

**Roberto Jorjan**

**Soldagem de revestimento tipo *lining* pelo  
processo MAG pulsado com arame sólido  
ER317L**

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

São Paulo

Fevereiro/2012

**Roberto Jorjan**

**Soldagem de revestimento tipo *lining* pelo  
processo MAG pulsado com arame sólido**

**ER317L**

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

Área de Concentração:

Engenharia de Soldagem

Orientador:

Diego Martins Garcia

São Paulo

Fevereiro/2012

*...Quem olha para fora sonha, quem olha para dentro desperta!*

Carl Gustav Jung

## **DEDICATÓRIA**

*Dedico este trabalho à minha esposa Daiane e  
à minha filha Manuela.*

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador, Diego Martins Garcia pela sua disponibilidade e compartilhamento de conhecimentos.

Ao professor Sérgio Duarte Brandi pelo acompanhamento do trabalho e pelas sugestões.

Aos inspetores de equipamentos da refinaria Presidente Bernardes: Eduardo Esteves, Nelson Bohemer, Maurício de Oliveira, Marcos Ferreira, David José, Célio Ronaldo e Marcos Rodrigues pelas fotos, informações e trabalhos de oficina.

Aos colegas André Carvalho, Marcelo Ajifú, Carlos da Silva Coelho da manutenção de equipamentos estáticos da refinaria Presidente Bernardes pela disponibilização dos corpos de prova e pela ajuda técnica.

Ao gerente do setor de Inspeção de Equipamentos da refinaria Presidente Bernardes, Nestor Ferreira de Carvalho pelo incentivo à educação continuada.

À refinaria Presidente Bernardes e à PETROBRAS pela oportunidade de realização deste trabalho.

Às empresas ESAB, Eutectic e Miller, que gentilmente disponibilizaram seus profissionais, equipamentos de soldagem e instalações para a confecção dos corpos de provas.

À empresa White Martins pela disponibilização de cilindro de gás.

À empresa Araujo pela realização dos ensaios metalúrgicos.

Às todas as pessoas que contribuíram para realização deste trabalho.

## **CURRICULUM VITAE**

Roberto Jorjan

Engenheiro de materiais formado pela Universidade Estadual de Ponta Grossa, Paraná.

Iniciou sua carreira profissional na CECRISA revestimentos cerâmicos em Santa Catarina, no desenvolvimento de produtos e processos industriais.

Em 2006 ingressou na PETROBRAS. Trabalhou na gerência de inspeção de equipamentos da refinaria Landulpho Alves de Mataripe na Bahia, e atualmente trabalha na gerência de inspeção de equipamentos da refinaria Presidente Bernardes em Cubatão, São Paulo.

## **RESUMO**

Este trabalho tem como objetivo avaliar as características de soldas realizadas pelo processo de soldagem MIG/MAG pulsado com arame sólido ER317L na instalação de revestimento interno tipo *lining* em ASTM A 240 TP 317L em torres de destilação que processam petróleo com elevada acidez naftênica.

As ligas utilizadas nas chapas e soldas de fixação de revestimento tipo *lining* devem conter um teor mínimo de 2,5% de molibdênio para resistir à corrosão naftênica.

Atualmente na PETROBRAS, utiliza-se o processo de soldagem MIG/MAG com arame tubular E309MoL ou E317L para ganhar produtividade e qualidade na instalação de *lining* em paradas de manutenção.

O processo MIG/MAG pulsado com arame sólido trabalha com correntes médias menores e com energia mais concentrada, gerando cordões de solda com menores diluições e com formato mais estreito em comparação com o arame tubular.

Neste trabalho obtiveram-se soldas com elevadas penetrações e teores de molibdênio acima de 3% utilizando-se correntes médias altas.

## **ABSTRACT**

This work aims to evaluate the characteristics of welds carried out by the pulsed MAG welding with solid wire ER317L for welding of internal lining in ASTM A 240 TP 317L in distillation towers that process naphthenic acidity oils.

The alloys used in lining plate and attachment welds must contain a minimum content of 2.5% molybdenum for naphthenic corrosion resistance.

PETROBRAS uses currently the MIG/MAG welding processes with cored wire E309MoL or E317L to gain productivity and quality in maintenance shutdowns.

The MIG/MAG pulsed with solid wire works with low average currents and concentrated energy, generating weld beads with small dilutions and narrow format in comparison with the tubular wire.

The welds obtained in this work showed high penetrations and molybdenum content above 3% using high average currents.



## **LISTA DE FIGURAS**

Figura 2.1 – Estrutura típica de ácido naftênico .....	4
Figura 2.2 – Estruturas típicas homólogas de ácidos naftênicos .....	5
Figura 2.3 – Locais preferenciais de ataque por ácidos naftênicos em unidades de destilação.....	6
Figura 2.4 – Corrosão naftênica em tubo de forno atmosférico, material aço liga 5%Cr ½Mo. ....	7
Figura 2.5 – Ataque por ácidos naftênicos em costado de torre de destilação à vácuo - seção de gasóleo leve (GOL) .....	8
Figura 2.6 – Representação gráfica de possível processo de corrosão naftênica .....	9
Figura 2.7 – Esquema de Helle para corrosão naftênica por condensação .....	10
Figura 2.8 – Taxas de corrosão de ligas ferrosas em função da temperatura..	13
Figura 2.9 – Corrosão por ácido naftênico em prato com borbulhador confeccionado em AISI 317 com 2,95% de Mo .....	15
Figura 2.10 – Metalurgia em planta de destilação - refinaria Presidente Bernardes (RPBC).....	16
Figura 2.11 – <i>lining</i> com sobreposição horizontal e vertical .....	17
Figura 2.12 – Soldagem de tiras com sobreposição.....	18
Figura 2.13 – Chapas de <i>lining</i> sobrepostas com rompimento na solda e abaulamento devido à penetração de produto.....	19
Figura 2.14 – Deformação na região das soldas em chapa sobreposta.....	20
Figura 2.15 – <i>Lining</i> sem sobreposição .....	20

Figura 2.16 – Soldagem de tiras sem sobreposição.....	21
Figura 2.17 – Chapas de <i>lining</i> abauladas e com estrias geradas por deformação plástica reveladas no ensaio de líquido penetrante.....	22
Figura 2.18 – Trincas em solda de fixação de chapas de <i>lining</i> . Soldagem realizada com eletrodo revestido. ....	23
Figura 2.19 – Instalação de <i>lining</i> sem sobreposição em torre de destilação à vácuo. Chapas em AISI 317L com dimensões 400 X 3000 mm. ....	24
Figura 2.20 – Processo de Soldagem MIG/MAG .....	25
Figura 2.21 – Equipamento básico para a soldagem MIG/MAG .....	27
Figura 2.22 – controle intrínseco do comprimento do arco .....	28
Figura 2.23 – Seções de arames eletrodos .....	29
Figura 2.24 – Diferença do cordão de solda entre arame sólido e tubular com mistura de gases Argônio e CO <sub>2</sub> .....	30
Figura 2.25 – Contorno de cordão de solda e penetração para alguns gases de proteção .....	33
Figura 2.26 – Variação do volume e do número de gotas por segundo em função da corrente de soldagem .....	34
Figura 2.27 – Esquema da transferência metálica globular , curto-circuito e pulverização axial, mostrando o comportamento da tensão e da corrente de soldagem durante a transferência .....	35
Figura 2.28 – Esquema do modo de transferência por arco pulsado. Observa-se a transferência de uma única gota por pulso de corrente .....	36
Figura 2.29 – Comparação entre modos de transferência em função da corrente e tensão .....	37

Figura 2.30 – Efeito da posição longitudinal da tocha .....	41
Figura 2.31 – Variação esquemática da corrente na soldagem GMAW com pulsação dupla .....	42
Figura 2.32 – O controle sinérgico .....	43
Figura 2.33 – Diagrama de Schaeffler com áreas de problemas típicos: fissuração de solidificação, formação de fases intermetálicas, crescimento de grão na ZTA e Fragilização por formação de martensita .....	45
Figura 2.34 – Diagrama de Schaeffler mostrando pontos correspondentes ao metal base (MB), metal de adição (MA) e a zona fundida (ZF) .....	46
Figura 4.1 – Desenho esquemático da montagem dos corpos de prova .....	50
Figura 4.2 – Montagem dos cordões de solda .....	52
Figura 4.3 – Critérios de aceitação para mordedura e reforço de solda .....	54
Figura 4.4 – Amostra retirada do corpo de prova para ensaio metalográfico. .	54
Figura 4.5 – Cálculo das áreas de diluição.....	56
Figura 4.6 – corpo de prova ASTM A 190 para ensaio de dobramento de face longitudinal. ....	57
Figura 4.7 – Croqui para medição de microdureza. ....	57
Figura 5.1 – CP1, gás: 98%Ar / 2%O <sub>2</sub> , corrente média: 125 A .....	59
Figura 5.2 – CP2 – gás: 96%Ar / 4%CO <sub>2</sub> , corrente média 215 A .....	59
Figura 5.3 – CP3 – gás: 96%Ar / 4%CO <sub>2</sub> , corrente 215 A .....	60
Figura 5.4 – CP4 – gás: 96%Ar / 4%CO <sub>2</sub> , corrente 170 A, soldado na posição horizontal .....	60
Figura 5.5 – CP5 – gás: 95%Ar / 3%CO <sub>2</sub> / 2%N <sub>2</sub> , corrente 130 A .....	61
Figura 5.6 – CP6 – gás: 95%Ar / 3%CO <sub>2</sub> / 2%N <sub>2</sub> , corrente 150 A .....	61

Figura 5.7 – CP7 – gás: 95%Ar / 3%CO <sub>2</sub> / 2%N <sub>2</sub> , corrente 176 A .....	62
Figura 5.8 – CP8 - gás 95%Ar / 3%CO <sub>2</sub> / 2%N <sub>2</sub> , corrente 160/185 A, soldagem com duplo pulso .....	62
Figura 5.9 – CP9: gás 95%Ar/3%CO <sub>2</sub> /2%N <sub>2</sub> , corrente 120/145 A. Soldagem com duplo pulso. ....	63
Figura 5.10 – Micrografias do centro do cordão de solda dos CP1 (98%Ar / 2%O <sub>2</sub> ) e CP2 (96%Ar / 4%CO <sub>2</sub> ) .....	65
Figura 5.11 – Micrografias do centro do cordão de solda dos CP6 (95%Ar / 3%CO <sub>2</sub> / 2%N <sub>2</sub> ) e CP9 (95%Ar / 3%CO <sub>2</sub> / 2%N <sub>2</sub> ) com duplo pulso.....	65
Figura 5.12 – CP5 com trincamento na solda .....	67

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 2.1 – Características gerais dos modos de transferência metálica.....	36
Tabela 2.2 – Faixas de corrente utilizáveis com diferentes diâmetros.....	38
Tabela 4.1 - Principais características das fontes de energia utilizadas .....	49
Tabela 4.2 - Composição química (%) das chapas dos corpos de prova. ....	49
Tabela 4.3 - Composição química (%) do eletrodo .....	51
Tabela 4.4 - Parâmetros de soldagem utilizados na soldagem dos corpos de prova.....	53
Tabela 5.1 - Resultados de penetração e reforço de solda.....	64
Tabela 5.2 – Resultado do teor de Mo e da diluição nos cordões de solda.....	66
Tabela 5.3 – Medição de dureza Vickers 1,0 Kgf (HV1).. .....	67

## **LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS**

API:	American Petroleum Institute
ASME:	American Society of Mechanical Engineers
ASTM:	American Society For Testing And Materials
AWS:	American Welding Society
DSC:	Diesel circulante
DSL:	Diesel leve
DSP:	Diesel pesado
FCAW:	Flux Core Arc Welding
GMAW:	Gas Metal Arc Welding
GOL:	Gasóleo leve
GOP:	Gasóleo pesado
GTAW:	Gas Tungsten Arc Welding
IAT:	Índice de Ácidez Total
MAG:	Metal Active Gas
MIG:	Metal Inert Gas
RAT:	Resíduo atmosférico
RV:	Resíduo de vácuo
ZTA:	Zona Termicamente Afetada

## **SUMÁRIO**

DEDICATÓRIA.....	ii
AGRADECIMENTOS.....	iii
CURRICULUM VITAE.....	iv
RESUMO .....	v
ABSTRACT .....	vi
LISTA DE FIGURAS .....	vii
LISTA DE TABELAS.....	xi
LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS .....	xii
SUMÁRIO.....	xiii
1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 Corrosão Naftênica.....	3
2.1.1 Histórico.....	3
2.1.2 Ácidos naftênicos.....	4
2.1.3 Locais e Mecanismos de ataque .....	6
2.1.4 Variáveis do processo corrosivo.....	12
2.1.5 Prevenção e mitigação.....	14
2.2 Instalação de <i>lining</i> em torres de destilação. ....	17
2.3 O Processo de soldagem MIG/MAG.. ....	25
2.3.1 Equipamento.....	26
2.3.2 Consumíveis.....	28
2.3.2.1 Arame eletrodo.....	28
2.3.2.2 Gases de proteção.....	31
2.3.3 Modos de transferência metálica.....	33
2.3.4 Variáveis e técnicas do processo.....	38
2.3.5 O processo MIG/MAG pulsado.....	41
2.3.5.1 O Processo MIG/MAG pulsado duplo.....	42
2.3.6 MIG Sinérgico.....	43
2.3.7 Soldagem de aços austeníticos.....	44
3. OBJETIVOS.....	47
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	48
4.1 Introdução.....	48
4.2 Fontes de energia .....	48
4.3 Materiais.....	49
4.3.1 Corpos de prova.....	49
4.3.2 Eletrodo.....	51
4.3.3 Gases de proteção.....	51
4.4 Metodologia experimental... ..	52
4.4.1 Soldagem dos corpos de prova.....	52

4.4.2	Análise das amostras.....	53
4.4.2.1	Exame visual.....	53
4.4.2.2	Macrografia e Micrografia.....	54
4.4.2.3	Penetração e reforço de solda.....	55
4.4.2.4	Análise química.....	55
4.4.2.5	Diluição.....	55
4.4.2.6	Dobramento.....	56
4.4.2.7	Microdureza .....	57
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	58
5.1	Introdução. ....	58
5.2	Aspecto visual e macrografia das soldas. ....	58
5.3	Penetração e reforço de solda.....	64
5.4	Micrografia das soldas.....	65
5.5	Análise química e diluição.....	66
5.6	Líquido penetrante .....	66
5.7	Ensaio de dobramento .....	67
5.8	Microdureza .....	67
6.	CONCLUSÕES.....	68
	<i>SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.</i> ....	69
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:.....	70



## **1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.**

As refinarias da PETROBRAS não foram projetadas para processar petróleos com altos teores de ácidos naftênicos. Com o início da importação e processamento de petróleos mais ácidos, principalmente da Venezuela no final da década de 70 [1], e com o início da destilação dos petróleos nacionais ácidos a partir da década de 80, as refinarias brasileiras começaram a conviver com um novo processo corrosivo, a corrosão naftênica.

Desde então a metalurgia das torres de destilação, fornos e tubulações das unidades de destilação atmosférica e à vácuo vêm sendo adaptadas para resistir à corrosão naftênica.

As torres de destilação originalmente construídas em aço carbono, e com algumas seções cladeadas em aços inox ferríticos AISI 405 e AISI 410S para resistir à corrosão por compostos de enxofre, vêm sendo revestidas por ligas mais resistentes através da instalação de revestimento tipo *lining*.

Os primeiros revestimentos tipo *lining* foram soldados por processo manual com eletrodo revestido, posteriormente para ganhar produtividade e qualidade, introduziu-se o processo de soldagem semiautomático MIG/MAG com arame tubular. O consumível inicialmente usado era E309Mo e atualmente vêm-se utilizando o E317L.

As seções das torres de destilação possuem grande área, e nas paradas de manutenção o processo de soldagem semiautomático MIG/MAG proporciona ganho em produtividade e qualidade.

No processo MAG pulsado com arame sólido trabalha-se com correntes médias menores e energia mais concentrada, proporcionando cordões com maior penetração e menor diluição.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.**

### **2.1 CORROSÃO NAFTÊNICA.**

#### **2.1.1 HISTÓRICO.**

A corrosão naftênica foi observada pela primeira vez em 1920, quando petróleos provenientes da Romênia, Rússia (região de Baku), América do Sul e da Califórnia foram destilados [2].

No início dos anos 30, durante a 11ª Reunião Anual do American Petroleum Institute (API) nos Estados Unidos foi apresentado um trabalho em que, pela primeira vez, fazia-se referência aos ácidos naftênicos contidos nos petróleos, como uma fonte para corrosão [2, 3].

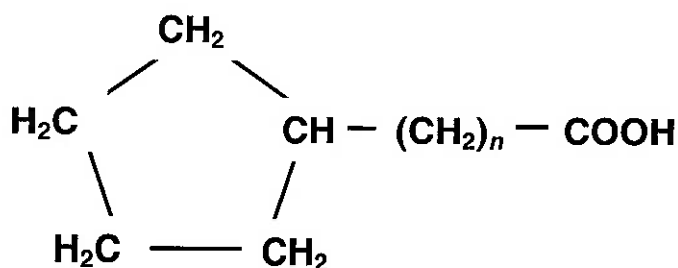
DERUNGS [2], em 1956 publicou um dos primeiros artigos sobre corrosão naftênica em plantas de destilação, descrevendo as características deste novo tipo de ataque, os fatores que o influenciam e as formas de proteção.

No Brasil, a partir do final da década de 70, com o processamento de petróleos ácidos, surgiu a possibilidade da ocorrência de corrosão naftênica, processo corrosivo até então não encontrado na PETROBRAS.

Ficou evidente, desde então, a necessidade de algumas adaptações nas unidades de destilação, tal como a mudança de especificação dos aços utilizados em fornos, linhas de transferência e internos de torres de vácuo [4].

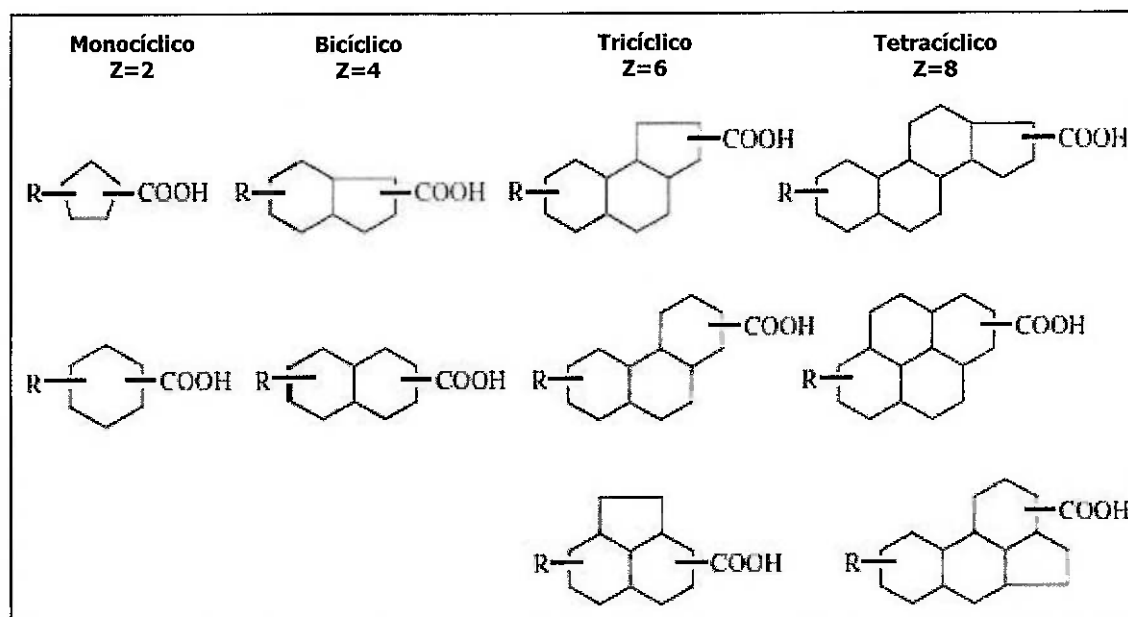
### 2.1.2 ÁCIDOS NAFTÊNICOS.

Ácidos naftênicos é uma designação geral para os ácidos orgânicos presentes em vários petróleos. O nome provém do fato de a acidez ter sido observada pela primeira vez, em petróleos de base naftênica (petróleos russos da região de Baku). Os ácidos naftênicos são classificados como ácidos carboxílicos monobásicos de fórmula geral  $\text{RCOOH}$ , onde R são estruturas cicloalifáticas derivadas do ciclopentano e ciclohexano, e o grupo carboxila está ligado a uma cadeia parafínica lateral. O ácido naftênico mais simples é o ácido acético ciclopentano ( $n=1$ ) [5, 6], figura 2.1.



**Figura 2.1** - Estrutura típica de ácido naftênico [6].

De uma forma geral, os ácidos naftênicos são representados pela fórmula geral  $\text{C}_n\text{H}_{2n-2}\text{O}_2$ , onde  $n$  representa o número de carbono e  $z$  representa o número de átomos de hidrogênio perdidos na ciclização da estrutura (especificando séries homólogas).



**Figura 2.2** – Estruturas típicas homólogas de ácidos naftênicos, onde R=grupamento alquila, adaptado de [6].

Quanto maior é o peso molecular destes ácidos, maior é o ponto de ebulição, então, eles se distribuirão ao longo da destilação conforme seu peso molecular. A experiência tem mostrado que os ácidos naftênicos se concentram nas frações pesadas com maior ponto de ebulição [7].

