

Stéfanie de Moraes Moreira e Silva

**COMPARAÇÃO DE PRODUTIVIDADE DA
SOLDAGEM DE TUBOS ASTM A 106 GR.B COM
ASTM A312 TP 304L ENTRE O PROCESSO
MIG/MAG COM TRANSFERÊNCIA CONTROLADA
E PULSADA E O PROCESSO TIG.**

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

11/2012

Stéfanie de Moraes Moreira e Silva

(Tecnóloga de Soldagem, FATEC-SP, 2010)

**COMPARAÇÃO DE PRODUTIVIDADE DA
SOLDAGEM DE TUBOS ASTM A 106 GR.B COM
ASTM A312 TP 304L ENTRE O PROCESSO
MIG/MAG COM TRANSFERÊNCIA CONTROLADA
E PULSADA E O PROCESSO TIG.**

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

Área de Concentração: Engenharia da Soldagem

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Duarte Brandi

São Paulo

11/2012

}

A sorte do gênio é 1% de inspiração e 99% de transpiração

(Thomas Edison)

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho a toda minha família.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, que me propiciaram a educação e uma vida digna e sempre me fizeram acreditar que tudo é possível basta acreditar, estudar e insistir no nosso sonho.

Aos meus professores, que sempre acreditaram no meu potencial, em especial ao meu orientador que sempre procurou me auxiliar da melhor maneira possível me direcionando.

Aos meus colegas de classe que dividiram comigo suas experiências e que de alguma forma direta ou indiretamente me ajudaram a concluir esse trabalho.

CURRICULO VITAE

STÉFANIE DE MORAES MOREIRA E SILVA

BRASILEIRA, 26 ANOS, SOLTEIRA

RUA DAS CAMELIAS, 16 – GRANJA VIANA

06355-400 CARAPICUIBA-SP

STEFANIEDMMS@GMAIL.COM

FORMAÇÃO ACADEMICA

ENSINO SUPERIOR

- FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO PAULO – FATEC CONCLUSÃO: 2010

ESPECIALIZAÇÃO

- ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DE SOLDAGEM – UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

IDIOMAS

INGLÊS INTERMEDIÁRIO

ESPAANHOL BÁSICO

QUALIFICAÇÕES NA ÁREA

EM PROCESSO PARA QUALIFICAÇÃO EM N2 DE SOLDA NA NORMA ASME VIII DIV.1

HISTÓRICO PROFISSIONAL

- MONTCALM MONTCAGENS INDUSTRIAIS

Atuante na área da qualidade/ soldagem

- *Inspeção, Acompanhamento de Solda e elaboração de documentos de solda como: DATABOOK, EPS, RQPS, RQS, IEIS, relatórios de ensaios não destrutivos(Ex: Liq. Penetrante, Partícula Magnética);*

- *Acompanhamentos nos vários processos de solda: SMAW, GMAW, GTAW, SAW;*

- *Acompanhamento em todo processo de qualificação de profissionais de soldagem na fabricação de spools de aço inoxidável como aço carbono para diversos clients;*

- *Responsável pela busca continua para otimização nos processos de soldagem e fabricação de spools.*

Período: Set/2011 até atualmente.

- APEXFIL FILTRAGEM INDUSTRIAL

- Responsável pela área de soldagem

SLD 18/2011 - T3

- *Inspeção, Acompanhamento de Solda e elaboração de documentos de solda como: EPS, RQPS, RQS, IEIS, relatórios de ensaios não destrutivos(Ex: Liq. Penetrante, Partícula Magnética);*
- *Acompanhamentos nos vários processos de solda: SMAW, GMAW, GTAW;*
- *Acompanhamento em todo processo de qualificação de profissionais assim como na fabricação de vasos de pressão para diversos clientes.*

Período: Dez/2010 a Set/2011

- SOUDAGE INDUSTRIA E SERVIÇOS DE SOLDA LTDA

- *Inspeção e Acompanhamento de Solda: responsável por EPS, RQPS, RQS, relatórios de não conformidades, relatórios de ensaios não destrutivos(Ex: Liq. Penetrante, Partícula Magnética);*
- *Normas: vivencia principalmente com as Normas ASME VIII, IX, AWS.*
- *Acompanhamentos nos vários processos de solda: SAW, SMAW, FCAW, GMAW, GTAW;*
- *Análise de documentação (Databook);*
- *E com diversos materiais: Aço inoxidável, alumínio, aço carbono, etc.*
- *Trabalhos especiais de recuperação de materiais.*
- *Estudos de análise de falha em estruturas soldadas em aço carbono, inoxidáveis, alumínio e titânio.*
- *Acompanhamento de soldagem em estaleiros, etc.*

Período : Jul/2008 a Nov/2009

RESUMO

Esse trabalho visou abordar um tema crítico hoje em dia nos pipe-shop's que é a uma maior produtividade sem a perda da qualidade. Para isso, comparou-se o processo de soldagem TIG , ainda muito utilizado por seu excelente acabamento e confiabilidade na execução de passes de raiz, e o processo MIG/MAG que apresenta ótima produtividade quando utiliza-se o modo de transferência por Curto-Circuito Controlado propiciando assim corções livres de defeitos comuns no modo de transferência convencional por curto-curcuito na soldagem na raiz. Para que essa comparação fosse possível, todos os estudos e testes foram executados por soldadores qualificados.

Palavras Chaves: Soldagem de Tubos, Raiz com MIG/MAG com STT, comparação de processos.

ABSTRACT

This study aimed to address a critical issue in today's pipe-shop, that is greater productivity without losing quality. For this, we used comparisons between the TIG welding process, although widely used for their excellent workmanship and reliable execution at the root weld and welding in MIG / MAG which has great productivity and the machine properly using the Waveform Control Technology is also providing sound roots free from defects, common in this type of process in the root. For this comparison possible, all tests were performed by welders.

Key-words: Pipe Welding, Root pass with GMAW STT, processes comparison

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Princípio do processo Mig/Mag	7
Figura 2.2 – Alimentador de arame	8
Figura 2.3 - Tocha de soldagem.....	9
Figura 2.4 – Classificação AWS	12
Figura 2.5 - Aspecto do cordão com diferentes misturas de gases	14
Figura 2.6 – Modo de transferência metálica globular	16
Figura 2.7 - Transferência Metálica por Spray	18
Figura 2.8 – Princípios do Arco Pulsado.....	19
Figura 2.9 - Forma de onda da corrente utilizada no processo STT.....	22
Figura 2.10 – Forma de onda da corrente no processo STT.....	23
Figura 2.11 - Processo de soldagem TIG.....	25
Figura 2.12 – Tocha de Soldagem	27
Figura 2.13 - Efeito do teor de cromo na resistência a corrosão de ligas de Fe-Cr.....	33
Figura 2.14 - Estrutura Austenítica	35
Figura 2.15 – Aço Inoxidável ABNT 420	36
Figura 2.16 - Diagrama de Fases Fe- C.....	39
Figura 4.1 - CP do processo MIG/MAG.....	46
Figura 4.2 - CP do processo Tig	46
Figura 4.3 - Mesa giratória usada para soldagem na posição 1G	46
Figura 4.4 - Posição 1G Girando conforme ASME IX Ed2010	47

Figura 4.5 e 4.6 - Máquina Mig/Mag STT	47
Figura 4.7 e 4.8 - Máquina usada no processo Tig	48
Figura 4.9 - Kit Purga de 4"	48
Figura 4.10-Demonstração da localização dos cp's nos ensaios de tração e dobramento.....	51
Figura 4.11 - Pontos utilizados para medição da dureza	52
Figura 4.12 - Pontos retirados para medição da composição química	52
Figura 5.1 - Microestrutura encontrada no processo TIG	53
Figura 5.2 - Micrografia realizada no CP MIG/MAG	54
Figura 5.3 e 5.4 - Cp's do ensaio de Tração	55
Figura 5.5 - Demonstração do Diagrama Tensão x Deformação (MIG/MAG) .	56
Figura 5.6 – Demonstração do Diagrama Tensão x Deformação (TIG)	56
Figura 5.7 – Equipamento para execução de dobramento	57
Figura 5.8 – Detalhe do dobramento do processo MIG/MAG	58
Figura 5.9 – Detalhe do dobramento do processo MIG/MAG	58
Figura 5.10 – Resultado do ensaio de Dureza do Corpo de Prova	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1-Resumo das características da soldagem MIG/MAG	6
Tabela 2.2-Especificação AWS	11
Tabela 2.3 - Resistência Mecânica do Metal de Solda	12
Tabela 2.4 - Gases e Misturas usados na soldagem MIG/MAG	14
Tabela 2.5 - Características dos gases e suas misturas	15
Tabela 2.6 - Especificação AWS para Metais de Adição	28
Tabela 2.7 - Composição Química dos eletrodos de Tungstênio.....	29
Tabela 2.8 - Características dos gases de proteção mais utilizados no processo TIG adaptados	30
Tabela 2.9 - Principais diferenças dos processos TIG e MIG/MAG	30
Tabela 4.1 - Seleção de consumíveis para soldagem de aços inoxidáveis dissimilares ou não	45
Tabela 4.2 - Composição Química ER 309L-Si (ASME II Parte C – SFA 5.9).....	45
Tabela 4.3 - Principais Parâmetros dos testes	49
Tabela 5. 1 – Valores de tensão encontrados nos testes	57
Tabela 5. 2 – Análise química dos materiais de Base	59
Tabela 5. 3 – Custos.....	60
Tabela 5. 4 – Dados importantes para dos cálculos	60
Tabela 5. 5 – Chanfro utilizado e sua fórmula de Área Transversal	63
Tabela 5. 6 – Densidades aproximadas das ligas utilizadas.....	63
Tabela 5. 7 – Taxas máximas de depreciação (SRF)	65

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS

ASTM: American Society For Testing And Materials

AWS: American Welding Society

CP: Corpo de Prova

ED's: Ensaios Destrutivos

END's: Ensaios Não Destrutivos

EVS: Ensaio de Visual de Solda

GMAW: Gas Metal Arc Welding

GTAW: Gas Tungsten Arc Welding

Ni: Níquel

CO₂: Dióxido de Carbono

CTS: Custo Total de Soldagem

CMO: Custo de Mão-de-obra

CC: Custo do Consumível

STT®: Surface Tension Transfer®

ZAC: Zona Afetada pelo calor

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	ii
AGRADECIMENTOS	iii
CURRICULUM VITAE	iv
RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS	xi
SUMÁRIO	xii
1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
2.1 Desenvolvimento tecnológico da soldagem MIG/MAG	2
2.2 Introdução do Processo MIG/MAG	4
2.2.1 Características do Processo	5
2.2.2 Equipamentos	6
2.2.2.1 Fonte de Energia	7
2.2.2.2 Alimentador de Arame	8
2.2.2.3 Tocha de Soldagem MIG/MAG	9
2.2.3 Consumíveis	10
2.2.3.1 Metal de Adição	10
2.2.3.2 Gás de Proteção	13
2.2.4 Modo de Transferência	15
2.2.4.1 Transferência Metálica Globular	16
2.2.4.2 Transferência Metálica por Curto-Circuito	17
2.2.4.3 Transferência Metálica por Spray	18
2.2.4.4 Transferência Metálica por projeção (Arco Pulsado)	19
2.2.4.5 Transferência Metálica por Curto-Circuito Controlado	20
2.3 Soldagem GTAW	24
2.3.1 Introdução à Soldagem TIG	24
2.3.2 Características do processo TIG	25
2.3.3 Equipamentos	26
2.3.4 Consumíveis	27
2.3.4.1 Metal de Adição	28
2.3.4.2 Eletrodo de Tungstênio	29
2.3.4.2 Gás de Proteção	29
2.4 Custo de Soldagem	30
2.4.1 Principais diferenças entre o Processos TIG e MIG/MAG ...	30
2.5 Aços Inoxidáveis	31

2.5.1 História dos Aços Inoxidáveis	31
2.5.2 Tipos e Características dos Aços Inoxidáveis	32
2.5.3 Aços Inoxidáveis Austeníticos	34
2.5.4 Aços Inoxidáveis Ferríticos	35
2.5.5 Aços Inoxidáveis Martensíticos.....	36
2.6 Aço Carbono	37
2.6.1 Diagrama de Fases ou Equilíbrio	38
2.6.1 Classificação dos Aços	41
2.6.1.1 Sistema Americano (AISI/SAE)	41
2.6.1.2 Sistema Alemão (DIN)	41
3. OBJETIVOS.	43
4. MATERIAIS E MÉTODOS.	44
4.1 Material de Base.	44
4.1.1 Gás de Proteção	44
4.1.2 Metal de Adição.....	44
4.2 Métodos	46
4.2.1 Construção do corpo de prova.....	46
4.2.2 Parâmetros de Soldagem.	49
4.2.3. Análise em Laboratório	49
4.2.3.1 Macrografia	49
4.2.3.2 Micrografia	50
4.2.3.3 Tração.	50
4.2.3.4 Dobramento	51
4.2.3.5 Dureza	52
4.2.3.6 Análise Química	52
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	53
5.1 Resultados dos Ensaios	53
5.1.1 Micrografia.....	53
5.1.2 Tração.....	55
5.1.3 Dobramento.....	57
5.1.4 Dureza.....	59
5.2 Análise Comparativa do Custo x benefício de cada processo.....	59
5.2.1 Introdução para Cálculo dos Custos.....	60
5.2.1.1 Custo de Mão-de-Obra.....	61
5.2.1.2 Custo do Consumível.	62
5.2.1.3 Custo de Energia Elétrica.	64
5.2.1.4 Custo de Depreciação	65
5.2.1.5 Custo de Manutenção	65
5.2.1.6 Custo de Outros Materiais	66
5.3 Custo Total de Soldagem.....	66

6. CONCLUSÕES.....	67
<i>SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....</i>	<i>68</i>
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:.....	69
ANEXO I – Título do anexo.....	72

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.

Durante muitos anos buscou-se um processo de soldagem que propiciasse uma maior produtividade, porém sem perda qualidade na indústria de pipe-shop. Para isso, vários processos de soldagem vêm sendo testados para que esse objetivo seja alcançado.

Um dos processos bastante utilizados é processo TIG que propicia um ótimo acabamento final nas juntas soldadas e uma maior confiabilidade na soldagem da raiz em comparação ao processo MIG/MAG convencional. Porém, esse processo tem limitações como a baixa produtividade.

Em busca de um processo que pudesse ser ao mesmo tempo produtivo, mas sem perder a qualidade final, a indústria de pipe-shop começou a exigir do mercado processos de soldagem que atendessem esse novo anseio de seus cliente.

Sendo assim, nesse trabalho buscou-se realizar uma comparação tanto no aspecto de qualidade como no de custo de soldagem em uma linha de produção contínua de tubulação.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.

2.1 DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO DA SOLDAGEM MIG/MAG

O desenvolvimento da soldagem pode ser traçado desde os primórdios. Os primeiros exemplos vêm da Idade do Bronze. Pequenas caixas circulares de ouro foram unidas por soldagem. Acredita-se, que isso tenha ocorrido a cerca de 2000 anos atrás [1].

A história da soldagem MIG/MAG começou por volta do século 19, com Sir Humphry Davy, que descobriu o arco elétrico em 1800. [2]

Em 1890, C.L. Coffin foi a primeira patente americana para processo de soldagem a arco usando eletrodo de metal. Esse foi o primeiro relato de metal fundido através de arco elétrico para depositar metal de solda em junta soldada. Aproximadamente ao mesmo tempo, N.G. Slavianoff, um russo, apresentou a mesma ideia de transferência de metal através de um arco, mas para metal fundido em um molde [1].

Em 1920 que a soldagem semi-automática é introduzida no mercado. E um antecessor dos equipamentos MIG/MAG foi inventado por P.O.Nobel, que na época trabalhava na General Electric. Ele utilizou um eletrodo com corrente direta e alterava a regulação do arco para regular a penetração da solda, sem utilizar nenhum gás inerte para proteção da solda [3].

H.M. Hobart e P.K. Devers estavam fazendo um trabalho similar, porém usando atmosferas protetoras como hélio e argônio. Só em 1926, pediram patentes para a soldagem a arco utilizando gás fornecido ao redor do arco e demonstraram a soldagem com um bocal concêntrico e com eletrodo que era alimentado através desse bocal. Esse foi o precursor do processo MIG/MAG que conhecemos hoje [1].

Só em 1948, que o processo MIG/MAG foi finalmente desenvolvido Batelle Memorial Institute. E esse equipamento foi utilizado por H.E. Kennedy, que desenvolveu um eletrodo com um diâmetro pequeno e com uma fonte de energia de tensão constante. E com isso, obteve uma elevada taxa de deposição, mas o custo elevado dos gases inertes limitava a sua utilização para materiais não-ferrosos [2].

Em 1953, com o desenvolvimento do gás dióxido de carbono (CO_2) e outras misturas de gás de proteção, o processo MIG/MAG se tornou viável e muito popular na área industrial [3].

Em 1958 e 1959, a variação do processo para o modo de transferência por curto-circuito do MIG/MAG foi lançada, o que aumentou a versatilidade do processo e fez a soldagem em espessuras finas possíveis com diâmetros de arames cada vez menores e fontes de alimentação cada vez mais avançadas.

A variação do modo de transferência de arco por spray é lançada no início dos anos 1960, quando pesquisadores adicionaram pequenas quantidades de oxigênio na mistura do gás inerte [2].

Nos meados dos anos 70, com o surgimento dos tiristores, foi possível a regulação dos vários parâmetros de soldagem com maior sensibilidade.[3]

Mais recentemente, a utilização de corrente pulsada foi testada junto com o processo MIG/MAG, chamando este método de "pulsed spray-arc". [2] Hoje em dia, o MIG/MAG é um processo bastante popular entre os processos existentes, especialmente em ambientes industriais. [3]

2.2 INTRODUÇÃO DO PROCESSO MIG/MAG

A soldagem a arco com proteção gasosa MIG/MAG é um processo de soldagem em que a união metálica é feita pelo aquecimento da junta a ser soldada com um arco elétrico estabelecido entre o arame metálico, que é consumível, e a peça de trabalho. A proteção da poça de fusão é feita através do gás que pode ser tanto ativo como inerte ou ainda mistura destes. [4]

Esse processo é chamado de MIG (Metal Inert Gas) quando a proteção gasosa é gerada a partir de um gás inerte como, por exemplo, o Argônio ou o Hélio, ou mistura desses. [5]

Quando a proteção se faz por um gás ativo, exemplo CO_2 (dióxido de carbono) ou ainda com misturas contendo CO_2 ou O_2 este processo é chamado de MAG (Metal Active Gas). [5]

O processo de soldagem MAG é utilizado na soldagem de materiais ferrosos, enquanto o processo MIG pode ser usado tanto na soldagem de materiais ferrosos quanto não ferrosos como Alumínio, Cobre, Magnésio, Níquel e suas ligas. [6]

O processo MIG/MAG tem muitas variantes, normalmente é semi-automático onde a alimentação do arame é feita de forma mecânica e o soldador é responsável pelo início e o final da soldagem. [4]

Contudo, o MIG/MAG pode ser automatizado e essa variante auxilia na soldagem de materiais com espessuras muito finas, isto é, espessuras de cerca de 1,0mm. [7]

2.2.1 CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO

A soldagem MIG/MAG possui algumas características importantes quando se busca por produtividade e uma boa qualidade de acabamento.

Isso porque esse processo tem algumas vantagens que o favorecem se comparado a outros processos a arco-elétrico conhecidos.

