$$E = mc^2 \quad (1)$$

- E = energia liberada
- m = diferença entre as massas
- c = velocidade da luz

Os nêutrons liberados são oriundos da instabilidade dos núcleos dos produtos de fissão, conforme eq.(2).



Na fissão de um átomo de U^{235} são liberados aproximadamente 2,48 nêutrons e radiações gama de várias intensidades. Estas radiações gama têm origem na própria fissão do átomo, no decaimento dos produtos de fissão e na ativação de alguns átomos. Na fissão de um átomo de U^{235} temos a liberação de aproximadamente $200 \cdot 10^6$ ev de energia, enquanto que na combustão de um átomo de C_{12} tem-se 4 ev de energia liberada, ou seja, para a mesma massa, o urânio libera 2,5 milhões de vezes mais energia que o C_{12} . Desta energia liberada, 80% é energia cinética dos produtos de fissão e 20% na forma de raios gama e cinética das partículas beta e nêutrons.

3.1.2 Radiação (2), (11) e (14)

Na estrutura atômica tem-se basicamente duas forças contrárias presentes no núcleo dos átomos: a força de atração intranuclear, existente entre os nêutrons, entre os prótons e entre nêutrons e prótons e a força de repulsão existente entre os prótons, que é de origem eletrostática.

Com o aumento do número atômico, ou número de massa, a força de repulsão passa a ser predominante, tornando o núcleo do átomo instável, devido ao desequilíbrio entre as forças de atração e repulsão. Para atingir o equilíbrio, o núcleo emite radiação, que são partículas e radiações eletromagnéticas, num fenômeno chamado decaimento radioativo. A radiação está presente na natureza de várias formas, como por exemplo, nos raios solares e em tubos de imagem de televisores. Neste fenômeno o átomo

radioativo passa por várias emissões até atingir o equilíbrio, sendo o tempo necessário para a redução do número de átomos radioativos à metade, conhecido por meia-vida. Este processo varia exponencialmente com o tempo.

No fenômeno de decaimento radioativo são emitidas, basicamente, partículas alfa (2 prótons + 2 nêutrons) ou beta (1 elétron). A partícula beta surge da transformação espontânea do nêutron em partícula beta, um próton e um neutrino. Quando há perda de um próton, ocorre sua transformação em um nêutron, um elétron positivo e um neutrino. A energia excedente após as emissões alfa ou beta é liberada, conforme eq.(3), na forma de radiação eletromagnética chamada gama,



As radiações podem ainda variar em função da sua energia, assim os nêutrons podem possuir energia de milhões de eletron-volts quando liberados do núcleo de um átomo até 0,025 ev quando à temperatura ambiente, após ter reduzido sua energia em várias interações com outros materiais.

Os raios gama possuem sua energia associada à emissão de fótons, variando entre 0,1 Mev e 10 Mev.

3.1.3 Interação da Radiação com a Matéria (11), (14) e (22).

A interação da radiação com a matéria ocorre quando as partículas alfa, beta, gama, nêutrons, e outros íons pesados atingem o material.

A partícula alfa é uma emissão radioativa pouco penetrante devido ao seu grande tamanho, podendo ser facilmente freada, reduzindo o poder de penetração, e produzindo uma ionização muito intensa no meio atingido.

A partícula beta tem um poder de penetração maior e um poder de ionização menor que a partícula alfa, devido ao seu tamanho menor, sendo também facilmente freada.

A radiação gama possui uma alta velocidade, igual a da luz, sendo altamente penetrante e difícil de ser freada, tendo um poder de ionização menor que as partículas alfa e beta.

Os nêutrons rápidos têm massa próxima à do átomo de Hélio, carga nula, alta velocidade e transportam alta energia.

As microestruturas dos materiais irradiados podem ser afetadas por diversos modos:

Primeiro, dependendo da massa e energia cinéticas das partículas incidentes e das características do material alvo poderá ocorrer o deslocamento físico dos átomos do material alvo. Este deslocamento poderá ser pontual ou provocar uma linha na estrutura cristalina. Os resultados práticos deste deslocamento são o “inchamento” e a fluência por radiação.

Segundo, os átomos que constituem as ligas de materiais que desempenham a função estrutural podem reagir, ocasionando segregação microquímica com alteração na matriz.

Terceiro, a transmutação poderá ocorrer produzindo alterações químicas e físicas, assim os aços aplicados em estruturas podem ter as propriedades mecânicas alteradas. Os aços podem possuir traços de Boro em sua constituição química, dos quais 20% são isótopos ^{10}B e um nêutron térmico poderá, conforme reação da eq.(4), reagir com este isótopo produzindo Hélio.



Gerando uma quantidade de Hélio que acarretará conseqüências danosas para a microestrutura.

As alterações microestruturais induzidas pela radiação alteram o comportamento das propriedades mecânicas convencionais tais como: resistência à fadiga, resistência à fluência, tenacidade à fratura, tensão de escoamento e tensão de ruptura. Além disso, produz o surgimento de duas novas propriedades: inchamento metálico e estabilidade à radiação.

Na análise da interação entre radiação e matéria é importante o conhecimento das seguintes definições:

a) Fluxo de partículas: é o fluxo de partículas incidentes sobre a matéria é definido pelo tipo de radiação, pela densidade e energia das partículas, representada pela seguinte eq.(5)

$$\Phi = \int \Phi(E).dE \quad (5)$$

- Φ = fluxo total, em partículas.cm⁻².s⁻¹

- $\Phi(E)$ = fluxo de partículas que tem energia cinética entre E e (E+dE)

Somente uma porção do fluxo das partículas com energia maior que um valor mínimo especificado poderá ser considerado como sendo possível de provocar um deslocamento atômico, variando de valor de acordo com o tipo de reator.

b) Fluência: é o total de radiação que incidiu sobre o material por um determinado período de tempo e é representada pela eq.(6)

$$Fluência = \int_0^t \Phi(t).dt \quad (6)$$

- **Fluência** = em partículas * cm⁻²

- **t** = tempo de exposição a radiação

- $\Phi(E)$ = fluxo de partículas que têm energia cinética entre E e (E+dE)

A fluência, também, é definida para valores de energia acima de um valor mínimo, que varia de acordo com o tipo de reator.

c) Seção de choque: muitas vezes a seleção de um material em particular para um ambiente radioativo é ditado pelas características físicas do maior átomo e não pelas características mecânicas. Por exemplo, a necessidade de absorver e moderar a radiação de nêutrons requer materiais que tenham esta capacidade, como a grafite. Neste caso, a propriedade importante é a que indica a probabilidade da matéria refletir ou absorver os nêutrons incidentes. Esta propriedade é conhecida como “seção de choque microscópica”, representada pelo símbolo σ , tendo as seguintes definições:

- σ_a é a seção de choque de absorção;
- σ_s é seção de choque de espalhamento;
- a unidade é expressa em **barns** equivalendo a 10^{-24} cm².

d) Seção de choque macroscópica: representa a taxa de ocorrência da interação das partículas com o material atingido e definida pela eq.(7).

$$\Sigma = \Phi \sigma N \quad (7)$$

- Σ = taxa de ocorrência da reação, em s^{-1}
- N = densidade de átomos do material.

O poder de absorção e espalhamento de nêutrons é muito importante para a escolha dos materiais que compõem um reator, pois ditam a quantidade de nêutrons livres para a reação em cadeia.

3.2 O Reator Nuclear (11), (14) e (15).

As instalações nucleares têm como princípio de operação aproveitar a fissão dos núcleos de determinados isótopos de Urânio e Plutônio através de nêutrons, gerando a cada fissão uma grande quantidade de energia (200 MeV), produtos de fissão radioativos e nêutrons de altas energias.

Com o efeito da fissão de vários núcleos e com a conseqüente emissão de nêutrons a cada fissão é gerada uma reação em cadeia que, controlada, pode ser utilizada para várias finalidades.

Os reatores nucleares, independentemente do tipo, devem possuir os meios para manter e controlar a reação em cadeia, realizando as seguintes funções:

- Produzir calor e transferi-lo para o refrigerante;
- Manter a pressão interna, sem a perda do refrigerante;
- Prover a estrutura para suportar o combustível nuclear.

Os reatores nucleares podem ser classificados de acordo com os seguintes critérios:

1. Energia dos nêutrons utilizados para a fissão
 - Reatores rápidos ou intermediários ou térmicos
2. Propósito de funcionamento do reator
 - Reatores de potência, de pesquisa ou de ensino.
3. Tipo de combustível e/ou refrigerante e/ou moderador.
 - Reatores refrigerados a gás: GCR, AGR, HTGR e GCFBR.
 - Reatores refrigerados e moderados a água leve: PWR e BWR

- Reatores de água pesada: HWR
- Reatores rápidos: FBR

O Anexo A contém tabela elaborada a partir da referência (15), comparando os modelos de reatores aplicados na geração de energia elétrica e indicando quantidade de reatores em operação.

Os reatores do tipo PWR estão sendo utilizados em 252 instalações de geração de energia elétrica representando 60 % do total.

Também na aplicação de propulsão de embarcações os reatores do tipo PWR representam a maioria das unidades instaladas.

Os reatores refrigerados a água, PWR, BWR, PHWR e LWGR estão sendo empregados comercialmente há mais de 30 anos. Aproximadamente 96% da capacidade mundial instalada em centrais nucleares são com estes tipos de reatores e 84% são com centrais nucleares com reatores a água leve do tipo PWR e BWR. Os combustíveis para todas estas centrais são acondicionados em varetas combustíveis do tipo descrito em 3.2.1.3.

Os principais parâmetros operacionais de um reator nuclear do tipo PWR tendo como exemplo o instalado na Usina Nuclear de Angra dos Reis, Angra-II, estão indicadas no Anexo B.

3.2.1 Os Reatores Nucleares do Tipo PWR

3.2.1.1 O Vaso de Pressão

Os reatores do tipo PWR, figura 4, são vasos de pressão, verticais, com tampo e fundo hemisférios, com o projeto sendo realizado para atender os requisitos da norma. Os projetos, por exemplo, que seguem os requisitos do ASME têm um livro de códigos específico para a área nuclear que é a “Section III, Division 1 Rules for Construction of Nuclear Power Plant Components”.

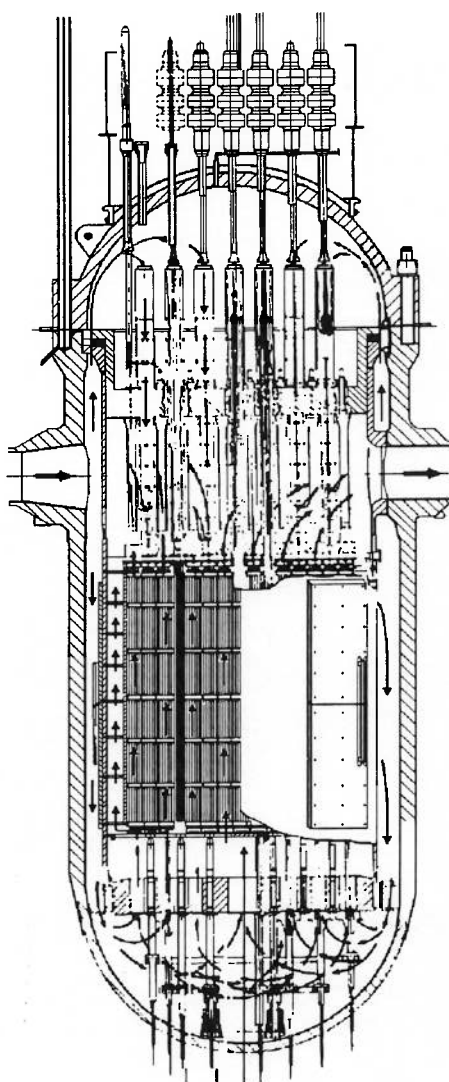


Figura 4: Corte apresentando o interior de um reator nuclear do tipo PWR (Retirado da referência 11)

O líquido refrigerante circula no interior do vaso do reator, por entre os elementos combustíveis, retirando o calor gerado, a uma pressão média do sistema de 158 bar e temperatura média de 300 °C.(11).

3.2.1.2 O Elemento Combustível

O elemento combustível é um conjunto estrutural, vide figura 5, que tem a finalidade de manter o combustível nuclear no interior do reator, composto de vários componentes tais como: vareta combustível, vareta de controle, etc.

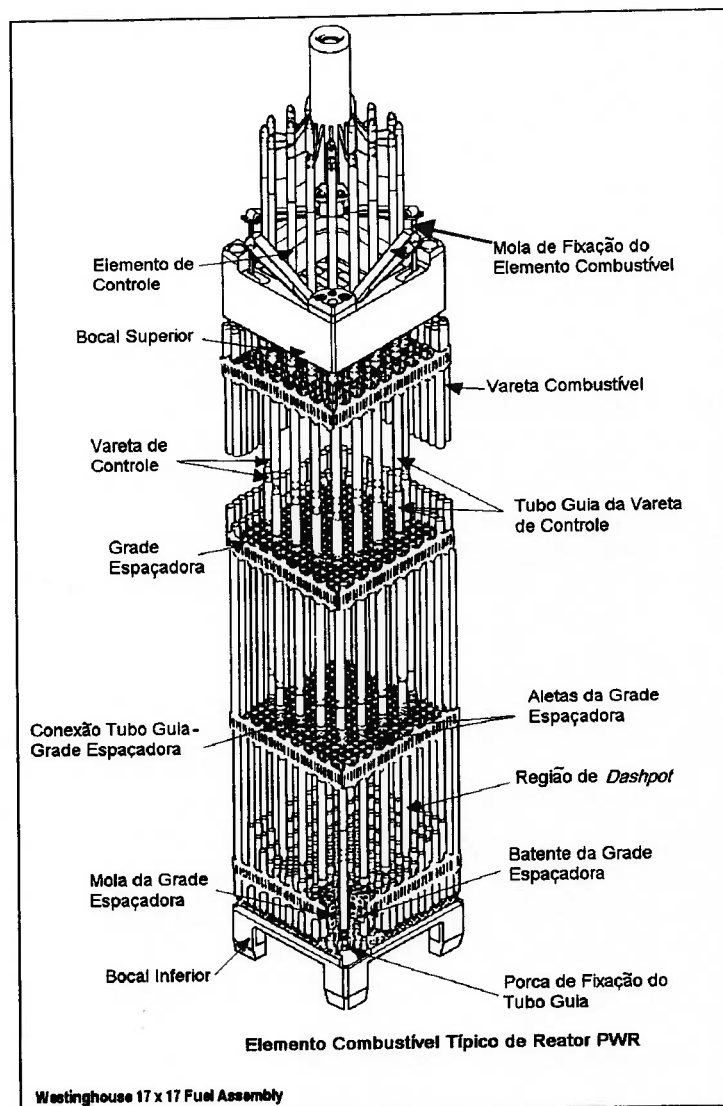


Figura 5: Vista em perspectiva do conjunto elemento combustível utilizado em reatores nucleares do tipo PWR (Retirado da referência 16)

O combustível nuclear utilizado nos reatores PWR é o UO_2 , apresentado sob a forma de pastilhas cerâmicas sinterizadas e acondicionado em invólucro individual metálico denominado “vareta combustível”. (11).

A quantidade de elementos combustível e varetas combustível é função da potência a ser gerada pela instalação. O reator nuclear instalado em Angra dos Reis, usina de Angra-II, possui 193 elementos combustível tendo cada um 236 varetas combustível e 20 varetas de controle.(11).

3.2.1.3 A Vareta Combustível

A vareta combustível, figura 6, contém de forma isolada o material fissil, sendo constituída dos seguintes itens: tubo metálico de revestimento, tampões, pastilhas de combustível, pastilha isolante e mola de fixação.

As temperaturas na região central das pastilhas podem estar acima de $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ e, devido a baixa condutividade térmica do UO_2 e a alta potência gerada no reator, leva a existência de altos gradientes térmicos na pastilha de combustível. Como consequência, são geradas tensões térmicas que podem causar rachaduras no material cerâmico, mas para não provocar problemas de desempenho e vazamento de material radioativo para o líquido refrigerante, o revestimento metálico deve ser projetado para resistir a este colapso e conter o material combustível.(11)

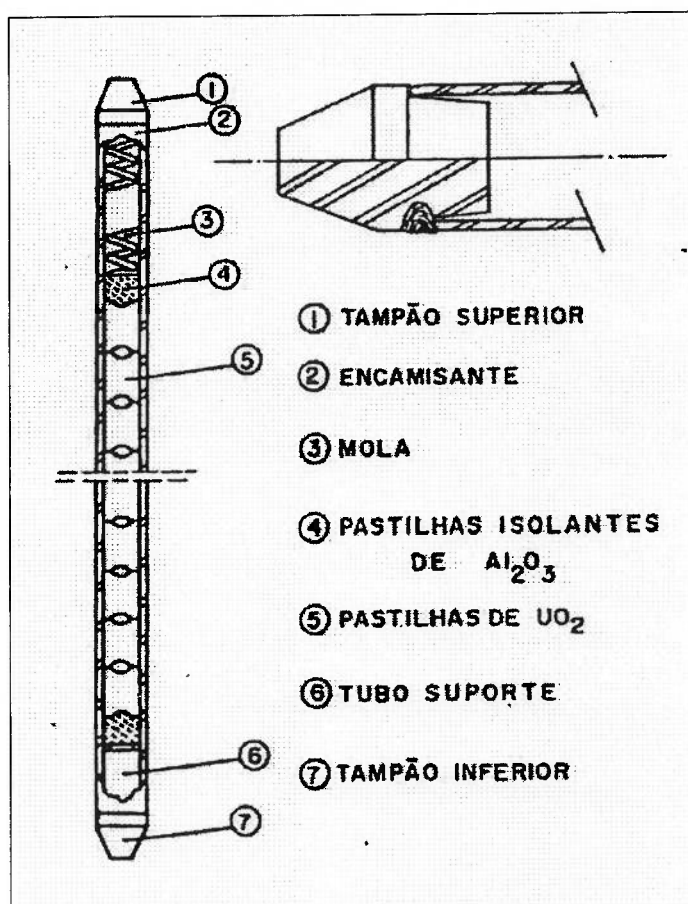


Figura 6: Vareta combustível de reator nuclear tipo PWR (Retirado da referência 11)

O tubo metálico de revestimento e os tampões de extremidades são fabricados em aço inoxidável austenítico e devem manter estanques as pastilhas combustível bem como os produtos de fissão gasosos produzidos durante a irradiação.

As varetas são preenchidas e pressurizadas com gás Hélio para melhorar a transferência de calor das pastilhas para o revestimento e deste para o refrigerante, já que existe uma folga entre as pastilhas e o tubo.

3.3 Materiais

Os materiais empregados na fabricação de equipamentos e componentes de instalações nucleares seguem os requisitos estabelecidos pelas normas escolhidas para o projeto, sendo os principais e de modo genérico os indicados na tabela 3.

Tabela 3: Relação dos principais materiais utilizados na fabricação de um reator nuclear e respectiva aplicação. (Adaptado das referências 11 e 17)

Aplicação	Função	Materiais utilizados
Combustível	Conter os elementos que irão produzir as fissões da reação em cadeia	Urânio, Plutônio e Tório.
Estrutural	Estrutura e revestimento dos componentes do reator.	Aço inoxidável, Zircalloy e ligas de Níquel.
Moderador	Moderar a energia dos nêutrons produzidos na fissão.	Grafite, Água leve, Água pesada e Berílio.
Absorvedor	Manter de forma controlada a reação em cadeia dentro do núcleo	Boro, Cádmiio, Hafnio, Índio, Prata e Gadolínio.
Refrigerante	Retirar o calor gerado no interior do núcleo do reator devido à fissão nuclear	Hélio, CO ₂ , Água pesada, Metais líquidos.
Blindagem	Barreira da radiação para atenuar efeito sobre equipamento e meio exterior.	Água leve e elementos de alto e médio número atômico (Pb, Fe, etc).

As propriedades dos materiais aplicados na indústria nuclear podem ser divididas em duas categorias: (17)

Categoria I:

Propriedades gerais: são as propriedades de materiais convencionais na engenharia e referidas na maioria dos projetos, a saber: resistência mecânica, ductilidade,

capacidade de manter integridade dimensional, conformabilidade, usinabilidade, soldabilidade, resistência à corrosão, propriedades de transferência de calor, estabilidade térmica, compatibilidade e disponibilidade.

Categoria II:

Propriedades especiais: são as que resultam das fontes de radiação nuclear ou irradiação e das condições do sistema do reator e são as propriedades neutrônicas, radioatividade induzida, estabilidade à irradiação, interação química e interdifusão de partículas.

As *propriedades neutrônicas* consistem na forma de interação dos nêutrons com o material e pode ser por fissão, captura e espalhamento. A medida da probabilidade da interação é denominada “seção de choque” e cada elemento da composição do material possui uma característica própria de seção de choque, de absorção e de espalhamento.

A *radiatividade induzida* das reações nucleares é constituída pelas partículas alfa e beta e pela radiação gama emitida durante as transmutações nucleares. A transmutação nuclear e a produção de isótopos são geradas devido à absorção de nêutrons térmicos ou rápidos em um reator nuclear. Se a radiação induzida tiver meia vida longa ou a radiação gama for de alta energia dificultará a inspeção, reparo e atividades de manutenção.

A *estabilidade à irradiação* é o comportamento dos materiais devido à irradiação com nêutrons. Estas irradiações induzem as alterações sensíveis nas propriedades físicas, mecânicas e metalúrgicas. Os efeitos observados, por exemplo, são inchamento e densificação do combustível e alterações na ductilidade e fluência dos materiais estruturais.

A *interação química e a interdifusão de partículas* são freqüentemente observados entre o material combustível e o utilizado no revestimento, enfraquecendo a integridade estrutural e a estabilidade à irradiação, prejudicando a transferência de calor do combustível para o refrigerante.

Os materiais estruturais têm o comportamento perante a radiação, conforme apresentado na tabela 4. (11)

Tabela 4. Efeitos da radiação nas propriedades dos materiais estruturais de um reator nuclear. (Adaptado da referência 11)

Propriedade	Efeito da radiação
Tensão de escoamento para material recozido.	Aumenta
Tensão de escoamento para material encruado	Função da temperatura de irradiação.
Tensão de ruptura para material recozido.	Aumenta
Tensão de ruptura para material encruado	Função da temperatura de irradiação.
Ductilidade	Diminui
Dureza	Aumenta
Fragilização	Aumenta
Temperatura de transição dúctil-frágil.	Aumenta
Fluência	Aumenta
Tempo de ruptura por fluência.	Diminui
Resistência à fadiga – Alto ciclo	Aumenta
Resistência à fadiga – Baixo ciclo	Diminui
Condutividade térmica	Diminui
Difusividade térmica	Diminui
Coefficiente de expansão térmica	Aumenta ligeiramente.

3.3.1 Materiais das Varetas Combustíveis.

Os aços inoxidáveis austeníticos AISI da série 300 formam a categoria dos aços inoxidáveis com maior produção e aplicação no mundo, sendo conhecidos por sua excelente resistência contra a corrosão generalizada em meios levemente agressivos, por apresentarem boas propriedades mecânicas e boa soldabilidade. São utilizados tanto em altas como em baixas temperaturas.(19) e (20)

A família de aços inoxidáveis austeníticos AISI está representada no fluxograma existente no Anexo C deste trabalho.

Conforme referências (11) e (17), as ligas adotadas para a fabricação das varetas combustível são a 304L e a 348.

O material a ser utilizado nos tubos segue o especificado na norma ASTM-213 (47) aplicada para tubos sem costura utilizados na fabricação de superaquecedores e trocadores de calor.

A seguir estão apresentadas as características nominais destes materiais de acordo com a norma ASTM (47).

3.3.1.1 Características Nominais do AISI 304L.

O aço inoxidável austenítico AISI 304L é originado a partir do 304, conforme fluxograma da família da Série 300 apresentado no Anexo C, com a redução do teor de Carbono para produzir a melhora da soldabilidade. (21)

A composição química e propriedades mecânicas típicas do aço inoxidável austenítico AISI 304L são:

a) Composição química (% em peso)

Elemento	Tubo	Barra
	ASTM A-213(47)	ASTM A 403(51)
C	0,035 max	0,035
Mn	2,00	2,00
Si	0,75 max	1,00
Cr	18 a 20	18 a 20
Ni	8 a 13	8 a 13
P	0,040	0,045
S	0,030	0,030

Obs: Os valores indicados são os máximos, a menos que tenha outra indicação.

b) Propriedades mecânicas típicas (47) e (51):

- Tensão de ruptura, 485 MPa
- Tensão de escoamento com 0,2 % de “offset”, 170 MPa
- Alongamento em 50mm, 35 %

- Dureza Vickers, máx. 200 kg/mm²

3.3.1.2 Características Nominais do AISI 348.

O aço inoxidável austenítico AISI 348 é estabilizado ao Nióbio e Tântalo sendo especificado para estruturas soldadas que trabalhem em altas temperaturas. A aplicação na indústria nuclear impõe restrição aos teores de Cobalto e Tântalo. (21)

A composição química e propriedades mecânicas típicas do aço inoxidável austenítico AISI 348 são:

a) Composição química (% em peso)

	Tube	Barra
	ASTM A-213(47)	ASTM A 403(51)
C	0,08 max	0,08
Mn	2,0	2,00
Si	0,75 max	1,00
Cr	17 a 20	17 a 20
Ni	9 a 13	9 a 13
P	0,040	0,045
S	0,030	0,030
Nb + Ta	10 x %C < % < 1%	10 x %C < % < 1%

Obs: Os valores indicados são os máximos, a menos que tenha outra indicação.

b) Propriedades mecânicas típicas: (47) e (51)

- Tensão de ruptura, 515 MPa
- Tensão de escoamento com 0,2 % de "offset", 205 MPa
- Alongamento em 50mm, 35 %
- Dureza Vickers, máx. 200 kg/mm²

3.3.1.3 Equivalência de Normas

A equivalência aproximada e identificação dos aços inoxidáveis austeníticos AISI 304L e 348 em outros sistemas de normas é apresentada na tabela 5.