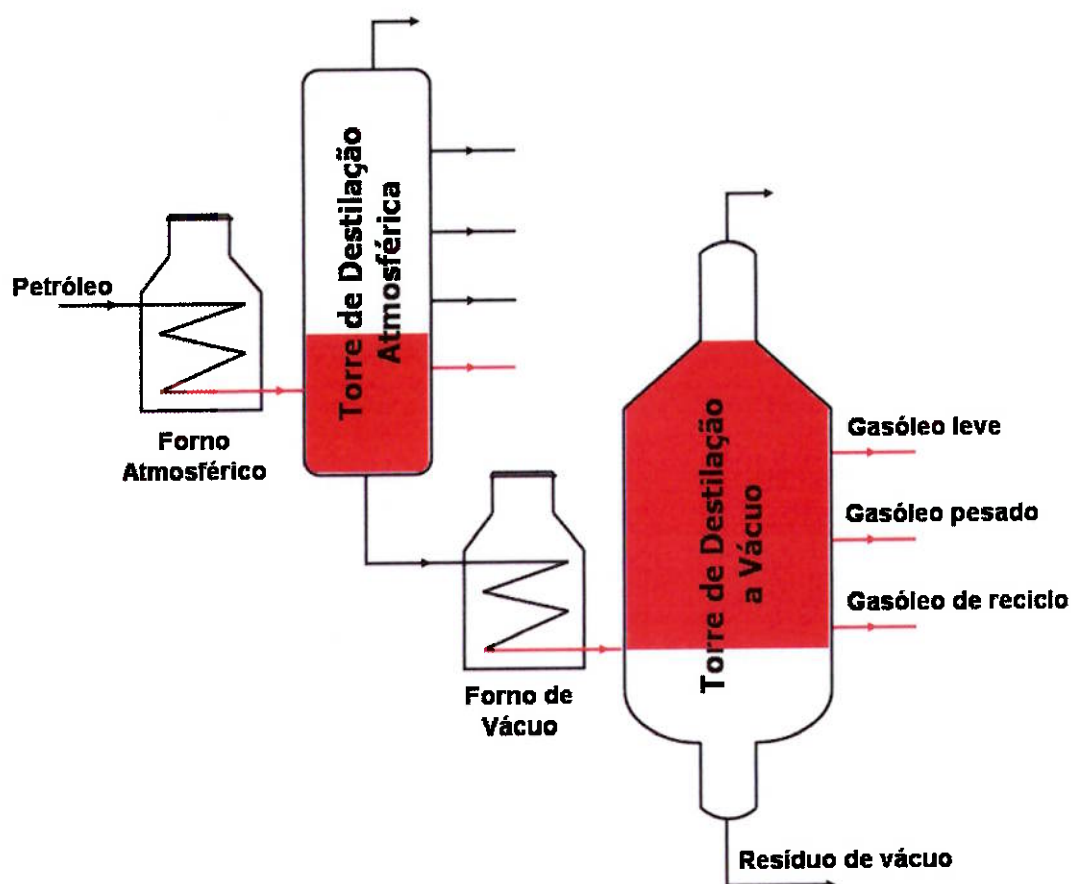
Um dos índices mais usados para medir a agressividade do petróleo é o Índice de Acidez Total (IAT), que consiste na quantidade de hidróxido de potássio (KOH) necessária para neutralizar a acidez de um grama de petróleo ou derivados.

DERUNGS [2] considera um petróleo potencialmente corrosivo quando este apresentar IAT igual ou superior a 0,5 mg KOH/g. Muitos refinadores e pesquisadores vêm sustentando esta afirmativa, entretanto, há casos de corrosão naftênica com petróleos com IAT menor que 0,5 [5, 8], evidenciando que não é só a acidez que rege o processo corrosivo.

PIEHL [9] considera o índice crítico de 1,5 a 2,0 mg KOH/g, pelo método ASTM D-974, mas aplicado às frações do petróleo destilado.

### 2.1.3 LOCAIS E MECANISMOS DE ATAQUE.

O ataque pelos ácidos naftênicos acontece mais freqüentemente em meios bifásicos gás-líquido, e com maior intensidade quando ocorre mudança de fase como a vaporização e a condensação. Em plantas de destilação, os locais preferenciais são tubos de saída de fornos, tubulação de transferência de forno para torre, descargas de bombas e algumas seções das torres atmosféricas e à vácuo (figura 2.3).



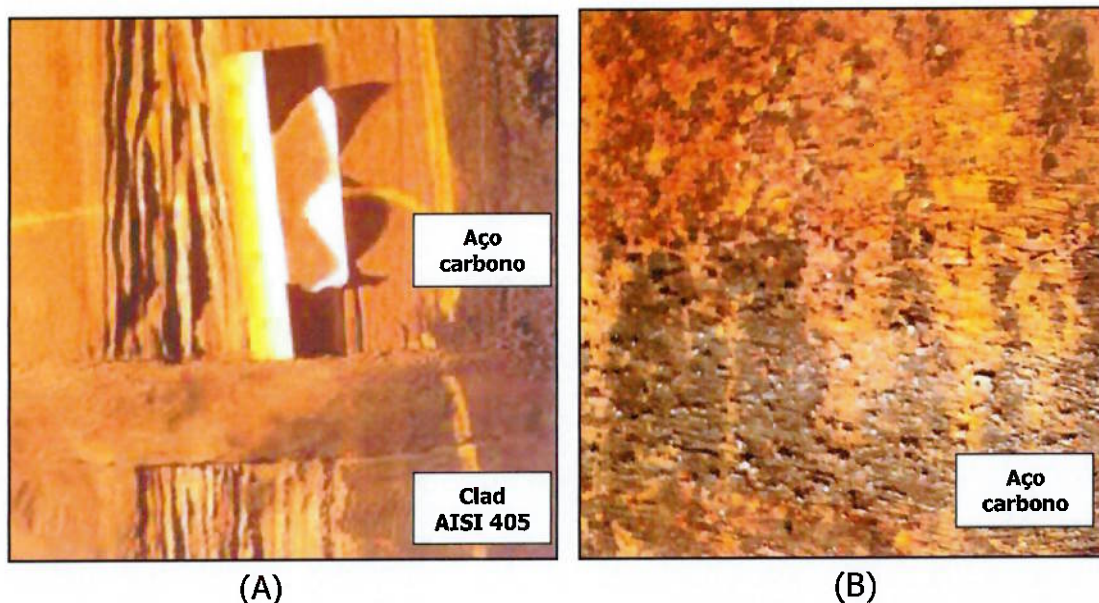
**Figura 2.3** - Locais preferenciais (em vermelho) de ataque por ácidos naftênicos em unidades de destilação, adaptado de [7].

Quando o ataque corrosivo acontece por escoamento (tubos de fornos e tubulações), e é localizado, o aspecto da superfície é liso, sem produto de corrosão e com alvéolos de bordas aguçadas (figura 2.4).



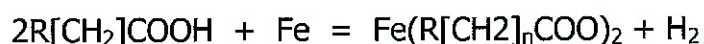
**Figura 2.4** – Corrosão naftênica em tubo de forno atmosférico, material aço liga 5%Cr ½Mo.

Em casos de baixa velocidade, como acontece em costados de torres de destilação, o principal mecanismo de ataque é por condensação. Neste caso, o aspecto da corrosão são sulcos localizados, ou ainda alvéolos isolados ou agrupados com aspecto de “casca de laranja”, figura 2.5.



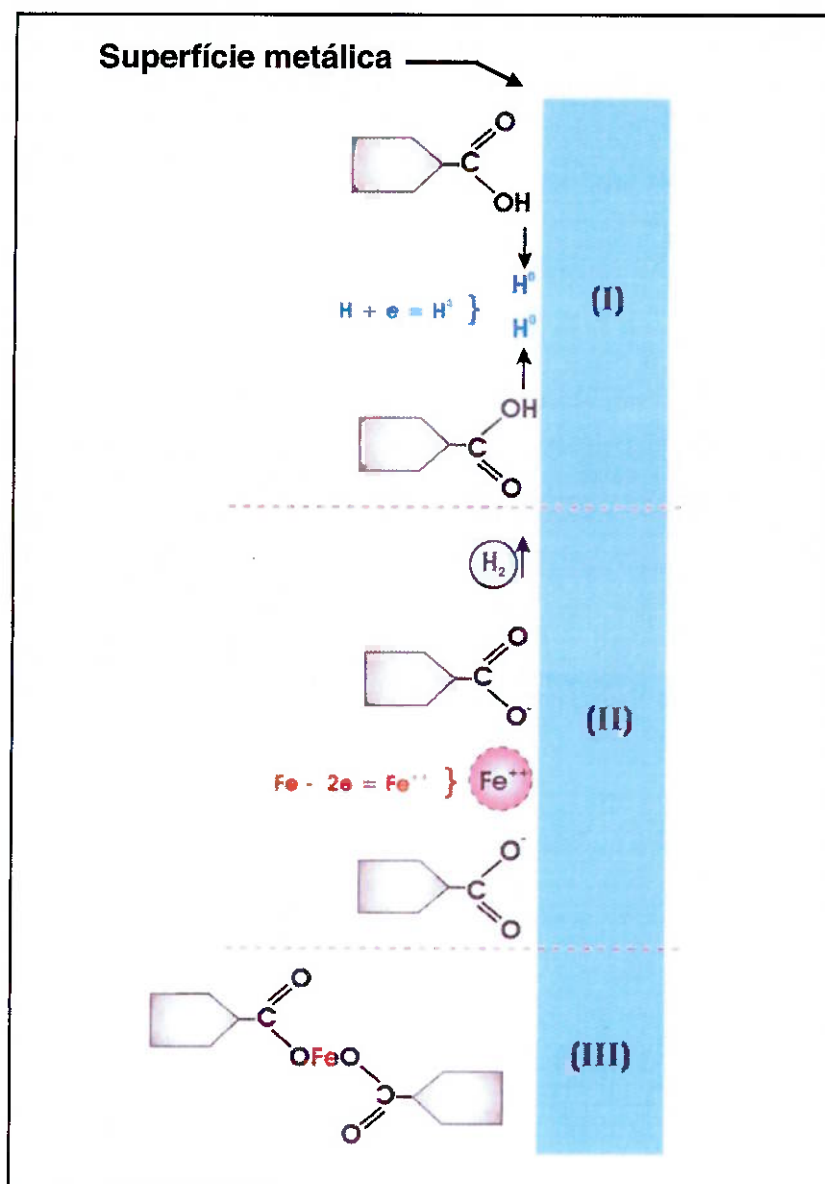
**Figura 2.5** – Ataque por ácidos naftênicos em costado de torre de destilação à vácuo - seção de gasóleo leve (GOL). (A) sulcos profundos (B) aspecto “casca de laranja”.

Considerando-se que o processo de ataque pelo ácido naftênico seja por oxidação direta, a reação dos diversos tipos de ácidos naftênicos com a superfície metálica seria:



Inicialmente uma molécula de ácido colide com a superfície metálica, formando um radical de ferro e deixando um hidrogênio disponível adsorvido na superfície metálica. Imediatamente outro ácido reage com este radical, liberando outro hidrogênio. De maneira global os hidrogênios atômicos reagem formando o gás hidrogênio e naftenato de ferro como produto [10], o esquema é mostrado na figura 2.6.





**Figura 2.6** – Representação gráfica de possível processo de corrosão naftênica, adaptado de [10].

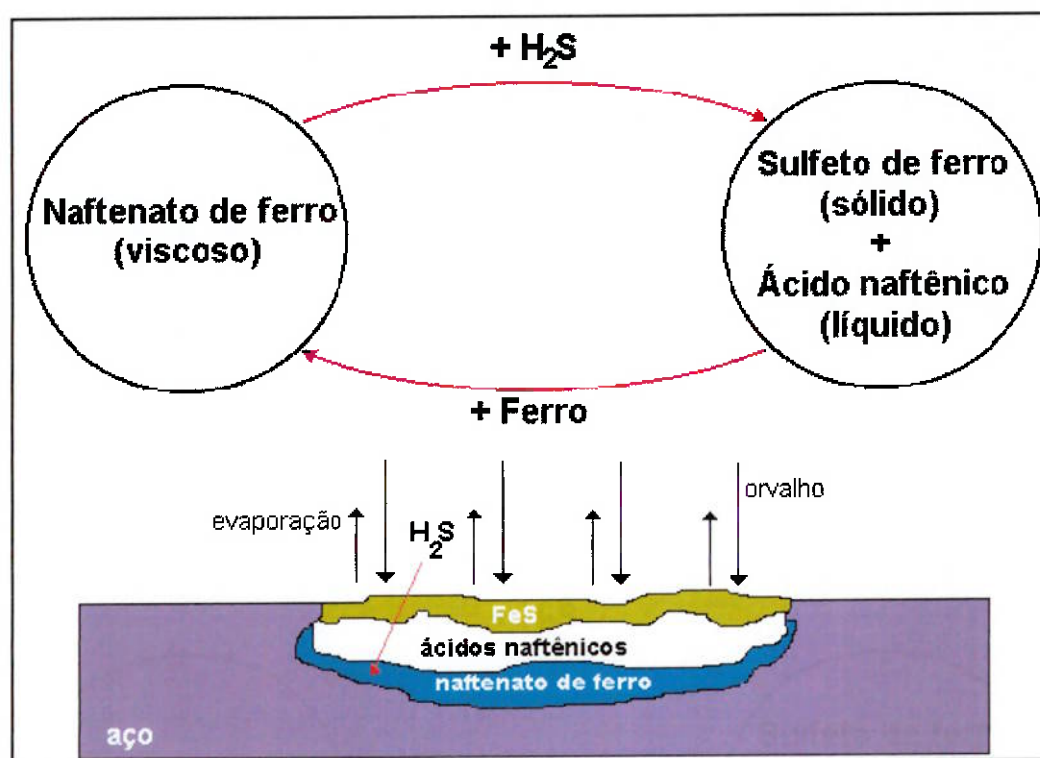
Os naftenatos de ferro são carregados pelas frações do petróleo, formando depósitos nas torres em função da evaporação do solvente. Estes depósitos podem se formar em qualquer lugar da torre, como bandejas, recheios, grades, bicos, planos horizontais, ou nas paredes do vaso [11].

Como os naftenatos não são corrosivos, HELLE [11] e BABAIAN-KIBALA [12] et al. propõem que haja a liberação de ácido naftênico pela reação do naftenato com o  $H_2S$ . Este ácido naftênico volta a atacar o ferro formando novamente o

naftenato de ferro, e o processo prossegue de uma forma autocatalítica para dentro do aço.

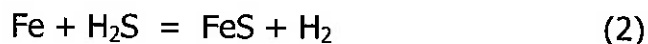
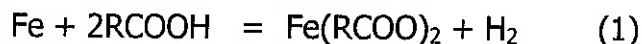
O  $\text{H}_2\text{S}$  teria, então, um comportamento duplo na corrosão por ácidos naftênicos. Primeiro, regenerando e concentrando os ácidos naftênicos através da precipitação do sulfeto de ferro. Em segundo, formando rapidamente um filme protetor de sulfeto. O esquema da figura 2.7 mostra este mecanismo.

Nos depósitos a concentração dos ácidos naftênicos pode ser tão elevada, que materiais reconhecidamente resistentes, como os aços inoxidáveis AISI 316 e 317, passam a ser corroídos [7].



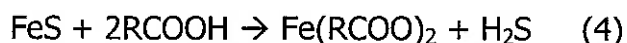
**Figura 2.7** – Esquema de Helle para corrosão naftênica por condensação, adaptado por [7].

As reações propostas por BABAIAN-KIBALA et al. [12] são:



A equação (1) representa o ataque direto do ácido naftênico sobre o ferro (aço carbono), enquanto a equação (2) representa a corrosão pelo sulfeto de hidrogênio. A grande diferença é que o produto de corrosão, naftenato de ferro, é bastante solúvel no óleo, enquanto o sulfeto de ferro tende a formar um filme protetor sobre o metal. A equação (3) mostra a regeneração do ácido naftênico pela reação do sulfeto de hidrogênio com o naftenato de ferro.

Se o filme protetor de FeS já tiver sido formado, para poder haver a corrosão naftênica, gerando os naftenatos de ferro que irão se depositar na torre, seria necessário que a reação (3) ocorresse em sentido inverso ao que foi apresentado:



PIEHL [9] pondera que o  $\text{H}_2\text{S}$  e os ácidos naftênicos podem agir de forma competitiva, formando e destruindo o filme de FeS. Porém, os ácidos naftênicos não dissolvem, necessariamente, o filme protetor de FeS, mas afetam a sua

integridade. O aumento do teor de ácidos naftênicos no petróleo levaria, então, a uma dissolução parcial do filme de FeS, reduzindo sua adesão e integridade.

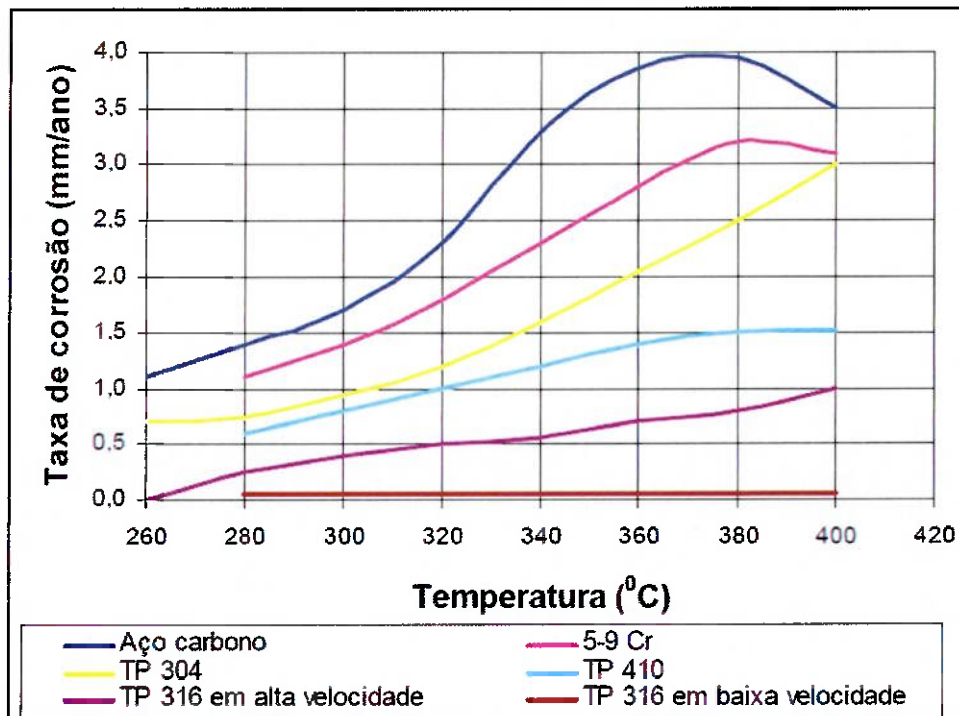
#### **2.1.4 VARIÁVEIS DO PROCESSO CORROSIVO.**

Além da acidez, outras variáveis exercem forte influência na característica corrosiva do petróleo, tais como a temperatura, velocidade, turbulência, grau de vaporização, teor de enxofre e composição química do aço [13]

A corrosão naftênica é favorecida principalmente pela temperatura, e acontece em uma determinada faixa, mas há uma divergência entre os valores mínimos e máximos encontrados na literatura. Em seu trabalho, PAIVA [7] pesquisou esses limites em diversas fontes, e o limite mínimo e máximo encontrado são 216 e 400°C respectivamente.

Entretanto, na refinaria Presidente Bernardes há histórico de corrosão naftênica em temperaturas entre 190 e 200°C, na região de gasóleo leve (GOL) em torre de destilação à vácuo (figura 2.5).

A figura 2.8 mostra o efeito da temperatura na taxa de corrosão para cinco ligas diferentes, conforme dados coletados e compilados por HELER [3] em diferentes refinarias dos Estados Unidos.



**Figura 2.8** - Taxas de corrosão de ligas ferrosas em função da temperatura, adaptado de [3].

Devido as diversos parâmetros envolvidos, a experiência tem mostrado que há dificuldade de prever taxas de corrosão reais nos equipamentos somente com dados de laboratório. Os Refinadores têm relatado que cada unidade de processo tem seu histórico, e que nem todas as unidades apresentam corrosão nos mesmos locais [13].

### 2.1.5 PREVENÇÃO E MITIGAÇÃO.

Algumas ações podem ser tomadas para diminuir os efeitos provocados pela presença de ácidos naftênicos nos diferentes tipos de petróleo, tais como: mistura de petróleos (*blending*), injeção de inibidores de corrosão, mudança metalúrgica dos equipamentos, e inspeção dos locais com maior probabilidade de ocorrência.

A diluição dos petróleos mais ácidos com petróleos menos ácidos nos tanques de armazenamento (*blending*), a inspeção e a adequação metalúrgica são os métodos mais utilizados nas refinarias da PETROBRAS.

A seleção adequada dos materiais é o método mais adequado para controlar a corrosão naftênica em longo prazo. Em tubulações e seções das torres de destilação, onde a temperatura está abaixo de 220°C e não há condensação, o aço carbono ainda é usado.

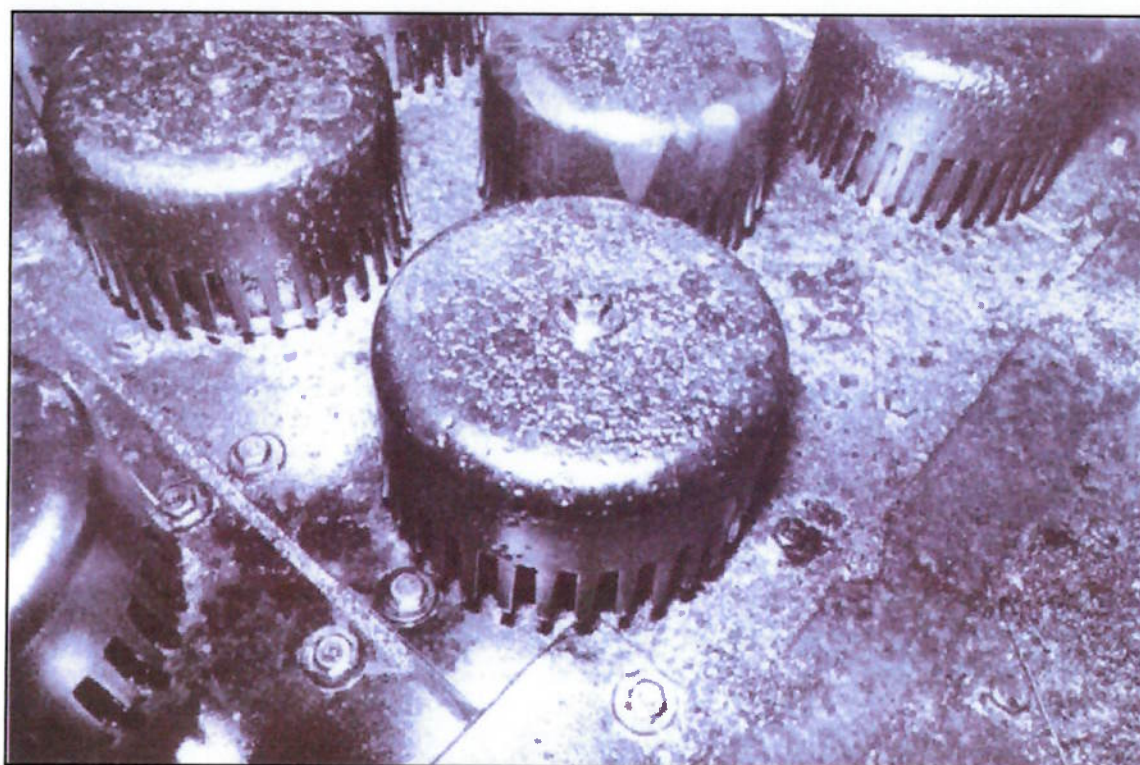
Os revestimentos cladeados em aços inoxidáveis ferríticos AISI 405 e 410S, encontrados em algumas regiões de torres de destilação atmosférica e à vácuo, foram selecionados originalmente para resistir à corrosão por compostos de enxofre em condições de temperaturas mais altas. Estes aços apresentam uma resistência à corrosão naftênica maior que o aço carbono, porém, em regiões onde há condensação ácida de ácidos orgânicos, os aços ferríticos sofrem corrosão, conforme verificado em torre de destilação à vácuo da RPBC (figura 2.5).

