

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

Aldo Santos Pereira

**SOLDAGEM EM OPERAÇÃO DE TUBOS API DE ALTA  
RESISTÊNCIA E BAIXA ESPESSURA COM ÊNFASE NA  
PERFURAÇÃO E TRINCAS A FRIO**

Florianópolis

2012



Aldo Santos Pereira

**SOLDAGEM EM OPERAÇÃO DE TUBOS API DE ALTA  
RESISTÊNCIA E BAIXA ESPESSURA COM ÊNFASE NA  
PERFURAÇÃO E TRINCAS A FRIO**

Tese submetida ao Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Mecânica  
para a obtenção do Grau de Doutor  
em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Augusto Jose de  
Almeida Buschinelli, Dr. Ing.

Florianópolis

2012



Aldo Santos Pereira

**SOLDAGEM EM OPERAÇÃO DE TUBOS API DE ALTA  
RESISTÊNCIA E BAIXA ESPESSURA COM ÊNFASE NA  
PERFURAÇÃO E TRINCAS A FRIO**

Esta Tese foi julgada aprovada para a obtenção do Título de  
“Doutor em Engenharia Mecânica”, e aprovada em sua forma final pelo  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Florianópolis, 13 de fevereiro de 2012.

---

Prof. Júlio César Passos, Ph. D.  
Coordenador do Curso

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Augusto Jose de Almeida Buschinelli, Dr. Ing.  
Presidente

---

Prof. Valtair Antonio Ferraresi, Ph. D.  
Relator



---

Prof. Alexandre Queiroz Bracarense, Ph. D.

---

Carlos Eduardo Iconomos Baixo, Dr. Eng.

---

Prof. Ramón Sigifredo Cortes Paredes, Dr. Eng.

---

Prof. Carlos Enrique Niño Bohórquez, Dr. Eng.

**Não basta conquistar a sabedoria, é preciso usá-la.**  
**CICERO**

## **DEDICATÓRIAS**

**Dedico este trabalho a Deus, a minha família, esposa Terezinha e Filhos Fernando Henrique e Ramon Felipe, em especial a minha mãe, Dona Moca, que tanto torceu e rezou para a finalização deste doutorado.**

## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, prof. Augusto J. A Buschinelli, pelo constante incentivo e apoio durante a realização do doutorado.

Ao Prof. Carlos E. Niño, pela ajuda na execução deste trabalho.

À minha Família, pela paciência e esforço despendido durante todo tempo da realização do doutorado.

À UTFPR, Câmpus Curitiba, pela possibilidade de realização deste trabalho.

A todos os amigos e colegas do DAMEC, da UTFPR-Curitiba.

A todos os amigos do Labsolda e do laboratório da Cavitação, sem nomeá-los para não se esquecer de ninguém.

A todos os bolsistas que ajudaram no transcorrer desta tarefa: André, Richard, Gabriel, Karen e Alexandre.

Ao amigo Luciano Santos, pela ajuda na atualização do programa para determinar a temperatura interna da parede do tubo.

Ao colega e amigo Celso Salamon, pela ajuda no projeto e montagem da bancada de teste.

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFSC.

Às empresas: Irmãos Passaúra S/A, especialmente ao pessoal do controle da qualidade da matriz, pela ajuda e fornecimento de alguns consumíveis; Spectroscan Tecnologia de Materiais Ltda., pelas realizações de espectrometrias e ensaios mecânicos; Hobart Brothers, através da Alumaq, pelo fornecimento do eletrodo E 71T-11; e Apolo Tubulares S/A, pelo fornecimento do tubo API 5L X70.

## RESUMO

A soldagem em operação é uma técnica frequentemente empregada no reparo ou modificação de tubulações devido às suas vantagens econômicas, pois evita as perdas oriundas da interrupção do serviço e garante a continuidade no fornecimento do fluido. Na aplicação da técnica, as principais dificuldades envolvidas são a ocorrência de trincas a frio e o risco de perfuração da parede pelo arco voltaico. A tecnologia existente e a experiência adquirida estão relacionadas principalmente com o reparo de tubos de parede espessa (6,3 mm ou mais) e de aços de baixa resistência. O objetivo do presente trabalho foi o desenvolvimento de reparo em dutos com pequena espessura, entre 3,2 e 4,8 mm, fabricados em aços de alta resistência (API 5L X70) de uma forma segura, isto é, evitando ao mesmo tempo a perfuração e as trincas a frio induzidas pelo hidrogênio. Dois métodos foram pesquisados: reparo por simples deposição de solda (RDS) e soldagem com o uso de dupla calha. Foram qualificados procedimentos de soldagem para reparos em operação com a técnica da dupla calha. Também, foi construída uma bancada para testes de soldagem com ajuste variável na vazão e pressão do fluido. As soldagens foram realizadas na direção longitudinal sobre tubos contendo água como fluido interno com pressões de 2 e 5 bar e vazões de 20, 40 e 80 l/min. Para a soldagem foram usados dois processos semiautomáticos: MIG/MAG (GMAW) e arame tubular autoprotégido (FCAW-S). Para avaliar a ocorrência de trincas foram executados dois conjuntos de experimentos: o primeiro, em que foi variada a folga entre a calha e o tubo de aço com alto carbono equivalente; o segundo, em que foi imposta alta restrição à junta soldada, e também resfriamento rápido, obtido com fluxo de água no interior do tubo. Não foram detectadas trincas nos dois experimentos. Admite-se que não houve fissuração devido ao uso de processos e consumíveis com baixo teor de hidrogênio. Por outro lado, na avaliação da perfuração foram pesquisados parâmetros de soldagem limite para ocorrência, para cada processo, em função das condições estabelecidas de vazão e de pressão. Os resultados mostraram que tanto para o processo GMAW em corrente pulsada e técnica empurrando a poça, como para FCAW-S transferência goticular e tocha reta, os níveis de energia de soldagem para ocorrência da perfuração foram superiores aos obtidos na literatura para SMAW; portanto, esses processos são apropriados para soldagem de reparo em operação. Os ensaios realizados para a qualificação dos procedimentos

de soldagem em operação, com os processos GMAW-P técnica empurrando e FCAW-S goticular e tocha reta, foram aprovados de acordo com os requisitos prescritos no apêndice B da norma API 1104.

## ABSTRACT

In-service welding is a technique often used when repairing and modifying pipelines due to its economic advantages, since it avoids losses from service disruption and ensures continuity in the fluid supply. When using the technique, the main difficulties incurred are the occurrence of cold cracks and the risk of burn-through of the pipe wall by the arc. The existing technology and experience are primarily related to the repair of thick-walled pipelines (6.3 mm or more) and low strength steels. The aim of this study was the development of a technique for safety repairing pipelines with low thickness, between 3.2 to 4.8 mm, manufactured from high strength steels like API 5L X70 (without burn-through and cold cracks induced by hydrogen). Two methods were investigated, namely: the repair by direct deposition of weld-metal onto an active pipe and welding with the use of a full encirclement sleeve. Welding procedures were qualified with an in-service pipeline with the technique of full encirclement sleeve. A welding test bench with adjustable valves of flow and pressure (with water as flow) was constructed. The welds were made in the pipes longitudinal direction. The internal fluid pressures were (2 and 5 bar) and considered flow (20, 40 and 80 l/min.). For welding were used two semiautomatic processes: GMAW (MIG/MAG) and FCAW-S (self-shielded). For assessing the occurrence of cracks two sets of (set) adjusted experiments were performed: the first experiment, called "F", had the gap between the sleeve and pipe and steel with high carbon equivalent. The second experiment, called "R", a severe restriction was imposed onto the welded joint, as well as a fast cooling due to the flow of water inside the pipe. After analysis, no cracks were detected in both sets of experiments (considering the procedures employed and the use of low hydrogen consumables). On the other hand, for evaluating of the burn-through the welding limit parameters for each process were studied, according to the conditions set forth flow rate and pressure. The results for both techniques, the GMAW - pulsed forehand and FCAW-S spray transfer and perpendicular torch, showed that the heat input levels of welding for the occurrence of burn-through were higher than those obtained in the literature for SMAW. Therefore, they are more suitable for welding in in-service. The tests for qualifying of welding procedures in-service, processes GMAW-P and FCAW-S, were approved in accordance with the requirements prescribed in Appendix B of API Standard 1104

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1– Estimativa da demanda (Brasil, A. Latina e NAFTA) X-80 7	
Figura 3.2 – Evolução na produção de aços API. (TAISS, 2007).	8
Figura 3.3 - Evolução dos aços para a fabricação de tubos de grandes diâmetros. (FEDELE, 2002)	10
Figura 3.4 – Técnica de trepanação (PAES et al, 2000)	11
Figura 3.5 – Operação de “ <i>hot-tapping</i> ”: a) Perfuração da tubulação;	12
Figura 3.6 – Instalação de Dupla-Calha Tipo A e B. A seta indica a Tira de Superposição (PAES et al, 2000).	12
Figura 3.7 – Solda de filete entre tubo e calha (BRUCE, 2000b).	14
Figura 3.8 – Macrografia de cordões depositados nos mesmos parâmetros de soldagem, mostrando a maior penetração no RDS. (BRUCE, 2000b)	14
Figura 3.9 – Solda de simples deposição sobre tubo com perda de parede interna. (BRUCE, 1998).	15
Figura 3.10 - Radiografia e desenho de uma solda mostrando a perfuração (KODAK, 2008).	16
Figura 3.11- Ocorrência de perfuração em deposição de solda sobre tubo SAE 1020 de 3,2 mm de parede. (GUBER, 2005).	17
Figura 3. 12 – Relação entre os fatores de influência da perfuração na soldagem	17
Figura 3.13 - Relação entre as temperaturas medidas com termopar e as estimada (PÉRES, 2005).	19
Figura 3.14 – Temperatura de pico na superfície interna ao utilizar varios processos de soldagem com energia de 12,9 kJ/cm. (BEGG, 2009).	21
Figura 3.15 - Penetração do cordão em função do fator $I^{1.5}/V_s^{0.7}$ em condições de convecção natural ao ar (PÉREZ, 2005).	23
Figura 3.16 – Deflexão radical calculada em função da pressão do fluido, para a soldagem de um tubo de 3,0 mm de espesura utilizando energia de soldagem de 7,5 kJ/cm. (SABAPATHY et al, 2000)	25
Figura 3.17 - Comparação das condições previstas para ocorrer à perfuração	25
Figura 3.18 – Temperatura na parede interna do tubo e $T_{sat}$ versus pressão interna com 1,1 e 1,65 kJ/mm (BELANGER, 2000).	26
Figura 3.19 – Taxa de resfriamento na parede externa do tubo com água e aporte de calor 1,4 kJ/mm ((BELANGER, 2000).	27

Figura 3.20 – Efeito do aporte de calor simulado sobre a temperatura da parede interna com a transição de ebulição em água através do programa do Instituto Battelle (BELANGER, 2000).	28
Figura 3.21 – Trinca a frio na ZTA (INFOSOLDA, 2007).	29
Figura 3.22 – Aspecto típico de trincas a frio (PÉREZ, 2005).	30
Figura 3.23 – Fatores necessários para ocorrência de trincas a frio	31
Figura 3.24 – Superfície de fratura de um olho de peixe ( <i>fisheye</i> ) vista através do MEV, mostrando um poro na região central circundada por uma fratura frágil (BAILEY, 2010).	32
Figura 3.25 – Uma inclusão como local de origem da trinca	32
Figura 3.26 – Equipamento de aquecimento por indução, modelo ProHeat 35 Induction Power Source, da Miller. (MILLER, 2007).	34
Figura 3.27 – Sistema de aquecimento por indução utilizado durante a soldagem do Trans-Alaska. (BRUCE, 2004).	35
Figura 3.28 – Seqüências de deposição de passes de solda (BRUCE, 2004).	36
Figura 3.29 – Testes realizados utilizando passes de revenimento.	37
Figura 3.30 – Influência da temperatura e da umidade relativa do ar no hidrogênio difusível de eletrodos básicos (PAES et al, 2000).	38
Figura 3.31 – teores típicos de hidrogênio para diversos processos de soldagem	39
Figura 3.32 - Processo básico de soldagem MIG/MAG. Fonte: ESAB.	42
Figura 3.33 - Tipos básicos de transferência metálica: a) Transferência por curto-circuito, b) Transferência globular, c) Transferência goticular.	43
Figura 3.34 - Seqüência de transferência por arco pulsado.	44
Figura 3.35 - fenômeno da formação do cordão no processo GMAW	45
Figura 3.36 - Balanceamento dos efeitos da energia imposta e da sobreposição da poça sobre a penetração para velocidade de soldagem crescente.	46
Figura 3.37 – Esquema para definição do ângulo de ataque na soldagem MIG/MAG (SCOTTI, 2008).	46
Figura 3.38 - Esquema de soldagem com arame tubular pelo processo FCAW-S.	47
Figura 3.39 – Efeito da velocidade do vento sobre a tenacidade de aço depositado pelos processos GMAW e FCAW-S (BONISZEWSKY, 1992).	47
Figura 3.40 – Representação esquemática do “efeito colchão”	48
Figura 3.41 – Peça de teste para a qualificação da solda em operação de dutos.	49