A soldagem MIG/MAG proporciona poucos respingos, possibilidade de soldagem em todas as posições, velocidades de soldagem elevadas, alta taxa de deposição, não necessita de soldador altamente habilitado como na soldagem TIG, por exemplo, além de alimentação contínua do eletrodo nu. Também não há formação de escória, penetração uniforme, baixo teor de hidrogênio, zonas afetadas pelo calor mais estreitas, possibilidade de soldagem em materiais de amplas faixas de espessura, entre outras. [4][7][8]

Contudo, assim como todo processo de soldagem há limitações, por exemplo, há necessidade de realizar-se a soldagem em ambiente fechado para assim evitar correntes de ar. [4]

E, por não haver escória ou fluxo, há uma maior velocidade de resfriamento o que pode resultar em aparecimento de trincas. [4]

O acesso à junta soldada fica limitado ao bocal utilizado e em alguns casos inviabiliza a soldagem, há ainda uma maior sensibilidade à mudança dos parâmetros elétricos de operação do arco de soldagem – o que influenciam diretamente no acabamento e qualidade final da soldagem - além de se

precisar de um ajuste rigoso nos parâmetros para que se obtenha o padrão de cordão desejado. [4][8]

Tabela 2. 1 - Resumo das características da soldagem pelo processo MIG/MAG
[8] Adaptado

Tipo de operação: Semi-automática ou automática	Equipamentos: Gerador,retificador, pistola, cilindro de gases e Unidade de alimentação do eletrodo Nu.
Características: Taxa de deposição: 1 a 15 kg/h Espessuras soldadas: 3mm mínima na soldagem semi-automática e 1,5 mm na soldagem automática Posições de soldagem:todas Diluição: 10 a 30% Tipo de juntas: todas Faixa de corrente: 60 a 500 A	Custo do equipamento: 5 a 10 vezes o custo do equipamento de eletrodo revestido
	Consumíveis: Eletrodo nu 0,5 a 1,6 mm Bocal Gases: argônio, hélio, CO2 e misturas (argônio + CO2; argônio + oxigênio)
Vantagens: Taxa de deposição elevada Poucas operações de acabamento Solda com baixo teor de hidrogênio Facilidade de execução da soldagem blabla	Limitações: Velocidade de resfriamento elevada com possibilidade de trincas Dificuldade na soldagem em locais de difícil acesso.
Segurança: Proteção Auricular Proteção de pele para evitar queimaduras pela radiação ultra-violeta e proteções metálicas	

2.2.2 EQUIPAMENTOS

Os equipamentos comumente utilizados para a soldagem com MIG/MAG consistem basicamente nos seguintes componentes: Pistola refrigerada a ar ou a água, alimentador de arame, fonte de energia e o gás de proteção. Como mostra figura 2.1 [8]

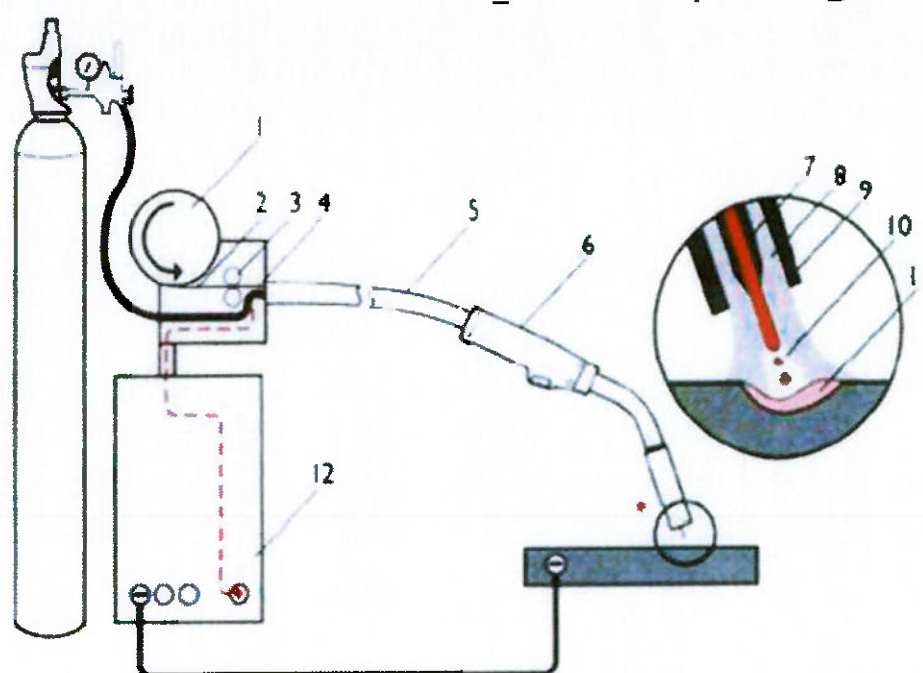


FIGURA 2. 1 - Princípio do Processo MIG/MAG: 1. Carretel ou tambor 2. Eletrodo 3. Roletes de tração 4. Guia do arame 5. Conjunto de mangueiras 6. Pistola de soldagem 7. Bico de Contato 8. Gás de proteção 9. Bocal do Gás de proteção 10. Arco elétrico 11. Poça de fusão 12. Fonte de energia [Adaptado da referência] [4]

2.2.2.1 FONTE DE ENERGIA

Quase todas as soldagens realizadas com MIG/MAG são em CC+, ou seja, corrente contínua polaridade inversa e de tensão constante. Isto é, o eletrodo nu é conectado ao polo positivo, enquanto a peça é conectada ao polo negativo. Como a velocidade de alimentação de arame é regulada pelo controle do arame, o ajuste básico executado pela fonte é o comprimento do arco, que é regulado pela tensão de soldagem. [9]

Quando ocorre uma variação abrupta de velocidade de alimentação de arame, ou uma variação momentânea da tensão do arco, a fonte aumenta ou diminui abruptamente a corrente de soldagem, dependendo da mudança no

comprimento do arco. A taxa de fusão do arame muda automaticamente para restaurar o comprimento original do arco elétrico. Sendo assim, mudanças permanentes no comprimento do arco são efetuadas quando ajustamos a tensão na saída da fonte. Logo, a velocidade de alimentação do arame, que o soldador/operador ajusta na fonte, determina a corrente de soldagem. [4][9]

2.2.2.2 ALIMENTADOR DE ARAME

Todo alimentador de arame tem como função principal a de conduzir o arame até a poça de fusão e essa condução é realizada através de um conjunto de roletes de tração. Esses podem estar tanto próximos como longe da pistola de soldagem, e, dependendo da distância entre o carretel de arame e a tocha de soldagem, um outro tipo pode ter melhores resultados.

Os alimentadores são normalmente acionados por um motor de corrente contínua e fornece o arame de forma constante completamente ajustável. E como foi explicado anteriormente, variando a velocidade do arame a varia-se a corrente, mesmo não existindo qualquer dependência entre o alimentador e a fonte de energia MIG/MAG.

A Figura 2.2 mostra um alimentador de arame típico para soldagem

MIG/MAG.



FIGURA 2. 2 – Alimentador de Arame [Catálogo Eutectic]

2.2.2.3 TOCHA DE SOLDAGEM MIG/MAG

A tocha de soldagem utilizada no processo MIG/MAG basicamente consiste de punho ou suporte e um bico de contato, que é o responsável pela energização do arame eletrodo, de um bocal que orienta o fluxo do gás de proteção e um gatilho que aciona o sistema de alimentação do arame. Essa pistola pode ser tanto refrigerada a ar como a água, isso depende da escolha da corrente, do tipo de gás protetor, do tipo de junta, comprimento da junta além do material utilizado [4][8].

As tochas têm a função principal de conduzir o arame eletrodo do cabeçote até a peça a ser soldada e é através dela também que o gás de proteção chega a poça de fusão.

O bloco condutor que fica na saída do cabeçote e na entrada da pistola, fornece a energia para a tocha que é conduzida pelo bico de contato. Este então fornece a energia para o arame. Na figura 2.3 se pode observar o esquema de uma tocha MIG/MAG. [4]

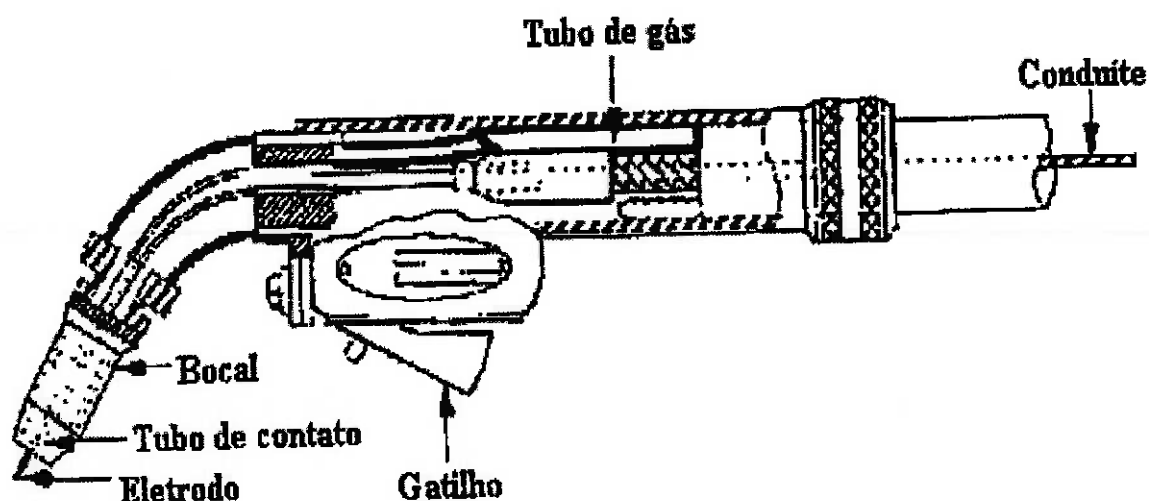


FIGURA 2. 3 - Tocha de soldagem MIG/MAG [6]

2.2.3 CONSUMÍVEIS

Os principais consumíveis utilizados na soldagem MIG/MAG são o arame eletrodo, gás de proteção e em alguns casos, um líquido para proteção da tocha e regiões adjacentes à solda contra adesão de respingos. [4][10]

2.2.3.1 METAL DE ADIÇÃO

Os arames eletrodos para a soldagem MIG/MAG são constituídos de metais ou ligas metálicas que possuem composição química, dureza, condições superficiais e dimensões bem controladas. Arames que não possuem uma boa qualidade podem produzir descontinuidades nas soldas. Por isso, a escolha de um arame adequado deve ser levado em conta antes de começar a soldagem. [4][10][11]

Os arames mais utilizados, por exemplo, com proteções gasosas de CO₂ são os que contêm maiores teores de silício e manganês em sua composição, devido à sua ação desoxidante. Para uma escolha adequada do metal de adição de adição deve-se levar em conta a composição química do metal de base, do gás de proteção e da composição química e propriedades mecânicas desejadas na junta soldada. [4]

Para a soldagem MIG/MAG, os eletrodos consumíveis consistem de um arame contínuo em diâmetros que variam de 0,6 a 2,4 mm (arame tubular até 4 mm), usualmente em rolos de 12 a 15 kg, existindo no mercado rolos de até 200 kg. Os arames são normalmente revestidos com uma fina camada de Cobre para melhor contato elétrico com o tubo de contato da pistola e para prevenir a ocorrência de corrosão na estocagem. [12]

Tabela 2. 2 - Especificações AWS de materiais de adição para Soldagem MIG/MAG [12]

Material	Nº da especificação
Arames de Cobre e suas ligas	A 5.7
Arames de Aços inoxidáveis	A 5.9
Arames de Alumínio e suas ligas	A 5.10
Arames de Níquel e suas ligas	A 5.14
Arames para soldagem de Ferro fundido	A 5.15
Arames de Titânio e suas ligas	A 5.16
Arames e arames tubulares de Aço carbono com pó interno	A 5.18
Arames de Magnésio e suas ligas	A 5.19
Arames tubulares de Aço carbono com fluxo interno	A 5.20
Arames para Revestimento	A 5.21
Arames tubulares para soldagem de Aços inoxidáveis	A 5.22
Arames para soldagem de Zircônio	A 5.24
Arames de Aços de baixa liga	A 5.28

A especificação AWS A 5.18 prescreve os requerimentos para a classificação de eletrodos sólidos ou 59 compostos (arame tubular com núcleo metálico – metal cored) e varetas para os processos MIG/MAG (GMAW), TIG (GTAW) e PLASMA (PAW) na soldagem de aço carbono.

A classificação dos arames para soldagem de aços pelas especificações AWS A 5.18 e A 5.28, que engloba os arames sólidos e os arames com enchimento metálico, tem o formato abaixo conforme figura 2.4. [10]

Indica opcionalmente o teor de H_2 difusível (ml/100g de metal depositado)
Pode ser 2,4,8 ou 16

Indica requisitos de composição química do eletrodo ou do metal depositado.

Pode ser "S" para arame sólido ou "C" para arame tubular com enchimento metálico

Indica o limite de resistência mínimo do metal depositado em ksi (2 ou 3 dígitos) ou em MPa (3 dígitos).

Eletrodo para soldagem a arco (E) e/ou vareta (R)

AWS ER XXXA - YYY HZ

FIGURA 2.4 - Classificação AWS 5.18 [10]

Na tabela 2.3 podemos observar alguns exemplos de arames e a correspondente resistência mecânica.

Tabela 2.3 - Resistência Mecânica do Metal de Solda [12]

Classificação	Gás de Proteção	Limite de Resistência		Limite de Escoamento		Alongamento %mínimo
		PSI	MPA	PSI	MPA	
ER 70S-2 a7	CO2	70.000	480	58.000	400	22
ER 70S-B2L ER70C-B2L	Ar/1-5%O2	75.000	515	58.000	400	19
ER 80S e 80C		80.000	550	68.000	470	19
ER 90S e 90C		90.000	620	78.000	540	17
ER 100S		100.000	690	88.000	610	16
ER 110S ou 110C		110.000	760	95.000	660	15
ER 120S ou 120C		120.000	830	105.000	730	14

2.2.3.2 GÁS DE PROTEÇÃO

Para evitar que ocorram problemas com contaminação na poça de fusão, três principais gases são utilizados para proteger a soldagem: o Argônio(Ar), hélio(He) e o Dióxido de Carbono (CO_2). Contudo, ainda pode-se adicionar na mistura pequenas quantidade de gás Oxigênio (O_2), Hidrogênio (H) ou ainda Nitrogênio (N_2) já que essas misturas provaram ser interessantes na soldagem em algumas aplicações. E desses gases apenas o Ar e o He são inertes. Para se compensar a tendência de oxidação dos outros gases utiliza-se formulações no próprio arame. [4]

A fonte de gás normalmente consiste de um cilindro do gás ou mistura de gases ativos ou inertes utilizados na soldagem para a proteção da poça de fusão.

O gás de proteção além de proteger a poça de fusão tem também papel fundamental na ionização da atmosfera protetora ajudando na abertura e manutenção do arco elétrico, além disso, interfere no formato do cordão, tipo de transferência metálica, posição de soldagem, grau de penetração, quantidade de respingos, fumaça e fumos, custo da limpeza e manutenção do equipamento de soldagem e, conseqüentemente, o custo geral de solda. Os principais gases utilizados na soldagem de aços são CO_2 e mistura de Ar- CO_2 . Em menor escala estão misturas Ar- O_2 , Ar- O_2 - CO_2 e Ar-He- CO_2 . [4]

A figura 2.5 mostra uma comparação do aspecto do cordão com a variação do tipo de gás utilizado durante a soldagem. [6]

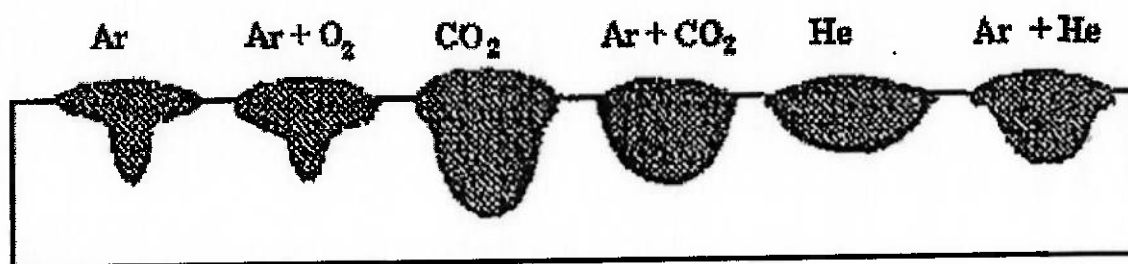


FIGURA 2. 5 - Aspecto do cordão com diferentes gases e misturas. [6]

Os principais gases e misturas utilizados na soldagem são mostrados na tabela 2.4.

Tabela 2. 4 - Gases e misturas usados na soldagem MIG/MAG [Adaptado das referências] [4][6]

GÁS OU MISTURA	COMPORTAMENTO QUÍMICO
Argônio (Ar)	inerte
Hélio (He)	Inerte
Ar + 20 a 50% He	Inerte
Nitrogênio (N ₂)	Ativo
Ar + 20 a 30% N ₂	Ativo
Ar + 1 a 2% O ₂	Ativo
Ar + 3 a 5% O ₂	Ativo
CO ₂	Ativo
Ar + CO ₂ + O ₂	Ativo

Os gases mais comumente utilizados são o Ar, CO₂ e Hélio. Sendo assim, é interessante abordar sobre os mesmos.

O Argônio é o gás inerte mais utilizado na indústria, principalmente, na mistura Ar+CO₂. Isso porque, o Argônio estabiliza o arco elétrico propiciando: uma penetração mais uniforme, uma quantidade menor de respingos, um arco largo e pouca distorção. O Dióxido de Carbono (CO₂) é o mais comumente

utilizado por ser mais barato. É mais utilizado com correntes de até 250A propiciando um arco estável no modo de transferência de curto-circuito. Com correntes acima de 250A passa a apresentar um arco instável por transferência globular, na Tabela 2.5 podemos verificar algumas características das principais misturas e gases. [4][6]

Tabela 2. 5 - Características dos gases e suas misturas. [Adaptado da referência] [4]

Gás	Desempenho
Ar - CO ₂	75% Ar – 25% CO ₂ é mistura mais comum. Baixo nível de respingos. Boa penetração, arco largo e pouca distorção.
Ar - O ₂ (1-5% O ₂)	O ₂ altera a tensão superficial do metal fundido facilitando transferência por spray. Boa penetração. Alta taxa de deposição (devido aos maiores níveis de corrente utilizados) e alta velocidade de soldagem.
CO ₂	Rápida velocidade de soldagem. Respingos excessivos. Requer arame com desoxidante. Bom para transferência por circuito.

2.2.4 MODO DE TRANSFERÊNCIA

Existem basicamente 4 tipos de transferência metálica: globular, curto-circuito, pulsado e spray.

Os principais fatores que influenciam no modo de transferência são: [6][8]

- Intensidade e tipo de corrente;
- Tensão do arco elétrico;
- Densidade da corrente;
- Extensão livre do eletrodo;
- Gás de proteção;
- Característica da fonte de energia.

2.2.4.1 TRANSFERÊNCIA METÁLICA GLOBULAR

A transferência globular é conhecida por apresentar gotas de metal de solda próximas ou maior do que o diâmetro do arame que viaja através da abertura de arco sob a influência da gravidade e pelo tamanho da gota ser grande há dificuldade em se soldar fora de posição por esse tipo de transferência metálica. A Figura 2.6, mostra a transferência globular durante a soldagem MAG de aço carbono com uma corrente de 180A e com uma mistura de gases inerte e ativo (Ar-2%+O₂).