Os aços austeníticos contendo alto teor de molibdênio são os que possuem maior resistência à corrosão por ácidos naftênicos. Deve-se, entretanto, usar as

especificações com baixo carbono como para evitar a sensitização durante a soldagem.

Na refinaria Presidente Bernardes, as ligas austeníticas AISI 317, com teor de molibdênio entre 3 e 4%, empregadas em tubulações, conexões e revestimento interno das torres, vêm resistindo à corrosão naftênica.

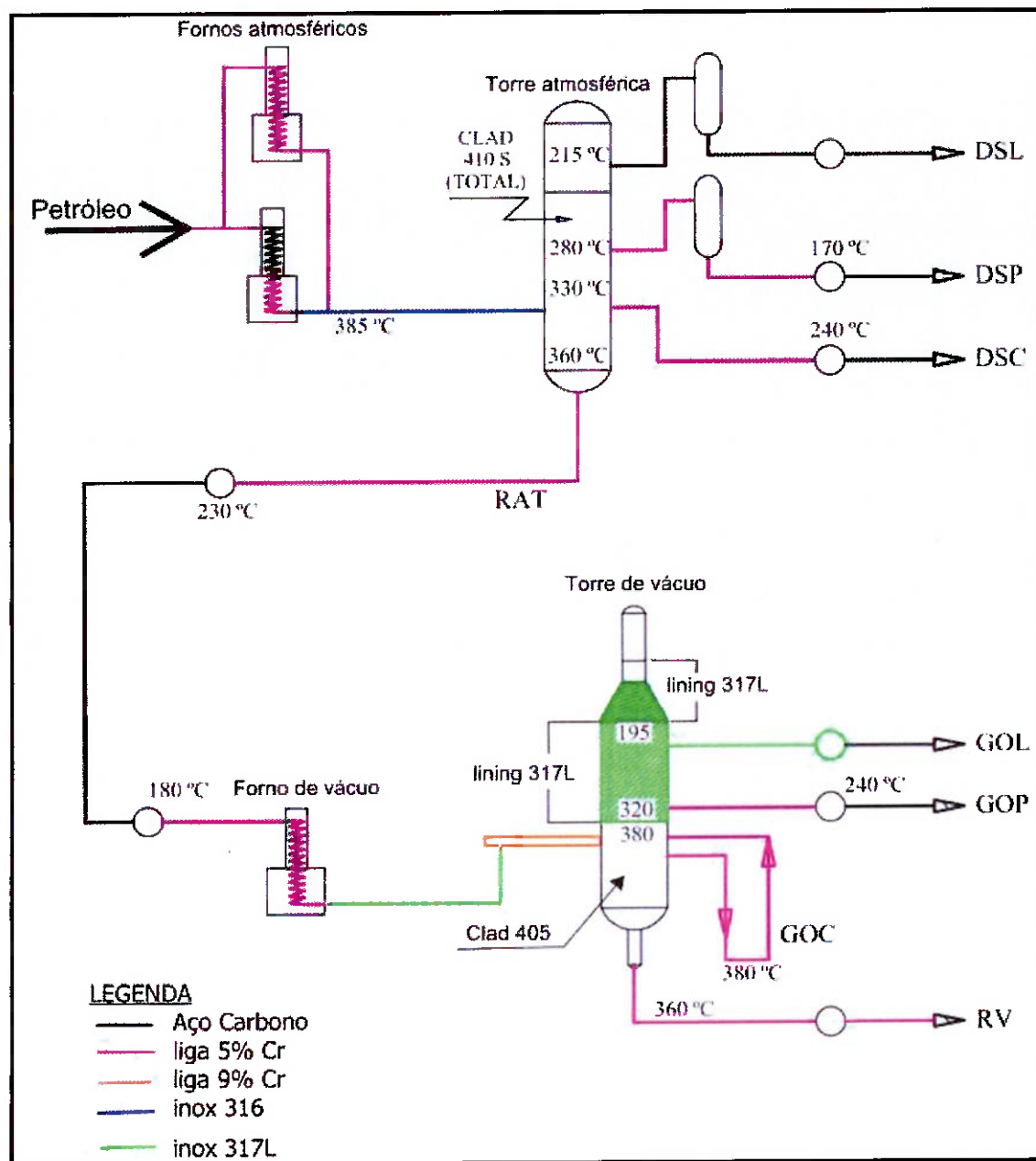
Porém, na literatura já há relatos de corrosão naftênica em ligas AISI 317 em torres de destilação [14, 15].



**Figura 2.9** – Corrosão por ácido naftênico em prato com borbulhador confeccionado em AISI 317 com 2,95% de Mo [14].

Em 2008, GALLO [15] apresentou um quadro de refinarias que tiveram tubulações e *lining* em AISI 317 atacados por ácidos naftênicos e substituídos por liga austenítica AISI 904L, com teor de molibdênio entre 4 e 5%.

A figura 2.10 mostra um esquema da metalurgia atual de uma das plantas de destilação da refinaria Presidente Bernardes (RPBC).



**Figura 2.10** – Metalurgia em planta de destilação - refinaria Presidente Bernardes (RPBC).





**Figura 2.13** – Chapas de *lining* sobrepostas com rompimento na solda e abaulamento devido à penetração de produto.

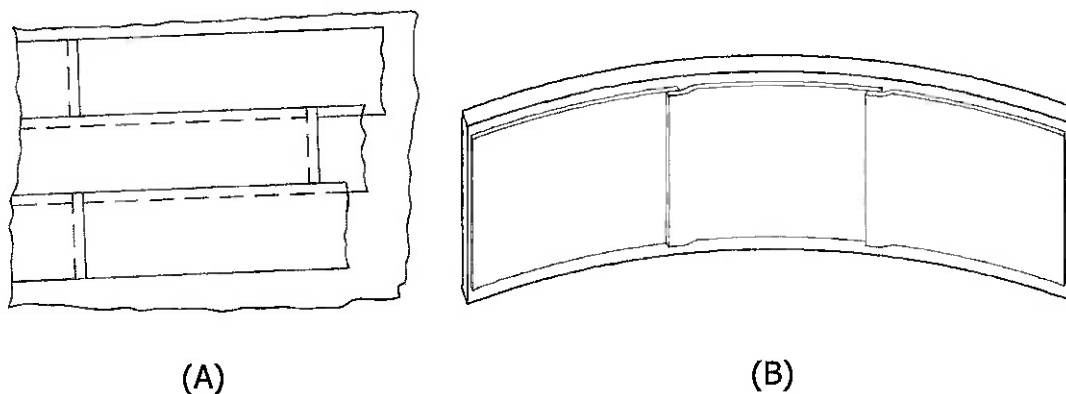
Em simulação realizada por TINOCO et al. [16] em modelo axissimétrico (onde os sólidos de revolução são representados pela seção transversal) para painéis de chapas sobrepostas horizontais e verticais, observou-se que, além do acúmulo de deformação na região de sobreposição, há uma flexão bastante pronunciada do cordão de solda, concluindo-se que essa é uma solução muito suscetível à falha, pois além de praticamente toda a deformação plástica concentrar-se na região de sobreposição, o cordão de solda fica sujeito a uma flexão que tende a nuclear trincas na raiz da solda, figura 2.14.

## 2.2 INSTALAÇÃO DE *LINING* EM TORRES DE DESTILAÇÃO.

O revestimento com tiras soldadas *strip lining* ou *lining* é constituído de chapas finas, resistentes à corrosão, soldadas diretamente no costado dos equipamentos, sua aplicação é relativamente simples, e atualmente é o revestimento mais utilizado na manutenção de torres de destilação.

As tiras devem ser conformadas para se adaptarem ao contorno da superfície das torres, chapas não calandradas geram maior distância entre a chapa e o costado, aumentando o volume de ar aprisionado.

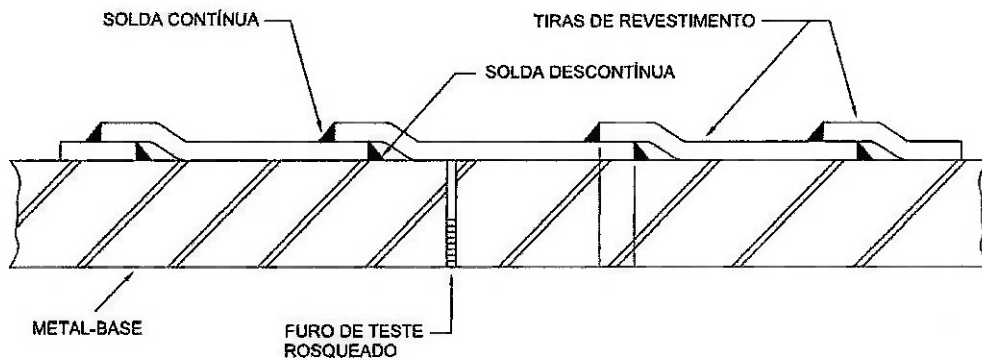
A instalação das tiras metálicas pode ser realizada com ou sem sobreposição. A instalação de *lining* com sobreposição pode ser ainda realizada horizontalmente ou verticalmente conforme mostra a figura 2.11.



**Figura 2.11** – *lining* com sobreposição horizontal (A) e vertical (B) [16, 17].

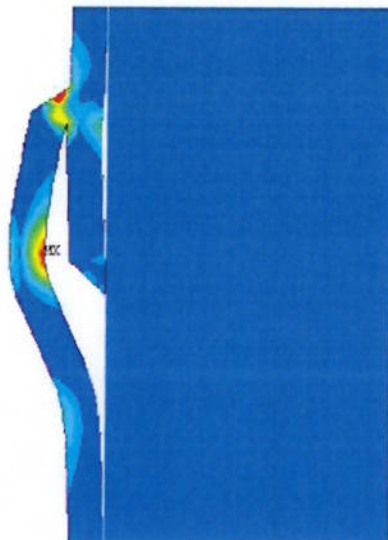
a) *Lining* com sobreposição: Nessa configuração as bordas inferiores das chapas são soldadas no costado de forma intermitente, para permitir a passagem de ar de teste. A borda superior é sobreposta à próxima chapa, à

qual é soldada ao longo de todo seu comprimento, conforme é demonstrado na figura 2.12.



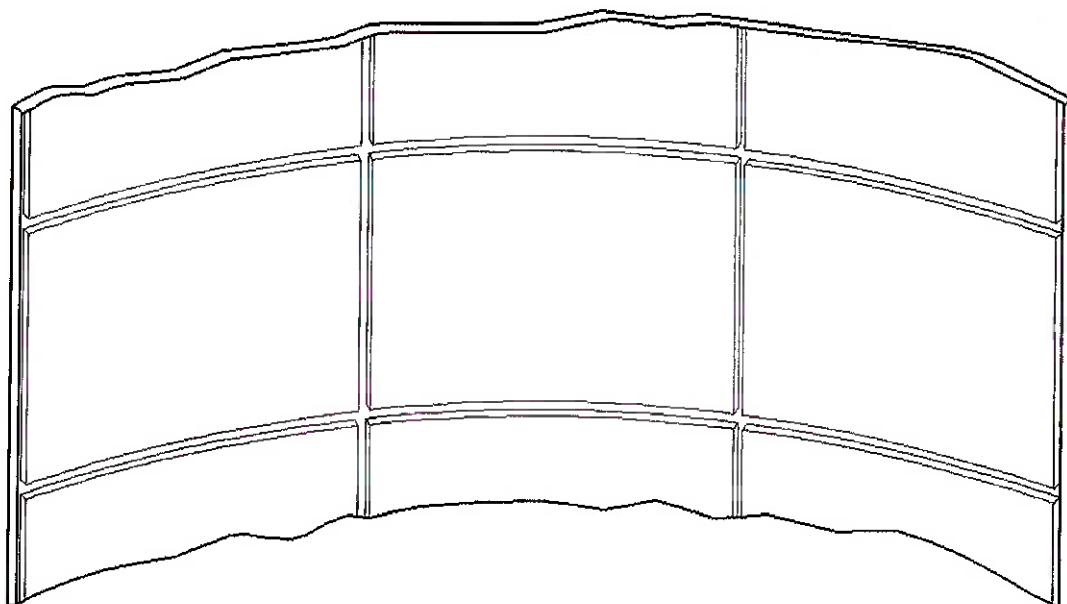
**Figura 2.12** – Soldagem de tiras com sobreposição [17].

Essa construção permite que todo o painel seja testado pneumaticamente de uma só vez, já que os espaços de confinamento entre as chapas do *lining* e o costado se comunicam. Essa característica traz a desvantagem de que, caso alguma das soldas do painel falhe, todo o espaço de confinamento será preenchido pelo produto. Com o passar do tempo esse produto “coqueifica”, estufando cada vez mais as chapas (figura 2.13). A presença desse coque cria dificuldades, tanto na remoção das chapas velhas, quanto na preparação de superfície para a soldagem das novas chapas [16].



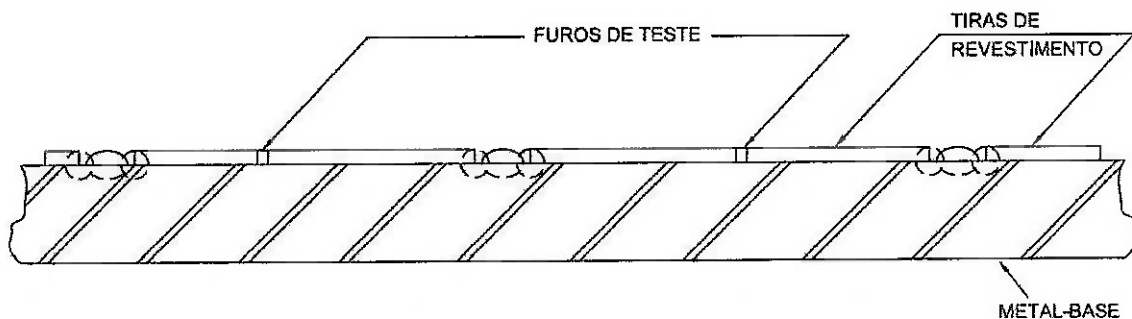
**Figura 2.14** - Deformação na região das soldas em chapa sobreposta [16].

b) Chapas sem sobreposição: Nesta configuração as chapas são soldadas diretamente sobre o costado em todo seu contorno, conforme mostrado na figura 2.15.



**Figura 2.15** – *Lining* sem sobreposição [16].

O espaço entre as chapas, que varia entre 6 e 10mm, é preenchido por dois ou três cordões de solda - figura 2.16.



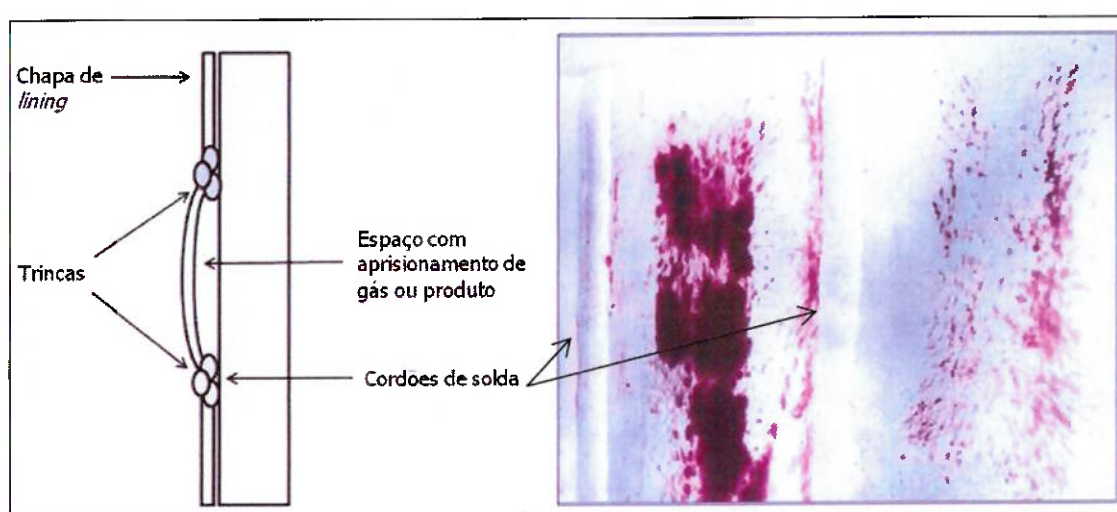
**Figura 2.16** – Soldagem de tiras sem sobreposição [17].

No estudo realizado por TINOCO et al. [16] para chapas sem sobreposição em torres atmosféricas e à vácuo, foram avaliadas as configurações e dimensões máximas das chapas de revestimento, de modo a minimizar-se a quantidade de soldas. A partir dos resultados das simulações computacionais e dos resultados experimentais, concluiu-se que:

- Para chapas de *lining* soldadas em todo o contorno na região cilíndrica da torre, o valor da deformação máxima praticamente independe do comprimento da chapa, permitindo maior liberdade na escolha do comprimento das chapas de *lining*.
- Na configuração descrita acima, podem ser utilizadas chapas com até 400 mm de largura em torre de vácuo, sem comprometer-se a integridade do *lining*.
- O furo usado para o teste pneumático e secagem deverá estar na região próxima aos cantos das chapas.
- O teste pneumático deverá ser realizado a uma pressão máxima de 0,5 kgf/cm<sup>2</sup>.

É recomendada a secagem do espaço vazio entre o costado e a chapa de *lining* após a soldagem, a uma temperatura máxima controlada de 110°C.

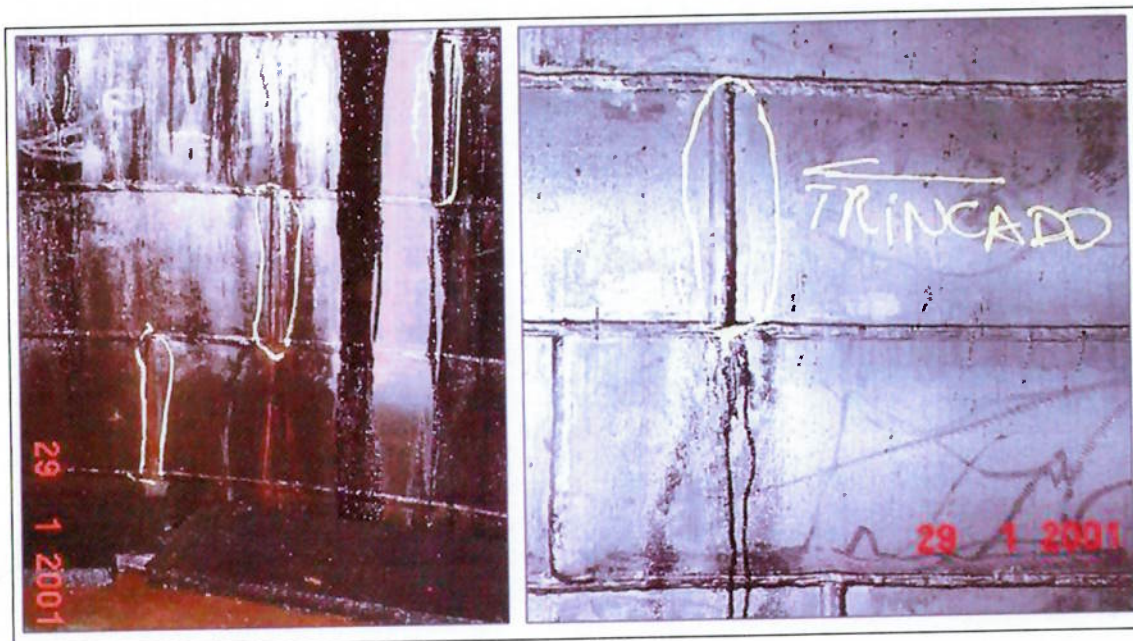
Quando fica ar aprisionado entre a chapa e o costado, ou quando acontece a falha de uma solda e o produto invade este espaço, as chapas de *lining* se deformam, formando um abaulamento pronunciado com deformações plásticas (figura 2.17).



**Figura 2.17** – Chapas de *lining* abauladas e com estrias geradas por deformação plástica reveladas no ensaio de líquido penetrante.

As falhas em revestimento tipo *lining* acontecem principalmente no cordão de solda de fixação, a figura 2.18 mostra soldas trincadas encontradas em inspeção de manutenção em torre de destilação atmosférica. A soldagem com processos manuais geram cordões irregulares, aumentando a probabilidade de defeitos.





**Figura 2.18** – Trincas em solda de fixação de chapas de *lining*. Soldagem realizada com eletrodo revestido.

Os primeiros trabalhos com o processo MIG/MAG na soldagem de *lining* na PETROBRAS foram realizados com arame tubular E309MoL, utilizando-se vários passes para fixação do molibdênio.

