

Rodrigo de Oliveira Ribeiro

**Comparação entre os modos de transferência
por curto-circuito e projetado (pulsado) no
processo MIG/MAG na soldagem de tubos API
5L X56**

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

São Paulo

Fevereiro de 2013

Rodrigo de Oliveira Ribeiro

(Engenheiro Mecânico, Fundação Santo André, 2009)

**Comparação entre os modos de transferência
por curto-circuito e projetado (pulsado) no
processo MIG/MAG na soldagem de tubos API
5L X56**

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: Eng.º Vicente de P. Ortega

São Paulo

Fevereiro de 2013

*"E, tudo quanto fizerdes, fazei-o de todo coração, como se
estivessem servindo o Senhor e não as pessoas."*

[Colossenses 3:23]

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu Deus, a minha esposa Lívia, a meus pais Levy e Soraya e a minha irmã Patrícia.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus primeiramente;

Ao professor Vicente de P. Ortega, por ter me orientado nesta intensa tarefa;

Ao professor Sérgio D. Brandi, que também colaborou com importantes sugestões;

A toda minha família pelo apoio, amor e confiança;

A minha esposa por acreditar em mim, pela compreensão e carinho;

As pessoas que me ajudaram a tornar este trabalho uma realidade:

Marcos Roberto de Jesus, Walter Diniz, Alexandre Marques, Alex

Sandro Amorim, Matheus S. Cunha, Gustavo H. Maeda, Edinaldo de

Lima Silva, Francisco José de Souza e André Luis B. de Oliveira.

CURRICULUM VITAE

Rodrigo de Oliveira Ribeiro

Formação

Pós Graduação de Especialização em Engenharia De Soldagem

Universidade de São Paulo – USP

Mar 2013

Engenharia Mecânica com Ênfase em Mecatrônica / Tecnologia Mecânica com Ênfase em Mecatrônica

Centro Universitário Fundação Santo André – FAENG. Dez 2009 / Nov2008.

Experiência Profissional

GE Oil & Gas do Brasil – Supply Chain

Cargo: Analista de Documentação. Janeiro/2012 – Atual

SGS do Brasil – Prestadora de Serviços

Cargo: Engenheiro Mecânico. Março/2011 – Dezembro/2011

Hollbras Filtros e Equip. Ind. Ltda – Serviços de Engenharia

Cargo: Controle da Qualidade. Maio/2008 – Fevereiro/2011

Cursos e Treinamentos Complementares

Inspetor de Soldagem N1 – CETRE

Inspetor de Ensaio Não Destrutivo por Líquido Penetrante (LP-N2-G) – CETRE

Green Belt (Lean – SixSigma) – GE Oil & Gas

Interpretação da Norma ISO 9001:2008 – SGA Qualidade

Formação de Auditor Interno da Qualidade ISO 9001 – SGA Qualidade

PPAP – Aprovação de Peças para Produção – SENAI

APQP – Planejamento Avançado da Qualidade do Produto e Processo – SENAI

RESUMO

As atividades petrolíferas e as novas descobertas exigem grande desenvolvimento e aperfeiçoamento técnico devido às dificuldades encontradas nas explorações. Para reduzir as não conformidades e atender as especificações de projeto, foram realizados testes com utilização do processo de soldagem MIG/MAG, sendo os modos de transferência projetado (pulsado) e por curto-circuito. Este trabalho tem por objetivo comparar a qualidade de juntas soldadas, visando a identificar a influência do modo de transferência metálica com foco nos índices de descontinuidades tipo falta de fusão das juntas. Para tanto, foram fixadas as geometrias do chanfro, a temperatura de pré-aquecimento (entre 200°C e 400°C), o interpasse (entre 150°C e 350°C), o eletrodo sólido (AWS ER80S-D2), o metal de base (API 5L X56) e o soldador, variando-se o modo de transferência e o gás de proteção. A partir do uso de ensaios não destrutivos de partícula magnética, ultrassom e gamagrafia, foram executadas as comparações de qualidade das juntas e os resultados de detecção dos ensaios. Estes mostram que a detecção de descontinuidades é maior no ensaio por ultrassom e menor na gamagrafia. Os corpos de prova com menores índices de descontinuidades foram obtidos no processo MIG/MAG com modo de transferência projetado (pulsado) e gás próximo ao indicado pelo fabricante. O resultado foi juntas com maior qualidade, quando esses corpos de prova foram comparados às demais variações executadas no experimento.

ABSTRACT

The oil activities and the new discoveries require a great technical development and improvement due to oil exploration difficulties. To reduce the nonconformities and to meet the project specifications, tests were performed using MIG/MAG welding process, with pulsed and short-circuit transfer mode. This study aims to compare the quality of welded joints, to identify the influence of the metal transfer mode, focusing on discontinuity rates such as lack of fusion. The grooves geometries were fixed, the preheat temperature (between 200°C and 400°C), interpass temperature (between 150°C and 350°C), solid electrode (AWS ER80S-D2), the base metal (API 5L X56) and welder, changing transfer mode and shielding gas. Comparisons of joints quality and results of detection tests were performed, using magnetic particle, ultrasonic and gammagraphy non-destructive tests. The results showed that the detection of discontinuities is greater in ultrasound test and lower in gammagraphy test. The specimens with lower discontinuities rates were obtained in MIG/MAG process with pulsed transfer mode and gas with a composition near from the manufacturer specification, resulting in higher quality joints compared to the other variations performed in the experiment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 Esquema básico MIG/MAG [9].....	25
Figura 2-2 Tocha típica de MIG/MAG [9].....	26
Figura 2-3 Estação de soldagem semiautomatizada [10].....	27
Figura 2-4 Principais modos de transferência [9].	29
Figura 2-5 Oscilograma (curto-circuito) [10].....	30
Figura 2-6 Variação de corrente no tempo (transferência projetada - pulsada) [10].....	31
Figura 2-7 Corrente (transferência STT™) [10].	32
Figura 2-8 Curva característica de fonte CV [9].	36
Figura 2-9 Efeito da variação do comprimento do arco na corrente de soldagem com fontes de CV [9].....	37
Figura 2-10 Contorno-penetração versus gases de proteção [10].	39
Figura 2-11 Campo de fuga em material ferromagnético [17].....	44
Figura 2-12 Técnica dos eletrodos (PM) [17].....	45
Figura 2-13 Contato direto (PM) [17].....	46
Figura 2-14 Bobina (PM) [17].....	46
Figura 2-15 Yoke (PM) [17].....	47
Figura 2-16 Condutor central (PM) [17].	48
Figura 2-17 Campo de audibilidade (US) [18].....	49
Figura 2-18 Inspeção por US [18].....	50
Figura 2-19 Inspeção em junta soldada por US [18].	51
Figura 2-20 Técnica de ensaio radiográfico (RAD) [19].	51
Figura 5-1 Energia de soldagem CP1 a 4.....	65
Figura 5-2 Energia de soldagem CP5 a 6B.....	66
Figura 5-3 Energia de soldagem CP7 a 8.....	66
Figura 5-4 Passe de raiz (curto-circuito).....	68
Figura 5-5 Passe de raiz (projetada).	68
Figura 5-6 Passe de enchimento (curto-circuito).....	69
Figura 5-7 Passe de enchimento (projetada).	69
Figura 5-8 Milímetros reprovados por PM no CP de Ø 9,5".	71
Figura 5-9 Milímetros reprovados por US no CP de Ø 9,5".....	71
Figura 5-10 Milímetros reprovados por RAD no CP de Ø 9,5".....	72
Figura 5-11 Milímetros reprovados por PM no CP de Ø 12".....	72
Figura 5-12 Milímetros reprovados por US no CP de Ø 12".....	73
Figura 5-13 Milímetros reprovados por RAD no CP de Ø 12".....	73
Figura 5-14 Passe com processo MIG/MAG curto-circuito (imagem referente a 100 cm ² do CP1).....	76
Figura 5-15 Passe com processo MIG/MAG projetada – pulsada (imagem referente a 100 cm ² do CP5).	76
Figura 5-16 Passe com processo MIG/MAG projetada – pulsada (imagem referente a 100 cm ² do CP7).	77
Figura 5-17 Ensaio de PM do CP3 com indicação de falta de fusão lado interno (por Rodrigo Ribeiro).....	79
Figura 5-18 Ensaio de PM do CP8 com indicação de falta de fusão lado interno (por Rodrigo Ribeiro).....	79

Figura 5-19 Ensaio de RAD do CP5 com indicação de falta de fusão (por Rodrigo Ribeiro).	80
Figura 5-20 Ensaio de RAD do CP3 com indicação de falta de penetração (por Rodrigo Ribeiro).	81
Figura 5-21 Ensaio de RAD do CP6B com indicação de porosidade (por Rodrigo Ribeiro).	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 Fontes modernas de energia para soldagem [13].	35
Tabela 2-2 Classificação dos tipos e métodos de penetração/remoção [16]....	43
Tabela 4-1 Composição química do tubo (especificação API 5L X56) [8]	57
Tabela 4-2 Composição química e propriedades mecânicas mínimas do eletrodo sólido [22].	58
Tabela 4-3 Tabela de variáveis executadas.	60
Tabela 5-1 Acompanhamento de soldagem.	64
Tabela 5-2 Quantidade de respingo por área (CP1, CP5 e CP7).	78

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS

<u>"</u> :	<u>Polegada</u>
<u>%</u> :	<u>Por Cento</u>
<u>°</u> :	<u>Graus</u>
<u>°C</u> :	<u>Graus Celcius</u>
<u>Δ</u> :	<u>Variação do Comprimento</u>
<u>≤</u> :	<u>Menor ou Igual</u>
<u>≥</u> :	<u>Maior ou Igual</u>
<u>Ø</u> :	<u>Diâmetro</u>
<u>A</u> :	<u>Ampère</u>
<u>ABENDI</u> :	<u>Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos e</u> <u>Inspeção</u>
<u>API</u> :	<u>American Petroleum Institute</u>
<u>Ar</u> :	<u>Argônio</u>
<u>ARBL</u> :	<u>Alta Resistência Baixa Liga</u>
<u>ASME</u> :	<u>American Society of Mechanical Engineers</u>
<u>ASNT</u> :	<u>American Society For Nondestructive Testing</u>
<u>AWS</u> :	<u>American Welding Society</u>
<u>C</u> :	<u>Elemento Químico Carbono</u>
<u>CI</u> :	<u>Corrente Constante</u>

<u>cm²:</u>	<u>Centímetros Quadrados</u>
<u>CO₂:</u>	<u>Dióxido de Carbono</u>
<u>CP:</u>	<u>Corpo de Prova</u>
<u>CV:</u>	<u>Tensão Constante</u>
<u>D₀:</u>	<u>Dia 0</u>
<u>D₁:</u>	<u>Dia 1</u>
<u>D₂:</u>	<u>Dia 2</u>
<u>END:</u>	<u>Ensaio Não Destrutivo</u>
<u>EPS:</u>	<u>Especificação de Procedimento de Soldagem</u>
<u>GMAW:</u>	<u>Gas Metal Arc Welding</u>
<u>HeatInput:</u>	<u>Energia de Soldagem</u>
<u>HPH:</u>	<u>High Pressure Housing</u>
<u>HSLA:</u>	<u>High Strength Low Alloy</u>
<u>Hz:</u>	<u>Hertz</u>
<u>in:</u>	<u>Inch (polegada)</u>
<u>J:</u>	<u>Joule</u>
<u>k:</u>	<u>Quilo</u>
<u>lbs:</u>	<u>Libras</u>
<u>LP:</u>	<u>Líquidos Penetrantes</u>
<u>MIG/MAG:</u>	<u>Metal Inert Gas / Metal Active Gas</u>

MM: Milhões

mm: Milímetros

MPa: Mega Pascal

PM: Partículas Magnéticas

psi: Pound Square Inch

PSL: Product Specification Levels

RAD: Radiografia

RQPS: Registro de Qualificação de Procedimento de Soldagem

Stick-Out: Extensão do Eletrodo (MIG/MAG)

STT: Surface Tension Transfer

US: Ultra-Som

V: Volt

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	ii
AGRADECIMENTOS	iii
CURRICULUM VITAE	iv
RESUMO	v
ABSTRACT.....	vi
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS	x
SUMÁRIO	xiii
1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.	19
2.1 Marcos da soldagem.....	19
2.2 Aços alta resistência baixa liga (ARBL).....	23
2.3 Tubos API 5L	24
2.4 Processo de soldagem MIG/MAG.....	25
2.4.1 Equipamentos e acessórios.....	25
2.4.2 Modos de transferência.	28
2.4.3 Segurança.	33
2.5 Fontes de energia.	34
2.6 Gases de proteção.	37
2.7 Ensaios não destrutivos (END).....	39
2.7.1 Líquidos penetrantes (LP).....	41
2.7.2 Partículas magnéticas (PM).....	44
2.7.3 Ultrassom (US).	48
2.7.4 Radiografia (RAD).	51
2.7.5 Descontinuidades planares e volumétricas.	53
3 OBJETIVOS.....	55
4 MATERIAIS E MÉTODOS.	56
4.1 Tubos API 5L X56.	56
4.2 Consumíveis.	57
4.2.1 Eletrodo sólido.....	58
4.3 Execução dos CPs.	59
4.4 Equipamentos.....	60
4.5 Critérios de aceitação.	60
4.6 Acompanhamento de soldagem.	61
4.7 Ensaios não destrutivos.....	62
4.8 Quantificação de respingos.....	63
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	64
5.1 Energia de soldagem.....	64
5.2 Ensaios não destrutivos.....	70
5.2.1 Influência do soldador.....	74
5.3 Quantificação de respingo.	75
5.4 Variação de altura de arco.....	78

5.5	Importante constatação.....	82
6	CONCLUSÕES.....	84
	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	86
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:	87
	Anexo I – Especificações de soldagem.	89
	Anexo II – Relatório de partículas magnéticas.....	90
	Anexo III – Relatório de gamagrafia.	92
	Anexo IV – Certificado do eletrodo sólido.	95
	Anexo V – Fotos de realização do ensaio por líquidos penetrantes.	96
	Anexo VI – Critérios de aceitação.	97

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

As atividades petrolíferas e as novas descobertas exigem grande desenvolvimento e aperfeiçoamento técnico devido às dificuldades encontradas nas explorações, em especial do pré-sal, em razão das condições geológicas que exigem novas gerações de equipamentos como os *risers*, bem como tubulações, sondas e ferramentas utilizadas nas instalações dos poços de produção que precisam suportar esforços ainda maiores do que os já praticados. Um dos equipamentos utilizados no sistema de poço de produção é o alojador de alta pressão (*High Pressure Housing* – HPH), que suporta toda a coluna, desde a superfície do solo marinho até a reserva de petróleo. O HPH atualmente chega a ter capacidade de carga de 8 (oito) MM lbs e pressão de 15.000 psi [1], sendo que a primeira seção de tubo é soldada no HPH e, em consequência dos esforços do conjunto, a solda deste componente é de alta responsabilidade, pois a sua falha não só inutilizaria o poço, como poderia acarretar desastres ambientais.

Na indústria, um dos processos de soldagem utilizados, em conjunto com outros neste equipamento, é o GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), também conhecido como MIG/MAG (*Metal Inert Gas / Metal Active Gas*), sendo o modo de transferência do metal de adição, basicamente, de três tipos distintos: curto-circuito, globular e *spray* [2]. No processo de fabricação, foi indicada a utilização do MIG/MAG por curto-circuito por possuir especificações de procedimento de soldagem (EPS) aprovadas, com o respectivo registro de qualificação de procedimento de soldagem (RQPS) e demais requerimentos de

norma para execução de soldagem. Apesar disso, em um período de 12 meses, quando realizado ensaio não destrutivo (END) por ultrassom, mais de 40 juntas obtiveram resultado não satisfatório, sendo reprovadas por falta de fusão. Para reduzir as não conformidades e atender as especificações de projeto, que não permitem esse tipo de defeito, foram realizados testes utilizando processo de soldagem MIG/MAG, sendo o modo de transferência projetado (pulsado) uma variante dos processos citados, com vistas a identificar a influência do modo de transferência metálica com foco nos índices de descontinuidades tipo falta de fusão das juntas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.

2.1 Marcos da soldagem.

O fato de poucas evidências (peças de ferro ou aço) conseguirem sobreviver ao ataque de corrosão por longos períodos de tempo resultou em poucos registros ou provas diretas para conseguir determinar com maior precisão quando a soldagem teve origem. No entanto, o trabalho com endurecimento de aços, um estágio avançado no trabalho com metais, cujo conhecimento provavelmente levou séculos para ser obtido, era comumente praticado há mais de trinta séculos na Grécia, sendo mencionado por Homero.

Outro registro muito antigo, a Bíblia, já citava no Velho Testamento homens que trabalhavam com metais, evolução do conhecimento pelos processos de metalurgia que vem sendo desenvolvido. A seguir, estão alguns marcos da soldagem [3]:

1836 - Edmund Davy descobre o gás acetileno;

1856 - Acredita-se que o físico James Joule (Inglaterra) tenha descoberto o princípio da solda por resistência;

1881 - De Meritens (França) inventa uma das primeiras máquinas de soldagem a arco com eletrodo de carvão;

1885 - Benardos & Olszewski (Rússia) desenvolvem a soldagem a arco com eletrodo de carvão;

1889-90 - C. L. Coffin (EUA) realiza a primeira soldagem a arco com eletrodos de fio desencapado;

1895 - Konrad Roentgen (Bavária) observou os efeitos da radiação X ao passar uma corrente elétrica através do tubo de vácuo;

1900 - Hans Goldschmidt, Goldschmidt AG da Alemanha Ocidental (Orgetheus Inc. EUA), descobriu que a reação exotérmica entre uma mistura de pó de alumínio e um óxido de metal pode ser iniciada por uma fonte de calor externa para a solda aluminotérmica;

1904 - Avery (EUA) inventou um cilindro portátil para faróis de automóveis alimentados de acetileno, produzido pela Companhia Acetileno Concentrado (CAC);

1907-10 - O. Kjellberg (Suécia) desenvolveu eletrodos revestidos;

1909 - Schonherr inventou o sistema de arco de plasma, usando um vórtice de gás estabilizado;

1917 - Soldagem a arco passa a ser utilizada durante a I Guerra Mundial para reparar motores em 109 navios alemães capturados; após os reparos, os barcos foram usados para enviar 500.000 tropas dos EUA para a França;

1919 - American Welding Society é fundada por Comfort A. Adams;

1924 - H. H. Lester usa a radiografia para examinar peças vazadas para serem instaladas na primeira central elétrica a vapor dos EUA para 8,3 MPa (1200 psi) de pressão para a Edison Company Boston;

1926 - A. O. Smith Co. (EUA) introduz o revestimento extrudado sólido na blindagem de metal para eletrodos de solda de arco;

1926 - A Stoodly (EUA) são concedidas as primeiras patentes para fio fluxado;

- 1926 - M. Hobart e Devers P. K. emitem patentes separadas nos Estados Unidos para desenvolvimentos em soldagem a arco utilizando hélio como gás de proteção;
- 1927 - Lindberg obtém primeiro voo transatlântico solo em monoplane Ryan; fuselagem com base estrutural toda soldada de tubos de liga de aço;
- 1928 - American Welding Society, precursor do D1.1, Código de Soldagem Estrutural – Aço, publica o primeiro código de soldagem estrutural, para soldagem por fusão e gás de corte em construção de edifícios;
- 1934 - API-ASME (EUA) emitem conjuntamente o Código de Vasos de Pressão;
- 1935 - Linde Air Products Co. (EUA) desenvolve a soldagem por arco submerso;
- 1941 - Meredith (EUA) inventa o Gas Tungsten Arc Welding ("Heliarc");
- 1941 - Primeiro tanque americano de 60 toneladas concluído. A soldagem torna-se crítica para a produção de navios, aviões, tanques blindados e armas na Segunda Guerra Mundial;
- 1949 - O primeiro de todos os automóveis soldados (Ford) foi produzido usando soldagem por resistência;
- 1950 - Air Reduction Sales Company (EUA) comercializa a primeira patente de transferência *spray* de *Gas Metal Arc Welding* (GMAW), por Muller, Gibson e Anderson;
- 1950 - Soldagem por eletro-escória usada pela primeira vez para a produção na Rússia;
- 1954 - Lincoln Electric (EUA) introduz o arame tubular autoprotetido;
- 1955 - Linde, Union Carbide Corporation (EUA) desenvolve e introduz o arco constrito (plasma);

- 1956 - Soldagem por fricção é inventada (Rússia);
- 1957 - Dióxido de carbono (CO₂) é utilizado para transferência por curto-circuito, GMAW (EUA, Grã-Bretanha e Rússia);
- 1960 - Primeiro feixe de laser é produzido usando um cristal de rubi;
- 1960 - Airco (EUA) introduz GMAW pulsado;
- 1962 – A Arcos (Bélgica) é atribuída a patente de soldagem eletrogás;
- 1964 – Manz (EUA) patenteia o controle do processo de “Hot wire” processos de soldagem e “one knob” (Synergic Control) GMAW;
- 1965 - Apollo 10, nave espacial soldada, é lançada à Lua (EUA);
- 1967 - Frank Pilia (EUA), pela Linde, Union Carbide Corporation, no Golfo do México, solda o primeiro gasoduto submarino;
- 1969 - Linde, Union Carbide Corporation introduz o arco plasma para o processo de revestimento com fio-quente (*hot wire*);
- 1970 - Transistor-controlador de energia de soldagem com inversor é introduzido (vários lugares do mundo);
- 1980 - Circuitos semicondutores e circuitos de computadores são usados para controlar a soldagem e os processos de corte (vários lugares do mundo);
- 1983 - American Welding Institute (AWI) é estabelecido como o centro americano de aplicação e tecnologia da soldagem;
- 1990 - Domínio na tecnologia de inversores de alimentação resultam no tamanho e no peso do equipamento reduzidos (vários lugares do mundo);
- 1991 - Friction Stir Welding é introduzido e usado com sucesso para soldar as séries de ligas de folha de alumínio 2000, 5000, 6000;

1993 - Processo de feixe de laser usado para soldar o Abrams - Tanque Principal de Combate do Exército dos EUA - é roboticamente controlado;

1996 - O primeiro equipamento de soldagem por fricção da ESAB, SuperStir™, é entregue para a Marine Aluminium da Noruega [3].