A transferência globular, muitas vezes não é suave e produz alguns respingos. Na soldagem com corrente baixa a transferência globular, ocorre independentemente do tipo de proteção gasosa. Com CO₂ e He, no entanto, ocorre em todas as correntes de soldagem utilizáveis. E este tipo de transferência tem algumas limitações como falta de penetração, falta de fusão e/ou reforço do cordão de solda excessivo. [8][13]

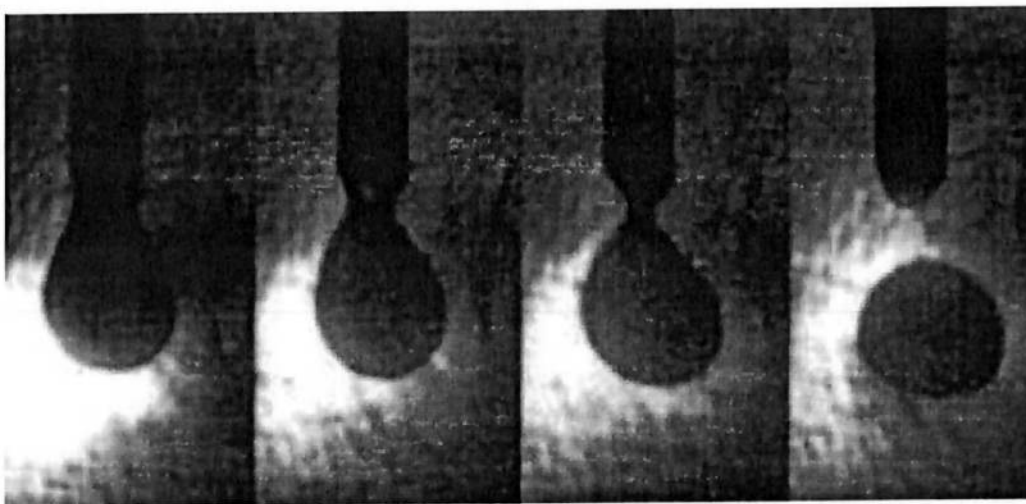


FIGURA 2. 6 - Modo de transferência metálica globular [13].

2.2.4.2 TRANSFERÊNCIA METÁLICA POR CURTO-CIRCUITO

A transferência por curto-circuito é mais utilizada na soldagem MIG/MAG, propicia um pequeno comprimento de arco (menores valores de tensão de soldagem). O curto-circuito ocorre quando o eletrodo toca a poça de fusão e isso acontece periodicamente (cerca de 20 a 200 vezes por segundo). Durante este, a corrente de soldagem eleva-se rapidamente causando um aquecimento forte do eletrodo por efeito Joule, a sua fusão e a transferência de metal para a poça de fusão ocorre com a ruptura de uma parte do eletrodo e a reabertura do arco elétrico. Esta forma de operação é muito usada industrialmente para a soldagem de aços carbono com arames de menor bitola (0,6 a 1,2 mm), com proteção de CO₂ e correntes relativamente baixas, para a soldagem de juntas de pequena espessura e, frequentemente, fora de posição. [1][8]

A transferência por curto-circuito é relativamente instável, com a geração de uma elevada quantidade de respingos, particularmente ao final de cada curto-circuito. Existe, contudo, em geral, uma condição de menor instabilidade que ocorre quando a frequência de transferência (ou de curtos-circuitos) é máxima. Esta condição pode ser obtida, com base no ruído emitido pelo processo, variando, em geral, a tensão de soldagem. Um outro fator importante para a estabilidade do processo na transferência por curto-circuito é a taxa de crescimento (A/s) da corrente durante esse modo de transferência. Se a corrente aumenta de uma forma excessivamente rápida, o corte do arame ao final de um curto tende a ser explosivo e forma uma grande quantidade de respingos. Se a corrente elevar-se muito devagar, o rompimento do eletrodo não pode ocorrer e o processo de soldagem se interrompe. [4][13]

2.2.4.3 TRANSFERÊNCIA METÁLICA POR SPRAY

A transferência spray ou pulverização ocorre na soldagem com proteção gasosa mista rica em argônio e com correntes suficientemente elevadas para que a força de origem magnética passe a controlar o processo de transferência. Esta forma de transferência tende a ser extremamente estável (desde que o arco seja suficientemente longo para prevenir a ocorrência de curto-circuito) e não depende da força da gravidade.

A necessidade de uma corrente elevada, contudo, restringe o seu uso para a soldagem de juntas de maior espessura e para a soldagem na posição plana (a poça de fusão tende a ter um volume e fluidez que dificultam o seu controle fora da posição plana). [8][11][13]

A Figura 2.7 mostra esse tipo de transferência.

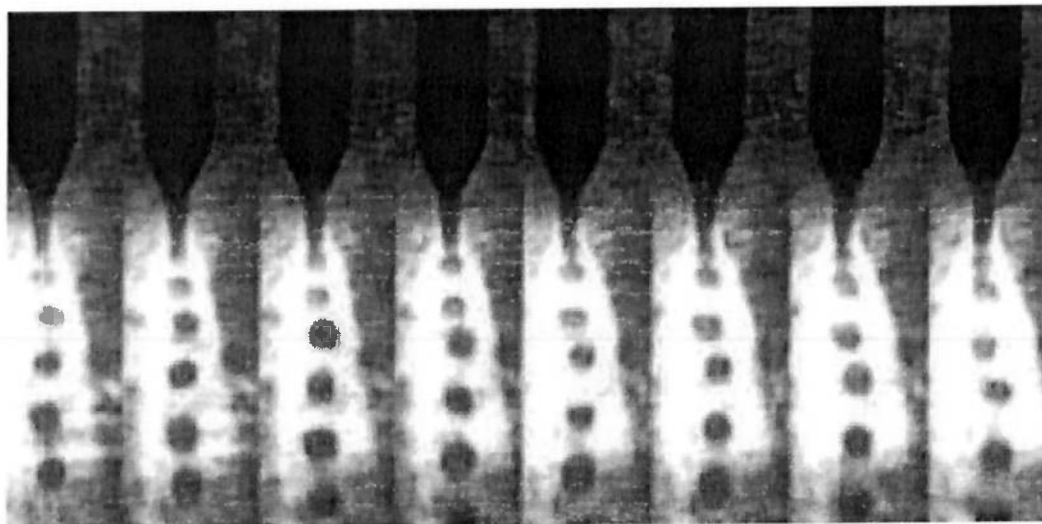


FIGURA 2. 7 - Transferência por Spray (pulverização) [11]

2.2.4.4 TRANSFERÊNCIA METÁLICA POR PROJEÇÃO (ARCO PULSADO)

Nesse modo de transferência a corrente varia de um nível elevado de corrente (corrente de pico) para um nível baixo de corrente (corrente de base).

O valor e a duração da corrente de pico são selecionados de forma a causar a transferência spray, enquanto que a passagem pela corrente de base permite a obtenção de um valor médio de corrente relativamente baixo. Desta forma, com a utilização de um equipamento mais sofisticado, pode-se soldar com a transferência spray (e com as suas vantagens) com um valor de corrente que permita a soldagem de juntas com menor espessura (diferentemente do modo spray convencional) e, também, fora da posição plana. Além disto, a corrente média é bem menor que o apresentado no modo de transferência por spray como também a quantidade de calor aplicada na poça de fusão é menor.

Em relação aos equipamentos, possuem um tempo de resposta muito mais rápido do que os convencionais, e permitem a mudança controlada da corrente de soldagem durante o ciclo do curto-circuito. Isto permitiu o desenvolvimento de equipamentos de soldagem que operam com transferência por curto-circuito com uma maior estabilidade e uma menor formação de salpicos. [8][11][13]

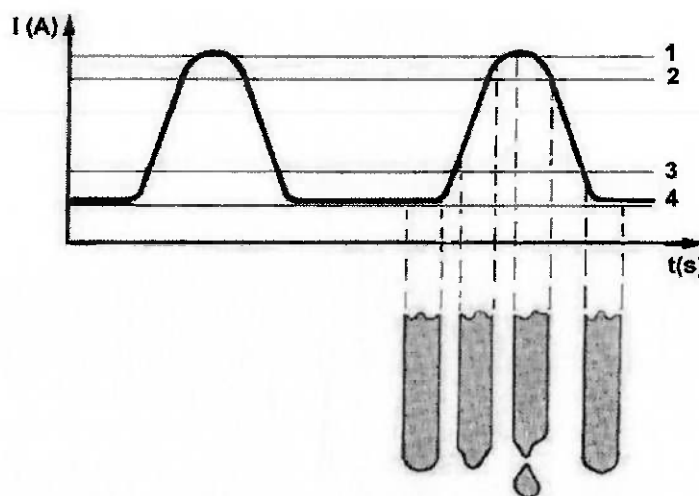


FIGURA 2. 8 – Princípio do arco pulsado. 1-Corrente de pico. 2-Corrente de transição. 3-Corrente média. 4-Corrente de Base [12]

2.2.4.5 TRANSFERÊNCIA METÁLICA POR CURTO CIRCUITO CONTROLADO

A soldagem MIG/MAG convencional por curto-circuito apesar de apresentar características de soldagem e controle básico satisfatório, possui desvantagem quando analisamos o seu controle na corrente de soldagem o que gera entre outros problemas o descontrole nas emissões de respingos comuns no processo.

Porém, antes de apresentar as características desse modo de transferência é necessário mostrar algumas características de um controle conhecido como "indutância" que permite o ajuste das características dinâmicas da fonte de soldagem, em especial, a velocidade de variação da corrente como resultado de variações no comprimento de arco ou da passagem de um curto circuito entre o arame-eletrodo e o tubo. [14]

Este controle é particularmente relevante quando se trabalha com o modo de transferência por curto circuito, controlando a variação da corrente quando o arame toca a peça e evitando que esta aumente de forma explosiva (baixa indutância), o que aumentaria a instabilidade de processo, ou de forma muito lenta (indutância elevada), o que poderia levar à solidificação da poça de fusão e o salpicos excessivos entre outras desvantagens. [15]

Logo, tornou-se necessário estudos para obter-se uma regulagem perfeita da velocidade de alimentação, do comprimento do arco e da indutância que para um determinado tipo de gás de proteção e arame-eletrodo, pode resultar em uma soldagem praticamente isenta de respingos e um bom controle de soldagem. Contudo, essa regulagem perfeita é muito dependente de ajustes

finos e qualquer pequena variação pode resultar em um resultado não satisfatório. [14][15]

Com o crescimento da necessidade de processos que demonstrassem maior produtividade, repetitividade e menor aporte térmico para que assim as propriedades mecânicas e metalúrgicas fossem mantidas a indústria de pipe-shop está investindo no processo MIG/MAG por curto-circuito controlado.

Nesses equipamentos a corrente tende a ser um parâmetro controlável e regulado em tempo real durante o processo. E esse maior controle é o que favorece na diminuição dos respingos e na possibilidade de soldagem na raiz. [14][15]

O fundamento desse processo está no equilíbrio entre duas características comuns no modo de transferência metálica por curto-circuito: a tensão superficial e as forças eletromagnéticas. A instabilidade do modo convencional acontece justamente no momento da transferência metálica, início e no fim do curto-circuito. [14]

A empresa pioneira foi a Lincoln Electric que patenteou o processo Surface Tension Transfer (STT) em 1988, porém existem outras empresas que possuem variações desse métodos também como Regulated Metal Deposition (RMD) da Miller /EUA, Cold Metal Transferer (CMD) da Fronius /Austria, Fastroot da Kemppi/Finlândia e Curto-Circuito Controlado (CCC) da IMC/Brasil. [16].

O processo STT será que o descrito, por ser o escolhido para esse trabalho.

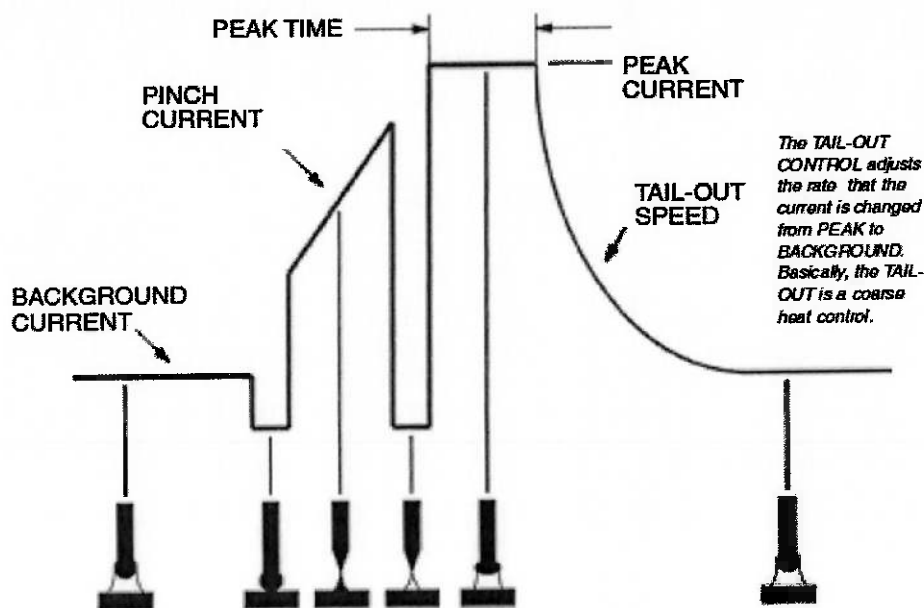


FIGURA 2. 9 – Forma da onda da corrente utilizada no processo STT[16]

No STT buscou-se aliar o controle da corrente do TIG com as principais características do MIG/MAG que é elevada taxas de deposições, baixa energia de soldagem e de velocidades de soldagem elevadas. Além disso, procurava-se ter poucos respingos durante a soldagem, reduzir os fumos e também se ter um modo de transferência que tivesse com um maior controle sobre a corrente sem a necessidade de alteração da velocidade de arame.

Para isso foi preciso controlar a forma da onda, a fim de se evitar respingos que são formados no início e termino do curto-circuito (MIG/MAG convencional). Para isso, a corrente é controlada pela tensão e entre os curtos-circuitos (centenas de vezes por segundo). A corrente, denominada corrente de base, é mantida a níveis significativamente baixos, suficiente para manter a gota liquida de metal de deposição na ponta do arame-eletrodo e o aquecimento do metal de base. Essa corrente não excede a 70A. E instantaneamente após o início do controle do

circuito detecta a queda de tensão, a corrente de base é diminuída, reduzindo assim o nível de repulsão da gota evitando assim os respingos de metal, característico do processo convencional. [16]

E esse nível de corrente (t_3) é mantido por alguns milissegundos até a aplicação da corrente de curto-circuito. O que acontece posteriormente é conhecido como Efeito de Piçamento. [16]

Após esse período a corrente de curto-circuito é reduzida novamente a níveis abaixo da corrente de base na ordem de 35A, o que acarreta na transferência metálica de forma suave, diminuindo os respingos durante a soldagem. Durante essa fase, como mostrado na figura 2.10, que durante a baixa corrente a tensão aumenta (fase t_4 e t_5) e há reabertura de arco. Após essa é aplicada uma alta, mas controlada, corrente (t_5), a ponta do arame-eletrodo funde-se na poça de fusão e uma nova gota é rapidamente formada e recomeça o ciclo. [16]

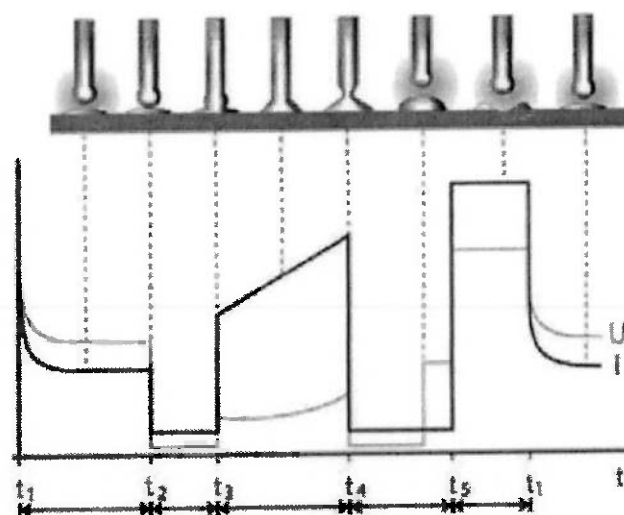


FIGURA 2. 10 – Forma da onda da corrente no processo STT. [17]

2.3 SOLDAGEM GTAW

2.3.1 INTRODUÇÃO A SOLDAGEM TIG

A soldagem GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) é conhecida também como TIG (Tungsten Inerte Gás) e é um processo a arco com eletrodo de tungstênio e proteção gasosa, que pode ser tanto um processo manual como mecanizado. [4][9]

A soldagem TIG consiste na união de peças metálicas onde o arco elétrico é estabelecido entre o eletrodo de tungstênio (não consumível) e a peça a ser soldada. Pode ser adicionado ou não o metal de adição. O processo surgiu, pois havia uma necessidade de maior eficiência nos processos para soldagem de materiais mais difíceis como o alumínio e magnésio, principalmente na indústria aeroespacial e naval. [1][4]

2.3.2 CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO TIG

Esse processo possui algumas características importantes, como por exemplo, o excelente controle de energia transferida para a peça. Em virtude, principalmente, de fontes de energia mais modernas com maior independência em seu controle e da adição de material ser feita de forma que o soldador/operador tenha maior controle do enchimento da junta a ser soldada (quando é usado metal de adição). [1][4]

Como foi citado acima, a possibilidade da solda ser autógena facilita a soldagem em espessuras finas e como não existem reações de metal-gás e

metal-escória, os fumos gerados são inferiores aos encontrados em outros processos como o MIG/MAG.

Em relação ao custo do equipamento e dos consumíveis pode-se dizer que é alto se comparado, por exemplo ao Eletrodo Revestido, por isso deve se analisar o resultado que se deseja obter antes da execução desse processo. [2][4]

Possui uma taxa de deposição baixa quando compara-se aos principais processos, porém pode ser soldado em todas as posições. [4][8]

Na figura 2.11 abaixo podemos observar o esquema básico da soldagem TIG.