Figura 3.42 – Localização da retirada dos Corpos de prova	50
Figura 4.1 – Desenho mostrando os locais das juntas C e D com a execução de um único passe e em condições distintas.	54
Figura 4.2 – Desenho mostrado a folga de 0 a 5,0 mm entre a calha e o tubo.	55
Figura 4.3 – Locais de retiradas dos corpos de prova para ensaio macrográfico.	55
Figura 4.4 – Desenho mostrando os detalhes da junta com restrição.	55
Figura 4.5 - Localizações dos cordões de solda sobre o tubo.	56
Figura 4.6 – Corpos de prova para análises.	57
Figura 4.7 – Foto mostrando como medir as dimensões do cordão e da ZAC.	57
Figura 4.8 – Detalhes da solda de topo com chanfro em V com três cordões (calha com tubo).	57
Figura 4.9 – detalhe da solda em ângulo com um filete (calha com tubo).	58
Figura 4.10 - Desenho mostrando a calha após a soldagem com o tubo e antes da planificação.	58
Figura 4.11 - Corpo de prova para ensaio de tração (API 1104).	58
Figura 4.12 - Corpo de prova para ensaio de dobramento face (API 1104).	58
Figura 4.13 - Corpo de prova para ensaio de dobramento raiz (API 1104).	59
Figura 4.14 - Corpo de prova para ensaio de fratura ( <i>Nick-Break</i> ) (API 1104).	59
Figura 4.15 – Bancada de teste.	60
Figura 4.16 - Fonte de soldagem DIGITEC 450.	60
Figura 4.17 - Sistema de deslocamento da tocha.	61
Figura 4.18- Sistema de aquisição portátil de dados de soldagem (SAP).	61
Figura 4.19 - Fluxograma das etapas para a realização do trabalho.	63
Figura 4.20 - Foto ilustrativa mostrando os locais das medições de micro dureza.	68
Figura 4.21 - Pontos de coordenadas ( $y_1, z_1$ ) e ( $y_2, z_2$ ) usados no programa de Santos para determinar os parâmetros fonte. a) penetração da ZAC < espessura; b) penetração da ZAC > espessura.	69

Figura 5.1 - Junta de filete com eletrodo revestido na união calha/tubo: metal de base ASTM A 335 Grau P5 e metal de solda E 8018 – B8.	71
Figura 5.2 - Ensaio com liquido penetrante para a detecção de trinca superficial na união do calha/tubo: metal de base ASTM A 335 Grau P5 e metal de solda E 8018 – B8.	71
Figura 5.3 - Macrografia de soldas com folga variável entre calha e tubo (metal de base ASTM A 335 Grau P5 e metal de solda E 8018 – B8): à esquerda, com preaquecimento e ressecagem; à direita sem preaquecimento nem ressecagem.	72
Figura 5.4 - Soldas de filete com o processo GMAW-P para avaliação da trinca na soldagem do tubo/calha com restrição.	73
Figura 5.5 - Soldas de filete com o processo FCAW-S para avaliação da trinca na soldagem do tubo/calha com restrição.	73
Figura 5.6 – Foto do ensaio com liquido penetrante para a detecção de trinca superficial na soldagem da calha/tubo com restrição no metal de base API 5L (X70) e metal de adição (ER 80S-G).	74
Figura 5.7 - Macrografias da solda com restrição entre calha e tubo	74
Figura 5.8 - Oscilograma de tensão e corrente para GMAW-P na soldagem do tubo/calha com restrição (corrente pulsada).	75
Figura 5.9 - Oscilograma de tensão e corrente para FCAW-S na soldagem do tubo/calha com restrição (goticular).	76
Figura 5.10 – Comparação do perfil de dureza entre tubos nos processos GMAW-P (CP-B) e FCAW-S (CP-B1).	77
Figura 5.11 – Comparação do perfil de dureza entre tubos e calhas nos processos GMAW-P (CP-B) e FCAW-S (CP-B1).	78
Figura 5.12 - Comparação do perfil de dureza para calhas e para tubos nos processos GMAW-P (CP-A e B) e FCAW-S (CP-A1 e B1).	79
Figura 5.13 – Macrografia com os mesmos parâmetros de soldagem	81
Figura 5.14 - Gráfico do efeito da corrente sobre a penetração para velocidade de soldagem 25 cm/min., obtido pela regressão linear com dados	82
Figura 5.15 - Gráfico da correlação dos valores de penetração para a tocha empurrando a poça de fusão.	83
Figura 5.16 - Gráfico da superfície de resposta da penetração versus corrente e velocidade de soldagem com a tocha empurrando	84
Figura 5.17 - Gráfico da superfície de resposta da penetração versus corrente e velocidade de soldagem com a tocha puxando.	84
Figura 5.18- Gráfico mostrando o efeito da Im com GMAW-P na penetração do cordão para uma mesma Vs.	88

Figura 5.19 – Mostra o intervalo de confiança de 95% no processo GMAW-P	88
Figura 5.20 – Macrografia mostrando diferentes perfis de penetração com único cordão de solda depositado com GMAW-P.	89
Figura 5.21 – Amostra “230-D” com suas isolinhas de temperatura máxima (1451°C) e o ciclo térmico imposto durante a soldagem com GMAW-P na parede interna da chapa na espessura de 3,0 mm.	90
Figura 5.22 - Macrografia mostrando cavidades alongadas na soldagem com GMAW em curto circuito e empurrando a poça de solda.	94
Figura 5.23 - Gráfico mostrando um patamar no nível da penetração entre 90 a 140 A no processo de soldagem FCAW-S.	95
Figura 5.24 - Macrografia mostrando cavidades alongadas na soldagem com FCAW-S em corrente pulsada e empurrando a poça de solda.	96
Figura 5.25 - Penetração do cordão de solda para GMAW (curto circuito) e para FCAW-S (goticular), tubo sem fluido e 3,2 mm de espessura.	97
Figura 5.26 – Macrografias mostrando a ausência de discontinuidades para o processo de soldagem FCAW-S com transferência goticular e Vs de 30 cm/min.	98
Figura 5.27 - Gráficos da penetração do cordão de solda em função da Im, para GMAW e FCAW-S de acordo com Vs.	100
Figura 5.28 - Macrografias mostrando a penetração em função do processo de soldagem e modo de transferência.	101
Figura 5.29 – Penetração excessiva durante a soldagem de tubo sem fluido interno, GMAW em curto circuito, Im 180 A, Vs 30 cm/min. e espessura de parede 3,2 mm.	102
Figura 5.30 - Furo durante a soldagem de tubo com vazão de 40 l e pressão de 5 bar, GMAW em curto circuito, Im 165 A, Vs 30 cm/min. e espessura de parede 3,2 mm.	103
Figura 5.31 – Furo em tubo mostrando a parte externa e interna sem a ocorrência da penetração e sem deflexão radial com água a pressão de 5 bar.	103
Figura 5.32 – Furos provenientes da soldagem de tubo com fluido e pressão interna: Seta 1 devido ao esforço trativo; Seta 2 devido a incidência do arco voltaico.	104
Figura 5.33 - Furo proveniente da soldagem de tubo com fluido e pressão interna: Seta 1 furo devido ao esforço trativo; Seta 2 ausência de furo na incidência do arco voltaico.	104

- Figura 5.34 - Gráfico da correlação ( $R^2$ ) entre os valores ajustados e medidos da penetração do arco para GMAW-P empurrando na soldagem com simples deposição sobre tubos API 5L X70 com água na vazão de 40 l/min. e pressão 5 bar 107
- Figura 5.35 - Gráfico da superfície de resposta da penetração versus corrente e velocidade de soldagem para o processo GMAW-P empurrando na soldagem com simples deposição sobre tubos API 5L X70 com água na vazão de 40 l/min. e pressão 5 bar. 108
- Figura 5.36 - Gráfico da superfície de resposta da reforço versus corrente e velocidade de soldagem para o processo GMAW-P empurrando na soldagem com simples deposição sobre tubos API 5L X70 com água na vazão de 40 l/min. e pressão 5 bar. 109
- Figura 5.37 - Gráfico da superfície de resposta da largura versus corrente e velocidade de soldagem para o processo GMAW-P empurrando na soldagem com simples deposição sobre tubos API 5L X70 com água na vazão de 40 l/min. e pressão 5 bar. 110
- Figura 5.38 – Macrografias após a soldagem GMAW-P empurrando a poça em tubos API 5L X70, Vazão 40 l/min. e pressão de 5 bar, na espessura de 3,2 mm. 112
- Figura 5.39 – Amostra “7 G” com suas isolinhas de temperatura máxima e o ciclo térmico imposto durante a soldagem com GMAW-P na vazão de 40 l/min. e pressão de 5 bar, na parede interna do tubo. 115
- Figura 5.40 – Amostra “12 G” com suas isolinhas de temperatura máxima e o ciclo térmico imposto durante a soldagem com GMAW-P na vazão de 40 l/min. e pressão de 5 bar, na parede interna do tubo. 116
- Figura 5.41 - Gráfico da correlação ( $R^2$ ) entre os valores ajustados e medidos da penetração do arco para o processo FCAW-S goticular na soldagem com simples deposição sobre tubos API 5L X70 com água na vazão de 40 l/min. e pressão 5 bar. 118
- Figura 5.42 - Gráfico da superfície de resposta da penetração versus corrente e velocidade de soldagem para o processo FCAW-S goticular e tocha reta na soldagem com simples deposição sobre tubos API 5L X70 com água na vazão de 40 l/min. e pressão 5 bar. 119
- Figura 5.43 - Gráfico da superfície de resposta da penetração versus corrente para o processo FCAW-S goticular e tocha reta na

- soldagem com simples deposição sobre tubos API 5L X70 com água na vazão de 40 l/min. e pressão 5 bar. 120
- Figura 5.44 - Gráfico da superfície de resposta da reforço versus corrente e velocidade de soldagem para o processo FCAW-S goticular tocha reta na soldagem com simples deposição sobre tubos API 5L X70 com água na vazão de 40 l/min. e pressão 5 bar. 121
- Figura 5.45 - Gráfico da superfície de resposta da largura versus corrente e velocidade de soldagem para o processo FCAW-S goticular tocha reta na soldagem com simples deposição sobre tubos API 5L X70 com água na vazão de 40 l e pressão 5 bar. 122
- Figura 5.46 - Macrografias após a soldagem FCAW-S goticular e tocha reta em tubos API 5L X70, Vazão 40 l/min. e pressão de 5 bar, na espessura de 3,2 mm. 124
- Figura 5.47 – Amostra “10 F” com suas isolinhas de temperatura máxima e o ciclo térmico imposto durante a soldagem com FCAW-S na vazão de 40 l/min. e pressão de 5 bar, na parede interna do tubo. 127
- Figura 5.48 – Amostra “9 F” com suas isolinhas de temperatura máxima e o ciclo térmico imposto durante a soldagem com FCAW-S na vazão de 40 l/min. e pressão de 5 bar, na parede interna do tubo. 128
- Figura 5.49 – Solda de topo calha-tubo material API 5L X70 e metal de adição AWS ER 80S-G no processo GMAW-P. O tubo contém água como fluido interno na vazão de 80 l/min. e pressão de 2 bar. 129
- Figura 5.50 – Corpos de prova dos ensaios de tração material API 5L X70 e metal de adição AWS ER 80S-G no processo GMAW-P. O tubo contém água como fluido interno na vazão de 80 l/min. e pressão de 2 bar. 130
- Figura 5.51 - Corpos de prova dos ensaios de dobramento de face e raiz material API 5L X70 e metal de adição AWS ER 80S-G no processo 130
- Figura 5.52 - Aspecto dos corpos de prova dos ensaios de fratura mostrando regiões brilhantes típicas de “olho de peixe” no processo GMAW-P. O tubo contém água como fluido interno na vazão de 80 l/min. e pressão de 2 bar. 131
- Figura 5.53 – Detalhe do aspecto da fratura revelado por MEV (região da seta CP inferior Figura 5.52), mostrando uma região central de quase-clivagem. 132
- Figura 5.54 - Macrografia da calha-tubo material API 5L X70 e metal de adição AWS ER 80S-G no processo GMAW-P. O tubo contém

- água como fluido interno na vazão de 80 l/min. e pressão de 2 bar. 133
- Figura 5.55 - Perfil de dureza na junta soldada material API 5L X70 e metal de adição AWS ER 80S-G no processo GMAW-P. O tubo contém água como fluido interno na vazão de 80 l/min. e pressão de 2 bar. 134
- Figura 5.56- Microestrutura ao longo do ZF, ZAC e MB no lado do tubo material API 5L X70 e metal de adição AWS ER 80S-G no processo GMAW-P. O tubo contém água como fluido interno na vazão de 80 l/min 135
- Figura 5.57 – Solda de topo calha-tubo material API 5L X70 e metal de adição AWS ER 80S-G no processo GMAW-P. O tubo contém água como fluido interno na vazão de 40 l/min. e pressão de 5 bar. 136
- Figura 5.58 - Corpos de prova dos ensaios de tração material API 5L X70 e metal de adição AWS ER 80S-G no processo GMAW-P. O tubo contém água como fluido interno na vazão de 40 l/min. e pressão de 5 bar. 137
- Figura 5.59 - Corpos de prova dos ensaios de dobramento de face e raiz material API 5L X70 e metal de adição AWS ER 80S-G no processo GMAW-P. O tubo contém água como fluido interno na vazão de 40 l/min. e pressão de 5 bar. 137
- Figura 5.60 - Aspecto dos corpos de prova dos ensaios de fratura mostrando regiões brilhantes típicas de “olho de peixe”no processo GMAW-P. O tubo contém água como fluido interno na vazão de 40 l/min. e pressão de 5 bar. 138
- Figura 5.61 - Fratografia de um corpo de prova de fratura (*nick-break*) no processo GMAW-P. O tubo contém água como fluido interno na vazão de 40 l/min. e pressão de 5 bar. 139
- Figura 5.62- Macrografia da calha-tubo material API 5L X70 e metal de adição AWS ER 80S-G no processo GMAW-P. O tubo contém água como fluido interno na vazão de 40 l/min. e pressão de 5 bar. 139
- Figura 5.63 - Perfil de dureza na junta soldada material API 5L X70 e metal de adição AWS ER 80S-G no processo GMAW-P. O tubo contém água como fluido interno na vazão de 40 l/min. e pressão de 2 bar. 140
- Figura 5.64 – Solda de topo da calha-tubo material API 5L X70 e metal de adição AWS E 71T-11no processo FCAW-S. O tubo contém água como fluido interno na vazão de 80 l/min. e pressão de 2 bar. 141