2005 - Fronius lança no mercado o CMT (Cold metal transfer), que é um novo processo MIG/MAG que permite junção térmica de aço e alumínio na soldagem de chapas finas [4].

2012 - Maiores cuidados com o ambiente de trabalho do soldador; foram emitidas duas patentes para capacetes que filtram o ar e simultaneamente resfriam utilizando um módulo de refrigeração termo elétrica [5].

Todos estes processos criados desde o começo da história da soldagem, veem sendo aprimorados e desenvolvidos propiciando melhores formas de unir partes, sejam elas possíveis devido ao avanço da tecnologia ou necessidade de mercado. Isto garante o contínuo crescimento e desenvolvimento desta grande área que é a soldagem.

2.2 Aços alta resistência baixa liga (ARBL).

Os aços ARBL, ou high strength low alloy (HSLA) em inglês, tipicamente com menos de 0,2% de carbono (C) e podem ser combinados em pequenas quantidades de outros elementos de liga, como cromo, níquel, molibdênio, vanádio e cobre, sendo diferenciados de outras ligas por serem concebidos para atender requisitos específicos de propriedades mecânicas, e não de composição química [6]. Os ARBL são comumente fornecidos na condição como laminado podendo também serem fornecidos por laminação controlada, normalizada ou

precipitação endurecida [7]. Estas melhores propriedades mecânicas permitiram o desenvolvimento, por exemplo, de tubos com paredes mais finas para mesma pressão de trabalho ou mesmo para aumento de pressão, dada igual espessura de parede. Tais possibilidades permitem reduções de custos envolvidos com transporte, e aumento de produção, entre outros fatores.

2.3 Tubos API 5L.

Os tubos API 5L são utilizados em sistemas de transporte em indústrias de petróleo e gás natural, e são fabricados com ou sem costura em aço carbono [8]. As classificações destes tubos são dadas pelo limite de escoamento, sendo que, quando precedidos por X, indicam utilização de alta resistência. A norma API 5L subdivide o fornecimento desses tubos em níveis de especificação de produto (PSL – Product Specification Levels) PSL 1 e PSL 2. O nível PSL 1 estabelece um padrão de qualidade com relação a tolerâncias dimensionais, tipo de fabricação, composição química, entre outros. No nível PSL 2, a norma estabelece outros requisitos obrigatórios, além dos determinados no PSL 1 para composição química, ductilidade, propriedades de resistência e ensaios não destrutivos [8].

Os tubos desta especificação fornecidos com costura, sendo realizada com ou sem metal de adição, devem ser aprovados conforme especificação API 5L através de ENDs, ensaios destrutivos, além de atendimento à composição química.

2.4 Processo de soldagem MIG/MAG.

A união das partes pelo processo de soldagem MIG/MAG é produzida pelo calor do arco elétrico gerado entre o consumível que será depositado e a peça de trabalho, ou seja, o metal de base. A proteção é fornecida externamente de modo gasoso, podendo ser uma mistura de gases ou não, ativos ou inertes, usando-se o termo MIG para o uso de gás inerte e MAG para gás ativo. Esta proteção é necessária para evitar oxidação ou contaminação proveniente da própria atmosfera. As características básicas do processo estão mostradas na Figura 2-1 [9].

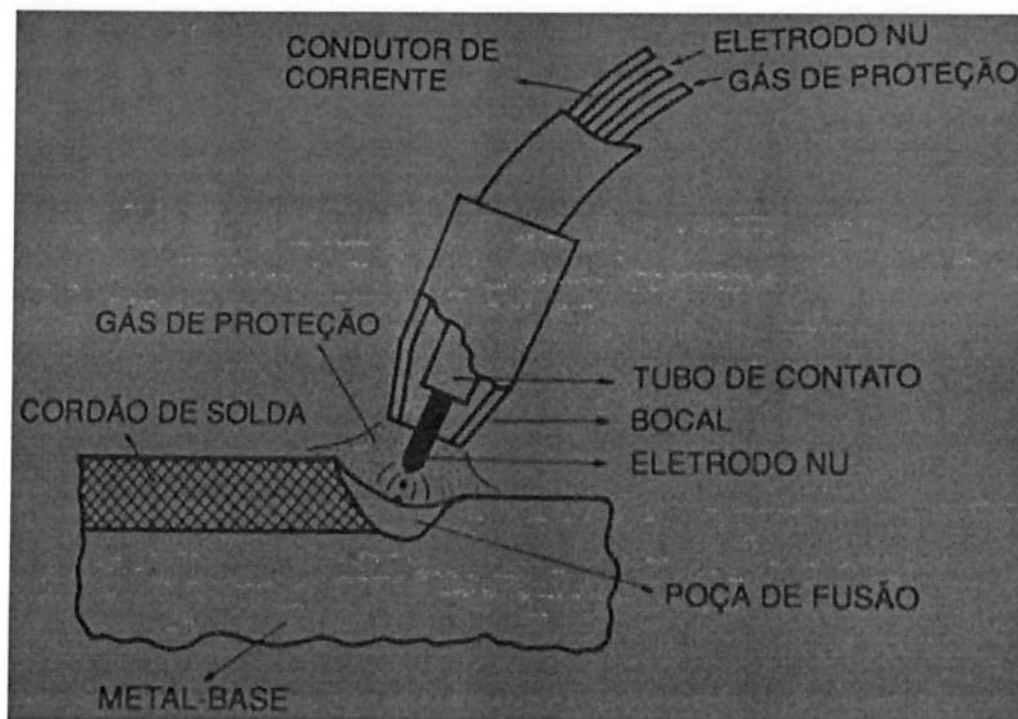


Figura 2-1 Esquema básico MIG/MAG [9].

2.4.1 Equipamentos e acessórios.

Neste processo, são utilizadas tochas e acessórios, sendo que a tocha de soldagem é responsável por guiar o arame que será utilizado na deposição

(consumível), pela proteção gasosa na área de transferência e também por conduzir ao arame a energia para abertura do arco entre o consumível e o metal de base. Para diversos tipos de aplicação, foram desenvolvidos diversos tipos de tochas, seja para maiores níveis de corrente, com tochas mais robustas; ou para menores níveis de corrente, com tochas menores e mais leves, facilitando também a soldagem em regiões com acesso restrito. Nestes dois casos, o resfriamento por água ou ar, ponteiros curvas ou retas, poderá ser variável para cada aplicação. A Figura 2-2 representa uma típica tocha de MIG/MAG [9].

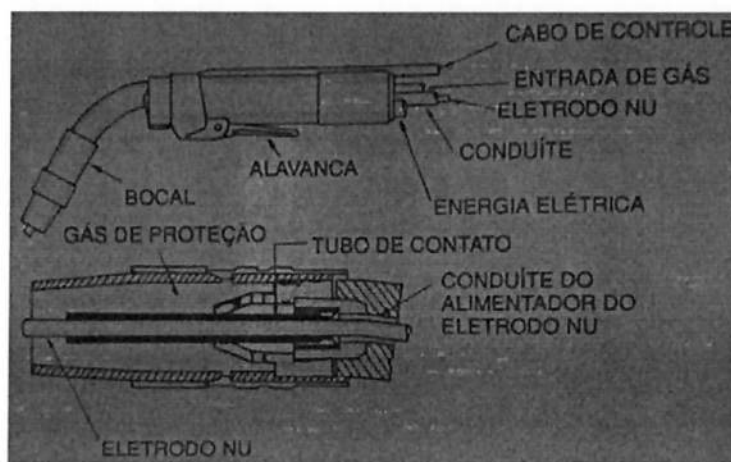


Figura 2-2 Tocha típica de MIG/MAG [9].

Além da tocha e de seus acessórios, basicamente, a estação de trabalho é composta de um motor que controla a alimentação de arame (de forma que a velocidade é pré-determinada), uma fonte de energia e gases de proteção, além dos cabos que propiciam as interligações. A Figura 2-3 [10] apresenta como exemplo uma estação de soldagem MIG/MAG semiautomatizada, uma vez que o soldador controla apenas parte do processo. Durante a soldagem, ele não possui controle da velocidade de alimentação do arame, mas o possui sobre a

velocidade de deslocamento, inclinação da tocha, distância entre a tocha e o local de interesse, entre outros. O processo pode facilmente ser automatizado, dependendo da aplicação.

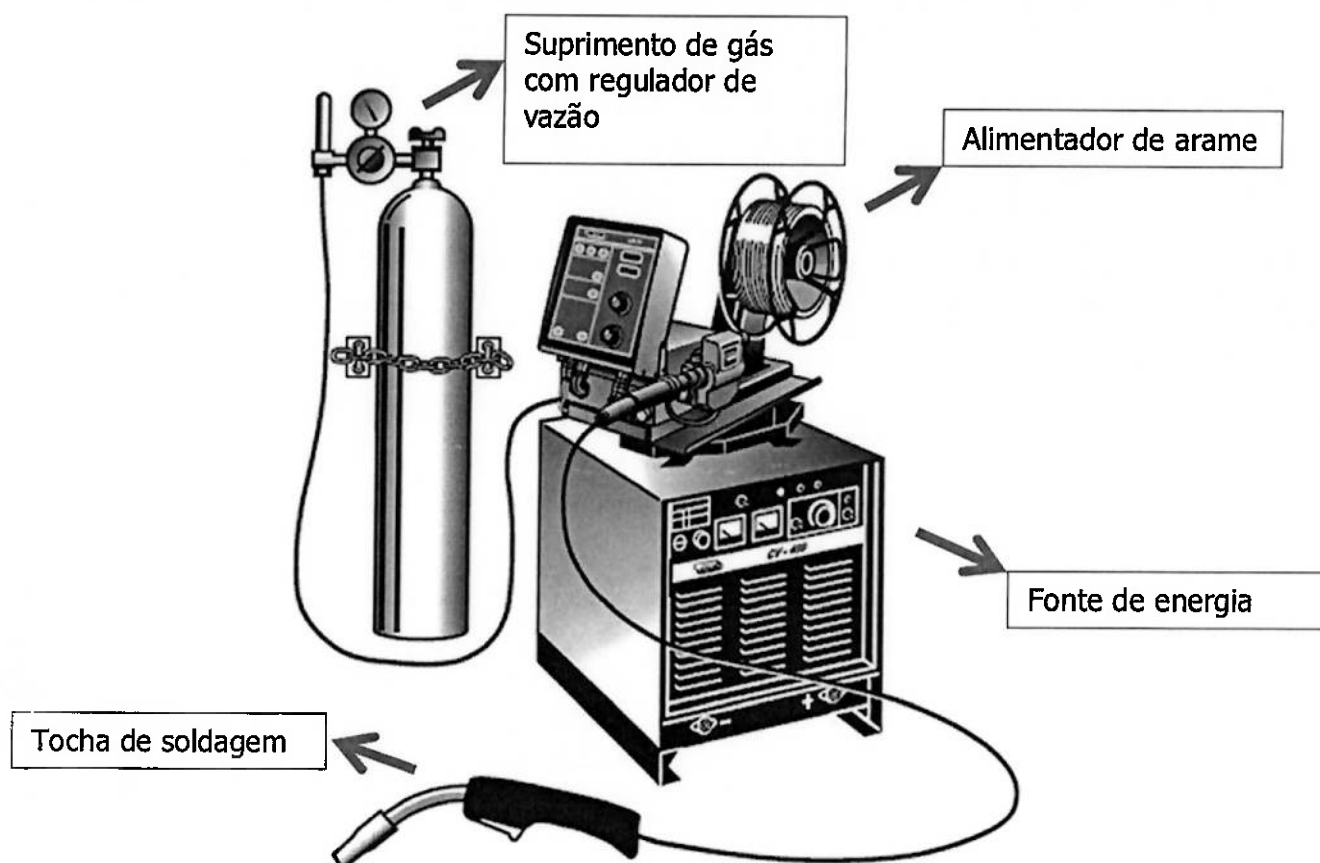


Figura 2-3 Estação de soldagem semiautomatizada [10].

Quando o MIG/MAG foi desenvolvido, considerava-se fundamental o uso de altos valores de corrente, pequeno diâmetro de arame e uso de gás inerte [11]. Desde então, têm sido desenvolvidas novas formas de soldagem ligadas diretamente com a aplicação que cada processo exige, o que inclui trabalho com baixas correntes na transferência por curto-circuito ou uso de corrente pulsada direta, gases ativos que resultam em juntas com melhores

propriedades em alguns metais, e uso dessa técnica para revestimento, utilizando diâmetros maiores do que os praticados inicialmente [12].

2.4.2 Modos de transferência.

No processo MIG/MAG, a forma como o metal fundido do eletrodo é transferido para a peça de trabalho depende da interação de forças complexas que envolvem diversos fatores, como gás de proteção, tipo de corrente, tensões, *stick-out* (extensão do eletrodo), elementos químicos contidos no eletrodo, diâmetro do eletrodo, fontes de potência, pressões do ambiente, entre outros. Um dos mecanismos de transferência do metal através do arco surge, principalmente, por influência de forças eletromagnéticas sobre a ponta do eletrodo fundido e o arco plasma. Essas forças magnéticas, somadas à vaporização do metal, interagem com a corrente, criando um campo magnético coaxial na ponta do eletrodo onde uma componente de força comprime a parte fundida do eletrodo (pinçamento). A gota individual também é submetida à força mecânica do jato contínuo do fluxo de gás, o qual desprende a gota fundida do eletrodo [11].

Os três modos de transferência mais comumente utilizados no processo MIG/MAG são por curto-circuito, globular e “*spray*” conforme Figura 2-4 [9] respectivamente.

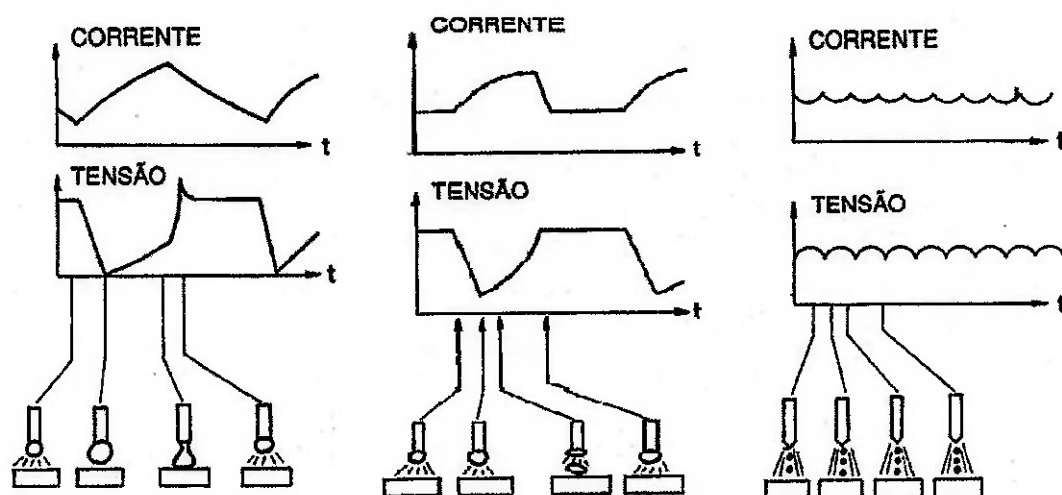


Figura 2-4 Principais modos de transferência [9].

No curto-circuito a transferência gera baixas correntes de soldagem e diâmetro do eletrodo associado com o processo. Esse tipo de transferência produz poças de solda pequenas e de resfriamentos mais acelerados, comparando-as com os outros modos, o que se torna adequado à soldagem de juntas fora de posição, como a sobre-cabeça e a soldagem de seções finas. A transferência do metal do eletrodo para o metal de base não ocorre na abertura do arco, mas somente durante o momento em que o eletrodo entra em contato com a poça de fusão

Figura 2-5.

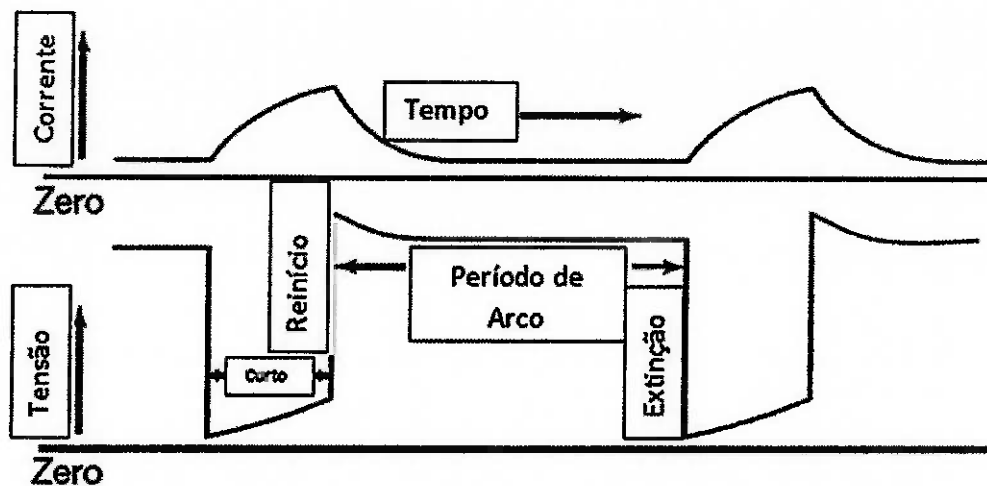


Figura 2-5 Oscilograma (curto-circuito) [10].

No modo de transferência globular, são utilizadas maiores correntes e tensão do que na transferência por curto-circuito e, desta forma, passa a formar gotas - geralmente de diâmetro maior do que o do arame - onde a ação da gravidade atua de forma relevante e, por isso, limita uma melhor condição de transferência na posição plana.

A transferência por spray é mais estável, menor índice de respingos e é produzido quando utilizada proteção gasosa rica em argônio ou gases inertes. Necessita o uso de corrente direta com eletrodo positivo e nível de corrente acima de um valor crítico denominado corrente de transição, pois, abaixo deste nível de corrente, a transferência ocorre no modo globular. Com valores acima da corrente de transição, a transferência ocorre em pequenas gotas que são formadas e destacadas a uma taxa de centenas por segundo, sendo aceleradas axialmente através da abertura do arco.

A corrente de transição é proporcional ao diâmetro do eletrodo, e, em menor grau, à extensão do eletrodo [6].

Além desses três modos de transferência, é possível citar algumas variações, como transferência projetada (pulsada) e o curto-circuito com controle STT™:

A transferência projetada exige alto controle de variáveis no momento da transferência, atuando no ciclo de corrente entre os níveis de pico e vale, ou seja, pontos de máximo e mínimo. A transferência do metal ocorre durante o nível de pico de alta energia na forma de uma única gota fundida Figura 2-6 [10]. A transferência pulsada foi desenvolvida visando à redução e ao controle de dois fatores, sendo eles a falta de fusão e o respingo durante a soldagem, os quais são comuns nas transferências globulares e por curto-circuito. Além desses fatores, tal processo apresenta melhor acabamento, maiores velocidades de soldagem, possibilita a soldagem fora de posição, entre outros aspectos positivos.