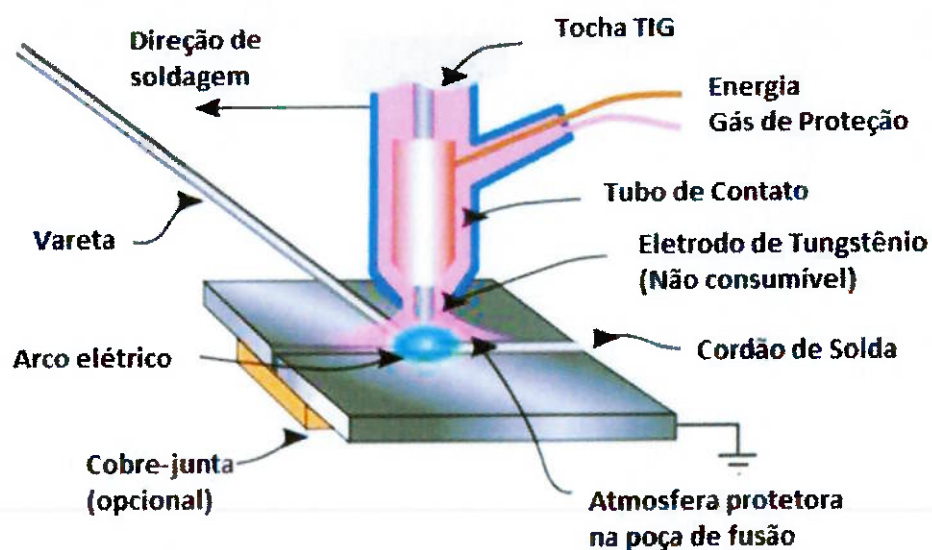


FIGURA 2. 11 - Processo de soldagem TIG [Adaptado da referência] [1]

2.3.3 EQUIPAMENTOS

Os equipamentos básicos para a soldagem TIG consistem em [4][8]:

- Fonte de energia – Corrente constante e pode ser tanto um gerador, retificador ou ainda um transformador, dependendo do tipo de aplicação.
- Unidade de alta frequência – Para soldagem de alguns tipos de materiais, como por exemplo, o Alumínio é necessário que a soldagem seja em corrente alternada e para isso há a necessidade de uma unidade de alta frequência devendo-se ter intensidade regulável e controle de pré e pós-vazão do gás inerte (gás de proteção), quando este não estiver incluído na própria fonte.
- Sistemas de refrigeração – Tanto a tocha quanto a fonte podem ser refrigeradas a água e nesse caso é normal que esta seja recirculada em um sistema fechado.
- Tocha de soldagem – possuem internamente uma pinça, que serve para segurar o eletrodo de tungstênio e gerar o contato elétrico. Ainda há os bocais para o direcionamento do fluxo de gás, que podem ser cerâmicos ou metálicos. [4]

Conforme figura 2.12 abaixo:

Processo de Soldagem TIG

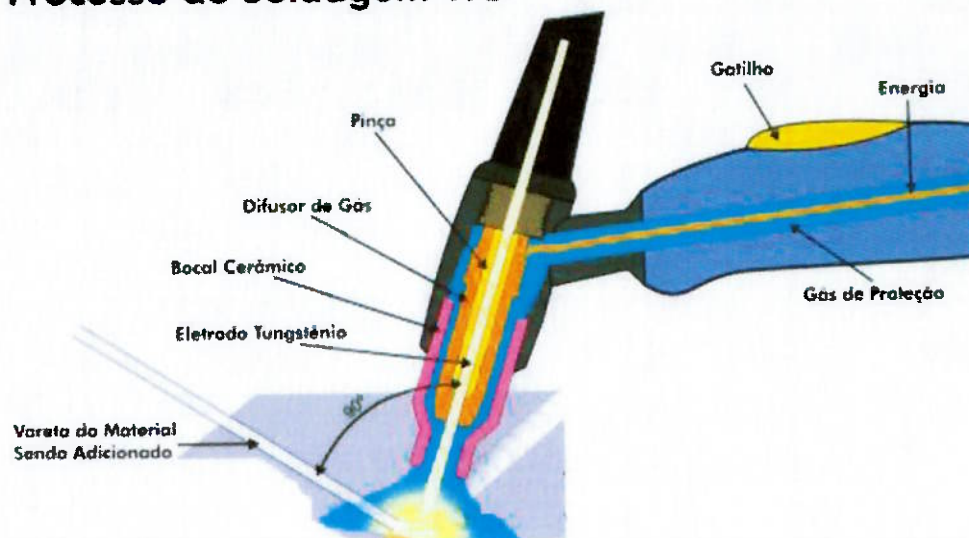


FIGURA 2. 12 - Tocha de soldagem [4]

- Gás de proteção – O processo TIG tem a limitação de apenas utilizar gases inertes. Os gases mais comuns são Argônio e Hélio ou misturas destes. O reservatório pode ser tanto cilindros como tanques.

2.3.4 CONSUMÍVEIS

Gás de proteção e o metal de adição são os consumíveis utilizados na soldagem TIG. O eletrodo de tungstênio como foi mencionado anteriormente não é consumível, porém se desgasta e por isso deve ser recondicionado ou substituído frequentemente e será descrito nesse tópico. [4][8]

2.3.4.1 METAL DE ADIÇÃO

O metal de adição é fornecido em forma de varetas com um comprimento em torno de 1,0 m. Na soldagem mecanizada, o metal de adição é fornecido em forma de fio que se assemelha muito ao arame no processo

MIG/MAG, ou seja, em forma de bobina. Os diâmetros dos fios ou das varetas variam de 0,5 a 5mm. [4][18]

Existe no mercado uma diversidade grande de metais de adição. Para que se possa fazer a melhor escolha é preciso levar em conta o que se deseja obter no metal de solda, ou seja, composição química e as propriedades mecânicas desejadas. Os metais de adição são classificados de acordo com sua composição química e com suas propriedades mecânicas. A tabela 2.6 apresenta as principais especificações AWS para a soldagem TIG. [4][18]

TABELA 2. 6 – Especificações AWS para metais de adição adequados à soldagem TIG [4]

ESPECIFICAÇÃO	TIPO DE METAL DE ADIÇÃO
AWS A 5.7	Arames e varetas para a soldagem de cobre
AWS A 5.9	Arames e varetas para a soldagem de aços inoxidáveis
AWS A 5.10	Arames e varetas para a soldagem de alumínio
AWS A 5.14	Arames e varetas para a soldagem de níquel
AWS A 5.15	Arames e varetas para a soldagem de ferro fundido
AWS A 5.16	Arames e varetas para a soldagem de titânio
AWS A 5.18	Arames e varetas para a soldagem de aço carbono
AWS A 5.19	Arames e varetas para a soldagem de magnésio
AWS A 5.21	Arames e varetas para revestimentos
AWS A 5.22	Arames e varetas tubulares para a soldagem de aços inoxidáveis
AWS A 5.24	Arames e varetas para a soldagem de zircônio
AWS A 5.28	Arames e varetas para a soldagem de aços de baixa liga

2.3.4.2 ELETRODO DE TUNGSTÊNIO

Os eletrodos mais usados na soldagem TIG são varetas sinterizadas que têm na sua composição química o tungstênio puro ou com adição de óxido de cério, tório ou zircônio e sua função é conduzir a corrente elétrica até o arco

elétrico. Os eletrodos mais usados para a soldagem em corrente alternada são os de tungstênio puro além de seu custo é menor. Já os eletrodos de óxidos apresentam melhores desempenhos no que diz respeito a estabilidade do arco e durabilidade. [1][8][27]

A tabela 2.7, apresenta a composição química dos principais eletrodos de tungstênio. A seleção do tipo de eletrodo usado varia conforme a escolha do material a ser soldado, da espessura da peça e do tipo e valor da corrente de soldagem a ser usada. [4]

Tabela 2. 7 - Composição química de eletrodos de tungstênio (AWS A 5.12)

Classificação AWS	Composição química (%peso)					
	Tungstênio (min)	CeO ₂	La ₂ O ₃	ThO ₂	ZrO ₂	Outros* (Max)
EWP	99,5	-	-	-	-	0,5
EWCe-2	97,3	1,8 a 2,2	-	-	-	0,5
EWL a-1	98,3	-	0,8 a 1,2	-	-	0,5
EWL a-1,5	97,8	-	1,3 a 1,7	-	-	0,5
EWL a-2	97,3	-	1,8 a 2,2	-	-	0,5
EWTh-1	98,3	-	-	0,8 a 1,2	-	0,5
EWTh-2	97,3	-	-	1,7 a 2,2	-	0,5
EWZr-1	99,1	-	-	-	0,15 a 0,4	0,5
EWG	94,5	#	#	#	#	#

* - Outros óxidos ou elementos

- Valor não especificado

2.3.4.3 GÁS DE PROTEÇÃO

Nesse processo a escolha do melhor gás de proteção é fundamental para que assim se obtenha melhores propriedades físico-mecânicas no metal de solda.

Na Tabela 2.8 abaixo, podemos observar algumas diferenças quando usamos determinado tipo de gás. [8]

TABELA 2. 8 – Características dos gases de proteção mais utilizados no processo TIG [Adaptado da referência] [8]

Soldagem com Argônio	Soldagem com Hélio
Melhora a estabilidade do arco	Maior consumo, já que o gás é mais leve que o ar
Menor consumo	Maiores tensões de soldagem e energias de soldagem para uma mesma corrente e comprimento de arco
Menores tensões de arco	Maior penetração no cordão de solda
Menor custo	Custo mais elevado
Maior facilidade na abertura de arco	Possibilidade de maior velocidade de soldagem
Melhor efeito de limpeza dos óxidos na soldagem	Vazão de proteção de 2 a 3 vezes maior que a do argônio
Vazão de proteção pequena	
Maior resistência à corrente de ar lateral	
Baixa tensão de arco	

2.4 CUSTO DE SOLDAGEM

2.4.1 PRINCIPAIS DIFERENÇAS ENTRE O PROCESSO TIG E MIG

As principais diferenças serão apresentadas na Tabela 2.9 a seguir:

TABELA 2. 9 – Principais diferenças dos processos MIG e TIG [19]

Processo de soldagem	Características			
	Taxa de deposição (kg/h)	Posição	Custo do equipamento ⁽¹⁾	Habilidade do soldador ⁽²⁾
TIG	0,2-1,5	Todas ⁽³⁾	1,5-10	M-G
MIG	1,0-15,0	todas ⁽⁴⁾	5-10	P

Legenda: (1) Custo relativo ao equipamento de soldagem com eletrodo revestido; (2) P = pouca; M = moderada; G = grande; (3) depende do tipo de revestimento e do diâmetro do eletrodo; (4) depende do tipo de transferência metálica utilizado.

O processo MIG/MAG tem uma maior velocidade de soldagem que o processo TIG. O processo de soldagem TIG é o que apresenta melhor qualidade da junta soldada. O soldador tem que ter uma habilidade no mínimo moderada. A diferença entre os tempos de produção é bastante grande, mas os equipamentos para soldagem TIG são mais caro que o do processo MIG. [19]

2.5 AÇOS INOXIDÁVEIS

2.5.1 HISTÓRIA DOS AÇOS INOXIDÁVEIS

A resistência à corrosão do ferro-cromo foi reconhecida pela primeira vez em 1821 pelo francês Pierre Berthier metalúrgico, que notou sua resistência contra o ataque de alguns ácidos e sugeriu seu uso em talheres. [20]

Nos finais de 1890 Hans Goldschmidt da Alemanha desenvolveu um processo aluminotermia que consiste basicamente na redução dos óxidos metálicos a partir do alumínio para a obtenção de metais diversos. Entre 1904 e 1911 vários pesquisadores, particularmente da França Leon Guillet, produziram ligas que hoje seriam consideradas aços inoxidáveis. [20]

Em 17 de outubro de 1912, os engenheiros da Krupp Benno Strauss e Eduard Maurer patentearam o aço inoxidável como ThyssenKrupp Nirosta. [20] Desenvolvimentos semelhantes estavam ocorrendo simultaneamente nos Estados Unidos, onde Christian Dantsizen e Frederick Becket estavam industrializando o aço inoxidável ferrítico. Em 1912, Elwood Haynes fez um pedido de patente nos EUA em uma liga de aço inoxidável martensítico, que não foi concedida até 1919. [21]

Também em 1912, Harry Brearley do laboratório de pesquisa de Brown-Firth em Sheffield, Inglaterra, buscando uma liga resistente à corrosão de canos, descobriu e posteriormente industrializou uma liga de aço inoxidável martensítico. Em 1929, antes da Grande Depressão, mais de 25.000 toneladas de aço inoxidável foram fabricadas e vendidas em os EUA. [21]

2.5.2 TIPOS E CARACTERÍSTICAS DOS AÇOS INOXIDÁVEIS

O termo aço inoxidável é utilizado para um determinado conjunto de ligas ferrosas que têm as seguintes características principais: [23]

- Resistência à corrosão em meios aquosos na presença de inúmeros agentes orgânicos e minerais agressivos;
- Resistência à corrosão à elevadas temperaturas;
- Resistência mecânica elevada;
- Facilidade de limpeza/baixa rugosidade superficial;
- Aparência higiênica;
- Material inerte;
- Facilidade de conformação;
- Acabamentos superficiais e formas variadas;
- Forte apelo visual;
- Baixo custo de manutenção
- Material reciclável.

Não existe um consenso entre os autores, mas para um aço ser considerado "inoxidável", ele deve apresentar teores entre 10 -13% de Cromo em sua composição. [24][25]

Os mais comuns tipos de aços inoxidáveis encontrados são: os austeníticos, os ferríticos, martensíticos. Porém, ainda existem outros conhecidos e cada vez mais utilizados como os duplex, super-duplex, os endurecidos por precipitação. [24]

Os processos obtidos ao longo dos anos com novas descobertas sobre os aços inoxidáveis permitiram que fossem desenvolvidos com diferentes composições químicas, microestruturas e propriedades químicas e mecânicas. Atualmente, os aços inoxidáveis mais comumente utilizados no mundo são os austeníticos, formados principalmente por Fe, Cr e Ni e cuja estrutura é basicamente austenita. [24][27]

Os aços inoxidáveis são ligas ferrosas que contém cromo, comumente, níquel e, em vários casos, outros elementos de liga. O cromo é o principal elemento nos aços inoxidáveis, isto porque esse elemento ao contato com o ar atmosférico ou outro meio oxidante forma uma camada de óxido de cromo na superfície destas ligas. E essa camada de óxido que torna os aços inoxidáveis mais resistentes à corrosão que os aços não inoxidáveis. [24][25]

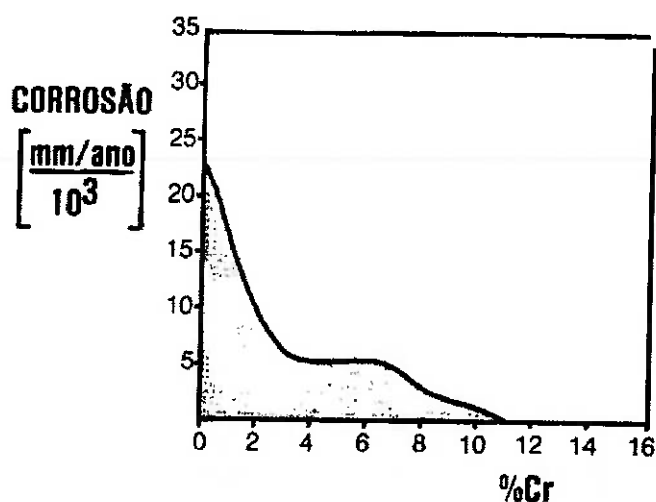


FIGURA 2. 13 - Efeito do teor de cromo na resistência a corrosão atmosférica de ligas Fe-Cr [28]

2.5.3 AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS

Os aços inoxidáveis apresentam uma boa resistência à corrosão, porém, em alguns casos outras características além da resistência à corrosão são necessárias, para a utilização dos mesmos em determinadas aplicações; acrescentam-se outros elementos nos aços inoxidáveis para que assim a liga adquira as características que procuramos.

Uma grande melhoria em muitas propriedades é conseguida com a introdução de Ni como elemento de liga. Consegue-se uma mudança na estrutura, transformando ligas ferríticas em ligas austeníticas (estrutura de alta resistência e tenacidade). Os aços inoxidáveis austeníticos são conhecidos pela sua excelente resistência à corrosão em muitos meios agressivos. Outros elementos como molibdênio, titânio e nióbio, se adicionados podem melhorar a resistência a corrosão e minimizar a corrosão intergranular por estabilização dos carbonetos presentes. Dos três grupos, estes aços são os que apresentam maior resistência à corrosão. [24]

Eles combinam baixo limite de escoamento com alta resistência à tração e bom alongamento, oferecendo as melhores propriedades para trabalho à frio.

Não podem ser endurecido por tratamento térmico, mas suas resistência a tração e dureza podem ser aumentadas por encruamento. Não são ferromagnéticos. Eles possuem uma ampla faixa de propriedades mecânicas, oferecendo boa ductilidade e resistência a altas e/ou baixíssimas temperaturas, além de boa trabalhabilidade e soldabilidade. [25]

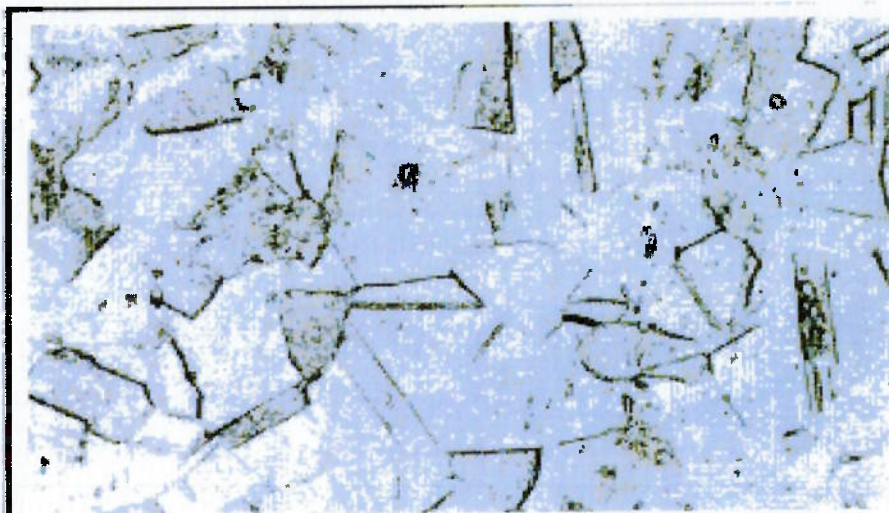


FIGURA 2.14 – Estrutura austenítica [28]

2.5.4 AÇOS INOXIDÁVEIS FERRÍTICOS

Os aços inoxidáveis ferríticos são estruturalmente simples, ou seja, à temperatura ambiente, eles apresentam uma estrutura ferrítica. [24]

Podem conter teores de Cr variando entre 12 a 30% são conhecidos como aços inoxidáveis ferríticos. Uma das muitas características desses aços é que não podem ser endurecidos por tratamento térmico por não poder serem completamente austenitizados e são basicamente usados nas condições de recozido. [24]

São ferromagnéticos ao contrário dos aços inoxidáveis austeníticos, além de apresentarem um baixo coeficiente de expansão térmica.