- Figura 5.65 – Solda de filete da calha-tubo material API 5L X70 e metal de adição AWS E 71T-11 no processo FCAW-S. O tubo contém água como fluido interno na vazão de 80 l/min. e pressão de 2 bar. 141
- Figura 5.66 – Corpos de prova dos ensaios de material API 5L X70 e metal de adição AWS E 71T-11 no processo FCAW-S. O tubo contém água como fluido interno na vazão de 80 l/min. e pressão de 2 bar. 142
- Figura 5.67 - Corpos de prova dos ensaios de dobramento de face e de raiz material API 5L X70 e metal de adição AWS E 71T-11 no processo FCAW-S. O tubo contém água como fluido interno na vazão de 80 l/min. e pressão de 2 bar. 142
- Figura 5.68 - Aspecto dos corpos de prova dos ensaios de fratura (*Nick-break*) mostrando as regiões brilhantes típica de “olho de peixe” no processo FCAW-S. O tubo contém água como fluido interno na vazão de 80 l/min. 143
- Figura 5.69 – Fratografia de um corpo de prova de fratura (*nick-break*) no processo FCAW-S. . Contendo água como fluido interno na vazão de 80 l/min. e pressão de 2 bar. O tubo contém a estrutura típica de trinca facetada em um olho de peixe. 144
- Figura 5.70 – Fratografia de um corpo de prova soldado no processo FCAW-S. O tubo contém água como fluido interno na vazão de 80 l/min. e pressão de 2 bar. Mostrando fratura dúctil com a presença de alvéolos. 144
- Figura 5.71 - Macrografia da calha-tubo material API 5L X70 e metal de adição AWS E 71T-11 no processo FCAW-S. O tubo contém água como fluido interno na vazão de 80 l/min. e pressão de 2 bar. 145
- Figura 5.72 - Perfil de dureza na junta material API 5L X70 e metal de adição AWS E 71T-11 no processo FCAW-S. O tubo contém água como fluido interno na vazão de 80 l/min. e pressão de 2 bar. 146
- Figura 5.73 – Solda de topo calha-tubo material API 5L X70 e metal de adição AWS E 71T-11 no processo FCAW-S. O tubo contém água como fluido interno na vazão de 40 l/min. e pressão de 5 bar. 146
- Figura 5.74 – Solda de filete calha-tubo material API 5L X70 e metal de adição AWS E 71T-11 no processo FCAW-S. O tubo contém água como fluido interno na vazão de 40 l/min. e pressão de 5 bar. 147
- Figura 5.75 – Corpos de prova dos ensaios de tração material API 5L X70 e metal de adição AWS E 71T-11 no processo FCAW-S. O tubo contém água como fluido interno na vazão de 40 l/min. e pressão de 5 bar. 147

- Figura 5.76 - Corpos de prova dos ensaios de dobramento de face e de raiz material API 5L X70 e metal de adição AWS E 71T-11 no processo FCAW-S. O tubo contém água como fluido interno na vazão de 40 l/min. e pressão de 5 bar. 148
- Figura 5.77 – Aspecto dos corpos de prova dos ensaios de fratura (*Nick-break*) no processo FCAW-S. O tubo contém água como fluido interno na vazão de 40 l/min. e pressão de 5 bar. 149
- Figura 5.78 – Fratografia de um corpo de prova fraturado (*nick-break*) no processo FCAW-S, mostrando vazios em forma de poros muito pequenos. 149
- Figura 5.79 – Fratografia de um corpo de prova soldado no processo FCAW-S, mostrando fratura dúctil com a presença de alvéolos. 150
- Figura 5.80 - Macrografia da calha-tubo material API 5L X70 e metal de adição AWS E 71T-11 no processo FCAW-S. O tubo contém água como fluido interno na vazão de 40 l/min. e pressão de 5 bar. 150
- Figura 5.81 - Perfil de dureza na junta material API 5L X70 e metal de adição AWS E 71T-11 no processo FCAW-S. O tubo contém água como fluido interno na vazão de 40 l/min. e pressão de 5 bar. 151

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1- Relação de graus API 5L e aplicações.	6
Tabela 3.2 – Limites de energia de soldagem para evitar perfurações ao soldar com eletrodos de baixo hidrogênio em tubulações contendo gás N estático.	22
Tabela 3.3 – Evolução do hidrogênio nas soldas(FBTS, 2005).	38
Tabela 3.4 – Tipos e números de corpos de prova para qualificação de procedimento de soldagem em operação. (API 1104, apêndice B, 1999).	49
Tabela 4.1- Composições químicas do tubo ASTM A 335 P5	52
Tabela 4.2– Composições químicas do eletrodo AWS E 8018-B8	52
Tabela 4.3– Composições químicas dos tubos.	52
Tabela 4.4- Propriedades mecânicas dos tubos ASTM 106 Grau B	53
Tabela 4.5- Propriedades mecânicas dos tubos API 5L X70	53
Tabela 4.6- Composição química do arame AWS ER 80S-G	53
Tabela 4.7- Composição química do eletrodo AWS E 71T-11	54
Tabela 4.8 - Codificação dos ensaios realizados.	67
Tabela 5.1 – Parâmetros de soldagem e perfis dos cordões de solda com processo GMAW-P e técnica empurrando.	80
Tabela 5.2 – Parâmetros de soldagem e perfis dos cordões de solda com processo GMAW-P e técnica puxando	81
Tabela 5.3 - Valores de Im e Es para perfuração durante a soldagem com GMAW-P em tubo na espessura de 3,0 mm e Vs de 30 cm/min.	86
Tabela 5.4 - Soldagem GMAW – P, Gás de proteção: 92% Ar + 8% CO <sub>2</sub> , Metal de base:Chapa espessura 3,0 mm, Metal de Adição: ER 80S – G $\phi$ 1,2 mm. DBCP: 18,0 mm	87
Tabela 5.5 - Valores de Im e Es para furar durante a soldagem GMAW - curto circuito em tubo API 5L X70 com espessura 3,2 mm e Vs de 30 cm/min.	91
Tabela 5.6 - Valores de Im e Es para furar durante a soldagem GMAW-P em tubo API 5L X70 com espessura 3,2 mm e Vs de 30 cm/min.	92
Tabela 5.7 - Valores de Im e Es para furar durante a soldagem com FCAW-S em curto circuito e empurrando, tubo com espessura de 3,2 mm sem água.	96

- Tabela 5.8 - Parâmetros de soldagem e perfis dos cordões de solda com processo GMAW em corrente pulsada e empurrando a poça, tubo API-5L X70 espessura 3,2 mm, ER 80S-G. 106
- Tabela 5.9 - Parâmetros de soldagem dados da temperatura na parede interna do tubo API-5L X70 com processo GMAW em corrente pulsada e empurrando a poça, com água na vazão de 40 l/min. e pressão 5 bar. 114
- Tabela 5.10 - Parâmetros de soldagem e perfis dos cordões de solda com processo FCAW-S goticular e tocha reta, tubo API-5L X70 espessura 3,2 mm, E 71T-11 com água na vazão de 40 l/min. e pressão 5 bar. 117
- Tabela 5.11 - Parâmetros de soldagem dados da temperatura na parede interna do tubo API-5L X70 com processo FCAW-S goticular tocha reta, com água na vazão de 40 l/min. e pressão 5 bar. 126

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Ampere [A]
Ac <sub>1</sub>	Temperatura dinâmica de transformação austenítica, no aquecimento
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
API	<i>American Petroleum Institute</i>
ARBL	Aços alta resistência baixa liga
ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i>
ASTM	American Society for Testing Materials
AWS	American Welding Society
CE	Carbono equivalente
CENPES	Centro de Pesquisa e Desenvolvimento Leopoldo A. Miguez de Mello Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CP	Corpo de prova
CTDUT	Centro de tecnologia em Dutos
Es	Energia de soldagem
EWI	<i>Edison Welding Institute</i>
FCAW-S	<i>Flux Cored Arc Welding-Self Shielded</i>
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
GMAW-P	<i>Gas Metal Arc Welding - Arco Pulsado</i>
GTAW	<i>Gas Tungsten Arc Welding</i>
HSLA	<i>High Strenght Low alloy</i>
HV	Dureza Vickers
Ief	Corrente eficaz
Im	Corrente média
IMC- soldagem	Indústria de Máquinas e Comércio de Produtos de Soldagem
IIW	International Institute of Welding
LABSOLDA	Laboratório de Soldagem e Mecatrônica da UFSC
LZACi	Largura inferior da ZAC
LZACs	Largura superior da ZAC
MB	Metal base
MIG/MAG	MIG – <i>Metal Inert Gas</i> / MAG – <i>Metal Active Gas</i>
min.	Minuto
mm	Milímetro
MS	Metal de solda
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
PRCI	<i>Pipeline Research Council International</i>
PZAC	Penetração da ZAC
R <sup>2</sup>	Coefficiente de correlação
RDS	Reparo por deposição de solda
S	Segundo
SAP	Sistema de aquisição de dados para soldagem
SMAW	<i>Shielded Metal Arc Welding</i>
t <sub>8/5</sub>	Tempo de resfriamento entre 800 °C e 500 °C

Tc	Temperatura calculada
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i>
Tm	Temperatura medida
TM	Termo-mecânica
TMCP	<i>Thermomechanical controlled rolling</i>
TRANSPETRO	Petrobras Transporte S.A
T <sub>sat</sub>	Temperatura de saturação[°C]
TTPS	Tratamentos térmicos pós-soldagem
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
USIMINAS	Usinas Siderúrgicas de Minas Gerais S/A
V <sub>s</sub>	Velocidade de soldagem
ZAC	Zona afetada pelo calor

**Alfabeto grego:**

$\alpha$	Ferrita (CCC)
$\eta_t$	Parâmetro de eficiência térmica
$\sigma$	Parâmetro de distribuição da fonte de calor
$\gamma$	Austenita (CFC)

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	1
2 OBJETIVOS .....	4
2.1 Objetivo Geral .....	4
2.2 Objetivos Específicos .....	4
3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	5
3.1 Tubos, Tubulações e Dutos .....	5
3.1.1 Definições .....	5
3.1.2 Especificações API 5L .....	5
3.1.3 Aços para tubos API 5L .....	8
3.2 Soldagem em operação .....	10
3.3 Métodos de reparo .....	11
3.4 Perfuração (Burnthrough) .....	15
3.4.1 Efeito do processo de soldagem na penetração da solda .....	19
3.4.2 Influência da energia de soldagem na perfuração .....	21
3.4.3 Influência da pressão interna na perfuração .....	23
3.4.4 Influência da pressão na temperatura interna e externa do tubo .....	26
3.4.5 Influência da resistência mecânica (grau do material) na perfuração .....	28
3.4.6 Técnica alternativa para minimizar a perfuração .....	29
3.5 Trinca a frio ou induzida por hidrogênio .....	29
3.5.1 Mecanismo de trinca por hidrogênio – O conceito de “Olho de Peixe” .....	30
3.5.2 Formas de evitar as trincas a frio ou induzidas por hidrogênio .....	32
3.5.2.1 Controle da microestrutura .....	33
3.5.2.2 Controle do hidrogênio .....	37
3.5.2.3 Controle das tensões na solda .....	39
3.5.2.4 Controle da temperatura .....	40
3.6 Processos semi-automáticos a serem utilizados na soldagem em operação .....	40
3.6.1 Soldagem de tubulação pelo processo GMAW (MIG/MAG) .....	42
3.6.2 Soldagem pelo processo arame tubular auto protegido .....	46
3.7 Qualificação de procedimentos de soldagem em operação segundo a norma API 1104 e apêndice B .....	48
4 MATERIAIS E MÉTODOS .....	51
4.1 Materiais .....	51
4.2 Preparação dos corpos de prova .....	54
4.3 Bancada de teste .....	59
4.4 Equipamentos para soldagem .....	60