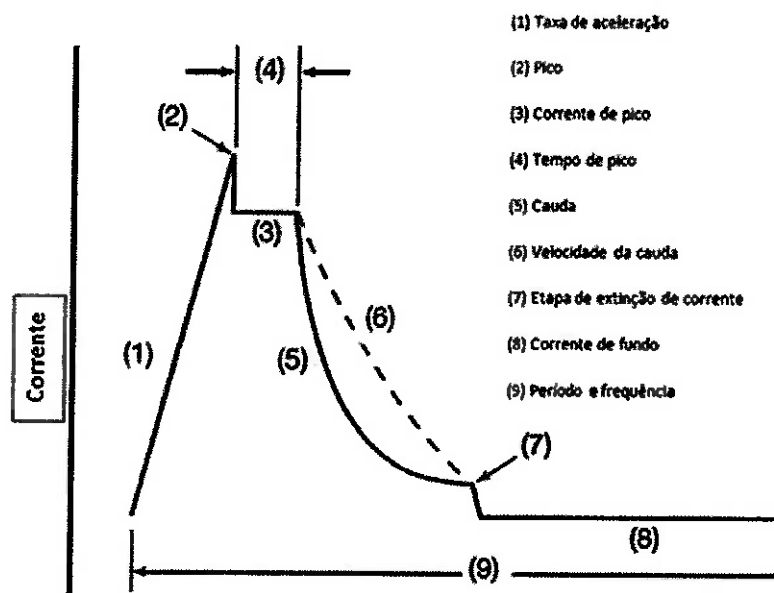


Figura 2-6 Variação de corrente no tempo (transferência projetada - pulsada) [10].

STT™ (Surface Tension Transfer – Transferência por Tensão Superficial) é um controle do modo de transferência de baixa energia de soldagem incorporado à alta velocidade de resposta da fonte de energia, atendendo de forma instantânea as necessidades do arco, mantendo, dessa forma, o arco mais estável, apesar das variações de altura, entre outros [10]. Assim, as alturas de arco que costumam oscilar nos processos manuais terão menor impacto na soldagem por causa do controle executado pela fonte de energia (Figura 2-7).

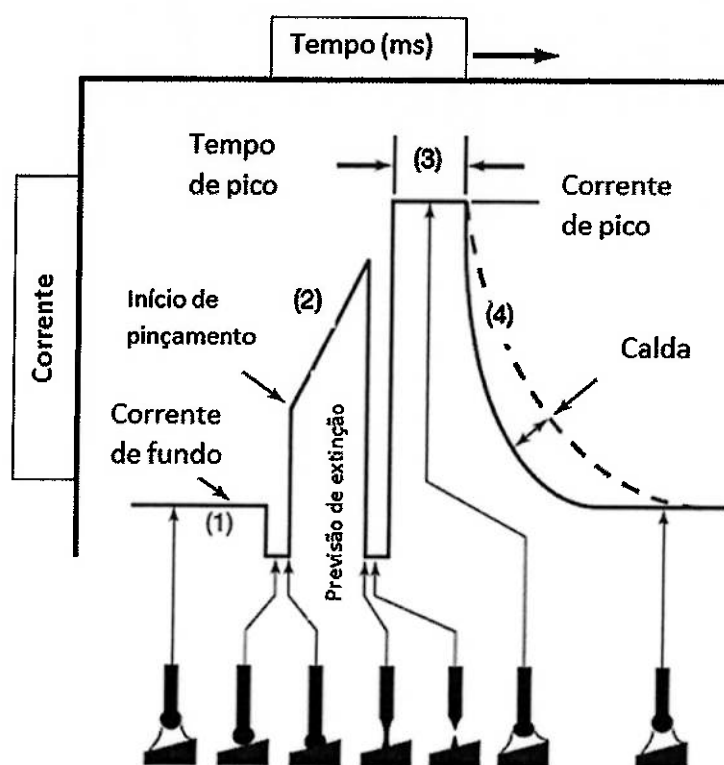


Figura 2-7 Corrente (transferência STT™) [10].

Algumas das variáveis importantes do processo MIG/MAG que afetam a penetração, a geometria da deposição e a qualidade da soldagem são: corrente de soldagem, polaridade, tensão do arco, velocidade de soldagem, extensão do eletrodo, orientação do eletrodo, gás de proteção e diâmetro do eletrodo. O

conhecimento e o controle dessas variáveis são essenciais para a produção de soldas com qualidade satisfatória e, como não são completamente independentes, a mudança de uma variável geralmente requer a alteração de uma ou mais outras variáveis para obter o resultado esperado. Na indústria, o conhecimento técnico e a experiência são necessários na seleção da combinação ótima devido à grande variedade de aplicações e complexidade das forças envolvidas na soldagem.

2.4.3 Segurança.

A seguir, estão os maiores riscos envolvidos quanto à segurança no processo MIG/MAG:

Inalação de fumos e gases: os fumos e os gases são prejudiciais à saúde, de maneira que a ventilação sempre é requerida para evitar que esses produtos possam ser potencializados, dependendo dos materiais utilizados;

Alta voltagem: a eletricidade com alta voltagem pode causar morte, portanto é necessário o uso de cabos adequados para a corrente aplicada e o uso de equipamentos de proteção individual para o soldador e os envolvidos;

Radiação eletromagnética: a radiação gerada pelo arco podem danificar os olhos e ocasionar queimaduras da pele. Em especial, um dos raios gerados é o ultravioleta, sendo necessário também o uso de equipamentos de proteção individuais e coletivos;

Ruído: os ruídos, quando presentes (variam com o modo de transferência), prejudicam os ouvidos, que necessitam do uso de proteção.

2.5 Fontes de energia.

A soldagem a arco necessita de um equipamento projetado especialmente para atender as necessidades de fornecimento de tensões e correntes adequadas ao processo, e este equipamento é denominado máquina de soldagem ou fonte de energia. Essas fontes geralmente possuem valores de tensão e corrente entre 10 V e 40 V (Volt), 10 A e 1200 A (Ampère), respectivamente [13].

Devido ao avanço da eletrônica, as fontes utilizadas na soldagem permitem controles que não eram possíveis em busca de soldas com melhores propriedades para cada aplicação. Com essa, evolução é possível, atualmente, dividir as fontes em dois grandes grupos: (1) as fontes convencionais em que os desenvolvimentos são das décadas de 1950 e 60 ou até antes, e (2) fontes modernas com eletrônica embutida desde a década de 1970 até os dias atuais [13].

Uma fonte de energia de soldagem precisa de três requisitos mínimos, além de requisitos de segurança, para atender as necessidades do processo. São eles [13]: Para cada processo de soldagem, produzir correntes e tensões adequadas; Permitir a seleção dos valores de tensão e/ou corrente para cada aplicação; Promover variação de corrente e tensão durante o processo de soldagem conforme a aplicação.

As fontes são utilizadas para converter a energia recebida pela rede de alimentação em energia necessária para soldagem, e também servir como meio de proteção aos soldadores, operadores e envolvidos com o processo de forma direta e indireta. A energia fornecida pela rede de alimentação costuma possuir tensões elevadas e corrente alternada, sendo função da fonte, em muitos

casos, converter em tensões menores e corrente contínua, mas podendo ser também em corrente alternada, pulsada ou outra que seja requerida ao projeto.

Em fontes convencionais, a tensão é reduzida geralmente por um transformador comum, e, se for necessária corrente contínua, um banco de retificadores é instalado na saída do transformador [13].

Nas fontes modernas, é possível citar as tiristorizadas, analógicas, chaveadas ou híbridas e inversoras com diferentes características de sinais de saída fornecidas de cada fonte [13], conforme Tabela 2-1.

Tabela 2-1 Fontes modernas de energia para soldagem [13].

Tiristorizada	Analógica	Chaveada ou Híbrida	Inversora
Resposta variável, mas relativamente lenta; estabilização da rede, ruído elevado.	Resposta muito rápida, flexibilidade, precisão, ausência de ruído, alta reprodutibilidade, mas com eficiência elétrica baixa se comparada a outras.	Resposta rápida (porém menor que a inversora), saída variável e reprodutível, estável.	Resposta rápida, saída variável e reprodutível, estabilidade e com eficiência elétrica muito boa.

As fontes inversoras, que cada vez ganham mais espaço, retificam a corrente alternada da rede diretamente e a corrente contínua de elevada tensão é convertida em corrente alternada de alta frequência por um sistema de transistores [13].

A evolução da eletrônica permite que a fonte de energia possua diferentes curvas de saída de tensão e corrente, que possibilitam usar uma mesma fonte para diferentes processos de soldagem e diferentes modos de transferência já pré-programados, além de interface via *software*. Esta viabiliza a coleta ou a

definição de dados, podendo ter uma curva característica de corrente constante ou de tensão constante, ao passo que, para fontes convencionais, todas essas funcionalidades não seriam possíveis em um único equipamento.

A Figura 2-8 demonstra a curva características de uma fonte com tensão constante (CV), mas também existem as de corrente constante (CI).



Figura 2-8 Curva característica de fonte CV [9].

Importante ressaltar que esses tipos de curvas características respondem de diferentes formas à variação do comprimento do arco, muito comum em processos manuais, por causa da oscilação da mão do soldador durante o processo. Essa forma de resposta em função da variação do comprimento do arco pode ser observada na Figura 2-9, em que "I" corresponde à variação do comprimento.

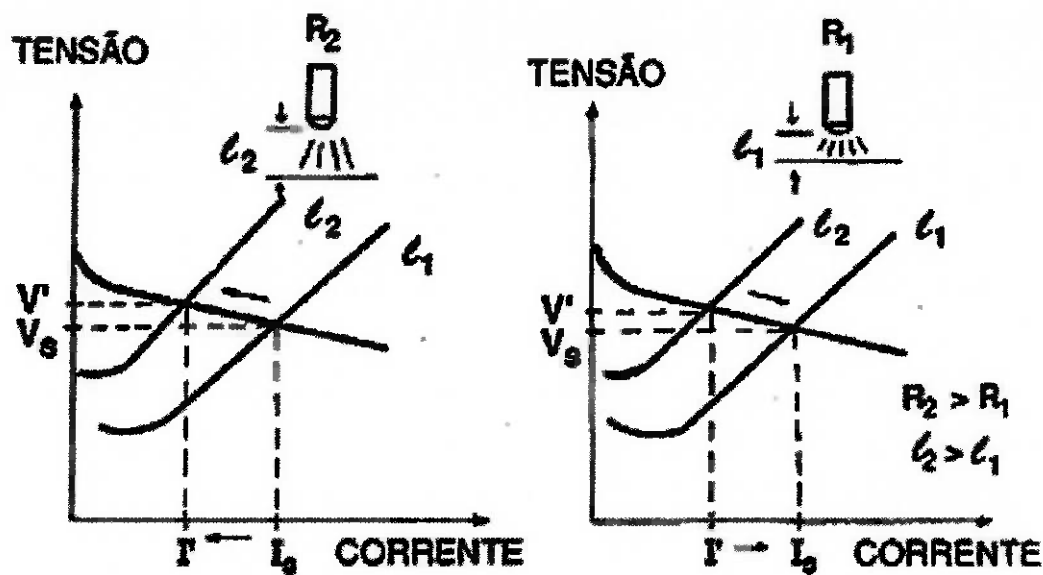


Figura 2-9 Efeito da variação do comprimento do arco na corrente de soldagem com fontes de CV [9].

Atualmente, existe grande variedade de opções de fontes de energia de soldagem com diferentes curvas características, ciclos de trabalho, taxas de deposição, dimensões, entre outros. Assim, para cada tipo de processo e resultado necessário, deve-se confrontar tais características e selecionar as que melhor se enquadram, ou mesmo desenvolver novas fontes para necessidades específicas.

2.6 Gases de proteção.

A seleção correta dos gases para a aplicação desejada é crítica na qualidade final da solda a ser obtida, e os critérios a serem considerados na seleção devem ser, entre outros, o material de deposição, as propriedades mecânicas desejadas, a espessura do metal de base e o tipo de junta, a condição do metal

de base (com óleo, oxidado, entre outros), o modo de transferência, a posição de soldagem, a penetração desejada, o tipo de acabamento e o custo [10].

O calor transmitido pelo arco provoca diferentes resultados na solda usando-se o mesmo gás de proteção, isso por causa do potencial de ionização dos componentes dos gases, da condutividade térmica e da reatividade química na poça de fusão. Os gases são subdivididos em inertes e ativos, sendo que a classificação de gases inertes indica que não haverá reação química com a poça de fusão, já nos ativos ocorre a reação [10].

O argônio é um dos gases inertes utilizados na proteção e, comparado ao hélio (gás também inerte e utilizado na indústria), possui menores condutividade térmica e energia de ionização – elevar um elétron de camada – o que resulta em uma penetração maior (Figura 2-10). O potencial de ionização é a energia necessária para remover um elétron da eletrosfera do átomo. Quanto maior o potencial de ionização maior será a energia e, maior penetração.

Um gás reativo utilizado no processo MAG é o dióxido de carbono (CO_2), o qual, em temperatura ambiente, é um gás inerte; porém, na presença da coluna de plasma formado na soldagem, reage com a poça, gerando o processo conhecido por dissociação, em que há liberação de carbono livre, monóxido de carbono e oxigênio que reagem com a poça, dissociando ou recombinao com a região mais fria do cátodo [10].

A utilização de combinações binárias ou terciárias dos gases é muito aplicada para a obtenção de características finais da solda, podendo ser observados na Figura 2-10 o contorno e a penetração resultantes.

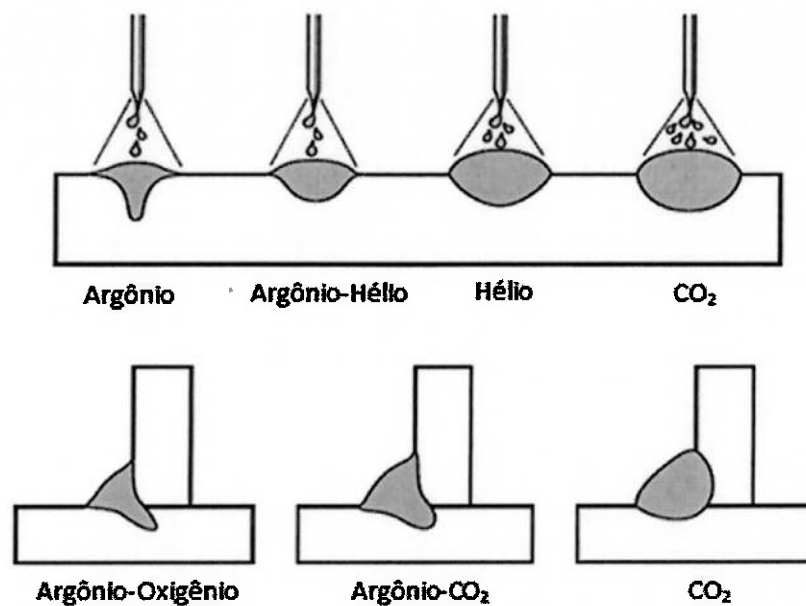


Figura 2-10 Contorno-penetração versus gases de proteção [10].

2.7 Ensaios não destrutivos (END).

Os ensaios não destrutivos são empregados nos mais diversos setores industriais, como aeronáutico, naval, aeroespacial, metal-mecânico, ferroviário, automobilístico, nuclear, óleo e gás, petroquímico, químico, eletromecânico, entre outros. Devido a esta grande gama de setores, existem variações de sensibilidade do ensaio, critérios de aceitação, tipo de ensaio, procedimentos e forma de execução. Assim, o objetivo destes ensaios é verificar a integridade do material conforme projeto, atestando condições mínimas – cada tipo de ensaio possui limitações que devem ser consideradas na especificação de qual é o mais adequado – permitindo que o material possa ser utilizado como produto para a próxima etapa, uma vez que estes ensaios não danificam o material.

No Brasil, o órgão responsável pela formação, qualificação e certificação de profissionais aptos a executarem ENDs é a Associação Brasileira de Ensaios Não

Destrutivos e Inspeção (ABENDI). A Petrobras exige em seus contratos que inspetores de ENDs sejam certificados através da ABENDI e estejam com suas certificações dentro do prazo de validade. Nos outros segmentos, muitos solicitam a mesma qualificação/certificação para garantia de qualidade na atividade, porém existem outros órgãos, no âmbito internacional, que certificam inspetores, como *The American Society For Nondestructive Testing* (ASNT – Sociedade Americana para Testes Não Destrutivos). Este também é aceito, em alguns casos, pela própria Petrobras, ou mesmo por segmentos que necessitam somente de pessoal com conhecimento das técnicas, sem estar vinculado a algum desses órgãos.

Dos ensaios mais comumente aplicados, pode-se destacar o ensaio por líquidos penetrantes (LP), partículas magnéticas (PM), ultrassom (US) e radiografia (RAD), amplamente aplicados nas etapas de fabricação, construção, montagem e manutenção, inclusive tendo suas aplicações determinadas por normas como a API 6A (*American Petroleum Institute* – Instituto Americano de Petróleo) [14]. Tal norma trata de especificações para alojadores e árvores de natal, em que, para cada nível de especificação do produto (PSL), determina quais ensaios e sensibilidades serão aplicadas para atestar a condição dos materiais. A ASME V (*The American Society of Mechanical Engineers* – Sociedade Americana de Engenheiros Mecânicos) [15] é um código internacional para caldeiras e vasos de pressão, sendo a seção V dedicada aos ENDs, tamanha sua importância de aplicação.

Os ENDS são aplicados conforme requisitos de projetos de fabricação, ou seja, normas de fabricação ou exigência de clientes, não sendo definidos de forma aleatória ou por convenção de técnicos e engenheiros.

2.7.1 Líquidos penetrantes (LP).

As primeiras aplicações de ensaio por LP da forma que se conhece hoje tiveram início nas inspeções de locomotivas nos Estados Unidos [16]. Elas ocorriam na inspeção de eixos e rodas, sendo as etapas, basicamente, constituídas de limpeza, aplicação de solução capaz de penetrar nas discontinuidades, secagem e aplicação de produto revelador, porém utilizando diferentes tipos de materiais para a detecção de discontinuidades superficiais em relação àqueles utilizados atualmente.

Na limpeza, eram utilizadas soluções de soda cáustica. Após essa etapa, a peça era mergulhada por longos períodos em óleo diluído em querosene e, em seguida, era retirado o óleo superficial e aguardava-se a secagem. No passo seguinte, era aplicado pó de giz diluído em álcool, sendo o último passo a aplicação de golpes com martelo para que o óleo retido nas discontinuidades fosse expelido, gerando as manchas que indicariam sua localização.

Após 1942, houve uma evolução importante para o ensaio por LP: o desenvolvimento do sistema “zyglo” de inspeção pela Magnaflux® [16]. Nele, acrescentavam-se pigmentos fluorescentes ao líquido penetrante que, quando expostos à luz ultravioleta, possibilitavam identificar discontinuidades menores

com maior facilidade devido à fluorescência. A partir da Segunda Guerra Mundial, o método foi se aprimorando até o estágio atual [16].

No estágio atual, os materiais utilizados para o ensaio por LP visam a melhor aproveitamento de suas propriedades, sendo que o líquido penetrante em si foi o que sofreu maior evolução nas detecções de descontinuidades para garantir resultados mais precisos, como melhores propriedades de tensão superficial, molhabilidade (a força de interação entre as moléculas do líquido com a superfície é maior do que a força de atração entre as moléculas desse mesmo líquido, de modo que ele se espalha pela superfície, em vez de se concentrar [16]), capilaridade (propriedade dos fluidos de subir em tubos muito finos [16]), viscosidade, volatilidade, ponto de fulgor, inércia química, toxidez, solubilidade, entre outros.

Atualmente, as etapas do ensaio são: preparação da superfície, limpeza, aplicação do líquido penetrante (que pode ser colorido ou fluorescente, e com métodos de remoção variados, dependendo da sensibilidade desejada para o ensaio, conforme Tabela 2-2), remoção do excesso de penetrante, secagem, aplicação do revelador e interpretação das indicações.

Tabela 2-2 Classificação dos tipos e métodos de penetração/remoção [16]

Tipo I – Fluorescente
Método A – Removível com água
Método B – Pós-emulsificante lipofílico
Método C – Removível com solvente
Método D – Pós-emulsificante hidrofílico
Tipo II – Colorido
Método A – Removível com água
Método C – Removível com solvente

O ensaio por LP é utilizado para a detecção de indicações abertas para a superfície, pois, caso contrário, o líquido penetrante será totalmente removido durante as etapas de execução, sendo este um dos principais limitadores deste tipo de ensaio.

Na indústria de óleo e gás (sistemas de cabeça de poço), pode-se citar a aplicação desse ensaio em preparações de juntas para soldagem, verificação da integridade da primeira deposição de soldagem denominada de passe de raiz, entre outras, uma vez que é um exame considerado de baixo custo e tempo de execução reduzido, se comparado com outros métodos, como ultrassom e radiografia, por exemplo.

2.7.2 Partículas magnéticas (PM).

O ensaio por PM é utilizado na localização de descontinuidades superficiais e sub-superficiais em materiais ferromagnéticos [17]. Entretanto, essa é uma das suas grandes limitações, uma vez que equipamentos em aço inox austenítico, por exemplo, largamente utilizados em diversos segmentos das indústrias, não podem ser ensaiados por este tipo de END por não serem ferromagnéticos.

Basicamente, o ensaio de PM consiste em magnetizar a área de interesse e aplicar uma partícula magnética, de forma que o campo de fuga (Figura 2-11) gerado por descontinuidades resulte em uma concentração destes particulados, sendo possível identificá-los.