Possuem uma maior soldabilidade e maior resistência à corrosão que os aços martensíticos devido ao maior teor de cromo. As aplicações principais são aquelas que exigem boa resistência à corrosão, ótima aparência superficial e requisitos mecânicos moderados. Como por exemplo, na fabricação de eletrodomésticos, cubas, utensílios de cozinha, em aplicações de temperaturas

elevadas, etc. Apresentam, tendência ao crescimento de grão após soldagem, particularmente para seções de grande espessura, experimentando certas formas de fragilidade. [24]

2.5.5 AÇOS INOXIDÁVEIS MARTENSÍTICOS

São predominantemente ligas Fe-Cr-C que contêm entre 12% e 18%, aproximadamente de cromo e entre 0,1 e 0,5 % de carbono e que podem ser austenitizados se forem aquecidos a uma temperatura adequada. Estes aços, após resfriamento rápido de alta temperatura, mostram uma estrutura caracterizando alta dureza e fragilidade, denominada Martensítica. [24][25]

São dificilmente atacados pela corrosão atmosférica no estado temperado e se destacam pela dureza. São ferromagnéticos. Apresentam trabalhabilidade inferior as demais classes e soldabilidade pior, especialmente com carbono mais elevado, devido a formação de martensita no resfriamento. [16][25]

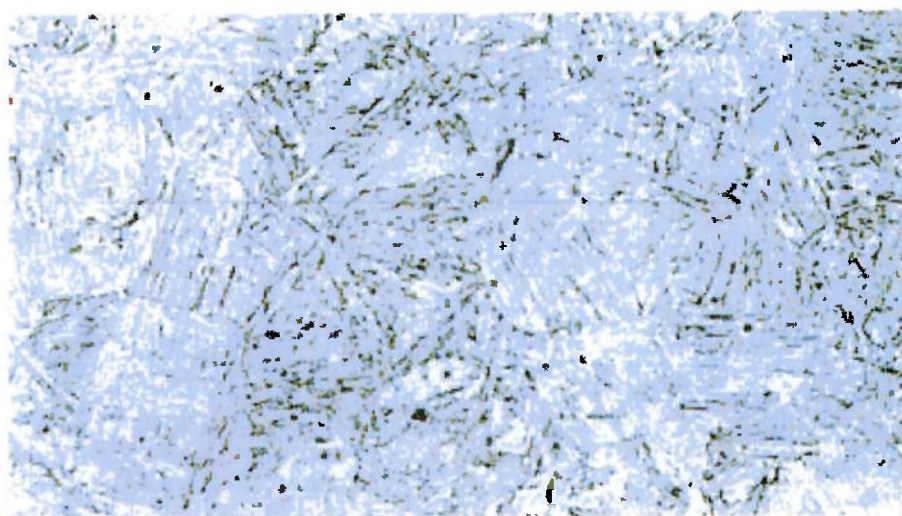


FIGURA 2.15 - Aço Inoxidável ABNT 420 [16]

2.6 AÇO CARBONO

O carbono (do latim *carbo*, carvão) é simbolizado por C, dependendo das condições de formação pode ser encontrado na natureza de diversas formas alotrópicas: carbono amorfo e cristalino, em forma de grafite ou ainda diamante. [30]

Podemos caracterizar o aço como sendo uma liga metálica formada principalmente por ferro e carbono, com percentagens deste último variando entre 0,008 e 2,10%. [30]

É distinto do ferro fundido, apesar de ser uma liga de ferro e carbono também, porém com um maior teor de carbono entre 2,11% e 6,69%. [30]

Aço carbono é a composição da liga que confere ao aço o seu nível de resistência mecânica. Esse teor elevado de carbono na liga faz com que seja altamente frágil ao contrário do aço carbono que é dúctil e facilmente deformável por forja, laminação e extrusão. [30]

As propriedades de uma liga metálica são em função da respectiva composição química e do processamento a que a mesma foi sujeita, ou seja, da sua história térmica e mecânica; estes fatores (composição e história termomecânica) impõem uma dada microestrutura ao material, a qual será responsável pelas propriedades finais do mesmo. [30]

A composição química define as potencialidades da liga: por exemplo, um aço de baixo carbono é presumivelmente dúctil; porém ele pode ser fragilizado por um tratamento térmico que lhe imponha um grão grosseiro.

A quantidade de Carbono define sua classificação: o baixo carbono possui em média, no máximo 0,30% do elemento; o médio carbono apresenta de 0,30 a 0,60% e o alto carbono possui de 0,60 a 2,10%. [30]

2.6.1 DIAGRAMA DE FASES OU EQUILIBIO

Os diagramas de fase ou diagramas de equilíbrio como também são denominados têm como finalidade mostrar mudanças de estado físico e de estrutura que sofrem as ligas metálicas, em decorrência de aquecimentos ou resfriamentos lentos.

O diagrama de fases Ferro-Carbono é obviamente o diagrama mais estudado entre todas as ligas metálicas presentes na atualidade, fato explicado já que os aços carbono, além de serem os materiais metálicos mais comumente utilizados pelo homem, apresentam as mais variadas transformações no estado sólido.

O estudo do diagrama de fases permite-nos compreender porque variações do teor de carbono nos aços resultam na obtenção de diferentes propriedades, e dessa maneira, possibilitam a fabricação de aços de acordo com propriedades desejadas. [31]

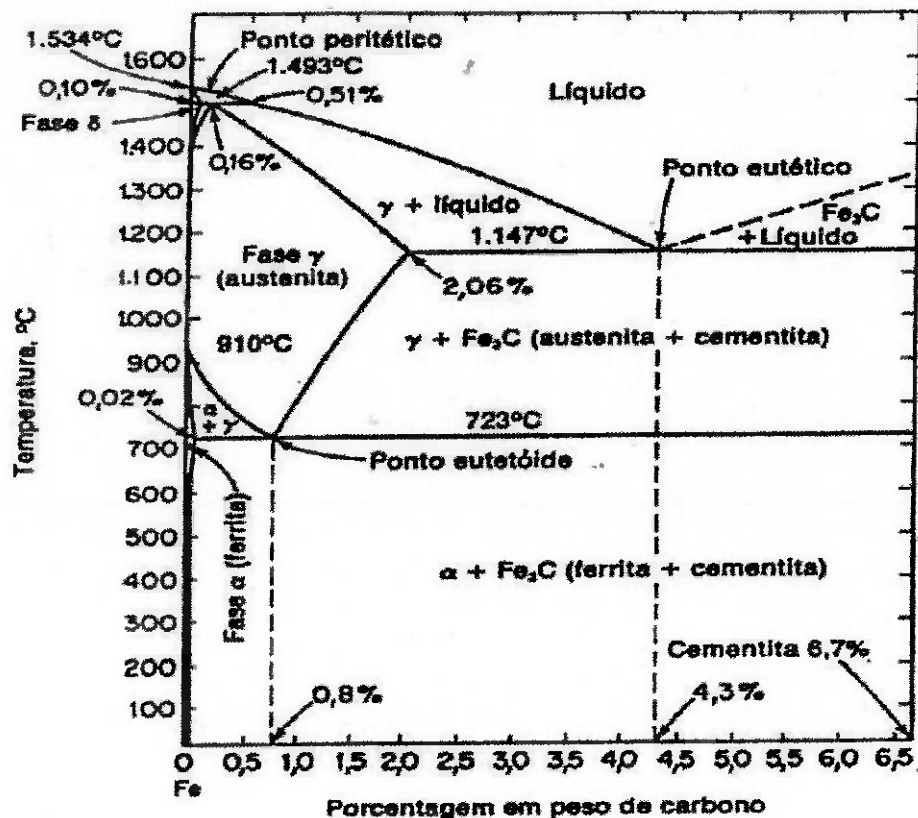


FIGURA 2.16– Diagrama de fases (Fe-C) [31]

O diagrama Fe-C mostrado acima, não é um diagrama completo, já que são apresentadas apenas concentrações de carbono inferiores a 6,67%, percentagem de carbono da cementita (Fe₃C). Do diagrama podemos destacar [31]:

- Área ferrítica (fase α) – Campo correspondente à solução sólida de carbono no ferro α , nesse campo a estrutura atômica é cúbica de corpo centrado.
- Área austenítica (fase γ) – Campo correspondente à solução sólida de carbono no ferro γ , nesse campo a estrutura atômica é cúbica de face

centrada. Essa fase tem solubilidade máxima de carbono de 2,06% à 1147°C.

- Cementita (Fe_3C) – Microconstituente composto de ferro e carbono. Esse carboneto apresenta elevada dureza, estrutura atômica ortorrômbica e 6,7% de carbono.
- Ponto eutetóide – Ponto correspondente à composição de carbono de 0,8%. Ligas dessa composição, elevadas até o campo austenítico (fase γ) e em seguida resfriadas lentamente, sofrem a reação eutetóide, reação onde a austenita transforma-se em perlita, microestrutura constituída de lamelas de cementita (Fe_3C) envoltas em uma matriz ferrítica (fase α).
- Ponto eutético – Ponto correspondente à composição de carbono de 4,3%. Trata-se do ponto de mais baixa temperatura de fusão ou solidificação, 1147°C. Ligas dessa composição são denominadas ligas eutéticas.

O diagrama pode ser dividido em duas faixas de porcentagem de carbono, a faixa correspondente aos aços, de 0,008% até 2,11% de C, e a faixa correspondente aos ferros fundidos, com porcentagens de carbono acima de 2,11%. Os aços com porcentagem de carbono acima de 0,8% (composição eutetóide) são denominados aços hipereutetóides, enquanto que os aços com porcentagem de carbono inferior a 0,8% são denominados aços hipoeutetóides. Analogamente, os ferros fundidos com porcentagem de carbono acima de 4,3% (composição eutética) são denominados ferros fundidos hipereutéticos, e os

ferros fundidos com porcentagem de carbono inferior a 4,3% são denominados ferros fundidos hipoeutéticos. [31]

Deve-se ressaltar que o diagrama Fe-C é um diagrama dependente somente da temperatura e da porcentagem de carbono, e as transformações microestruturais que ocorrem sob aquecimento e resfriamento lentos são transformações de equilíbrio. [31]

2.6.1 CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS

É necessário, para uma correta caracterização de um aço, que a respectiva composição química seja conhecida; esta é identificada através de classificações ou códigos definidos por instituições internacionais. As mais relevantes são a American Iron and Steel Institute (AISI) e a DIN de origem alemã. [32]

2.6.1.1 SISTEMA AMERICANO (AISI / SAE)

O sistema de classificação da AISI é frequentemente adotado pela Society of Automotive Engineers (SAE), pelo que é referido abreviadamente por AISI-SAE; consiste num sistema numérico de quatro ou cinco algarismos, indicando os dois (ou três) últimos o teor em carbono do aço em centésimos; os dois primeiros indicam se o aço é ou não ligado e qual o tipo de liga. [32]

2.6.1.2 SISTEMA ALEMÃO (DIN)

A especificação DIN 17 006 estabelece o modo de abreviar as diferentes composições de aços. [32]

Os aços sem liga são designados pela letra C seguida do respectivo teor em carbono em centésimos.

Os aços ligados são classificados em fraca e fortemente ligados conforme não exista ou exista um elemento cujo teor seja pelo menos de 5%.

Os aços pouco ligados são designados pelo seu nível de teor em carbono em centésimos e pela descrição da natureza dos diferentes elementos de liga (pelo respectivo símbolo químico) e um ou mais números indicando o teor do (ou dos) elementos de liga, afetados por um fator multiplicador (4 ou 10) para que esse teor seja expresso por um número inteiro. [32]

Os aços fortemente ligados são designados pela letra X seguida do respectivo teor em carbono (em centésimos) e da descrição da natureza dos diferentes elementos de liga através do respectivo símbolo e seu teor nominal. [32]

3. OBJETIVOS.

Este trabalho tem como objetivo comparar dois processos de soldagem: MIG com transferência metálica tipo curto-circuito controlado e o processo TIG com a finalidade de facilitar a escolha de um processo de soldagem mais produtivo para a indústria de tubulação.

Pretende-se ainda determinar se o processo MIG pode ser substituído pelo processo TIG hoje usado para espessuras e diâmetros menores que 6" (478,54 mm), porém é um processo muito lento e de baixa produtividade.

4. MATERIAIS E MÉTODOS.

4.1 MATERIAL DE BASE

Foram utilizados 2 corpos de prova (CP) com 300 mm cada, para união de uma junta dissimilar de ASTM A 106 Gr.B com ASTM A312 Tp304L de 4" de diâmetro, com espessura de 6,02 mm cada.

4.2 GÁS DE PROTEÇÃO UTILIZADO

O gás de proteção utilizado no processo TIG foi o Argônio(Ar) com uma pureza de 99,9%. Já no processo MIG/MAG foi utilizado mistura de Dióxido de Carbono (CO₂) e Argônio (Ar) na porcentagem de 75%Ar25% CO₂.

Para o processo TIG foi utilizada uma vazão de 12 l/min para proteção da poça de fusão. Já para o processo MIG/Mag o teste foi realizado com uma vazão de utilizada uma vazão de 18 l/min.

Na purga tanto para o processo TIG como para o MIG/MAG foi utilizada uma vazão de 15 l/min onde foi aguardado por cerca de 10 minutos até que foi atingido no Oxímetro – aparelho que mede a quantidade de oxigênio durante a Purga – 85 ppm.

4.3 METAL DE ADIÇÃO

Foi utilizado como metal de adição no processo TIG a vareta ER 309L e no processo MIG foi usado o arame eletrodo nú ER 309L-Si (SFA 5.9). A escolha do metal de adição deu-se, a partir da consulta da tabela 4.1 a seguir:

Tabela 4. 1 - Seleção de consumíveis para a soldagem dos aços inoxidáveis, dissimilares ou não.

Combinação de metal de base	301, 302, 304, 308	304 L	310, 314 (a)	316	316 L	317	321, 347	405, 410, 420	430	446 (b)	Aços carbono	Aços carbono baixa liga ou Cr-Mo
301, 302, 304, 308	308	308	308	308	308	308	308	309	309	310	309	309
304L		308 L	308	308	308	308	309	309	309	310	309	309
310, 314 ^(a)			310	316	317	308	309	309	309	310	309	309
316				316	316	316	308	309	309	310	309	309
316L					316 L	316	316L	309	309	310	309	309
317						317	308	309	309	310	309	309
321, 347							347	309	309	310	309	309
405, 410, 420								410	430 _(c)	410 _(c)	410 _(c,d)	410 _(c)
430									430	430	430 _(c,d)	430 _(c)
446										446	430 _(c,d)	430 _(c)

Legenda: (a) Suscetível a trinca de solidificação; (b) consumível à base de níquel é mais adequado para aplicações em temperaturas elevadas, exceto na presença de enxofre; (c) no caso de ser aceito um depósito completamente austenítico, pode-se utilizar 309 ou 310; (d) consumíveis de aço carbono podem ser empregados, desde que a peça seja pré-aquecida e que haja um controle de hidrogênio(31).

Abaixo segue tabela 4.2 retirada da norma ASME II Parte C referente ao consumível SFA 5.9:

Tabela 4. 2 – Composição Química ER 309L-Si (ASME II Parte C – SFA 5.9)

Classificação AWS	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S	Cu
ER 309L-Si	0,03	23,0-25,0	12,0-14,0	0,75	1,0-2,5	0,65-1,0	0,03	...	0,75

4.4 METODOS

4.4.1 Construção do corpo de prova

Na montagem dos corpos de prova não se utilizou dispositivos de fixação apenas ponteamto dos tubos, conforme mostrado nas figuras abaixo:



FIGURA 4.1 – CP do processo Mig/Mag **FIGURA 4.2** - CP do processo TIG

Utilizou-se uma mesa giratória com dispositivo de controle de velocidade para que o soldador/operador tivesse controle total da velocidade de rotação dos CP's através de pedal. Conforme figura 4.3 abaixo:



FIGURA 4.3 – Mesa Giratória usada para a soldagem na posição 1G (girando) TIG.

Os CP's foram soldados na posição 1G Girando (*1G Rotated*), conforme figura 4.4, retirada da norma ASME IX :

QW-461.4 GROOVE WELDS IN PIPE — TEST POSITIONS

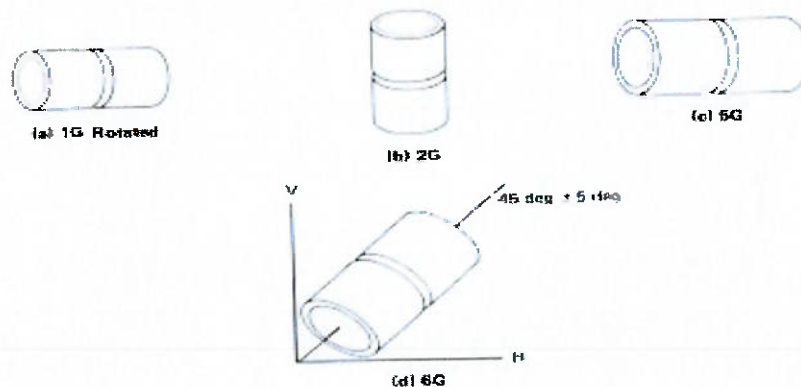


Figura 4.4 – Posição 1G Girando conforme ASME IX – Ed.2010

A máquina utilizada foi da Lincoln Electric Power Wave S350 para a soldagem no processo MIG/MAG com modo de transferência por corrente constante controlada para soldagem na raiz e para os demais passes o modo de transferência utilizado foi o pulsado.



FIGURA 4.5 – Máquina Mig/Mag STT



FIGURA 4.6 - Máquina Mig/Mag

STT

E para a soldagem TIG foi utilizada a máquina da Miller Maxstar 350 conforme figuras 4.7 e 4.8, abaixo:



FIGURA 4.7 e FIGURA 4.8 – Máquina Miller Maxstar 350 – Processo TIG

Os testes foram realizados na Empresa Montcalm com soldadores qualificados, conforme ASME IX Ed.2010, seguindo todos os requisitos para qualificação de procedimento.

Os CP's foram purgados com Argônio (99,9%) usando o Kit Purga, confeccionado pela equipe de engenharia da empresa Montcalm, conforme figura 4.9 abaixo:



FIGURA 4.9 – Kit purga de 4" de diâmetro - Mangueira do gás de purga e 2 vedações de esponja e silicone.

4.4.2 Parâmetros de Soldagem

O acompanhamento de soldagem foi realizado tanto para o processo MIG/MAG como para o processo TIG.

A Tabela 4. 3 mostra os principais parâmetros para cada processo:

Tabela 4. 3 – Principais Parâmetros dos testes

Processo de Soldagem	Gás Purga	Gás de Proteção	Corrente (A)	Tensão (V)	Temp. Interpasse
TIG	99,99% Ar (15 l/min)	99,99% Ar (12 l/min)	110 - 115	18 – 20	150°C (máx)
MIG	99,99% Ar (15 l/min)	75%Ar+25%C O ₂ (15 l/min)	118- 120	16 - 18	150°C (máx)

4.4.3 Análises em laboratório

Para verificação das propriedades do material após a soldagem, foram realizados os ensaios mecânicos: Tração e Dobramento, além dos ensaios complementares como: Macrografia, Micrografia, Dureza e Análise Química do Metal de Base, conforme requisitos do código ASME.

4.4.3.1 Macrografia

É a análise da seção de uma peça previamente polida e em geral atacada por um reagente específico no caso deste trabalho o reagente utilizado foi a água régia e o critério de aceitação foi o descrito conforme no ASME IX QW-183.

No Ensaio Macrográfico estamos interessados na geometria (altura e largura dos reforços de solda e dimensões das pernas das soldas de filete) e organização dos cordões de solda depositados na junta em questão, a presença ou não de descontinuidades/defeitos de soldagem, a região de transição entre o metal de base e o metal de solda, chamada de ZAC (zona afetada pelo calor).

4.4.3.2 Micrografia

É a análise de uma peça previamente polida e em geral atacada por um reagente específico no caso do teste realizado o reagente utilizado foi o ácido oxálico 10%, sentido transversal com uma ampliação de 500x e o microscópio utilizado foi o Gx 41.

Na análise Micrográfica com o auxílio de uma técnica apropriada, consegue-se tornar visível a microestrutura do material, pondo assim em evidência os diversos grãos de que é formado.

As propriedades mecânicas de um metal dependem fortemente da forma que estes grãos se organizam na estrutura do metal, estrutura cristalina, e seus respectivos tamanhos.

Tal qual o Ensaio Macrográfico, o registro deste ensaio é feito por fotografias obtidas em microscópios.

Em soldagem, busca-se com este ensaio conhecer as características do metal principalmente na zona afetada pelo calor (ZAC), região esta, com maior possibilidade de problemas de natureza metalúrgica na soldagem.

4.4.3.3 Tração

No ensaio de tração é aplicado uma força no corpo de prova preparado segundo ASME IX QW – 462.1(b) e com o critério de aceitação segundo a mesma norma porém descrito no QW-153. A partir desse ensaio é possível determinar diversas características do material ensaiado como: tensão de escoamento, alongamento, tensão de ruptura e etc. Os cp's foram retirados conforme figura 4.10.