4.4.1	Fonte (maquina de solda).....	60
4.4.2	Sistema de deslocamento da tocha.....	61
4.4.3	Sistema de aquisição de dados.....	61
4.5	Planejamento experimental.....	62
4.6	Avaliação das condições que podem ocorrer trincas a frio (hidrogênio).....	62
4.7	Avaliação das condições em que ocorre a perfuração.....	64
4.8	Qualificação de procedimento de soldagem (dupla calha) de acordo com o apêndice B da norma API 1104.....	65
4.9	Medição de dureza.....	67
4.10	Aplicativo Computacional.....	68
5	RESULTADOS E DISCURSÕES.....	70
5.1	Avaliação da ocorrência de trincas a frio.....	70
5.1.1	Efeito da folga entre a calha e tubo e do alto carbono equivalente.....	70
5.1.2	Efeito da restrição imposta à junta soldada.....	72
5.2	Avaliação das condições em que ocorre a perfuração.....	79
5.2.1	Avaliação da penetração da solda com o processo GMAW-P (em função da inclinação da tocha).....	79
5.2.2	Avaliação da penetração em função da espessura e do processo de soldagem.....	85
5.2.2.1	Soldagem GMAW-P, tubo 4" e cordão sobre chapa, espessura 3,0 mm, velocidade soldagem de 30 cm/min.....	85
5.2.2.2	Soldagem GMAW-P e Curto circuito, tubo API 5L X70 $\phi$ 4", espessura 3,2 mm e velocidade soldagem de 30 cm/min.....	91
5.2.2.3	Soldagem FCAW-S com curto circuito, tocha empurrando, cordão sobre chapa, espessura 3,0mm e velocidade de soldagem de 30 cm/min.....	92
5.2.2.4	Soldagem FCAW-S com curto circuito e corrente pulsada, tocha empurrando, tubo API 5L X70, espessura 3,2mm.....	95
5.2.2.5	Soldagem FCAW-S com transferência goticular/ <i>spray</i> , tubo API 5L X70, espessura 3,2mm.....	96
5.2.2.6	Soldagem GMAW e FCAW-S com imposição de tensão (curto circuito) e corrente pulsada, tocha empurrando, cordão sobre chapa, espessura 4,8 mm.....	98
5.2.3	Influência da pressão interna na perfuração/furo.....	102
5.2.4	Avaliação da penetração para os processos de soldagem GMAW em corrente pulsada e FCAW-S transferência goticular.....	105
5.2.4.1	Avaliação da penetração para o processo de soldagem GMAW em corrente pulsada empurrando a poça.....	105

5.2.4.2 Avaliação da penetração para o processo de soldagem FCAW-S transferência goticular tocha reta.....	117
5.3 Qualificação de procedimento de soldagem de acordo com apêndice B da norma API 1104.....	129
5.3.1 Processo GMAW-P empurrando; tubo e calha material API 5L X70; metal de adição AWS ER 80S-G; vazão 80 l/min. e pressão 2 bar.	129
5.3.1.1 Ensaio de Tração.....	129
5.3.1.2 Ensaio de Dobramento .....	130
5.3.1.3 Ensaio de Fratura ( <i>Nick-Break</i> ).....	131
5.3.1.4 Ensaio Macrográfico e Dureza .....	132
5.3.2 Processo GMAW-P empurrando; tubo e calha material API 5L X70; metal de adição AWS ER 80S-G; vazão 40 l/min. e pressão 5 bar...	136
5.3.2.1 Ensaio de Tração.....	136
5.3.2.2 Ensaio de Dobramento .....	137
5.3.2.3 Ensaio de Fratura ( <i>Nick-Break</i> ).....	138
5.3.2.4 Ensaio Macrográfico e Dureza .....	139
5.3.3 Processo FCAW-S goticular tocha reta; tubo e calha material API 5L X70; metal de adição AWS E 71T-11; vazão 80 l/min. e pressão 2 bar.	141
5.3.3.1 Ensaio de Tração.....	141
5.3.3.2 Ensaio de Dobramento .....	142
5.3.3.3 Ensaio de Fratura ( <i>Nick-Break</i> ).....	143
5.3.3.4 Ensaio Macrográfico e Dureza .....	144
5.3.4 Processo FCAW-S goticular tocha reta; tubo e calha material API 5L X70; metal de adição AWS E 71T-11; vazão 40 l/min. e pressão 5 bar.	146
5.3.4.1 Ensaio de Tração.....	147
5.3.4.2 Ensaio de Dobramento .....	147
5.3.4.3 Ensaio de Fratura ( <i>Nick-Break</i> ).....	148
5.3.4.4 Ensaio Macrográfico e Dureza .....	150
6 conclusões .....	152
6.1 Quanto ao risco de ocorrência da trinca a frio na soldagem em operação de dutos de alta resistência. ....	152
6.2 Quanto ao risco de perfuração pelo arco de soldagem em dutos de pequena espessura. ....	152
6.3 Aplicação dos processos de soldagem semi-automáticos de reparo de dutos em operação. ....	153
6.3.1 Processo GMAW em corrente pulsada empurrando a poça. ....	153
6.3.2 Processo FCAW-S transferência goticular tocha reta.....	153

6.4 Qualificação de procedimento de soldagem de reparo de dutos em operação nos processos GMAW-P e FCAW-S de acordo com apêndice B da norma API 1104. ....	153
7 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	154
8 REFERÊNCIAS .....	155
9 APÊNDICE .....	161





## 1 INTRODUÇÃO

A estrutura de abastecimento de petróleo e derivados interliga, através de várias modalidades de transporte, três pontos distintos: fontes de extração, refinarias e centros de consumo. Entre os meios de condução utilizados, os oleodutos e os gasodutos tornaram-se o preferencial, tanto para atender ao abastecimento das refinarias, como para suprir a necessidade dos grandes centros de consumo de derivados (CTDUT, 2009).

O transporte por dutos é o meio mais econômico de conduzir óleo e gás, porém deve ser realizado com confiabilidade e segurança operacional para evitar prejuízos econômicos e, principalmente, ambientais. É desejável determinar as condições nas quais, processos alternativos e práticos ofereçam uma vantagem técnica e econômica para a soldagem em operação de dutos, considerando os riscos envolvidos neste serviço.

Uma das técnicas comumente empregada na modificação, reparo ou expansão da malha de dutos é a soldagem realizada com a tubulação em operação, que permite a intervenção sem interromper o escoamento do fluido. Reparos por soldagem e colocação de conexões para derivação (*hot tap*) em tubulação pressurizada em operação tem a vantagem de evitar paradas (troca de trechos) e perdas de receitas pelas empresas proprietárias de dutos. Contudo, o risco que envolve esse tipo de soldagem deve ser bem gerenciado, assegurando um excelente desempenho e repetibilidade.

Além das evidentes vantagens econômicas, a soldagem em operação, ainda que em algumas situações exija redução na vazão e/ou pressão do fluido, tem positivos reflexos ambientais por evitar vazamentos de produto em região da tubulação de baixa espessura ou possíveis discontinuidades existentes.

Durante a soldagem em operação duas situações devem ser consideradas. Primeiro, as soldas executadas em dutos em operação sofrem resfriamento acelerado pelo escoamento do fluido e, portanto, poderão produzir regiões de elevada dureza suscetíveis a trincas a frio induzidas pelo hidrogênio. A outra situação é o risco de que o arco elétrico utilizado na soldagem penetre excessivamente através da espessura do tubo e cause uma perfuração e, conseqüentemente, vazamento do produto.

Para que os reparos ocorram em condições seguras deve-se especificar procedimento de soldagem que contemplem a seleção do

processo e parâmetros operacionais os mais adequados. Como resultado desta seleção deve ser imposta uma faixa restrita para o aporte térmico, pois enquanto, alto aporte pode conduzir a perfuração, baixo aporte traz a possibilidade da ocorrência da trinca a frio.

Existe controvérsia a respeito da influência do aporte térmico na penetração. De acordo com Bruce (BRUCE, 2000b) a penetração do cordão do cordão depende diretamente do aporte térmico proveniente da soldagem. Por outro lado, Pérez (PÉREZ, 2005) afirma que, na soldagem com eletrodos revestidos, a penetração do cordão depende somente das condições de soldagem, particularmente da corrente. O parâmetro  $I_m^{1.5}/V_s^{0.7}$ , cujos expoentes foram obtidos experimentalmente, apresenta uma maior correlação com a penetração do que com o aporte.

Os aços API 5L são utilizados em malhas dutoviárias que são responsáveis pelo transporte de petróleo e seus derivados. O aumento da demanda energética tem incentivado a ampliação e a construção de novos oleodutos e gasodutos. Para que se tenha uma noção da demanda por serviços nessa atividade, destaque-se inicialmente aqui, dentre os dados divulgados pela Petrobrás nas áreas de exploração, produção, abastecimento, a extensão atual da malha de dutos no Brasil - 25966 km atualizado em março de 2010 (PETROBRAS, 2011).

Os investimentos previstos, num total de cerca de US\$ 6,5 bilhões, visam permitir o crescimento do transporte de gás para cerca de 100 milhões de  $m^3$ /dia. A partir desses investimentos será possível aumentar a participação do gás natural na matriz energética do País, atualmente da ordem de 9%, para 12% em 2011 (TRANSPETRO, 2011). Os avanços, porém, não mudam o fato de que malha atual é deficiente e apresenta gargalos na distribuição de gás no sul do país. Mais do que isso, que a expansão continua a ser executada de forma insuficiente, o que gera prejuízos logísticos e instabilidade para a indústria dutoviária (POWER, 2010).

Para os projetos do pré-sal está prevista a instalação de dois mil quilômetros de dutos submarinos. Embora não tenham sido divulgados os valores de investimentos previstos pelas empresas para atendimento dessa demanda, já se observa *upgrade*, não só na capacidade produtiva, como também na qualidade e sofisticação dos produtos e certificação para as condições de alta pressão e baixas temperaturas do pré-sal (POWER, 2010).

Em função do crescente aumento do transporte de petróleo e gás sob condições severas de trabalho, as especificações de tubos para gasodutos e oleodutos têm-se tornado cada vez mais exigentes. A

tendência mundial aponta para a utilização de tubos com as seguintes características: grandes diâmetros, com espessuras de parede menores e maiores níveis de resistência com carbono equivalente mais baixo, visando melhorar a soldabilidade. Pode-se citar os aços alta resistência baixa liga – ARBL (ou *HSLA – High Strength Low Alloy*), ou seja, a tendência mundial é utilizar aços API graus X70 e X80 com carbono equivalente máximo de 0,43% (USIMINAS, 2009).

A seleção de tubulações de alta resistência para construção de dutos pode contribuir expressivamente na redução dos custos do projeto, ao permitir diminuir sua espessura e, como consequência, favorecer a redução do volume de solda depositado. Além disso, existindo a possibilidade de operação dos tubos com maiores pressões, pode-se reduzir o número de estações de compressão.

A tecnologia existente e a experiência na soldagem em operação estão relacionadas principalmente com o reparo de tubos de parede espessa (de 6,4 mm ou mais) e de aços de menor resistência. Entretanto, existe uma necessidade crescente de realizar soldagens em tubos de parede cada vez mais fina por várias razões: a) aumento do tempo de operação das tubulações existentes;

b) perdas significativas de material em tubulações instaladas há décadas sem os meios adequados de proteção contra a corrosão (revestimentos, proteção catódica); c) tendência à redução da espessura das tubulações e, portanto, do custo das mesmas, mediante o uso de aços de maior resistência (X70 e X80, já homologados nas normas API e ASME, com a possibilidade de, no futuro, serem usados aços X100 e X120).

O tema para esta pesquisa foi selecionado em consonância com uma seqüência de estudos já executados pelo Laboratório de Soldagem do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, no âmbito de dissertações de mestrado (SILVA, 2002), (PÉREZ, 2005), (MASCARENHAS, 2005) e de uma tese de doutorado (NOVICK, 2008). O tema também fez parte de um projeto de pesquisa apoiado pelo CNPq com o título de “Condições limites para ocorrência de perfuração e trincas a frio na soldagem em operação de tubos API de alta resistência”.

## 2 OBJETIVOS

Um levantamento das práticas atuais em empresas que se utilizam da soldagem em operação para o reparo de dutos, complementado pela revisão da literatura sobre as perspectivas de domínio e inovação dessa tecnologia, conduziu aos seguintes objetivos para este trabalho.

### 2.1 Objetivo Geral

Estabelecer condições de soldagem em operação de tubulações de pequena espessura, entre 3,2 e 4,8 mm, que permitam minimizar o risco de perfuração e formação de trinca a frio em materiais para dutos em alta resistência.

### 2.2 Objetivos Específicos

Com o intuito de atingir de forma sistemática e completa os objetivos gerais, são propostos os seguintes objetivos específicos:

1 – Avaliar os riscos de perfuração em tubulações de pequenas espessuras, na soldagem em operação por simples deposição pelos processos GMAW (MIG/MAG) e FCAW-S (arame tubular auto protegido).

2 – Avaliar os efeitos do uso de restrição e folga variáveis entre calha-tubo sobre o risco de trincamento a frio em aços API de maior resistência (X70), ao executar soldas de filete (para instalação de calha sobre duto).

3 - Estudar a aplicabilidade de dois processos (GMAW e FCAW) em relação à diminuição dos riscos de perfuração e de trincas a frio ao executar soldas de filete (para instalação de calha sobre duto) e soldas de simples deposição sobre tubo.

4 - Qualificar procedimentos de soldagem para reparo de dutos em operação contendo água no interior variando a vazão e pressão nos processos GMAW-P e FCAW-S, seguindo e aperfeiçoando os requisitos prescritos no apêndice B da norma API 1104.

### 3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo aborda os principais processos de fabricação de tubos. No início são definidos os dutos e a especificação API 5L, também são comentados os as características da soldagem em operação, envolvendo seus métodos e utilização.

Posteriormente, serão discutidos os rios de perfuração e trinca que existem na soldagem em operação, apresentando as possíveis causas e como estes podem ser evitados. Também são expostos os processos de soldagem mais adequados para a execução destas tarefas.

#### 3.1 Tubos, Tubulações e Dutos

##### 3.1.1 Definições

**Tubos** são condutos fechados, destinados principalmente ao transporte de fluido (gás ou líquido). A grande maioria dos tubos funciona como condutos forçados, sem superfície livre, com o fluido ocupando toda a área da seção transversal. Já o termo **tubulação** é bastante amplo, e refere-se ao componente industrial representado pelo conjunto de tubos, válvulas, bombas, controladores de fluxo, etc.