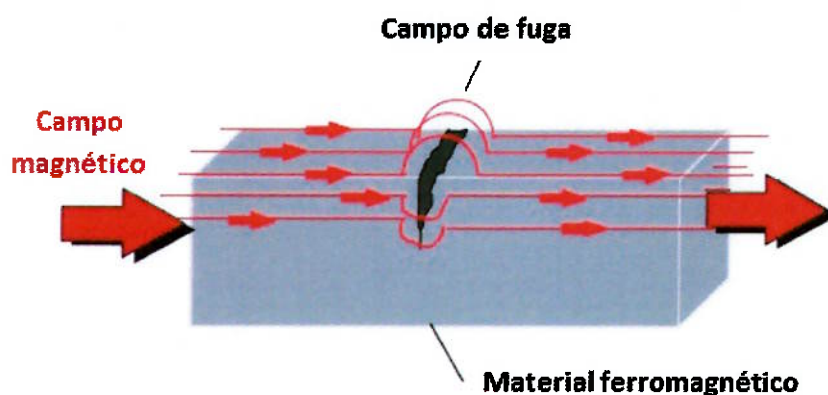


Figura 2-11 Campo de fuga em material ferromagnético [17].

Assim como no ensaio por LP, o por PM possui variações dos métodos de ensaios para níveis diferentes de sensibilidades desejados, sendo basicamente colorido ou fluorescente, e por via seca ou úmida com relação às partículas. As

principais técnicas de magnetização são: eletrodos, contato direto, bobina, yoke e condutor central.

A técnica dos eletrodos consiste basicamente na passagem de corrente elétrica pela peça por meio dos eletrodos, sendo que o tipo de campo gerado é o circular (Figura 2-12). A variação da distância entre os eletrodos influencia na indução do campo magnético.

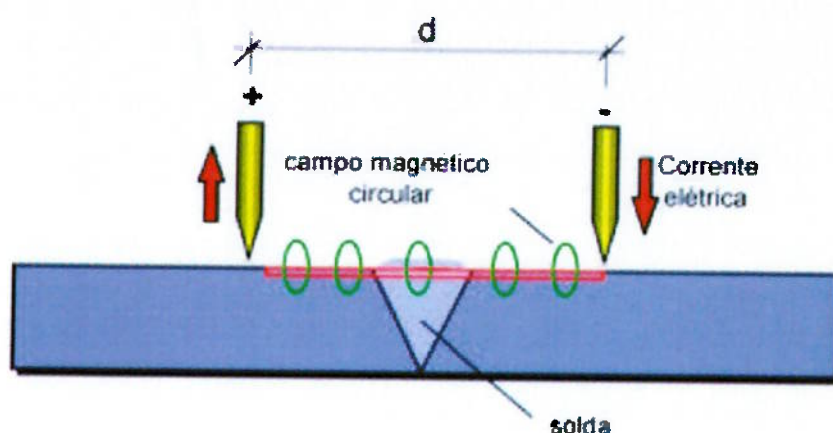


Figura 2-12 Técnica dos eletrodos (PM) [17].

Na técnica do contato direto, assim como na dos eletrodos, o campo magnético gerado é circular, porém a corrente é direcionada através das extremidades da peça, tendo maior aplicação em máquinas estacionárias e sistemas automatizados (Figura 2-13).

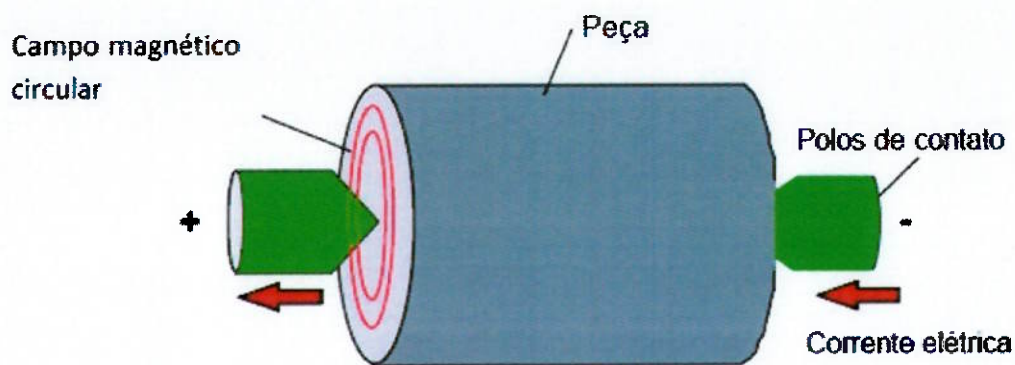


Figura 2-13 Contato direto (PM) [17].

Na técnica da bobina, a corrente elétrica é circulada através de solenoide ou bobina, e a peça a ser ensaiada é colocada no interior. Dependendo da corrente aplicada e do número de voltas de enrolamento que a bobina possui, o campo magnético terá variação de intensidade. O campo magnético gerado é o longitudinal (Figura 2-14).

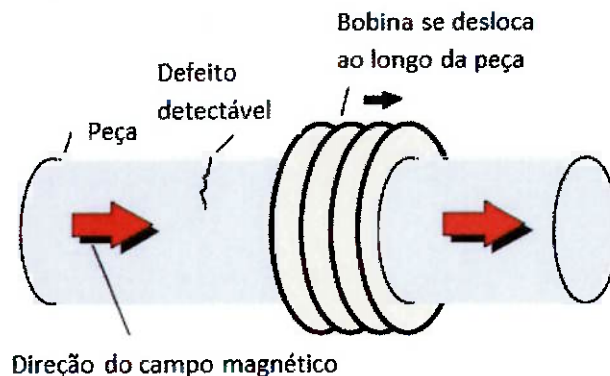


Figura 2-14 Bobina (PM) [17].

A técnica do yoke tem grande aplicação devido a sua versatilidade, principalmente nos equipamentos que possuem pernas articuláveis (Figura 2-15). Diferentemente dos processos citados anteriormente, nesta técnica, a corrente é circulada no yoke e não na peça a ser inspecionada, que passa a

receber o campo magnético gerado pelo eletroímã em forma de "U" invertido, criando, assim, um campo magnético paralelo à linha imaginária que une as duas pernas do yoke [17].

Por não promover a passagem da corrente elétrica na peça, o yoke não causa aquecimento dos pontos de contato, evitando também a abertura do arco elétrico, que danifica a peça, o que pode ocorrer na técnica dos eletrodos, por exemplo.

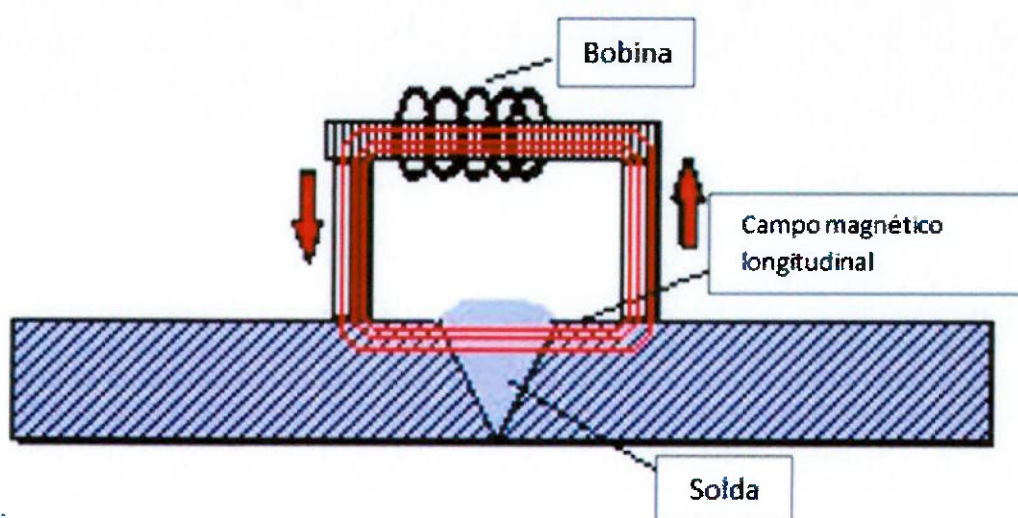


Figura 2-15 Yoke (PM) [17].

Com a técnica do yoke de pernas articuláveis, é possível inspecionar, por exemplo, juntas internas de tubos com diâmetros relativamente pequenos (ex. 9 polegadas), desde que acessível ao inspetor, sendo possível identificar a falta de fusão que está na superfície ou na sub-superfície ensaiada.

Na técnica do condutor central, utiliza-se um conjunto de cabos ou fios condutores no centro da peça a ser inspecionada, pelo qual passa corrente elétrica, gerando ao seu redor o campo magnético circular. Permite-se, desse modo, a aplicação das partículas magnéticas e a identificação das

descontinuidades, porém, a técnica está limitada a peças de geometria circular, como anéis, flanges, entre outros (Figura 2-16).

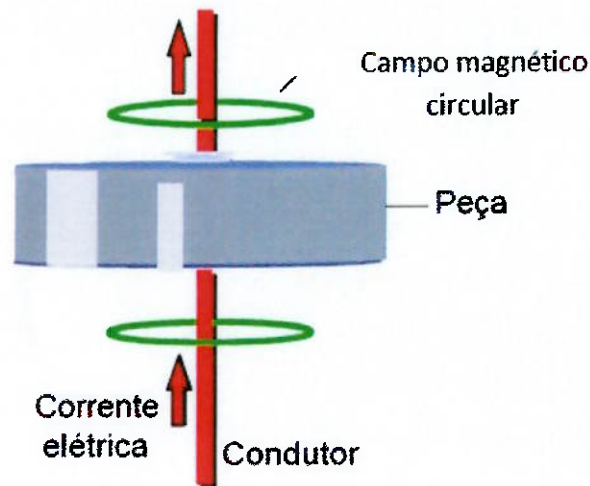


Figura 2-16 Condutor central (PM) [17].

2.7.3 Ultrassom (US).

O ensaio por US é muito utilizado nas indústrias que trabalham com materiais em aço carbono, uma vez que materiais não ferrosos apresentam maior dificuldade na execução do ensaio e requerem procedimentos especiais [18].

Por volta de 1945, devido à necessidade da indústria, o ensaio por US ganhou força e aprimoramento na detecção de descontinuidades, evitando a utilização de materiais que não atenderiam as condições de projeto. O US é capaz de detectar descontinuidades ou defeitos internos em peças de variadas geometrias. Neste processo, um aparelho emite o ultrassom que, após encontrar uma barreira, é refletido. Dessa forma, com o conhecimento da velocidade de deslocamento deste som e do tempo de resposta, é possível identificar variações na peça examinada. O aparelho emissor do ultrassom é

denominado de transdutor, que emite, por meio de materiais piezelétricos, uma frequência acima de 20kHz (Figura 2-17).

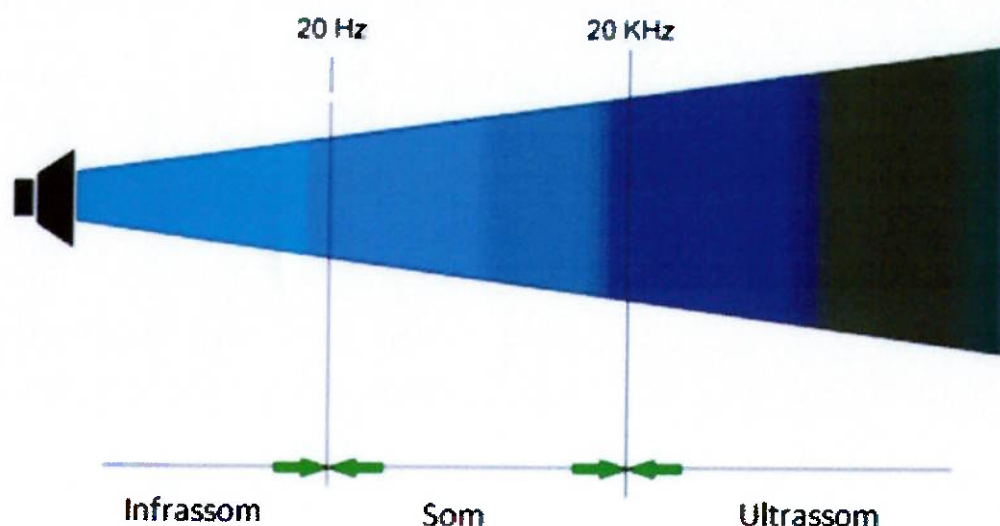


Figura 2-17 Campo de audibilidade (US) [18].

Este método tem boa capacidade de revelar pequenas descontinuidades internas, como exemplo as trincas resultantes de tratamento térmico. Neste ensaio, é possível detectar descontinuidades dificilmente identificadas por outros métodos, como a falta de fusão, que, dependendo de sua localização, o LP não indicaria, uma vez que necessita de descontinuidade aberta à superfície. Já para o ensaio por PM, o campo magnético poderia não ter condições de incidir até a descontinuidade; ou mesmo o ensaio radiográfico, que dificilmente consegue detectar esse tipo de indicação devido ao posicionamento deste em relação aos raios emitidos.

O ensaio por US exige grande conhecimento teórico e experiência do inspetor, e requer preparo da superfície para possibilitar o correto acoplamento entre o

transdutor e a peça (Figura 2-18). Isso demanda tempo de fábrica, no caso de uma junta soldada, que precisará, em alguns casos, ter o reforço totalmente removido. Assim como os outros ENDs, o US possui limitações, podendo-se ressaltar as zonas de campo sônico, que restringem a distância mínima e máxima de detecção de discontinuidades e a velocidade de propagação de ondas sonoras dos materiais, o que pode inviabilizar a aplicação deste ensaio.

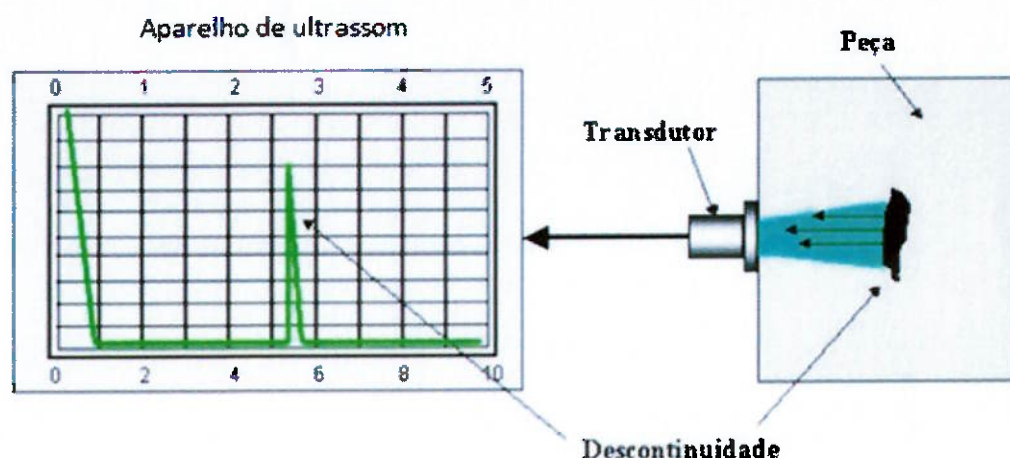


Figura 2-18 Inspeção por US [18].

No ensaio por US, existem vários tipos de transdutores e meios acoplantes que deverão ser selecionados conforme a aplicação, dependendo da posição da área de interesse e do material a ser ensaiado. Em juntas soldadas, por exemplo, poderão ser utilizados transdutores de 45°, 60° entre outros, variando com a geometria da junta, devido ao rebatimento dos sinais, os quais exigem maior conhecimento e experiência do inspetor na identificação de discontinuidades e posicionamento destas (Figura 2-19). Este ensaio também permite identificar falta de fusão, descontinuidade recorrente em MIG/MAG por curto-circuito. Deve-se ressaltar que a falta de fusão, dependendo da

orientação e da dimensão, poderá ser identificada de forma direta por um método de END e por outro não, sendo interessante o uso de algumas técnicas em conjunto, dependendo da criticidade do equipamento.

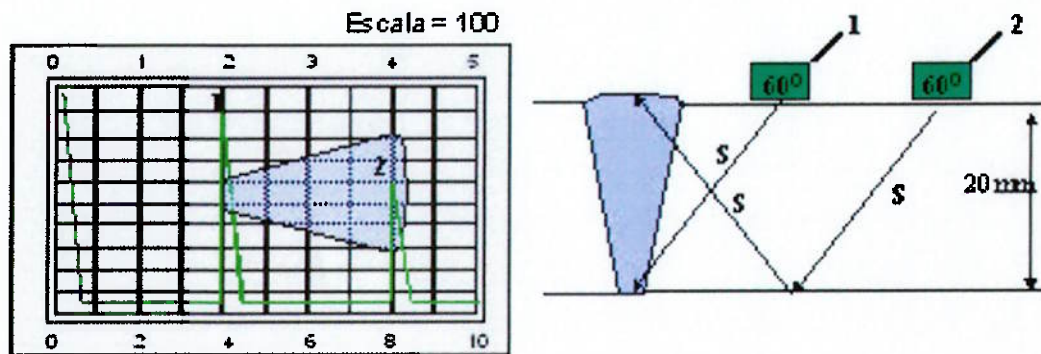


Figura 2-19 Inspeção em junta soldada por US [18].

2.7.4 Radiografia (RAD).

A radiografia baseia-se na absorção diferenciada da radiação penetrante pela peça que está sendo inspecionada [19]. Devido à diferença de sua absorção ao atravessar a peça, é possível identificar as variações de espessura no filme radiográfico, por exemplo, e, por sua vez, identificar descontinuidades ou defeitos (Figura 2-20).

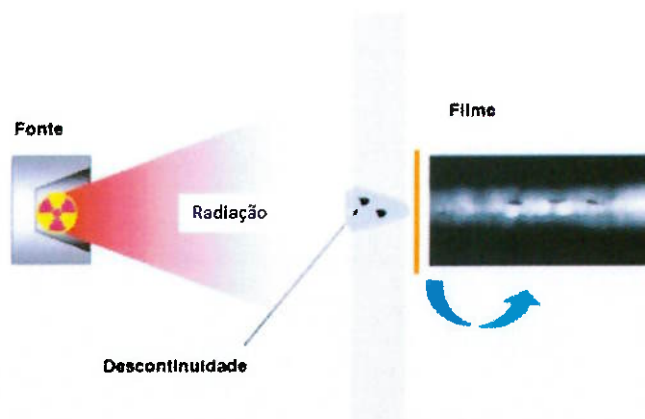


Figura 2-20 Técnica de ensaio radiográfico (RAD) [19].

Assim como nos demais ENDs, o objetivo deste tipo de ensaio é possibilitar a garantia dos materiais com qualidade requerida, isentando as peças de defeitos que possam comprometer o seu desempenho. Além disso, objetiva-se também possibilitar a melhoria de novos métodos e teste de novos materiais sem destruí-los ou inutilizá-los.

Diversas normas e códigos referenciam o ensaio radiográfico para determinar adequações ao projeto, sendo possível citar a API 1104 [20] que, no item 6 (seis), referente à qualificação de soldadores, mais especificamente no item 6.6, permite o uso do exame radiográfico da junta soldada como um dos parâmetros de aprovação ou não do soldador.

Importante ressaltar que os raios-X e raios gama, utilizados nesse tipo de ensaio, têm muitas propriedades semelhantes à luz, como a velocidade de propagação, a forma do deslocamento em linha reta, propriedade de impressionar emulsões fotográficas, e não são afetadas por campos elétricos ou magnéticos [19]. Os raios-X para uso industrial utilizam uma ampola de vidro (*Coolidge*), possuem um cátodo e um ânodo que, ao serem submetidos à tensão elétrica, geram este tipo de radiação. Os raios gama são gerados a partir de um núcleo atômico que emite espontaneamente a radiação. Por esse motivo, necessitam de cuidados ainda maiores que os raios-X, pois, uma vez ativados, emitem radiação constantemente, enquanto o raio-X precisa de energia elétrica para emitir radiação; sendo utilizada blindagem para os raios gama, fonte radioativa e dispositivo para expor a fonte, e, para os raios-X, somente são aplicadas as condições de segurança quando o irradiador é ativado pela energia elétrica.

Os filmes radiográficos industriais atingidos por uma quantidade maior de radiação apresentarão, após a ação do revelador, um número maior de grãos negros do que as regiões atingidas por uma quantidade menor de radiação [19], devido à reação do brometo de prata contido no filme com o revelador, possibilitando identificar as descontinuidades do material.

2.7.5 Descontinuidades planares e volumétricas.

As descontinuidades detectadas nos ensaios não destrutivos podem ser identificadas, com relação a sua geometria, em dois grupos: volumétricas e planares.