4.4.3.4 Dobramento

Os ensaios de dobramento de face e raiz busca apresentar entre outras coisas: defeitos de soldagem, sendo os mais comuns falta de fusão, inclusões metálicas, e não metálicas, poros e ainda trincas.

A preparação seguiu conforme ASME IX QW-462.3(a) e o critério de aceitação pode encontra-se na mesma norma, porém na parte QW-163.

Todos os ensaios seguiram a norma ASME B31.3 que chama a norma ASME XI que determina os critérios de aceitação para os testes requeridos numa qualificação de procedimento ou soldador para os processos analisados nesse trabalho. Os CP's foram retirados conforme figura 4.10.

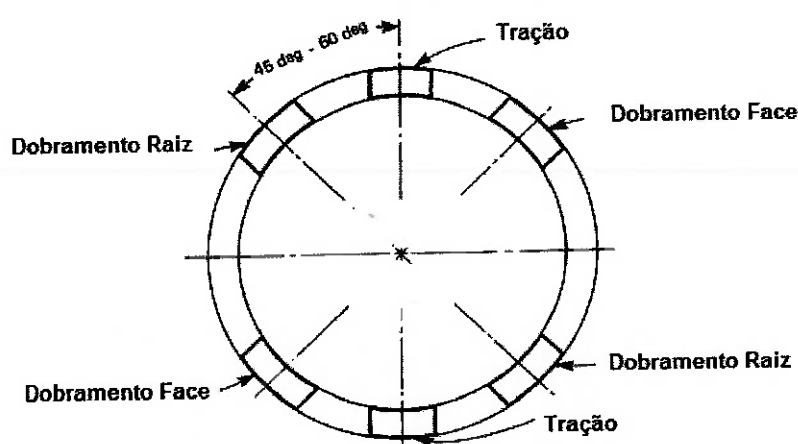


FIGURA 4.10 – Demonstração da localização dos cp's nos ensaios de tração e dobramento.

4.4.3.5 Dureza

O ensaio de dureza visa determinar se a dureza encontrada em determinado material está de acordo com a norma específica de projeto.

No caso deste trabalho o critério de aceitação para esse ensaio pode ser encontrado na ASTM E 92-08, além da preparação ter seguido a ASTM E 3-07.

Os pontos utilizados para a medição da dureza são mostrados, conforme figura 4.11:

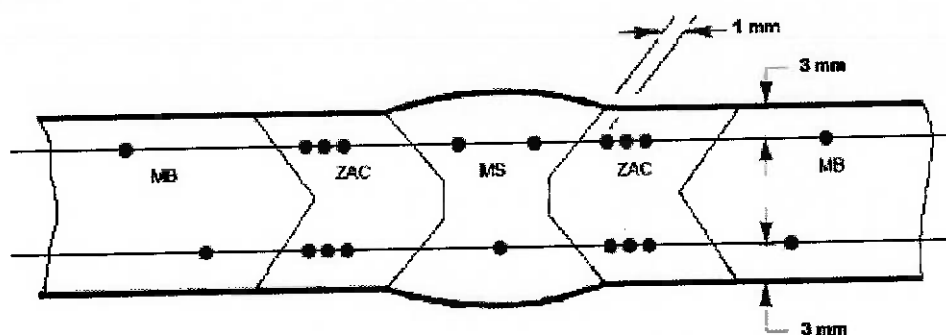


FIGURA 4.11 – Pontos utilizados para medição da dureza.

4.4.3.6 Análise Química

O ensaio de análise química, nesse experimento, teve como principal objetivo a determinação da composição química dos Metais de Base afim de analisar se os mesmos estão de acordo com o especificado. As amostras foram tiradas conforme figura 4.12 abaixo:

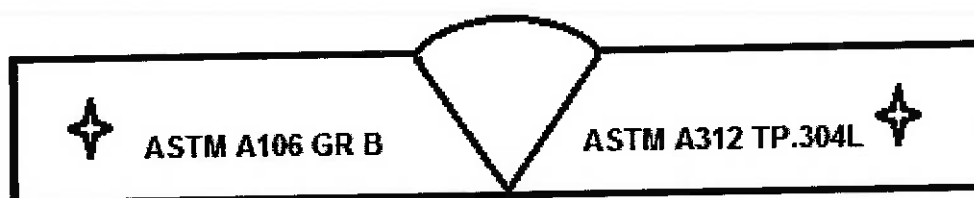


FIGURA 4.12 – Pontos retirados para medição da composição química.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 RESULTADO DOS ENSAIOS

5.1.1 Micrografia

TIG

O resultado obtido na micrografia realizada no corpo de prova soldado no processo TIG apresentou a seguinte estrutura, de acordo com laudo do laboratório, figura 5.1:

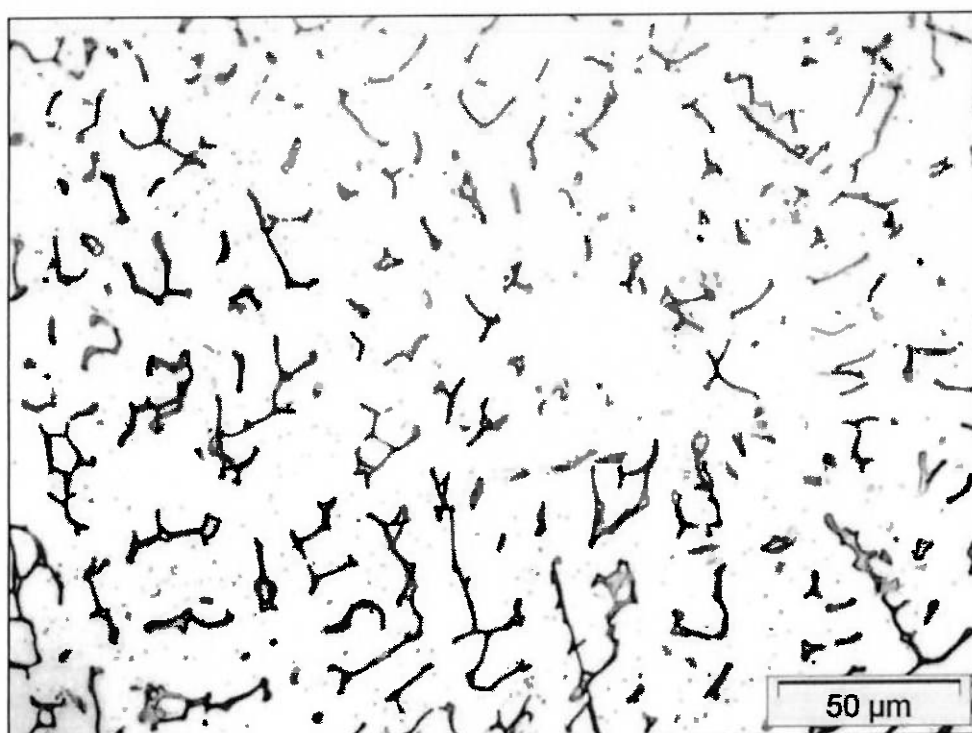


FIGURA 5.1 – Microestrutura encontrada no processo TIG

A figura acima mostra a imagem da micrografia tirada do metal de solda ampliada em 500x, onde observa-se uma microestrutura austenítica com ferrita isolada. Não apresentando qualquer descontinuidade.

MIG/MAG

Assim como no processo TIG o processo MIG/MAG não apresentou descontinuidades ou qualquer problema metalúrgico.

Conforme figura 5.2 abaixo:

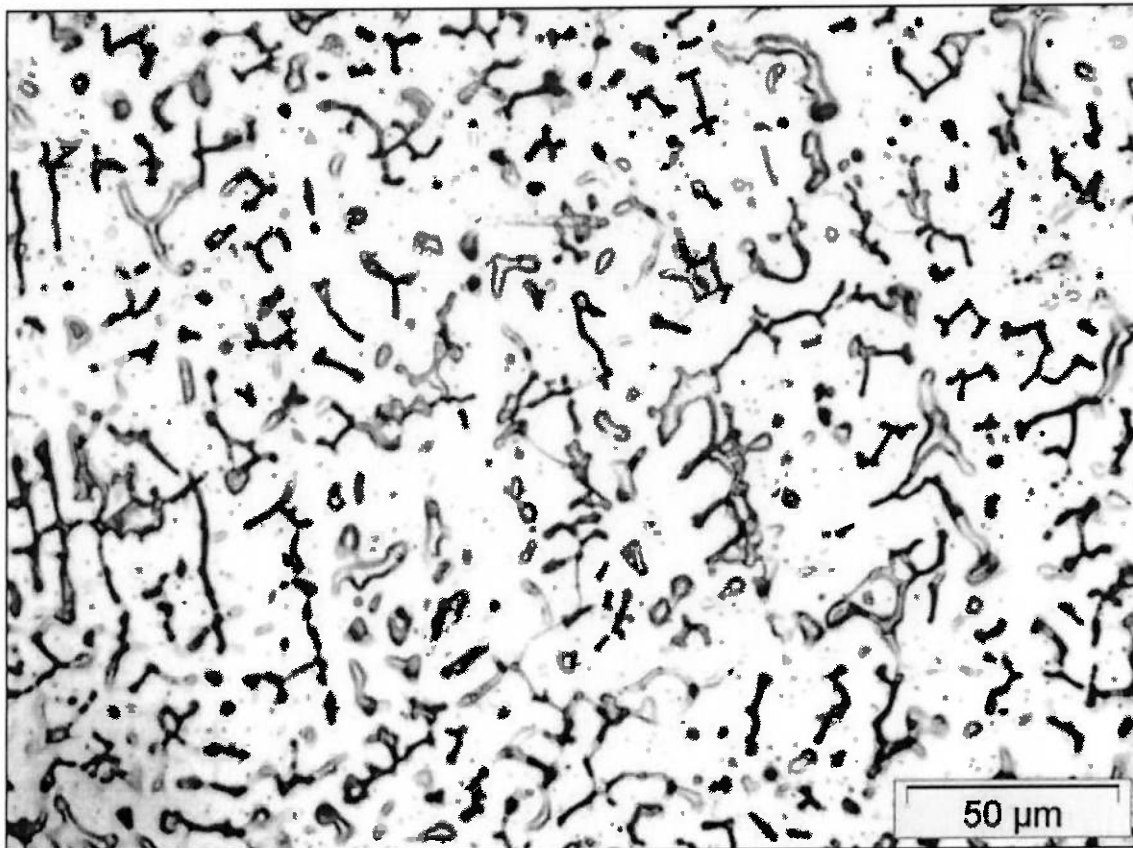


FIGURA 5.2 – Micrografia realizada no CP MIG/MAG

5.1.2 Tração

O ensaio de tração resultou num rompimento no metal de base ASTM A 106 GR.B por esse apresentar um limite de resistência a tração menor que o material A 312 Tp304L , conforme figuras 5.3 e 5.4:

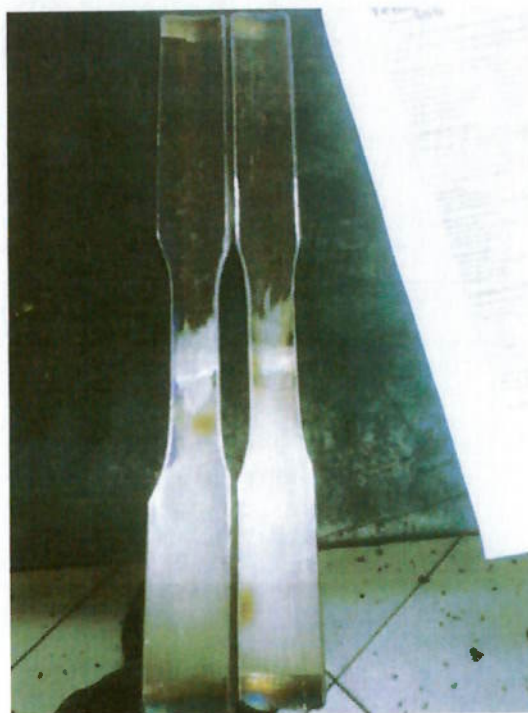


FIGURA 5.3 – Cp's do ensaio de Tração

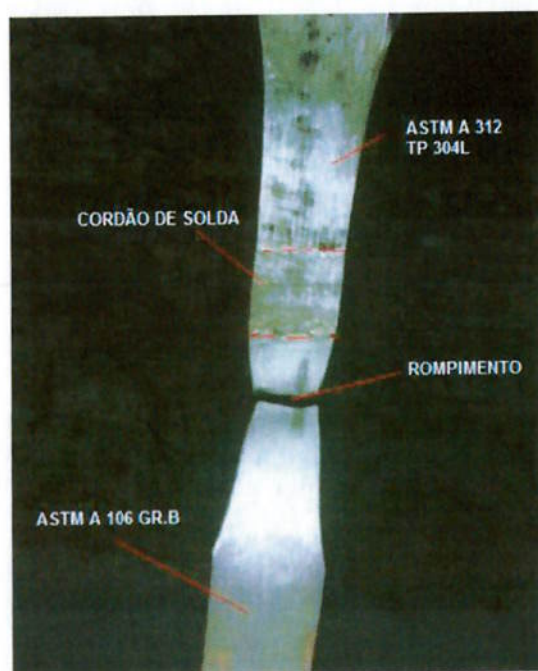


FIGURA 5.4 – CP depois do ensaio de tração

Durante o teste de tração foram registrados os gráficos abaixo que mostram as tensões de resistência, ruptura e escoamento dos CP's do experimento:

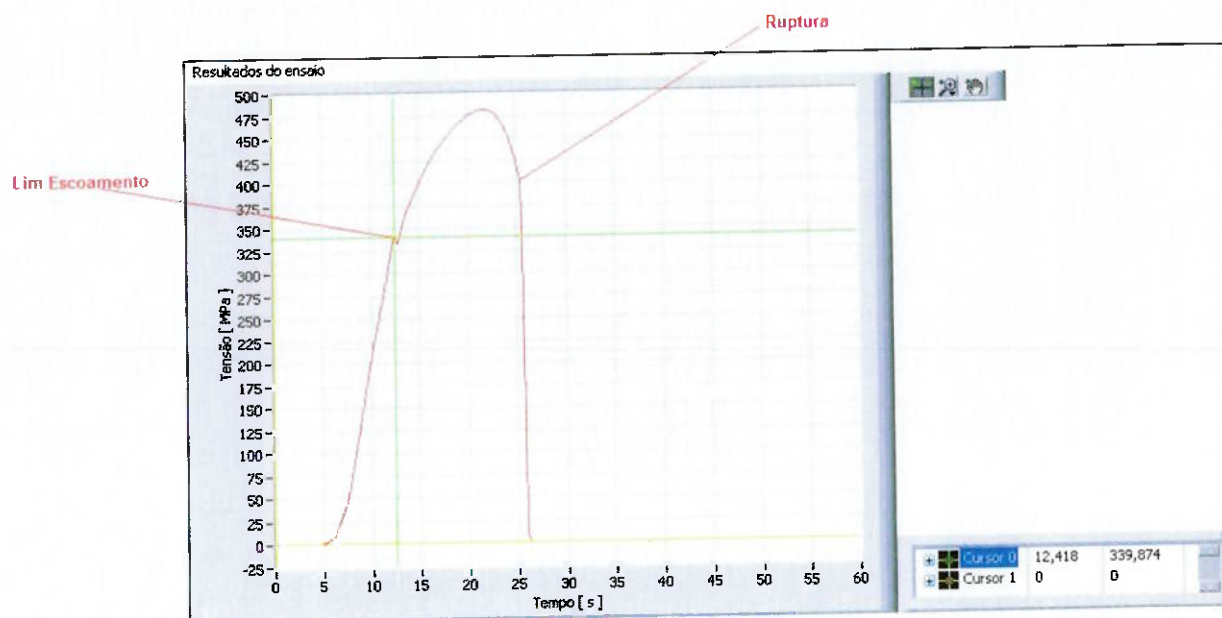


FIGURA 5.5 – Demonstração do Diagrama Tensão x Deformação (MIG/MAG)

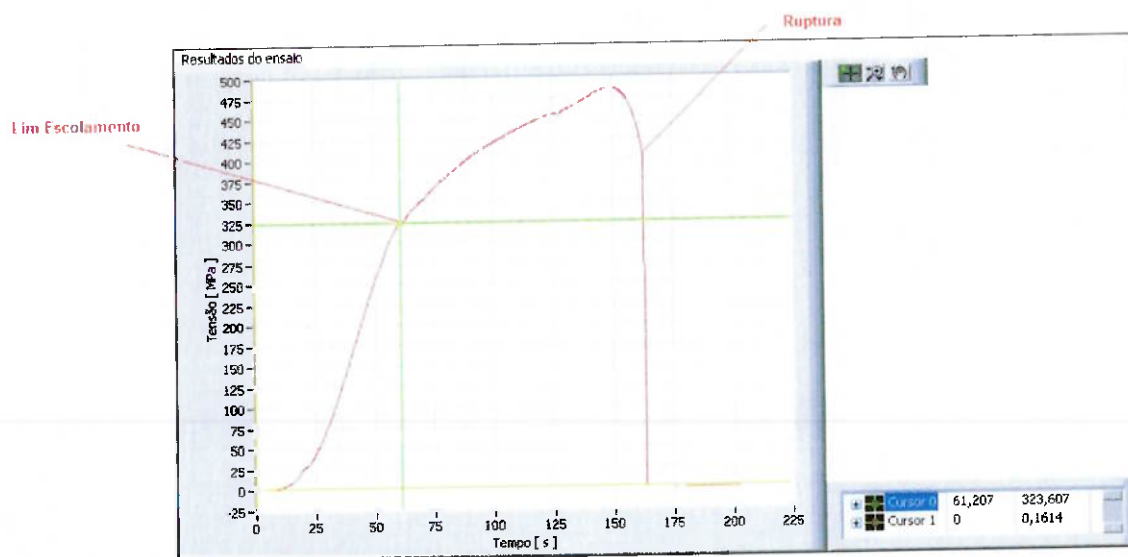


FIGURA 5.6 – Demonstração do Diagrama Tensão x Deformação (TIG)

O resultado dos ensaios resultou na aprovação dos mesmos. Já que o rompimento ocorreu no metal de base e com o limite de resistência superior ao

mínimo por especificado na norma ASMT A 312 Tp304L que é o material com o limite maior conforme Tabela 5. 1 abaixo:

Tabela 5. 1 – Valores de tensão encontrados nos testes

Processo	Lim. Res. (Mpa) Norma (min)	Lim. Res. (Mpa) Encontrado
Aço Carbono	415	T1 481 / T2 488
Aço Inox	485	T1 486 / T2 489

5.1.3 Dobramento

Todos os CP's tirados para a realização dos testes foram aprovados no ensaio de dobramento tanto os do processo MIG/MAG como os do processo TIG, não apresentando nenhuma descontinuidade na solda seja de face como de raiz.



FIGURA 5.7 – Equipamento para execução de dobramento



FIGURA 5.8 – Detalhe do dobramento do processo MIG/MAG



FIGURA 5.9 – Detalhe do dobramento do processo TIG

5.1.4 Dureza

O teste de dureza atestou que nos dois processos os valores encontrados foram acima do mínimo exigido por norma o que acarretou a aprovação dos corpos de prova testados.