Tabela 5. Equivalência entre normas internacionais para identificação dos aços inoxidáveis austeníticos AISI 304L e 348. (Adaptado da referência 63)

NORMA	PAÍS	MATERIAL 1	MATERIAL 2
AISI	EUA	304 L	348
UNE	Espanha	F.3503-X 2 Cr Ni 18-10	F.3524-X 6 CrNiNb 18.10
GOST	URSS	03 Ch 18N11	08 Ch 18N 12B
SS	Suécia	2352	2238
JIS	Japão	SCS 19 e SUS304L	SUS 347
UNI	Itália	X 2 Cr Ni 18 11 X 2 Cr Ni 18 11 GX 2 Cr Ni 19 10	X6CrNiNb18 11 X8CrNiNb18 11
BS	Inglaterra	304 S11: LW 20 LWCF 20 S.536 T;74 304 C 12 (LT 196) 305 S :11	347 S 20 347 S.31 347 S 51 ANC 3 B 2 S. 130 2 S. 143/144/145
AFNOR	França	Z1 CN 18-12 Z2CN 1810/Z3CN 1910M Z3 CN 1810;Z3 CN 1911 Z3 CN 1911 FF	Z6 CNNB 18-10 X6 CrNiNb 18-10
DIN	Alemanha	X2CrNi 19-11 GX 2 CrNiN 18-8	X5CrNiNb18 10

3.4 Fragilização pela Radiação (17) e (22).

No item 3.1.3 anterior está descrito, de modo geral, o processo de interação da radiação sobre a matéria, transformando os átomos em íons positivos através do deslocamento de elétrons ou transferindo energia tornando os átomos excitados. A visualização esquemática destes fenômenos está apresentada na figura 7, em figura obtida a partir da referência (48).

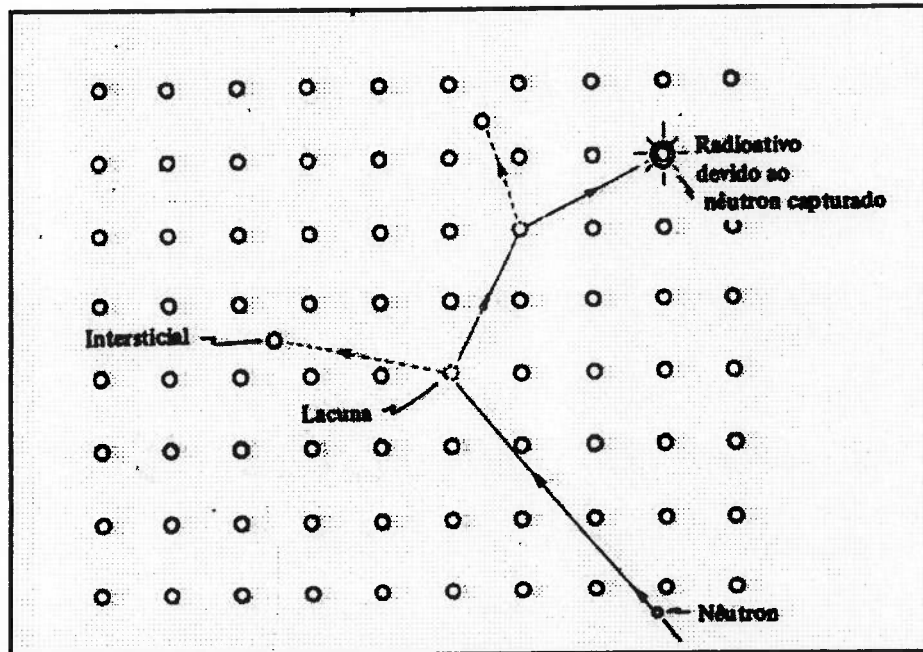


Figura 7. Esquema demonstrando os efeitos causados pela passagem de um nêutron por um cristal metálico. (Retirado da referência 48)

A passagem de uma partícula pelo interior da matéria poderá fazer com que um átomo se torne ionizado devido a captura de um nêutron, ou provocar um deslocamento causando o aparecimento de uma lacuna no material.

Dependendo da densidade do fluxo e da energia cinética das partículas, ao invés de uma lacuna pontual, será criada uma linha de ruptura acompanhando a trajetória do feixe de partículas.

A interação entre a radiação e a microestrutura dos materiais metálicos ocorre de modo similar, provocando alterações em sua estrutura, modificando propriedades e influenciando no desempenho dos mesmos.

O efeito da radiação, por exemplo, sobre alguns materiais metálicos tende a aumentar a dureza e outras propriedades mecânicas como limite elástico e resistência, mas ao mesmo tempo tende a diminuir a ductilidade.

Os efeitos da radiação apresentados na tabela 6 ilustram as conseqüências da influência da radiação sobre as características de materiais metálicos de uso comum. A referência utilizada para elaborar a tabela 6 não apresentou a indicação da fluência de neutrons a que foram submetidos os materiais.

Tabela 6 – Exemplos numéricos de propriedades mecânicas de materiais metálicos alteradas devido a irradiação. (Adaptado da referência 17)

MATERIAL	Tensão de Escoamento		Tensão de Ruptura	
	MPa		MPa	
	Antes da Irradiação	Depois da Irradiação	Antes da Irradiação	Depois da Irradiação
Al- 2SH14	125	160	139	188
Fe – puro	125	215	250	188
Aço Carbono	346	645	520	672

Obs: os valores da tabela estavam em Psi na referência (17) e foram transformados para MPa através do fator de conversão: 1 MPa = 0,006985 psi.

3.4.1 Fragilização nos Aços Inoxidáveis

3.4.1.1. Nos Aços Inoxidáveis Ferríticos

Os materiais ferríticos ao serem irradiados têm como principal alteração de propriedade a diminuição da resiliência, ao mesmo tempo em que ocorre um aumento na temperatura de transição da fratura dúctil à frágil, o que equivale dizer que os materiais que têm a transição de fratura dúctil à frágil em temperaturas próximas a ambiente ao serem irradiados se tornam frágeis. (17)

3.4.1.1. Nos Aços Inoxidáveis Austeníticos (20) a (26)

Os componentes fabricados com aços inoxidáveis austeníticos instalados no interior do reator nuclear estarão submetidos a condições severas tais como irradiação de nêutrons, alta temperatura e alta pressão.

Nas varetas combustível a temperatura poderá chegar a valores acima de $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ e o material deverá manter as suas características dentro do previsto para que não leve à falência o equipamento e comprometa o conjunto.

A ação da irradiação de nêutrons sobre os aços inoxidáveis austeníticos produz alterações microestruturais, sendo que a fragilização dos aços inoxidáveis austenítico ocorre devido a três fatores:

- Fragilização a baixa temperatura: provocada pelos nêutrons incidentes que produzem o deslocamento na estrutura metálica e é inversamente proporcional a temperatura.(17)
- Fragilização a alta temperatura: provocada pela formação de bolhas de Hélio nos contornos de grão sendo diretamente proporcional a temperatura.(17)
- Inchamento: provocada pela formação de vazios por condensação de elementos gasosos.(17)

As alterações devido a radiação e alta temperatura mais observadas estão apresentadas a seguir:

1. Alterações da microestrutura: (23)

Os defeitos encontrados na microestrutura dos materiais metálicos são puntiformes devido ao deslocamento dos átomos de suas posições da rede cristalina pelos nêutrons incidentes. Os defeitos podem ser observados com a determinação das propriedades mecânicas após a radiação.

Na figura 8, está apresentado o gráfico representando a ductilidade após radiação de um aço inoxidável austenítico AISI 316 nas seguintes condições de ensaio:

- Temperatura de $50\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Fluência neutrônica de $3 \cdot 10^{22}\text{ n/cm}^2$

- Energia cinética $E > 0,1 \text{ Mev}$

A baixa ductilidade obtida com temperatura de irradiação menores que $480 \text{ }^\circ\text{C}$ está relacionada com a alta concentração de defeitos na microestrutura. Nas temperaturas mais altas a concentração de defeitos diminui levando ao aumento na ductilidade. Em torno de $550 \text{ }^\circ\text{C}$ átomos de Hélio formados na reação de transmutação começam a apresentar mobilidade e formar bolhas levando a fragilização, que é significativa a altas temperaturas como $750 \text{ }^\circ\text{C}$.

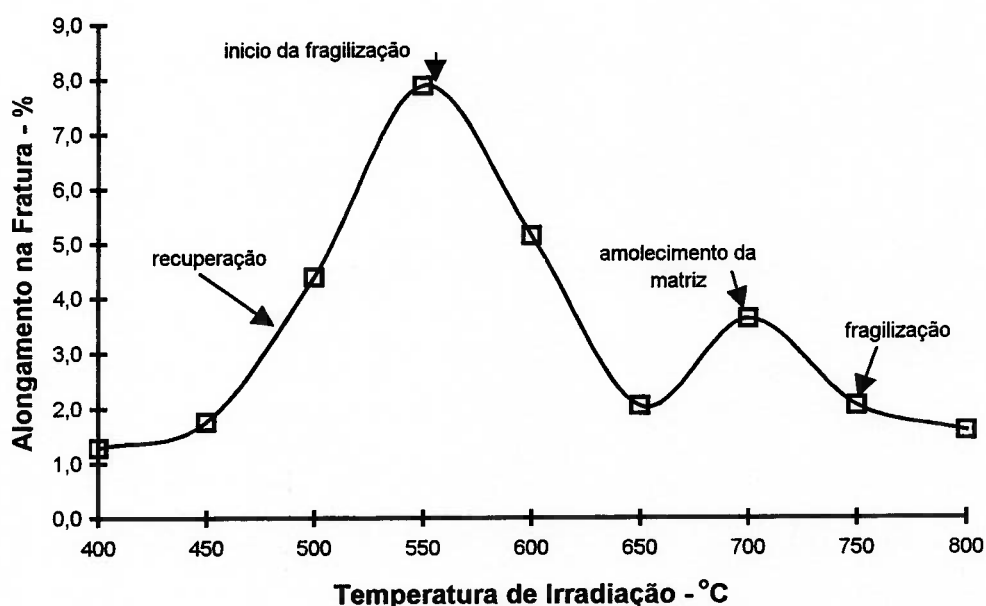


Figura 8. Efeito da temperatura sobre a ductilidade de um aço inoxidável austenítico AISI 316L, sob fluência neutrônica de $3 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$ ($E > 0,1 \text{ Mev}$) e temperatura de teste de $50 \text{ }^\circ\text{C}$. (Adaptado da referência 25)

2. Estabilidade de fases (23)

A estabilidade das fases também é observada durante a irradiação com nêutrons. Os aços inoxidáveis austeníticos podem apresentar transformações de fase devido às alterações químicas em microrregiões. Estas alterações ocorrem devido à migração de soluto para precipitados e/ou vazios. Podendo haver a formação de fases como γ'' (nominalmente Ni_3Si) que não é observado nas mesmas condições fora do reator. Esta fase é instável na ausência de irradiação. Em aços inoxidáveis AISI 316 foi

encontrada uma fração volumétrica de 1,5%, quando submetidos às seguintes condições:

- Temperatura: de 350 °C a 500 °C;
- Fluência neutrônica: $5 \cdot 10^{22}$ n/cm² ;
- Energia cinética: $E > 0,1$ Mev.

Os precipitados normalmente encontrados após tratamento térmicos de envelhecimento, podem ter a cinética de precipitação acentuada e/ou a composição química alterada. A segregação de solutos para precipitados e vazios está relacionada a um mecanismo de transporte envolvendo troca de posições entre solutos e lacunas, levando a um fluxo livre de solutos para os precipitados e outros absorvedores.

3. Efeito dos elementos de liga (23)

As alterações microestruturais que ocorrem durante a irradiação são influenciadas pela presença de elementos de liga. Nos aços inoxidáveis austeníticos, solutos como C, Ni e Si em determinados teores reduzem o inchamento.

Quando em solução de silício, aumenta o tempo de incubação para a nucleação de vazios levando à diminuição no inchamento.

Com o aumento de teor de Carbono de 0,01 para 0,05 % em peso também há diminuição do inchamento.

O efeito dos solutos no inchamento dos aços inoxidáveis austeníticos é sinérgico, parecendo estar relacionado com a formação de fases durante a irradiação ou a migração destes solutos para precipitados e vazios.

A presença do titânio aumenta significativamente a resistência ao inchamento.

4. Propriedades mecânicas (23)

Ocorre significativo aumento na resistência mecânica e diminuição da ductilidade que é dependente das temperaturas de irradiação, fluência neutrônica e temperatura de teste.

A composição química e microestrutura inicial também afetam as propriedades mecânicas.

Na figura 9 está apresentada a variação das propriedades mecânicas para o aço inoxidável austenítico AISI-316 irradiado,

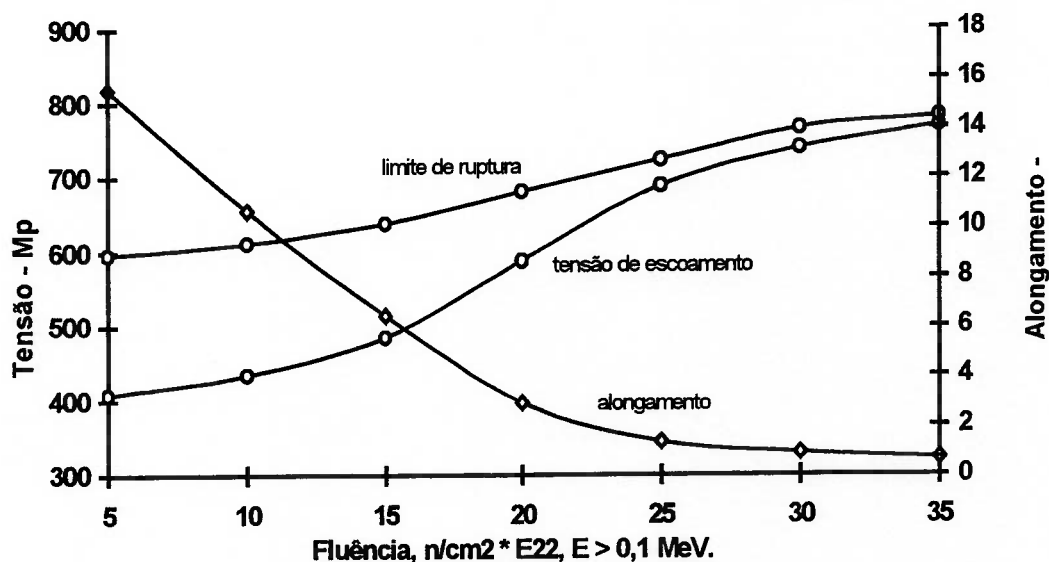


Figura 9. Propriedades mecânicas do aço inoxidável austenítico AISI 316 irradiado entre 400-600 °C e testados a 430 °C. (Adaptado da referência 25)

5. Inchamento (22) e (23)

O inchamento ocorre nos aços inoxidáveis austeníticos devido à aglomeração de defeitos puntiformes formados durante a irradiação. Lacunas podem aglomerar-se e formar vazios e os intersticiais podem formar anéis de discordância. A formação destes aglomerados e vazios depende das condições de irradiação. São formados vazios devido à existência de interações preferenciais entre intersticiais e discordâncias, e entre vazios e lacunas. Isto parece ser devido às discordâncias apresentarem um raio de captura para intersticiais maior que para lacunas, pelo fato de existir uma interação maior entre o campo de tensão estabelecido por um átomo intersticial. No caso das lacunas o campo de tensão é muito menor, por isso existe um fluxo de lacunas para vazios e um fluxo de intersticiais para discordâncias.

O inchamento dos aços inoxidáveis austeníticos depende das condições de irradiação, dos fatores microestruturais e da composição química que, aparentemente, afetam a concentração de defeitos puntiformes e a migração desses defeitos.

6. Fluência induzida pela irradiação (22) e (23)

Nas temperaturas abaixo de 500-600 °C onde, normalmente, a fluência térmica é desprezível poderão ocorrer deformação quando aços inoxidáveis austeníticos forem irradiados sob ação de tensão.

Há várias teorias que procuram explicar o mecanismo de fluência induzida pela irradiação, sendo que a maioria leva em consideração a formação de anéis de lacunas e de intersticiais, o deslizamento de discordâncias ou absorção preferencial de lacunas e intersticiais sob ação de uma tensão.

Entre os mecanismos propostos estão:

- Nucleação preferencial de anéis de intersticiais;
- Absorção preferencial de defeitos puntiformes pelas discordâncias orientadas favoravelmente a uma tensão aplicada;
- Escalagem e escorregamento de discordâncias;
- Deformação orientada pela tensão produzida por crescimento durante irradiação.

A escalagem de discordâncias pode ocorrer com a absorção preferencial de defeitos puntiformes gerados durante a irradiação de nêutrons e após a escalagem, que sob a ação de uma tensão pode ocorrer escorregamento, levando a uma deformação. Isto ocorre devido à interação entre os campos de tensão gerados pelos defeitos e o gerado pela discordância, que é alterada pela ação de uma tensão. Anéis de lacunas também podem ser formados em maior quantidade em planos perpendiculares a uma tensão aplicada.

A formação de anéis de intersticiais pode ser orientada pela tensão e são formados em planos aproximadamente normais a uma tensão de tração. Este favorecimento está relacionado com a diminuição da energia necessária à nucleação dos anéis de intersticiais.

Dos vários mecanismos propostos é possível que mais de um destes atuem simultaneamente dependendo da temperatura, fluência neutrônica e da tensão aplicada.

7. Resistência a corrosão a altas temperaturas. (21)

A exposição dos aços inoxidáveis austeníticos a elevadas temperaturas por longos períodos de tempo pode provocar a formação de vários precipitados, tais como carbonetos e fase sigma. O aumento da precipitação pode dar início ao fenômeno de sensitização do material e, dependendo do meio, causar a corrosão intergranular.

Na indústria nuclear os estudos de sensitização indicam que os reatores de potência operando a temperaturas de 300 °C em combinação com a radiação podem causar a diminuição do teor de Cromo no contorno de grão nos aços inoxidáveis do tipo 304, sem a precipitação na forma de carbonetos.

No processo de soldagem os fatores que podem influenciar no processo de corrosão da junta são:

- Composição e estrutura do material base e de solda;
- Condições metalúrgicas do material base antes da soldagem;
- Processo empregado;
- Procedimento de soldagem;
- Gás de proteção;
- Dimensão e geometria da peça.

Os métodos metalúrgicos para reduzir a sensitização nos aços inoxidáveis austeníticos são:

- Adotar materiais com teor máximo de Carbono igual a 0,03%, que são identificados com a letra "L";
- Tratamento térmico após a soldagem para provocar a redifusão do Cromo na austenita empobrecida;
- Adição de Titânio ou Níobio mais Tântalo para precipitar os carbonetos a alta temperatura evitando que ocorra precipitação de Cromo durante o resfriamento.

Teodoro (26) apresenta a comparação de diversos aços inoxidáveis austeníticos da série 300 em termos de resistência à corrosão.

O objetivo deste trabalho foi o de verificar o comportamento destes materiais a altas temperaturas, tendo em vista que foram projetados para trabalhar em meios corrosivos a médias temperaturas.

Não houve amostras testadas sob o efeito de radiação e as conclusões destacam-se dois pontos:

- Aços com teor de ferrita delta entre 5 a 10% são os mais resistentes à fissuração a quente do que aços completamente austeníticos ou ferríticos.
- Os aços com grau L apresentaram o melhor comportamento quanto às propriedades mecânicas e susceptibilidade à corrosão sob tensão.

3.4.2 No Aço Inoxidável Austenítico AISI-304L

Os conceitos descritos no item 3.4.1. são gerais para os aços inoxidáveis austeníticos e aplicados ao aço inoxidável austenítico 304L e a seguir estão apresentados resultados de ensaios do comportamento deste material sobre o efeito da irradiação.

1. Comportamento dos elementos de liga

Bona (27) apresenta resultados de ensaios realizados com a irradiação de um quilograma de aço inoxidável austenítico 304L sob fluxo de 10^{21} nêutrons.cm⁻².s⁻¹, por longo tempo de exposição.

O objetivo desta exposição foi observar o comportamento dos elementos de liga perante a irradiação, absorção de nêutrons e a atividade remanescente.

Os resultados apresentados na tabela 7 permitem visualizar que após algumas horas o Manganês exposto à irradiação não constituirá problema, pois a sua atividade total decresce rapidamente, enquanto as do Cromo, Níquel e Ferro desaparecem em um ano.

Tabela 7. Atividade total para cada elemento componente do Aço-304L após irradiação quando expostos a um fluxo de $10E11$ n/cm².s e por longo período. (Adaptado da referência 27).

Elemento	Quantidade de Material (%)	Atividade (mCi)	Meia-vida
Fe	70	100	45,1 dias
Mn	2	7.800	2,58 horas
Cr	18	4.500	27,8 dias
Co	1	990	5,25 anos
Ta	1	438	111 dias
Ni	8	23.490	72 dias

Obs: Massa total do material exposto = 1 kg.

2. Fluência induzida pela irradiação

Yoshimoto (25) apresenta a partir dos resultados de ensaios obtidos em bibliografia, a fluência induzida pela irradiação com amostras irradiadas a 380 °C. O gráfico deste ensaio está reproduzido na figura 10.

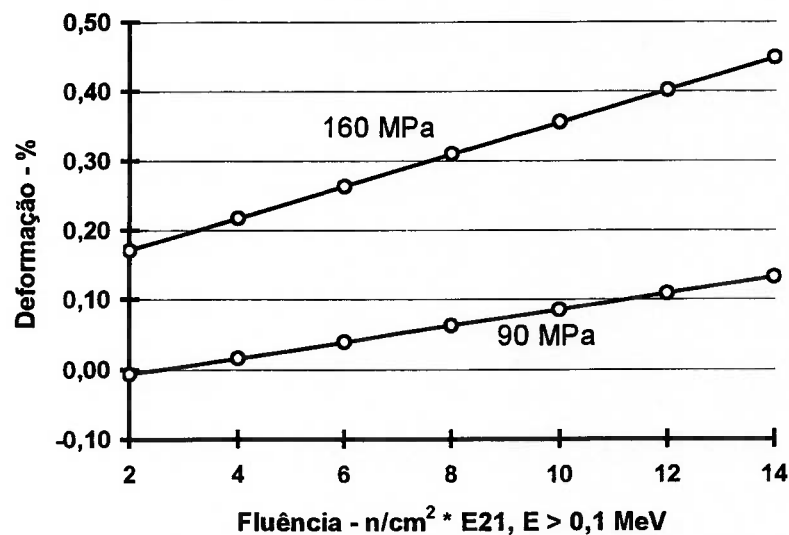


Figura 10. Fluência induzida pela irradiação em aço inoxidável austenítico AISI 304L irradiado a 380 °C. (Adaptado da referência 27)

3. Propriedades mecânicas

Bona (27) adaptou de referências o gráfico com a variação das propriedades mecânicas para o material sendo irradiado a várias fluências neutrônicas e testadas na faixa de 25 a 600 °C. O gráfico está reproduzido na figura 11.

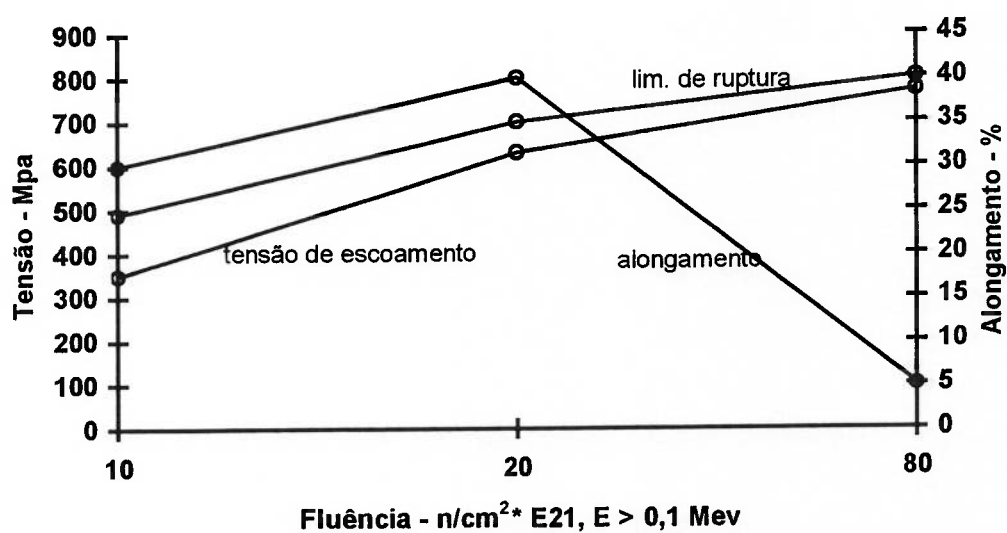


Figura 11. Propriedades mecânicas de tração do aço inoxidável austenítico AISI 304L irradiado a 400 °C. (Adaptado da referência 27)

3.4.3 No Aço Inoxidável Austenítico AISI 348

Os conceitos descritos no item 3.4.1. são gerais para os aços inoxidáveis austeníticos e aplicáveis ao aço inoxidável austenítico 348 e a seguir estão sendo apresentados exemplos de pesquisa sobre o comportamento deste material sobre o efeito da irradiação.

1. Propriedades Mecânicas

Bona (27) apresenta gráfico com as propriedades mecânicas de tração do material irradiado entre 330 e 400 °C e testadas na faixa de temperatura de 310 a 430 °C. com o gráfico reproduzido na figura 12.

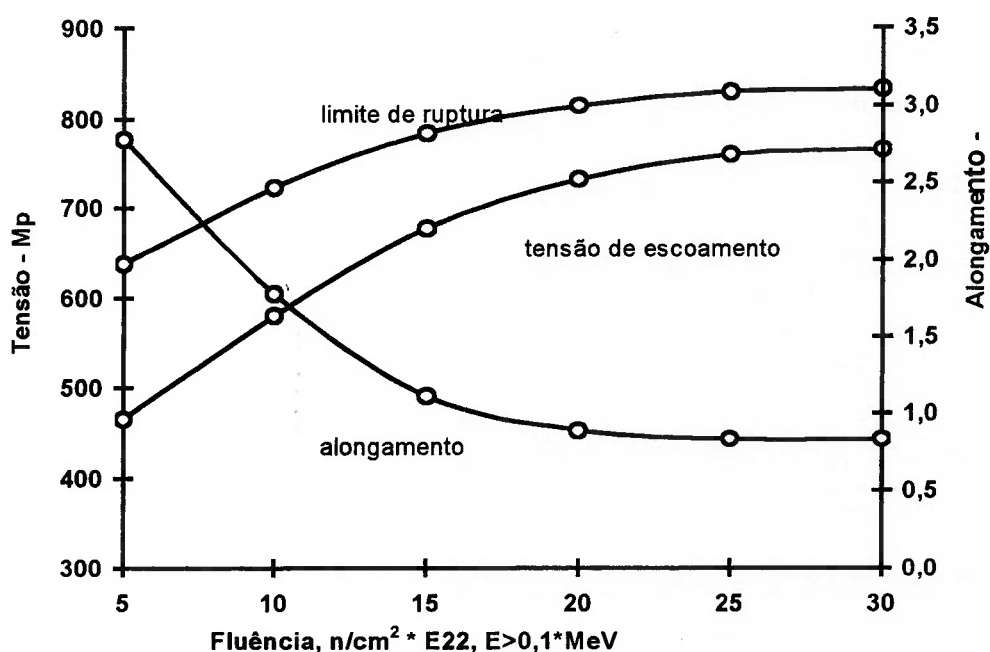


Figura 12. Propriedades mecânicas de tração do aço inoxidável austenítico AISI 348 com amostras irradiadas entre 330 e 400 °C e testadas na faixa de temperatura de 310 a 450 °C. (Adaptado da referência 25)

2. Inchamento

Bona (27) apresenta o gráfico do inchamento observado no aço inoxidável austenítico AISI 348 recozido irradiado a temperaturas entre 330-390 °C. O gráfico está reproduzido na figura 13.