Nas descontinuidades volumétricas, também denominadas de 3D ou tridimensionais, são caracterizadas pelo formato arredondado e de maior volume, características estas que resultam em menores concentrações de tensões em seu contorno se comparado as planares. A ASME V define alguns critérios de aceitação para este tipo de descontinuidade sendo que são consideradas descontinuidades volumétricas todas que tiverem seu comprimento menor ou igual a 3 vezes a largura [15]. Entre as descontinuidades volumétricas podem se enquadrar os poros e inclusões de escória, que são aceitáveis dependendo de suas dimensões e norma aplicada.

Nas descontinuidades planares, também denominadas de 2D ou bidimensionais, são caracterizadas pelo formato linear e de menor volume, características estas que resultam em maiores concentrações de tensões em seu contorno se comparado as volumétricas. A ASME V define alguns critérios de aceitação para

este tipo de descontinuidade sendo que são consideradas descontinuidades planares todas que tiverem seu comprimento maior que 3 vezes a largura [15]. Entre as descontinuidades planares podem se enquadrar as trincas e falta de fusão, que poderão ser aceitáveis dependendo de suas dimensões e norma aplicada.

Falta de fusão: *causa – energia de soldagem insuficiente para fundir a região do chanfro onde está sendo realizado o cordão* [21], podendo ser influenciada por altura elevada do arco, velocidade de avanço excessiva, entre outros;

Respingos: podem ser gerados por altura elevada do arco, bico de contato danificado, entre outros;

Porosidade: *causa – aprisionamento de bolhas de gás no cordão de solda* [21], podendo ser influenciada por altura elevada do arco, respingos de material fundido no bocal, por ângulo da pistola orientado incorretamente, entre outros;

Mordedura externa: *causa – fusão do metal de base na região adjacente à margem do cordão de solda* [21], podendo ser influenciada por movimento inadequado da pistola, impurezas no metal de base, entre outros;

Falta de penetração: *causa – cordão de solda que não une completamente a espessura das duas partes que estão sendo soldadas* [21], podendo ser influenciada por altura do arco elevada, junta inadequada entre outros;

Trinca a quente: *causa – presença de um filme líquido em um cordão de solda ou na zona de ligação, que está macroscopicamente solidificado* [21], podendo ser influenciada por cordão estreito e com grande penetração, técnica de soldagem inadequada entre outros.

3 OBJETIVOS.

Este trabalho tem por objetivo comparar a qualidade de juntas soldadas, utilizando o processo MIG/MAG com transferência por curto-circuito e projetada (pulsada) na soldagem de tubos de aço API 5L X56, visando a identificar a influência do modo de transferência metálica com foco nos índices de descontinuidades tipo falta de fusão das juntas considerando também a habilidade do soldador.

4 MATERIAIS E MÉTODOS.

4.1 Tubos API 5L X56.

Para realização dos experimentos, foram utilizadas seções de tubos API 5L X56, frequentemente empregados no ramo de óleo e gás. Os diâmetros dos tubos são de 9,5" e 12" com espessura de parede de 12,7mm. Para execução dos corpos de prova (CP), foram utilizadas 18 (dezoito) seções de tubo com aproximadamente 150mm de comprimento, sendo cada junta formada por 2 (duas) seções, resultando em 9 (nove) CPs, sendo 5 CPs de 9,5" e 4 CPs de 12". Caso fossem aplicados para qualificação pela API 1104 todos os tubos utilizados estariam dentro do mesmo intervalo de qualificação a qual determina espessura menor ou igual a 12,7mm e diâmetro externo maior que 4,500" até 12,750" na tabela dois da norma referida [20].

Quatro CPs destinam-se à soldagem por MIG/MAG com modo de transferência por curto-circuito e gás de proteção binário; os demais CPs destinam-se ao mesmo processo de soldagem, porém com modo de transferência projetado (pulsado).

Os tubos cedidos encontram-se cortados com preparação de bisel de 30° formando um ângulo de chanfro de 60° – sem informações sobre qual processo foi utilizado no corte – e expostos ao tempo. O processo de preparação da junta foi por esmerilhamento e lixamento das áreas de interesse para remover os óxidos provenientes da exposição.

4.2 Consumíveis.

Os eletrodos utilizados são fabricados pela Böhler, os gases de proteção são fabricados pela Air Liquide do Brasil e todos seguem as especificações da American Welding Society (AWS).

A composição química do tubo conforme API 5L atende os parâmetros conforme Tabela 4-1.

Tabela 4-1 Composição química do tubo (especificação API 5L X56) [8]

Especificação API 5L X56	
C ⁽¹⁾	≤ 0,28
Mn ⁽¹⁾	≤ 1,40
P	≤ 0,03
S	≤ 0,03
V	*
Nb	*
Ti	*

(1) Para cada redução de 0,01% ou mais da concentração máxima especificada para o carbono, é permitido aumento de 0,05% acima do especificado da concentração máxima de manganês até um máximo de 1,65% para os graus W ≥ L245 ou B, mas ≤ L360 ou X52; máximo de 1,75% para as classes > L360 ou X52, mas < L485 ou X70, e até máximo de 2,00% para o grau L485 ou X70.

* A soma das concentrações de vanádio, nióbio e titânio deve ser ≤ 0,15%.

4.2.1 Eletrodo sólido.

O eletrodo de classificação AWS A5.28/SFA-5.28 ER80S-D2 foi utilizado em todos os passes de todos os CPs com o gás de proteção binário de argônio (Ar) e dióxido de carbono (CO₂) com proporções de 80% - 20% e de 92% - 8%, respectivamente. Segundo fabricante do equipamento, o gás mais indicado para o modo de transferência projetado (pulsado) é o Ar 95% e CO₂ 5%, porém não disponível para soldagem dos CPs.

A Tabela 4-2 apresenta as características químicas e as mecânicas do eletrodo sólido referenciando a AWS [22].

Tabela 4-2 Composição química e propriedades mecânicas mínimas do eletrodo sólido [22].

Composição química	AWS 5.28 (ER80S-D2)	
	Especificação AWS	Certificado
Carbono	0,070 - 0,120	0,090
Manganês	1,600 - 2,100	1,690
Silício	0,500 - 0,800	0,620
Fósforo	0,025	0,014
Enxofre	0,025	0,007
Níquel	0,150	0,010
Molibdênio	0,400 - 0,600	0,450
Cobre	0,500	0,190
Somatória de outros elementos	0,500	< 0,500

Propriedades mecânicas	AWS 5.28 (ER80S-D2)	
	Especificação AWS	Certificado
Limite de resistência (MPa)	550	550
Limite de escoamento (MPa)	470	470
Along. (%)	17	17
Charpy-V @-30°C (J)	27	27

4.3 Execução dos CPs.

As 18 (dezoito) seções foram juntadas duas a duas, formando 9 (nove) CPs denominados de CP1, CP2, CP3, CP4, CP5, CP6, CP6B, CP7 e CP8. A soldagem foi executada com acompanhamento do autor da presente pesquisa.

Todos os ensaios realizados visam comparar a qualidade de juntas soldadas utilizando o processo MIG/MAG com transferência por curto-circuito com a projetada (pulsada), na soldagem de tubos de aço API 5L X56, identificando a influência do modo de transferência metálica com foco nos índices de descontinuidades tipo falta de fusão das juntas.

Primeiramente, foi executada a preparação do bisel por esmerilhamento e lixamento seguida de ensaio visual e por LP nos biséis, preparação da junta com 2mm de abertura, pré-aquecimento entre 200°C e 400°C, soldagem das juntas, interpasse entre 150°C e 350°C (antes de cada passe, executou-se limpeza e verificação de temperatura da área de interesse), ensaio por PM, RAD e US. Na soldagem das juntas dos CPs 1 a 4, o modo de transferência foi o curto-circuito convencional com gás de proteção Ar 80% - CO₂ 20%, dos CPs 5 a 6B, foi o modo de transferência projetado (pulsado) com modo de controle rapid arc® com gás de proteção Ar 92% - CO₂ 8%, e dos CPs 7 e 8 foi o modo de transferência projetado (pulsado) com controle rapid arc® e gás de proteção Ar 80% - CO₂ 20% na posição plana conforme Tabela 4-3.

Os CP1 ao CP3 foram soldados no dia 0 (D₀), os CP4 ao CP8 exceto CP6B foram soldados no dia 1 (D₁), seguindo a sequência numérica, e o CP6B foi soldado no dia 2 (D₂).

Tabela 4-3 Tabela de variáveis executadas.

Diâmetro (polegadas)	Corpo de prova	Variáveis			Fixo
		Modo de transferência	Tipo de gás		
			Ar (%)	CO ₂ (%)	
9,5	CP1	Curto-circuito	80	20	-Geometria do chanfro Posição -Preaquecimento -Interpasse -Metal de base -Eletrodo sólido -Soldador
9,5	CP2	Curto-circuito	80	20	
12	CP3	Curto-circuito	80	20	
12	CP4	Curto-circuito	80	20	
9,5	CP5	Projetado (Pulsado)	92	8	
9,5	CP6	Projetado (Pulsado)	92	8	
9,5	CP6B	Projetado (Pulsado)	92	8	
12	CP7	Projetado (Pulsado)	80	20	
12	CP8	Projetado (Pulsado)	80	20	

4.4 Equipamentos.

Os equipamentos utilizados na soldagem são de fabricação Lincoln, sendo a fonte de energia a multiprocesso Power Wave S350 do tipo inversor, com alimentador LF 45, utilizando-se dos modos de transferência por curto-circuito convencional, ou seja, sem o uso do sistema STT™ e transferência projetada (pulsada) no modo de controle rapid arc®.

4.5 Critérios de aceitação.

Os critérios de aceitação foram aplicados conforme normas internacionalmente reconhecidas.

O ensaio de LP foi realizado respeitando ASME Sec. V Ed. 2010 e procedimento PR-001 Rev. 6 – 2008 (utilizado pela ABENDI na certificação de inspetores), para indicações de descontinuidades relevantes e reprovadas – Anexo VI.

O ensaio de PM foi realizado respeitando ASME Sec. V Ed. 2010 e procedimento PR-002 Rev. 6 – 2008 (utilizado pela ABENDI na certificação de inspetores), para indicações de descontinuidades relevantes e reprovadas – Anexo VI.

O ensaio de US foi realizado respeitando a norma API 1104 e para critérios de aceitação a VGS8.1.3 S1 (norma interna baseada em normas internacionais) – Anexo VI.

O ensaio de RAD – gamagrafia – foi realizado respeitando a norma ANSI B31.3 e para critérios de aceitação a VGS8.2.3 S2 (norma interna baseada em normas internacionais).

4.6 Acompanhamento de soldagem.

O acompanhamento da soldagem foi realizado pelo autor da presente pesquisa, garantindo que os parâmetros estabelecidos foram atendidos e os dados necessários para a comparação dos processos foram coletados. Também foi realizado registro tanto de corrente quanto de tensão aplicadas nos CPs via software Power Wave Manager version 1.0.1.229 Copyright © Lincoln Electric 2008-2011 através de rede Ethernet.

O controle de preaquecimento e interpasse foram realizados com uso de lápis térmicos compatíveis com as temperaturas estabelecidas.

4.7 Ensaios não destrutivos.

Com vistas a identificar a influência do modo de transferência metálica com foco nos índices de descontinuidades, em especial a falta de fusão, foram realizados ENDs de PM, RAD e US comparando-se os resultados e correlacionando-se a capacidade de detecção dos ensaios.

Na indústria, devido aos custos envolvidos, é comum a realização de somente um dos ensaios mencionados (quando permitido por norma, projeto) ou, quando combinados, costumam seguir a ordem do menor para o maior com relação ao custo envolvido, sendo assim primeiramente realizado o PM posteriormente o US e, por último, RAD. É comum ver-se o ensaio de radiografia como único teste realizado na inspeção do material, por ser capaz de reter registro das informações do objeto da inspeção, mas, desconsiderando, desta forma, as limitações do emprego desta técnica.

O ensaio por PM foi realizado com partícula úmida fluorescente, pois possibilita melhor identificação de descontinuidades, uma vez que possui maior sensibilidade de detecção.

O US foi realizado com transdutor de 45° que apresentou melhores resultados para a geometria da junta e foram registradas descontinuidades com amplitude maiores ou iguais a 100%.

O RAD foi realizado com isótopo de irídio 192 e, portanto, o ensaio denomina-se gamagrafia, uma vez que este isótopo emite raios gama.

O LP foi realizado somente durante o processo de preparação dos biséis, fazendo uso da técnica II-A, ou seja, penetrante colorido removível com água.

4.8 Quantificação de respingos.

Visando a quantificação de respingos gerados no experimento, foram executados registros fotográficos do passe de acabamento dos CPs 1, 5 e 7 de uma área de 100 cm² e registrado a quantidade de respingos para cada variação.

Sendo o CP1 a junta soldada de Ø9,5" com processo MIG/MAG, modo de transferência por curto-circuito e gás de proteção 80-20 (Ar – CO₂), o CP5 a junta soldada de Ø9,5" com processo MIG/MAG, modo de transferência projetado e gás de proteção 92-8 (Ar – CO₂) e o CP7 a junta soldada de Ø12" com processo MIG/MAG, modo de transferência projetado e gás de proteção 80-20 (Ar – CO₂).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Energia de soldagem.

A Tabela 5-1 apresenta a energia de soldagem aplicada aos CPs, baseando-se nos valores de tensões, correntes e velocidades médias.

Tabela 5-1 Acompanhamento de soldagem.

CP	Passe nº	Camada nº	Processo de soldagem	Soldador	Corrente (A)	Tensão (V)	Velocidade (mm/s)	Velocidade de alimentação do arame (m/s)	Vazão do gás (l/min.)	Préaquecimento (°C)	Interpasse (°C)	Energia de Soldagem (kJ/m)
1	1	1	MIG/MAG	64	155	17	0,00239	0,0558	18	>200	<350	661,65
1	2	1	MIG/MAG	64	155	17	0,00231	0,0558	18	>200	<350	685,88
1	3	1	MIG/MAG	64	155	17	0,00262	0,0558	18	>200	<350	604,50
1	4	2	MIG/MAG	64	198	20	0,00286	0,0867	18	>200	<350	834,06
1	5	3	MIG/MAG	64	198	20	0,00254	0,0867	18	>200	<350	939,09
1	6	4	MIG/MAG	64	198	20	0,00180	0,0867	18	>200	<350	1325,23
2	1	1	MIG/MAG	64	158	17	0,00232	0,0558	18	>200	<350	693,60
2	2	1	MIG/MAG	64	158	17	0,00299	0,0558	18	>200	<350	539,27
2	3	1	MIG/MAG	64	158	17	0,00306	0,0558	18	>200	<350	527,43
2	4	2	MIG/MAG	64	186	20	0,00246	0,0867	18	>200	<350	911,19
2	5	3	MIG/MAG	64	187	20	0,00259	0,0867	18	>200	<350	872,33
2	6	4	MIG/MAG	64	190	20	0,00194	0,0867	18	>200	<350	1182,75
3	1	1	MIG/MAG	64	149	17	0,00243	0,0558	18	>200	<350	625,80
3	2	1	MIG/MAG	64	149	17	0,00245	0,0558	18	>200	<350	620,41
3	3	1	MIG/MAG	64	149	17	0,00252	0,0558	18	>200	<350	603,76
3	4	2	MIG/MAG	64	178	20	0,00238	0,0867	18	>200	<350	901,97
3	5	3	MIG/MAG	64	180	20	0,00237	0,0867	18	>200	<350	916,15
4	1	1	MIG/MAG	64	149	17	0,00302	0,0558	18	>200	<350	503,43
4	2	1	MIG/MAG	64	149	17	0,00281	0,0558	18	>200	<350	539,98
4	3	1	MIG/MAG	64	149	17	0,00232	0,0558	18	>200	<350	654,68
4	4	2	MIG/MAG	64	183	20	0,00228	0,0867	18	>200	<350	966,46
4	5	3	MIG/MAG	64	180	20	0,00208	0,0867	18	>200	<350	1045,88
5	1	1	MIG/MAG	64	97	18	0,00339	0,0507	18	>200	<350	308,85
5	2	1	MIG/MAG	64	97	18	0,00344	0,0507	18	>200	<350	304,68
5	3	1	MIG/MAG	64	97	18	0,00339	0,0507	18	>200	<350	309,25
5	4	2	MIG/MAG	64	128	20	0,00146	0,0850	18	>200	<350	1053,14
5	5	3	MIG/MAG	64	130	21	0,00155	0,0850	18	>200	<350	1055,27
6	1	1	MIG/MAG	64	90	18	0,00353	0,0507	18	>200	<350	275,53
6	2	1	MIG/MAG	64	90	18	0,00351	0,0507	18	>200	<350	276,70
6	3	1	MIG/MAG	64	90	18	0,00252	0,0507	18	>200	<350	386,36
6	4	2	MIG/MAG	64	132	21	0,00148	0,0850	18	>200	<350	1101,75
6	5	3	MIG/MAG	64	141	20	0,00163	0,0850	18	>200	<350	1056,04
6B	1	1	MIG/MAG	64	95	19	0,00217	0,0507	18	>200	<350	498,86
6B	2	1	MIG/MAG	64	101	19	0,00280	0,0507	18	>200	<350	411,81
6B	3	1	MIG/MAG	64	102	19	0,00212	0,0507	18	>200	<350	549,78
6B	4	2	MIG/MAG	64	145	20	0,00154	0,0850	18	>200	<350	1132,24
6B	5	3	MIG/MAG	64	146	20	0,00159	0,0850	18	>200	<350	1103,78

7	1	1	MIG/MAG	64	87	19	0,00268	0,0507	18	>200	<350	370,27
7	2	1	MIG/MAG	64	86	18	0,00213	0,0507	18	>200	<350	435,14
7	3	1	MIG/MAG	64	87	19	0,00213	0,0507	18	>200	<350	466,73
7	4	2	MIG/MAG	64	150	19	0,00204	0,0850	18	>200	<350	837,58
7	5	3	MIG/MAG	64	122	20	0,00196	0,0850	18	>200	<350	745,56
8	1	1	MIG/MAG	64	90	19	0,00328	0,0507	18	>200	<350	312,57
8	2	1	MIG/MAG	64	92	26	0,00304	0,0507	18	>200	<350	472,51
8	3	1	MIG/MAG	64	96	18	0,00215	0,0507	18	>200	<350	481,71
8	4	2	MIG/MAG	64	138	20	0,00229	0,0850	18	>200	<350	722,20
8	5	3	MIG/MAG	64	135	20	0,00190	0,0850	18	>200	<350	852,00

Nota: Cálculo da energia de soldagem (Heat Input) executado conforme ASME IX QW-409.1 [23], porém com fator de eficiência igual à 0,6, ou seja, energia de soldagem igual ao produto da tensão e corrente dividido pela velocidade, multiplicados pelo fator de eficiência. Preaquecimento limitado a 400°C e interpasse a 150°C.

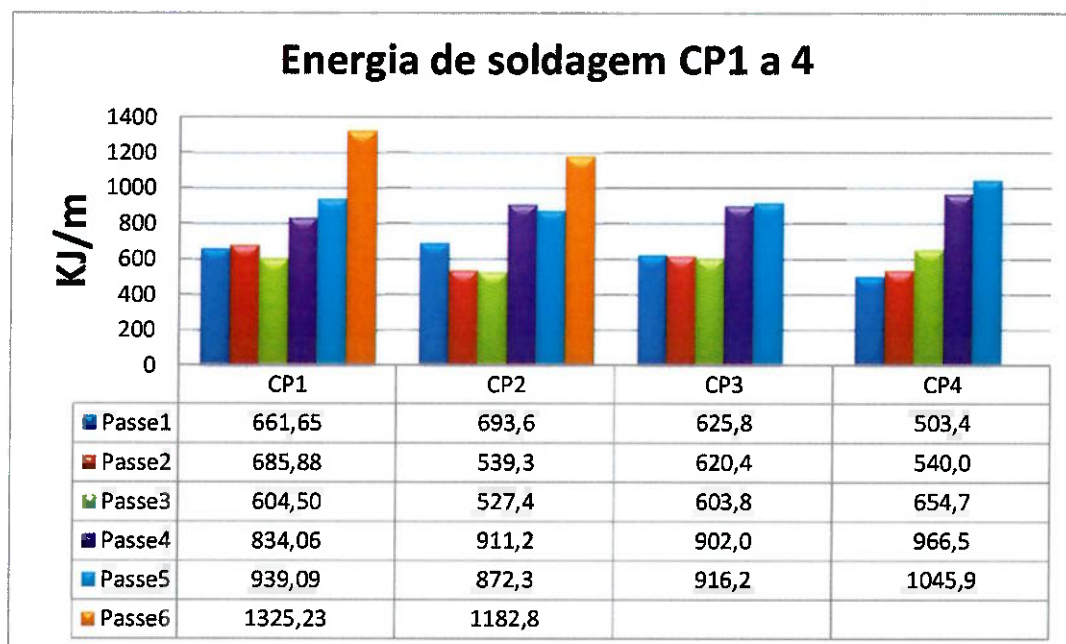


Figura 5-1 Energia de soldagem CP1 a 4.