Metal Base	ZAC			Solda		ZAC			Metal Base
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
151	161	160	160	206	206	206	206	221	245
Metal Base	ZAC			Solda		ZAC			Metal Base
11	12	13	14	15	16	17	18	19	19
151	160	160	165	206	245	221	245	245	245

FIGURA 5.10 – Resultado do ensaio de Dureza do Corpo de Prova

5.1.5 Análise Química (%)

Tabela 5. 2 – Análise química dos materiais de Base

Material	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni
ASTM A312 Tp 304L	Esp. Máx.0,035	Esp. Máx.2,00	Esp. Máx.0,045	Esp. Máx.0,045	Esp. Máx.1,00	Esp. 18,0-20,0	Esp. 8,0 – 13,0
	Enc. 0,012	Enc. 1,27	Enc. 0,038	Enc. 0,003	Enc. 0,042	Enc. 18,2	Enc. 8,1
ASTM A106 Gr.B	Esp. Máx.0,30	Esp. 0,29-1,06	Esp. Máx.0,035	Esp. Máx.0,035	Esp. Máx.0,10	Esp. Máx.0,40	Esp. Máx.0,40
	Enc. 0,19	Enc. 0,46	Enc. 0,015	Enc. 0,005	Enc. 0,23	Enc. 0,02	Enc. 0,00

Como podemos observar no ensaio de análise química também não houve desvios nas porcentagens encontradas.

5.2. Análise Comparativa do Custo x Benefício de cada processo

Após a análise dos resultados de laboratório podemos levantar agora também o melhor custo x benefício para soldagem de tubulação de baixa espessura em fabricação de pipe-shop diante dos dados levantados abaixo:

5.2.1 Introdução para cálculo dos custos

Para análise de alguns custos de soldagem, que serão exemplificados em capítulos subsequentes, foram levantados custos mostrados na tabela 5.3 abaixo:

Tabela 5. 3 – Custos

Processo de Soldagem	Montagem/Preparação (h)	Tempo gasto nos testes total (h)	Velocidade de soldagem média (mm/min)
TIG	~1:40	2:30	37,5
MIG	~1:40	1:10	150

Tabela 5. 4 – Dados importantes para dos cálculos

Item	TIG	MIG/MAG
Mão-de-obra	R\$13,00	R\$9,00
Eficiência de deposição	0,35	0,95
Eficiência do equipamento	0,75	0,85
Número de passes	4	3
Corrente (média)	112,5 A	119,0 A
Tensão	19,5 V	17 V
Tamanho da solda	300 mm	300mm
Vareta	R\$ 40,00 /kg	-
Arame	-	R\$ 15,0 / kg
Energia Elétrica	R\$ 0,19 kwh	R\$ 0,19 kwh

O custo total de soldagem pode ser aproximado pela equação abaixo:

$$CTS = CMO + CC + CE + CM + CD + CMD$$

Onde CTS é o custo total de soldagem, CMO é o custo da mão-de-obra é o custo do material, CC é o custo do consumível, CE é o custo da energia elétrica, CM é o custo de manutenção, CD é o custo de depreciação e finalmente CMD é o custo de outros materiais de consumo.

Será demonstrado o cálculo para cada processo para que seja feita uma comparação mais próxima possível da real.

A variável de maior peso no momento do cálculo dos custos de soldagem é o da mão-de-obra. Portanto, neste caso o custo de mão-de-obra mais o custo dos consumíveis (principalmente por ser inoxidável) representa mais de 90% do custo de operação.

5.2.1.1 Custo Mão-de-Obra

O custo unitário, porém pode ser calculado incluindo salários, encargos sociais e fixos da empresa.

O custo da mão-de-obra varia de empresa para empresa para este experimento foi utilizado como base os valores citados na tabela 5.4 citada anteriormente.

$$\text{CMO} = \text{custo unitário (R\$/h)} \times \text{tempo de soldagem (h)}$$

O tempo de soldagem leva em consideração as mesmas premissas do custo unitário, portanto pode ou não ser considerado os tempos de parada do soldador para troca de consumível, limpeza da peça, etc.

Para esse experimento foi considerado apenas o tempo de arco aberto tanto para o processo MIG/MAG como para o processo TIG. Lembrando que o comprimento total de solda foi de 300 mm ou 30 cm para ambos os processos e os valores considerados para o fator de ocupação do soldador, serão

considerados 0,35 e 0,95, respectivamente para a soldagem com o processo TIG e MIG/MAG.

TIG: Tempo de arco aberto $(300 \text{ mm}) / (37,5 \text{ mm/min}) = 8 \text{ min} = 8 / 60 = 1,3 \text{ h}$

Tempo de soldagem: $1,3 \text{ h} / 0,35 = 3,7 \text{ h}$

MIG/MAG : Tempo de arco aberto $(300 \text{ mm}) / (150 \text{ mm/min}) = 2 \text{ min} = 2 / 60 = 0,33 \text{ h}$

Tempo de soldagem: $0,33 \text{ h} / 0,95 = 0,34 \text{ h}$

Logo,

TIG : CMO = $13 \times 3,7 \text{ h} = \text{R\$ } 48,10$

MIG : CMO = $9 \times 0,34 \text{ h} = \text{R\$ } 3,06$

5.2.1.2 Custo do Consumível

O custo do consumível (CC) é representado pela soma dos custos do metal de adição (CMA), do fluxo (CF) e do gás de proteção (CG), se usados.

A princípio deve-se levantar o custo do metal depositado (CMD), calculado a partir do produto da massa do metal depositado pelo custo do eletrodo, arame ou vareta:

CMD(R\$) =

massa do metal depositado(kg) x custo do metal de adição (R\$/Kg)

E a massa do metal depositado (MMD) é calculado pelo produto da área da seção transversal da junta, do comprimento da solda e da densidade do material.

MMD (Kg) = $A \text{ (cm}^2\text{)} \times L \text{ (cm)} \times \rho \text{ (Kg/cm}^3\text{)}$

Onde, A é a área da seção transversal , L é o comprimento da solda e ρ é a densidade do material.

Tabela 5. 5 – Chanfro utilizado e sua fórmula de Área Transversal

Chanfro	Área da Seção Transversal
V Simples	$(e - h)^2 \times \tan (\theta/2) + d \times e$

Onde, "e" é a espessura da peça , "h" é o nariz, "θ" é o ângulo do chanfro e "d" é a abertura de raiz.

Na tabela abaixo segue as densidades aproximadas das ligas utilizadas:

Tabela 5. 6 – Densidades aproximadas das ligas utilizadas

Liga	Densidade (kg/cm ³)
Aço carbono	0,0078
Aço Inoxidável	0,0080

Por ser um experimento com material dissimilar será empregado uma média da densidade, ou seja, o valor utilizado será 0,0079 Kg/cm³.

Logo,

Área da Seção transversal é: $(0,6 - 0,2) \times \tan(70^\circ / 2) + 0,3 \times 0,0079 = 0,28 \text{ cm}^2$

$$\text{MMD} = 0,28 \times 30 \times 0,0079 = 0,6 \text{ Kg}$$

O custo do metal de adição também deve levar em conta a parte perdida na forma de respingos, pontas descartadas, etc estimada pela eficiência de deposição do processo(ϕ), logo:

$$\text{CMA (R\$)} = 100 \times \text{CMD (R\$)} / \phi (\%)$$

Para o processo TIG será utilizado um valor $\phi = 60\%$ e no processo MIG/MAG por ser utilizado a variação do STT que minimiza a emissão de respingos durante a soldagem (característica principalmente no MIG/MAG convencional) o valor $\phi = 95\%$.

Logo, o CC é:

$$\text{CC (R\$)} = \text{CMA (R\$)}$$

$$\text{CMD} = \text{Massa do metal depositado} \times \text{custo dos consumíveis}$$

$$\text{TIG: } 0,6 \times 40 = \text{R\$ } 24,00$$

$$\text{MIG/MAG: } 0,6 \times 15 = \text{R\$ } 9,00$$

$$\text{CMA} = \text{CMD} / \text{ED} =$$

$$\text{TIG} = 24 / 0,35 = \text{R\$ } 68,57$$

$$\text{MIG} = 9,0 / 0,95 = \text{R\$ } 9,47$$

Não será considerado o consumo de gás.

5.2.1.3 Custo da energia elétrica

$$\text{CE (R\$)} = [\text{PE (R\$/Kwh)} \times \text{PES (Kw)} \times \text{T (h)}] / (\text{E} \times 1000)$$

Onde PE é o preço da energia elétrica, PES é a potência elétrica de saída, T é o tempo de arco aberto, E é a eficiência elétrica do equipamento e A é a eficiência média dos equipamentos de soldagem fornecida pelos fabricantes.

$$\text{TIG: } (0,19 \times 112,5 \times 19,5 \times 3,7) / (0,75 \times 1000) = \text{R\$ } 2,05$$

$$\text{MIG: } (0,19 \times 119,0 \times 17 \times 0,33) / (0,85 \times 1000) = \text{R\$ } 0,15$$

5.2.1.4 Custo de depreciação

O custo de depreciação envolve além do custo da reposição de novas peças desgastadas ao longo da vida útil da máquina, por exemplo, assim como o valor residual que nada mais é que o valor de venda do equipamento ao término de sua vida útil, devido ao desgaste, inadequação ou obsolescência.

A taxa de depreciação segundo a Secretaria da Receita Federal para máquinas e equipamentos segue abaixo de acordo com a tabela 5.7:

Tabela 5. 7 – Taxas máximas de depreciação (SRF)

Tipos e Ativos	Taxa Anual (%)	Vida Útil (anos)
Máquinas e equipamentos	10	10

5.2.1.5 Custo de Manutenção

O custo médio de manutenção (CMM) tem os dados considerados com base nos custos de manutenção do equipamento num determinado período de tempo, dividido pelo número de horas de operação deste equipamento no mesmo período.

$$\text{CM (R\$)} = \text{CMM (R\$/h)} \times \text{tempo de operação (h)}$$

5.2.1.6 Custo de outros materiais

Outros materiais de consumo incluem: bicos de contato, líquido anto-respingo, eletrodo de tungstênio, EPI's e etc.

Contudo, para esse experimento esses fatores não foram levados em consideração para o custo total de soldagem.

5.3 Custo Total de Soldagem

Não foi considerado os custos de depreciação, manutenção e outros materiais, pois o trabalho tem o objetivo de obter resultados de soldagem especificamente.

Após o levantamento dos custos de cada processo chegou-se aos seguintes resultados:

$$\mathbf{CT = CMO + CC + CE}$$

$$\mathbf{TIG: 48,10 + 68,57 + 2,05 = \mathbf{R\$ 118,72}}$$

$$\mathbf{MIG/MAG: 3,10 + 9,47 + 0,15 = \mathbf{R\$ 12,72}}$$

Portanto, a partir dos dados levantados podemos concluir o experimento realizado com o processo MIG/MAG teve um custo, aproximadamente, 92,7% menor se comparado ao processo TIG.

Esse resultado foi obtido em virtude de alguns fatores principais como: das diferenças de taxa de deposição dos processos, do preço do material, custo da mão-de-obra, tempo de soldagem e etc.

6 *Conclusões*

Os resultados obtidos neste trabalho demostram que a soldagem no processo MIG/MAG com modo de transferência por corrente constante controlada apresentou um excelente custo x benefício, produtividade maior, menor energia de soldagem aplicada sobre o material preservando suas propriedades mecânicas, resultados semelhantes no laboratório o que se traduz em maior confiabilidade na soldagem de raiz com esse processo de soldagem em relação ao TIG, concluindo ser um processo confiável na fabricação de tubulações de baixo diâmetro e espessura.

Ao analisar somente os resultados dos ensaios realizados não é possível a escolha, pois os mesmos apresentaram resultados positivos e sem maiores diferenças. Porém ao analisarmos o processo de soldagem como um todo percebemos que o processo MIG/MAG é o que mostra o melhor custo x benefício por apresentar um menor tempo de soldagem, uma habilidade de mão-de-obra menor, maior deposição de soldagem além de qualidade equivalente.

SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.

Como sugestão para trabalhos futuros podemos citar um estudo mais detalhado da comparação de custo desse processo desde a montagem até o final da soldagem o que demonstraria de maneira mais real o quanto esse processo é vantajoso ou não para esse tipo de fabricação de tubulação.

Podemos sugerir o estudo em diâmetros diferentes maiores ou menores com espessuras diferentes o que poderia nos apresentar uma situação oposta a apresentada nesse trabalho.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

1. http://www.welding.com/history_of_welding.asp
2. <http://www.weldguru.com/mig-welding-history.html>
3. http://www.oxigenio.com/guia-do-processo-de-soldagem-mig-mag-ou-gmaw/historia_da_solda_mig_mag.
4. MARQUES, P.V.; MODENESI, P.J.; BRACARENSE, A.Q. Soldagem: Fundamentos e Tecnologia. Belo Horizonte: Ed. UFMG, 2005. 363 p.
5. OKUMURA,T.; TANIGUCHI,C. Engenharia de Soldagem e Aplicações. Rio de Janeiro:LTC-Livros Tecnicos e Cientificos Edito S.A.;Tóquio: The Association for International Technical Promotion,1982. 461 p.
6. SILVA, Luis G. – Processo de Soldagem MIG/MAG (Apostila)
7. ALCAN (Brasil) (Org.). Manual de Soldagem Alcan. São Paulo: Alcan, 2000.
8. WAINER, E.; BRANDI, S.D.; MELLO, F.D.H. Soldagem Processos e Metalurgia: ED. Edgard Blucher Ltda,1992. 494 p.
9. FORTES, Cleber. Apostila ESAB. Soldagem MIG/MAG. Esab BR, 2004.
10. NERIS, Manuel M. Apostila – Soldagem dos metais. Universidade Santa Cecília. 98 p.
11. MODENESI, Paulo J. Introdução à Física do Arco Elétrico e sua Aplicação na Soldagem dos Metais. Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica, Apostila do Programa de pós-graduação em Engenharia Metalúrgica. Belo Horizonte. 2001. 53 p.
12. AWS, Weldability, Welding Metallurgy, and Welding Chemistry, 1995.

13. Kou, Sindo. Welding metallurgy / Sindo Kou.—2nd ed. p. cm. A Wiley-Interscience publication, 2003. 468 p.
14. DUTRA, J.C., SILVA, R.G. MIG/MAG – Transferência Metálica por Curto-Circuito sob Controle da Forma de Onda da Corrente-Sistemas CCC e STT – Fundamentos. Soldagem & Inspeção, v.13, n12
15. MODENESI, Paulo J. **Técnica Operatória da Soldagem GMAW.**
16. VERHOEVEN, John D. Emeritus Professor, "Metallurgy of Steel for Bladesmiths & Others who Heat Treat and Forge Steel" .Iowa State University . 186p.
17. Soldagem TIG – Universidade Federal de Minas Gerais. Pode ser acessado em : <http://www.demec.ufmg.br/ema097solda/6-GTAW1.pdf>
18. http://www.oxigenio.com/guia-do-processo-de-soldagem-tig-ou-gtaw/processo_TIG_o_que_e.htm
19. DERUNTZ, Bruce D., Assessing the benefits of Surface Tension Transfer® Welding to Industry. Journal of Industrial Technology, Vol 19, N 4, August 2003 to October 2003
20. <http://www.thyssenkrupp-nirosta.de/History.22.0.html?&L=1> - Retrieved 2007-08-13
21. CARLISLE, Rodney P., Scientific American Inventions and Discoveries, p. 380, John Wiley and Sons, 2004.
22. HOWSE, Geoffrey *A Photographic History of Sheffield Steel*, History Press, 2011.
23. ACESITA, <http://www.acesita.com.br>.

24. MODENESI, P.J. Soldabilidade dos Aços Inoxidáveis, SENAI-SP, 2001. 100p.
25. PADILHA, A. F.; GUEDES, L. C. Aços Inoxidáveis Austeníticos: Microestrutura e Propriedades. São Paulo: Editora Hemus, 1994.
26. <http://chemistry.about.com/cs/metalsandalloys/a/aa071201a.htm>
27. PICKERING, F.B. "Physical metallurgy of stainless developments". Stainless Steels 77.1977, p-227-250
28. TEBECHER, C. T. P. Aços Inoxidáveis. p. 1-15, 2004, Disponível em: http://www.pipesystem.com.br/Artigos_Tecnicos/Aço_Iox/body_aço_inox.html.
29. ASHBY, Michael F. and Jones, David R. H.. Engineering Materials 2. ed. Oxford: Pergamon Press, 1992.
30. CHAVERINI, Vicente "Aços e Ferros Fundidos", Características gerais, tratamentos térmicos e principais tipos, 4 Edição São Paulo, Associação Brasileira de Metais 1977.
31. DURFERRIT DO BRASIL QUÍMICA LTDA. Apostila. Pode ser acessado em: http://www.durferrit.com.br/downloads/13_Diagrama%20Ferro-Carbono.pdf
32. Apostila do Centro Federal de Educação Tecnológica de São Paulo – CEFET da disciplina de Tecnologia Mecânica de 10 de Janeiro de 2001. Páginas 1 a 6.