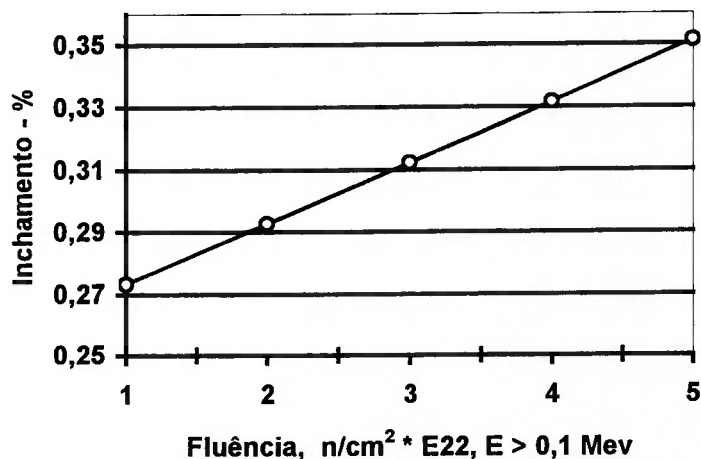


Figura 13. Inchamento de aço inoxidável austenítico AISI 348 recozido a temperaturas entre 330-390 °C. (Adaptado da referência 27)

3. Fluência induzida

Bona (27) apresenta o gráfico da fluência induzida pela irradiação no aço inox 348. O gráfico está reproduzido na figura 14..

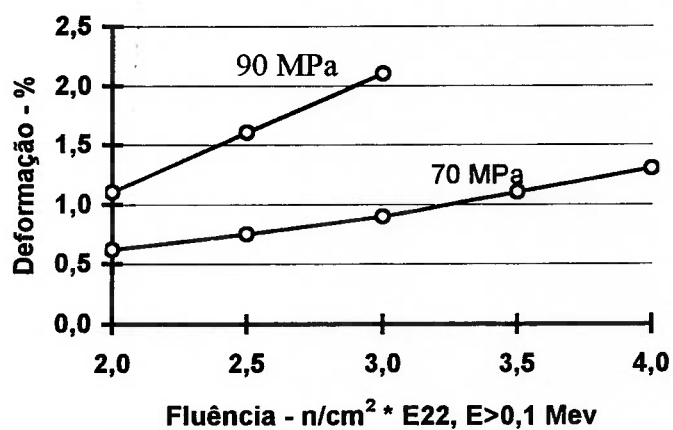


Figura 14. Fluência induzida pela irradiação em aço inoxidável austenítico AISI 348. (Adaptado da referência 27)

3.5 Processo de Soldagem

3.5.1. Histórico

Os processos de soldagem a arco elétrico podem ser considerados centenários ao adotar-se o ano de publicação da patente da “Electrohephaestus” para solda do aço carbono requerida pelo inventor russo Nikolai Nikolaevich Bernardos em 1885. Por outro lado, pode-se, também, considerar a data de início da solda a arco como sendo 1881 quando o francês Auguste de Méritens desenvolveu um equipamento para soldar placas de chumbo para baterias. Entretanto, embora estes experimentos tenham sido importantes, a história da solda a arco pode ter seu início relacionada com os experimentos do inglês Sir William Edwards Staite que descobriu e patenteou uma lâmpada a arco que não tinha nada a ver com uma máquina de solda, mas motivou de Méritens e Bernardos a criar e desenvolverem o sistema de solda a arco (30).

O desenvolvimento a partir destas descobertas foi orientado para a obtenção de geradores de corrente que levassem em consideração os requisitos específicos de um processo de soldagem. Como o soldador manipula o arco, ocorrem variações de tensão que vão do zero quando ele toca a peça com o eletrodo para início do trabalho, até a tensão máxima quando afasta o eletrodo da peça. O gerador de solda tem que ser capaz de manter o arco aberto em todo o ciclo de trabalho.

O equipamento do francês *de Meritens* era capaz de manter o arco aberto, todo o tempo, porque estava regulado para trabalhar na soldagem de placas de chumbo de baterias, que possui baixo ponto de fusão. Na figura 15 está o desenho apresentado para obtenção da patente.

O desenvolvimento de *Bernardos* foi direcionado, a partir do invento de *de Meritens*, para melhorar as condições de geração de corrente, instalando grandes e caras baterias no circuito de geração. Adotando um quadro de comando e resistências variáveis, conseguia variar e controlar o par corrente/tensão dentro de uma faixa. O processo desenvolvido por Bernardos para a solda a arco demorou muito tempo para ser adaptado ao aço e ao ferro. O sinal de aprovação e sucesso desta tecnologia, na época, foi o relato do Prof. Richard Rühlmann do Chemnitz da Alemanha, que em 1887 descreveu os bons resultados obtidos por Bernardos ao reparar uma caldeira em

São Petesburgo, quando a adoção deste processo reduziu o tempo de reparo de 3 dias para 3 horas. (30)

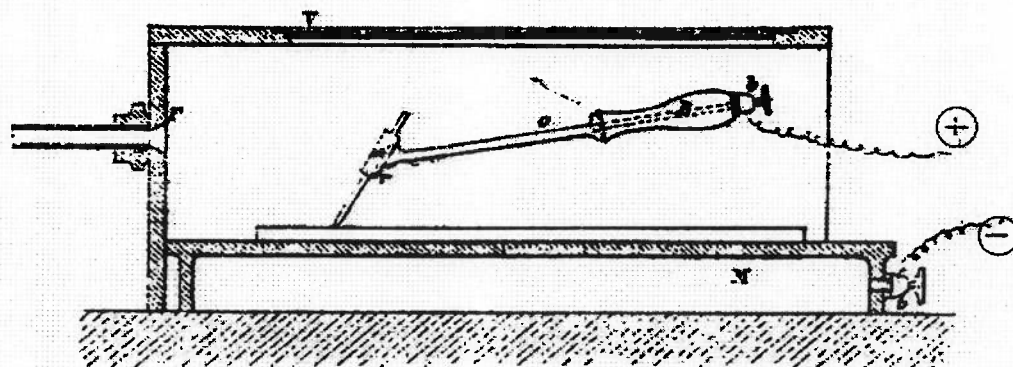


Figura 15. Desenho do equipamento apresentado por *de Meritens* para patentear o processo de soldagem a arco em 1981 (Obtido na referência 30)

A soldagem representou para a indústria nuclear um papel tão importante quanto o representado no início do desenvolvimento da energia elétrica, o de viabilizar a aplicação da tecnologia que começava a se implantar no mundo.

A indústria nuclear teve grande desenvolvimento na década de 70, vide Figura 1, quando a participação na matriz energética evoluiu de menos de 2% para 12 %. Nesta fase a tecnologia de soldagem (41) existente foi fundamental para que este desenvolvimento com a adaptação e certificação dos processos existentes aos rígidos controles e especificações que caracterizam a indústria nuclear,

Os componentes nucleares trabalham em condições críticas, a altas temperaturas, sob a influência de irradiação de partículas, com ciclo térmico e sob pressão, exigindo a devida atenção.

As soldas que estão no interior do vaso do reator submetida a temperaturas na faixa de 500 0C e a pressão de 160 bar tem que apresentar confiabilidade ao longo de todo o tempo de operação da planta, exigindo pesquisa ininterrupta em materiais, processos e caracterização dos processo procurando conhecer o comportamento das juntas soldadas para diminuir os coeficientes de segurança aplicados(55).

A tecnologia de soldagem na década de 70 estava centrada especialmente nos processos a arco elétrico e eletrodo revestido.

3.5.2. Processos TIG e Plasma (36), (37) e (38).

O processo de soldagem TIG produz a coalescência dos metais aquecendo-o com um arco aberto entre um eletrodo de tungstênio, não consumível, e a peça. A proteção do eletrodo e da região de solda é realizada por um gás inerte ou uma mistura de gases. A adição de material de enchimento será realizada, ou não, de acordo com o projeto da junta.

Os equipamentos básicos utilizados neste processo e representados na figura 16 são: fonte de energia, porta eletrodo, eletrodo, suprimento de gás e controles.

O arco elétrico é produzido pela passagem da corrente pelo gás inerte de proteção ionizado. Os átomos ionizados perdem elétrons ficando com carga positiva. Os íons positivos de gás fluem do polo positivo para o polo negativo do arco. Os elétrons fluem do polo negativo para o polo positivo. A abertura do arco pode ser realizada tocando-se o eletrodo momentaneamente na peça e rapidamente colocado à pequena distância, ou através de um dispositivo que provoque o salto de uma faísca do eletrodo para a peça ou com um dispositivo que inicie e mantenha uma pequena corrente piloto entre o eletrodo e a peça, ionizando o gás para o arco principal.

A corrente do arco pode ser contínua ou alternada, e quando a corrente contínua for utilizada é necessário definir se o eletrodo de tungstênio será o ânodo ou o cátodo. Quando for o cátodo (negativo) o fluxo dos elétrons é do eletrodo para a peça. Na situação inversa, com o eletrodo sendo o polo positivo, o fluxo será da peça para o eletrodo. Para uma mesma intensidade de corrente e diâmetro de eletrodo a temperatura na ponta do eletrodo será maior quando estiver ligado ao polo positivo. Isto provoca a formação de uma gota de material fundente na ponta do eletrodo. Um eletrodo suporta 5 vezes mais corrente quando ligado ao polo negativo. A penetração quando se usa a polaridade inversa é baixa e a largura do cordão é maior.

O processo de soldagem a plasma é derivado do processo de soldagem TIG, porém com uma densidade energética maior e maior velocidade dos gases de proteção.

A coalescência é produzida pelo aquecimento com um arco elétrico constricto entre um eletrodo e a peça, denominado arco de transferência, ou entre o eletrodo e o anel de constrição.

A proteção é realizada pelo gás quente e ionizado proveniente do orifício do anel de constrição. Uma proteção suplementar é realizada com uma fonte auxiliar de gás para proteger a solda do ar. O gás de proteção deve ser um gás inerte ou uma mistura de gases. O material de enchimento pode ser utilizado ou não.

O gás que passa pelo orifício flui ao redor do eletrodo, torna-se ionizado no arco para formar o plasma, e sair pelo anel da tocha como um jato de plasma.

A distância que o eletrodo tem de recuo em relação a ponta da tocha é a folga de montagem. O plenum ou câmara plenum é o espaço entre a parede interna do bocal de constrição e o eletrodo. O gás é direcionado desta câmara e através do orifício para a peça.

O equipamento utilizado no processo de soldagem a plasma é semelhante ao do processo de soldagem TIG.

As diferenças existentes entre os dois processos são:

- ◆ processo de soldagem a plasma tem o eletrodo de tungstênio protegido pelo corpo da tocha, e por isso não tendo a possibilidade de haver o contato com a peça, contaminando o cordão de solda, como pode ocorrer no processo de solda TIG.
- ◆ processo de soldagem a plasma tem maior densidade energética e maior velocidade de gás que o existente no processo de solda TIG.
- ◆ processo de soldagem a plasma requer o fluxo de gás para que ocorra a transferência energética e o processo de solda TIG não.
- ◆ Nas mesmas condições de soldagem o processo de soldagem a plasma apresenta maior penetração que o processo de soldagem TIG.

3.5.3. Processo de Soldagem TIG

Os equipamentos básicos necessários envolvidos no processo de soldagem TIG, como representados na figura 16, são: dispositivo para fixação da peça a ser soldada, cabo de alimentação, a tocha ou sistema para fixar o eletrodo de tungstênio,

mangueira para o gás de proteção, cilindro com o gás de proteção, manômetros e válvulas para controle da vazão do gás de proteção, sistema de resfriamento da tocha e fonte de energia.

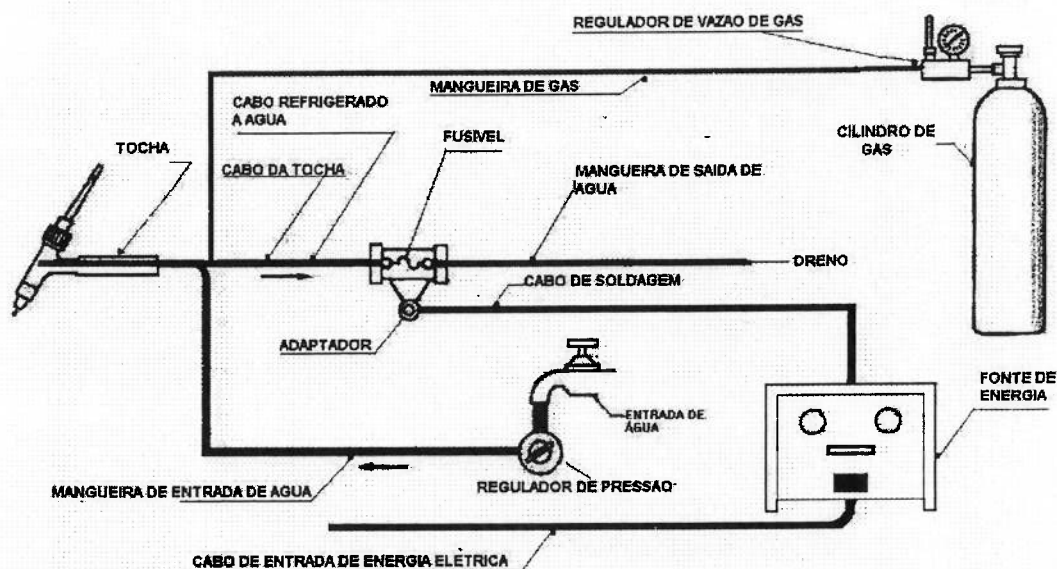


Figura 16. Diagrama esquemático do processo TIG com a tocha sendo resfriada a água. (adaptada da ref. 46).

3,5,3.1. Corrente de Soldagem

O processo de soldagem TIG pode ser utilizado com corrente contínua ou corrente alternada, apresentando o perfil do cordão de solda característico para cada tipo de corrente como os exemplificados na figura 17.

a) Corrente contínua

A utilização de fonte de alimentação em corrente contínua permite a escolha da polarização da corrente, definindo se o eletrodo de tungstênio desempenhará a função de cátodo (polo negativo) ou ânodo (polo positivo).

Quando o eletrodo de tungstênio estiver operando como cátodo, a polaridade é direta, e haverá a migração de elétrons do eletrodo para a peça, desenvolvendo-se mais calor na peça, obtendo-se boa penetração, conforme figura 17a..

Quando o eletrodo de tungstênio estiver operando como ânodo, polaridade inversa, haverá a migração de elétrons da peça para o eletrodo, desenvolvendo-se mais calor no eletrodo, e formando-se uma gota na ponta do eletrodo. A penetração é baixa e a largura da poça de fusão é grande, conforme figura 17b.

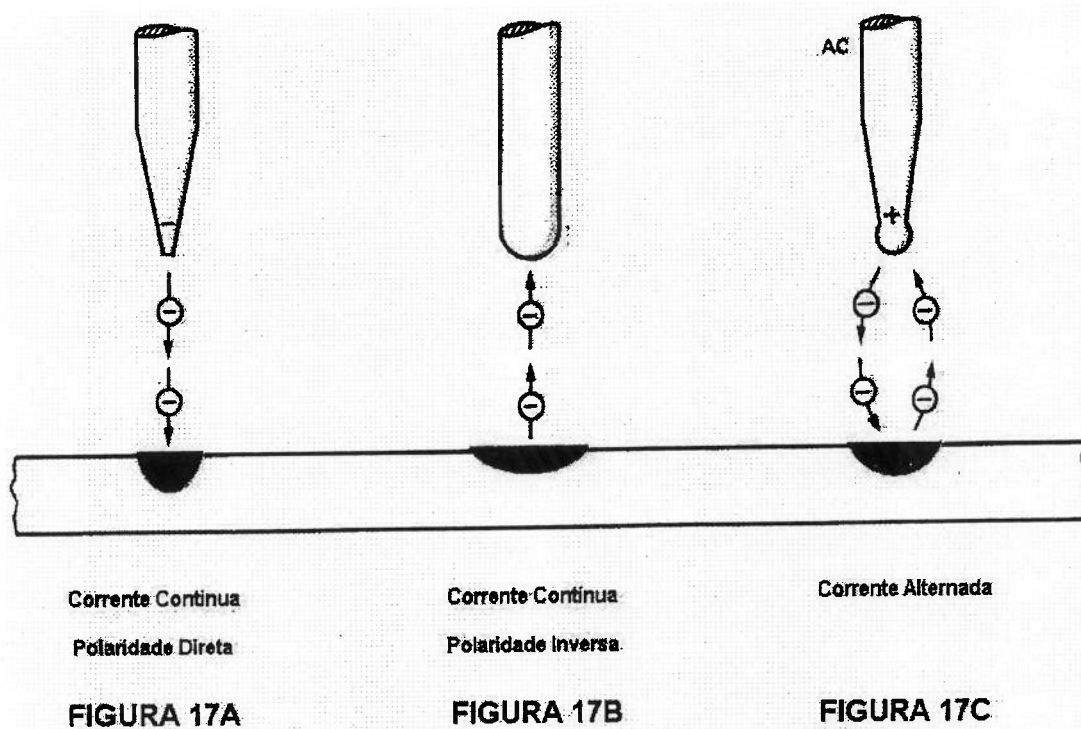


Figura 17. Perfil do cordão de solda para cada um dos três tipos de corrente elétrica possíveis no processo TIG. (adaptado da referencia 46)

A utilização de corrente contínua e polaridade positiva, quando utilizada para a solda de alumínio e magnésio e suas ligas, promove a remoção de óxidos superficiais, obtendo-se uma região brilhante ao longo do cordão de solda. A soldagem por corrente alternada é a alternativa utilizada na solda de alumínio.

b) Corrente alternada

A corrente alternada é utilizada para a soldagem de ligas de alumínio e magnésio. O cuidado que deve ter-se é para que a corrente não atinja valores muito baixos pois isto faz com que o arco extinga-se, interrompendo o processo. A penetração obtida é média, como pode ser observado na figura 17c.

A utilização de corrente contínua e polaridade positiva, quando utilizada para a solda de alumínio e magnésio e suas ligas, promove a remoção de óxidos superficiais, obtendo-se uma região brilhante ao longo do cordão de solda. A soldagem por corrente alternada é a alternativa utilizada na solda de alumínio.

3.5.3.2 Equações Básicas da Soldagem

A parcela da energia transferida ao cordão durante o processo de soldagem e utilizada na fusão do material base é determinada pela fórmula apresentada na eq.(8):

$$H_{\text{fusão}} = f_1 \cdot (E \cdot I / V) \quad (8)$$

$H_{\text{fusão}}$ = Energia do arco utilizada para fundir o material, (J/mm)

f_1 = Fator de eficiência de transferência de calor

E = Tensão (V)

I = Intensidade de corrente (A)

V = Velocidade do arco (mm/s)

O fator de eficiência de transferência de calor (f_1) representa a relação entre a energia gerada pela fonte e a que realmente foi transferida à junta soldada. O seu valor depende da densidade dos gases utilizados na proteção, do processo, do material e pode assumir, no caso da solda TIG, valores que variam de 0,2 e 0,85.

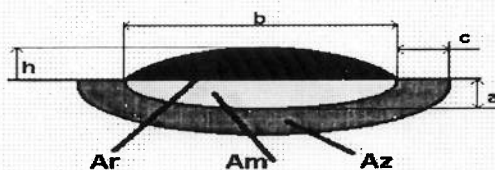


Figura 18. Corte apresentando as dimensões básicas a serem observadas em um cordão de solda.(adaptado da ref. 56)

O cordão de solda é definido como tendo as dimensões e área básicas apresentadas na figura 18, onde tem-se:

- Ar = Área transversal do reforço representada pela altura do material que ultrapassa a dimensão original da peça que está sendo trabalhada. (mm²)
- Am = Área transversal do material fundido. (mm²)
- Az = Área transversal da zona termicamente afetada. (mm²)
- Aw = Área transversal do cordão de solda. e definida na eq.(9).(mm²)
- a = Penetração do cordão. (mm)
- b = Largura do cordão. (mm)
- c = Largura da zona afetada pelo calor. (mm)
- h = Altura, dimensão do cordão que ultrapassa a dimensão principal. (mm)

$$A_w = A_m + A_r \quad (9)$$

$A_w = A_m$, quando a solda for autogena.

A quantidade de calor requerida para fundir e soldar o material é fornecida pela formula indicada na eq.(10):

$$Q = \frac{(T_m + 273)^2}{300.000} \quad (10)$$

T_m = Temperatura de fusão do metal (°C)

A relação entre a área transversal do cordão e a energia fornecida pode ser obtida pela formula apresentada na eq.(11)

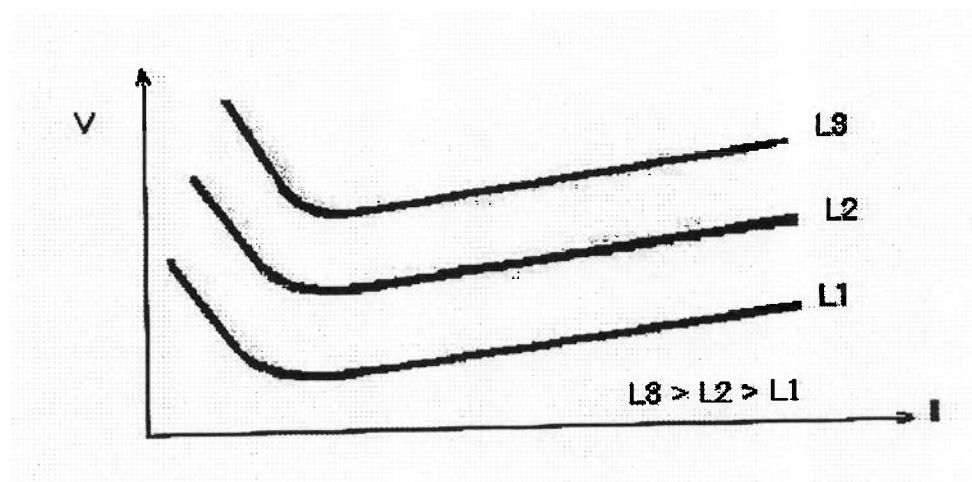
$$A_w = (f_1 * f_2 * V * I) / (Q * v) \quad (11)$$

f_2 = rendimento da fusão do material

3.5.3.3. Intensidade de Corrente e Tensão

A curva característica de tensão x corrente no processo TIG é ilustrada na figura 19, parametrizada em função do comprimento de arco. Exceto para pequenas intensidades de corrente a curva característica apresenta uma pequena inclinação

positiva. As curvas são idênticas para as polaridades direta e inversa, mas fixando-se os valores de intensidade de corrente o valor da tensão será maior para a polaridade inversa.



L = comprimento do arco

Figura 19. Relação entre intensidade de corrente e tensão do arco elétrico (Adaptado da referência 38)

Outras variáveis que influem na relação entre tensão e a intensidade de corrente são o tipo de gás de proteção, a composição do eletrodo e o ângulo da ponta do eletrodo

3.5.3.4. Gás de Proteção

As funções desempenhadas pelo gás de proteção durante o processo de soldagem são: a de proporcionar uma atmosfera facilmente ionizável e proteger a poça de fusão da contaminação do ar atmosférico.

O fluxo de gás deve sair do bocal da tocha de solda em um escoamento laminar para evitar dispersão na atmosfera.

Os gases utilizados no processo de soldagem TIG são: Argônio, Hélio ou uma mistura dos dois.

O Argônio é o gás mais utilizado para proteção, mais pesado que o ar e monoatômico, é facilmente encontrado em vários níveis de pureza, como o grau de “Alta Pureza” que equivale a 99,998% ou o “Grau de Soldagem” que é de 99,995%, sendo aceito para vários trabalhos.

O Argônio é obtido a partir da separação do ar atmosférico liqüefeito, é quimicamente inerte, inodoro, incolor, sem gosto e não é tóxico.

O principal fator que influencia na utilização do Argônio nos processos de soldagem é a sua densidade que é 1,3 vez maior que a do ar e cerca de 10 vezes maior que a do Hélio. Esta característica confere ao Argônio a propriedade de ao ser utilizado como gás de proteção, formar uma camada protetora estável em torno do arco e sob a peça. Com isto utiliza-se uma vazão menor que a utilizada pelo Hélio.

Tabela 8. Propriedades do Argônio e do Hélio. (Adaptado das referências 36 e 37)

Propriedade	Argônio	Hélio	Condição
Densidade (g/l)	1,7837	0,1785	CNTP
Densidade (kg/m³)	77	8	100 bar e 400 °C
Condutividade térmica (W/mk)	3	28	100 bar e 400 °C
Calor específico (J/kg,k)	0,52 * 10 ³	5,2 * 10 ³	100 bar e 400 °C
Potencial de ionização (kcal/mol)	363	567	100 bar e 400 °C
Peso atômico	40	4	-

O Hélio é obtido a partir da separação do gás natural e é um dos gases monoatômicos mais leves sendo quimicamente inerte, inodoro, incolor, sem gosto e não é tóxico. Os graus de pureza alcançados são de “Alta Pureza” equivalente a 99,995% ou o “Grau de Soldagem” que é de 99,95%.