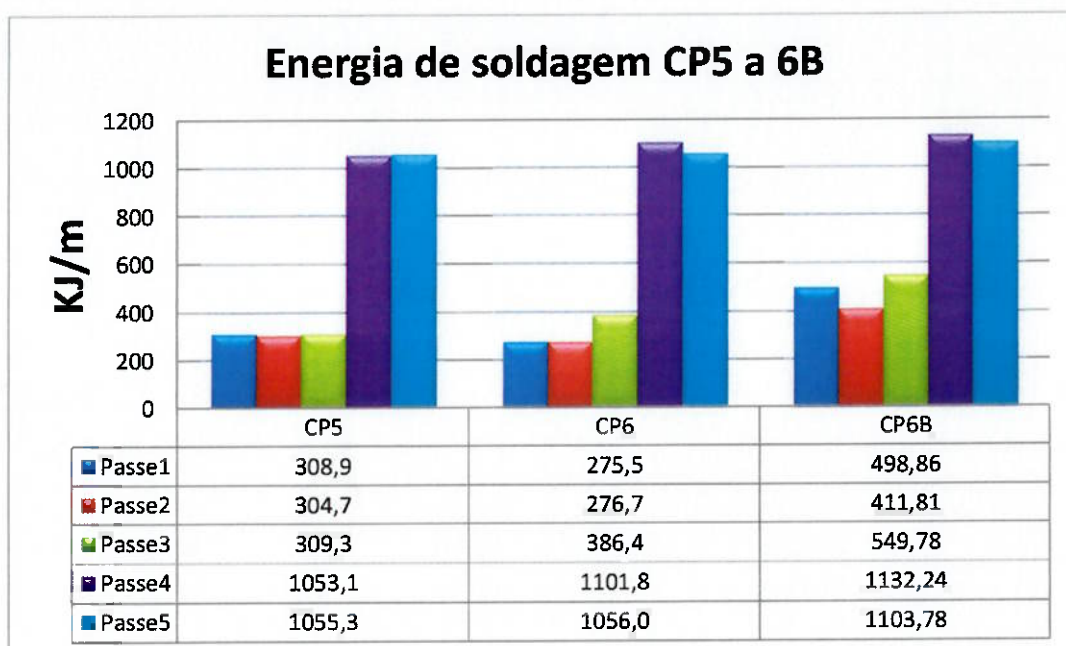


Figura 5-2 Energia de soldagem CP5 a 6B.

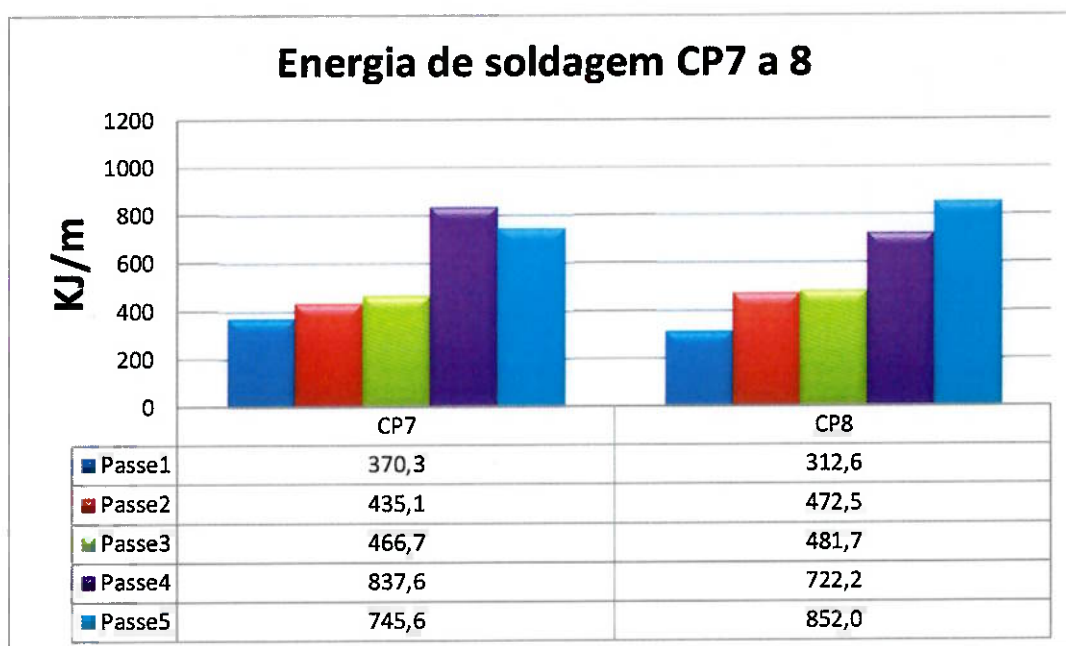


Figura 5-3 Energia de soldagem CP7 a 8.

A partir dos dados da Tabela 5-1, é possível observar que, mesmo com valores relativamente similares de tensão, a energia de soldagem no processo MIG/MAG projetada (pulsada) é menor do que a por curto-circuito. Os CPs 1, 2,

5, 6 e 6B possuem as mesmas dimensões, mas é possível observar que o número de passes necessários para preenchimento de raiz, enchimento e acabamento foram inferiores nos CPs com processo MIG/MAG projetada (pulsada).

As Figuras 5-4 a 5-7 apresentam o comportamento da corrente e da tensão de um período determinado, em um CP executado com transferência por curto-circuito e outro por projetada (pulsada), em que é possível observar que, apesar de usarem valores de tensões próximas, ocorre queda nos valores de corrente necessários para o processo MIG/MAG com o uso de transferência projetada (pulsada). Também é possível identificar momentos em que, devido à inexperiência do soldador com este processo em específico, ocorrem variações pontuais da tensão, nas quais, durante o acompanhamento, foi possível observar momentos de instabilidade e quase interrupção do arco elétrico evidenciado, principalmente, nas variações de tensões.

É possível identificar que, nos momentos de abertura de arco, ocorrem instabilidades que podem causar descontinuidades nas emendas de cordões de solda, necessárias principalmente nos passes de raiz, uma vez que se faz necessário, em muitos casos, o uso de separadores, ponteamientos, entre outros, para ser possível manter abertura de raiz desejada.

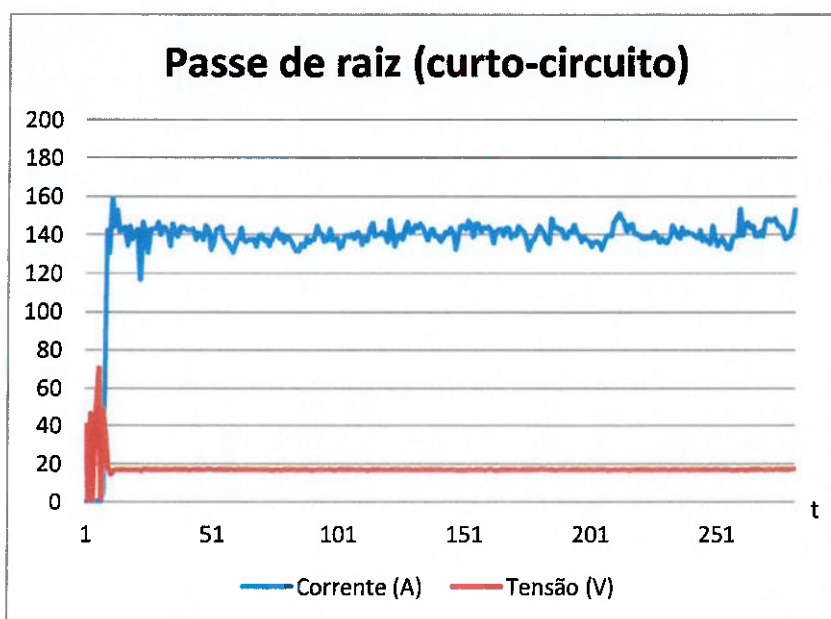


Figura 5-4 Passe de raiz (curto-circuito).

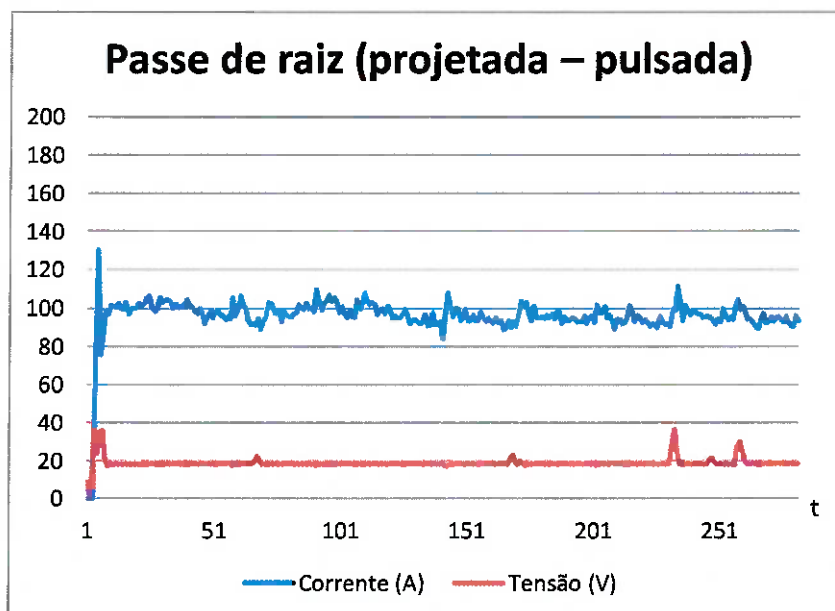


Figura 5-5 Passe de raiz (projetada).

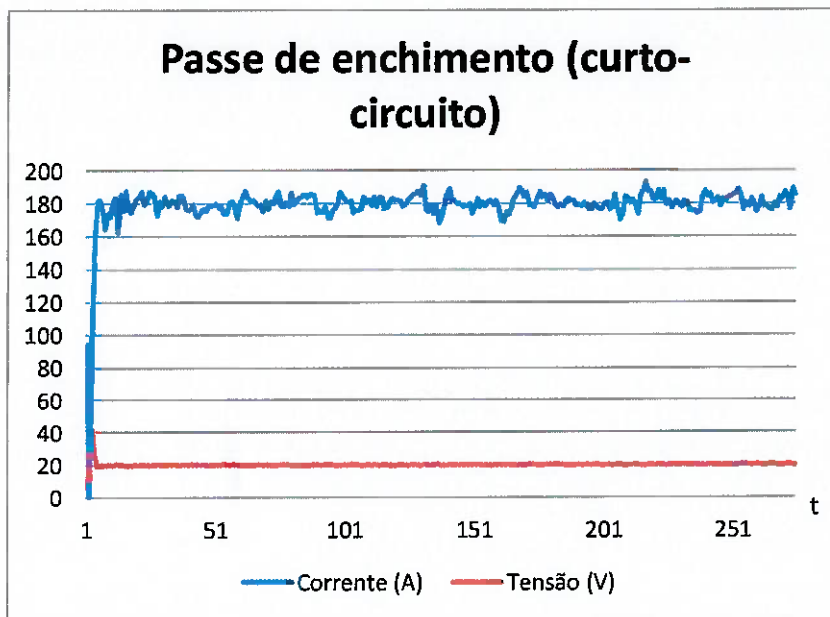


Figura 5-6 Passe de enchimento (curto-circuito).

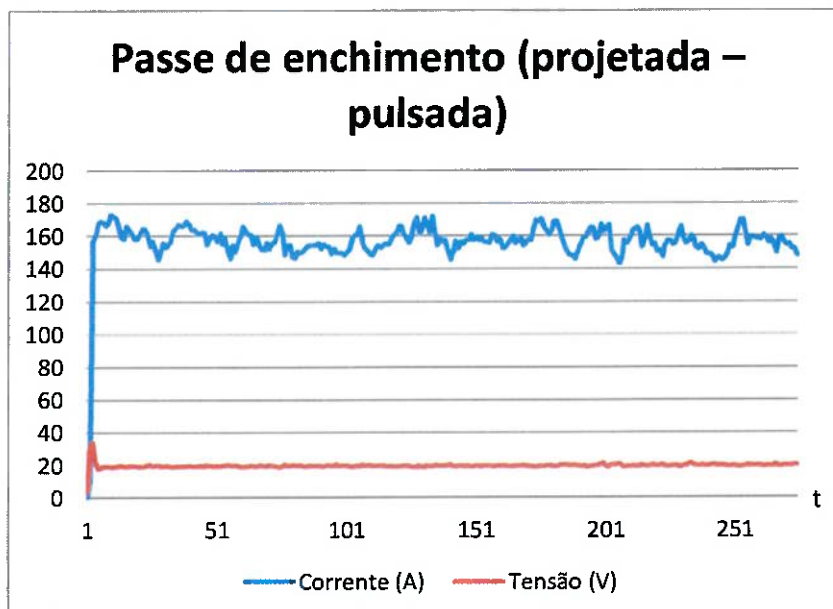


Figura 5-7 Passe de enchimento (projetada).

5.2 Ensaios não destrutivos.

As Figuras 5-8 a 5-13 representam a quantidade de defeitos em milímetros detectados em cada uma das três técnicas de ENDs utilizadas, sendo que a técnica de US permite a identificação de descontinuidades em uma mesma seção de solda, mas com profundidades diferentes. Elas podem ser caracterizadas como sendo mesmo defeito ou não, gerando, em alguns casos, juntas soldadas com defeitos em milímetros superiores ao perímetro total. Nos ensaios executados, o enfoque foi em descontinuidades tipo falta de fusão, ou seja, planares, representando mais de 80% das indicações; porém, conforme procedimento, outros tipos de descontinuidades foram registrados, por exemplo, porosidade que são descontinuidades volumétricas.

Importante ressaltar que, diferentemente dos ensaios de PM e US, no ensaio RAD, as dimensões em milímetros são aproximadas, uma vez que os efeitos causados pela distância existente entre a fonte e os filmes resultam em distorções nos comprimentos registrados.

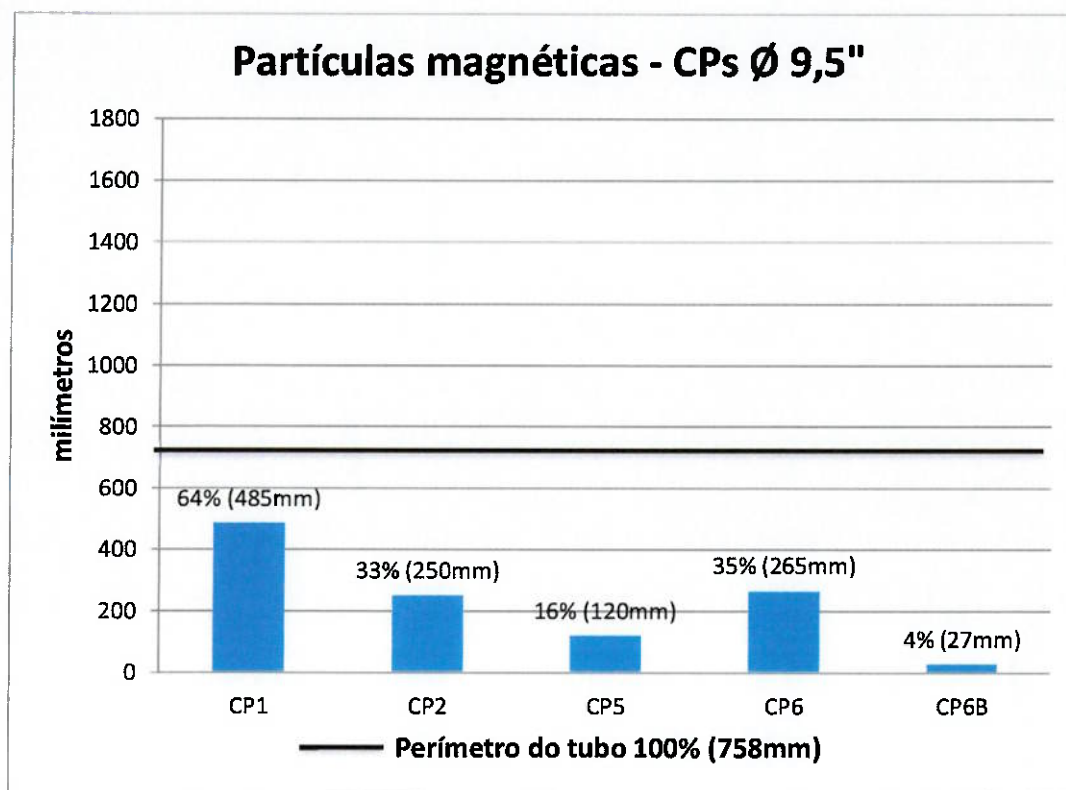


Figura 5-8 Milímetros reprovados por PM no CP de Ø 9,5".

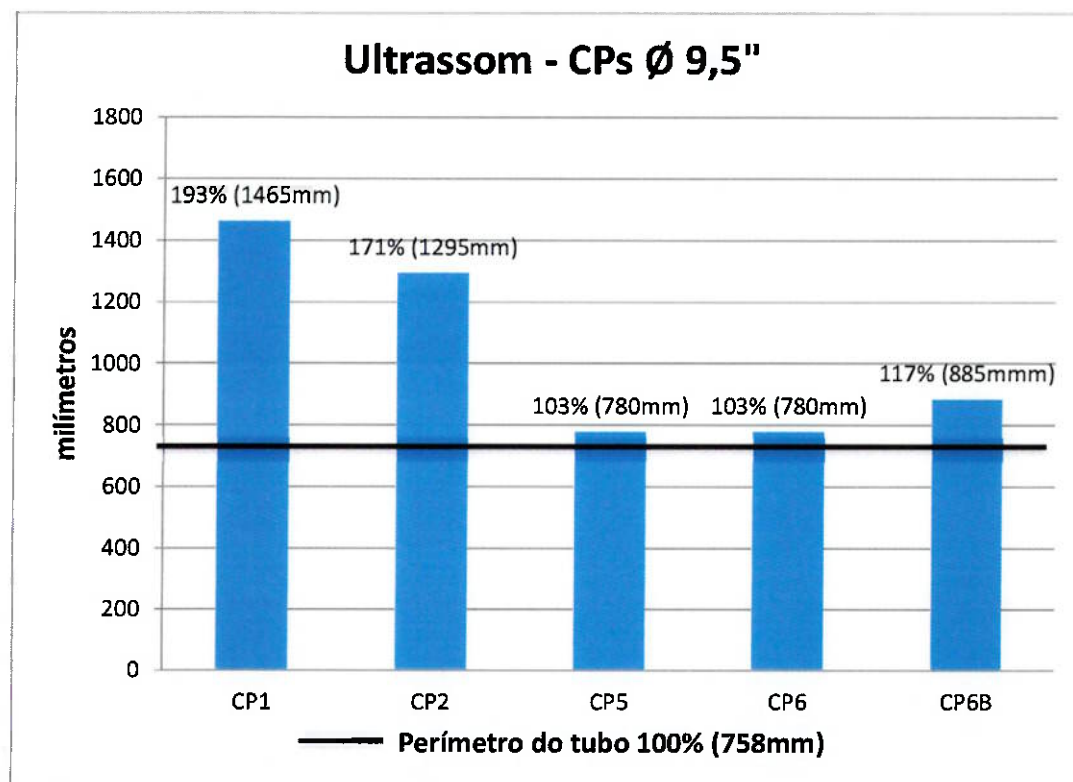


Figura 5-9 Milímetros reprovados por US no CP de Ø 9,5".

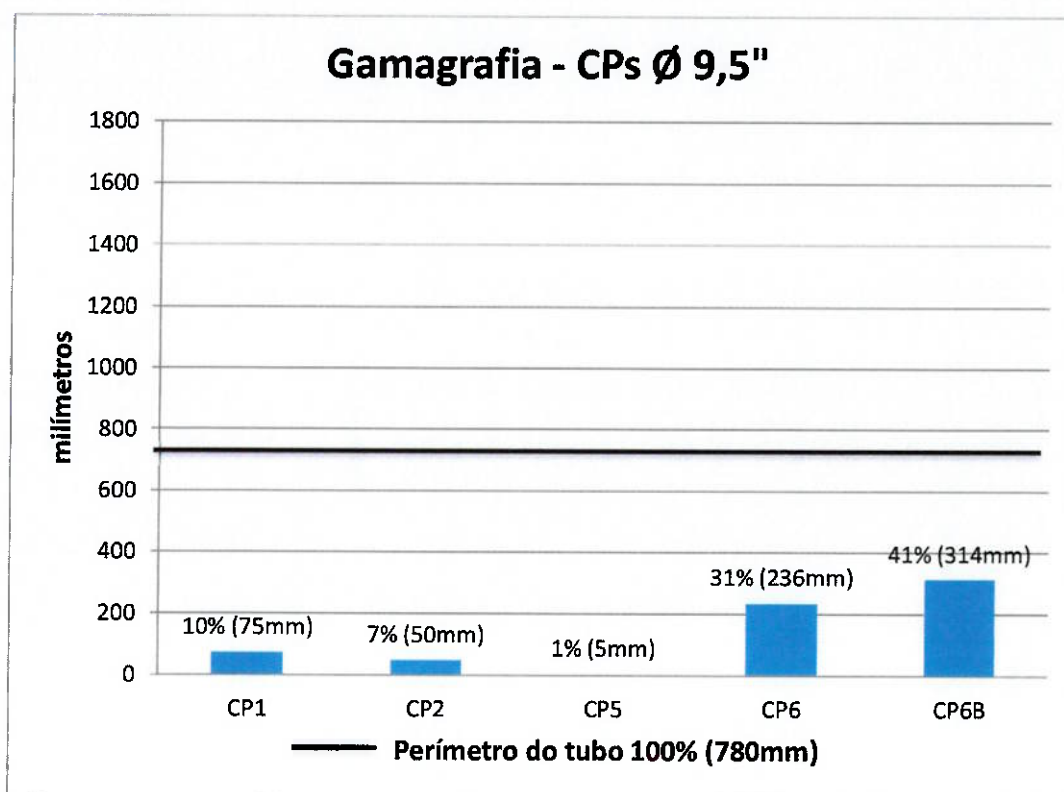


Figura 5-10 Milímetros reprovados por RAD no CP de Ø 9,5".