CERSOSIMO et al [18] em 2004 utilizou em seu trabalho arame tubular E317L com apenas dois passes na soldagem de *lining*, testando chapas com chanfro reto e meio V.

Em 2005, ABDALLA [19] propôs a utilização de apenas 01 passe na soldagem de *lining* utilizando-se a variante MAG pulsado e MAG pulsado térmico com arame sólido ER309MoL. Apesar do bom resultado conseguido em laboratório para a variante MAG pulsado, alguns corpos de prova apresentaram mordeduras adjacentes à margem do cordão de solda.

Na última instalação de *lining* em torre de destilação à vácuo, realizada em 2010 na refinaria Presidente Bernardes, soldou-se as chapas sem sobreposição, com o processo de soldagem MIG/MAG com arame tubular E317L sem proteção gasosa. Utilizou-se três passes de solda para uma melhor fixação das chapas, figura 2.19.

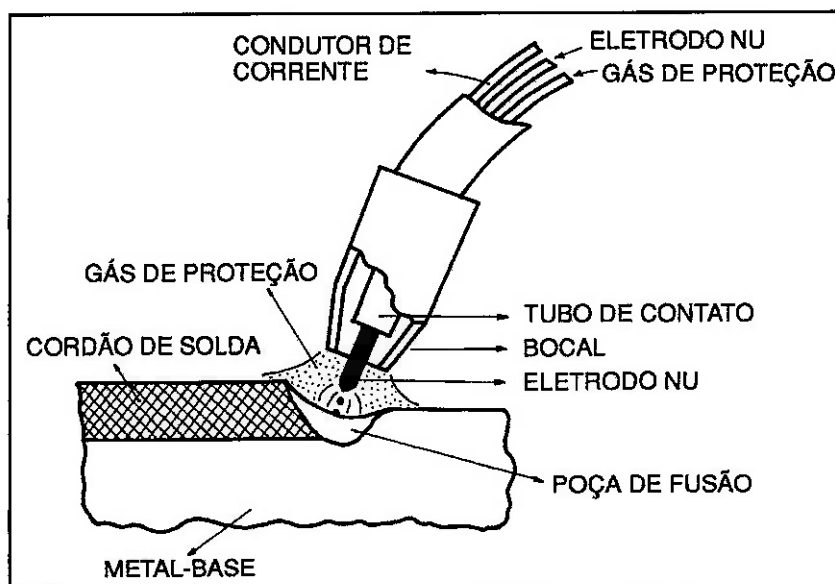


**Figura 2.19** – Instalação de *lining* sem sobreposição em torre de destilação à vácuo. Chapas em AISI 317L com dimensões 400 X 3000 mm.



## 2.3 O PROCESSO DE SOLDAGEM MIG/MAG.

Atualmente o processo de soldagem ao arco elétrico com gás de proteção GMAW (Gas Metal Arc Welding) ou MIG/MAG, é o processo mais utilizado na soldagem de grandes áreas de revestimento interno tipo *lining* em torres de destilação na PETROBRAS, devido principalmente a sua produtividade e baixo índice de reparos. Os processos MIG (Metal Inert Gas) e MAG (Metal Active Gas) utilizam como fonte de calor um arco elétrico mantido entre um eletrodo consumível, alimentado continuamente, e a peça a soldar. A proteção da região de soldagem é feita por um fluxo de gás inerte (MIG) ou gás ativo (MAG). A soldagem pode ser semiautomática ou automática. A figura 2.20 mostra esquematicamente o processo [20].



**Figura 2.20** – Processo de Soldagem MIG/MAG [20].

As principais vantagens do processo na soldagem de *lining* são:

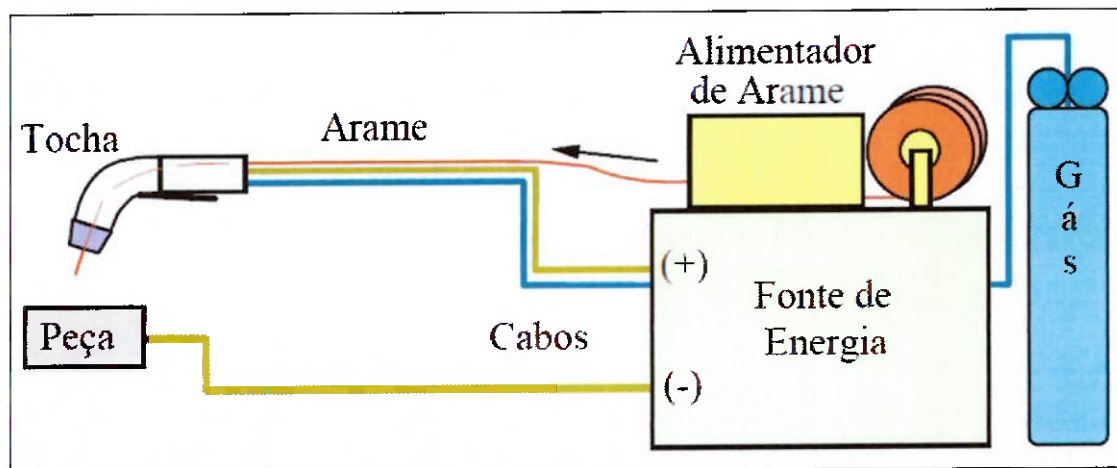
- A soldagem pode ser executada em todas as posições.
- A velocidade de soldagem é elevada.
- A taxa de deposição é elevada devido à densidade de corrente alta na ponta do arame.
- Não há necessidade de remoção de escória e possibilidade de inclusão de escória entre passes.
- A penetração de raiz é mais uniforme em comparação com o eletrodo revestido.
- É um processo com baixo teor de hidrogênio (para arames sólidos).
- Os problemas de distorção e tensões residuais são diminuídos.
- Na soldagem há visibilidade total da poça de fusão.

Limitações:

- A velocidade de resfriamento é elevada, com possibilidade de trincas.
- Dificuldade na soldagem em locais de difícil acesso.
- O equipamento de soldagem é mais caro e complexo [20].

### **2.3.1 EQUIPAMENTO**

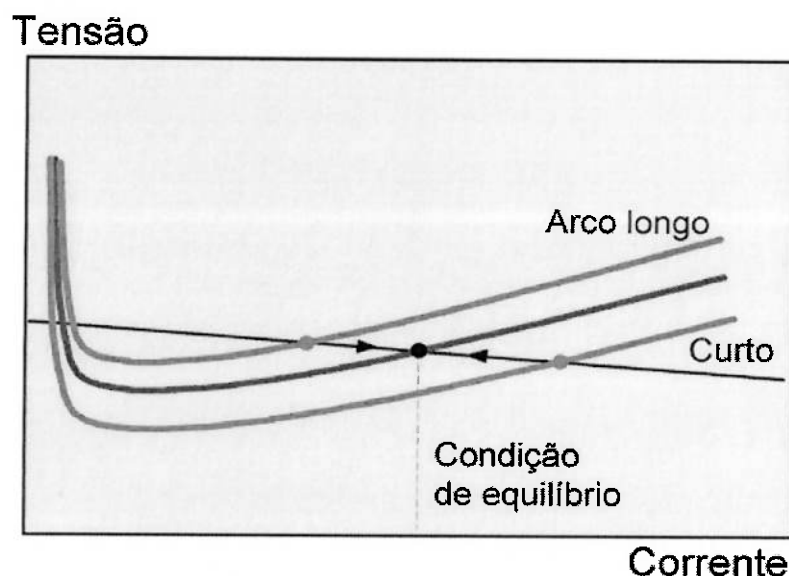
O equipamento básico para a soldagem MIG/MAG é composto de uma fonte de energia, um alimentador de arame, uma tocha de soldagem e uma fonte de gás protetor (figura 2.21).



**Figura 2.21** – Equipamento básico para a soldagem MIG/MAG [21].

Na soldagem MIG/MAG há duas alternativas básicas de se conseguir que a velocidade de consumo (fusão) de eletrodo seja, em média, igual à velocidade de alimentação, de modo que o comprimento do arco permaneça relativamente constante. A primeira maneira é trabalhar com equipamento com controle de velocidade de alimentação, neste caso, trabalha-se com uma fonte do tipo corrente constante, com um alimentador de arame com velocidade de alimentação variável, controlada pelo equipamento.

A segunda alternativa é utilizar fonte do tipo tensão constante e alimentador de arame com velocidade de alimentação constante. Este tipo de equipamento tende a manter o comprimento do arco estável como mostrado na figura 2.22. Variações no comprimento do arco são sempre acompanhadas de variações na tensão, causando grandes variações na corrente de soldagem de forma que, se em dado instante o arco se tornar maior que o valor de equilíbrio, a corrente de soldagem será reduzida, de modo que a velocidade de consumo cai, e o comprimento do arco tende a voltar ao valor original. Um raciocínio similar é usado quando o comprimento do arco diminui momentaneamente [21].



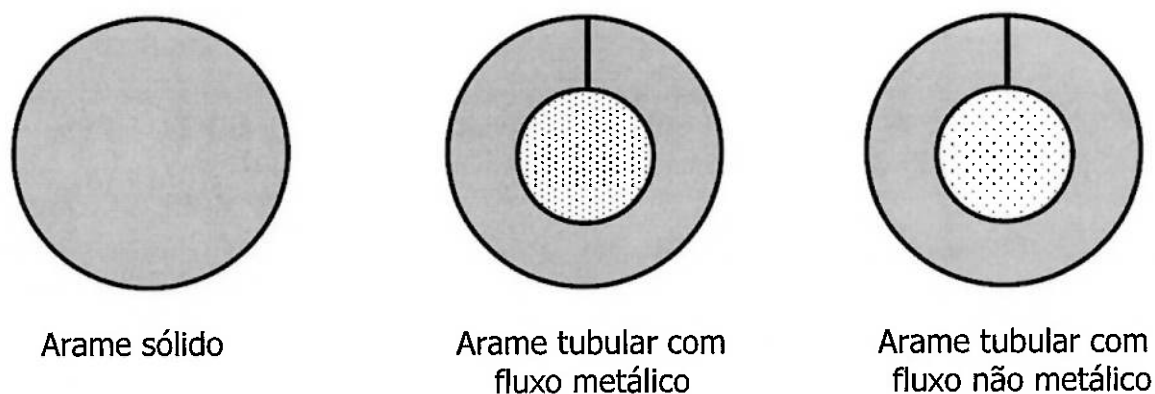
**Figura 2.22** – controle intrínseco do comprimento do arco [21].

### 2.3.2 CONSUMÍVEIS.

#### 2.3.2.1 ARAME ELETRODO.

Os arames para soldagem MIG/MAG podem ter seção inteiramente metálica, chamados arames sólidos, ou ser do tipo tubular, formado por uma camada metálica fechada com um enchimento interno. Este pode ser um fluxo convencional, similar ao usado na soldagem com eletrodos revestidos, ou então ser uma mistura de pós metálicos. Os arames tubulares preenchidos com fluxo podem ainda ser do tipo autoprotegidos, quando o fluxo interno é capaz de gerar toda a proteção gasosa necessária ao processo, ou com proteção gasosa suplementar [21].

A figura 2.23 mostra esquematicamente a seção dos arames sólidos e tubulares usados na soldagem MIG/MAG.



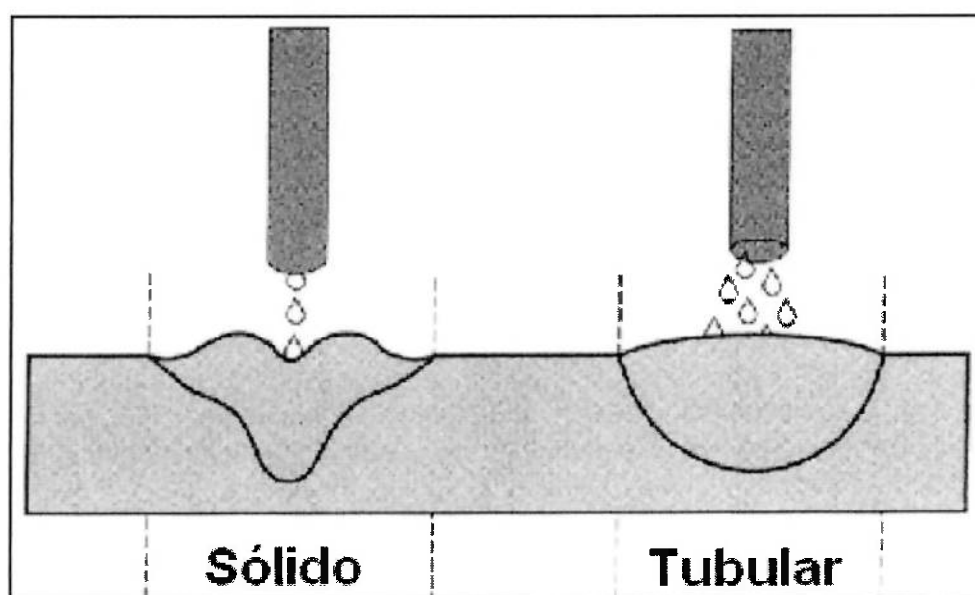
**Figura 2.23** – Seções de arames eletrodos [22].

Na soldagem com arame sólido, toda a seção transversal conduz a corrente, já no arame tubular com fluxo metálico a corrente é conduzida parcialmente pelo núcleo e, no caso de arame tubular com fluxo não metálico, toda a corrente é conduzida pelo invólucro tubular metálico.

Uma diferença essencial entre os arames sólidos e os arames tubulares para a soldagem com gás de proteção é o modo de transferência do metal de solda em uma soldagem ao arco aberto.

Arames sólidos, que necessitam de uma mistura Argônio +  $\text{CO}_2$  para a soldagem ao arco aberto, produzem um arco pequeno e uma transferência de metal muito localizada. As gotas atravessam o arco ao longo de uma linha de centro, uma após outra a uma alta frequência, sendo que isso pode ser visto no cone característico do arco. Por causa dessa transferência axial, as gotas penetram na poça de fusão dentro uma área de projeção relativamente

pequena. Conseqüentemente, toda a energia contida nas gotas fica concentrada nessa área. Tipicamente, a penetração de arames sólidos é pequena e estreita, ou seja, é uma penetração característica no formato dediforme. Embora o arco do arame sólido tenda a escavar profundamente o metal de base, há um risco de defeitos de falta de fusão por causa da penetração em forma de dedo. A penetração dos arames tubulares tem uma forma mais rasa, porém mais larga, possibilitando uma tolerância muito maior para desalinhamentos da pistola e, adicionalmente, reduzindo os riscos de defeitos de falta de fusão [22].



**Figura 2.24** – Diferença do cordão de solda entre arame sólido e tubular com mistura de gases Argônio e  $\text{CO}_2$  [22].

Na seleção do diâmetro do eletrodo deve-se considerar que a taxa de fusão e a penetração são funções da densidade de corrente. Se dois eletrodos sólidos

com diâmetros diferentes puderem ser utilizados nas mesmas condições de soldagem, o de menor diâmetro dará maior taxa de deposição e penetração. Eletrodos sólidos com diâmetro maior originam cordões mais longos que os de menor diâmetro [20].

A maioria dos equipamentos MIG/MAG que utilizam arame sólido podem migrar para arame tubular, envolvendo apenas a troca de alguns acessórios como roldanas e alguns materiais consumíveis da pistola [22].

#### *2.3.2.2 GASES DE PROTEÇÃO.*

Os gases de proteção usados na soldagem MIG/MAG podem ser inertes ou ativos ou, ainda misturas destes. O tipo de gás influencia as características do arco, a transferência de metal, a penetração, a largura e o formato do cordão de solda e a tendência ao aparecimento de mordeduras.

Na soldagem de metais ferrosos, a adição de pequenas quantidades de gases ativos contendo oxigênio melhora sensivelmente a estabilidade do arco e a transferência de metal.

Nos últimos anos, foi observado que misturas gasosas ternárias ou mesmo multicomponentes específicas apresentam melhores resultados. Assim, misturas específicas têm sido propostas para a soldagem de aços inoxidáveis austeníticos, resultando em menor consumo, melhor penetração, menor nível de respingos, perfil de cordão mais adequado, entre outros. Estas misturas têm como base o Argônio, o  $\text{CO}_2$ , oxigênio e o Hélio, podendo ainda, conter

Nitrogênio ou hidrogênio. Os componentes e a proporção de mistura são otimizados para cada aplicação [21].

Os gases utilizados neste trabalho foram misturas de argônio (Ar), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), oxigênio ( $\text{O}_2$ ) e Nitrogênio ( $\text{N}_2$ ). Abaixo são descritos as principais propriedades destas misturas:

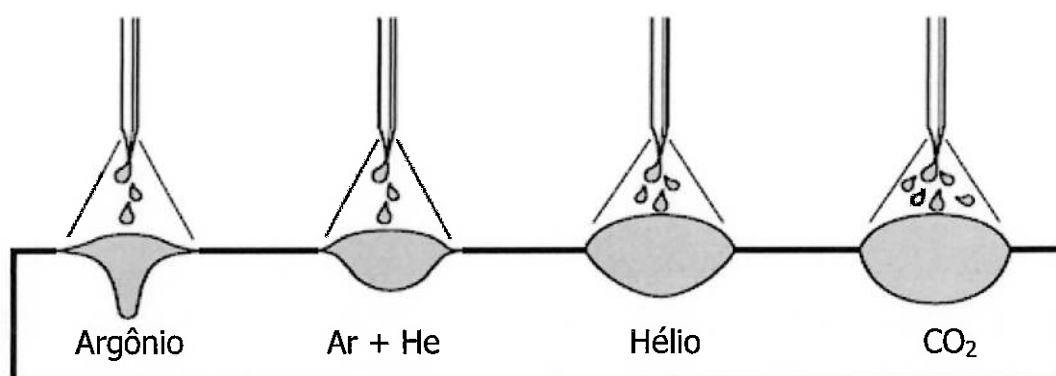
- Argônio + 2%  $\text{O}_2$ : mistura utilizada para aços carbono, aços de baixa liga e aços inoxidáveis.  $\text{O}_2$  é usado para estabilizar o arco, aumentar a taxa de gotejamento e melhorar a aparência do cordão de solda. É normalmente usado quando se deseja altas velocidades de soldagem. É usado em transferências do tipo spray axial e pulsado [22, 23].
- Argônio + 3 a 10%  $\text{CO}_2$ : essas misturas são empregadas na transferência por curto-circuito e na transferência em aerossol. O  $\text{CO}_2$  é inerte à temperatura ambiente, mas nas temperaturas elevadas do arco elétrico de soldagem ele se decompõe em CO e O, tornando-se ativo [21].

Melhores penetrações são alcançadas quando se utilizam adições de  $\text{CO}_2$  no lugar das adições de oxigênio. Considerando a molhabilidade, é necessário o dobro de dióxido de carbono na mistura para se conseguir o mesmo resultado que com o oxigênio [24].

O Nitrogênio tem característica similar ao Hélio com penetração melhor que o argônio e com tendência a promover a transferência globular [25]. O Nitrogênio é um elemento gamagênico, e adições desse elemento podem alterar o modo de solidificação da liga, tornando-a austenítica, reduzindo desta maneira o teor de ferrita delta, e aumentando a susceptibilidade às trincas de solidificação.



A figura 2.25 mostra a influência dos gases de proteção na configuração do cordão de solda.



**Figura 2.25** – Contorno de cordão de solda e penetração para alguns gases de proteção [23].

### 2.3.3 MODOS DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA.

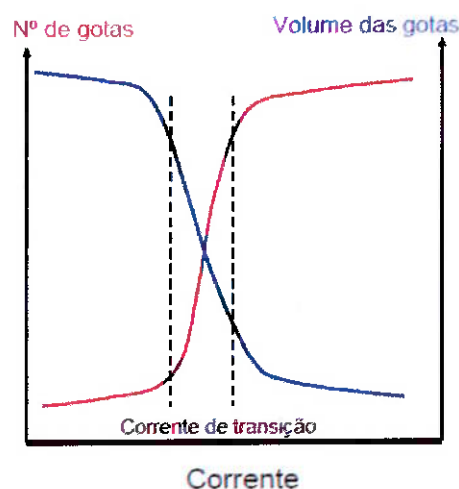
Existem basicamente quatro tipos de transferência metálica no processo MIG/MAG: globular, por curto-circuito, por pulverização axial e rotacional, e por arco pulsado.

- **Transferência globular:** Ocorre para baixas densidades de corrente e qualquer tipo de gás de proteção, especialmente para CO<sub>2</sub> e hélio. A gota que se forma na ponta do eletrodo nu tem o diâmetro maior que ele, daí resultando a dificuldade em soldar fora de posição.
- **Transferência por curto-circuito:** Ocorre para eletrodos nus de diâmetros menores que os convencionais (0,8 a 1,2 mm), para valores mais baixos de corrente que a transferência globular e para qualquer tipo de gás de proteção. A gota que se forma na ponta do eletrodo nu toca a poça de fusão, formando um curto-circuito. A gota é puxada para a poça de fusão

pela tensão superficial desta e, por isso, este modo de transferência é adequado para todas as posições. A quantidade de calor colocada na peça é bem menor que a da transferência globular, sendo assim recomendada para soldar chapas finas. A penetração não é muito grande e existe problema de respingo e instabilidade do arco.