O Hélio sendo mais leve que o ar tende a diluir-se rapidamente na atmosfera, e para se evitar este fenômeno, trabalha-se com vazões altas de gás e o mais próximo possível da peça.

O Hélio apresenta como vantagem tecnológica o seu alto potencial de ionização, gerando uma maior quantidade de calor, quando comparado ao argônio em idênticas condições idênticas de trabalho.

As propriedades dos dois gases são, para efeito de comparação, apresentadas na tabela 8.

3.5.3.5. Eletrodo não Consumível

A especificação dos eletrodos não consumíveis é realizada em função dos parâmetros de soldagem, material a ser soldado, importância da aplicação da peça e local. O material de fabricação pode ser tungstênio puro, com tório e com zircônio. As características de aplicação estão na tabela 9 e a classificação pela AWS conforme tabela 10:

Tabela 9. Tipos de eletrodos e características. (Adaptado da referência 37)

Eletrodo	Características
EWP Tungstênio teor de 99,5%	Menor custo. Aplicado a soldas de pouca responsabilidade. Menor capacidade de corrente Baixa resistência a contaminação
EWPTH1 EWPTH 2 EWPTH 3 Tungstênio, com 1 a 2% de Tória	Maior emissividade de elétrons em relação ao eletrodo puro. Melhor capacidade de corrente. Maior durabilidade. Grande resistência a contaminação. Grande facilidade para abertura e estabilidade do arco.
EWZ Tungstênio com 0,15 a 0,4% de Zircônio	Propriedades entre as do eletrodo de tungstênio puro e o com adição de tório. Bom desempenho em algumas solda com corrente alternada.

O diâmetro e perfil da extremidade são as principais dimensões a serem observadas nos eletrodos. O diâmetro é função da intensidade de corrente a circular em seu interior. A intensidade de corrente é função do suporte de eletrodo, a extensão do

eletrodo para fora do suporte, a posição de soldagem, o gás de proteção e tipo de corrente.

Tabela 10. Identificação e composição química dos eletrodos de acordo com a AWS. (Adaptado da referência 37)

AWS	Tungstênio	Tória	Zircônia	Outros
EWP	99,5			0,5
EWTh-1	98,5	0,8 a 1,2		0,5
EWTh-2	97,5	1,7 a 2,2		0,5
EWTh-3	98,95	0,35 a 0,55		0,5
EWZr	99,2		0,15 a 0,40	0,5

O diâmetro é disponível de 0,25 mm a 6,35 mm e a relação com a operação em corrente contínua e com gás de proteção sendo o Argônio, está indicada na tabela 11.

Tabela 11. Intensidade de corrente e diâmetro de eletrodo para corrente contínua

Diâmetro (mm)	Polaridade direta	Polaridade inversa
	I (A)	I (A)
0,26	Até 15	Não aplicável
0,51	5 a 20	Não aplicável
1,02	15 a 80	Não aplicável
1,59	70 a 150	10 a 20
2,38	150 a 250	15 a 30
3,18	250 ^a 400	25 a 40
3,97	400 ^a 500	40 a 55
4,76	500 ^a 750	55 a 80
6,35	750 a 1000	80 a 125

A geometria da extremidade do eletrodo influencia diretamente a penetração, facilidade de abertura de arco e estabilidade de arco.

Key J.F. (Ref. 57), em 1980, experimentou várias geometrias de eletrodo com gases de proteção para relacionar a geometria do eletrodo e o gás de proteção com a penetração obtida na solda, concluindo que:

- A penetração aumenta com o afinamento do perfil;
- Hélio tem um efeito benéfico na penetração;
- O perfil ótimo para um eletrodo é comandado pela estabilidade do arco.

O esmerilhamento da ponta dos eletrodos deve ser realizado com o devido cuidado, porque apesar de simples e rápido poderá provocar a contaminação da solda ou a produção de um arco não eficiente quando realizado inadequadamente. O posicionamento e manuseio corretos estão representados na figura 20, recomendando-se que:

1. Tungstênio possui alta condutividade térmica por isso recomenda-se que não seja forçado contra o disco do esmeril para que não aqueça de tal modo que queime a mão do operador.
2. Tungstênio tem alta dureza e baixa ductilidade quebrando-se com facilidade, está é outra razão para que seja manuseado com cuidado na operação de esmerilhamento.
3. O esmerilhamento deve ser realizado de modo que as marcas do esmeril no eletrodo acompanhem o seu comprimento e o eletrodo deve ser girado em torno do seu eixo e transladado sobre o disco.
4. O eletrodo deve ser segurado pelo operador de modo que não fique apoiado sobre a palma de sua mão, porque em caso de ser impulsionado violentamente pelo disco não venha feri-la.
5. Os trabalhos no eletrodo não devem ser realizados com ferramentas ou materiais que contenham Carbono, porque contaminarão o eletrodo e conseqüentemente a solda.

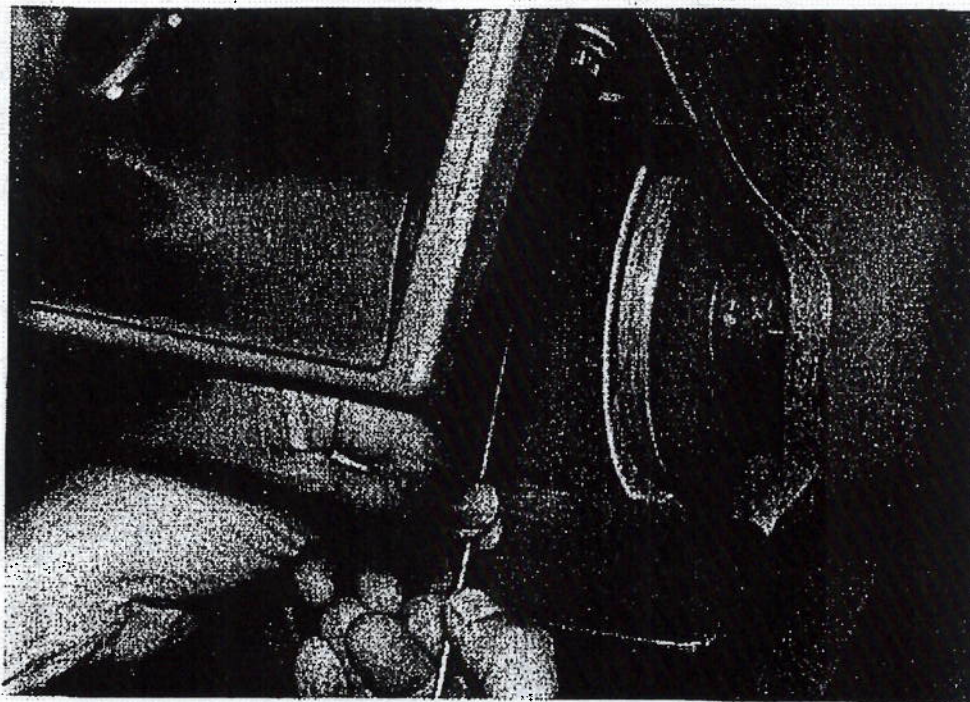


Figura 20: Posicionamento correto para executar a tarefa de esmerilhar o eletrodo de tungstênio (Adaptado da referência 46)

3.5.4. Soldabilidade dos Aços Austeníticos. (28)

Soldabilidade é a capacidade do material ou conjunto de materiais serem soldados seguindo as condições especificadas e apresentar o desempenho adequado quando em serviço. Compreende a compatibilidade do material com o processo escolhido, a capacidade do material ser soldado e a eficácia da junta soldada.

A compatibilidade metalúrgica implica que as transformações ocorridas durante o processo de soldagem possam ser controladas e conhecidas para evitar-se a deterioração da microestrutura.

Os aços inoxidáveis austeníticos tem como pontos a serem verificados na sua estrutura cristalina a formação de ferrita, fase sigma e precipitação de carbonetos

A solidificação dos aços inoxidáveis austeníticos pode iniciar-se com a formação de ferrita e/ou austenita, dependendo, principalmente, de sua composição química ou,

mais propriamente, do balanceamento entre os elementos de liga que promovem a formação de ferrita e de austenita.

O efeito da composição química na seqüência de solidificação dessas ligas foi longamente estudado e identificado quatro modos possíveis de solidificação:

1. Iniciando com a formação de dendritas de austenitas, completando-se com a formação apenas desta fase.
2. Iniciando com a formação de dendritas de austenita, ocorrendo a formação de ferrita entre os braços das dendritas por efeito da segregação de elementos que promovem a formação de ferrita.
3. A ferrita é a primeira fase a se solidificar, na forma de dendritas, A austenita forma-se posteriormente na interface ferrita/líquido, por intermédio de uma reação periférica ou, dependendo das condições de solidificação, pela reação eutética envolvendo 3 fases ($L+\delta+\gamma$).
4. A ferrita é a única fase a se formar na solidificação, tendo-se formação posterior de austenita somente no estado sólido.

Estas são formas de solidificação, existindo outras, dependendo dos elementos de liga existentes no material base, e de como venham a interferir na formação de carbonetos e decomposição em fases sigma e alfa.

3.5.4.1 Efeitos do Teor de Ferrita. (59), (60) e (23)

A presença da ferrita é prejudicial à estrutura formada, fragilizando-a e, para o projeto da junta, vários autores propuseram diagramas e métodos de previsão do comportamento e formação de ferritas após a soldagem.

A ferrita δ é fase magnética de estrutura cúbica de corpo centrado. Na faixa de temperatura 400 e 900 °C uma quantidade de ferrita δ se decompõe em austenita e fase sigma. O aparecimento de fase sigma na microestrutura ocasiona diminuição na ductilidade e tenacidade da junta soldada por ser a fase sigma uma fase dura e frágil, e a fase sigma propiciar local para preferencial corrosão.

O efeito positivo mais importante da ferrita- δ é diminuir a tendência dos aços inoxidáveis austeníticos de sofrerem trincas a quente, que ocorrem devido a

formação de filmes de baixo ponto de fusão nos contornos de grão. As trincas desenvolvem-se na solidificação e resfriamento sob tensões térmicas e de contração.

3.5.4.2 Diagrama de Schaeffler (28) e (56)

O diagrama de Schaeffler, figura (21), é o método prático mais difundido para a avaliação do depósito de solda. Permite estimar com antecedência a composição e a estrutura da solda de um aço ligado. Chega-se a comparar a importância do diagrama de Schaeffler para os aços inoxidáveis à importância do diagrama Fe-C para os aços carbono.

Existia, desde 1920, um diagrama estrutural chamado diagrama de Maurer para os aços ao cromo e níquel, laminados e forjados, porém Schaeffler modificou e o adaptou à soldagem. Utilizando eletrodos revestidos de 4,7 mm de diâmetro e diferentes composições de cromo e níquel, depositou cordões simples e sem diluição conforme as normas da American Welding Society. Determinando a estrutura e a composição do metal depositado foram encontrados os seguintes constituintes:

- Austenita: uma estrutura puramente austenítica, c.f.c., de grande tenacidade, mas sujeita a fissurações a quente.
- Ferrita: uma estrutura ferrítica pura e também uma estrutura austeno-ferrítica.
- Martensita: uma estrutura dura e pouco tenaz, de acordo principalmente com o teor de carbono, sujeita a trincas a frio. Pode ser encontrada pura, ou o que é mais comum, com austenita e/ou ferrita. Nesse caso, suas propriedades devem ser melhores.

Em um sistema de coordenadas, com os eixos representando a composição dos elementos, foram plotados os pontos referentes aos materiais envolvidos, encontrando as respectivas estruturas à temperatura ambiente.

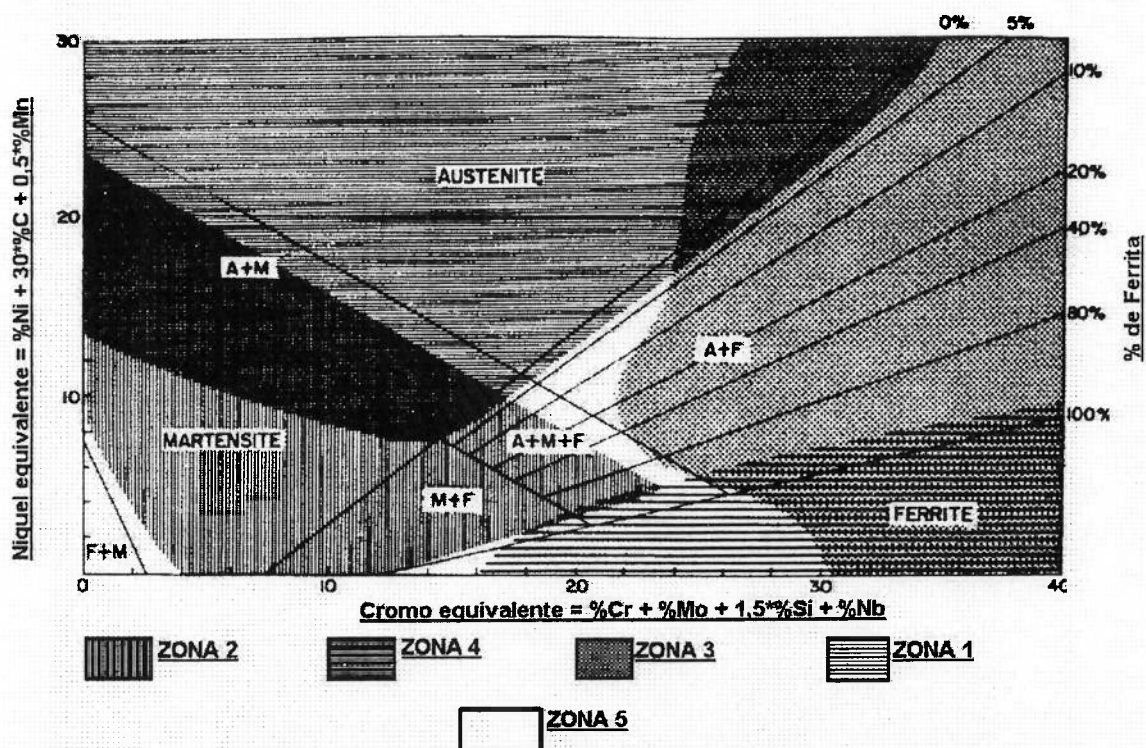


Figura 21: Diagrama de Schaeffler com indicação das zonas de estrutura cristalina a ser formada. (Adaptado da referência 65)

Quando da elaboração deste diagrama foi demonstrada a influência dos elementos de liga na geração da ferrita e da austenita. O objetivo do trabalho foi pesquisar a influência de cada um dos elementos e classifica-los em duas categorias: alfacênicos ou gamagênicos.

3.5.4.2.1. Elementos gamagênicos

Os elementos **gamagênicos** tem a função de estabilizar a **austenita** na liga metálica a ser formada no cordão de solda. Os principais elementos que tem esta função:

- Níquel: é o principal gamagênico, sendo o elemento de referência para os demais gamagênicos.
- Carbono: usado em pequenas quantidades com o teor entre 0,03% e 0,30%;

- Nitrogênio: em teores maiores que 0,07% pode ser considerado como elemento de liga que tem efeito análogo ao do Carbono. Pode ser usado para substituir parcialmente o Níquel ou para aumentar a resistência dos aços 18-10, sem o inconveniente da precipitação de carbonetos.
- Manganês: pode substituir uma parcela considerável de Níquel para possibilitar que a estrutura austenítica seja mantida na temperatura ambiente. Em teores maiores que 6% pode comportar-se como alfacênico, exigindo um maior teor de Níquel para contrabalançar seu efeito.
- Cobre: parece ser levemente gamagênico. Pode melhorar a resistência em certos meios de corrosão, assim como a resistência a fluência.

3.5.4.2.2. Elementos alfacênicos

Os elementos **alfacênicos** tem a função de estabilizar a **ferrita** na liga metálica a ser formada no cordão de solda. Os principais elementos que tem esta função são:

- Cromo: é o principal alfacênico, sendo o elemento de referência para os demais alfacênicos.
- Silício: possui uma influência 50 % maior que o cromo até o teor de 1%. Pode ser utilizado como elemento de liga nos aços refratários, ou para melhorar a resistência dos aços 18-10, em certos casos de corrosão sob tensão.
- Molibdênio: melhora a resistência ao “pitting” dos aços inoxidáveis austeníticos em certos casos de corrosão em meio úmido, aumentando igualmente a resistência mecânica a quente dos aços 18-10, e tem influência praticamente igual à do Cromo.
- Tungstênio: melhora a resistência mecânica a temperaturas elevadas.
- Nióbio-Titânio: usados em teores bem pequenos, são alfacênicos e contribuem para fixar o Carbono, evitando a corrosão intergranular.

3.5.4.2.3. Definição de Níquel Equivalente

Defini-se “Níquel Equivalente” como sendo a soma dos teores de Níquel e dos elementos gamagênicos, multiplicados pelo fator que expressa sua influência relativamente ao Níquel, sendo calculado pela fórmula apresentada na eq.(12):

$$\text{Ni eq} = \% \text{Ni} + 30 * \% \text{C} + 0,5 * \% \text{Mn} \quad (12)$$

3.5.4.2.4. Definição de Cromo Equivalente

Define-se “Cromo Equivalente” como sendo a soma dos teores de Cromo e dos elementos alfacênicos, multiplicados pelo fator que expressa sua influência relativamente ao Cromo, sendo calculado pela formula apresentada na eq.(13):

$$\text{Cr eq} = \% \text{Cr} + \% \text{Mo} + 1,5 * \% \text{Si} + \% \text{Cb} \quad (13)$$

3.5.4.3. Composição Desejável para a Zona Fundida. (58), (64) e (65)

O Diagrama de Schaeffler, figura 21, é uma ferramenta aplicada para escolher a melhor composição da zona fundida, possibilitando que com a combinação de percentagens das variações dos elementos seja evitada uma região que apresente uma estrutura inadequada.

Considerando o Diagrama de Schaeffler da figura 21 as seguintes zonas estruturais são identificadas:

1. Zona de crescimento de grão

Abrange geralmente a região dos aços inoxidáveis ferríticos ao cromo e com baixo teor de carbono. O problema é o crescimento irreversível dos grãos quando o aço é aquecido a temperaturas maiores que 1150⁰C.

Esse crescimento irreversível dos grãos é mais acentuado na zona termicamente afetada, resultando em fragilização, e normalmente não resistindo às tensões de contração da soldagem.

2. Zona de trinca a frio

Esse campo abrange as estruturas martensíticas e parte das estruturas mistas martensíticas-austeníticas e martensíticas-ferríticas. São normalmente os aços temperados ou temperados e revenidos com teores mais altos de Carbono (ex. 0,3%) e os revestimentos duros.

São os problemas desse campo a fissuração a frio abaixo de 400⁰C, ocorrendo nesses aços devido à coexistência dos três fatores: estrutura metalúrgica martensítica, tensões e hidrogênio.

A fissuração normalmente se localiza na zona termicamente afetada da junta soldada, também podendo ocorrer no cordão de solda.

3. Zona da fase sigma

Este campo engloba todas as composições de ligas que têm possibilidade de, após longo tempo de permanência a temperaturas na faixa de 600 e 950 °C, fazer surgir uma fase chamada de “sigma”, basicamente Fe-Cr, que tem como característica a fragilidade elevada a temperatura ambiente. A fase sigma sendo formada basicamente de ferro e cromo tem mais facilidade de se desenvolver a partir da ferrita. Entretanto também pode ser formada na austenita. Sendo a proporção na fase de aproximadamente 1 átomo de Ferro para 1 átomo de Cromo, era de se esperar que só ligas de alta percentagem de Cromo fossem susceptíveis. Entretanto devido à possibilidade de difusão, aliada ao fato de haver regiões microsegregadas de composições químicas diversas, há ocorrência de fase sigma em ligas com até 20% de cromo, austenitas ou feríticas.

4. Zona de trinca de solidificação e liquifação

Engloba basicamente as composições austeníticas e o que pode ocorrer nas soldagens de ligas cuja composição esteja nessa região é a fissuração a quente.

Ocorrendo em temperaturas acima de 1250°C. A explicação do fenômeno é que nessas ligas há possibilidade de formação de fases segregadas de menor resistência mecânica. Esse fato, aliado a tensões de contração oriundas da soldagem, é suficiente para fissurar a solda em temperaturas ainda elevadas, ocorrendo, principalmente, no cordão fundido.

5. Zona teórica ideal

No centro do diagrama, em torno de 21% de Cromo e 10% de Níquel, existe uma região que não pertence a nenhum dos quatro campos. As composições químicas que pertencem a essa região indicam que a liga está livre das quatro possíveis deficiências descritas anteriormente.

O objetivo então é tentar fazer com que a composição química da zona fundida situe-se dentro dessa região, embora esse procedimento não resolva a situação para a zona termicamente afetada, cuja composição química é a do metal base.

Os parâmetros a serem controlados para alcançar esse objetivo são basicamente a escolha do eletrodo (metal de adição, fluxo, etc) e o controle da diluição (participação do metal base) pela seleção apropriada dos parâmetros do processo de soldagem.

Ainda que esse objetivo não seja atingido, o Diagrama de Schaeffler indicará qual será o principal problema que poderá ser encontrado na soldagem, possibilitando a prevenção ou correção devida.

3.5.4.4. Exemplo de Aplicação do Diagrama de Schaeffler

Utilizando as composições químicas dos aços inoxidáveis austeníticos AISI 304L e 348 apresentadas nos itens 3.3.1.1. e 3.3.1.2. verifica-se o tipo de estrutura que será alcançada após o processo de soldagem e comparar os dois materiais, como segue:

- Material 1: Aço Inoxidável Austenítico AISI 304L

Elemento	Tubo	Tampão
	ASTM A-213(47)	ASTM A 403(51)
C	0,035 max	0,035
Mn	2,00	2,00
Si	0,75 max	1,00
Cr	18 a 20	18 a 20
Ni	8 a 13	8 a 13
P	0,040	0,045
S	0,03	0,030

Utilizando a eq.(12):

$$Ni_{eq} = \%Ni + 30*\%C + 0,5*\%Mn \quad (12)$$

Tem-se para a composição do tubo e para o máximo dos valores:

$$Ni_{eq} = 13 + 30 * 0,035 + 0,5 * 2$$

Resultando:

$$\underline{\text{Ni eq} = 15,05 \%}$$

Utilizando-se a eq.(13)

$$\text{Cr eq} = \% \text{ Cr} + \% \text{ Mo} + 1,5 * \% \text{ Si} + \% \text{ Cb} \quad (13)$$

Tem-se para a composição do tubo e para o máximo dos valores:

$$\text{Cr eq} = 20 + 0 + 1,5 * 0,75 + 0$$

Resultando,

$$\underline{\text{Cr eq} = 21,13 \%}$$

- Material 2: Aço Inoxidável Austenítico AISI 348.

	Tubo	Tampão
	ASTM A-213(47)	ASTM A 403(51)
C	0,08 max	0,08
Mn	2,0	2,00
Si	0,75 max	1,00
Cr	17 a 20	17 a 20
Ni	9 a 13	9 a 13
P	0,040	0,045
S	0,030	0,030
Cu	0,02	=
Nb + Ta	10 x %C < % < 1%	10 x %C < % < 1%

Da equação (12)

$$\text{Ni eq} = \% \text{Ni} + 30 * \% \text{C} + 0,5 * \% \text{Mn} \quad (12)$$

Para a composição do tubo e para o máximo dos valores:

$$\text{Ni eq} = 13 + 30 * 0,08 + 0,5 * 2$$

Resultando:

$$\underline{\text{Ni eq} = 16,4 \%}$$

Da equação (13)

$$\text{Cr eq} = \% \text{Cr} + \% \text{Mo} + 1,5 * \% \text{Si} + \% \text{Cb} \quad (13)$$

Para a composição do tubo e para o máximo dos valores:

$$\text{Cr eq} = 20 + 0 + 1,5 * 0,75 + 0$$

$$\underline{\text{Cr eq} = 21,13 \%}$$

Colocando estes valores no Diagrama de Schaeffler, figura 21 anterior, observa-se que o aço inoxidável austenítico AISI 304L por ter um valor de Ni eq inferior que o do AISI 348 produzirá uma solda estrutura austenita-ferrítica, com teor de 0 a 5%. O AISI 348, pelo exemplo, apresentaria uma estrutura totalmente austenítica.

3.5.4.3 Velocidade de Resfriamento e o Teor de Ferrita- δ

A soldagem de aços inoxidáveis austeníticos requer uma velocidade de resfriamento alta, a fim de evitar a precipitação de carbeto de cromo nos contornos de grão.(64)

A microestrutura bruta de fusão de um aço inoxidável austenítico AISI 304 contém de 3 a 12% de ferrita- δ à temperatura ambiente, apesar de que nas temperaturas pouco abaixo da linha solidus a estrutura existente consiste basicamente de células quase que completamente de ferritas- δ .

Estudos realizados por Arata (66) indicam que embora mais de 75% da microestrutura do aço inoxidável austeníticos AISI 304 ou 304L após a solidificação consista de ferrita- δ , após o resfriamento até a temperatura ambiente permanecem apenas 4 a 6% retida na estrutura, correspondendo a uma intensa transformação de ferrita- δ para austenita.

Segundo Lippold (61) e (62) em razão do curto tempo de soldagem e da alta velocidade de resfriamento, qualquer mecanismo envolvendo exclusivamente difusão para a transformação de ferrita- δ para austenita fica limitado, sugerindo uma reação massiva. Então, apenas na presença de baixas velocidades de resfriamento pode o mecanismo de difusão ser considerado eficaz na transformação de ferrita- δ para austenita durante o resfriamento.(42).

A velocidade de resfriamento é importante para que ocorra a retenção de ferrita- δ e a conseqüente diminuição do aparecimento de trinca a quente. Entretanto, segundo estudos desenvolvidos por Li e Messler (67), a manutenção em baixo nível dos teores de Fósforo e Enxofre será mais efetiva do que manter uma pequena quantidade de ferrita- δ na lida após a solidificação, para se inibir a formação de trincas a quente na zona termicamente afetada. A recomendação dos autores é que a soma dos teores de Fósforo e Enxofre sejam mantidos em torno de 0,032%

3.6 Ensaios para Qualificação das Soldas

Os ensaios para caracterizar os processos de soldagem aplicados a fabricação de varetas combustível estão indicados nas normas ASTM (43) e CNEN (9) e são:

Ensaios não-destrutivos

- 3.6.1. Inspeção visual
- 3.6.2. Exame dimensional
- 3.6.3. Radiografia
- 3.6.4. Ensaio de estanqueidade

Ensaios destrutivos

- 3.6.5. Caracterização da solda
 - 3.6.5.2. Observação metalográfica.
 - 3.6.5.3. Avaliação geral do cordão de solda.
 - 3.6.5.4. Avaliação das dimensões do cordão de solda.
 - 3.6.5.5. Avaliação da presença de carbonetos.