Na nomenclatura americana os tubos são chamados de *pipes* ou de *tubes*. De um modo geral o termo *pipe* é usado para os tubos cuja função é propriamente conduzir fluido, enquanto que o termo *tube* emprega-se para os tubos destinados principalmente a outras funções, tais como trocar calor (tubos de caldeiras, de permutadores de calor, etc.), conduzir sinais (tubos de instrumentação), funcionar como vigas ou como elementos estruturais, etc. (TELLES,1984).

Um **duto** (*pipeline*) é uma linha de condução de fluido, composto por vários segmentos, em que os tubos são unidos normalmente por soldas circunferenciais. Os dutos se destinam ao transporte de fluidos ao longo de grandes distâncias, se classificando quanto ao emprego como tubulações de transporte. O oleoduto é um duto destinado ao transporte de petróleo e seus derivados líquidos, podendo também transportar outras variedades de líquidos, como o álcool. O gasoduto, por sua vez, se destina ao transporte de grandes volumes de gases, principalmente o gás natural.

##### 3.1.2 Especificações API 5L

A API (*American Petroleum Institute*) foi fundada em 1919 para atender à necessidade de padronizar as especificações de engenharia referentes à perfuração e a produção de petróleo e seus derivados.

A especificação API para tubulações é a API 5L (API 5L, 2000), que se refere a tubos sem costura (*seamless*) ou com costura (*welded*). Para serem classificados como API, devem atender aos requisitos de composição química, propriedades mecânicas, dimensionais, peso, etc. A propriedade que determina o grau do tubo é o limite de escoamento em ksi (1000 psi), podendo ser classificado como grau A25, A e B e X. Os graus A25 e X são seguidos de dois dígitos que determinam o valor mínimo da tensão limite de escoamento (*SMYS – Specified Minimum Yield Strength*). Os graus abrangidos pela norma API 5L, na revisão do ano 2000, são X42, X46, X52, X60, X65, X70 e X80.

Os aços para tubos podem ser divididos em quatro grandes grupos de resistência, como pode ser observado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1- Relação de graus API 5L e aplicações.

<b>Classe (L.E.)</b>	<b>Graus API 5L</b>	<b>Aplicação</b>
Min. 217 MPa	A / B / X42 / X46 / X52 / X56	Dutos não submetidos a pressão ou onde a economia em peso não é importante.
Min. 453 MPa	X60 / X65	Dutos submetidos a média e alta pressão e onde a preocupação com economia em peso é considerada.
Min. 522 MPa	X70	Dutos submetidos a alta pressão onde a economia em peso é importante para o projeto.
Min. 551 MPa	X80	Dutos submetidos a alta pressão onde a economia em peso é muito importante para o projeto.

Fonte: (USIMINAS, 2007).

Novas exigências quanto à qualidade de tubos têm aumentando a segurança e a preservação do meio ambiente. No desenvolvimento de aços para dutos, além da resistência, deve-se atentar para a tenacidade, soldabilidade, resistência às trincas induzidas por hidrogênio, resistência à fadiga nas juntas soldadas e resistência à corrosão. Cada sistema de dutos deve apresentar bons níveis de tenacidade, com a preocupação da redução do risco de nucleação e propagação de trincas.

A principal vantagem da utilização de dutos com graus elevados de resistência mecânica é a redução do custo total de material. Esta redução se baseia na premissa de que ao aumentar o limite de escoamento, a espessura de parede requerida para resistir às pressões internas (ou externas em caso de águas profundas) pode ser reduzida. Isso traz como vantagens adicionais a diminuição do peso e a facilidade na fabricação e montagem, além de requerer menor quantidade de metal de adição e outros consumíveis de soldagem, e menores custos de mão de obra.

É observado o uso cada vez maior de aços de alta resistência na produção de tubos para condução de óleo e gás. Alternativamente, se grandes espessuras de parede forem mantidas, os dutos fabricados com estes aços podem receber maiores pressões de trabalho, resultam em economia na instalação e operação em longas distâncias. A utilização de aços a partir dos graus API 5L X70 e X80 têm dominado o mercado mundial e a utilização de graus superiores é considerada uma tendência irreversível.

Atualmente, nas especificações do mercado Brasileiro e da América Latina, não tem sido demandados aços superiores ao API 5L X70. Entretanto, a demanda mundial já projetou o consumo de API 5L X80 e a partir de 2007. Iniciaram-se projetos no Brasil e Argentina nesta qualidade de aço, principalmente se no mercado brasileiro houver fornecedores de aço com esta especificação. A Figura 3.1 mostra a estimativa da demanda de API 5L X80 no Brasil, América Latina e nos países assinantes do NAFTA<sup>1</sup>.

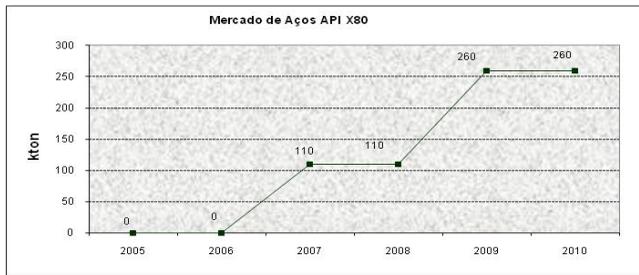


Figura 3.1– Estimativa da demanda (Brasil, A. Latina e NAFTA) X-80 (TAISS, 2007)

<sup>1</sup> NAFTA (North American Free Trade Agreement) é um tratado envolvendo Canadá, México e Estados Unidos da América numa atmosfera de livre comércio, com custo reduzido para troca de mercadorias entre os três países.

Pode ser vista através da Figura 3.2 a evolução na produção de aços API no Brasil e no mundo e, através dela pode-se tirar a conclusão que, em curto prazo serão utilizados aços com maior resistência, ou seja, será necessário trabalhar com dutos API 5L graus X100 e X120.

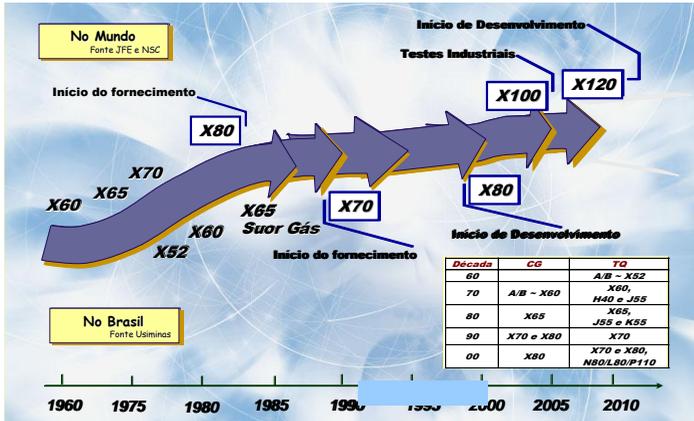


Figura 3.2 – Evolução na produção de aços API. (TAISS, 2007).

### 3.1.3 Aços para tubos API 5L

Antes do desenvolvimento dos aços alta resistência baixa liga (ARBL), os tubos eram produzidos com aços endurecidos pela adição de carbono e manganês possuindo, por causa disso, baixa soldabilidade e tenacidade (MALCON, 2007). Os aços utilizados na fabricação de tubos API 5L, a partir do grau X42 são do tipo ARBL.

Aços carbono alta resistência baixa liga ou microligados (ARBL ou HSLA em inglês) são aqueles onde, através de pequenas adições de elementos de liga, obtém-se limite de escoamento acima de 40 ksi (276 MPa) na condição laminado, tendo como características uma boa relação resistência mecânica/tenacidade. Estes aços possuem baixo teor de carbono, garantindo assim boa soldabilidade quando comparados aos aços carbono convencionais (METALS HANDBOOK, 1997).

A produção dos aços ARBL envolve uma primeira etapa de laminação a quente, onde o aço obtém a forma do produto final, e em seguida é executada uma segunda etapa de laminação, especialmente com o objetivo de melhorar as propriedades mecânicas (METALS HANDBOOK, 1997).

O desenvolvimento inicial destes aços visou sua utilização na indústria de petróleo e gás, entretanto suas boas propriedades mecânicas estenderam seu uso para outros setores industriais.

A vantagem principal de usar os Aços ARBL é devido a sua maior resistência mecânica, com isso a espessura da parede dos tubos (para uma certa pressão interna) pode ser diminuída, reduzindo assim o peso e os custos envolvidos no transporte e na montagem. Outra possibilidade é manter a espessura de parede e elevar a pressão interna, até o valor máximo de 72% do limite de escoamento do tubo, aumentando o volume de produto transportado (SICILIANO, 2008).

Durante a década de 60 o aço dominante para gasodutos de alta pressão era o X60, produzido com aço semialcamado e sem requisitos de tenacidade, com teor médio de carbono de 0,16% (SICILIANO, 2008). Entretanto, a necessidade de exploração de petróleo no ártico e a ocorrência de fraturas frágeis com mais de 10 km de extensão em dutos nos Estados Unidos levaram ao desenvolvimento de tubos produzidos com aços acalmados ao alumínio, proporcionando refino de grão e aumentando a resistência à fratura frágil (PALMER, 2008).

Até os anos 70 os aços alta resistência baixa liga (ARBL) eram produzidos pelo processo de laminação a quente, seguido de uma normalização visando obter uma microestrutura composta de finas lamelas de ferrita, perlita e grãos maiores de ferrita, tamanhos ASTM 7-8 (FEDELE, 2002).

Já nos anos 70, este processo foi modificado para operações de conformação termo-mecânica (TM), permitindo a produção de aços X70 com reduzidos teores de carbono, e adições de elementos nióbio e vanádio. A microestrutura passou a apresentar maior uniformidade, com grãos mais refinados de ferrita, tamanhos ASTM 10-11. Esta tecnologia foi aperfeiçoada nos anos 80, com a introdução do método de resfriamento controlado (*accelerated cooling*), juntamente com a laminação termo-mecânica. Foi então possível produzir aços da classe X70 com menores teores de carbono, o que resultou em melhora da soldabilidade. Neste caso, a microestrutura apresentava-se mais refinada, do tipo ferrítica-bainítica.

Nos últimos anos têm sido testadas com sucesso adições de molibdênio, níquel e cobre, em conjunto com processos modificados de resfriamento controlado, objetivando o desenvolvimento de tubos da classe X80. Esta evolução dos aços ARBL pode ser vista através da Figura 3.3 abaixo.

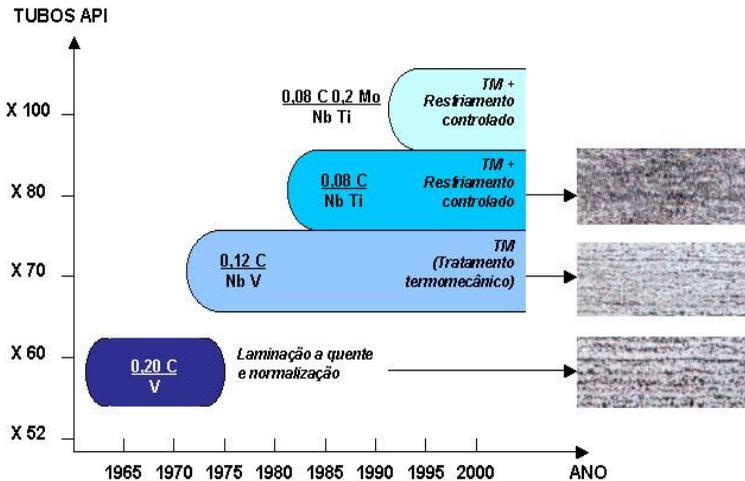


Figura 3.3 - Evolução dos aços para a fabricação de tubos de grandes diâmetros. (FEDELE, 2002)

Para atingir níveis de tensão de escoamento ainda maiores como 827 MPa no (X120), é necessário produzir o aço com adição de elementos de microliga e processos de laminação controlada, onde o refino do grão é conseguido através do processamento termo-mecânico de laminação controlada (TMCR – *Thermomechanical Controlled Rolling*), seguido por uma resfriamento acelerado, tendo como principais produtos de transformação a bainita inferior e ripas de martensita, como é apresentado no trabalho de Fairchild et al (2002).

### 3.2 Soldagem em operação

A prática da soldagem em operação basicamente pode ser separada em duas classes: uma voltada para o reparo de discontinuidades em dutos e tubulações e outra considerando a instalação de uma nova derivação ou conexão (conhecida como trepanação ou *stopple*). Sua grande vantagem é permitir uma intervenção, seja de reparo ou instalação, sem interromper o escoamento, evitando perda do produto, emissão de gases, parada de dutos e gasodutos, parada de unidades, interrupção de fornecimento para clientes, além de uma eventual contaminação do meio-ambiente em caso de falha na selagem e desgaseificação antes de uma soldagem sem bombeamento.

Apresenta como riscos inerentes, a possibilidade de perfuração da parede do tubo pela sobrepenetração do arco voltaico, e a ocorrência de trinca a frio, devido as já elevadas taxas de resfriamento naturais da soldagem tornam-se maiores pela transferência de calor para o fluido em escoamento. Sua aplicação é de uso corrente, seguindo regras e códigos estabelecidos em normas internacionais como as API 1104, API RP 2201, BS 6990, CSA Z 662 e, no Brasil, a norma da Petrobrás N2163, que procuram garantir um procedimento seguro, considerando a relação entre energia de soldagem, espessura da parede e composição química do material.