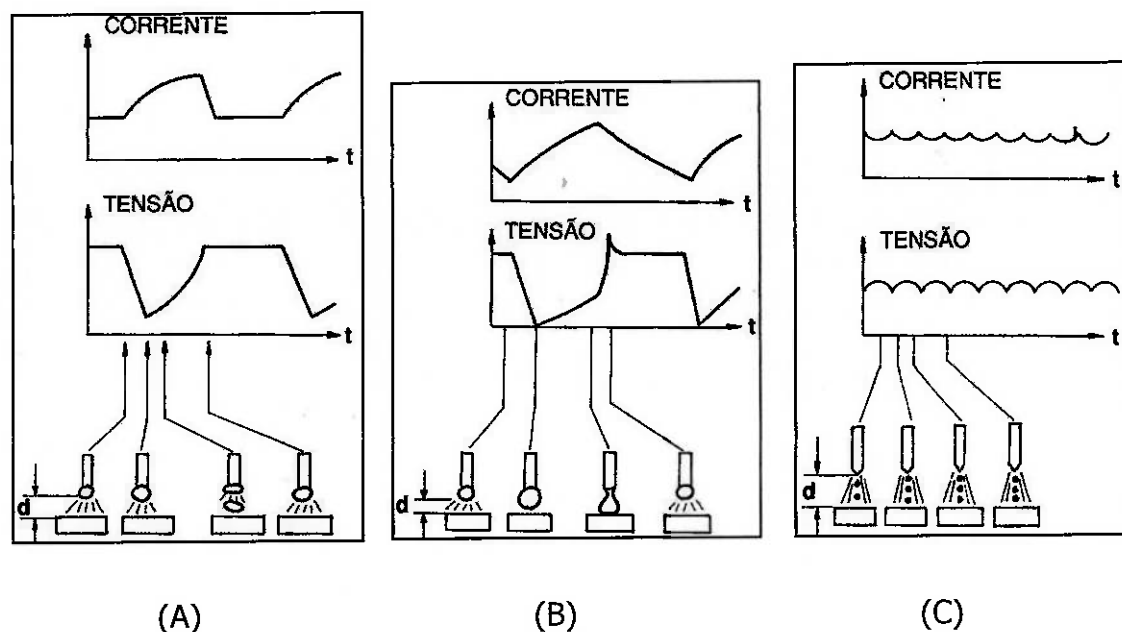
- Transferência por pulverização: Ocorre para elevadas densidades de corrente e quando se usa argônio ou misturas ricas em argônio como gás de proteção. A gota que se forma na ponta do eletrodo nu tem o diâmetro menor que o próprio eletrodo e é axialmente direcionada. A quantidade de calor colocada na peça para solda é bastante elevada, a penetração é bem elevada e o arco é bastante suave.

Para um dado diâmetro de arame, o tipo de transferência metálica muda de globular para pulverização axial, à medida que se aumenta a corrente. A essa corrente dá-se o nome de corrente de transição globular/pulverização. A figura 2.26 mostra esse comportamento.



**Figura 2.26** – Variação do volume e do número de gotas por segundo em função da corrente de soldagem [26].

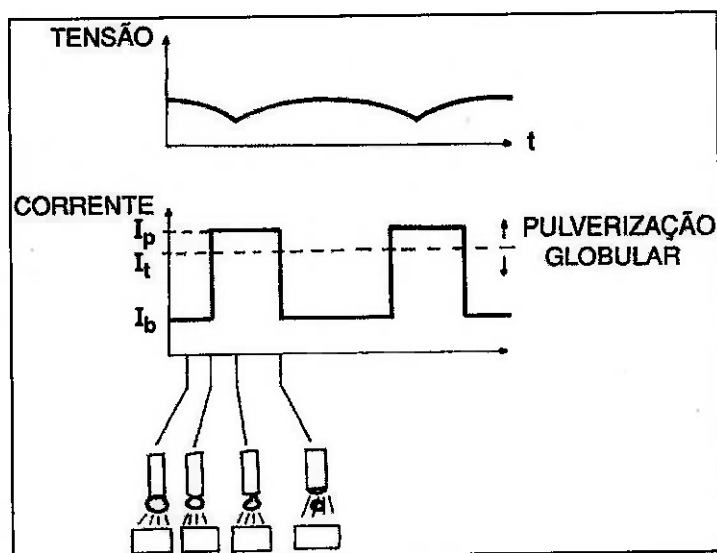
Existe ainda uma segunda corrente de transição, na qual a transferência metálica passa de pulverização axial para pulverização rotacional [20].



**Figura 2.27** – Esquema da transferência metálica globular (A), curto-circuito (B) e pulverização axial (C), mostrando o comportamento da tensão e da corrente de soldagem durante a transferência [20].

- Transferência com arco pulsado: A transferência é do tipo spray axial, e o equipamento de soldagem gera dois níveis de corrente. No primeiro nível, a corrente de base ( $I_b$ ) é baixa e não há transferência, mas somente o início da fusão do arame. No segundo, a corrente de pico ( $I_p$ ) é superior à corrente de transição globular/pulverização ( $I_t$ ), gerando a transferência de uma única gota. Com isso consegue-se uma transferência com característica de spray, porém com uma corrente média bem menor. A quantidade de calor colocada na peça é menor que a da pulverização axial convencional,

por isso, solda-se espessuras bem menores e consegue-se soldar em todas as posições. A figura 2.28 mostra esquematicamente este tipo de transferência.



**Figura 2.28** – Esquema do modo de transferência por arco pulsado. Observe-se a transferência de uma única gota por pulso de corrente [20].

A tabela 2.1 resume de modo qualitativo, as características dos diversos modos de transferência metálica.

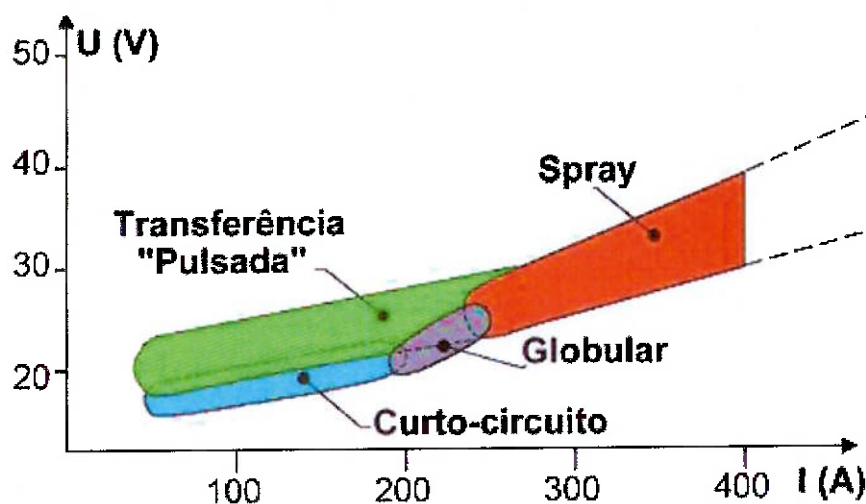
**Tabela 2.1** – Características gerais dos modos de transferência metálica [20].

Tipo de transferência metálica	Gás de proteção	Posição de soldagem	Energia de soldagem <sup>1</sup>	Penetração <sup>1</sup>	Estabilidade do arco
Globular	todos	plana	1,2	1,2	intermediário
Curto-circuito	todos	todas	1,0	1,0	ruim
Pulverização axial	Argônio e misturas ricas em argônio	Plana, horizontal (em ângulo)	1,8	1,8	boa
Arco pulsado		todas	1,2 – 1,6	1,2 – 1,6	boa

<sup>1</sup> Valores relativos tomando como base a transferência por curto-circuito.

O tipo de transferência metálica é função principalmente da corrente de soldagem, da bitola e composição do eletrodo sólido e da composição do gás de proteção, entre outros parâmetros. A transferência por pulverização axial é a mais indicada, por ter um arco estável e alta taxa de deposição, desde que respeitadas suas limitações. A transferência globular gera bastante respingos, sendo pouco utilizada. No seu lugar diminui-se a distância do arco e obtém-se a transferência por curto-circuito. A transferência com arco pulsado substitui a transferência por pulverização axial no que se refere à posição de soldagem e espessura da chapa [20].

A figura 2.29 apresenta uma comparação entre os modos de transferência de acordo com os parâmetros de corrente e tensão.



**Figura 2.29** – Comparação entre modos de transferência em função da corrente e tensão [27].

### 2.3.4 VARIÁVEIS E TÉCNICAS DO PROCESSO.

As principais variáveis do processo MIG/MAG são a tensão, a corrente e a polaridade do arco de soldagem, a velocidade de deslocamento, a vazão de gás protetor e o diâmetro e o comprimento do eletrodo, também conhecido como *stickout*.

O diâmetro do eletrodo é selecionado principalmente em função da espessura do metal de base, da posição de soldagem e outros fatores que influenciam o tamanho da poça de fusão e da solda e/ou a quantidade de calor que pode ser cedida à peça. Para cada diâmetro de arame existe uma faixa de corrente de soldagem adequada, de forma que o arco apresente boas condições de operação. A tabela 2.2 mostra essas faixas de corrente para arames de aço inoxidável austenítico.

**Tabela 2.2** – Faixas de corrente utilizáveis com diferentes diâmetros [21].

Material	Diâmetro do eletrodo (mm)	Faixa de corrente (A)
Aço inoxidável austenítico	0,8	60 – 180
	1,0	80 – 200
	1,2	90 – 260
	1,6	170 – 320
	2,4	250 – 450

O processo MIG/MAG utiliza normalmente corrente contínua e polaridade inversa (eletrodo positivo), resultando em maior penetração e estabilidade de arco. A corrente de soldagem influencia diretamente na penetração, largura e

reforço do cordão de solda, na taxa de deposição e na energia de soldagem, e afeta o modo de transferência de metal. A escolha da corrente de soldagem é feita em função da espessura das peças a unir, do diâmetro do eletrodo e da geometria desejada para o cordão de solda.

A tensão de soldagem afeta o comprimento do arco, o modo de transferência de metal e o formato do cordão. Tensões elevadas resultam em maiores largura da solda e tendência à formação de respingos. Tensões baixas favorecem a transferência por curto-circuito e maior instabilidade do arco, facilitando a absorção de gases da atmosfera, que pode resultar em porosidade ou outros problemas associados. Por outro lado, tensões muito baixas podem resultar em concavidade excessiva e má concordância do cordão com a peça, também chamada de *overlap*. A tensão de soldagem deve ser escolhida de acordo com a corrente de soldagem e o gás de proteção.

O comprimento energizado do eletrodo ou *stickout* é definido como a distância entre a extremidade do bico de contato da tocha e a extremidade do arame em contato com o arco. Entretanto, como esta distância é difícil de ser medida com o arco em operação, em geral toma-se o *stickout* como sendo a distância da extremidade do bico de contato até a peça. Quanto maior for essa distância, maior será o aquecimento do arame por efeito Joule e, portanto, menor a corrente necessária para fundir o arame, mantida a velocidade de alimentação. Inversamente, quanto maior o *stickout*, maior a taxa de deposição, se mantida a corrente de soldagem.

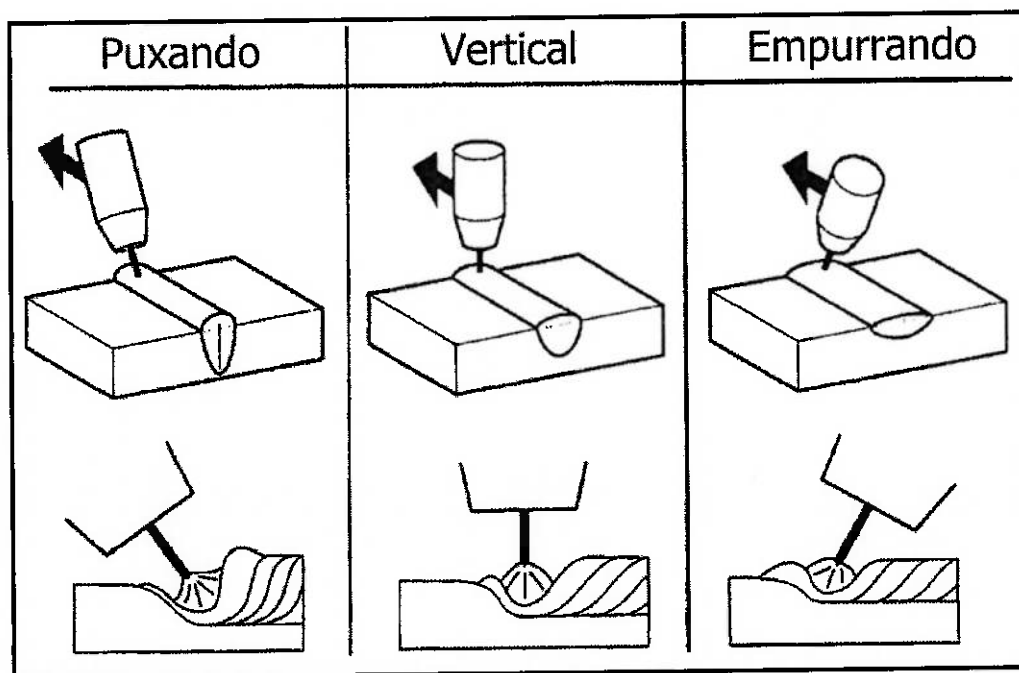
A vazão de gás protetor deve ser tal que proporcione uma proteção eficiente contra a contaminação do arco e da solda pela atmosfera. Em geral, quanto

maior a corrente, maior a poça de fusão e a área a proteger e, portanto, maior a vazão necessária. Vazões reduzidas podem levar ao aparecimento de porosidades e outros problemas associados à falta de proteção, como perda de elementos de liga e deterioração de propriedades. Vazões muito elevadas podem causar depressões na poça de fusão e tornar o cordão de solda irregular, além de aumentar desnecessariamente o custo da operação.

A velocidade de soldagem influencia a energia de soldagem e, assim, a quantidade de calor cedido à peça. Velocidades muito baixas, além de elevar o custo, podem causar problemas metalúrgicos devidos à energia de soldagem elevada. Velocidade de soldagem elevada resulta em menor penetração, reforço e largura do cordão. Velocidades excessivas provocam o aparecimento de mordeduras, falta de fusão e/ou penetração do cordão de solda [21].

A posição da tocha afeta as características da solda, ela refere-se à maneira pela qual a tocha é mantida relativamente ao cordão de solda. As técnicas de soldagem puxando e empurrando são mostradas na Figura 2.30. Na técnica puxando a tocha é posicionada de tal modo que o arame seja alimentado no sentido oposto ao do deslocamento do arco, e o arame é adicionado ao metal de solda já depositado. Na técnica empurrando a tocha é posicionada de tal modo que o arame seja alimentado no mesmo sentido do deslocamento do arco. Nessa técnica maior parte do arame é adicionado diretamente na peça [24].





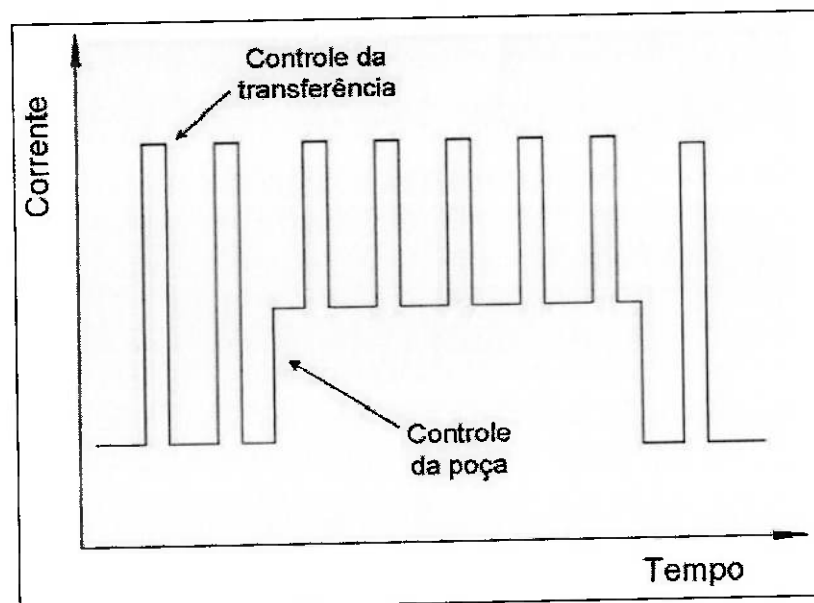
**Figura 2.30** – Efeito da posição longitudinal da tocha, adaptado de [28].

### 2.3.5 O PROCESSO MIG/MAG PULSADO

O MIG/MAG pulsado tem a vantagem de soldar em todas as posições com baixa energia de soldagem e transferência tipo spray. Os parâmetros a serem controlados nesse processo são a corrente de base, tempo na corrente de base, corrente de pico, tempo de corrente de pico, velocidade de alimentação do arame e tensão de soldagem. Os parâmetros a serem analisados antes de regular o equipamento para soldagem são o destacamento e tamanho da gota, estabilidade do arco, taxa de deposição, volume de gota e frequência do pulso. A corrente de pico deve ser sempre maior que a corrente de transição globular/pulverização axial [20].

### 2.3.5.1 O PROCESSO MIG/MAG PULSADO DUPLO

Alterações rápidas e controladas nas condições de soldagem podem ser usada não apenas para controlar a transferência de metal na soldagem MIG/MAG, mas também para atuar em diferentes outros aspectos do processo de soldagem, um exemplo é o uso de pulsação dupla da corrente. Neste caso, a pulsação de maior frequência (em geral,  $10^1$  a  $10^2$  Hz) é usada para controlar a transferência de metal, enquanto que a de menor frequência ( $10^0$  a  $10^1$  Hz) é usada para controlar a poça de fusão de forma similar à usada na soldagem GTAW. A figura 2.31 ilustra esta possibilidade [29].



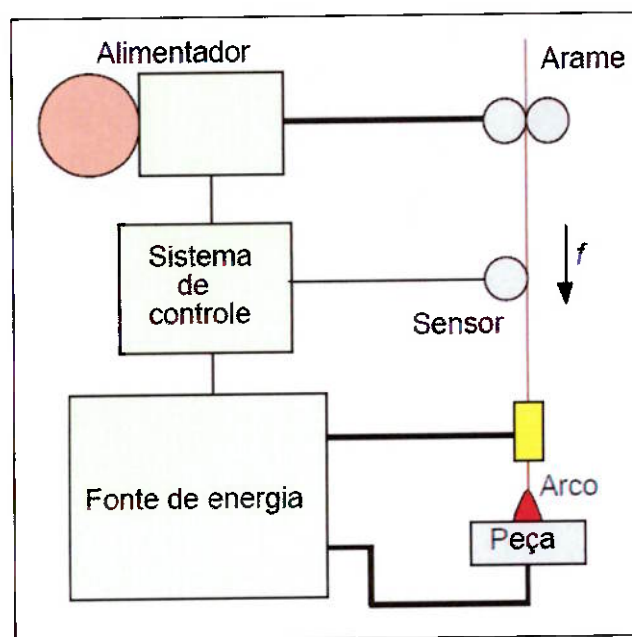
**Figura 2.31:** Variação esquemática da corrente na soldagem GMAW com pulsação dupla [29].

### 2.3.6 MIG SINÉRGICO

Esta variante do processo MIG foi originalmente desenvolvida para facilitar a soldagem com o MIG pulsado. Através de um único controle, todos os parâmetros do MIG pulsados estariam regulados.

O controle por um único botão pode ser feito de duas maneiras:

- Controle sinérgico: a alimentação do eletrodo nu controla a corrente média
- Controle auto-regulado: a tensão controla a corrente média.



**Figura 2.32** – O controle sinérgico [29].

No controle sinérgico, geralmente um sensor de velocidade de alimentação do arame fornece o sinal para controle da saída da fonte de energia (figura 2.32). A relação entre parâmetros de pulsação da corrente fornecida pela fonte e a velocidade do arame é determinada por um conjunto de regras que formam o algoritmo sinérgico.

Esta forma de controle tem recebido uma maior aceitação nos últimos anos, e o termo “MIG sinérgico” atualmente engloba outras formas de controle associadas ao processo MIG/MAG [20].

### **2.3.7 SOLDAGEM DE AÇOS AUSTENÍTICOS**

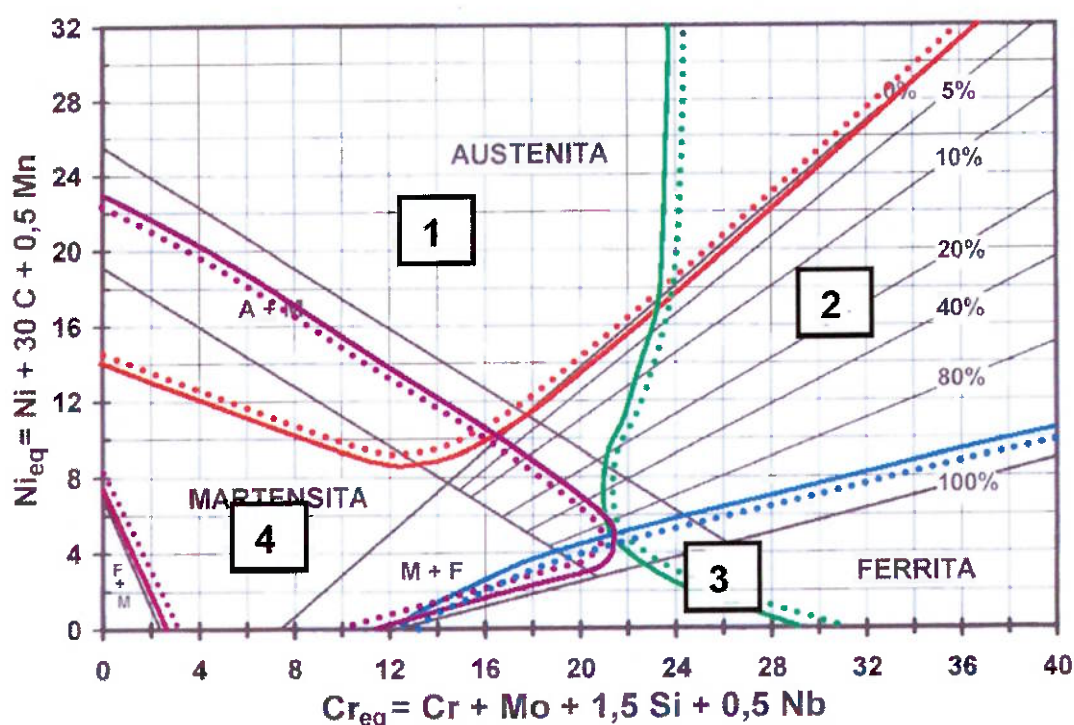
Os aços austeníticos apresentam maior coeficiente de expansão térmica, maior resistência elétrica e menor condutividade térmica que os aços carbono. Nos aços com teor de carbono superior a 0,06%, pode haver precipitação de carbonetos nos contornos de grão da zona termicamente afetada (ZTA) durante o ciclo térmico de soldagem, prejudicando a resistência à corrosão. Para minimizar este problema e distorções, recomenda-se soldar estes aços com uma maior velocidade de deslocamento.