- 3.6.5.6. Avaliação do teor de ferrita- δ
- 3.6.6. Ensaio de ruptura ou arrebentamento.
- 3.6.7. Ensaio de corrosão intergranular.

3.6.1 Inspeção Visual (35)

A inspeção visual tem o objetivo de:

- Garantir a preparação adequada das juntas;
- Ajuste das dimensões em conformidade com o projeto;
- Acompanhar o processo para corrigir defeitos;
- Detectar discontinuidades inaceitáveis tais como:
 - Falta de deposição
 - Mordeduras
 - Trincas
 - Rechupes de cratera
- Conferir a precisão dimensional das soldas.
- Garantir a conformidade das soldas com as especificações.

A atividade de inspeção visual deve ser realizada em local claro, bem iluminado e por inspetor com acuidade visual adequada. Recomenda-se o uso, quando necessário, de lente de aumento e iluminação suplementar.

A inspeção de solda não é restrita a observação do cordão de solda, incluindo a verificação do local, equipamentos e parâmetros de soldagem.

A verificação dos parâmetros de soldagem é realizada com a leitura dos valores de corrente e voltagem no equipamento e observando-se a largura do arco incidente sobre a peça no instante em que está sendo realizada a solda..

3.6.2. Inspeção Dimensional

A inspeção dimensional é realizada para verificar e garantir que as peças soldadas estão com as dimensões nos valores especificados no projeto e que o cordão de solda não apresenta dimensões que impeçam o bom desempenho do equipamento.

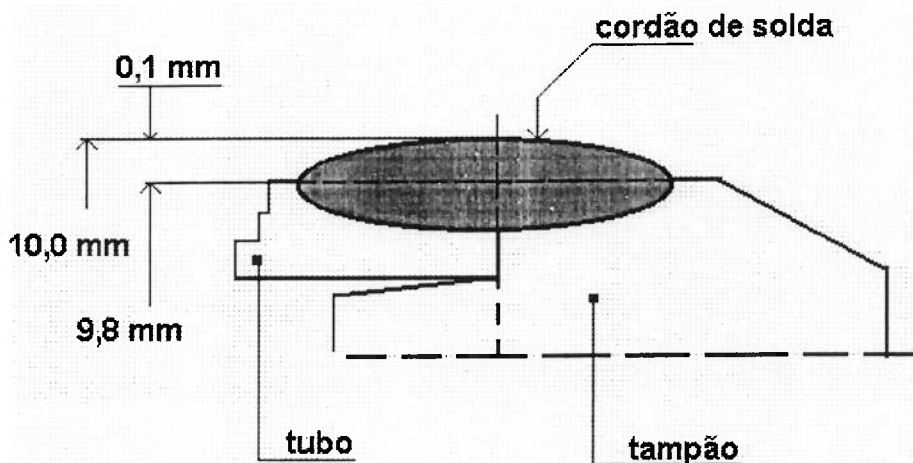


Figura 22: Altura máxima permitida para o cordão de solda, sem adição de material, do tampão ao tubo na fabricação da vareta combustível. Desenho fora de escala.

A inspeção dimensional é realizada com a utilização de instrumentos de medição ou com gabaritos do tipo “passa-não passa”.

O cordão de solda para junção do tampão ao tubo na fabricação da vareta combustível deverá ter altura máxima de 0,1 mm para que o diâmetro externo seja menor ou igual a 10,0 mm, conforme ilustrado na figura 22.

3.6.3. Ensaio Radiográfico

Atendendo aos requisitos da norma ASTM C 954 (43) as juntas soldadas das varetas combustível devem ser 100% radiografadas por intermédio de raio-x ou outro método equivalente.

Quando adota-se o raio-x como método de radiografia este deve atender ao indicado na norma ASTM E 142 (52).

A junta soldada deve ser radiografada em duas posições defasadas de 90°.

A observação das radiografias deve ser realizada procurando-se atender ao especificado na norma DIN 54109 (53) que recomenda que a dimensão do maior defeito não poderá ultrapassar $0,3 \pm 0,01$ mm, que corresponde a classe I de defeitos em soldas de alta estanqueidade.

3.6.4. Ensaio de Estanqueidade

O ensaio de estanqueidade ou de vazamento é realizado para verificar se a junta soldada permite a passagem do produto a ser contido no interior do equipamento ou vaso de pressão.

O plano de inspeção aplicável às varetas combustível determina que este ensaio seja aplicado a 100% do lote fabricado.(43) e (51)

As varetas pertencentes ao lote de produção devem ser testadas nas condições:

- Pressão interna de trabalho, à 20 °C: 25 bar
- Temperaturas de teste:
 - Condição 1: ambiente
 - Condição 2: 350 °C
- Cordões em câmara de alto vácuo com pressão de até: 10^{-5} torr.
- No interior da câmara deverá haver um detector de Hélio para sinalizar a ocorrência de vazamento.

3.6.5 Caracterização da Solda (35)

A caracterização da solda é realizada através do exame metalográfico da região de fundição e da zona termicamente afetada a fim de avaliar as alterações ocorridas em relação ao material base, verificar a existência de microtrincas internas, características dos cristais formados e variação da dureza.

3.6.5.1. Preparação Metalográfica (39)

Os corpos de provas soldados de acordo com os parâmetros e processo em análise, são seccionados no cordão de modo transversal ou longitudinal.

O corte transversal do cordão de solda é utilizado para verificar detalhes transversais tais como número de passes, linha de fusão, zona termicamente afetada, descontinuidades, forma e intensidade da segregação e transformações metalúrgicas.

O corte longitudinal é utilizado quando se deseja observar o processo de fabricação e extensão das descontinuidades.

Nesta preparação é importante manter-se os corpos de prova sempre limpos e isentos de partículas abrasivas, óleo e graxa.

A operação de lixamento é realizada por meio de uma série de lixas de granulação decrescente. Ao passar de uma lixa mais grossa para uma mais fina deve-se observar se os riscos da lixa anterior tenham sido eliminados e que a direção de lixamento seja sempre perpendicular aos riscos deixados pela lixa anterior.

A última etapa é a de lixamento com uma pasta de granulometria de $6\mu\text{m}$.

As amostras, em seguida, são lavadas e secas com álcool e ar quente, sendo encaminhadas para o ataque químico. As soluções químicas utilizadas neste ataque são preparadas em função do material a ser analisado e do tipo de observação a ser realizada.

A preparação metalográfica das amostras está descrita e normalizada na ASTM-A-262 (34) que é aplicada aos aços inoxidáveis austeníticos.

3.6.5.2. Observação Metalográfica

A observação metalográfica pode ser realizada com a utilização de microscópio óptico ou eletrônico de varredura.

1. Microscópio óptico (39)

O microscópio óptico é um instrumento tradicional de observação permitindo através de uma série de lentes de aumento a observação visual do local.

A faixa dos aumentos mais utilizados é de 100x a 1000x.

2. Microscópio eletrônico de varredura (44)

A técnica da microestrutura eletrônica de varredura detecta e analisa os elétrons secundários e os retroespalhados pelo material após este ter sido excitado por um

feixe de elétrons provenientes de uma fonte constituída por um filamento de tungstênio. A aceleração do feixe de elétrons depende da tensão aplicada, geralmente de 15 a 20 keV. O material excitado emite diferentes espectros, oriundos da interação “partícula-material” que ocorre com o choque dos elétrons incidentes com o alvo de forma inelástica ou elástica. A técnica consiste em projetar estes elétrons e fótons sobre um monitor de vídeo e reproduzem a imagem do alvo por contraste.

3.6.5.3. Avaliação Geral do Cordão de Solda. (35)

A utilização do microscópio óptico permite a observação visual do cordão de solda identificando e avaliando a extensão da zona fundida, zona termicamente afetada, região de crescimento de grão e material base. Nesta observação procura-se a existência de trincas entre fases, desenvolvimento do cordão e descontinuidades.

3.6.5.4. Verificação das Dimensões da Solda.

As dimensões da solda são obtidas com a utilização do microscópio óptico. O processo de soldagem adotado ocasiona a sobreposição de dois passes permitindo a visualização de duas zonas de fusão, conforme indicado na figura 23.

- a = Penetração do segundo cordão de solda, em mm.
- b = Largura do segundo cordão de solda, em mm
- c = Largura do primeiro cordão de solda, em mm,
- ZAC = Zona afetada pelo calor, em mm.

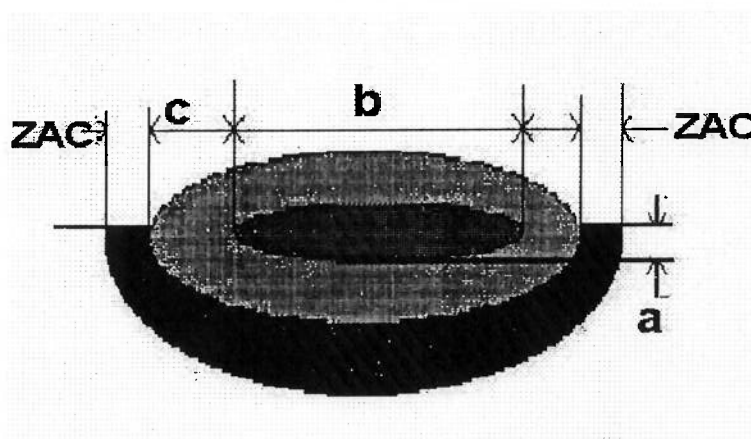


Figura 23: Dimensões principais que podem ser observadas em cordão de solda através da microscopia óptica. (Adaptado da referência 56)

O critério para aprovação do cordão de solda a ser realizado na junção do tampão com o tubo para fabricação da vareta combustível é que a penetração do cordão, medida “a” na figura 23, seja maior ou igual a 65% da espessura do tubo. (50)

3.6.5.5. Avaliação da Presença de Carbonetos.

A observação visual permite através de um aumento de 500x verificar a presença de carbonetos precipitados. Um exemplo está na figura 24, onde a solda de um aço inoxidável austenítico AISI 304L apresenta uma estrutura em fosso com um ou mais grãos completamente circundados por carbonetos.

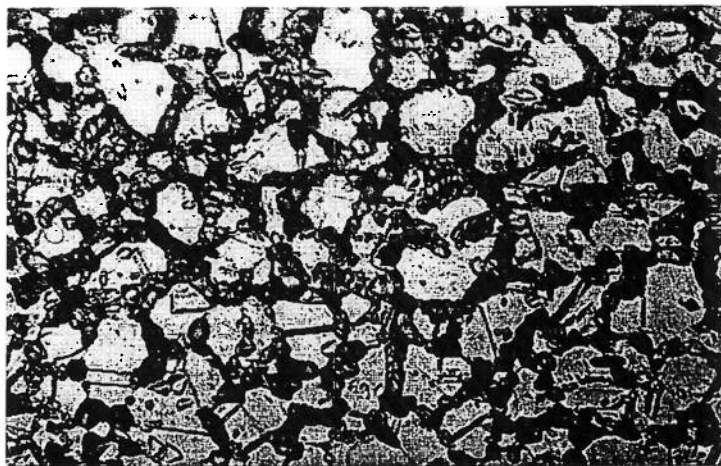


Figura 24: Micrografia com aumento de 500x de aço inoxidável austenítico AISI 304L apresentando zona empobrecida em Cromo.(Foto cedida por Elison B. de Lima)

3.6.5.6. Avaliação da Ferrita δ

A avaliação do teor de ferrita- δ existente na estrutura do material após o processo de soldagem pode ser verificada por diversos métodos, dos quais estão citados a seguir os seguintes:

3.6.5.6.1. Estima do teor de ferrita- δ antes da realização da solda

O teor de ferrita- δ é obtido a partir do conhecimento da composição química do material que será soldado e com o calculo dos valores de Níquel equivalente e

Cromo equivalente estabelecido pela formulação indicada pelo Diagrama de Schaeffler.

3.6.5.6.2. Avaliação quantitativa do teor de ferrita- δ .

Utilizando o corpo de prova de um elemento soldado realiza-se uma avaliação quantitativa do teor através da contagem de elementos encontrados em uma determinada área.

Esta contagem pode ser realizada com a utilização da prática operacional descrita na norma ASTM E 562 (45) que orienta na contagem de partículas pelo estabelecimento de grades.

Outra alternativa é a utilização da norma interna da KWU (69) para determinação do teor de ferrita que através de padrões e da comparação destes com a micrografia de 1000x da área analisada é realizada a classificação em termos de percentagem de ferrita.

3.6.5.6.3. Medição direta.

O teor de ferrita- δ pode ser medido diretamente no cordão de solda com a utilização de um equipamento denominado ferristocópio que aproveita a característica magnética da partícula e através de sensor calibrado transforma o valor lido em uma percentagem de ferrita.

A leitura obtida deve ser multiplicada pelo fator de correção que considera a forma e dimensão do item em análise. No caso da medida estiver sendo realizada no lado externo de uma superfície cilíndrica a leitura obtida deverá ser multiplicada pelo fator de correção retirado do gráfico existente na figura 25. (68)

No eixo das abcissas está indicado para que a medida de ferrita seja realizada em FN. Para realizar a conversão para percentagem de ferrita- δ o fabricante do equipamento indica um gráfico que está reproduzido na figura 26. Quando o valor de FN estiver entre 0 e 10 o fator de conversão para percentagem de ferrita- δ será 1:1.68)

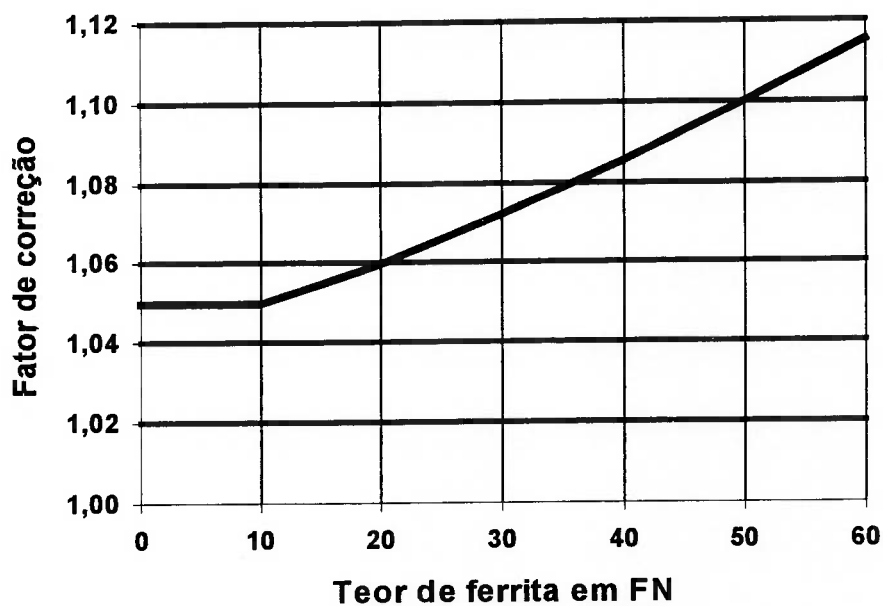


Figura 25. Fator de correção para um tubo de diâmetro externo de 10 mm com a medida de ferrita- δ realizada pelo lado externo. (Adaptado da referência 68)

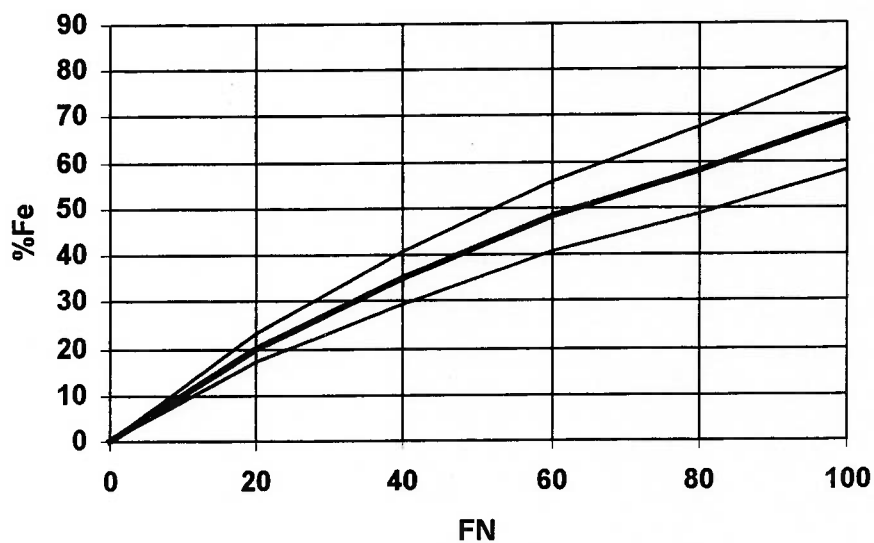


Figura 26. Gráfico para converter de FN para percentagem de ferrita- δ . (Adaptado da referência 68)

3.6.6. Ensaio de Arrebetamento

O ensaio de arrebetamento é utilizado para controlar as características mecânicas de todas as regiões do tubo tais como a junta soldada, parede do tubo e zona afetada pelo calor.

Os ensaios são realizados em corpos de provas extraídos de varetas combustíveis pertencentes ao lote de produção.

Os corpos de prova têm o comprimento 150 mm com um tampão soldado em uma das extremidades. A extremidade livre da solda, ou sem tampão, é utilizado para fixar a conexão por onde será realizada a pressurização do corpo de prova.

O óleo hidráulico é utilizado como fluido de pressurização.

A tensão de ruptura é calculada com a equação eq.14 indicada no Anexo A.1 da norma ASTM B 353 (54):

$$\sigma_{rup} = \frac{P * D_m}{2 * t} \quad (14)$$

Onde:

- σ_{rup} : Tensão de ruptura Mpa
- P Pressão máxima do fluido no teste Mpa
- D_m Diâmetro externo médio – espessura média mm
- t Espessura mínima mm

As condições para análise dos resultados são:

1. A tensão de ruptura (σ_{rup}) calculada pela equação (14) deve ser maior que a tensão de ruptura do tubo.
2. A ruptura deverá ocorrer no tubo a uma distância em que a abertura não afete o cordão de solda.
3. Se a ruptura ocorrer no cordão, deverá ter sido com uma tensão de 50 % acima da tensão de ruptura do tubo.

3.6.7. Ensaio de Corrosão Intergranular

Os ensaios para verificação da resistência dos aços inoxidáveis austeníticos à corrosão intergranular realizados neste trabalho seguiram o indicado na norma ASTM-262 (34) que determina a suscetibilidade do material ao ataque de uma determinada solução ácida. Esta norma indica seis práticas de ensaio e cada uma delas indica um ataque específico.(21)

A Prática A indica o seguinte:

- Ataque oxálico a 10%: 10% $H_2C_2O_4$, anódico a $1A/cm^2$, temperatura ambiente.
- Tempo de exposição: 1,5 minutos.
- Avaliação: tipo do ataque.
- Região atacada: região empobrecida devido a precipitação de carbonetos.

4.0 MATERIAIS E MÉTODOS

O capítulo descreve os materiais e métodos utilizados neste trabalho na seguinte ordem:

- Materiais;
- Equipamentos;
- Corpos de Prova;
- Processo de Soldagem;
- Ensaios;
- Resultados históricos.

4.1. Materiais

Os materiais utilizados na fabricação das varetas combustível e corpos de provas foram:

4.1.1. Tubo

Os tubos utilizados nos ensaios foram sem costura, laminados a frio, com as seguintes dimensões:

- Diâmetro interno $D_i = 8,6 \pm 0,05 \text{ mm}$
- Ovalização: $\frac{De(\max)}{De(\min)} \leq 1,006$
- Espessura mínima $t_{\min} = 0,545 \text{ mm}$
- Rugosidade: $Ra \leq 0,7 \text{ }\mu\text{m}$ (interna e externa)

4.1.2. Tampão

Os tampões utilizados foram usinados nas dimensões da figura 27 a partir de barras redondas com diâmetro de 12,7 mm (1/2").

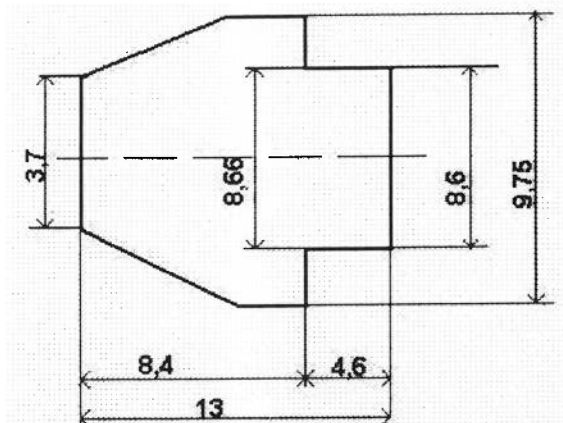


Figura 27: Desenho dimensional do tampão utilizado na fabricação das varetas combustível e nos corpos de provas.

4.1.3. Material dos Tubos e Tampões.

Os materiais utilizados na fabricação dos tubos e tampões descritos nos itens 4.1.1 e 4.1.2 tiveram origens distintas e as composições e características obtidas após ensaios de recebimento estão apresentadas na seqüência.

4.1.3.1 Aço Inoxidável Austenítico 304L

O aço inoxidável austenítico AISI 304L utilizado apresentou as seguintes características:

a) Composição química (% em peso)

Elemento	Tubo	Tampão
	Ensaio de 13/01/88	Ensaio de 13/01/88
C	0,032	0,073 (vide obs1.)
Mn	1,63	0,85
Si	0,40	0,69
Cr	18,3	18,3
Ni	10	8,86
P	0,019	0,018

S	0,012	0,0074
Co	0,21	-

Obs 1: O valor indicado está fora do especificado na norma ASTM A 403(51) e o material é classificado como AISI 304, mas foi utilizado mesmo assim.

4.1.3.2. Aço Inoxidável Austenítico 348.

A composição química e propriedades mecânicas típicas do aço inoxidável austenítico AISI 348 utilizados e obtidas a partir de análise química foram:

a) Composição química (% em peso)

	Tubo	Tampão
	Ensaio de 08/10/99	
C	0,05	0,016
Mn	0,98	1,84
Si	0,48	0,3
Cr	17,05	18,0
Ni	9,05	9,85
P	0,038	0,003
S	0,002	0,004
Cu	-	-
Nb + Ta	0,603	0,401

b) Propriedades mecânicas do tubo:

Os tubos de aço inoxidável austenítico AISI 348 foram fabricados laminados a frio, solubilizados e recozidos a uma temperatura de 1045 °C em atmosfera protetora e resfriamento brusco.

As propriedades do material foram obtidas a partir do certificado de material emitido pela empresa responsável pelo acompanhamento da fabricação do material.

•	T amb = 25 ⁰ C	T amb = 370 ⁰ C
• Tensão de ruptura,	736 a 744 MPa	499 a 510 MPa
• Tensão de escoamento - 0,2 % de offset,	399 a 405 MPa	286 a 296 MPa
• Alongamento em 50mm	42,2 a 40 %	25 a 22,6 %
• Dureza Vickers	194,8 kg/mm ²	-

4.1.4. Gases de Proteção

Os gases utilizados no processo de soldagem foram:

Argônio

- Fornecedor: Air Products
- Tipo: Comercial
- Pureza: 3.5 (99,95%)

Hélio

- Fornecedor: Air Products
- Tipo: Comercial
- Pureza: 4.5 (99,995%)

4.1.5. Eletrodo não Consumível

- Diâmetro: 2,4 mm;
- Tipo: Tungstênio com 2% de Tória;
- Código: EWPT_h 2.
- Ângulo na extremidade igual a 35⁰ máximo

4.1.6. Produtos Químicos.

Os produtos utilizados nos ensaios para atacar as amostras foram:

a) Verificação do teor de ferrita- δ .

Ataque realizado com o reagente “Murakami modificado”, com a seguinte formulação:

- 60 ml de água destilada;
- 30 g de hidróxido de potássio (KOH);
- 30 g de hexaferrocianeto de potássio ($K_3.Fe(CN)_6$);
- Temperatura de ataque: 50 °C;
- Tempo de ataque: 20 a 40 s;

b) Corrosão intergranular

Ataque oxálico especificado na norma ASTM-282 (34)

4.2. Equipamentos.

4.2.1 Bancada de Soldagem.

O equipamento de soldagem utilizado consiste em uma bancada, conforme descrito no Anexo DI, projetada especificamente para esta aplicação.

O equipamento é totalmente automatizado, sendo que para cada tipo de solda o controlador microprocessado impõe uma seqüência de abertura e fechamento de válvulas além de comandar a fonte de solda.

A bancada de soldagem é dotada de uma luneta e visor de vidro protetor que permite a observação visual da execução da solda.

O sistema de CLP utilizado é da Allen Bradley/Metal Leve modelo “Mini PLC 2/15”.

4.2.2. Fonte de Corrente Contínua.

- Fabricante: Merrick;
- Tipo: TXR 150;

- Potência: 150A a 100% de ciclo.

4.2.3. Ferritoscópio.

- Fabricante: HELMUT FISCHER GMBH + CO;
- Modelo: Ferritoscópio MP30.

4.2.4. Corpos de Provas

Foram fabricados dois tipos de corpos de provas diferenciados pelo comprimento:

- Tipo 1: comprimento de 50 mm, utilizado em todos os ensaios com exceção do ensaio de arrebentamento.
- Tipo 2: comprimento de 150 mm, utilizado no ensaio de arrebentamento.

4.3. Processo de Soldagem dos Corpos de Provas

O tampão é soldado no tubo em um equipamento automático especialmente desenvolvido para esta finalidade. O processo empregado é o TIG realizado em uma câmara estanque e pressurizada com gás inerte, corrente contínua direta e sem a adição de material..

A pressão de pressurização é regulada em função do tipo de solda a ser realizada. No caso da fabricação das varetas combustível a pressão é de 0,5 bar de Argônio para as soldas dos cordões e de 28 bar de Hélio para realizar a solda de selagem da vareta.

4.3.1. Parâmetros de Soldagem

4.3.1.1.Ciclo de Soldagem

O ciclo de soldagem tem o perfil apresentado na figura 28, com os valores apresentados na tabela 12.