### 3.3 Métodos de reparo

Como alternativa à substituição de um trecho danificado com parada operacional, podem ser utilizados métodos que mantêm a produção, seja no reparo de descontinuidades ou na instalação de novos trechos ou derivações, neste caso através da trepanação. Esta situação é comum na área industrial, pois permite a substituição da região danificada com o escoamento sendo desviado provisoriamente para a nova conexão, fixada por flanges instalados na linha principal por soldagem, e aberta ao fluxo mediante a operação de *hot-tapping*, como mostrado nas Figura 3.4 e Figura 3.5. Primeiro os flanges são soldados e depois se faz o *hot-tapping* para poder derivar a conexão.

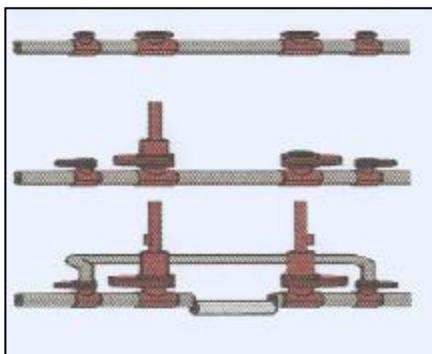


Figura 3.4 – Técnica de trepanação (PAES et al, 2000)

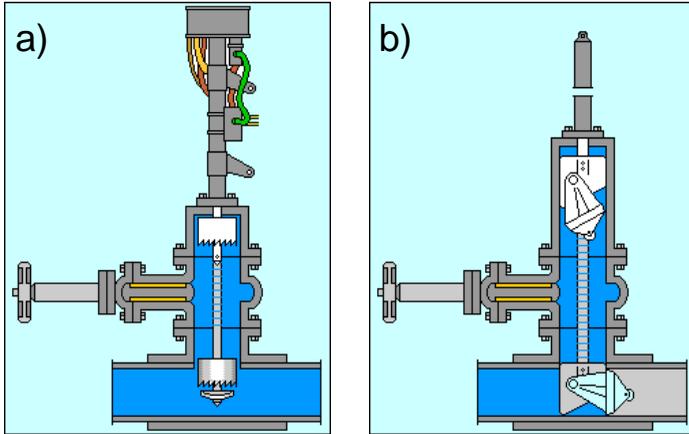


Figura 3.5 – Operação de “hot-tapping”: a) Perfuração da tubulação; b) válvula de bloqueio (PAES et al, 2000).

Considerando a soldagem para manutenção, o procedimento conhecido como “dupla-calha” consiste na instalação de luvas bipartidas soldadas que envolvem totalmente a tubulação. A Figura 3.6 mostra um esboço deste reparo nos seus dois tipos de instalação, A e B. A diferença está na ausência de soldas circunferenciais de fechamento entre luva e tubo no “Tipo A”, o que faz com que não tenha efeito sobre a tensão longitudinal no tubo, descaracterizando seu uso para defeitos de orientação circunferencial.

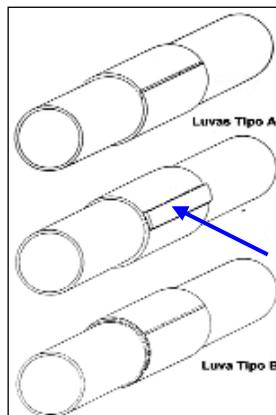


Figura 3.6 – Instalação de Dupla-Calha Tipo A e B. A seta indica a Tira de Superposição (PAES et al, 2000).

A união das luvas entre si é feita através de solda de topo, ou ainda pela superposição de tiras de aço com solda de filete. Uma luva do tipo A funciona como um reforço para uma área defeituosa externa e é usada apenas para defeitos sem vazamento, podendo ser considerada em caso de corrosão interna desde que condicionada ao fim do processo corrosivo. Para assegurar que não exista folga, faz-se a cobertura prévia com compostos endurecíveis epóxi ou poliéster na região do tubo a ser reparado. Como garantia de ajuste, pode ser previsto um pré-tensionamento das calhas ao tubo, através de meios mecânicos, hidráulicos ou pneumáticos, o qual, dependendo do nível de pré-tensionamento reduz a tensão de membrana (*hoop stress*)<sup>2</sup> atuante na parede do tubo, prevenindo o início de trincas (FRIEDRICH, 1995). Ainda consideradas como reforço, podem ser utilizadas calhas de envolvimento parcial, como mostra a Figura 3.7.

O outro tipo de luva utilizado é o “Tipo B”, na qual suas extremidades são unidas por soldas de filete (em juntas em ângulo) ao tubo condutor conforme mostrado na Figura 3.6, podendo ser usada para o reparo de vazamentos e para aumentar a resistência em áreas com defeitos orientados circunferencialmente. Deve ser projetada para atender, no mínimo, aos mesmos requisitos de integridade estrutural do tubo (KIEFNER et al, 1994), resistindo à pressão interna, se for requisitada. Pelas maiores solicitações que podem vir a atuar em uma luva “Tipo B”, não é permitido o uso de tira de superposição (KIEFNER et al, 1994), uma vez que ela é inerentemente mais fraca do que uma solda de topo com preenchimento total.

O uso de dupla-calha (tipo A ou B) é considerado o método mais simples na soldagem em operação, mas apresentam inconvenientes, como a necessidade de material adicional (calhas), impossibilidade de instalação em trechos curvos e a geração de concentradores de tensão, que podem dar início a trincas de fadiga em pressões cíclicas. Dependendo das condições operacionais e severidade do defeito, o uso de calhas pode ser substituído por luvas de compósitos, limitada pela temperatura de aplicação em torno de 150°C (VERGES et al, 2004), ou braçadeira aparafusada reforçada com soldagem de fechamento.

---

<sup>2</sup> Tensão de membrana (*hoop stress*) – São as tensões que agem tangencialmente à superfície curvada do tubo. O nome surgiu do fato de que essas são as únicas tensões que existem em membranas verdadeiras, como bolhas de sabão e em tiras finas de borracha.



Figura 3.7 – Solda de filete entre tubo e calha (BRUCE, 2000b).

O Reparo por Deposição de Solda (RDS) ou solda de simples deposição é uma atraente alternativa ao uso de calhas, pois não é limitada pela curvatura da tubulação (Figura 3.8). Sua aplicação é relativamente simples e direta, dispensando o uso de acessórios como calhas ou válvulas e operações de *hot-tapping*, implicando em menor tempo e custo no reparo.

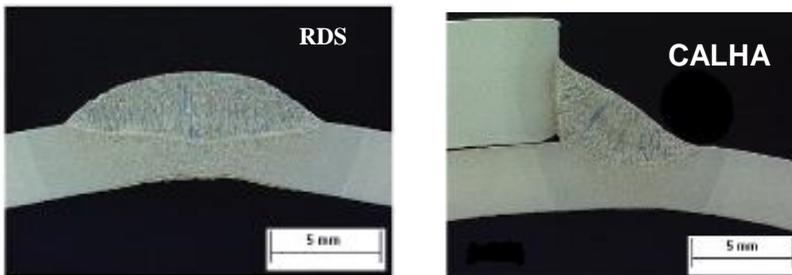


Figura 3.8 – Macrografia de cordões depositados nos mesmos parâmetros de soldagem, mostrando a maior penetração no RDS. (BRUCE, 2000b)

Outras vantagens em comparação ao reparo por calhas são a possibilidade de emprego em tubulações que necessitem isolamento térmico e a facilidade na inspeção por ultra-som. A Figura 3.9 mostra um desenho envolvendo um RDS sobre tubo com corrosão interna, mas a técnica pode igualmente ser aplicada para corrosão externa ou discontinuidades mecânicas (mossas, cavas, etc.).

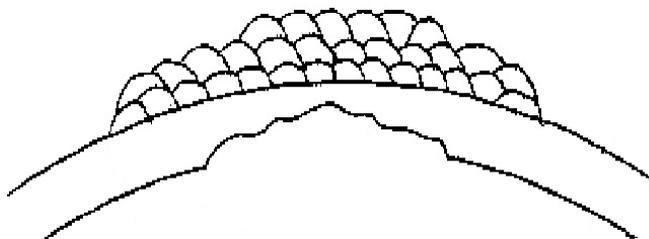


Figura 3.9 – Solda de simples deposição sobre tubo com perda de parede interna. (BRUCE, 1998).

O Reparo por Deposição de Solda tem aplicação assegurada por resultados que indicam sua capacidade de recuperar a resistência da região danificada, inclusive quando é submetida a pressões cíclicas (BRUCE, 1998), mas, notadamente, o risco de perfuração envolvido na operação é maior que em soldagem de calhas, onde a menor penetração das soldas de filete (Figura 3.8) permite o uso de aportes térmicos maiores, diminuindo desta forma a taxa de resfriamento e a possibilidade de trincas a frio (BRUCE, 2000b). O reparo por este método, particularmente quando se realiza em espessuras menores, exige que seja levada em consideração a espessura remanescente do tubo para a especificação dos parâmetros e procedimentos de soldagem, incluindo a escolha adequada do tipo e diâmetro do eletrodo, de modo que possa ser garantida uma soldagem segura quanto à perfuração e incidência de trinca a frio.

### 3.4 Perfuração (Burnthrough)

Não existe uma definição precisa para perfuração na literatura de soldagem. De acordo com a norma AWS A3.0 que trata dos termos e definições da terminologia da soldagem (WELDING HANDBOOK VOL.1, 2004), a perfuração é descrita como uma fusão excessiva ou um orifício. Também define a fusão excessiva como uma cavidade através do metal de solda, usualmente ocorrendo no primeiro passe. Outra definição para perfuração é dada por Adolfsson et al (ADOLFSSON, 2006), a perfuração é um orifício na junta de soldada ou no metal de solda, no qual o orifício passante pode ser detectado, iluminando-se a junta soldada pela face da solda. Se qualquer luz for detectada no verso da solda (raiz), existe uma perfuração na junta. Também existe outra definição para a perfuração definida como: Um colapso localizado da poça de fundida devido à excessiva penetração ou perda de controle, resultando em um furo ou cavidade durante a

soldagem do passe de raiz. Quando inspecionado através do ensaio radiográfico, a perfuração aparece como uma irregularidade na forma globular de área escura. A Figura 3.10 mostra esta descontinuidade.

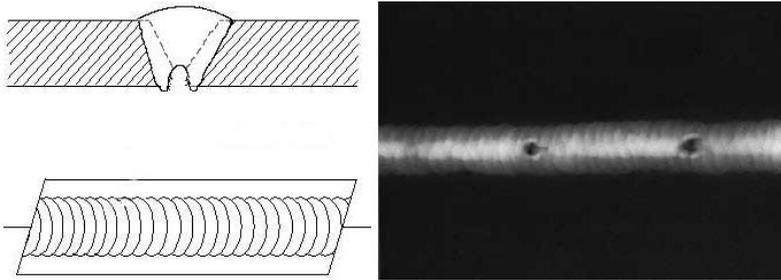


Figura 3.10 - Radiografia e desenho de uma solda mostrando a perfuração (KODAK, 2008).

No caso específico da soldagem de um tubo com fluido interno a perfuração ocorrerá caso a área não fundida adjacente à poça de fusão não tenha resistência suficiente para suportar a tensão proveniente da pressão interna. Como principais causas encontram-se a baixa espessura do duto ( $< 6,0$  mm), uso de elevada energia de soldagem ( $> 12,0$  kJ/cm), oscilação do eletrodo (trançar) durante o depósito em vez do uso do passe reto, soldagem na direção longitudinal, uso de eletrodos celulósicos (alta penetração), e uso de eletrodos com diâmetro elevado ( $> 3,2$  mm) (PAES et al, 2004).

A perfuração ocorrerá caso a área não fundida adjacente à poça de fusão não tenha resistência suficiente para suportar a tensão proveniente da pressão interna da tubulação. Como principais causas pode-se citar a baixa espessura do duto ( $< 6,0$  mm), uso de elevada energia de soldagem ( $> 12,0$  kJ/cm), oscilação do eletrodo (trançar) em vez de passe corrido, soldagem na direção longitudinal, uso de eletrodos celulósicos (alta penetração), e uso de eletrodos com diâmetro elevado ( $> 3,2$  mm) (PAES et al, 2004). A Figura 3.11 mostra a perfuração em uma deposição de solda realizada no LABSOLDA/UFSC.

O fenômeno da Perfuração é governado por três fatores:

- a) espessura local (juntamente com o tipo de material da parede do tubo);
- b) penetração da solda;
- c) condições operacionais da linha (vazão e pressão).

A figura 3.15 mostra a relação entre os fatores de influência na perfuração de tubos soldados em operação.

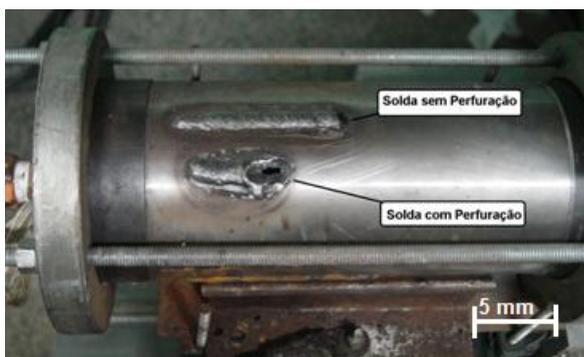


Figura 3.11- Ocorrência de perfuração em deposição de solda sobre tubo SAE 1020 de 3,2 mm de parede. (GUBER, 2005).