Devido à menor temperatura de fusão destes aços e sua menor condução de calor, a corrente de soldagem é usualmente menor que a usada em aços carbono. Dependendo de sua composição química (quantidade maior de elementos gamagênicos), o metal de solda pode solidificar-se com uma estrutura totalmente austenítica. Neste caso, a solda é muito sensível ao aparecimento de trincas durante a solidificação. Este problema é reduzido pela seleção de metal de adição que possibilite uma estrutura austeno-ferrítica na solidificação e resulte em cerca de 4 a 10% de ferrita na solda à temperatura ambiente.

Aços inoxidáveis austeníticos são comumente usados como metal de adição na soldagem de outros tipos de aços, na união de aços inoxidáveis com outros aços e na fabricação de revestimentos protetores contra a corrosão.

Para a previsão da microestrutura da solda e da possibilidade de ocorrência de problemas, diagramas constitucionais empíricos são utilizados, o mais conhecido é do diagrama de Schaeffler. Estes diagramas permitem prever a microestrutura da solda a partir de sua composição química, expressa em termos de equivalentes de cromo ( $Cr_{eq}$ ) e de níquel ( $Ni_{eq}$ ).

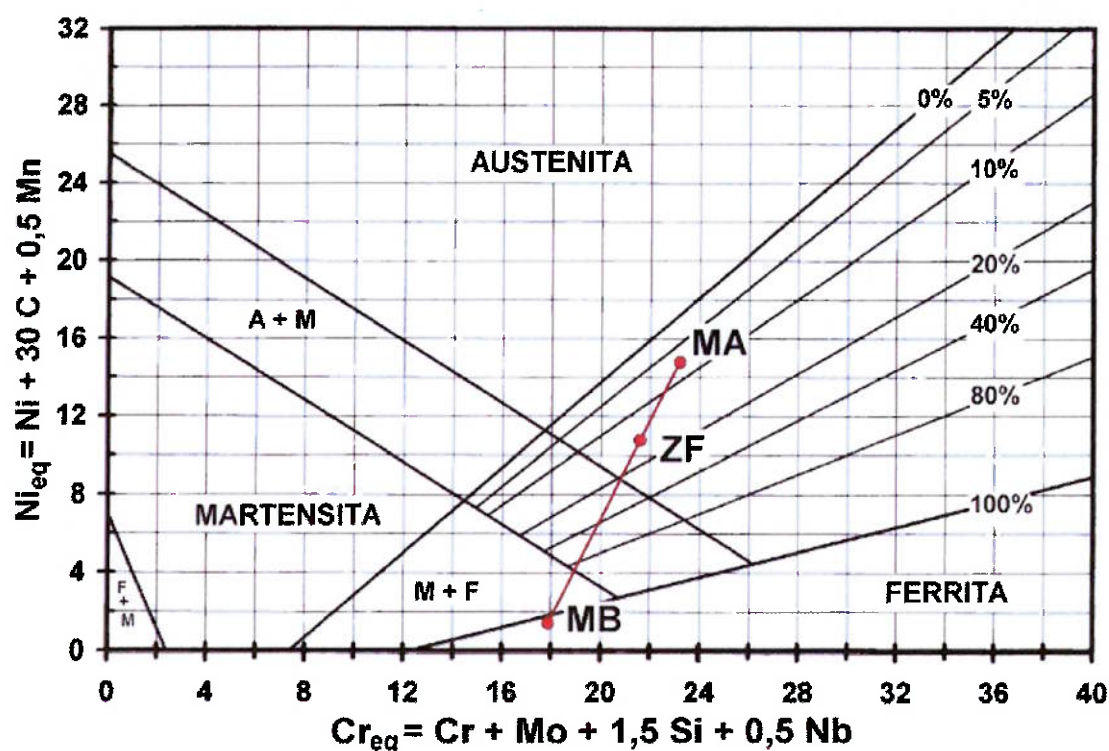
A figura 2.33 mostra o diagrama de Schaeffler indicando áreas típicas de problemas de soldagem de aços inoxidáveis.



**Figura 2.33** – Diagrama de Schaeffler com áreas de problemas típicos: (1) fissuração de solidificação, (2) formação de fases intermetálicas, (3) crescimento de grão na ZTA e (4) Fragilização por formação de martensita [30].

Na parte central do diagrama, na região de coexistência da ferrita e austenita, uma pequena área triangular não é atingida por nenhum dos problemas indicados. De uma forma geral, os consumíveis de aços inoxidáveis austeníticos são projetados para, após a diluição como o metal base, fornecer uma solda com composição química que caia nesta região.

Em aplicações em que as composições dos metais base e de adição sejam diferentes, o ponto que representa a solda no diagrama estará sobre o segmento de reta entre o metal base e o metal de adição. A posição desse ponto no segmento dependerá da diluição da solda, ficando mais próximo do metal de adição para soldas de pequena diluição [30], figura 2.34.



**Figura 2.34** – Diagrama de Schaeffler mostrando pontos correspondentes ao metal base (MB), metal de adição (MA) e a zona fundida (ZF) [30].

### **3. OBJETIVOS**

Este trabalho tem como objetivos:

- a) Avaliar o teor de molibdênio nos cordões de solda depositados pelo processo de soldagem MAG com arame sólido, visando a resistência à corrosão por ácidos naftênicos.
- b) Avaliar as características físicas e mecânicas dos cordões de solda em função dos materiais e parâmetros empregados na soldagem.

Este trabalho não tem como objetivo comparar ou avaliar as fontes de energia utilizadas.

## **4. MATERIAIS E MÉTODOS.**

### **4.1 INTRODUÇÃO.**

Este capítulo apresenta os materiais e métodos utilizados na soldagem MAG com arame sólido para revestimento tipo *lining*.

Aqui são apresentados os equipamentos e materiais utilizados para confecção dos corpos de prova, os ensaios e os métodos de avaliação dos cordões de solda.

### **4.2 FONTES DE ENERGIA.**

Os corpos de prova (CP) foram soldados com três fontes de energia diferentes, as características de cada equipamento são descritas abaixo:

Equipamento A: Fonte inversora trifásica multiprocesso para soldagem MIG, MIG Pulsado, FCAW e eletrodos revestidos, com reconhecimento automático de tensão de entrada.

Equipamento B: Fonte inversora trifásica para soldagem MIG, MIG pulsado e arame tubular.

Equipamento C: Fonte inversora sinérgica multiprocesso para aplicações MIG/MAG pulsado e duplo pulso, MIG/MAG, TIG e eletrodo revestido.



**Tabela 4.1** – Principais características das fontes de energia utilizadas.

	Equipamento A	Equipamento B	Equipamento C
Tensão de alimentação (V) (50/60 Hz)	220 a 440	208 a 575	220 a 440
Faixa de corrente (A)	< 380V: 16 -350 > 380V: 16 - 500	3 a 400	50 - 400
Potência (kVA)	não-fornecido	11,7	14,6

## 4.3 MATERIAIS.

### 4.3.1 CORPOS DE PROVA.

Os corpos de prova foram confeccionados com chapa de aço carbono ASTM A 516 Gr 70, e as tiras de *lining* com aço inoxidável austenítico ASTM A 240 TP 317L com espaçamento de 9 mm.

A tabela 4.2 mostra a composição das chapas utilizadas. Chapa ASTM A 240 TP 317L conforme certificado OUTOKUMPU nº P 50543.

**Tabela 4.2** – Composição química (%) das chapas dos corpos de prova.

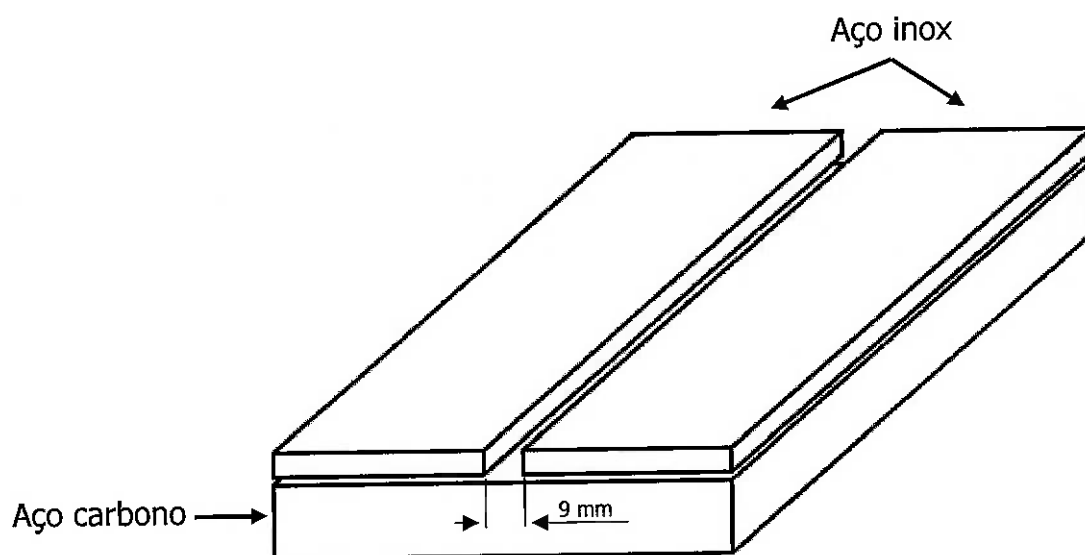
		C	Mn	Cr	Si	Mo	Ni	P	S
	Aço 516 Gr 70*	0.27	0.5-1.4	-	0.15-0.4	0.08	0.3	0.04	0.04
Inox 317L	norma	Máx. 0.03	Máx. 2.00	18-20	Máx. 1	3-4	11-15	Máx. 0.04	0.03
	fornecido	0.02	1.3	18.0	0.3	3.0	11.8	Máx. 0.03	0.03

\* Norma ASTM A516

Dimensões dos corpos de prova (comprimento X largura X espessura):

Chapa de aço carbono: 250 X 109 x 12,5 mm

Chapas de aço inox: 250 X 50 x 3,2 mm



**Figura 4.1** – Desenho esquemático da montagem dos corpos de prova.

Os cortes das chapas de aço carbono e de aço inox foram realizados com guilhotina.

As chapas foram montadas conforme a figura 4.1, com chanfro reto para receber os cordões de solda. Utilizou-se um gabarito para manter a distância de 9 mm constante entre as chapas de inox durante o ponteamto (fixação da chapas para soldagem posterior). O ponteamto foi realizado com o mesmo eletrodo de soldagem.

### 4.3.2 ELETRODO.

Utilizou-se arame sólido ER317L com diâmetro de 1,2 mm. A tabela 4.3 mostra a análise química do material conforme certificado 080926 emitido pela empresa Weld-inox - corrida 31086.

**Tabela 4.3** – Composição química (%) do eletrodo.

	C	Mn	Cr	Si	Mo	Ni	P	S	Cu
<b>Norma*</b>	<b>0,03</b>	<b>3,3-4,75</b>	<b>18,5-20,5</b>	<b>0,3-0,65</b>	<b>3,0-4,0</b>	<b>13,0-15,0</b>	<b>0,03</b>	<b>0,03</b>	<b>0,75</b>
<b>fornecido</b>	<b>0,01</b>	<b>1,39</b>	<b>18,89</b>	<b>0,41</b>	<b>3,53</b>	<b>13,66</b>	<b>0,02</b>	<b>0,01</b>	<b>0,12</b>

\*ASME II PART C SFA5.9 2001

### 4.3.3 GASES DE PROTEÇÃO.

Utilizou-se três misturas de gases na soldagem dos corpos de prova, conforme descrito abaixo:

A) Mistura de Argônio (98%) e Oxigênio (2%) – denominado neste trabalho de **98%Ar / 2%O<sub>2</sub>**.

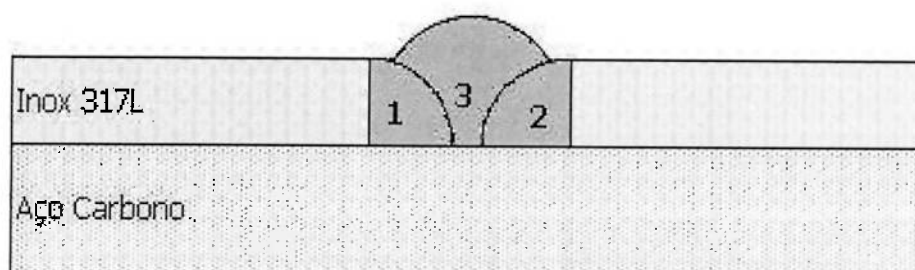
B) Mistura de Argônio (96%) e dióxido de carbono (4%) - denominado neste trabalho de **96%Ar / 4%CO<sub>2</sub>**.

C) Mistura de Argônio (95%), dióxido de carbono (3%) e Nitrogênio (2%) – denominado neste trabalho de **95%Ar / 3%CO<sub>2</sub> / 2%N<sub>2</sub>**.

## 4.4 METOLOGIA EXPERIMENTAL.

### 4.4.1 SOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

Realizou-se a soldagem manualmente de oito corpos de prova na posição plana e um corpo de prova na posição horizontal conforme a seqüência de passes mostrada na figura 4.2 abaixo.



**Figura 4.2** – Montagem dos cordões de solda.

O corpo de prova CP9 foi soldado com sobreposição de cordões na seqüência 1-3-2.

Os corpos de prova CP8 e CP9 foram soldados com a técnica de duplo pulso.

O tempo de soldagem de cada corpo de prova foi cronometrado para o cálculo da velocidade de soldagem.

Todos os corpos de prova foram soldados com um ângulo aproximado de 20° entre a pistola e a peça.

A tabela 4.4 mostra os valores de todos os parâmetros utilizados na soldagem de cada corpo de prova.

**Tabela 4.4** – Parâmetros de soldagem utilizados na soldagem dos corpos de prova.

Fonte de Energia	A	B			A	C			
Gases de Proteção	98%Ar / 2%O <sub>2</sub>	96%Ar / 4%CO <sub>2</sub>			95%Ar / 3%CO <sub>2</sub> / 2%N <sub>2</sub>				
Corpo de prova	CP1	CP2	CP3	CP4**	CP5	CP6	CP7	CP8	CP9
Corrente Média (A)	125	215	215	170	130	150	176	*160/185	*120/145
Velocidade do Arame (m/min)	4,0	7,5	7,5	6,0	4,0	5,1	5,9	*5/7,4	*2/7
Distância Bico / Peça (mm)	15					10			
Tensão (V)	29	26	25	21,5	29	23,5	26	*22/28	*21/23
Velocidade de Soldagem (m/min)	0,3	0,6	0,5	0,4	0,3	0,4	0,4	0,5	0,4
Vazão de Gás (litros/min)	14	16			14	11			

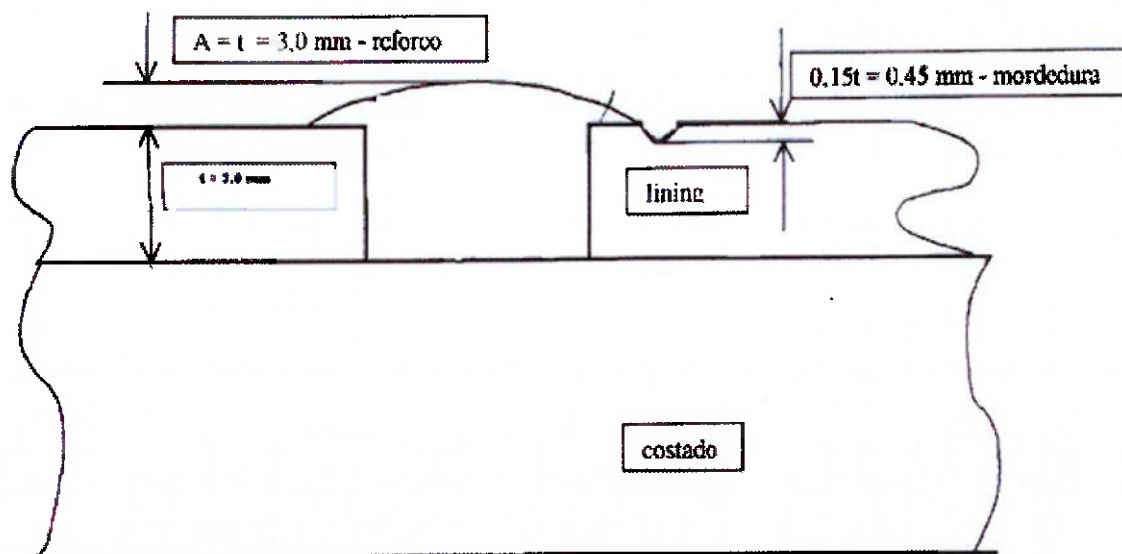
\*\* Posição Horizontal

\* MIG duplo pulso (primeiro valor corresponde a base, o segundo ao pico)

## 4.4.2 ANÁLISE DAS AMOSTRAS.

### 4.4.2.1 EXAME VISUAL

Os cordões dos corpos de prova foram limpos com escova manual e solvente, e inspecionados visualmente. Na inspeção visual observou-se o aspecto superficial da solda e descontinuidades como mordeduras e reforço de solda excessivo. Utilizou-se o critério de aceitação utilizado por BALDUCI [31] baseado na norma AWS D9.1 [32], figura 4.3 .



**Figura 4.3** – Critérios de aceitação para mordedura e reforço de solda [31].

#### 4.4.2.2 MACROGRAFIA E MICROGRAFIA

Para análise de macrografia e micrografia removeu-se uma amostra situada a aproximadamente 1/5 da extremidade de cada corpo de prova, local onde a solda já estivesse em regime térmico. As amostras foram cortadas com serra fita transversalmente ao cordão, como mostra a figura 4.4.



**Figura 4.4** – Amostra retirada do corpo de prova para ensaio metalográfico.

As micrografias foram realizadas no centro dos cordões de soldas.

Todos os ensaios de análise metalográfica foram realizados pela empresa Araujo conforme as normas ASTM E3, E340, E407 e E112.

#### *4.4.2.3 PENETRAÇÃO E REFORÇO DE SOLDA.*

A penetração e o reforço de solda foram medidos com auxílio de paquímetro e com o software PDFXCHANGE versão 2.0.

#### *4.4.2.4 ANÁLISE QUÍMICA.*

As análises químicas foram realizadas nas faces dos cordões de solda por Espectrometria de Emissão Óptica conforme norma ASTM A751, pela empresa Araujo, com espectrômetro de Emissão óptica marca ARL Mod. 3460 com certificado de calibração N° 2011-0823. Incerteza de medição de  $\pm 1,0\%$  do valor indicado.

#### *4.4.2.5 DILUIÇÃO.*

Para o cálculo das diluições utilizou-se as fotos das macrografias das amostras. As áreas de diluição do metal de revestimento, do metal base e do metal de solda foram calculadas com o auxílio do software PDFXCHANGE versão 2.0 através da relação:

$$\text{Diluição (\%)} = \frac{(\text{MR} + \text{MB})}{\text{AT}}$$

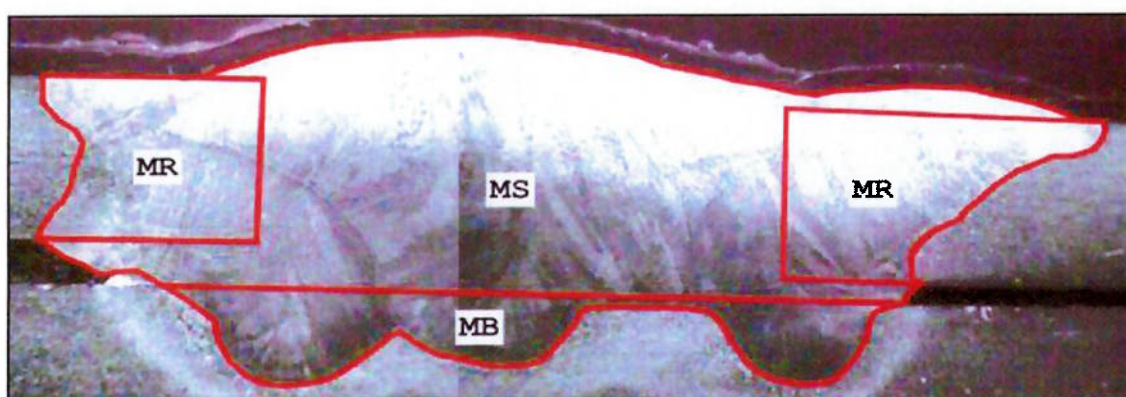
Onde:

MR: Metal de Revestimento (AISI 317L);

MB: Metal de Base (aço carbono);

MS: Metal de Solda (arame eletrodo ER317L);

AT: Area Total (MR+MB+MS).

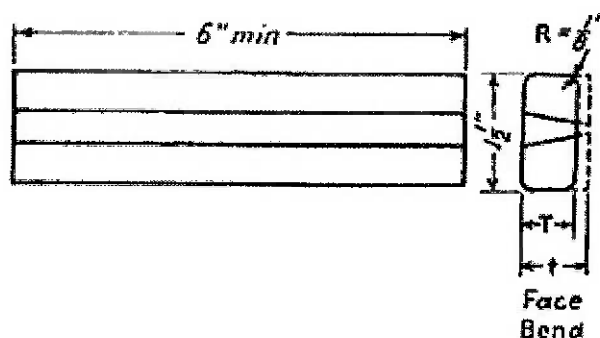


**Figura 4.5** – Cálculo das áreas de diluição utilizando o software PDFXCHANGE.

#### 4.4.2.6 DOBRAMENTO

Cortou-se os corpos de prova com serra fita com dimensões conforme figura 4.6. Realizou-se o ensaio de dobramento longitudinal livre de face conforme ASTM E 190, em máquina universal de ensaios AMSLER TIPO 699 30T. As soldas do revestimento não devem se destacar nem apresentar trincas ou defeitos maiores 3,2 mm na solda ou na zona de ligação.