ANEXO I – LAUDOS**Relatório de Ensaio**

REL: 0574/13

Laboratório de Ensaio Acreditado pela CGCRE de acordo com a ABNT NBR
ISO/IEC 17025, sob o N° CRL 0387

Página 1 de 3

LABORATÓRIO DE ENSAIO PERTENCENTE À REDE BRASILEIRA DE LABORATÓRIOS DE ENSAIOS - RBLE

Solicitante / Interessado: **STEFANIE DE MORAES MOREIRA E SILVA**Endereço: stef@ens.moraes@monica.com.br – Telefone (11) 98486-5967

Informações Fornecidas Pelo Solicitante:

Pedido do Solicitante / Interessado: Mensagem Eletrônica

Aplicação: Determinação das propriedades da junta soldada (CP-02)

Norma(s) de Referência: ASME IX 2010 e Addenda 2011a

Metal de Base / Metal de Adição: ASTM A 106 Grau B x ASTM A 312 Grau TP304L / ER309L Ø 2,5 mm

Dimensões da Peça de Teste: DN 4" Sch 40 (Ø 114,3 x 6,02 mm)

Processo de Soldagem: GTAW

Posição de Soldagem: 1G (Girando)

1 - ENSAIO DE TRACÃO

Identificação	Espessura (mm)	Largura (mm)	Área (mm²)	Carga Máxima		Tensão (MPa)	Local da ruptura	Laudo
				Kgf	(N)			
T 1	6,20	19,6	121,5	6.018	59.020	486	Metal base (A 106)	Aprovado
T 2	6,15	19,6	120,5	6.012	58.960	489	Metal base (A 106)	Aprovado

- Incerteza de Medição (U) = +/- 0,5%

Preparação: QW-462 1(b)
 Método de Ensaio: QW-152
 Critério de Aceitação: QW-153
 Limite de Resistência Especificado: Min 415 MPa

Máquina de Ensaio

Identificação: TL-017
 Certificado de Calibração: DNTT 932C/12
 Data de Validade: 10/09/13
 Entidade Emitente: Dinateste

Extensômetro

Identificação: TL-017
 Certificado de Calibração: DNTT 354C/12
 Data de Validade: 07/05/13
 Entidade Emitente: Dinateste

2 - ENSAIO DE DOBRAMENTO GUIADO

Diâmetro do Cutelo: 24 mm

Distância Entre Roletes: 39 mm

Identificação	Dimensões (mm)	Ângulo	Identificação e dimensões das descontinuidades detectadas	Laudo
DF 1	6 x 19 x 200	180°	Isento de descontinuidades	Aprovado
DF 2	6 x 19 x 200	180°	Isento de descontinuidades	Aprovado
DR 1	6 x 19 x 200	180°	Isento de descontinuidades	Aprovado
DR 2	6 x 19 x 200	180°	Isento de descontinuidades	Aprovado

Preparação: QW 462 3(a)
 Método de Ensaio: QW-162
 Critério de Aceitação: QW-163

TEAM LAB – Tecnologia em Ensaios e Análises de Materiais
 Rua Dr. Pelágio Marques, 51 – Vila Matilde – São Paulo – SP – CEP: 03512-010
www.teamlab.com.br – Telefone: 2537-9007 / 2537-9009 / 2082-3406 / 2082-3415 / 2082-3399

REL Revisão 02 / F02-10



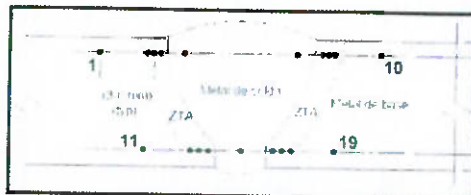
Relatório de Ensaio

REL: 0574/13

Laboratório de Ensaio Acreditado pela CGCRE de acordo com a ABNT NBR
ISO/IEC 17025, sob o Nº CRL 0387

Página 2 de 3

3 - DUREZA HV 5



Metal Base		ZTA			Solda		ZTA			Metal Base
1		2	3	4	5	6	7	8	9	10
151		151	160	160	206	206	206	206	221	245
Metal Base		ZTA			Solda		ZTA			Metal Base
11		12	13	14	15		16	17	18	19
151		160	160	165	206		245	221	245	245

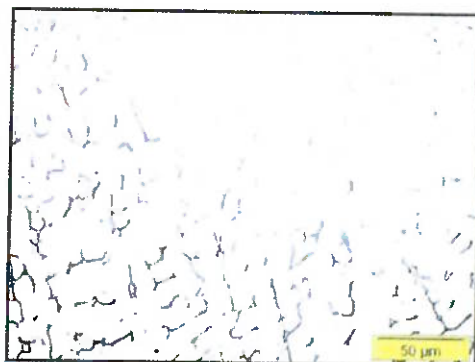
- Incerteza de Medição (U) = +/- 10 %

Preparação ASTM E 3 - 07 / N-133K - 2005, Figura 1
Método do Ensaio ASTM E 92 - 08
Critério de Aceitação Informativo

Máquina de Ensaio

Identificação TL-022
Certificado de Calibração 8450/11
Data de Validade 15 / 09 / 13
Entidade Emitente Quality Control

4 - MICROGRAFIA: MICROESTRUTURA E CONTAGEM DE FERRITA



Reagente Utilizado Ácido Oxálico 10%
Sentido Transversal
Ampliação Aumento de 500 vezes
Máquina de Ensaio Microscópio Gx 41

Identificação	Micrografia
MI	Consiste em uma matriz austenítica e ferrita solada. Não susceptível a corrosão intergranular

Preparação ASTM E 3 - 07
Método de Ensaio ASTM E 7 - 03
Critério de Aceitação Informativo

Microscópio

Régua Graduada TL-062
Certificado de Calibração D14472/12
Data de Validade 18 / 08 / 13
Entidade Emitente Ferrmess

TEAM LAB - Tecnologia em Ensaios e Análises de Materiais
Rua Dr. Pelágio Marques, 51 - Vila Matilde - São Paulo - SP - CEP: 03512-010
www.teamlab.com.br - Telefone: 2537-9007 / 2537-9008 / 2082-3406 / 2082-3415 / 2082-3399



Relatório de Ensaio

REL: 0574/13

Laboratório de Ensaio Acreditado pela CGCRE de acordo com a ABNT NBR
ISO/IEC 17025, sob o N° CRL 0387

Página 3 de 3

5 - MACROGRAFIA



Reagente Utilizado.....Água Régia

Inspeção Visual.....Aumento de 10 vezes

Ampliação.....1:1

Identificação	Lado	Reforço (mm)		Identificação e dimensões das descontinuidades detectadas	Laudo
		Largura	Altura		
M	Face	16	1,0	Isento de descontinuidades	Aprovado
	Raz	5,0	1,0		

Preparação.....QW-183

Método de Ensaio.....QW-183

Critério de Aceitação.....QW-183

- ✓ Este relatório atende aos requisitos de acreditação pela CGCRE, que avaliou a competência do laboratório e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida.
- ✓ Os ensaios foram realizados nas condições ambientais. (21 +/- 1) °C.
- ✓ O campo laudo não faz parte do escopo de acreditação do CGCRE.
- ✓ A incerteza expandida declarada é baseada em uma incerteza padrão combinada, multiplicada pelo fator de abrangência k=2, fornecendo um nível de confiança de aproximadamente 95%. A incerteza padrão de medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.
- ✓ Os resultados apresentados neste relatório têm significação restrita às amostras ensaiadas, não sendo extensivo a qualquer lote. É proibida a reprodução parcial deste relatório.

Ensaio realizado em 12 de Fevereiro de 2013

Emissão de relatório em 12 de Fevereiro de 2013

José Batista Damasceno
Signatário Autorizado

TEAM LAB – Tecnologia em Ensaios e Análises de Materiais

Rua Dr. Pelágio Marques, 51 – Vila Matilde – São Paulo – SP – CEP: 03512-010

www.teamlab.com.br - Telefone: 2537-9007 / 2537-9009 / 2082-3406 / 2082-3415 / 2082-3399



Relatório de Ensaio

REL: 0573/13

Laboratório de Ensaio Acreditado pela CGCRE de acordo com a ABNT NBR
ISO/IEC 17025, sob o Nº CRL 0387

Página 1 de 3

LABORATÓRIO DE ENSAIO PERTENCENTE À REDE BRASILEIRA DE LABORATÓRIOS DE ENSAIOS - RBLE

Solicitante / Interessado: STEFANIE DE MORAES MOREIRA E SILVA

Endereço: stefanie.moraes@montcalm.com.br - Telefone: (11) 98486-5967

Informações Fornecidas Pelo Solicitante:

Pedido do Solicitante / Interessado: Mensagem Eletrônica

Aplicação: Determinação das propriedades da junta soldada (CP 01)

Norma(s) de Referência: ASME IX 2010 e Addenda 2011a

Metal de Base / Metal de Adição: ASTM A 106 Grau B x ASTM A 312 Grau TP304L / ESAB Autorod ER309L-Si Ø 10mm

Dimensões da Peça de Teste: DN 4" Sch 40 (Ø 114,3 x 6,02 mm)

Processo de Soldagem: GMAW-STT

Posição de Soldagem: 1G (Girando)

1 - ENSAIO DE TRAÇÃO

Identificação	Espessura (mm)	Largura (mm)	Área (mm²)	Carga Máxima		Tensão (MPa)	Local da ruptura	Laudo
				Kgf	(N)			
T 1	5,9	19,2	113,3	5.556	54.490	481	Metal base (A 106)	Aprovado
T 2	5,7	19,4	110,6	5.498	53.920	488	Metal base (A 106)	Aprovado

• Incerteza de Medição (U) = +/- 0,5%

Preparação: QW-462 1(b)

Método de Ensaio: QW-152

Critério de Aceitação: QW-153

Limite de Resistência Especificado: Min. 415 MPa

Máquina de Ensaio

Identificação: TL-017

Certificado de Calibração: DNTT 9320/12

Data de Validade: 10/09/13

Entidade Emitente: Dinateste

Extensômetro

Identificação: TL-C117

Certificado de Calibração: DNTT 3540/12

Data de Validade: 07/05/13

Entidade Emitente: Dinateste

2 - ENSAIO DE DOBRAMENTO GUIADO

Diâmetro do Cutelo: 24 mm

Distância Entre Roletes: 39 mm

Identificação	Dimensões (mm)	Ângulo	Identificação e dimensões das descontinuidades detectadas	Laudo
DF 1	6 x 19 x 200	180°	Isento de descontinuidades	Aprovado
DF 2	6 x 19 x 200	180°	Isento de descontinuidades	Aprovado
DR 1	6 x 19 x 200	180°	Isento de descontinuidades	Aprovado
DR 2	6 x 19 x 200	180°	Isento de descontinuidades	Aprovado

Preparação: QW-462 3(a)

Método de Ensaio: QW-162

Critério de Aceitação: QW-163

TEAM LAB - Tecnologia em Ensaos e Análises de Materiais

Rua Dr. Patálio Marques, 51 - Vila Matilde - São Paulo - SP - CEP: 03512-010
www.teamlab.com.br - Telefone: 2537-9007 / 2537-9009 / 2082-3406 / 2082-3415 / 2082-3399



Relatório de Ensaio

REL: 0573/13

Laboratório de Ensaio Acreditado pela CGCRE de acordo com a ABNT NBR
ISO/IEC 17025, sob o N° CRL 0387

Página 2 de 3

3 – DUREZA HV 5



Metal Base	ZTA			Solda		ZTA			Metal Base
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
136	147	151	151	193	206	206	228	228	236
Metal Base	ZTA			Solda		ZTA			Metal Base
11	12	13	14	15		16	17	18	19
136	156	165	165	193		206	221	206	236

• Incerteza de Medição (U) = +/- 10 %

PreparaçãoASTM E 3 - 07 / N-133K - 2005, Figura 1

Método do EnsaioASTM E 92 - 08

Critério de AceitaçãoInformativo

Máquina de Ensaio

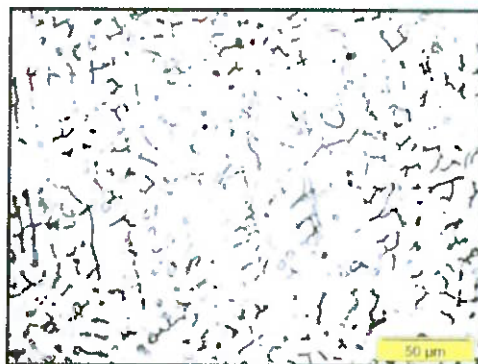
IdentificaçãoTL-022

Certificado de Calibração8450/11

Data de Validade15 / 09 / 13

Entidade EmitenteQuality Control

4 – MICROGRAFIA: MICROESTRUTURA E CONTAGEM DE FERRITA



Reagente UtilizadoÁcido Oxálico 10%

SentidoTransversal

AmpliaçãoAumento de 500 vezes

Máquina de EnsaioMicroscópio Gx 41

Identificação	Micrografia
MI	Consiste em uma matriz austenítica e ferrita isolada. Não susceptível à corrosão intergranular.

PreparaçãoASTM E 3 - 07

Método de EnsaioASTM E 7 - 03

Critério de AceitaçãoInformativo

Microscópio

Régua GraduadaTL 062

Certificado de CalibraçãoD14472/12

Data de Validade18 / 08 / 13

Entidade EmitenteFeinmess

TEAM LAB - Tecnologia em Ensaos e Análises de Materiais
Rua Dr. Pelágio Marques, 51 - Vila Mahide - São Paulo - SP - CEP 03512-010
www.teamlab.com.br - Telefone: 2537-9007 / 2537-9009 / 2082-3406 / 2082-3415 / 2082-3399



Relatório de Ensaio

REL: 0573/13

Laboratório de Ensaio Acreditado pela CGCRE de acordo com a ABNT NBR
ISO/IEC 17025, sob o N° CRL 0387

Página 3 de 3

5 - MACROGRAFIA



Reagente UtilizadoÁgua Regia

Inspeção VisualAumento de 10 vezes

Ampliação1.1

Identificação	Lado	Reforço (mm)		Identificação e dimensões das descontinuidades detectadas	Laudo
		Largura	Altura		
M	Face	12	2.5	Isento de descontinuidades	Aprovado
	Raiz	6	1.5		

PreparaçãoQW-183

Método de EnsaioQW-183

Critério de AceitaçãoQW-183

- ✓ Este relatório atende aos requisitos de acreditação pela CGCRE, que avaliou a competência do laboratório e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida.
- ✓ Os ensaios foram realizados nas condições ambientais: (21 +/- 1) °C.
- ✓ O campo laudo não faz parte do escopo de acreditação do CGCRE.
- ✓ A incerteza expandida declarada é baseada em uma incerteza padrão combinada, multiplicada pelo fator de abrangência k=2, fornecendo um nível de confiança de aproximadamente 95%. A incerteza padrão de medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.
- ✓ Os resultados apresentados neste relatório têm significação restrita às amostras ensaiadas, não sendo extensivo a qualquer lote. É proibida a reprodução parcial deste relatório.

Ensaio realizado em 12 de Fevereiro de 2013

Emissão de relatório em 12 de Fevereiro de 2013.

José Batista Damasceno
Signatário Autorizado

TEAM LAB – Tecnologia em Ensaios e Análises de Materiais
Rua Dr. Peláio Marques, 51 – Vila Matilde – São Paulo – SP – CEP: 03512-010
www.teamlab.com.br - Telefone: 2537-9007 / 2537-8009 / 2082-3406 / 2082-3415 / 2082-3399



Relatório de Ensaio

REL: 0572/13

Laboratório de Ensaio Acreditado pela CGCRE de acordo com a ABNT NBR
ISO/IEC 17025, sob o nº CRL 0387

Página 1 de 1

LABORATÓRIO DE ENSAIO PERTENCENTE À REDE BRASILEIRA DE LABORATÓRIOS DE ENSAIOS – RBLE

Solicitante / Interessado: **STEFANIE DE MORAES MOREIRA E SILVA**
Endereço: stefanie.moraes@monitcalm.com.br – Telefone (11) 98486 5967

Informações Fornecidas Pelo Solicitante:

Pedido do Solicitante / Interessado Mensagem Eletrônica
Aplicação Determinação da composição química do material
Norma(s) de Referência ASTM A 312 / A312M - 09
Metal de Base ASTM A 312 Grau TP304L
Dimensões da Peça de Teste DN 4 Sch 40 (Ø 114,3 x 6,02 mm)
Rastreabilidade Corrida SF09131 / Certificado nº INB-H0480-2



1 - ANÁLISE QUÍMICA

AQ	Concentração dos elementos na amostra (%)							Laudo
	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	
Especificado	Máx. 0,035	Máx. 2,00	Máx. 0,045	Máx. 0,045	Máx. 1,00	18,0 – 20,0	8,0 – 13,0	
Encontrado	0,012	1,27	0,038	0,003	0,42	18,2	8,1	Aprovado
Desvio Padrão	0,002	0,03	0,003	0,001	0,02	0,1	0,1	

- A incerteza dos resultados de cada amostra analisada é dada pela expressão: $(U = \pm 1,359 \cdot S)$, onde: U = Incerteza dos resultados e S = Desvio padrão de cada amostra.

Preparação
Método de Ensaio ASTM E 1086-08 (Espectrometria)
Critério de Aceitação ASTM A 312, Tabela 1

Máquina de Ensaio
Identificação TL-088
Certificado de Calibração 041/12
Data de Validade 19 / 10 / 13
Entidade Emissora GNR Brasil

- ✓ Este relatório atende aos requisitos de acreditação pela CGCRE, que avaliou a competência do laboratório e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida.
- ✓ O ensaio foi realizado nas condições ambientais: $(21 \pm 1) ^\circ\text{C}$.
- ✓ O campo laudo não faz parte do escopo de acreditação do CGCRE.
- ✓ A incerteza expandida declarada é baseada em uma incerteza padrão combinada, multiplicada pelo fator de abrangência $k=2$, fornecendo um nível de confiança de aproximadamente 95%. A incerteza padrão de medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.
- ✓ Os resultados apresentados neste relatório têm significação restrita às amostras ensaiadas, não sendo extensivo a qualquer lote. É proibida a reprodução parcial deste relatório

Ensaio realizado em 12 de Fevereiro de 2013

Emissão de relatório em 12 de Fevereiro de 2013


José Batista Damasceno
Signatário Autorizado

TEAM LAB – Tecnologia em Ensaios e Análises de Materiais
Rua Dr. Pelágio Marques, 51 – CEP: 03512-010 – Vila Matilde – São Paulo – SP
www.teamlab.com.br – Telefone: (11) 2537-9007 / 2537-9009 / 2082-3406 / 2082-3415 / 2082-3399



Relatório de Ensaio

REL: 0571/13

Laboratório de Ensaio Acreditado pela CGCRE de acordo com a ABNT NBR
ISO/IEC 17025, sob o N° CRL 0387

Página 1 de 1

LABORATÓRIO DE ENSAIO PERTENCENTE À REDE BRASILEIRA DE LABORATÓRIOS DE ENSAIOS - RBLE

Solicitante / Interessado: STEFANIE DE MORAES MOREIRA E SILVA

Endereço: stefanie.moraes@montcalm.com.br - Telefone: (11) 98486-5967

Informações Fornecidas Pelo Solicitante:

Pedido do Solicitante / Interessado: Mensagem Eletrônica

Aplicação: Determinação da composição química do material

Norma(s) de Referência: ASTM A 106 / A106M - 10

Metal de Base: ASTM A 106 Grau B

Dimensões da Peça de Teste: DN 4" Sch 40 (Ø 114,3 x 6,02 mm)

Rastreabilidade: Corrida: WB81-722 / SiC N° 08SYSP001

1 - ANÁLISE QUÍMICA

AQ	Concentração dos elementos na amostra (%)					
	C	Mn	P	S	Si	Cr
Especificado	Máx. 0,30	0,29 - 1,06	Máx. 0,035	Máx. 0,035	Min. 0,10	Máx. 0,40
Encontrado	0,19	0,46	0,015	0,005	0,23	0,02
Desvio Padrão	0,00	0,01	0,001	0,001	0,00	0,00

AQ	Concentração dos elementos na amostra (%)					Laudo
	Cu	Mo	Ni	V	Cr+Cu+Mo+Ni+V	
Especificado	Máx. 0,40	Máx. 0,15	Máx. 0,40	Máx. 0,08	Max. 1,00	Aprovado
Encontrado	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	
Desvio Padrão	0,00	0,00	0,00	0,00	-	

- A incerteza dos resultados de cada amostra analisada é dada pela expressão: $(U = \pm 1,359 \cdot S)$, onde: U = Incerteza dos resultados e S = Desvio padrão de cada amostra.

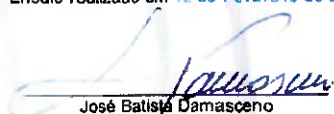
Preparação:
 Método de Ensaio: ASTM E 415 - 08 (Espectrometria)
 Critério de Aceitação: ASTM A 106 Tabela 1

Máquina de Ensaio:
 Identificação: TI-088
 Certificado de Calibração: 041/12
 Data de Validade: 19 / 10 / 13
 Entidade Emissora: GNR Brasil

- ✓ Este relatório atende aos requisitos de acreditação pela CGCRE, que avaliou a competência do laboratório e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida.
- ✓ O ensaio foi realizado nas condições ambientais: $(21 \pm 1) ^\circ\text{C}$
- ✓ O campo laudo não faz parte do escopo de acreditação do CGCRE
- ✓ A incerteza expandida declarada é baseada em uma incerteza padrão combinada, multiplicada pelo fator de abrangência $k=2$, fornecendo um nível de confiança de aproximadamente 95%. A incerteza padrão de medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.
- ✓ Os resultados apresentados neste relatório têm significação restrita às amostras ensaiadas, não sendo extensivo a qualquer lote. É proibida a reprodução parcial deste relatório.

Ensaio realizado em 12 de Fevereiro de 2013

Emissão de relatório em 12 de Fevereiro de 2013


 José Batista Damasceno
 Signatário Autorizado

TEAM LAB - Tecnologia em Ensaios e Análises de Materiais
 Rua Dr. Pelágio Marques, 51 - CEP 03512-010 - Vila Matilde - São Paulo - SP
www.teamlab.com.br - Telefone: (11) 2537-9007 / 2537-9009 / 2082-3406 / 2082-3415 / 2082-3399

REL Revisão 02 / F02-18