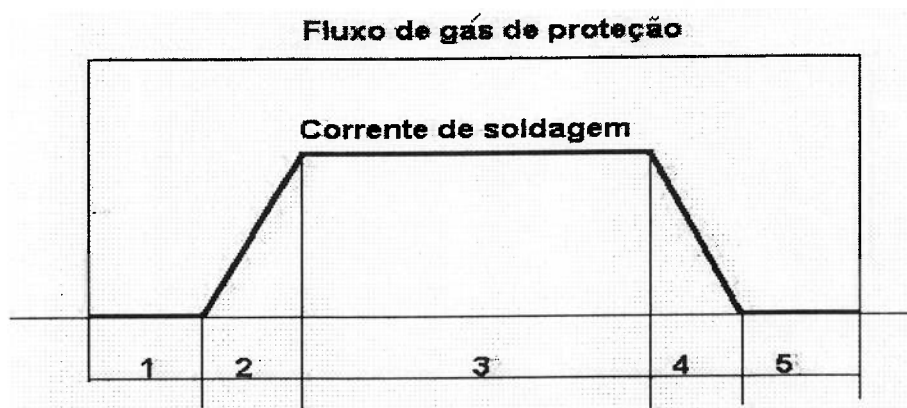


Figura 28: Ciclo de soldagem indicando os passos do programa.

Tabela 12: Parâmetros de soldagem aplicados ao processo e que complementam a fig.26.

Item	Etapa	Corrente	Tempo	Rotação
		A	s	rpm
1	Pré-purga	0	5	20
2	Rampa ascendente	I	0,2	20
3	Patamar	I	13	20
4	Rampa descendente	I	3	20
5	Pós-purga	0	10	20

O valor da corrente está indicado pela letra "I", pois está sendo variado em função do experimento realizado. Na tabela do Anexo F estão indicados os valores utilizados na fabricação dos corpos de provas.

4.3.2. Posição do Eletrodo não-Consumível.

A posição do eletrodo não foi alterada permaneceu constante ao longo de todos os ensaios realizados e está de acordo com o na figura 29.:

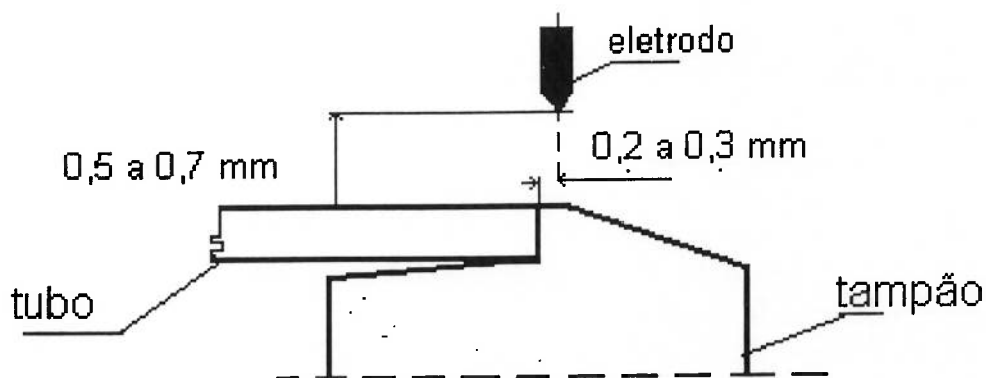


Figura 29: Posicionamento do eletrodo em relação às peças a serem soldada

4.3.3. Parâmetros de Soldagem dos Corpos de Provas

Os corpos de provas foram fabricados seguindo o grupamento de acordo com a finalidade: A seguir esta descrito cada grupo e indicando a corrente de soldagem e gás de proteção utilizado para fabricação de cada corpo de prova. No Anexo F está uma tabela com o resumo desta descrição.

Grupo I:

Os corpos de provas CP-1 a CP-10 foram fabricados, em 11/2000, em uma seqüência direta, sem interrupção. O objetivo foi de verificar o comportamento do equipamento na execução de um ciclo longo de trabalho e se estava regulado. Com os corpos de prova foram executados a análise do cordão de solda e da zona termicamente afetada.

Grupo II:

Os corpos de provas CP-11 e CP-12 foram fabricados em 11/2000 e seccionados transversalmente. O objetivo de observar a raiz da solda em toda a sua extensão, sendo esta uma prática recomendada pela regras e normas da CNEN e ASME.

Grupo III

Os corpos de provas CP-13 a CP-16 foram fabricados, em 11/2000, marcando-se o ponto inicial de trabalho ou seja o inicio de rotação do dispositivo.

O objetivo foi verificar o comportamento do cordão de solda com a superposição de passes.

Grupo IV

Os corpos de provas CP-17 e CP-18 foram fabricados, em 12/2000, e destinados ao ensaio de corrosão intergranular.

Grupo V.

Em 2002 foram fabricados corpos de provas, de CP-20 a CP-35, para realizar uma comparação entre a soldagem dos materiais em análise nas mesmas condições de fabricação.

Os corpos de prova deste grupo estão divididos em quatro subgrupos, a saber:

⇒ Grupo V-a

- Corpos de provas: CP-20, CP-21, CP-22 e CP-23
- Material: AISI_304L
- Gás de proteção: Argônio
- Correntes nominais de soldagem: 43, 40, 37 e 30 A

⇒ Grupo V-b

- Corpos de provas: CP-24, CP-25, CP-26 e CP-27
- Material: AISI_348
- Gás de proteção: Argônio
- Correntes nominais de soldagem: 43, 40, 37 e 30 A

⇒ Grupo V-c

- Corpos de provas: CP-28, CP-29, CP-30 e CP-31
- Material: AISI_304L
- Gás de proteção: Hélio

- Correntes nominais de soldagem: 43, 30, 27 e 24 A

⇒ Grupo V-d

- Corpos de provas: CP-32, CP-33, CP-34 e CP-35
- Material: AISI_348
- Gás de proteção: Hélio
- Correntes nominais de soldagem: 30, 27, 27 e 24 A

Os ensaios realizados nestes corpos de prova foram, além do visual e dimensional, ensaio de dureza, dimensões da zona termicamente afetada e teor de ferrita- δ .

Grupo VI

Os corpos de provas CP-38 e CP-39 foram fabricados e destinados ao ensaio de arrebentamento. Destes somente o CP-38 foi utilizado.

As verificações realizadas neste corpos de prova foram visual e dimensional.

Grupo VII

Os corpos de provas deste grupo foram fabricados nas seguintes condições:

- Corpos de provas: CP-36, CP37, CP-40 e CP-41
- Material: AISI_348
- Gás de proteção: Hélio e 1,5bar de pressão na câmara.
- Correntes nominais de soldagem: 30, 27, 21 e 24 A

4.4 Ensaio Realizados

Os ensaios realizados foram os seguintes

4.4.1. Verificação Visual

O processo de soldagem dos corpos de prova CP-21 a CP-40 foram acompanhados visualmente e medidas a largura do arco incidente sobre o cordão.

Visualmente, também, foi verificada a condição aparente de cada corpo de prova para avaliar a condição aparente dos cordões de solda.

4.4.2. Ensaio Dimensional.

Com a utilização do calibrador do tipo “passa-não passa” todos os corpos de prova foram analisados e verificado se o cordão de solda possui o diâmetro externo com medida menor ou igual a 10,0mm.

4.4.3. Verificação das Dimensões do Cordão de Solda

Todos os corpos de provas que foram embutidos tiveram a dimensão do cordão medidas. Esta verificação foi realizada pela leitura direta no microscópio.

4.4.4. Ensaio de Dureza.

Todos os corpos de prova, com exceção do utilizados no ensaio de arrebentamento, foram utilizados para verificar a dureza a partir do centro do cordão de solda e em direção ao tubo conforme apresentado na figura 30. A carga utilizada na verificação da dureza Vickers foi a de 1000 g.:



Figura 30. Posicionamento dos pontos de medida de dureza

4.4.5. Avaliação da ferrita- δ

A avaliação da ferrita- δ foi realizada por dois métodos, a saber:

Método 1:

Os corpos de provas utilizados neste ensaio foram os dos Grupos V e VII.

Com a utilização de um ferritoscópio, da marca HELMUT FISCHER e modelo MP30, foram realizadas medidas no material seccionado e que não foram embutido no baquelite.

Foram realizadas 4 medidas em cada um dos pontos, (1,2 e 3) indicados na figura 31

Os ensaios foram realizados em cima de uma mesa plana, tendo-se o cuidado de não haver material metálico ou magnético por perto para não influenciar nas leituras.

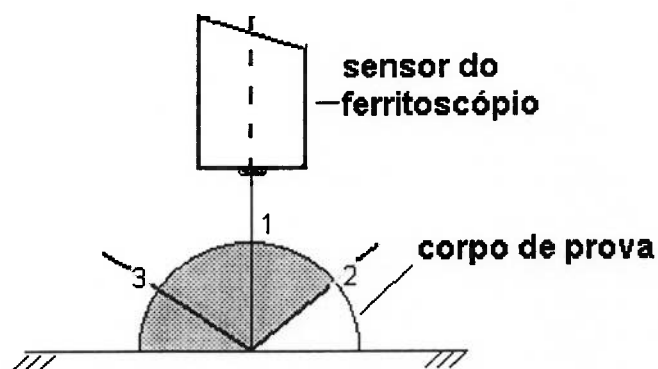


Figura 31. Posicionamento adotado para os pontos de medição dos teores de ferrita com o ferritoscópio.

Método 2

Os corpos de provas embutidos no baquelite e pertencentes aos Grupos VI e VII foram tratados quimicamente com a solução indicada no item 4.1.6 a e analisados em microscópio.

Foram realizadas micrografias, aumento de 1000x, para comparar com o padrão adotado pela KWU (69) e obter-se o valor de ferrita- δ .

4.4.6. Ensaio de Arrebatamento

O objetivo é o de verificar a resistência mecânica do cordão de solda, tendo sido realizado em um dos corpos de prova preparados para esta finalidade. O corpo de prova ensaiado foi o CP-38.

4.4.7. Ensaio de Corrosão Intergranular.

Os corpos de provas CP-17 e CP-18, de material AISI-348, foram atacados pela solução oxálica mencionada no item 4.1.6.b, seguindo a Prática A mencionada na norma (34).

5.0 RESULTADOS

Os resultados serão apresentados na seguinte ordem: avaliação dimensional, dimensão do cordão de solda, medida da dureza, avaliação do teor de ferrita- δ , arrebentamento e corrosão intercrystalina.

Será utilizado como identificação a divisão de grupo de corpos de prova descritos no Capítulo 4 e apresentados resumidamente na tabela do Anexo F.

5.1. Avaliação Dimensional

A tabela 13 apresenta o resultado das avaliações dimensionais dos cordões de solda.

Tabela 13. Avaliação dimensional

GRUPO	ANO	QUANTIDADES DE CORPOS DE PROVA		
		TOTAL	APROVADAS	REPROVADAS
I	2000	10	8	2
II	2000	2	2	0
III	2000	2	2	0
IV	2000	2	2	0
V	2002	16	0	16
VI	2002	2	0	2
VII	2002	4	0	4
TOTAL		40	14	16

5.2. Controle das Dimensões do Cordão de Solda

As dimensões do cordão de solda estão apresentadas nas tabelas a seguir, utilizando a figura 23 do parágrafo 3.6.5.4. como referência. Os dados obtidos estão distribuídos em várias tabelas para possibilitar a identificação das condições de soldagem em que foram fabricados.

Tabela 14. Dimensões do cordão de solda dos corpos de prova do grupo I e III, fabricados com AISI 348, gás de proteção é o Argônio e corrente de soldagem de 35 A.

Corpo de prova	a	b	c
	μm	μm	μm
CP-01	1170	1920	300
CP-02	660	2050	130
CP-03	725	2070	225
CP-04	790	2040	168
CP-05	920	2180	225
CP-06	820	2140	175
CP-07	795	2300	150
CP-08	720	2020	200
CP-09	800	2270	150
CP-10	810	2150	237
CP-13	750	1980	190
CP-14	760	1970	195
CP-15	990	2200	225
CP-16	980	2230	185
Média	835	2109	196,8
Desvio Padrão	130,66	114,13	42,31

Tabela 15. Dimensões do cordão de solda dos corpos de prova do grupo V-a, fabricados com AISI 304L, gás de proteção é o Argônio e com variação da corrente de soldagem .

Corpo de prova	a	b	c
	μm	μm	μm
CP-20	1600	3100	500
CP-21	1240	1800	350
CP-22	1200	2600	320
CP-23	1100	2100	500

Tabela 16. Dimensões do cordão de solda dos corpos de prova do grupo V-b, fabricados com AISI 348, gás de proteção é o Argônio e com variação da corrente de soldagem .

Corpo de prova	a	b	c
	μm	μm	μm
CP-24	1200	2600	400
CP-25	1000	3360	400
CP-26	1100	2600	400
CP-27	1000	2800	400

Tabela 17. Dimensões do cordão de solda dos corpos de prova do grupo V-c, fabricados com AISI 304L, gás de proteção é o Hélio e com variação da corrente de soldagem .

Corpo de prova	a	b	c
	μm	μm	μm
CP-28	-	-	-
CP-29	1900	3750	440
CP-30	1600	3000	520
CP-31	1600	2500	600

Tabela 18. Dimensões do cordão de solda dos corpos de prova do grupo V-d, fabricados com AISI 348, gás de proteção é o Hélio e com variação da corrente de soldagem .

Corpo de prova	a	b	c
	μm	μm	μm
CP-32	1800	3800	500
CP-33	-	-	-
CP-34	1250	2400	400
CP-35	940	3000	320

Tabela 19. Dimensões do cordão de solda dos corpos de prova do grupo VII, fabricados com AISI 348, gás de proteção é o Hélio e com variação da corrente de soldagem e pressão de 1,5 bar no interior da câmara.

Corpo de prova	a	b	c
	μm	μm	μm
CP-36	910	2800	440
CP-37	1600	3600	500
CP-40	1180	3200	420
CP-41	980	4000	420

5.3. Valores de Dureza.

Os valores de micro-dureza medidos estão distribuídos de forma similar a distribuição realizada para apresentar as dimensões do cordão de solda. Os pontos de leitura da dureza estão de acordo com o indicado na figura 30 do parágrafo 4.4.4.

Tabela 20. Valores de dureza Vickers dos cordões de solda dos corpos de prova do grupo I e III, fabricados com AISI 348, gás de proteção é o Argônio e corrente de soldagem de 35 A.

Corpo de prova	Pontos de medição					
	1	2	3	4	5	6
	Valores em kg/mm ² , carga de 1000g					
CP-01	195	194	170	194	192	194
CP-02	172	197	151	198	186	194
CP-03	179	170	149	188	195	192
CP-04	156	168	172	182	200	215
CP-05	180	174	173	195	189	202
CP-06	169	166	166	174	192	190
CP-07	164	173	158	170	178	194
CP-08	180	172	158	187	166	163
CP-09	160	180	202	206	168	201
CP-10	206	142	171	190	161	190
CP-13	180	180	174	204	190	191
CP-14	169	183	194	201	202	200
CP-15	165	165	167	191	208	204
CP-16	166	170	175	179	199	186
Média	174,4	174,0	170	189,6	187,6	194
Desvio Padrão	13,1	12,8	14,0	10,5	13,8	11,2

Tabela 21. Valores de dureza Vickers do cordão de solda dos corpos de prova do grupo V-a, fabricados com AISI 304L, gás de proteção é o Argônio e com variação da corrente de soldagem .

Corpo de prova	Pontos de medição					
	1	2	3	4	5	6
	Valores em kg/mm ² , carga de 1000g					
CP-20	126	138	170	191	201	214
CP-21	145	142	173	153	187	260
CP-22	125	136	124	146	162	172
CP-23	172	165	183	147	229	269

Tabela 22. Valores de dureza Vickers do cordão de solda dos corpos de prova do grupo V-b, fabricados com AISI 348, gás de proteção é o Argônio e com variação da corrente de soldagem

Corpo de prova	Pontos de medição					
	1	2	3	4	5	6
	Valores em kg/mm ² , carga de 1000g					
CP-24	183	179	161	180	199	196
CP-25	177	176	167	156	177	167
CP-26	303	250	264	341	336	322
CP-27	181	173	167	171	176	185

Tabela 23. Valores de dureza Vickers do cordão de solda dos corpos de prova do grupo V-c, fabricados com AISI 304L, gás de proteção é o Hélio e com variação da corrente de soldagem .

Corpo de prova	Pontos de medição					
	1	2	3	4	5	6
	Valores em kg/mm ² , carga de 1000g					
CP-28	-	-	-	-	-	-
CP-29	183	164	142	142	154	166
CP-30	183	208	226	246	246	256
CP-31	144	148	161	170	188	168

Tabela 24. Valores de dureza Vickers do cordão de solda dos corpos de prova do grupo V-d, fabricados com AISI 348, gás de proteção é o Hélio e com variação da corrente de soldagem .

Corpo de prova	Pontos de medição					
	1	2	3	4	5	6
	Valores em kg/mm ² , carga de 1000g					
CP-32	182	191	182	196	198	198
CP-33	159	178	191	194	224	243
CP-34	-	-	-	-	-	
CP-35	185	197	214	235	271	340

Tabela 25. Valores de dureza Vickers do cordão de solda dos corpos de prova do grupo VII, fabricados com AISI 348, gás de proteção é o Hélio e com variação da corrente de soldagem e pressão de 1,5 bar no interior da câmara.

Corpo de prova	Pontos de medição					
	1	2	3	4	5	6
	Valores em kg/mm ² , carga de 1000g					
CP-36	183	155	194	161	184	198
CP-37	161	174	158	177	193	195
CP-40	247	233	243	254	280	249
CP-41	199	179	191	160	194	187

5.4. Avaliação do Teor de Ferrita- δ .

A seguir esta apresentado, na tabela 26, a avaliação do teor de ferrita- δ pela leitura direta e por análise quantitativa. Os valores lidos no ferritoscópio foram multiplicados por um fator de correção de 1,05 para compensar a forma dos corpos de provas, de acordo com o gráfico da figura 25 do parágrafo 3.6.3.6.

Tabela 26. Valores dos teores de ferrita- δ obtidos no ferritoscópio e na análise quantitativa.

Corpo de prova	Leitura direta		Avaliação quantitativa
	Média dos valores	Desvio padrão	
CP-20	1,8	0,31	2
CP-21	1,2	0,46	1,5
CP-22	2,3	0,10	2
CP-23	1,4	0,10	0,5
CP-24	1,2	0,06	2
CP-25	1,2	0,18	1,5
CP-26	1,3	0,12	2,5
CP-27	1,3	0,16	3
CP-29	0,6	0,11	1
CP-30	1,2	0,08	2
CP-31	2,7	0,17	2
CP-32	1,8	0,49	1,5
CP-33	1,5	0,18	2
CP-35	1,4	0,12	1,5
CP-36	1,5	0,15	2,5
CP-37	2,5	0,56	2
CP-40	1,6	0,08	2
CP-41	2,4	0,35	2,5

5.5. Ensaio de Arrebetamento

O ensaio de arrebetamento apresentou o seguinte resultado:

- Quantidade de corpos de prova: 1
- Número do corpo de prova: CP 38
- Pressão máxima: 797 bar
- Tempo de duração do ensaio: 45 s.
- Local de ruptura: a 60 mm do cordão de solda.
- Nota: Durante o teste houve a expansão do tubo para fora da pinça de fixação, alterando a rugosidade da superfície e perdendo o brilho tornando-se opaco.

5.6 Ensaio de Corrosão Intergranular

Foram ensaiados dois corpos de prova e na figura 32 está sendo apresentado foto do corpo de prova atacado por solução oxálica, com aumento de 500x.



Figura 32. Micrografia com aumento de 500x apresentando resultado de ensaio de corrosão em solda de aço inoxidável austenítico AISI 348.

5.7. Corrente de Soldagem

Nos corpos de prova dos grupo V e VII foram observadas os valores de corrente, tensão e largura de arco conforme apresentado na tabela 27.

Tabela 27: Corrente de soldagem nominal e parâmetros reais.

Corpo de prova	Corrente Nominal	Valores lidos		
		Corrente	Tensão	Largura
	A	A	V	mm
CP-20	43	34	9	2,5
CP-21	40	36	9	2,3
CP-22	37	31	9	1,8
CP-23	30	30	8	1,2
CP-24	43	36	9	2,4
CP-25	40	36	9	2,3
CP-26	37	31	9	1,8
CP-27	30	30	8	1,2
CP-29	30	29	13	3
CP-30	37	26	12	2,5
CP-31	24	23	14	2
CP-32	30	29	13	3
CP-34	27	26	12	2,5
CP-35	24	24	12	2,0
CP-36	30	25	14	3,5
CP-37	27	22	14	2
CP-40	21	20	14	3
CP-41	24	19	14	2,5

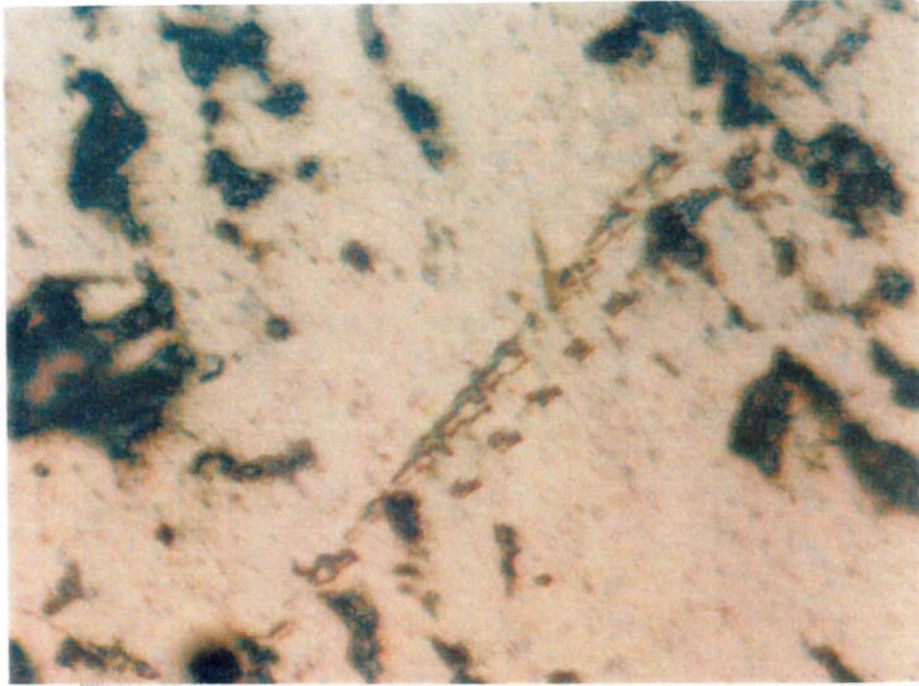


Figura 33. Microestrutura para verificação do teor de ferrita- δ em aço inoxidável austenítico AISI 304L após processo de soldagem TIG (Aumento de 1000x – ataque Murakami modificado)

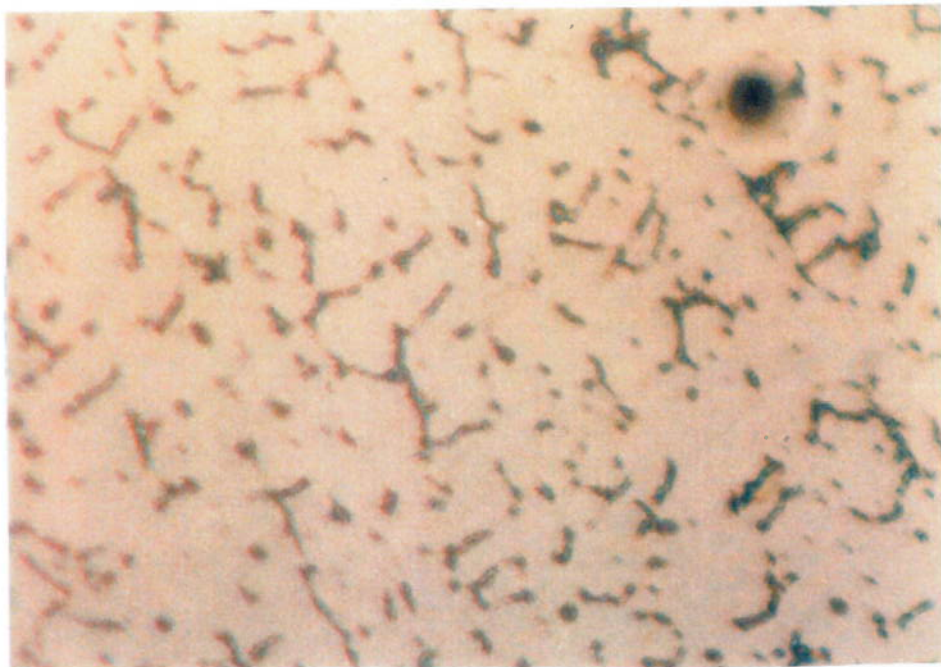


Figura 34. Microestrutura para verificação do teor de ferrita- δ em aço inoxidável austenítico AISI 348 após processo de soldagem TIG (Aumento de 1000x – ataque Murakami modificado)

6. ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.1 Avaliação Dimensional

Os resultados apresentados na tabela 13, parágrafo 5.1, foram obtidos em duas épocas diferentes, espaçadas em 2 anos.

Registra-se que em 1988 esta bancada realizou a soldagem de 400 varetas totalizando 800 cordões de solda e sendo reprovadas 2 % do lote.

O primeiro grupo de amostras fabricadas no de 2000 foi soldada de uma vez só, sem interrupção, com a bancada de soldagem permitindo que o trabalho fosse rápido e sem transtorno.

O segundo grupo de amostras foi fabricado em 2002 e foi um trabalho com muitos problemas operacionais. O trabalho foi longo e com interrupção devido a problemas mecânicos. No início da soldagem deste segundo tentou-se utilizar os mesmos parâmetros que utilizados anteriormente, mas com o surgir dos problemas optou-se em variar parâmetros para observar o equipamento. O principal parâmetro a ser variado foi a corrente que foi sendo diminuída porque julgou-se que seria a responsável pelo diâmetro externo de cordão além do máximo permitido.

Considerando este ocorrido a proposta é de realizar uma aferição dos instrumentos e revisão geral da bancada.