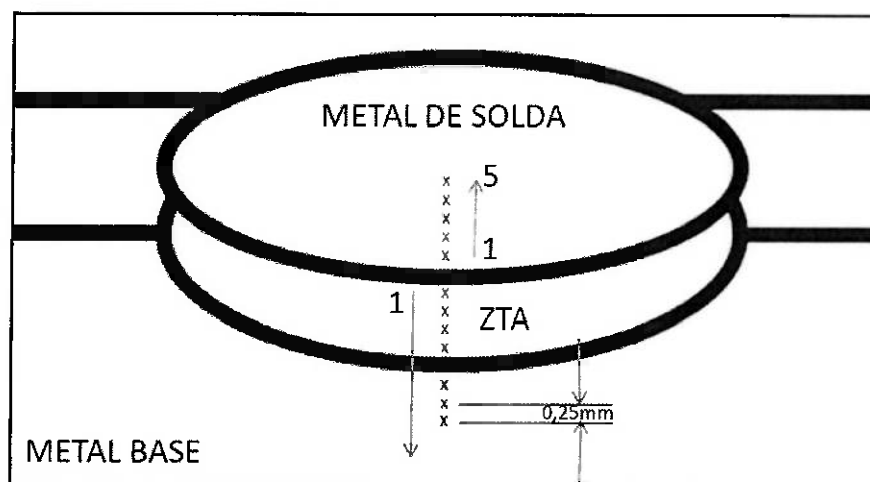




**Figura 4.6** – corpo de prova ASTM A 190 para ensaio de dobramento de face longitudinal.

#### 4.4.2.7 MICRODUREZA.

Realizou-se ensaio de microdureza Vickers 1,0 Kgf (HV1) conforme norma ASTM E384 à temperatura ambiente (24°C) com Durômetro DIGIMESS HV1000. A preparação dos corpos de prova foi realizada conforme norma ASTM E92/08. Realizou-se medições em 05 pontos no metal de solda, 03 pontos no metal base, e a quantidade de pontos necessários para atravessar a espessura da zona termicamente afetada (ZTA), conforme mostrado na figura 4.7.



**Figura 4.7** – Croqui para medição de microdureza.

## **5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.**

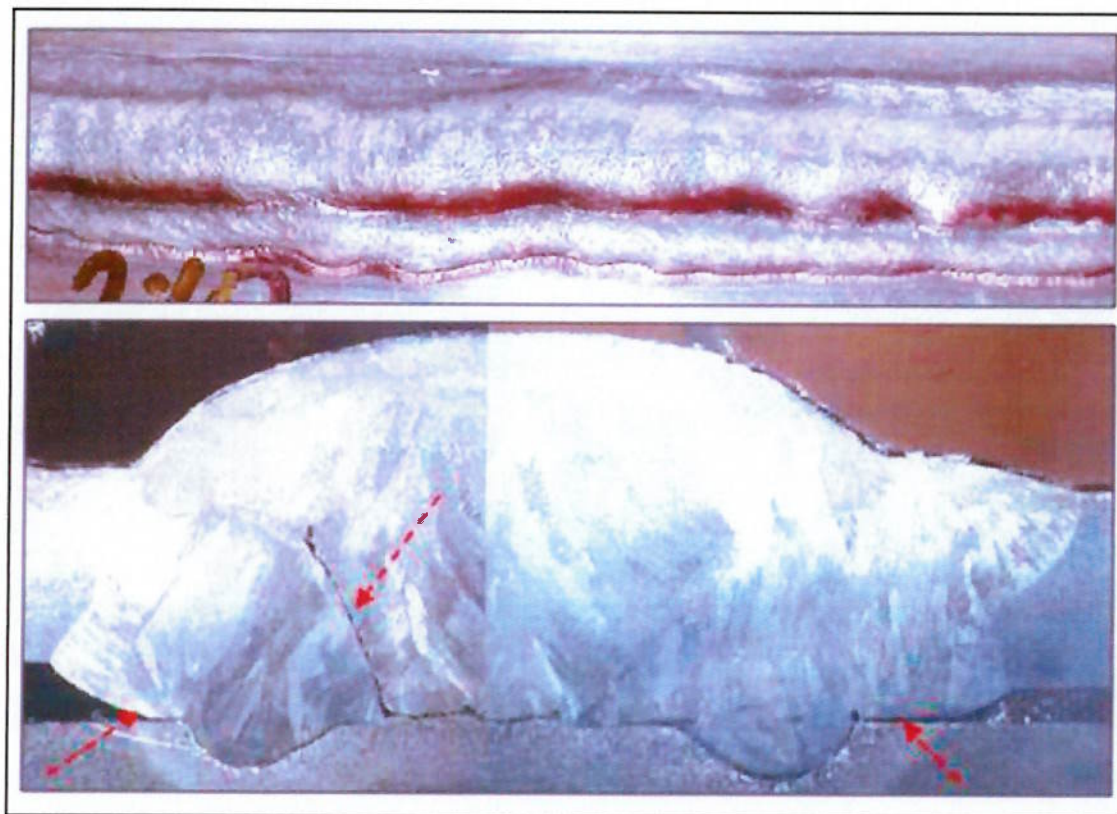
### **5.1 INTRODUÇÃO.**

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados experimentais obtidos para os cordões de solda depositados pela variante MAG pulsado e duplo pulso com arame sólido ER 317L para aplicação em revestimento tipo *lining*.

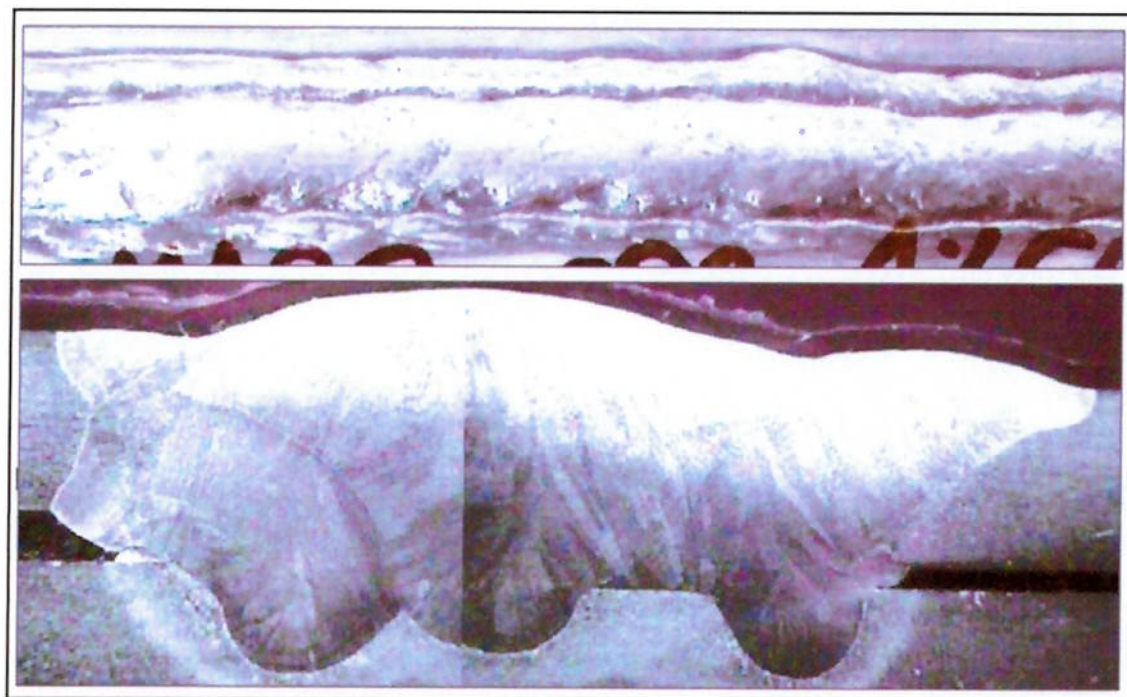
Aqui são apresentados e avaliados o aspecto visual, as características da macrografia e da micrografia, a penetração e o reforço de solda, e a análise química dos cordões de solda.

### **5.2 ASPECTO VISUAL E MACROGRAFIA DAS SOLDAS.**

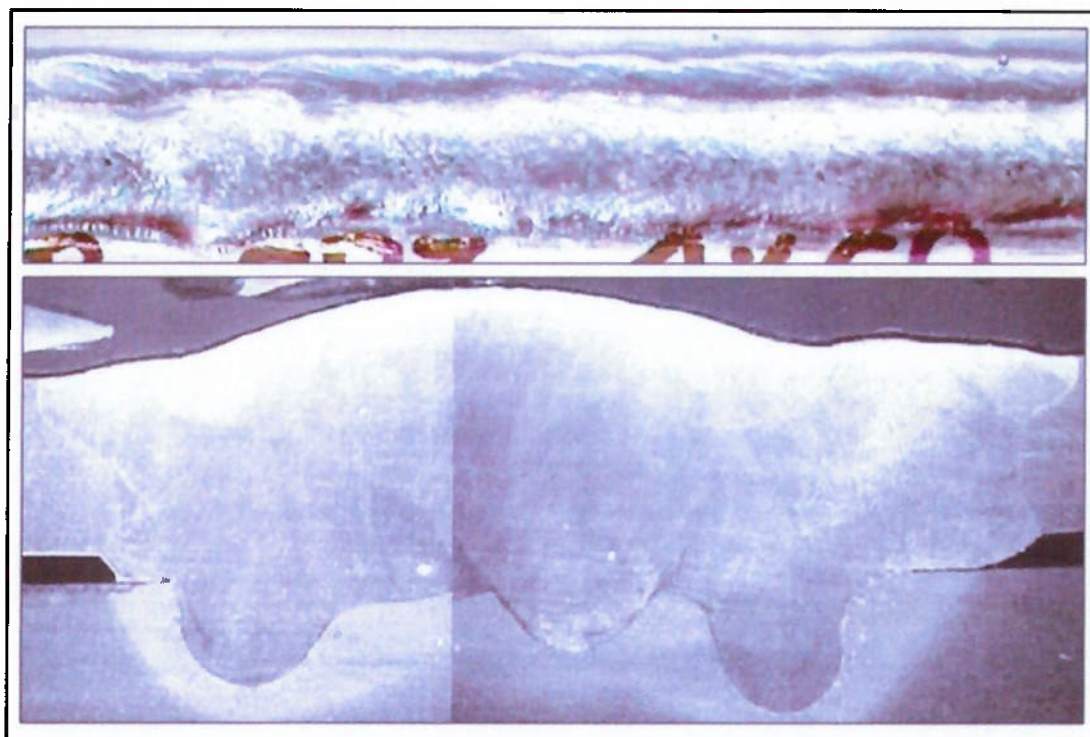
Nas figuras abaixo são apresentados o aspecto visual e a macrografia do corte transversal dos cordões de solda para cada condição de soldagem conforme tabela 4.4. Todas as macrografias apresentadas nas figuras abaixo estão com aumento de 7 vezes.



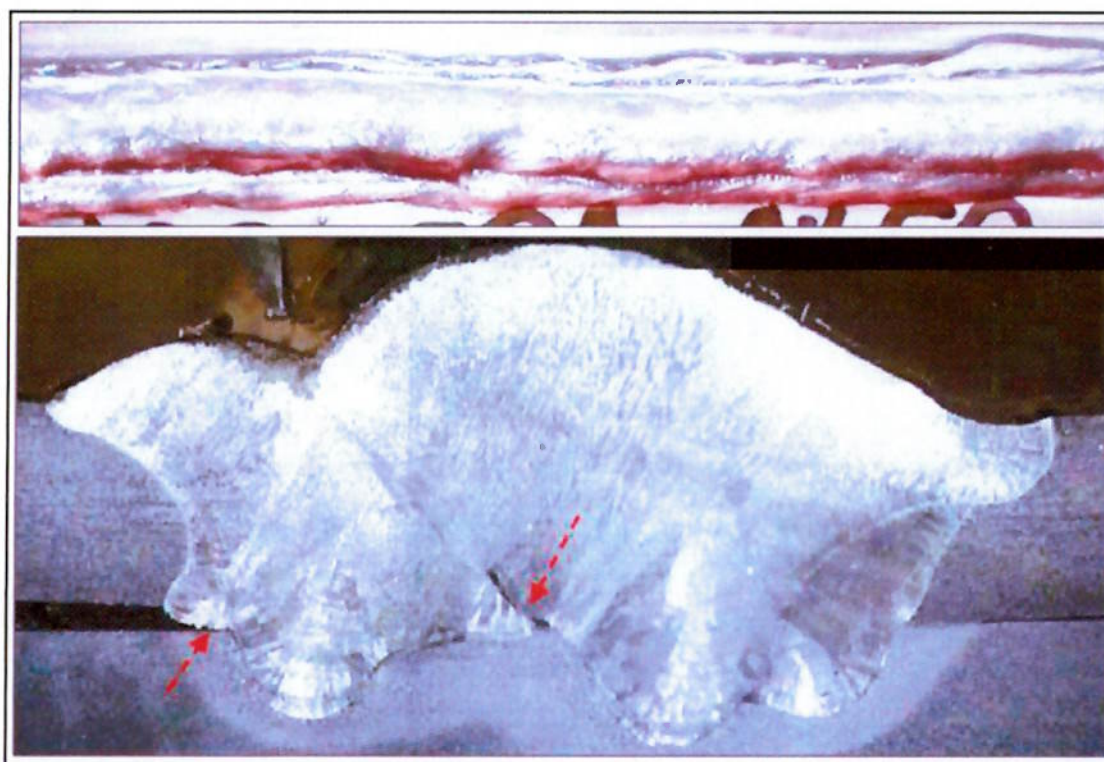
**Figura 5.1** – CP1, gás: 98%Ar / 2%O<sub>2</sub>, corrente média: 125 A. Aumento 7X.



**Figura 5.2** – CP2 – gás: 96%Ar / 4%CO<sub>2</sub>, corrente média 215 A. Aumento 7X.

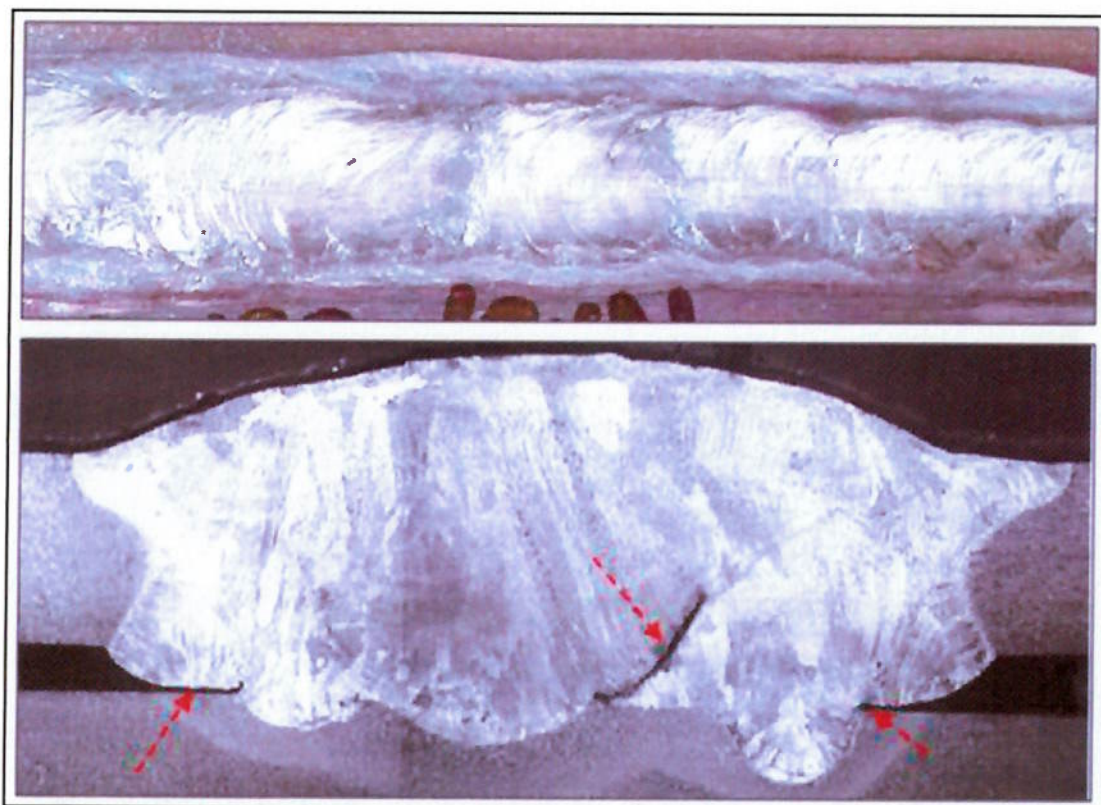


**Figura 5.3** – CP3 – gás: 96%Ar / 4%CO<sub>2</sub>, corrente 215 A. Aumento 7X.

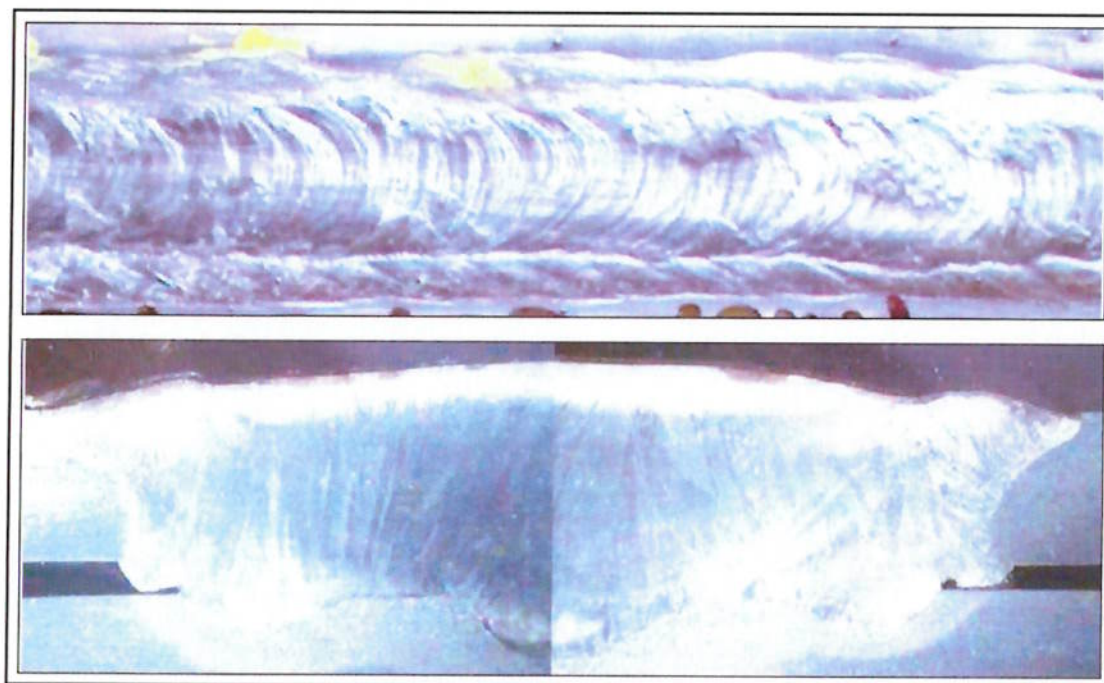


**Figura 5.4** – CP4 – gás: 96%Ar / 4%CO<sub>2</sub>, corrente 170 A, soldado na posição horizontal. Aumento 7X.

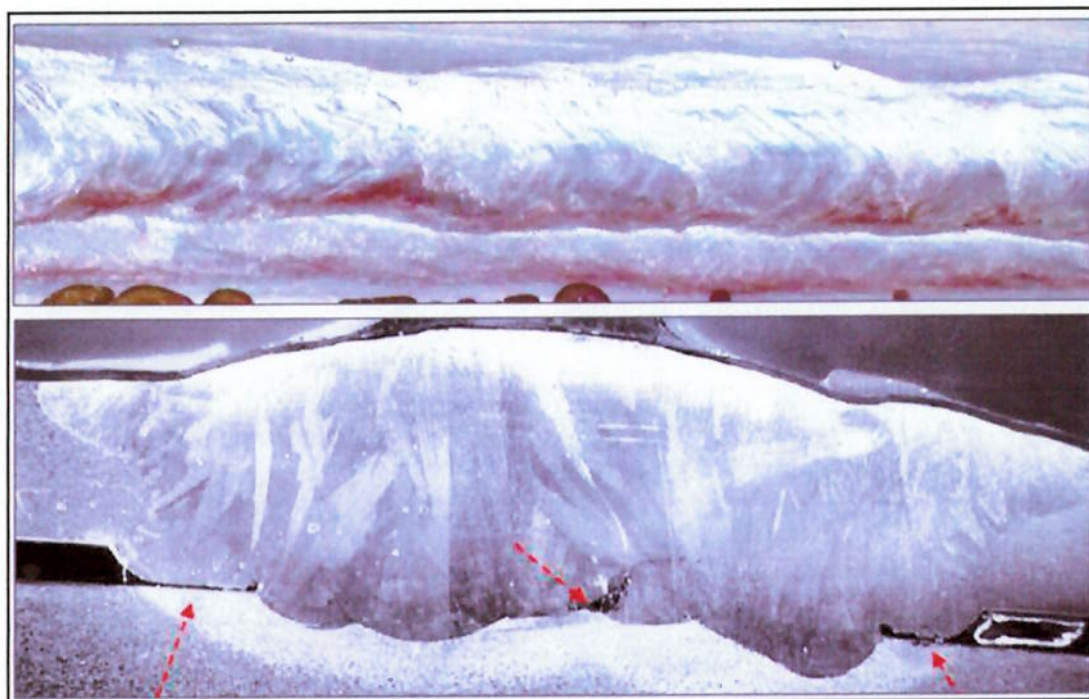




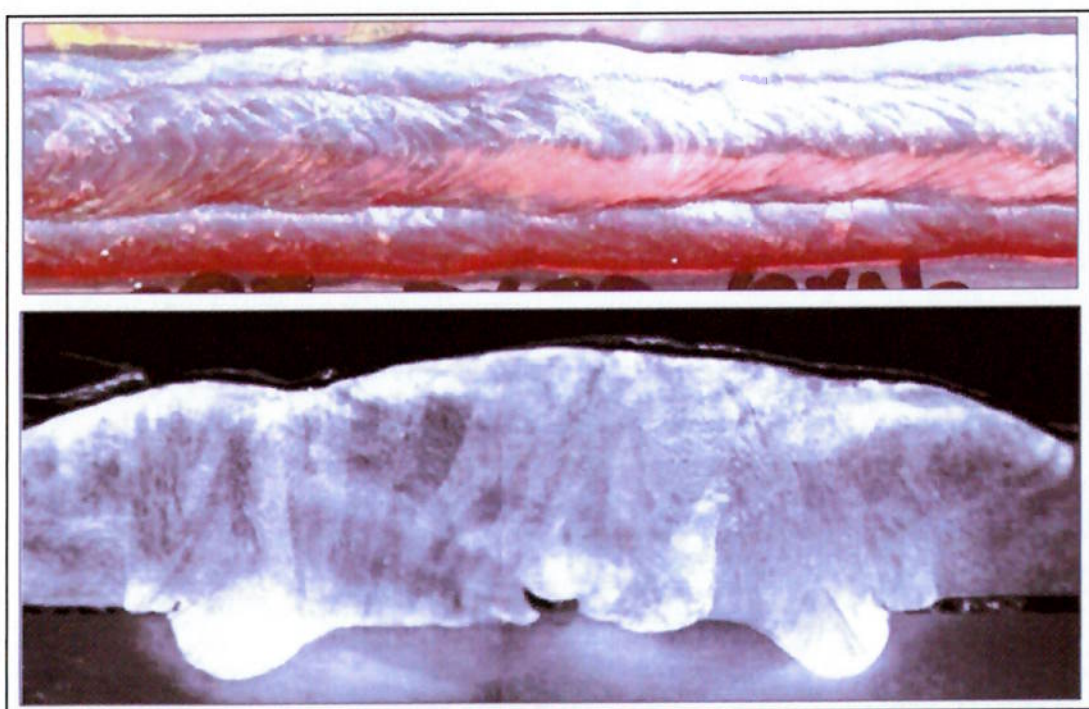
**Figura 5.5** – CP5 – gás: 95%Ar / 3%CO<sub>2</sub> / 2%N<sub>2</sub>, corrente 130 A. Aumento 7X.