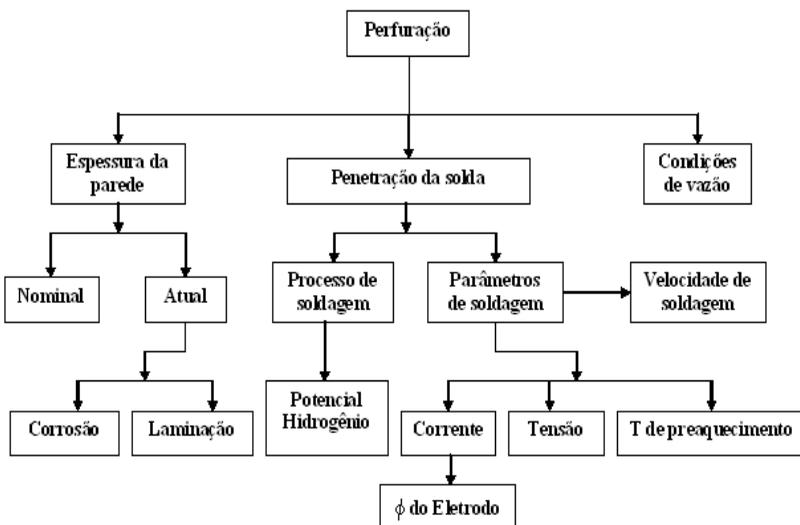


Figura 3. 12 – Relação entre os fatores de influência da perfuração na soldagem em operação. (PAES et al, 2000).

A perfuração da tubulação terá como conseqüência direta o vazamento do produto, que pode ser tóxico ou inflamável, com a necessidade de interromper totalmente o escoamento do fluido e, como

resultado, trazendo prejuízo para a empresa. Por outro lado, quando da perfuração normalmente não surgem rupturas catastróficas.

A medida que se usam tubulações fabricadas em aços com maior resistência (X70 e X80), visando o benefício econômico derivado de uma menor espessura, aumentam os cuidados necessários para evitar a perfuração. No programa de análise desenvolvido pelo Instituto Battelle para soldagem em operação (BRUCE, 2000a), o risco de perfuração é avaliado pela temperatura atingida pela parede interna do tubo. Com base em experimentos, foi concluído que a perfuração tende a ocorrer quando esta temperatura ultrapassa 1260°C. Para dar uma margem de segurança, a temperatura admissível foi limitada a 982°C quando são usados eletrodos revestidos de baixo hidrogênio, e 760°C com eletrodos celulósicos. Tendo como referência estes limites de temperatura, pode-se considerar que não existe risco de perfuração em espessuras superiores a 6,0 mm, desde que sejam utilizados eletrodos revestidos do tipo básico (baixo hidrogênio) e adotadas práticas adequadas de soldagem (KIEFNER et al, 1981).

No trabalho de mestrado de Pérez (PÉREZ, 2005) foram comparados os valores de temperatura na superfície interna de um tubo. Para tanto, foi realizada a comparação da temperatura medida ( $T_m$ ) através de termopares e da temperatura calculada ( $T_c$ ) através das equações analíticas de Santos (SANTOS, 2001). Pode-se verificar, através da Figura 3.13, que os valores calculados foram muito próximos dos valores medidos. Assim sendo, as equações de Santos são úteis para estimar a temperatura na parede interna do tubo sem o uso de termopar, facilitando muito nas pesquisas posteriores.

Considerando a influência da pressão interna, da espessura remanescente e da resistência mecânica da tubulação, podem-se aceitar valores de temperatura interna superiores aos limites citados no parágrafo anterior. Normalmente, a espessura do tubo não é um parâmetro que possa ser alterado, pois depende exclusivamente do projeto de engenharia e da perda de massa que sofreu o tubo durante o serviço. Antes da soldagem em operação, e para que não ocorra à perfuração, é necessário que a espessura seja verificada por equipamentos e técnicas apropriadas como, por exemplo, técnicas de mapeamento ultra-sônico. Isso permite conhecer a espessura local a ser soldada, que pode ser muito menor que a nominal do tubo, seja por fenômenos oriundos de corrosão generalizada, seja por pites, alveolar, erosão, cavitação, etc. (PAES et al, 2000)

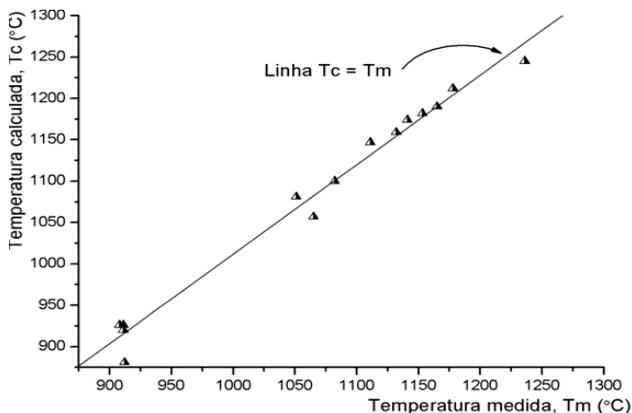


Figura 3.13 - Relação entre as temperaturas medidas com termopar e as estimada (PÉRES, 2005).

O método de análise numérica desenvolvido pelo Battelle, para a previsão de temperatura máxima a partir de dados como os parâmetros de soldagem e condições operacionais da tubulação, é considerado o método mais útil na avaliação de riscos na soldagem em operação (PAES et al, 2004). Entretanto, ele é direcionado somente para soldas de conexões ou duplas-calhas. Caso a soldagem em operação seja executada com depósito de metal de solda diretamente sobre a tubulação (RDS), ocasionando uma maior penetração se comparada às geometrias analisadas pelo Battelle, cuidados adicionais no que diz respeito à espessura mínima local (quando inferior a 6,0 mm), aporte térmico máximo, diâmetro de eletrodo e pressão interna deverão ser respeitados.

O modelo criado pelo Instituto Battelle (1991) permite analisar a transferência de calor ao soldar tubos com fluxo interno. Infelizmente, o método se aplica apenas para espessuras iguais ou maiores que 3,2 mm, e geometrias de solda de filete como as soldas circunferenciais entre calha e duto e soldas em chanfro entre conexões e o tubo. Entretanto, este programa (*software*) não dá resultados para soldas de simples deposição sobre a tubulação, como as efetuadas na técnica de reparo por deposição de solda (RDS).

### 3.4.1 Efeito do processo de soldagem na penetração da solda

O risco da perfuração, que é função da penetração do arco elétrico (solda) na parede interna da tubulação depende das variáveis de soldagem e, em um grau menor, do processo de soldagem. A penetração aumenta com aumento do aporte térmico, e também, com o aumento do

potencial de hidrogênio do processo de soldagem. Um processo de soldagem de baixo hidrogênio, tal como o eletrodo revestido com revestimento tipo básico ou TIG (*Tungsten Inert Gas*) associado a um aporte térmico baixo, resulta numa condição de menor penetração. Oposto, um processo com alto potencial de hidrogênio, como o de eletrodos revestidos celulósicos, associado a um alto aporte térmico resulta numa condição de máxima penetração (PAES et al, 2000).

Para aumentar a produtividade na soldagem é utilizado processo semi-automático ou automático. Para estas formas de aplicação o mais comum é o MIG/MAG (em inglês, GMAW- *Gas Metal Arc Welding*), mas com limitação do aporte de calor para evitar a perfuração. Com essa limitação, o processo pode ser tornar suscetível à falta de fusão. O processo de soldagem com arame tubular (em inglês, FCAW- *Flux Cored Arc Welding*), possibilita a realização da soldagem com alta produtividade e obtenção de um baixo teor de hidrogênio, sem necessidade de proteção gasosa externa, favorecendo em muito o reparo de dutos em campo (BRUCE, 2000b).

Em trabalho mais recente sobre processo alternativo para reparo de dutos em operação, Begg (BEGG, 2009) mostra que os processos de soldagem semiautomáticos, apesar de sua alta produtividade aliada ao baixo teor de hidrogênio, apresentam como ponto negativo, maior temperatura na parede interna e, por conseguinte, maior risco de perfuração. A Figura 3.14 mostra a temperatura de pico versus processo de soldagem para uma energia de soldagem de 12,9 kJ/cm.

A necessidade de melhorar a qualidade, minimizar os custos e reduzir os tempos em obras de oleodutos e gasodutos faz com que se busquem novos processos de soldagem que atendam estes requisitos. Com base nisto, vêm sendo executadas pesquisas, no LABSOLDA, voltado ao desenvolvimento de procedimentos alternativos de reparo em dutos: em projeto procurou-se empregar variantes do processo MIG/MAG, como o curto-circuito controlado, como alternativa à soldagem com eletrodos revestidos (processo comumente utilizado) de tubos de aço API 5L - X 60 e aço API 5L - X 65 (Pellizzaro, 2004); outra pesquisa realizada foi sobre o emprego da corrente alternada no processo MIG/MAG, objetivando diminuir a penetração do arco e, com isso, evitar a perfuração durante a soldagem de reparo; finalmente, podemos citar a pesquisa executada por Mascarenhas (2005), utilizando o processo de soldagem TIG com alimentação de arame, procurando aproveitar vantagens como o baixo teor de hidrogênio difusível obtido com esse processo e a possibilidade de trabalhar com baixas potências do arco.

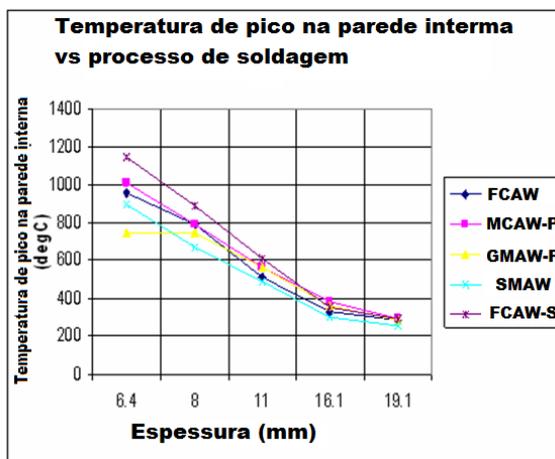


Figura 3.14 – Temperatura de pico na superfície interna ao utilizar varios processos de soldagem com energia de 12,9 kJ/cm. (BEGG, 2009).

De acordo com a norma Petrobrás N-2163 de 2002, a soldagem em operação de equipamentos, tubulações e dutos contendo hidrocarbonetos (tais como gás natural, petróleo, óleo diesel, propano, nafta, gasolina, GLP) ou álcool anidro, pode ser executada com qualquer processo a arco, como na maioria das situações encontradas em refinarias, terminais de armazenamento e dutos.

### 3.4.2 Influência da energia de soldagem na perfuração

No EDISON WELDING INSTITUTE (EWI) foram estabelecidos experimentalmente os limites de aporte térmico, de acordo com Tabela 3.2, para evitar perfurações ao soldar com eletrodos revestidos de baixo hidrogênio (tipo EXX18), em tubos de duas espessuras remanescentes, 3,2 e 6,4 mm (apud BRUCE, 2000b).

Segundo Bruce (2000b), esses limites são conservativos, pois os experimentos foram realizados com gás nitrogênio estáticos (sem fluxo), enquanto que nas condições reais gás metano e a maioria dos líquidos removem calor da parede da tubulação de forma mais eficiente que o nitrogênio. Por outro lado, esses limites são baseados em valores de corrente fixos (50, 80 e 110 A para as bitolas de 2,0; 2,4 e 3,2 mm, respectivamente), de forma que ao serem usados com maiores níveis de corrente podem se tornar não conservativos.

Tabela 3.2 – Limites de energia de soldagem para evitar perfurações ao soldar com eletrodos de baixo hidrogênio em tubulações contendo gás N estático.

	ϕ eletrodo (mm)		
	2,0	2,4	3,2
Espessura remanescente da parede (mm)	Energia de soldagem (kJ/cm)		
3,2	8,7	5,1	proibido
6,4	9,8	9,4	8,7

(BRUCE, 2000a).

Entretanto, o trabalho de pesquisa de mestrado de Pérez (PÉREZ, 2005) apresentou resultados divergentes em relação aos de Bruce (BRUCE, 2000a), a respeito do estabelecimento de limites de energia de soldagem visando evitar a perfuração.

Pode-se afirmar que o uso de limites de energia de soldagem é inadequado como critério para evitar a perfuração. Nesse sentido, foi encontrada uma correlação melhor entre o fenômeno da perfuração e o parâmetro  $I^{1.5}/Vs^{0.7}$ , cujos expoentes foram obtidos por regressão múltipla com base nos resultados experimentais, na soldagem com o processo eletrodo revestido. Assim sendo, em função da espessura do tubo e das características do fluido dentro da tubulação, pode ser estabelecido um valor crítico para esse parâmetro, que separa as condições de soldagem em que ocorre ou não perfuração.

A Figura 3.15 mostra que a penetração do cordão de solda pode ser correlacionada com o parâmetro  $I^{1.5}/Vs^{0.7}$ , e que os valores limites para que ocorra a perfuração ou não do tubo, dependem principalmente da corrente e velocidade de soldagem.