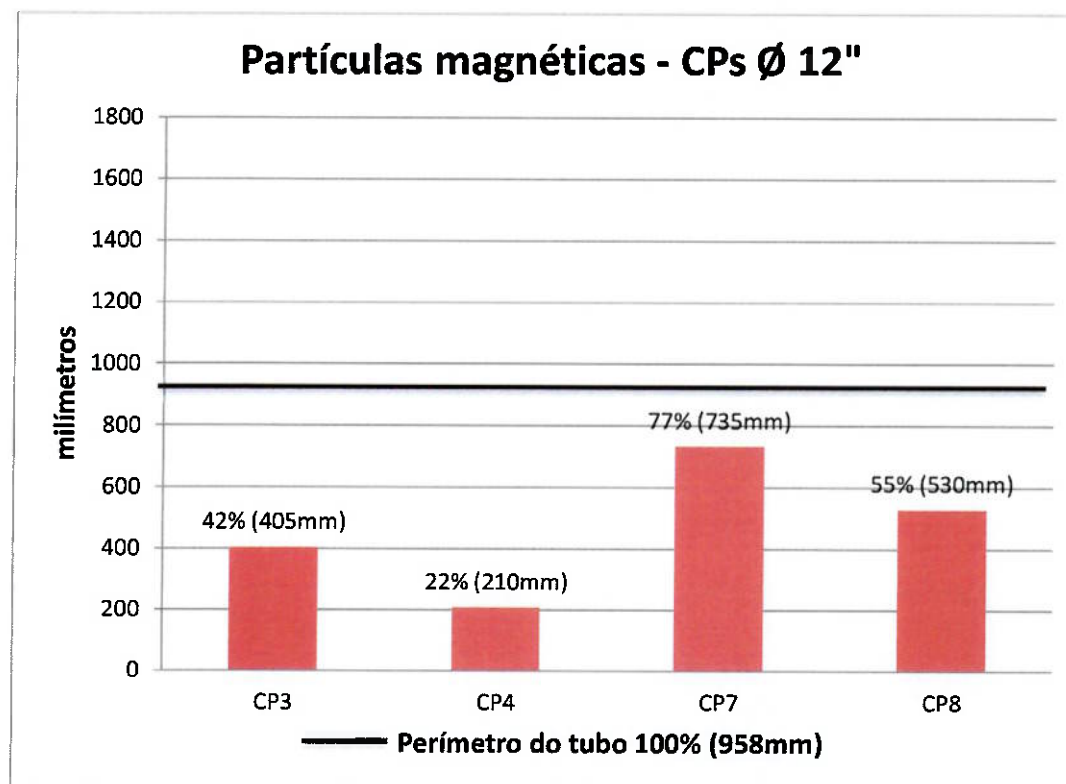


Figura 5-11 Milímetros reprovados por PM no CP de Ø 12".

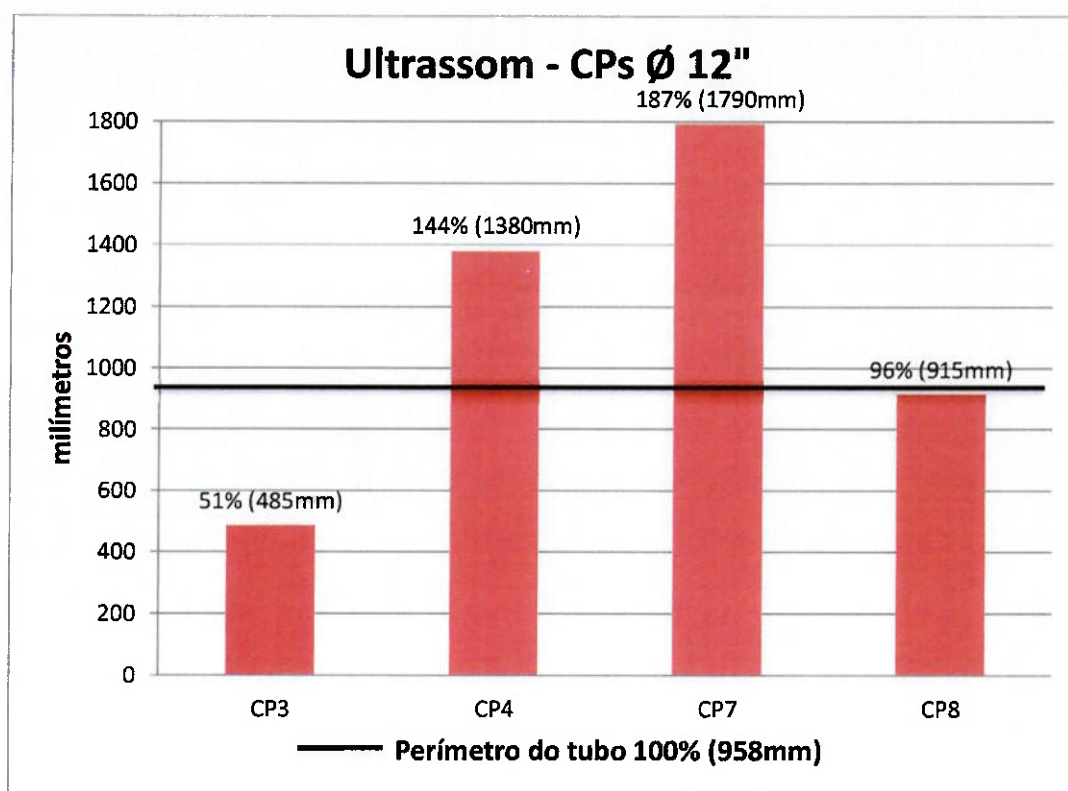


Figura 5-12 Milímetros reprovados por US no CP de Ø 12".

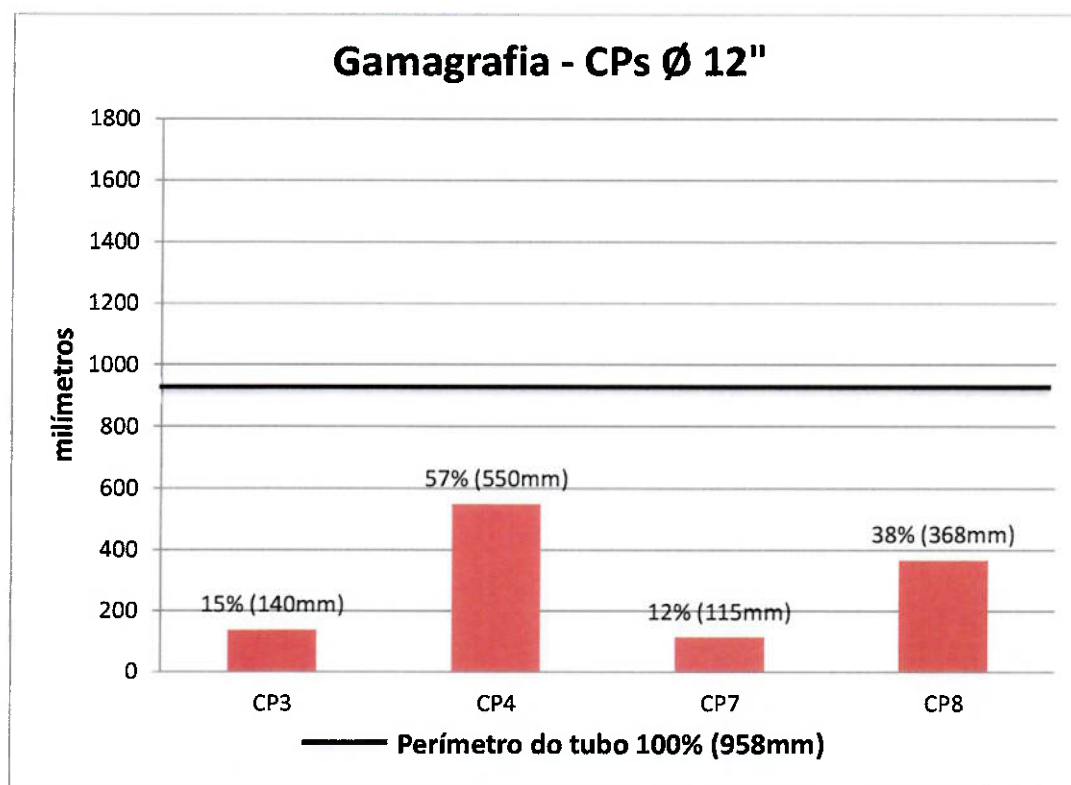


Figura 5-13 Milímetros reprovados por RAD no CP de Ø 12".

A partir dos dados das Figuras 5-8 a 5-13, é possível observar que a detecção de descontinuidades em milímetros é maior no ensaio de US e menor no ensaio RAD, tendo como foco as descontinuidades planares mesmo no ensaio de gamagrafia.

Nos CPs de Ø 9,5", o ensaio por US (que detectou maior número de descontinuidades) indica uma tendência de queda, comparando-se os modos de transferência, de forma que, no por curto-circuito, a quantidade de descontinuidade foi superior ao projetado (pulsado). Nos CPs de Ø 12", baseando-se no mesmo ensaio, a tendência é inversa. Ressalta-se que os CPs 7 e 8, apesar de soldados com o modo de transferência projetado (pulsado), neles foi utilizado o mesmo gás do processo por curto-circuito, ou seja, Ar 80% e CO₂ 20%, o qual não é indicado pelo fabricante, que especifica Ar 95% e CO₂ 5%. O experimento foi realizado com o gás não indicado pelo fabricante para averiguar a influência dele no processo.

5.2.1 Influência do soldador.

Os gráficos das Figuras 5-9 e 5-12 possibilitam identificar quais soldagens realizadas no mesmo dia apresentam melhora no desempenho do soldador. Do CP1 ao CP3, realizados na sequência crescente em D₀, houve tendência de redução no número de descontinuidades.

Importante ressaltar que, no experimento executado, o operador que realizou o posicionamento e a preparação dos CPs também realizou a soldagem.

Dos aproximados 7618 mm soldados, 7104 mm foram reprovados no ensaio de US, ou seja, 93%. No indicador de acompanhamento de performance de soldadores o limite determinado para considerar um soldador apto a executar soldas de fabricação é inferior a 10% de reprovação, o que indica uma grande influência do soldador nos defeitos encontrados, independentemente do modo de transferência.

5.3 Quantificação de respingo.

As Figuras 5-12 e 5-13 demonstram a variação no nível de respingos gerados em cada um dos modos de transferência.

Durante o acompanhamento, foi possível observar que, quando o arco ficava instável na transferência projetada (pulsada), gerava-se uma quantidade de respingos similar ao curto-circuito. Porém, quando estável, praticamente não era possível identificar respingos sendo gerados. As Figuras 5-14 a 5-16 apresentam uma área de 100 cm² do passe de acabamento do CP1 (curto-circuito), CP5 (projetada – pulsada) e CP7 (projetada – pulsada¹) respectivamente.

¹ Gás de proteção com CO₂ 20% e Ar 80%.



Figura 5-14 Passe com processo MIG/MAG curto-circuito (imagem referente a 100 cm² do CP1).



Figura 5-15 Passe com processo MIG/MAG projetada – pulsada (imagem referente a 100 cm² do CP5).

A partir das Figuras 5-12 e 5-13, é possível observar que os respingos resultantes do modo de transferência por curto-circuito possuem volumes superiores, que causam dificuldades de remoção e podem interferir na qualidade da junta soldada. Durante o acompanhamento, foi possível observar que, nos passes de raiz, a proporção de respingos era similar ao do acabamento no modo de transferência por curto-circuito, ou seja, com uma necessidade de remoção mais complexa. Isso poderia gerar pontos que não se unem metalurgicamente ao próximo passe de solda, assim como ocorre em processos de fundição durante o vazamento, quando gotas respingam nas paredes dos moldes e solidificam primeiro, resultando em defeitos nas peças finais, denominados de gotas frias [24].

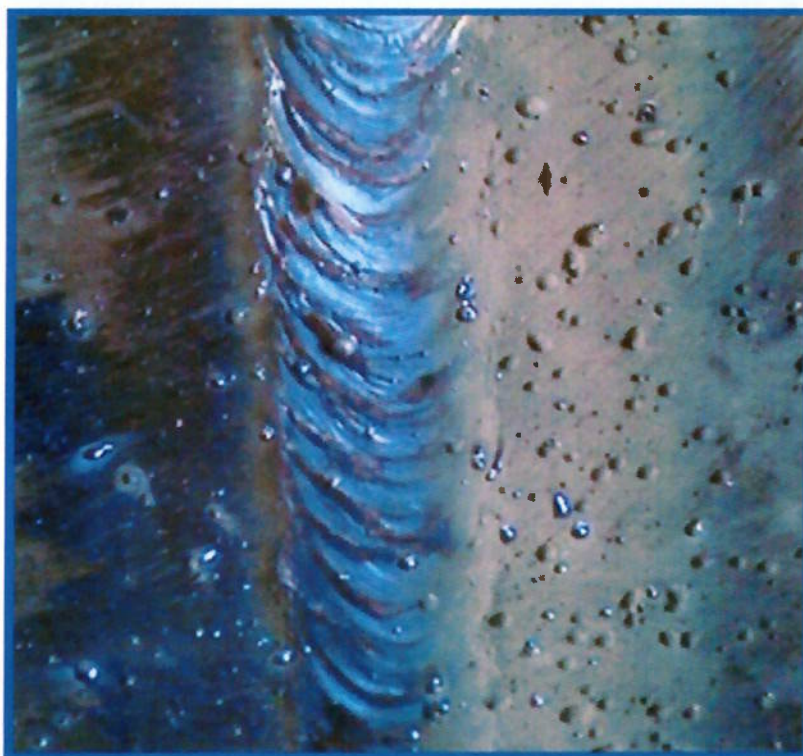


Figura 5-16 Passe com processo MIG/MAG projetada – pulsada (imagem referente a 100 cm² do CP7).

A Tabela 5-2 foi gerada tendo como referência as Figuras 5-14 a 5-16, e apresenta a quantidade de respingos por área.

Tabela 5-2 Quantidade de respingo por área (CP1, CP5 e CP7).

Modo de transferência	Curto-circuito	Projetado - pulsado	Projetado - pulsado ¹
	CP1 - Ø9,5" (Ar80%-CO ₂ 20%)	CP5 - Ø9,5" (Ar92%-CO ₂ 8%)	CP7 - Ø12" (Ar80%-CO ₂ 20%)
Quantidade de respingo	149	102	274
Área (cm ²)	100	100	100
Respingo/cm ²	1,49	1,02	2,74

A partir da Tabela 5-2, é possível identificar que a quantidade de respingos também é aproximadamente 46% superior no modo de transferência por curto-circuito, se comparada a projetado (pulsado), indicando que o modo de transferência projetado (pulsado) é capaz de reduzir a quantidade de respingos. Entretanto, o mesmo não ocorre quando utilizado gás de proteção com CO₂ 20% e Ar 80%, representado por Projetado – pulsado¹ na Tabela 5-2, com aproximadamente 169% a mais de respingos por cm² em relação ao mesmo modo de transferência, porém com gás mais próximo ao indicado pelo fabricante.

5.4 Variação de altura de arco.

Apesar de as fontes atuais promoverem ajustes mais finos e controles mais dinâmicos, as variáveis existentes no processo manual do MIG/MAG, como a distância entre o bico de contato e a peça, por exemplo, são diretamente impactantes na qualidade da junta soldada.

¹ Gás de proteção com CO₂ 20% e Ar 80%.

Durante o experimento, os ENDs indicaram as seguintes discontinuidades:

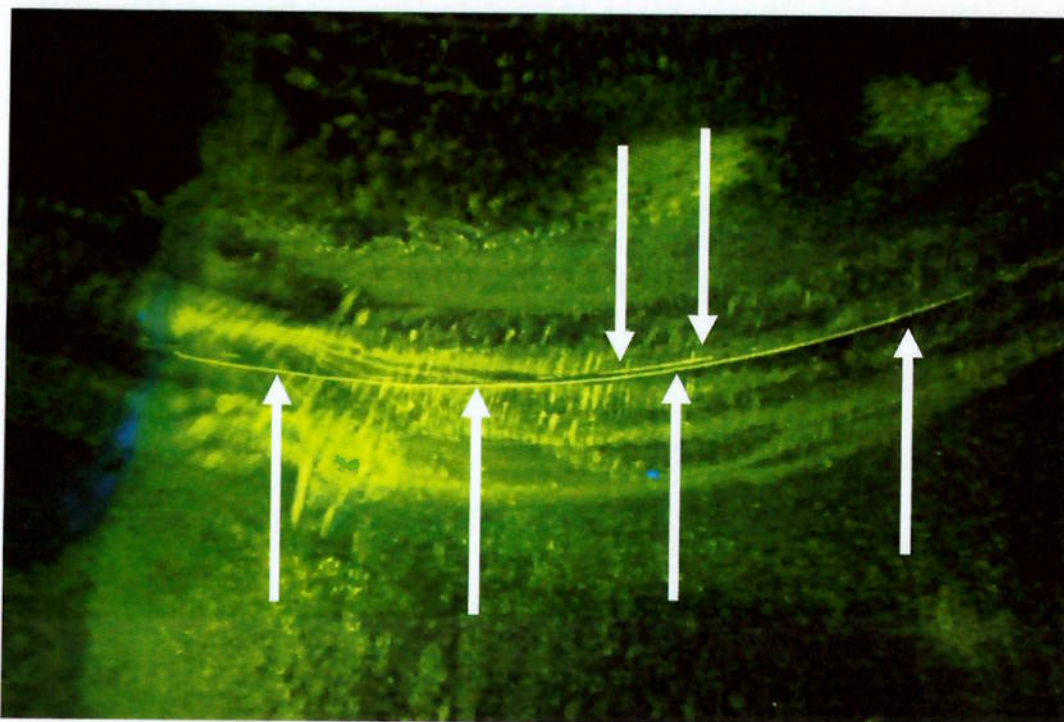


Figura 5-17 Ensaio de PM do CP3 com indicação de falta de fusão lado interno (por Rodrigo Ribeiro).

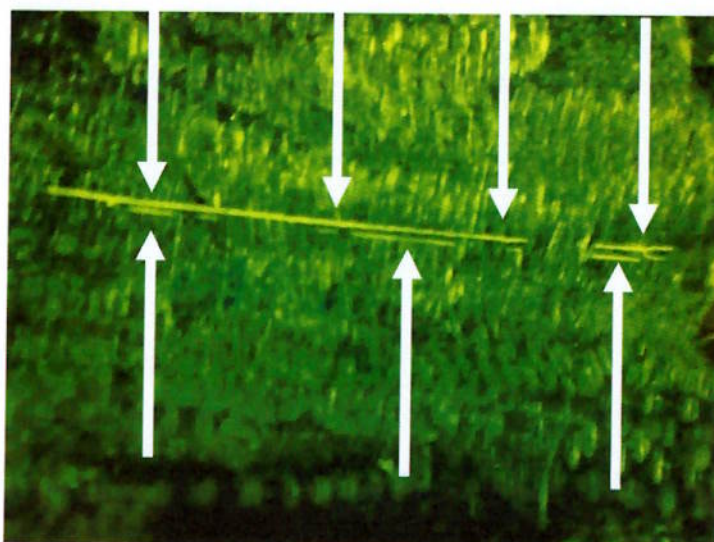


Figura 5-18 Ensaio de PM do CP8 com indicação de falta de fusão lado interno (por Rodrigo Ribeiro).

As Figuras 5-19 a 5-21 evidenciam discontinuidades indicadas pelo ensaio de RAD.