**Figura 5.6** – CP6 – gás: 95%Ar / 3%CO<sub>2</sub> / 2%N<sub>2</sub>, corrente 150 A. Aumento 7X.

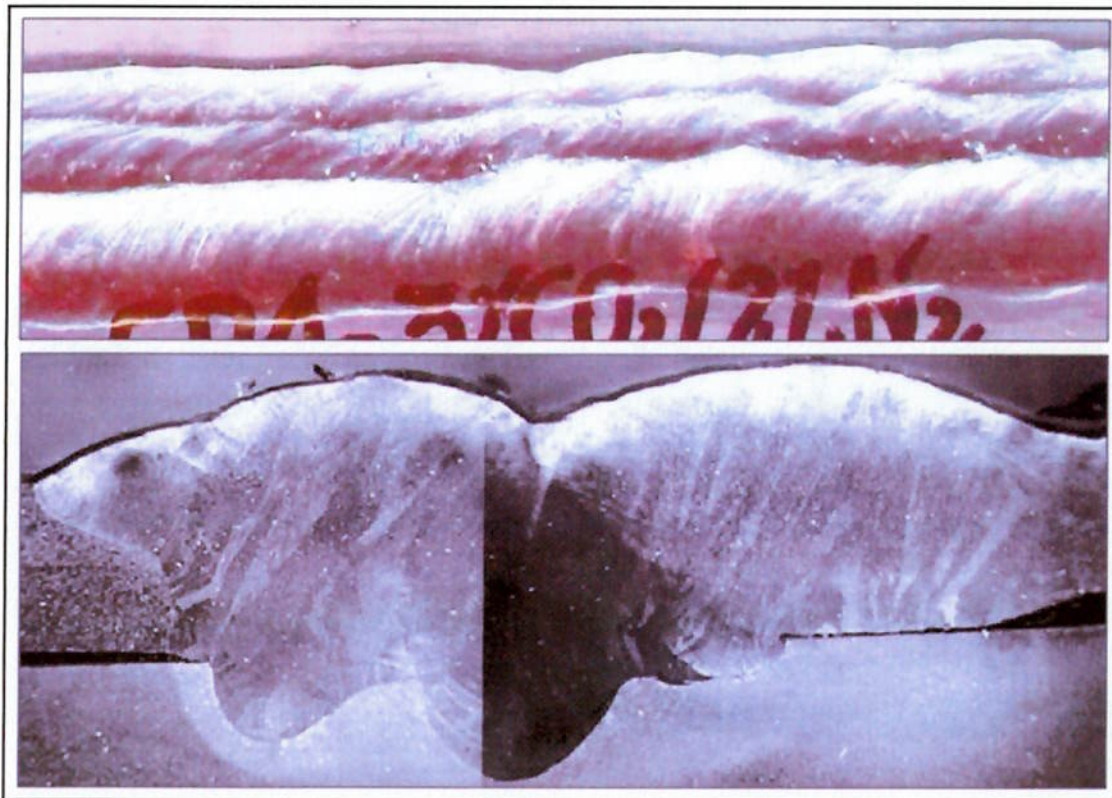


**Figura 5.7** – CP7 – gás: 95%Ar / 3%CO<sub>2</sub> / 2%N<sub>2</sub>, corrente 176 A. Aumento 7X.



**Figura 5.8** – CP8 - gás 95%Ar / 3%CO<sub>2</sub> / 2%N<sub>2</sub>, corrente 160/185 A, soldagem com duplo pulso. Aumento 7X.





**Figura 5.9** – CP9: gás 95%Ar/3%CO<sub>2</sub>/2%N<sub>2</sub>, corrente 120/145 A. Soldagem com duplo pulso. Aumento 7X.

As soldas dos corpos de prova não apresentaram mordeduras utilizando-se três passes de solda. Porém, a maioria dos corpos de prova apresentaram defeitos de soldagem do tipo falta de fusão nas interfaces das extremidades do cordão de solda com a chapa base de aço carbono. Estes defeitos podem nuclear trincas devido à dilatação diferencial entre o aço carbono e a liga austenítica.

Os corpos de prova CP1, CP4, CP5 e CP7 soldados com correntes médias menores apresentaram falta de fusão entre passes no cordão de solda. Esse tipo de descontinuidade pode estar ligado à baixa energia de soldagem e a fluidez do metal depositado. Este tipo de descontinuidade concentra tensões e pode levar ao surgimento de trincas.

### 5.3 PENETRAÇÃO E REFORÇO DE SOLDA.

A tabela 5.1 mostra os resultados da penetração e do reforço de solda.

**Tabela 5.1** – Resultados de penetração e reforço de solda.

Corpo de prova	CP1	CP2	CP3	CP4**	CP5	CP6	CP7	CP8	CP9
Gases de Proteção	98%Ar / 2%O <sub>2</sub>		96%Ar / 4%CO <sub>2</sub>		95%Ar / 3%CO <sub>2</sub> / 2%N <sub>2</sub>				
<b>Penetração (mm)</b>	0,86	1,88	2,45	1,82	1,3	1,45	0,85	1,29	2,40
<b>Altura média do reforço (mm)</b>	2,6	1,45	1,53	2,68	1,93	1,06	1,78	2,07	2,05
Corrente Média (A)	125	215	215	170	130	150	176	160/185	120/145
Tensão (V)	29	26	25	21,5	29	23,5	26	22/28	21/23
Velocidade do Arame (m/min)	4,0	7,5	7,5	6,0	4,0	5,1	5,9	5/7,4	0,3
Distância Bico / Peça (mm)	15					10			
Velocidade de Soldagem (m/min)	0,3	0,6	0,5	0,4	0,3	0,4	0,4	0,5	0,4

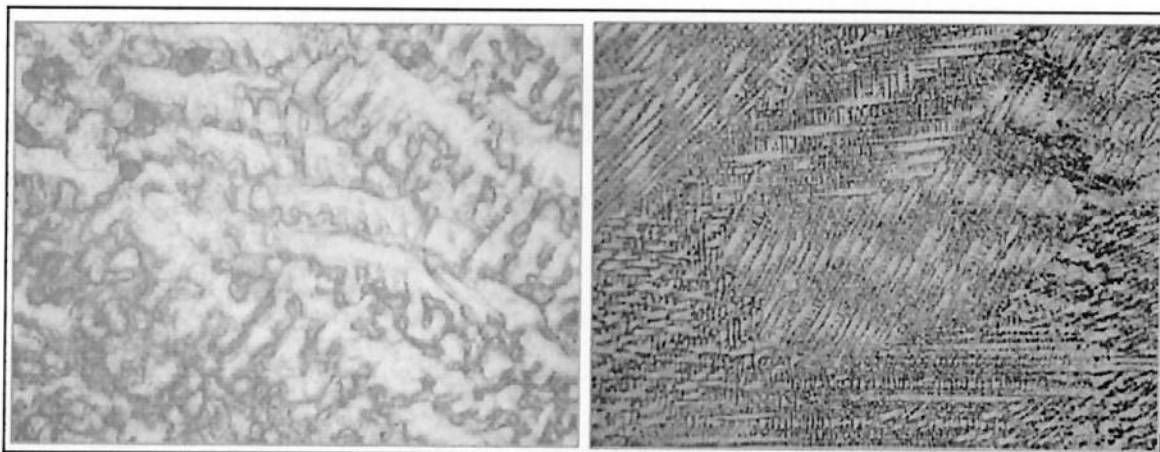
\*\* Posição Horizontal

Nenhuma das soldas apresentou reforço de solda acima de 3 mm. Os corpos de prova soldados com correntes médias mais altas apresentaram maiores penetrações devido à maior energia de soldagem. Abdalla [19] utilizando corrente média de 100A conseguiu penetração máxima de 1,32 mm com eletrodo ER309MoL de 1,2 mm de diâmetro e gás de proteção 92%Ar-8%CO<sub>2</sub>.

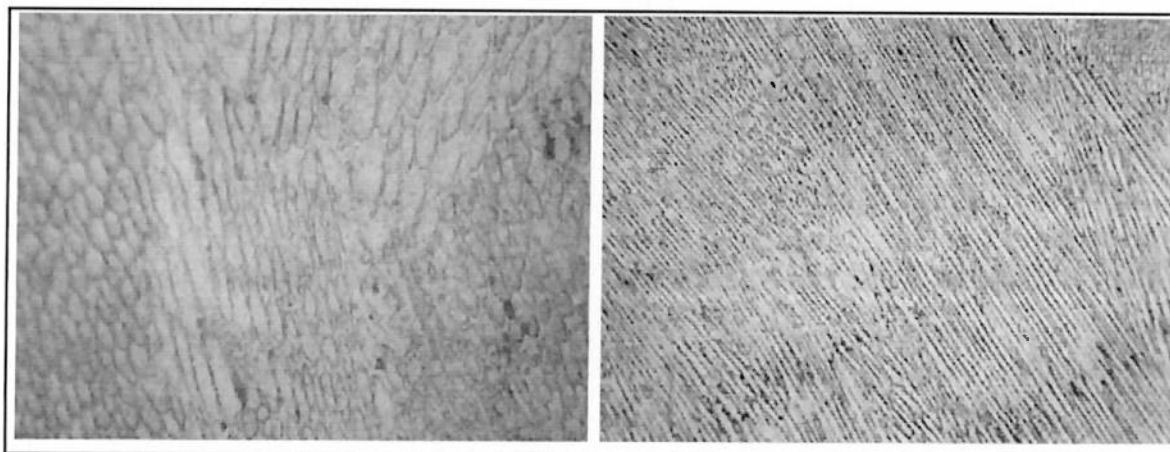


## 5.4 MICROGRAFIA DAS SOLDAS.

Todos os cordões de solda apresentaram microestrutura composta por matriz austenítica, ferrita delta e carbonetos.



**Figura 5.10** – Micrografias do centro do cordão de solda dos CP1 (98%Ar / 2%O<sub>2</sub>) e CP2 (96%Ar / 4%CO<sub>2</sub>). Aumento 400X.



**Figura 5.11** – Micrografias do centro do cordão de solda dos CP6 (95%Ar / 3%CO<sub>2</sub> / 2%N<sub>2</sub>) e CP9 (95%Ar / 3%CO<sub>2</sub> / 2%N<sub>2</sub>) com duplo pulso. Aumento 400X.

## 5.5 ANÁLISE QUÍMICA E DILUIÇÃO.

Na tabela 5.2 são apresentados os resultados da análise química realizada nos cordões de solda dos corpos de prova.

**Tabela 5.2** – Resultado do teor de Mo e da diluição nos cordões de solda.

Corpo de prova	CP1	CP2	CP3	CP4**	CP5	CP6	CP7	CP8	CP9
Gases de Proteção	98%Ar / 2%O <sub>2</sub>	96%Ar / 4%CO <sub>2</sub>			95%Ar / 3%CO <sub>2</sub> / 2%N <sub>2</sub>				
% Mo	3,23	3,13	2,93	3,08	3,25	3,16	3,06	3,15	3,13
Diluição (%)	27	42	45	30	29	44	35	37	43
Corrente Média (A)	125	215	215	170	130	150	176	160/185	120/145
Tensão (V)	29	26	25	21,5	29	23,5	26	22/28	21/23
Velocidade do Arame (m/min)	4,0	7,5	7,5	6,0	4,0	5,1	5,9	5/7,4	0,3
Distância Bico / Peça (mm)	15					10			
Velocidade de Soldagem (m/min)	0,3	0,6	0,5	0,4	0,3	0,4	0,4	0,5	0,4

\*\* Posição Horizontal

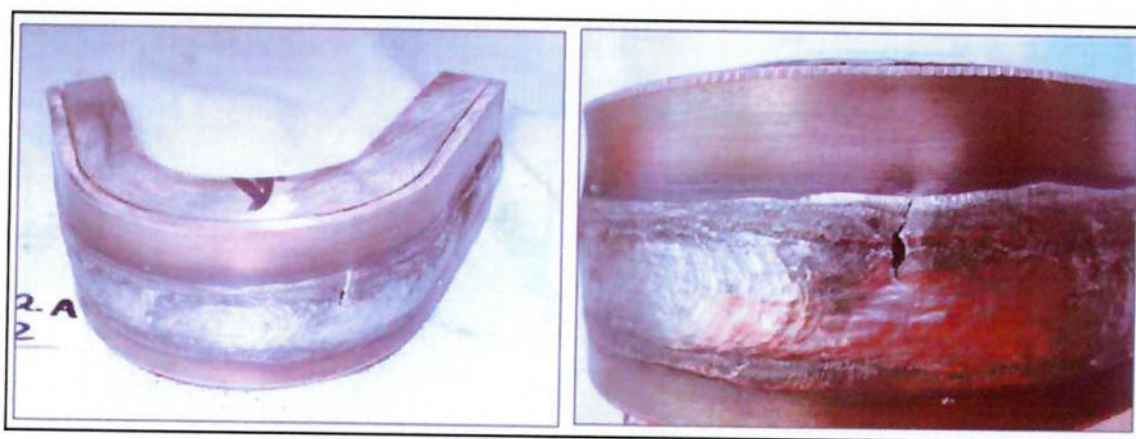
Para a maioria dos corpos de prova o teor de molibdênio ficou acima de 3%. A diluição não teve grande influência na composição química encontrada nas faces das soldas.

## 5.6 LÍQUIDO PENETRANTE

Não foi encontrada nenhuma descontinuidade relevante no ensaio de líquido penetrante para todos os corpos de prova.

## 5.7 ENSAIO DE DOBRAMENTO

Após o dobramento apenas o CP5 apresentou trinca maior que 3,2 mm (figura 5.12). A chapa do *lining* não se destacou em nenhum dos corpos de prova.



**Figura 5.12** – CP5 com trincamento na solda.

## 5.8 MICRODUREZA

A tabela 5.3 mostra os valores de microdureza Vickers máximos encontrados no metal base, zona termicamente afetada e metal de solda.

**Tabela 5.3** – Medição de dureza Vickers 1,0 Kgf (HV1).

Corpo de prova	Metal base	Zona Termicamente Afetada (ZTA)	Metal de solda
CP1	161	189	201
CP2	163	199	179
CP3	153	197	219
CP4	161	191	182
CP5	158	194	194
CP6	159	200	195
CP7	169	203	189
CP8	155	167	199
CP9	152	189	209

## **6. CONCLUSÕES.**

As análises dos resultados deste trabalho permitem as seguintes conclusões:

1. Mesmo trabalhando com correntes médias altas conseguiu-se uma boa fixação do molibdênio nos cordões de solda utilizando o eletrodo ER317L.
2. O processo de soldagem MAG pulsado com arame sólido permite boa penetração de solda.
3. Soldagem com correntes médias mais baixas geraram problemas de falta de fusão entre os passes de solda.
4. Os cordões de solda com formato dediforme, produzidos pelo processo de soldagem MAG pulsado com arame sólido, geraram falta de fusão na ligação da chapa de *lining* com o substrato. Este tipo de defeito pode levar à nucleação de trincas nesta região.
5. A mistura de gases com CO<sub>2</sub> proporcionaram boa geometria e penetração dos cordões de solda.

## SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Os resultados obtidos neste trabalho permitem sugestões para futuros trabalhos usando o processo MIG/MAG pulsado com arame sólido na soldagem de revestimento tipo *lining*.

1. Testar configurações com chapas chanfradas para minimizar a falta de fusão entre a chapa de *lining* e o substrato.
2. Verificar a geometria das soldas nas posições horizontal, vertical ascendente e vertical descendente.
2. Testar espaçamentos menores entre as chapas com eletrodo sólido de 0,9 mm utilizando-se três passes de solda.
3. Verificar a soldabilidade de ligas austeníticas com maior teor de molibdênio.

## **7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:**

1. ZAPPELLINI, A., Curso de corrosão naftênica, treinamento interno PETROBRAS/REVAP, 2011.
2. DERUNGS, W.A., "Naphthenic Acid Corrosion – An Old Enemy of the Petroleum Industry", Corrosion/56, vol. 12, nº 12, 1956.
3. HELER, J.J., "Corrosion of Refinery Equipment by Naphthenic Acid", Materials Protection, vol. 2, nº 9, 1963.
4. PROCESSAMENTO DE PETRÓLEO NACIONAL, VISÃO DA ÁREA DE EQUIPAMENTOS, Rev. 02, Relatório interno PETROBRAS, 2002.
5. SANTOS, I.S., "Corrosão por Ácidos Naftênicos em Unidades de Destilação Atmosférica e a Vácuo". 1º Curso Funcional de Deterioração em Unidades de Destilação, DEPIN/DIEQ, 1991.
6. BRIENT, J.A, WESSNER P.J., DOYLE M.N., Petroleum technology. John Wiley & Sons, New Jersey. Vol. 2 pag. 317-328, 2007.
7. PAIVA, G.J.M., "As Técnicas de Perda de Massa e de Resistência Elétrica na Análise da Corrosão Naftênica em Laboratório e em Campo", Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1999.
8. JAYARAMAN, A.; "Naphthenic Acid Corrosion in Refineries a Rewiew". Revue de L'Institute Francais du Pétroleum, vol. 41, nº 22. 1986.
9. PIEHL, R.L., "Naphthenic Acid Corrosion in Crude Distillation Units", Materials Performance, vol.27, nº 1, pag. 37-43, 1988.
10. JAMBO, H.C.M., FÓFANO, S., Corrosão – Fundamentos, Monitoração e Controle. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna Ltda., pag. 142-149, 2008.

11. HELLE, apud PAIVA, G.J.M., "As Técnicas de Perda de Massa e de Resistência Elétrica na Análise da Corrosão Naftênica em Laboratório e em Campo", Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1999.
12. BABAIAN-KIBALA, E. et ali., " Naphthenic Acid Corrosion in Refinery Settings", Materials Performance, vol. 32, nº 4, pp. 50-55, 1993.
13. BERNARDES, R., Comportamento de aços inoxidáveis comerciais e inonel na resistência à corrosão naftênica de petróleos nacionais: uma análise fenomenológica, Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2005.
14. KANE, R.D., Corrosion in Petroleum Refining and Petrochemical Operations, Corrosion: Environments and Industries, Vol 13C, ASM Handbook, ASM International, 2006, p 967–1014.
15. GALLO, G., EDMONDSON, J., The effect of Molybdenum on Stainless Steels and Naphthenic Acid Corrosion Resistance, NACE International – Corrosion 2008, paper nº 08555.
16. TINOCO, E.B., NOGUEIRA, L.J., Análise do *lining* das torres T-21003 e T-21005. Comunicação Técnica EQ 008/03, Relatório interno CENPES/PETROBRÁS, 2003.
17. PROJETO DE VASO DE PRESSÃO: N-1707 Rev. B, Petróleo Brasileiro S.A., Rio de Janeiro. Set/2006.
18. CERSOSIMO, A.G., ANTUNES, E.S., SÉRVULO, W., FEDELE, R., COSTA, U.P., TAMBURUS, E.G., RAMALHO, J., Otimização de processo Arame Tubular na Soldagem de *Lining*, I ENSOLD, 2004.

19. ABDALLA, F.E.S., Aplicação das variantes MAG pulsado e MAG pulsado térmico com arame maciço em soldas de revestimento do tipo "*lining*", Tese de M.Sc., UFSC, Florianópolis, 2005.
20. WAINER, E.; BRANDI, S.D.; MELO, F.D.H. Soldagem: Processos e Metalurgia. São Paulo: Edgar Blücher, 1995.
21. MARQUES, P.V., MODENESI, J., BRACARENSE A.Q., Soldagem: fundamentos e tecnologia. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007.
22. FORTES, C., Arames tubulares OK, Assistência técnica ESAB, 2003.
23. NADZAM, J., Gas Metal Arc Welding Guidelines, Lincoln Eletric.
24. FORTES, C., Soldagem MIG/MAG, Assistência técnica ESAB, 2005.
25. ASM - Metals Handbook, Welding, Brazing, and Soldering, 9 ed., 1983.
26. Apostila Soldagem MIG/MAG (GMAW) UFMG.
27. MACHADO, D.M., Processo GMAW, 2010.
28. KLAS, W., Welding processes handbook. Cambridge, England: Woodhead Publishing Ltd, 2003.
29. MODENESI, P.J., Fontes de energia para soldagem a arco. UFMG, 2009.
30. MODENESI, P.J., Soldagem de ligas metálicas. UFMG, 2001.
31. BALDUCI, C.R., Instrução de execução e inspeção de caldeiraria. REPLAN MI-EE nº 185, 2002.
32. AMERICAN WELDING SOCIETY, Sheet Metal Welding Code. 5 ed. Miami: AWS, 2006.