6.2 Dimensões do Cordão de Solda

As dimensões dos cordões de solda dos corpos de prova fabricados em 2002 foram fortemente influenciadas pela desregulagem encontrada no sistema. Com as amostras obtidas:

O objetivo do trabalho é analisar, comparando, a substituição do aço inoxidável austenítico AISI 304L pelo AISI 348. Para efetuar esta comparação com os valores obtidos nos ensaios dois gráficos podem ser elaborados:

Gráfico da “penetração x largura do cordão em função da corrente nominal de solda” para os dois materiais sendo soldados com o Argônio como sendo o gás de proteção. (Figura 35)

Gráfico da “penetração x largura do cordão em função da corrente nominal de solda” para os dois materiais sendo soldados com o Hélio como sendo o gás de proteção. (Figura 36)

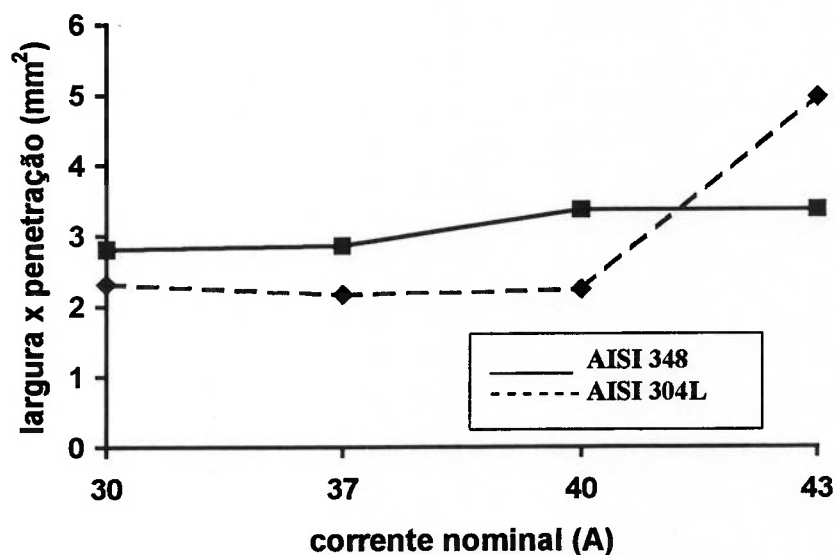


Figura 35. Comparação entre zonas fundidas do AISI 304L e AISI 348 soldados sob atmosfera de Argônio.

Considerando que os dois materiais pertencem a mesma família de aços inoxidáveis, terem similaridade de aplicação e sendo ambos de boa soldabilidade, é compreensível que tenha zona fundidas parecidas e de dimensões equivalentes, quando soldadas com os mesmos parâmetros e condições de equipamento.

As penetrações alcançadas com estes parâmetros estão bem acima do valor mínimo especificado que é de $0,85 \times$ espessura do tubo ou 0,51 mm.

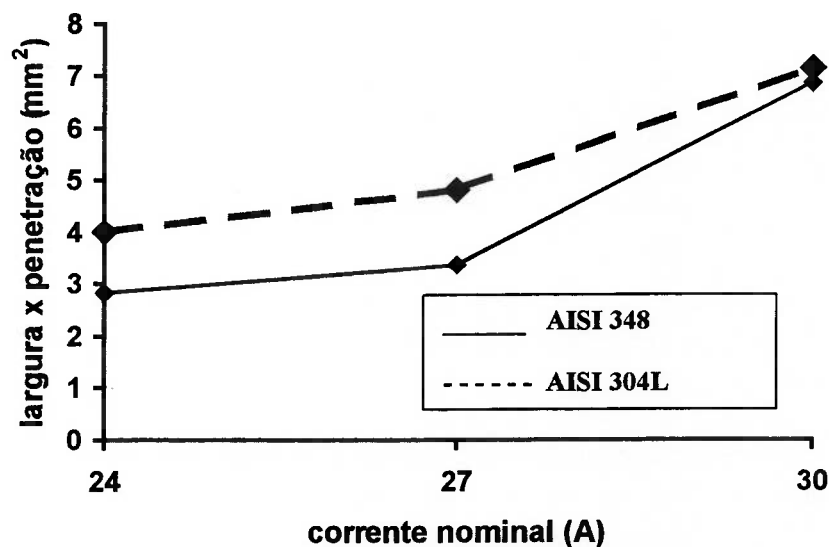


Figura 36. Comparação entre zonas fundidas do AISI 304L e AISI 348 soldados sob atmosfera de Hélio

Os corpos de prova que estão com as dimensões de cordão indicados na tabela 14 foram soldados em condições mais próximo do procedimento qualificado e podem servir de base de comparação. Desprezando-se os corpos de prova CP-01 que foi um dos corpos reprovados, tem-se a seguinte média de medidas:

- Penetração: $810 \pm 95 \mu\text{m}$
- Largura de cordão: $2123 \pm 105 \mu\text{m}$
- Zona termicamente afetada: $189 \pm 32 \mu\text{m}$

A verificação da qualidade destes números pode ser realizada calculando o coeficiente de Pearce (70) que é calculado pela fórmula da eq.(15).

$$C_p = \text{desvio padrão}/\text{média} \quad (15)$$

$$0 < C_p < 1$$

- C_p para a penetração da solda = $95/810 = 0,12$

- C_p para a largura do cordão = $105/2123 = 0,05$
- C_p para a zona termicamente afetada = $32/189 = 0,17$

Com os valores se aproximando de 0 (zero) significa que os extremos, máximo e mínimo, estão próximos e que a medida é de maior confiança..

6.3. Metalografia e Dureza

A avaliação da dureza ao longo do cordão de solda em direção ao tubo permite o dimensionamento das diversas zonas existentes na microestrutura: zona fundida, zona termicamente afetada, zona de transição e material base. Quando o material base estiver na forma encruada haverá diferenças significativas de dureza entre uma região e outra.

O material utilizado no tubo foi laminado a frio e depois aquecido a 1050°C e resfriado bruscamente, de modo a ficar com dureza de 220 kg/mm^2 conforme recomendação do ASME, portanto com uma dureza baixa e próxima a da zona de fusão.

Os valores de dureza obtidos possibilitam a comparação entre os materiais quando soldados na mesmas condições. A título de comparação entre os dois materiais, AISI 348 e AISI 304L, foi construído o gráfico da fig.37 comparando a dureza de dois corpos de prova, CP-20 e CP-24, ambos soldados a corrente nominal de 43 A tendo o Argônio como gás de proteção.

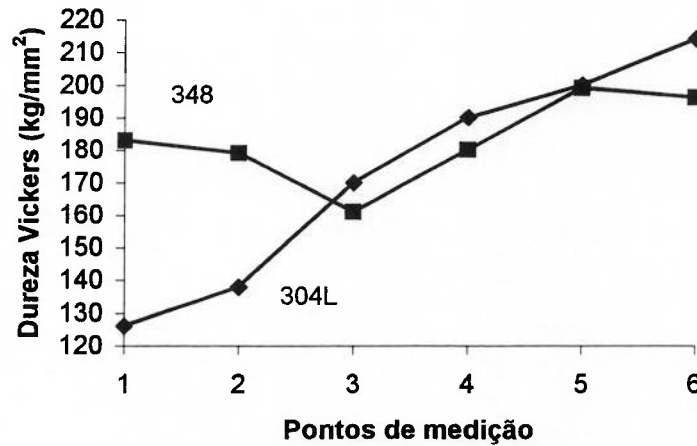


Figura 37. Comparação da variação de durezas Vickers no AISI 304L e no 348 soldados nas mesmas condições.

O ponto “1” corresponde a zona de fusão e o ponto “3” corresponde a zona termicamente afetada. A variação da dureza a partir da zona de fusão é maior no AISI 304L do que no AISI 348.

Os valores da média das durezas listados na tabela 20, parágrafo 5.3, e pertencentes aos corpos de prova que foram soldados em 2000 servem de parâmetro para definir o perfil de dureza a ser encontrado nas soldas de tubo e tampão de AISI 348, representado na figura 38.

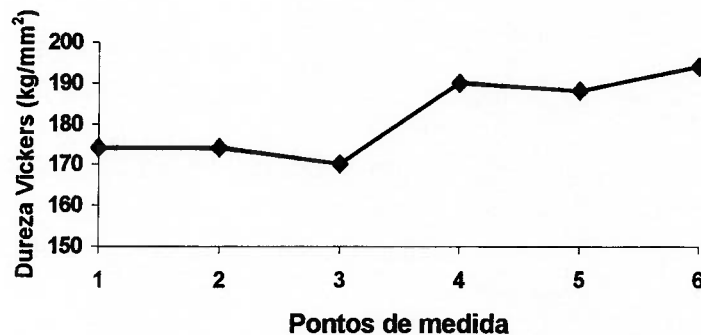


Figura 38. Perfil da dureza média para a solda do tubo-tampão de AISI 348

Os corpos de prova apresentaram a configuração típica apresentada na fig. 39, destacando-se sempre a marca devido a existência de passes sobrepostos de solda.

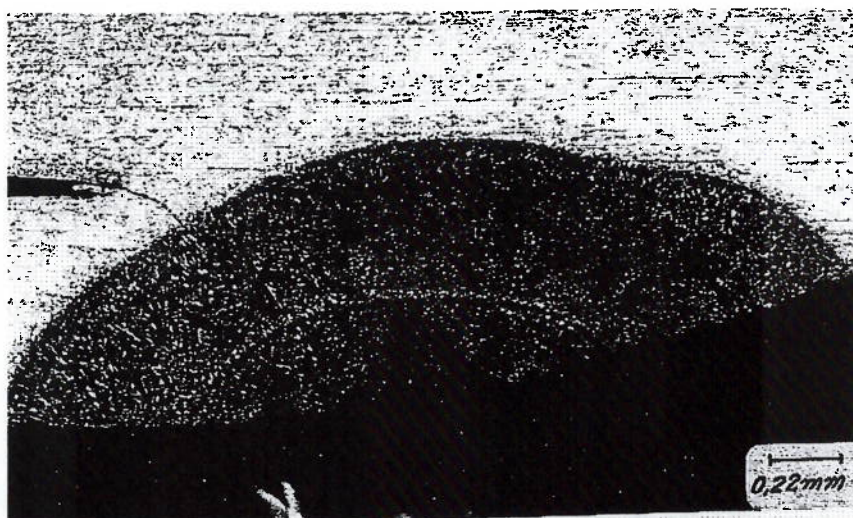


Figura 39. Perfil típico do cordão de solda do AISI 348 na união tubo-tampão. (Aumento de 50x – ataque oxálico 10%)

6.4. Teor de ferrita- δ

A microestrutura da zona de fusão dos aços inoxidáveis austeníticos deve conter uma certa quantidade de ferrita- δ para fazer frente a ocorrência de trincas a quente. A avaliação e medida deste teor foi realizada pelos seguintes modos: Diagrama de Schaeffler, medida direta com instrumento e microscopia quantitativa.

a) Avaliação pelo Diagrama de Schaeffler

Utilizando o Diagrama de Schaeffler da fig 21, parágrafo 3.5.4.2, calcula-se os valores de Níquel equivalente e Cromo equivalente para os materiais utilizados na fabricação dos corpos de prova, obtendo-se:

Para o Aço Inoxidável Austenítico 304L

- Níquel equivalente = 11,8 %

- Cromo equivalente = 18,9 %

Para o Aço Inoxidável Austenítico 304L

- Níquel equivalente = 11,5 %
- Cromo equivalente = 18,4 %

Com estes valores foram e o gráfico da fig. 21 anteriormente citado e reproduzido, novamente, na figura 40, obtém-se o teor previsto de ferrita- δ de 2 a 2,5% para cada material.

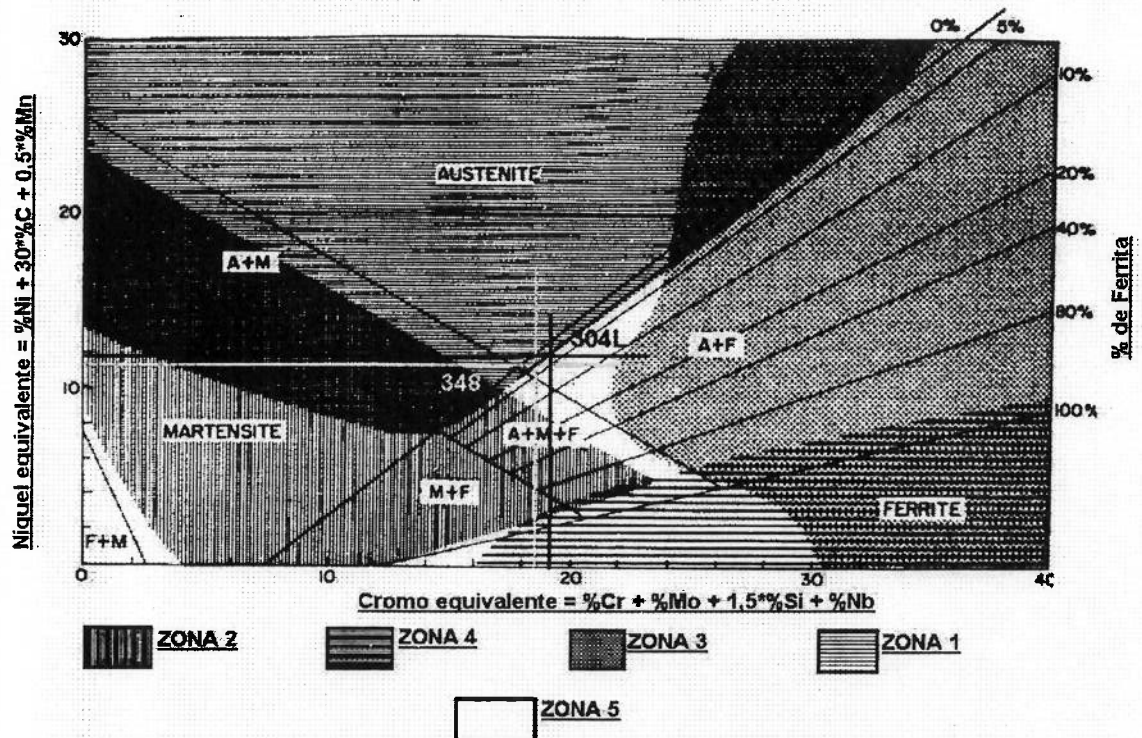


Figura 40. Valores de Cromo e Níquel equivalentes dos aços AISI 304L e 348 plotados para obtenção do teor previsto de ferrita- δ .

b) Medida direta e avaliação quantitativa.

Os valores obtidos dos ensaios estão registrados na tabela 26, parágrafo 5.4, indicando o valor verificado em cada corpo de prova. O resumo da tabela, indicando o valor médio da medida por tipo de material, tem-se:

Para o Aço Inoxidável Austenítico 304L

Medida direta com ferristoscópio:

- Média: 1,61 %
- Desvio padrão: 0,54 %

Medida por microscopia quantitativa.

- Média: 1,57 %
- Desvio padrão: 0,57 %

Para o Aço Inoxidável Austenítico 348

Medida direta com ferristoscópio:

- Média: 1,61 %
- Desvio padrão: 0,54 %

Medida por microscopia quantitativa.

- Média: 2,1 %
- Desvio padrão: 0,57 %

Os valores de ferrita estimado (2%) e os valores obtidos em ensaio (1.61 e 1,89) são números da mesma ordem de grandeza e coerentes.

As normas do ASME indicam que o teor de ferrita em equipamentos nucleares deve ser de 8 a 10%, por outro lado Messler (67) recomenda que o controle dos teores de Enxôfre e Fósforo seja realizado e que manter estes baixos representa mais eficácia no combate a formação de trincas a quente do que a ferrita- δ pode proporcionar.

6.5 Ensaio de Arrebetamento

O ensaio de arrebetamento apresentou a ruptura fora da região da solda e da zona afetada pelo calor atendendo ao especificado pelas normas.

A pressão na qual ocorreu a ruptura do tubo foi de 797 bar.

As dimensões do tubo ensaiado eram:

- Diâmetro interno médio $D_i = 8,6 \text{ mm}$
- Espessura mínima $t_{\min} = 0,545 \text{ mm}$

A tensão de ruptura é calculada com a equação eq.14 indicada no Anexo A.1 da norma ASTM B 353 (54):

$$\sigma_{rup} = \frac{P * Dm}{2 * t} \quad (14)$$

Onde:

- σ_{rup} : Tensão de ruptura MPa
- P Pressão máxima do fluido no teste MPa
- Dm Diâmetro externo médio – espessura média mm
- t Espessura mínima mm

Assim tem-se:

- $P = 797 \text{ bar} = 79,7 \text{ MPa}$
- $\sigma_{rup} := 79,7 * 9,8/2 * 0,5$
- $\sigma_{rup} := 781 \text{ MPa}$

O tubo rompeu acima da sua tensão de ruptura que é 736 MPa. e a solda permanecendo íntegra.

6.6 Ensaio de Corrosão Intergranular.

Os dois corpos de prova utilizados não apresentaram a precipitação de carbonetos no contorno de grão, satisfazendo ao requisito de norma.

6.7 Instabilidade da Corrente.

Um fato que existiu durante os ensaios realizados neste ano de 2002 foi a dificuldade em obter-se a corrente nominal acertada para a realização da solda. Na tabela 27, parágrafo 5.7, estão apresentadas estas variações. Os maiores desvios ocorreram quando o equipamento estava operando com o Argônio como gás de proteção

Várias tentativas para corrigir o problema foram realizadas, entendendo-se que haveria falta de aterramento adequado, mas não houve a comprovação de tal fato.

7.0 CONCLUSÃO

Os ensaios e pesquisas apresentadas neste trabalho fazem parte deste processo desenvolvimento que tem por objetivo validar o processo de soldagem com o novo material. As observações aqui descritas servirão para continuidade dos trabalhos não acadêmicos de qualificação do processo.

O aço inoxidável autêntico AISI 304L utilizado inicialmente apresenta boa soldabilidade mas tem a propensão de propiciar a precipitação de carbonetos e produzir o meio adequado para que ocorra corrosão intergranular.

O aço inoxidável autêntico AISI 348 ao ser estabilizado pelo Nióbio reduz a sensitização tornando-se apto a ser submetido a condições de trabalho em alta temperatura sem perder suas características.

Os ensaios demonstraram que no aspecto soldagem existe uma equivalência de comportamento, não existindo discrepância acentuada, ambos com boa soldabilidade

A conclusão com relação a substituição de material é a de que ela é totalmente viável, com o material AISI 348 substituindo o 304L. O material AISI 304L, quando atendendo a composição química especificada, atende as condições necessárias para ser utilizados na fabricação da vareta combustível. O AISI 348 com a presença de Nióbio e Tântalo apresenta uma condição suplementar de segurança.

Na continuação dos ensaios e estudos realizados nesta dissertação sugere-se os seguintes trabalhos futuros:

1. Desenvolvimento dos parâmetros de soldagem para os materiais AISI 304L e AISI 348, em atmosfera de Hélio e submetido a pressão de até 28 bar.
2. Avaliação da influência sobre os parâmetros de soldagem do comprimento de eletrodo de Tungstênio que seja mantido para fora da pinça de fixação.
3. Avaliação experimental da variação dos teores de Fósforo e Enxofre em função do teor de ferrita- δ .

8.0 ANEXOS

**ANEXO A - TABELA COM OS PRINCIPAIS TIPOS DE REATORES
NUCLEARES**

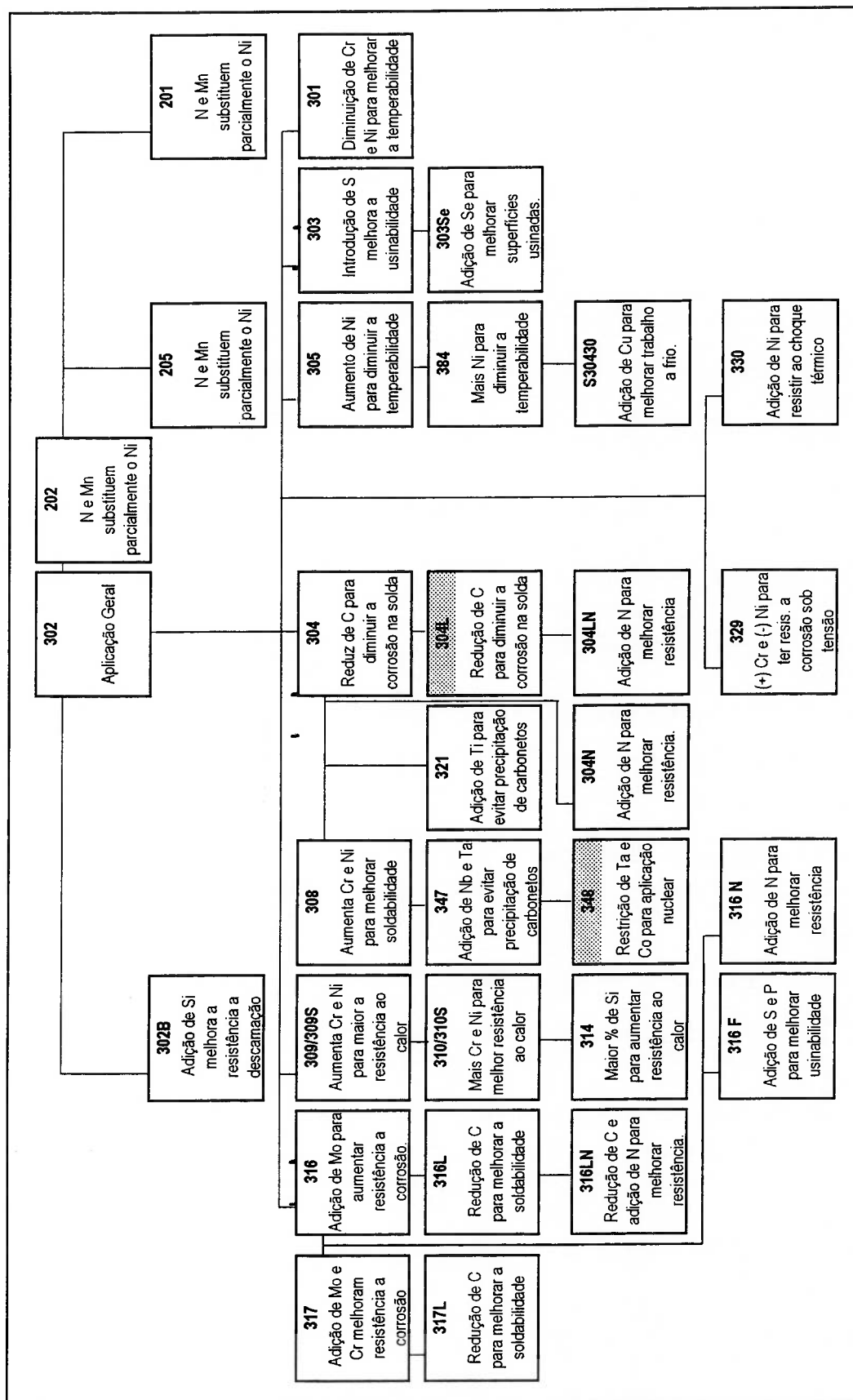
Característica	Tipos							Reator de Efeito Rápido, com metal líquido
	Reactores Refrigerados e Moderados a Água		Reator Refrigerado a Água Pesada	Reator Moderado a Grafite		Reator de Efeito Rápido, com metal líquido		
	Reator a Água Aberta	Reator a Água Pressurizada		Resfriado a Gás	Resfriado a Água			
Abreviatura	BWR	PWR	HWR	AGR	RBMK	FBR		
Operando	93	252	33	34	14	4		
Aplicação	Eletricidade	Eletricidade e propulsão	Eletricidade e produção de Pu	Eletricidade e produção de Pu	Eletricidade e produção de Pu	Eletricidade e produção de Pu		
Refrigerante	Água	Água	D ₂ O	Co ₂ ou He	Água	Na líquido		
Moderador	Água	Água	D ₂ O	Grafite	Grafite	Não é requerido		
Material Combustível	UO ₂	UO ₂	UO ₂ ou metal	UO ₂	UO ₂ ou U metálico	PO ₂ e UO ₂ em várias proporções		
Enriquecimento do Combustível	3 a 5 %	3 a 5 %	U natural	U natural ou entre 0,8 a 3,0%	0,8 a 3,0%	Várias combinações de Pu-235 e U-235		
Comentários	O vapor é gerado no interior do reator e vai direto para a turbina	Vapor é gerado em circuito secundário, externo ao reator	Conhecido por "CANDU"	Adotado na França e Inglaterra	Adotado na Rússia e em Chernobyl	Produzem mais material físsil que o consumido		

ANEXO B – Tabela com os principais parâmetros operacionais do reator nuclear de Angra-II:(11)

A tabela com os principais parâmetros operacionais do reator nuclear de Angra-II: foi obtida a partir das informações contidas na referência (11).

Item	Condição
Projeto do Núcleo	
• Potência Térmica do Núcleo do Reator	3.765 MW
• Porcentagem da Potência Gerada nas Varetas Combustível	97,4%
• Quantidade de Elementos Combustível	193
• Quantidade de Varetas Combustível Ativas	45548
• Diâmetro Equivalente do Núcleo	3.605 mm
Dados Termo Hidráulicos	
• Vazão Total de Refrigerante (Água Desmineralizada)	18.800 kg/s
• Potência Térmica Gerada em cada Vareta Combustível	0,805 MW
• Densidade Média do Fluxo de Calor na Vareta Combustível	61,1 W/cm ²
• Velocidade Média do Refrigerante no Núcleo do Reator	4,472 m/s
• Temperatura do Refrigerante na Entrada do Reator	291,3 °C
• Aumento Médio da Temperatura do Refrigerante no Reator	34,8 °C
• Pressão Média do Sistema	158 bar
Vareta Combustível	
• Diâmetro Externo da Vareta Combustível	10,75 mm
• Espessura da Parede da Vareta Combustível	0,725 mm
• Comprimento da vareta Combustível	4.405 mm
• Composição do Gás de Enchimento	96% He + 4% Ar
• Pressão Interna da Vareta de Combustível = Pressão do Gás	22,5 bar

ANEXO C – Fluxograma de relacionamento entre aços inoxidáveis austeníticos da série 300.



ANEXO D – DESCRIÇÃO DA BANCADA DE SOLDAGEM

D.1-DESCRIÇÃO DA BANCADA E DA OPERAÇÃO.

O processo de soldagem é todo controlado por um microprocessador que comanda a abertura e fechamento de válvulas, abertura do arco, tempos de pré-purga e de pós-purga.