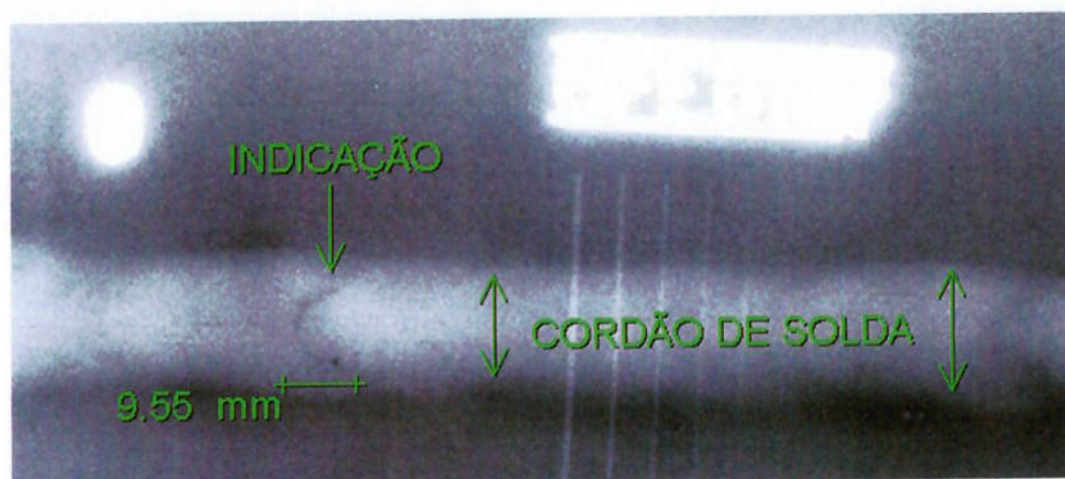


Figura 5-19 Ensaio de RAD do CP5 com indicação de falta de fusão (por Rodrigo Ribeiro).

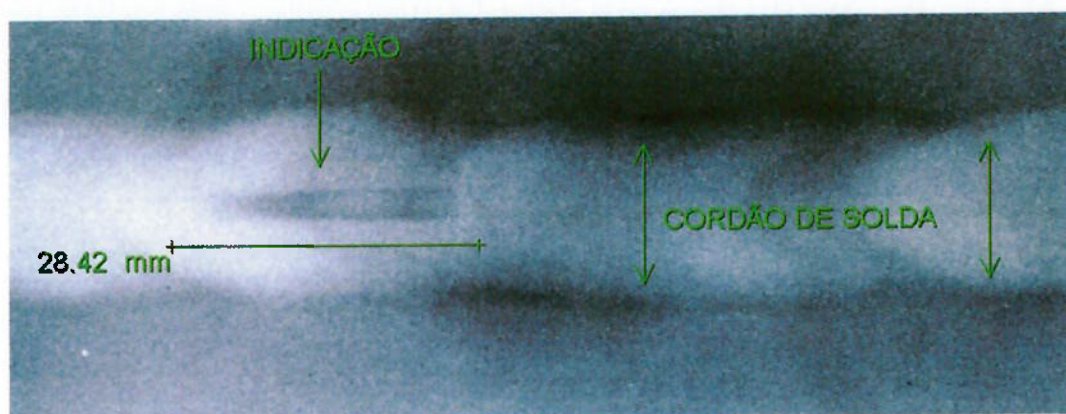


Figura 5-20 Ensaio de RAD do CP3 com indicação de falta de penetração (por Rodrigo Ribeiro).



Figura 5-21 Ensaio de RAD do CP6B com indicação de porosidade (por Rodrigo Ribeiro).

Durante a soldagem do CP6B, houve instabilidade do arco, ocasionando a fusão do eletrodo diretamente na poça de fusão, com extinção do arco e colagem do eletrodo, podendo ter ocasionado a descontinuidade indicada na Figura 5-21.

5.5 Importante constatação.

A verificação da junta soldada somente com o ensaio não destrutivo de gamagrafia (que, por exemplo, seria aceitável pela norma API 1104), dependendo da aplicação do equipamento, não seria recomendada, uma vez que o volume de identificação de descontinuidades com foco em falta de fusão foi significativamente menor se comparado ao ultrassom. Isso indica a

realização de ensaio por partícula magnética combinada com ultrassom, garantindo, assim, melhor possibilidade de identificar descontinuidades;

6 CONCLUSÕES.

Com base nos materiais utilizados, experimentos realizados e resultados obtidos, é possível concluir que:

1. De acordo com os dados coletados, os corpos de prova com menores índices de descontinuidades foram obtidos no processo MIG/MAG com transferência projetada (pulsada) e gás próximo ao indicado pelo fabricante, ou seja, Ar 92% e CO₂ 8%, resultando em juntas com maior qualidade, se comparado às demais variações executadas no experimento;
2. A alteração exclusiva do modo de transferência não é suficiente para garantir juntas soldadas com menores índices de descontinuidades, uma vez que a realização do experimento utilizando o gás apropriado do modo por curto-circuito, na transferência projetada (pulsada), resultou em maiores índices de encontro de defeitos;
3. A quantidade de respingo gerado no modo de transferência por curto-circuito é significativamente superior ao projetado (pulsado), quando utilizados os gases e os parâmetros adequados para cada modo de transferência;
4. O uso de gás com maior porcentagem de CO₂ no processo de soldagem MIG/MAG com modo de transferência projetado (pulsado) resulta em maiores índices de descontinuidades como respingos, falta de fusão, entre outros, além de instabilidade do arco durante o processo de soldagem;

5. O treinamento adequado e a prática nos processos de soldagens manuais são impactantes, pois, apesar de ter-se utilizado especificações de soldagens qualificadas como referência para o experimento, 93% das juntas foram reprovadas no ensaio por ultrassom, os defeitos encontrados não seriam aceitáveis, por exemplo, na qualificação de um procedimento de soldagem conforme API 1104 e também pelo sistema de qualidade utilizado no controle de desempenho de soldadores (conforme determinado por inspetor de soldagem nível dois), seria obrigatório a interrupção das atividades do soldador devendo realizar treinamentos para poder retornar as atividades de produção;
6. A energia de soldagem gerada no processo MIG/MAG com modo de transferência projetado (pulsado) é menor se comparada ao curto-circuito, mesmo quando utilizado o gás menos apropriado, pois, apesar de tensões e velocidades similares, a corrente necessária para o projetado (pulsado) é inferior, resultando em uma energia menor.

SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

1. Comparar o comportamento das juntas soldadas mediante ensaios destrutivos, inclusive avaliando, por meio de macrografia, distorções geométricas que contribuem para a descontinuidade tipo falta de fusão;
2. Executar experimento com mistura de gases mais próximos dos ideais para cada um dos modos de transferência e avaliar a sua influência na qualidade da junta soldada;
3. Executar controle mais rígido de preparação da junta, em especial, o controle dimensional, e averiguar a ocorrência de descontinuidade tipo falta de fusão.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

x

1. GE OIL & GAS. **Site da GE Energy**. Disponível em: <http://www.ge-energy.com/products_and_services/products/subsea_wellheads/VetcoGray_MS-800.jsp>. Acesso em: 8 Junho 2012.
2. UNION CARBIDE CORPORATION, LINDE DIVISION. Mig Welding Handbook. In: LINDE **Mig Welding Handbook**. Danbury: Union Carbide Corporation, 1985. Cap. 1, p. i - 07.
3. ESAB. Sobre a ESAB. **ESAB**, 2013. Disponível em: <http://www.esab.com.br/br/por/Sobre/1996_2006.cfm>. Acesso em: 24 Fevereiro 2013.
4. FRONIUS. Fronius International. **Site da Fronius**, 2013. Disponível em: <http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-AE4DDBF8-2CD5F74B/fronius_international/hs.xsl/68_240_ENG_HTML.htm>. Acesso em: 24 Fevereiro 2013.
5. WA TECHNOLOGY. welding. **History of welding**, 2013. Disponível em: <<http://www.netwelding.com/History%20of%20Welding.htm>>. Acesso em: 24 Fevereiro 2013.
6. ASM INTERNATIONAL. WELDING, BRAZING, AND SOLDERING - ASM Handbook. In: COLABORADORES, V. **WELDING, BRAZING, AND SOLDERING**. USA: ASM, v. 6, 1993. p. 573, 1062.
7. ASM INTERNATIONAL. **Properties and Selection: Irons Steels and High Performance Alloys**. 2ª. ed. USA: ASM, v. 1, 1993.
8. AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (API). **API Specification 5L**. 44ª. ed. Washington: API, 2007.
9. WAINER, E.; BRANDI, S. D.; DE MELLO, F. D. H. **Soldagem Processos e Metalurgia**. 1ª. ed. São Paulo: Blucher, 1992.
- 10 THE LINCOLN ELECTRIC COMPANY. **GMAW Welding Guide - Gas Metal Arc Welding - Carbon, Low Alloy and Stainless and Aluminium**. Cleveland, p. 24.
- 11 AMERICAN WELDING SOCIETY. Gas Shielded - Arc Welding. In: . ROTHCHILD, G. R., et al. **Gas Shielded - Arc Welding**. 3ª. ed. New York: American Welding Society, 1969. Cap. 23, p. 27-28.
- 12 MACHADO, I. G. Soldagem & Técnicas Conexas: Processos. In: MACHADO, . I. G. **Soldagem & Técnicas Conexas: Processos**. Porto Alegre: [s.n.], 1996. p. 194 - 218.
- 13 MODENESI, P. J. **Fontes de Energia para a Soldagem a Arco**. Belo Horizonte: [s.n.], 2009.
- 14 API AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **Specification for Wellhead and Christmas Tree Equipment**. 20ª. ed. Washington: [s.n.], 2010. Norma.
- 15 THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME Boiler & Pressure Vessel Code - Section V Nondestructive Examination**. 2007 edition. ed. New York: ASME, 2007.

- 16 DA SILVA, L. E. **Líquido Penetrante**. 3ª. ed. São Paulo: Abende, 2008.
- 17 ANDREUCCI, R. **Partículas Magnéticas**. Jan. 2007. ed. São Paulo: Abende, 2007.
- 18 ANDREUCCI, R. **Ensaio por Ultra-Som**. Set. 2006. ed. São Paulo: Abende, 2006.
- 19 ANDREUCCI, R. **Radiologia Industrial**. Jun. 2006. ed. São Paulo: Abende, 2006.
- 20 API - AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **Welding of Pipelines and Related Facilities**. 20ª. ed. Washington: API, 2005.
- 21 BRANDI, S. D. **Notas de Aula da Disciplina SLD 026 Metalurgia da Soldagem**. São Paulo. 2012. Notas de Aula em pdf.
- 22 AWS - AMERICAN WELDING SOCIETY. **Specification for Low-Alloy Steel Electrodes and Rods for Gas Shielded Arc Welding**. 3ª ed. ed. Miami: AWS, 2005.
- 23 THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. An international code 2007 ASME Boiler & Pressure Vessel Code IX Welding and Brazing Qualifications. In: ASME **ASME IX Welding and Brazing Qualifications**. Edição 2007. ed. New York: ASME, 2007. p. 68.
- 24 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS E INSPEÇÃO - ABENDI. **Processos de Fabricação**. 1ª. ed. São Paulo: ABENDI, 2011.

X

Anexo I – Especificações de soldagem.

Processo: MIG/MAG curto-circuito.

Tipo: semiautomático.

Chanfro: em V, com abertura de raiz de 2mm e ângulo do chanfro de 60°.

Posição de soldagem: Plana.

Preaquecimento: mínimo 200 °C; Interpasse: máximo 350 °C.

Metal de base: espessura de 12,7 mm.

Tratamento térmico: não aplicável.

Gás de proteção: 80%Ar – 20%CO₂ (vazão 18 litros por minuto).

Eletrodo sólido: ER80S-D2 AWS 5.28, Ø1,2 mm.

Corrente/Polaridade: Corrente direta/Polaridade reversa.

Corrente: 149 – 198 A.

Tensão: 17 – 20 V.

Velocidade: 4 – 7 in/min.

Processo: MIG/MAG projetado (pulsado).

Experimento 1- Gás de proteção: 92%Ar – 8%CO₂ (vazão 18 litros por minuto).

Experimento 2- Gás de proteção: 80%Ar – 20%CO₂ (vazão 18 litros por minuto).

Corrente: 86 – 150 A.

Tensão: 18 – 26 V.

Velocidade: 3 – 8 in/min.

Chanfro, posição de soldagem, preaquecimento, interpasse metal de base eletrodo sólido e polaridade iguais ao curto-circuito.

Anexo II – Relatório de partículas magnéticas.

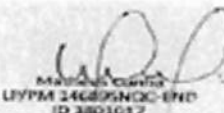
RELATÓRIO DE PARTÍCULAS MAGNÉTICAS (MAGNETIC PARTICLE EXAMINATION REPORT)		RPM 2493/2012	
Cliente: (Customer)	Número de Série: (Serial Number)	Nº OP: (Manufacturing Order)	
JAWS	N/A	0	
Part Number/Revisão: (PN/Revision)	Desenho/Revisão: (Drawing/Revision)	Descrição: (Description)	
Q/NC	Q/NC	TUBO API SL X-56	
Local Examinado: (Area submitted to evaluation)			
DIÂMETRO INTERNO EXTERNO.			
Procedimentos/Normas Aplicáveis: (Test Procedures/Rev)		Especificação: (Specification)	
PR-002 Rev.6 - 2008		ASME Sec.V Ed. 2010	
Material Examinado: (Material)		Espessura: (Thickness)	
X-56		12,7mm	
Estado da Superfície: (Surface conform)		Método de Limpeza: (Cleaning method)	
ESMERILHADO		SOLVENTE	
Técnica de Magnetização: (Magnetization Technique)	Tipo de Corrente: (Current Type)	Amperagem: (Amperage Level)	Veículo de Suspensão: (Suspension Vehicle)
Yoke-Longitudinal	ALTERNADA	17/65 A/cm	ÁGUA
Concentração de Partícula: (Particle concentration level)	Fabricação da Partícula: (Particle trade mark)	Lote: (Batch)	Tipo da Partícula: (Particle Type)
0.4m/100ml	MAGNAFLUX 14-A	FO50097	☒ Úmida: (Wet) ☒ Fluorescente: (Fluor.) ☐ Seca: (Dry) ☐ Não-Fluorescente: (Non-Fluor.)
Nº de Instrumentos Utilizados: (Examination equip. number)	Marca do Instrumento: (Model)	Data de Calibração: (Calibration date)	
2711	MAGNAFLUX Y-6	08/08/2012	
Equip. de Iluminação: (Lighting Method)	Intensidade da Luz: (Block Ligh intensity)	Fabricante: (Magn. Equipment Manuf.)	Modelo: (Lighting Equipment - Model)
LUMINÁRIA-UV	1800µW/cm2	MAGNAFLUX	ZB-100F

Ensaio Realizado em Material (Material Condition)☒ Sem Alívio
(Without stress relief)☐ Antes do Alívio
(Before stress relief)☐ Após do Alívio
(After stress relief)**REGISTRO DOS RESULTADOS - DESCONTINUIDADES (Indications report and evaluation)**

Nº (Nº)	Tipo (Type)	Cota (mm) (Position)	Comprimento (mm) (Length)	Laudo (Result)
1a				
2a				

LAUDO DO FINAL (Final result)☐ Aprovado
(Approved)☒ Rejeitado
(Non Conform)RNC Nº:
(NCR Number)

N/A

OBSERVAÇÃO/Instrumentos utilizados na medição da descontinuidade: (Note) / (Measuring equipment)
RELATÓRIO INFORMATIVO, ESTUDO DE CASO.
DADOS REFERENTE A REPROVAÇÃO VIDE ANEXO.☒ Inspeção do Cliente (Customer Inspection) ☐ Sim (Yes) ☐ Não (No)


MATHEUS COSTA
LTPM 146805NOC-ENR
ID 3801017

Assinatura do Inspetor
Inspector Signature
Data (Date): 07/12/2012

Indicação de milímetros reprovados											
CP1 (Øint 219mm)			CP2 (Øint 219mm)			CP3 (Øint 317mm)			CP4 (Øint 317mm)		
Área I	45		Área I	65		Área I	50		Área I	65	
Área II	260		Área II	165		Área II	170		Área II	90	
Área III	180		Área III	20		Área III	185		Área III	55	
Total	485		Total	250		Total	405		Total	210	
Curto-Circuito	70%		Curto-Circuito	36%		Curto-Circuito	41%		Curto-Circuito	21%	
CP5 (Øint 219mm)			CP6 (Øint 219mm)			CP7 (Øint 317mm)			CP8 (Øint 317mm)		
Área I	30		Área I	125		Área I	330		Área I	390	
Área II	90		Área II	85		Área II	335		Área II	140	
Área III	0		Área III	55		Área III	70		Área III	0	
Total	120		Total	265		Total	735		Total	530	
Pulsado	17%		Pulsado	39%		Pulsado	74%		Pulsado	53%	
			CP6B (Øint 219mm)								
			Área I	9							
			Área II	18							
			Área III	0							
			Total	27							
			Pulsado	4%							

[illegible]

[illegible]

Qualität der Führung

50 Anos de Brasil

Soltec Welding
a subsidiary company

© 2006 The Authors
Journal compilation © 2006 Blackwell Publishing Ltd

Carton No. Werkzeug Nr. Certificate	004820506	Position No. Auftrag No. Carton No.	Carton Charge Heute No.	004820516
---	-----------	---	----------------------------	-----------

[illegible]

Análise Química II							
C	S	Mn	P	S	Mo	W	Co
0,000	0,030	1,850	0,014	0,007	0,000	0,000	0,000

Ensayos Mecánicos

Unter-Ebene Streckgrenze Yield Strength 670 MPa	Symmetrie & Größe Engineering Size Tensile Strength 1.5E+08	Materialwerte Dichte Weight 7.7 %
Bruchtemperatur bei Zugbruch Critical Temperature Impact 271 80 °C	Elongation 80-100 Elongation	

150 151 152

QUOTY: 1,000000. A 00000000 DE OUTUBRO DE 2000. VALOR FACILITADO: 0,00 ✓
 VALOR DE AVALIO: 00000000 DE OUTUBRO DE 2000 ✓
 VALOR DE AVALIO: 00000000 DE OUTUBRO DE 2000 ✓

Inquiries: Joe Lippard • 800-967-8242

[REDACTED]
 TA
 H2
 2/5/2012

02-069 / 087 : 2008-10-01

Alhilar Técnica de Soldagem Ltda.

Consulta Técnica: 0800-119002

Siga: www.btwbr.com.br

Sistema de garantia da qualidade certificado por a ISO 9001:2000 pelo ABNT/V

Macmillan Magazines, 271
 Corporation Road, Newbury, UK
 Tel: +44 (0) 1344 386200 Fax: +44 (0) 1344 386201
 e-mail: info@macmillan.co.uk
 www: [www: www.macmillanmagazines.co.uk](http://www.macmillanmagazines.co.uk)

Variable	Unit	Value	Unit	Value
Age (years)	years	65.0	SD	10.0
Weight (kg)	kg	70.0	SD	15.0
Height (cm)	cm	170.0	SD	5.0
Body mass index (BMI)	kg/m ²	24.0	SD	3.0
Heart rate (b/min)	b/min	70.0	SD	10.0
Stroke volume (L)	L	70.0	SD	10.0
Cardiac output (L/min)	L/min	5.0	SD	1.0



Anexo V – Fotos de realização do ensaio por líquidos penetrantes.



Anexo VI – Critérios de aceitação.

Líquido penetrante

Conforme ASME Seção VIII, Divisão 1, Apêndice 8.

Indicações superiores a 1,6 mm são consideradas relevantes.

Todas as superfícies examinadas devem estar isentas de:

- Indicações lineares relevantes;
- Indicações arredondadas relevantes, maiores do que 4,8 mm;
- Quatro ou mais indicações arredondadas relevantes alinhadas, separadas por uma distância igual ou menor que 1,6 mm, medidas entre bordas de indicações consecutivas;
- A indicação de uma descontinuidade pode ser maior do que a própria descontinuidade; entretanto, a indicação é que deve ser utilizada para a aplicação do critério de aceitação.

Partículas magnéticas

Conforme ASME Seção VIII, Divisão 1, Apêndice 8.

Indicações superiores a 1,5 mm são consideradas relevantes.

Todas as superfícies examinadas devem estar isentas de:

- Indicações lineares relevantes;
- Indicações arredondadas relevantes, maiores do que 5,0 mm;
- Quatro ou mais indicações arredondadas relevantes alinhadas, separadas por uma distância igual ou menor que 1,5 mm, medidas entre bordas de indicações consecutivas;
- A indicação de uma descontinuidade pode ser maior do que a própria descontinuidade; entretanto, a indicação é que deve ser utilizada para a aplicação do critério de aceitação.

Ultrassom

Descontinuidades que excedem ao nível de referência 100% da curva de referência serão consideradas reprovadas, se o comprimento exceder às seguintes dimensões:

- 6,3 mm para "t" ≤ 19 mm;
 - 1/3t para "t" > 19 mm até 58 mm;
- Considerar para junta de topo "t" igual à espessura da solda, excluindo-se o reforço;
- Para juntas de diferentes espessuras, "t" será considerado a menor espessura.