A intervenção humana quando o processo de fabricação está estabilizado prende-se às seguintes atividades básicas:

1. ligar o equipamento,
2. verificar as condições de pressão do gás de proteção;
3. abrir as válvulas do sistema pneumático;
4. selecionar o programa destinado a operação a ser realizada;
5. verificar as condições do eletrodo de tungstênio;
6. verificar o posicionamento e fixação do tampão a ser soldado na extremidade do tubo;
7. posicionar o tubo com tampão no interior da câmara;
8. posicionar o dispositivo de apoio e segurança na outra extremidade do tubo a ser soldado;
9. verificar a posição relativa entre o eletrodo e o conjunto tampão-tubo;
10. liberar para soldagem;
11. anotar os parâmetro de soldagem;
12. retirar e observar o cordão de solda.

O microprocessador permite a alteração dos parâmetros de soldagem para ensaios e pesquisa de novos parâmetros.

Os principais componentes da bancada de soldagem estão listados e descritos no item seguinte.

D.2 BANCADA DE SOLDAGEM

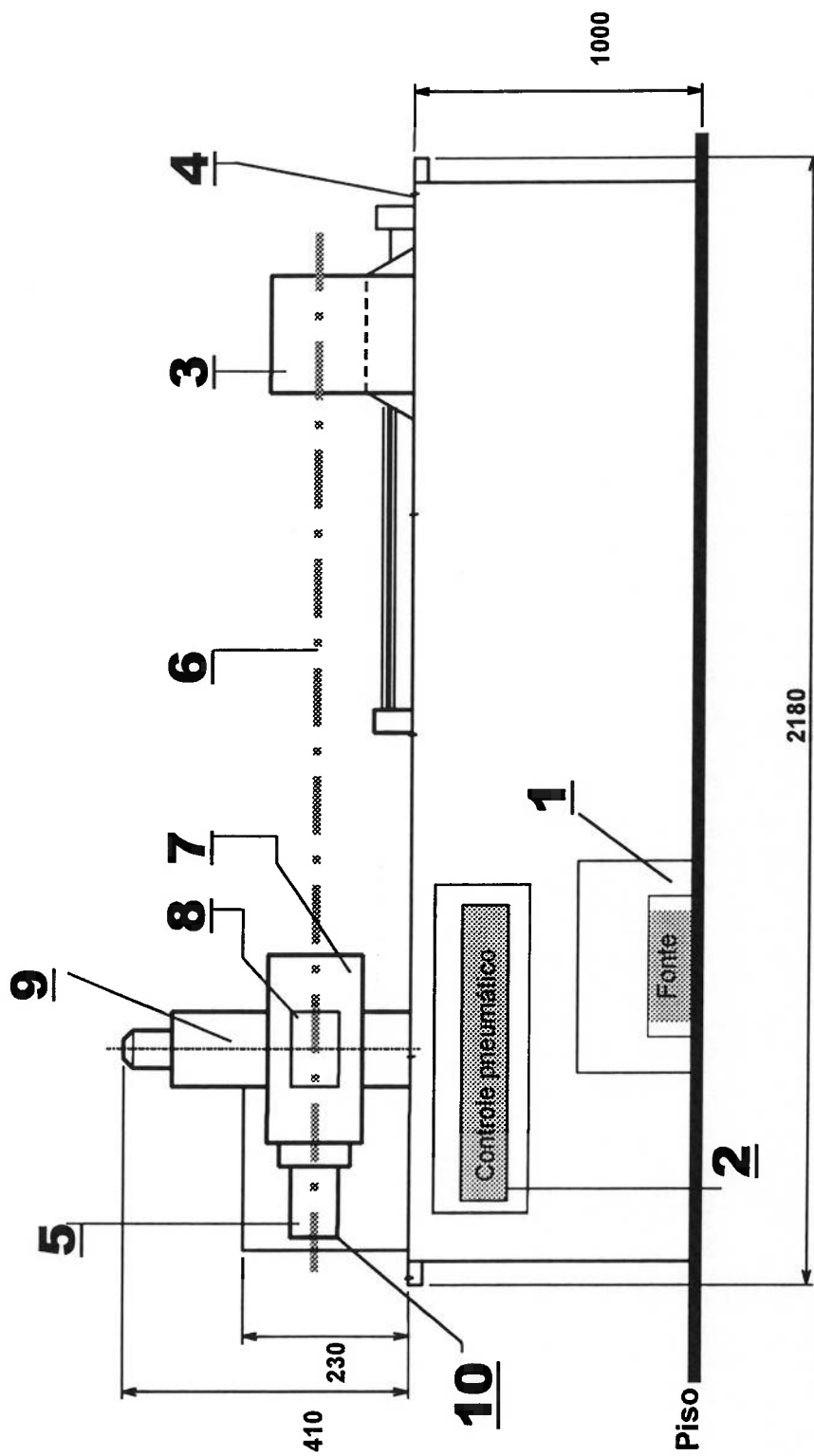
Os componentes básicos da bancada onde são realizadas as soldas circunferenciais e de selagem das varetas combustíveis estão listadas abaixo:

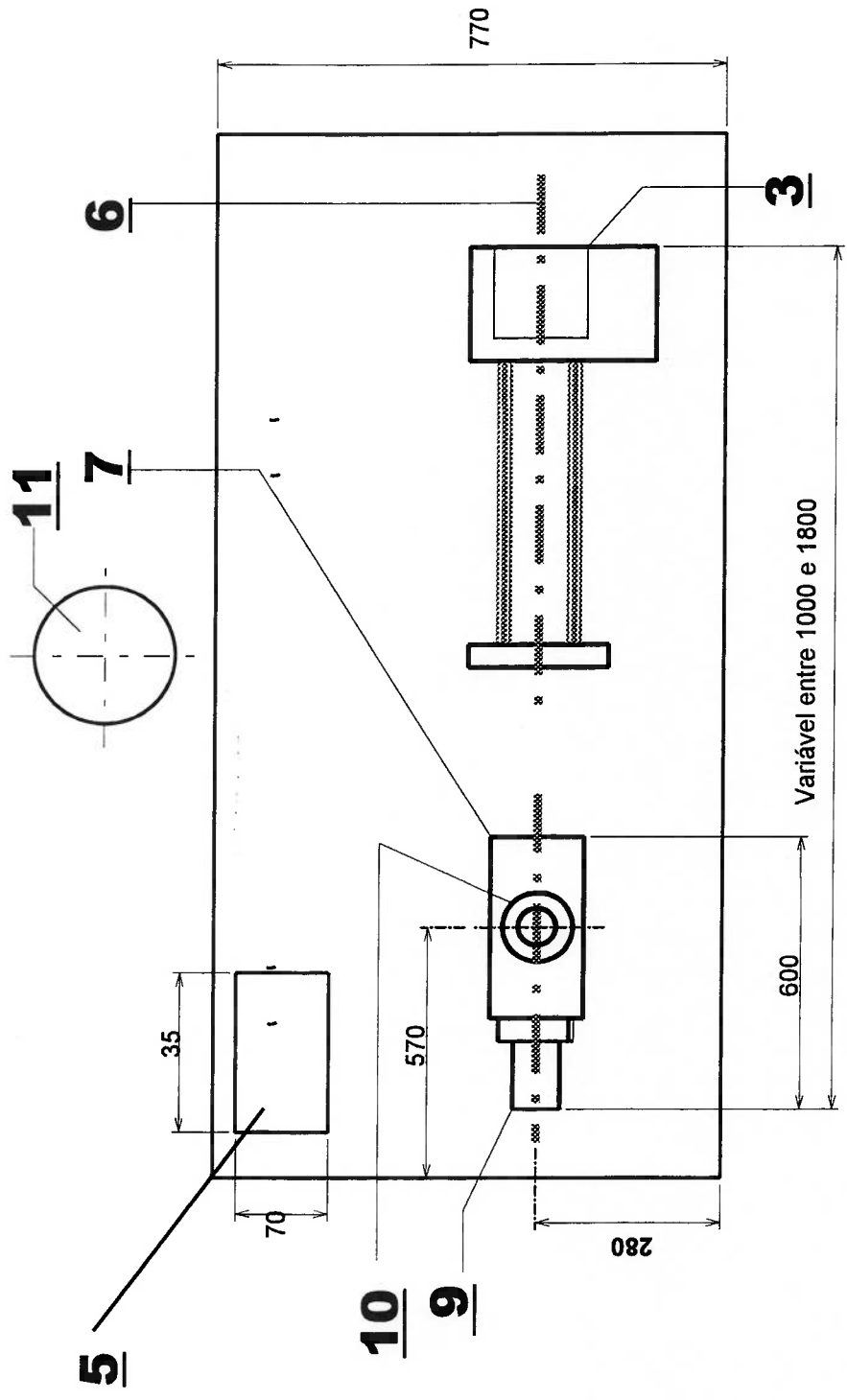
POSIÇÃO	DESCRIÇÃO DO ITEM
1	Fonte retificadora.
2	Conjunto de válvulas pneumáticas.
3	Dispositivo para suportar a extremidade do tubo que não está sendo soldado. Serve como anteparo se a vareta for expelida abruptamente devido a alta pressão no interior da câmara de soldagem.
4	Bancada para apoio do dispositivo de soldagem.
5	Painel com os manômetros de controle da pressão de gás de soldagem a ser injetado no interior da câmara.
6	Linha de centro representando a posição da vareta a ser soldada.
7	Câmara estanque para soldagem e capacidade para resistir a pressão interna de trabalho de 30 bar.
8	Visor com lente protetora para observação do interior da câmara de soldagem.
9	Cabeçote porta-eletrodo para realizar a solda circunferencial do tampão ao tubo.
10	Cabeçote porta-eletrodo para realizar a solda de selagem da vareta.
11	Cilindro de gás de soldagem.

12	Sistema de refrigeração a água.
----	---------------------------------

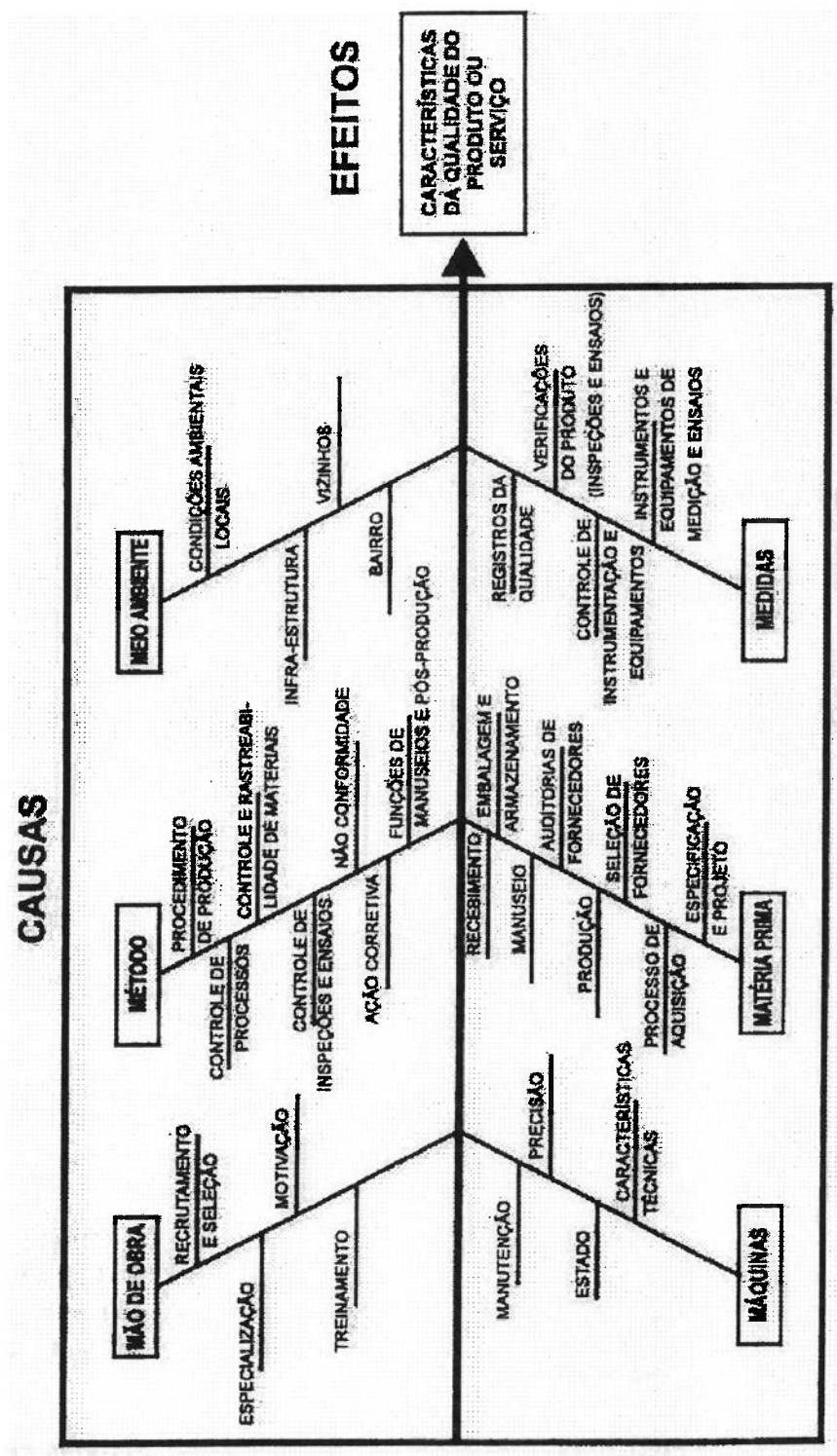
D.3 DESENHO DA BANCADA

Vide nas duas páginas seguintes o desenho dimensional apresentando a bancada de soldagem.





ANEXO E – DIAGRAMA DE ISHIKAWA



ANEXO F – TABELA DE PARÂMETROS DE SOLDAGEM.

GRUPO	N	GAS	MATERIAL	I (A)	APLICAÇÃO
I	10	Ar	AISI-348	35	REPETIBILIDADE
II	2			35	SEÇÃO TRANSVERSAL
III	4			35	INICIO DO CORDAO
IV	2			35	ENSAIO DE CORROSAO
V-a	4	Ar	AISI-304L	43, 40, 37 e 30 A	COMPARAÇÃO
V-b	4	Ar	AISI-348	43, 40, 37 e 30 A	
V-c	4	He	AISI-304L	43, 30, 27 e 24 A	
V-d	4	He	AISI-348	30, 27, 27 e 24 A	
VI	2	Ar	AISI-348	37 A	ENSAIO DE RUPTURA
VII	4	He, 1,5bar	AISI-348	30, 27, 24 e 20	ABERTURA DO ARCO

LISTA DE REFERÊNCIAS

1. ISHIGURA, Y; A Energia Nuclear no Brasil; 1.ed.; São Paulo; Makron Books; 2001.
2. SANTOS, A.J.; Considerações no Projeto de Embarcações com Propulsão Nuclear. 1993, Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo.
3. INSTITUTO DE ESTUDOS AVANÇADOS DO CTA. São José dos Campos. Perspectiva Internacional de Energia 2001 – Destaques. Disponível em <http://www.ieav.cta.br/hpenu/b/yuzi/perspectiva.html>. Acesso em 16 de jul. 2002.
4. CENTRO TECNOLÓGICO DA MARINHA EM SÃO PAULO. São Paulo. Apresenta Submarinos Nucleares no Mundo. Disponível em <http://www.ctmsp.mar.mil.br/index.htm>. Acesso em 15 de jun. 2002.
5. WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. Londres, Nuclear Power in the World Today – Marc 2002. <http://www.world-nuclear.org.htm> Acesso em 07 de jul. 2002.
6. INSTITUTO DE ESTUDOS AVANÇADOS DO CTA. São José dos Campos. Perspectiva Internacional de Energia 2001 – Destaques. Disponível em <http://www.ieav.cta.br/hpenu/b/yuzi/perspectiva.html>. Acesso em 16 de jul. 2002.
7. LAYRARGUES; P.P.; Razão e Emoção em Torno da Tecnologia Nuclear. Ciência Hoje, São Paulo, vol. 30, no. 175, p.65-67, setembro 2001.
8. CALEGARE; A.J.A.; Os Mandamentos da Qualidade Total, 3.ed., São Paulo, Inter-Qual, International Quality Systems S/C Ltda, 1999.
9. COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Garantia da Qualidade na Aquisição, Projeto e Fabricação de Elementos Combustíveis – CNEN-NE-1.27.** Rio de Janeiro, 1999.
10. CROUCH, H.F; Nuclear Ship Propulsion; Cambridge , Maryland; Cornell Maritime Press; 1960.
11. PERROTA, J.A.; Curso de Introdução à Engenharia do Núcleo de Reatores. IPEN/CNEN. Junho.1999.

12. UNIVERSITY OF CHICAGO. Chicago. The Nuclear Age and its Impact on Radiology at Chicago. Disponível em <http://www.radiology.uchicago.edu/nuclearage.htm>. Acesso em 05 de mai.2002.
13. OFFICE OF NUCLEAR ENERGY, SCIENCE AND TECHNOLOGY. Washington. Uranium Stewardship Activities. Disponível em <http://www.ne.doe.gov/uranium/history.html>. Acesso em 05 de mai.2002.
14. ELETROBRÁS TERMONUCLEAR S.A. Rio de Janeiro. A Situação da Energia Nucleoelétrica no Mundo. Disponível em <http://www.eletronuclear.gov.br> Acesso em 24 de jul.2002.
15. INSTITUTE FOR ENERGY AND ENVIRONMENTAL RESEARCH. Maryland. EUA. Basic Characteristics of Reactor Types. Disponível em www.ieer.org.html Acesso em 20 de jul. de 2002.
16. THE VIRTUAL TOURIST. Estados Unidos. PWR Reactor Fuel Assemblies. Disponível em www.nucleartourist.com . Acesso em 25 de abr. de 2002.
17. RODRIGUEZ, M, L.; MARTINEZ, F.R. Materiales Nucleares, 1.ed. Madrid; Serviço de Publicaciones de La Junta de Energia Nuclear. 1971
18. MASCHÉ, G.; Systems Summary of a Westinghouse Pressurized Water Reactor Nuclear Power Plant. 1.ed. E.U.A.; The Westinghouse Co. 1972.
19. PADILHA, A F.; GUEDES, L. C. Aços Inoxidáveis Austeníticos. 1.ed. São Paulo; Hemus Editora Ltda. 1994.
20. ASM INTERNATIONAL; Metal Handbook, vol I, 10 ed, Wrought Stainless Steels, p. 3 - 40; 1990.
21. SEDRIKS, A.J.; Corrosion of Stainless Steels. 2.ed. New York. John Wiley & Sons, Inc. 1996.
22. COLOMBIER, L; HOCKMANN, J. Aciers Inoxydables. 1.ed. Paris. Editora Dunod. 1965.
23. MARSHAL, P.; Austenitic Stainless Steels: Microstructure and Mechanical Properties. 1.ed. Londres. Elsevier Applied Science Publishers. S.d.

24. YOUNG, F.J; SHANE, R.S. *Materials and Processes*. 3.ed. Nova Iorque. Marcel Dekker Inc. 1985.
25. YOSHIMOTO, A. Estudo do Comportamento de Aços Inoxidáveis Austeníticos sob Irradiação de Neutrons. In. CONGRESSO GERAL DE ENERGIA NUCLEAR, 3, Belo Horizonte. 1990. *Anais*. Rio de Janeiro. CGEN. 1990. p-112-121.
26. TEODORO, C.A, Utilização de Aços Inoxidáveis como Materiais Estruturais en Núcleo de Reatores. In. CONGRESSO GERAL DE ENERGIA NUCLEAR, 3, Belo Horizonte. 1990. *Anais*. Rio de Janeiro. CGEN. 1990. p-168-176.
27. BONA, A., Análise Espectrográfica de Aços Inoxidáveis pela Técnica Ponto a Ponto. 1986, Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas energéticas e Nucleares, Autarquia Associada à Universidade de São Paulo. São Paulo.
28. HRIVŇAK, I. *Theory of Weldability of Metal and Alloys*. 1.ed. Amsterdam. Elsevier Science Publisher. 1972.
29. AMERICAN WELDING SOCIETY. *Introductory Welding Metallurgy*. 2.ed. Miami. 1971.
30. NUNES JR, A .C.; Arc Welding Origins. *Welding Journal*. Julho. p566-572. 1976.
31. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E112 – Standard Methods for Determining Average Grain Size. 1.ed. Philadelphia. 1982.
32. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E142 – Standard Methods for Controlling Quality of Radiographic Testing. 2.ed. Philadelphia. 1977.
33. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E165 – Standard Methods for Liquid Penetrant Inspection Method. 2.ed. Philadelphia. 1980.
34. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM A262 – Standard Methods for Detecting Susceptibility to Intergranular Attack in Austenitic Stainless Steels. 1.ed. Philadelphia. 1981.

35. AMERICAN WELDING SOCIETY. *Welding Inspection*. 2.ed. Miami. 1980.
36. AMERICAN WELDING SOCIETY. *Welding Process*. 7.ed. Miami. 1978.
37. AMERICAN WELDING SOCIETY. *Welding Handbook*. 7.ed. Miami. 1976.
38. AMERICAN WELDING SOCIETY. *Welding Encyclopedia*. 18.ed. Miami. 1997.
39. FAZANO, C A T V. *A Prática Metalografica*. 1.ed. São Paulo. Hemus Livraria Editora Ltda. 1980.
40. COTTRELL, A .H.; *Introdução à Metalurgia*. 3.ed. Lisboa. Fundação Calouste Gulbenkian. 1976.
41. NICHOLS, R.W. *The Uses of Welded Materials in Nuclear Power Engineering*. **Welding Journal**. Dezembro. p417s-432s. 1975.
42. Neves, M, D, M; *Soldagem de Varetas Combustíveis de Aço Inoxidável para Reatores Nucleares*. 1986. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia de Campinas. Universidade Estadual de Campinas. São Paulo.
43. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM C934 – Guide to Design and Quality Assurance Practices for Nuclear Fuel Rods*. 2.ed. Philadelphia. 1985.
44. GEMELLI, E. *Corrosão de Materiais Metálicos e suas Caracterização*; 1.ed; Rio de Janeiro; LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.. 2001.
45. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM A562 – Standard Practice for Determining Volume Fraction by Systematic Manual Point Count*. 1.ed. Philadelphia. 1983.
46. JEFFUS, L; JOHNSON, H,V; *Welding Principles and Applications*; 2.ed; Nova Iorque; Delmar Publishers Inc. 1988.
47. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM A213/213M – Standard Specification for Seamless Ferritic and Austenitic Alloy – Steel Boiler, Superheater and Heat-Exchanger Tubes*; 1.ed. Philadelphia. 1990.

48. HIGGINS, R,A; Propriedades e Estrutura dos Materiais em Engenharia. 1.ed. Rio de Janeiro, DIFEL – Difusão Editorial AS. s.a.
49. VAN VLACK, L.H; Princípios de Ciência dos Materiais. 1ed. São Paulo. Editora Edgard Blücher Ltda. 1970.
50. AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. ASME. Rules for Construction of Nuclear Power Plant Components – Division I. s.ed. s.p. 1998.
51. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM A403/A403M – Wrought Austenitic Stainless Steel Piping Fittings. 1.ed. Philadelphia. 1990.
52. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E-142 Controlling Quality of Radiographic Testing. 2ed. Philadelphia. 1983.
53. DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. DIN-54.109. Image Quality of Radiographs of Metallic Materials. s.ed. s.pu. s.d.
54. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM B353 – 1.ed. Philadelphia. 1990.
55. KING, R.T; CANONICO, D,A; BRINKMAN, C,R; Elevated Temperature Weldment Behavior as Related to Nuclear Design Criteria. **Welding Journal**. Agosto. P265s-275s. 1975.
56. CAMPBELL, H,C; Basic Welding Equations and Formulas. **Welding Journal**. Dezembro. p52 a 54. 1988.
57. KEY, J,F; Anode/Cathode Geometry and Shielding Gas Interrelationships in GTAW. **Welding Journal**. Dezembro. p364s a p370. 1980.
58. SCHAEFFLER, A,L; Constitution Diagram for Stainless Steel Weld Metal; **Metal Progress**. s.d. p.680. 1948.
59. HAUSER, D; VANECHO,J,A; Effects of Ferrite Content in Austenitic Stainless Steel Welds. **Welding Journal**. Março. P37s a p44s. 1982.

60. LIPPOLD, J,C; SAVAGE, W,F; Solidification of Austenitic Stainless Steel Weldments: Part I – A Proposal Mechanism. **Welding Journal**. Dezembro. p362s a p374. 1979.
61. LIPPOLD, J,C; SAVAGE, W,F; Solidification of Austenitic Stainless Steel Weldments: Part II – The Effect of Alloy Composition on Ferrite Morphology.. **Welding Journal**. Fevereiro. p48 a p58. 1980.
62. SUUTALA, N; TAKALO, T; MOISO, T; Comment of the Transformation $\delta + \gamma$ by a Massive Mechanism in Austenitic Stainless Steel. **Welding Journal**. Fevereiro. p92 a p95; 1981.
63. WEGST, C,W; *Stahlschlüssel*; 17.ed. Marbach. Verlag Stahlschlüssel Wegst GMBH. 1995.
64. SERVIÇO NACIONAL DA INDUSTRIA; *Soldagem*. I.ed. 1997.
65. GRAY, T,G,F; SPENCE, J; *Rational Welding Design*. I.ed. Londers; Butterworths; 1975.
66. ARATA, Y; MATSUDA, F; KATAYAMA, S; Solidification Crack in Weld Metals of Fully Austenitic Stainless Steels. **Japan Welding Research Institute**. s.d; p35-51; 1976.
67. LI. L; MESSLER, R,W; The Effects of Phosphorus and Sulfur on Susceptibility to Weld Hot Cracking in Austenitic Stainless Steel. **Welding Journal**. Dezembro. p387s a p396. 1999.
68. HELMUT FISCHER GMBH + CO; *Manual de Operação do Ferritoscópio MP30*; Versão 1.0. Alemanha. 1997.
69. KRAFTWERKUNION. AG. *Process Specification*. AVS E 63/01A. Ferrite Standard Evaluation. s.d.
70. BARROS, B,N; SCARMINIO, I,S; BRUNS, E,R; *Planejamento e Otimização de Experimentos*. 1,ed. Campinas, Editora da UNICAMP.1995.