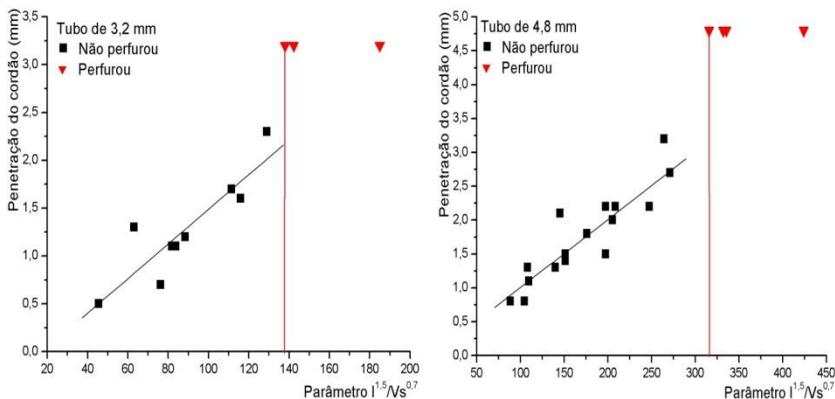


Figura 3.15 - Penetração do cordão em função do fator  $I^{1.5}/Vs^{0.7}$  em condições de convecção natural ao ar (PÉREZ, 2005).

### 3.4.3 Influência da pressão interna na perfuração

De acordo com os estudos e ensaios realizados no Instituto Battelle (BRUCE, 200a), a pressão tem influência secundária em relação àquela do aporte térmico de soldagem. Contudo, Painter (apud MASCARENHAS, 2005) afirma que a pressão interna é reconhecida como um fator de influência na perfuração. Para demonstração deste fato, Painter cita os estudos de Wade, o qual executou soldas de filete longitudinais num cilindro com 250 mm de diâmetro, pressurizado com nitrogênio. Após a soldagem, observou a ocorrência de uma deformação plástica significativa na região da solda criando uma saliência localizada.

Outro estudo que trata da perfuração em função da pressão interna é aquele de Sabapathy et al (2000), que inclui na solução numérica a transferência de calor no sentido longitudinal à solda, que não era considerada nos modelos anteriormente citados. Com isso, resulta em um modelo de simulação numérica tri-dimensional para determinar o campo de temperatura em regime estável (isto é, quando já foram atingidas as temperaturas máximas e é mais provável que aconteça a perfuração). Mediante uma análise termo-elasto-plástica, esses autores determinaram como varia a deflexão do material no sentido radial em função da pressão interna em uma soldagem com uma determinada energia de soldagem, como mostra a Figura 3.16. Nesta observa-se um ponto onde a curva se desvia do seu comportamento linear. Segundo os autores, esse ponto pode ser considerado um limite de escoamento efetivo local, que representaria o limiar para ocorrer

perfuração. Embora esse método possa apresentar resultados confiáveis e permitir avaliar a influência da pressão sobre a perfuração, é bastante demorado. Com o aumento da temperatura ocorre uma redução local da resistência do material. A tensão limite de escoamento na região de perda de resistência pode ser calculada ao longo de uma linha A-A perpendicular à superfície do tubo conforme a equação:

$$P_{A-A} = \sum_{ri}^{ro} \sigma_{yr} \times dr \quad (\text{Eq. 3.1})$$

onde:

$P_{A-A}$  = tensão limite de escoamento ao longo da linha A-A perpendicular ao tubo;

$ri$  e  $ro$  = raio interno e externo do tubo;

$\sigma_{yr}$  = limite de escoamento efetivo local.

A espessura da parede do tubo (em temperatura ambiente) que poderia suportar esta carga pode ser calculada pela equação:

$$t = P_{A-A} / \sigma_{yr} \quad (\text{Eq. 3.2})$$

A redução de resistência na região da solda pode ser então, representada como uma redução efetiva da espessura da parede, podendo ser considerada, por analogia, como um defeito ou cavidade. Fazendo esse cálculo em vários pontos dentro de uma área do tubo, podem ser encontradas as dimensões da cavidade efetiva. A partir daí, pode ser determinada (por critérios como os constantes na norma ASME B31G) a pressão máxima que pode suportar o tubo tendo essa cavidade.

Ao comparar os valores previstos pelo modelo com aqueles obtidos experimentalmente por Wade (apud SABAPHATY et al, 2000), pode-se verificar a boa precisão do modelo (veja a Figura 3.17).

Em outro trabalho (BANG et al, 2002) apresentam um método para a previsão da perfuração na soldagem circunferencial de calhas. Utilizaram um modelo de elementos finitos bidimensional axi-simétrico (isto é, considerando que o cordão de solda é depositado ao mesmo tempo em toda a circunferência do tubo). Estimaram as tensões desenvolvidas e, com base nelas, a deformação em cada local da região da solda. Segundo os autores, quando a deformação ultrapassa a capacidade do material para deformar (valor que está relacionado com o alongamento percentual do material obtido no ensaio de tração), ocorreria a perfuração. Não pode ser afirmado nada sobre a precisão



### 3.4.4 Influência da pressão na temperatura interna e externa do tubo

Testes de soldagem foram executados pelo processo TIG sobre tubos pressurizados com água, com diâmetro de 4" (101,6 mm) e espessura de parede de 6,1 mm. A temperatura na parede interna do tubo aumentou com a pressão interna para um dado aporte de calor e esteve muito perto da temperatura de saturação ( $T_{sat}$ ) da água. A Figura 3.18 mostra este comportamento (BELANGER, 2000). Constata-se, também, que a mudança no aporte de calor não afeta o resultado.

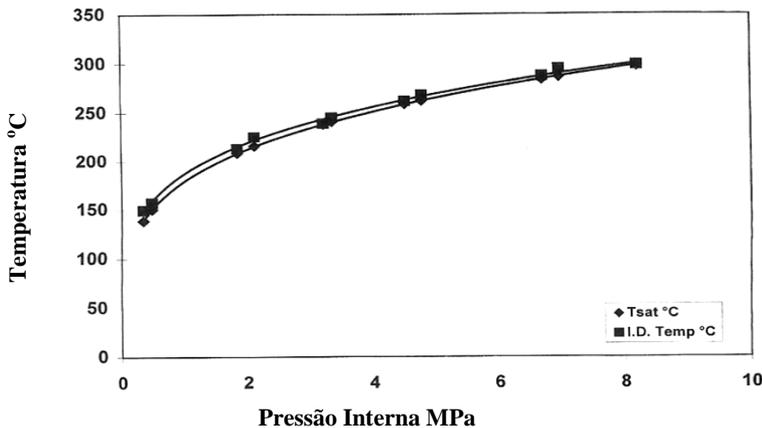


Figura 3.18 – Temperatura na parede interna do tubo e  $T_{sat}$  versus pressão interna com 1,1 e 1,65 kJ/mm (BELANGER, 2000).

As taxas de resfriamento foram determinadas, para a mesma condição de aporte de calor (1,4 kJ/mm), através de registro de saída do pirômetro ótico para determinar ambos  $\Delta T_{8,5}$  (tempo de resfriamento de 800 a 500 °C, em segundo) e  $R_{540}$  (a taxa de resfriamento em graus por segundo a 540 °C), a Figura 3.19 mostra estes valores. Contata-se que a taxa de resfriamento na superfície externa para ambos os critérios diminui pouco com o aumento da pressão da água (BELANGER, 2000).

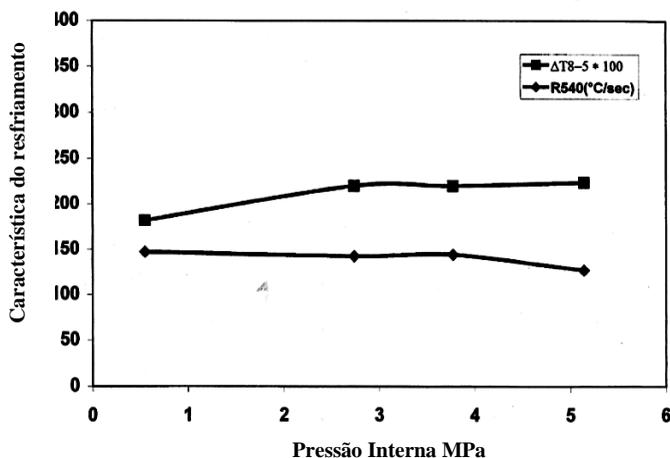


Figura 3.19 – Taxa de resfriamento na parede externa do tubo com água e aporte de calor 1,4 kJ/mm ((BELANGER, 2000).

Segundo Belanger (BELANGER, 2000) na soldagem em operação a zona fundida pode ser considerada como um pequeno furo, através do qual o calor é forçado para a parede interna do tubo e então removido pelo fluido interno. Quando a temperatura do líquido contido na parede interna do tubo estiver mais baixa que  $T_{\text{sat}}$ , nenhuma ebulição ocorre, a transferência de calor é baixa e ocorre em convecção natural. Quando a temperatura do líquido em contato alcança a  $T_{\text{sat}}$ , as bolhas são nucleadas na superfície do tubo e condensam rapidamente. As bolhas aumentam a taxa de transferência de calor pela agitação do líquido próximo da parede do tubo. Isto é, uma ebulição nucleada através do subresfriamento. Quando a temperatura do líquido superar a  $T_{\text{sat}}$ , bolhas são maiores e migram para dentro do líquido. Por isso, as taxas de transferência de calor continuam a aumentar neste regime de ebulição nucleada até a partida para esta ebulição, ocorrendo um fluxo de calor crítico. Então as taxas de transferência de calor diminuem rapidamente devido ao filme de vapor formado na superfície interna do tubo, em que limita de transferência de calor na fase líquida. Este é o regime de transição da ebulição. A molhabilidade do líquido é progressivamente eliminada e transferência de calor é principalmente controlada pela fase gasosa, que é menos eficiente, resultando no aumento da temperatura na parede interna do tubo (BELANGER, 2000).

O programa do Instituto Battelle para a soldagem em operação assume que mesmo com baixo aporte de calor, ao aumentar a pressão ocorre uma separação entre a parede do tubo e o fluido, como resultado veja a Figura 3.20, ocorrem rápidos saltos na temperatura da parede interna do tubo. Belanger (BELANGER, 2000) afirma que quando se tem a água como fluido, a temperatura da parede interna do tubo de fato aumenta com a pressão, mas nenhum filme de vapor se forma, exceto para a pressão atmosférica e com moderadamente alto aporte de calor.

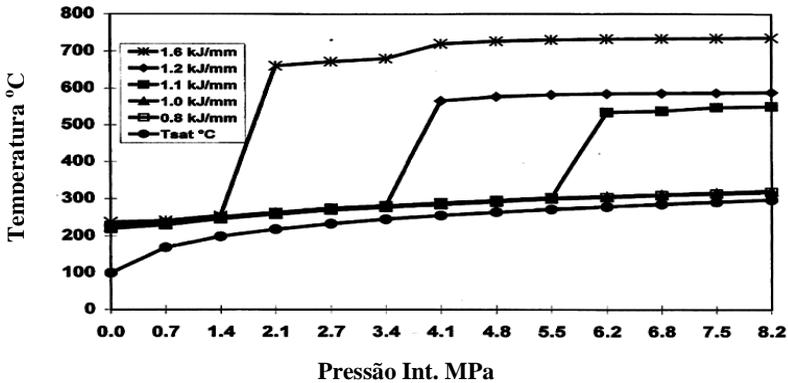


Figura 3.20 – Efeito do aporte de calor simulado sobre a temperatura da parede interna com a transição de ebulição em água através do programa do Instituto Battelle (BELANGER, 2000).

### 3.4.5 Influência da resistência mecânica (grau do material) na perfuração

Os aços sofrem elevada redução de sua resistência com o aumento da temperatura. Seu limite de resistência ao escoamento a temperaturas superiores a 800 °C é em torno de 4 a 10% do limite em temperatura ambiente. A resistência a altas temperaturas de um aço de grau elevado como o API 5L X80 não é significativamente maior que a de um aço de mais baixo grau. Então, apesar de que o aumento da resistência à temperatura ambiente permite usar tubos de parede mais fina, este acréscimo da resistência não continua a existir na região da Zona Termicamente Afetada (ZTA) próxima à poça de fusão durante a soldagem.

### 3.4.6 Técnica alternativa para minimizar a perfuração

Uma técnica alternativa de reparo em dutos e tubulações com pequena espessura remanescente foi desenvolvida por Novicki (NOVICKI et al, 2011), envolvendo uma recuperação prévia da espessura da parede do duto através de amantejamento por processos de aspersão térmica. O aumento da espessura a ser reparada diminui o risco de perfuração durante a deposição dos cordões de solda usados no reparo. Outra vantagem do aumento da espessura é permitir o aumento do aporte térmico, minimizando a incidência de trincas a frio induzidas por hidrogênio.

### 3.5 Trinca a frio ou induzida por hidrogênio

As trincas a frio ou induzidas por hidrogênio são as descontinuidades mais problemáticas com respeito à integridade de uma tubulação. Este tipo de trincas normalmente ocorre na ZAC como pode ser visto nas Figura 3.21 e Figura 3.22, e em algumas situações na zona fundida (ZF).

As trincas a frio em juntas soldadas de aços de alta resistência estão bem caracterizadas, bem documentadas, e os mecanismos de falha bem conhecidos. Extensivos esforços têm-se colocado para reconhecer os parâmetros de soldagem e selecionar os materiais que são promotores das trincas a frio. Contudo, estes esforços de engenharia não têm eliminado totalmente a ocorrência de tais falhas (STEVENSON, 2002)

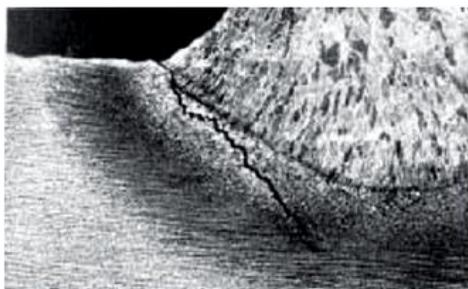


Figura 3.21 – Trinca a frio na ZTA (INFOSOLDA, 2007).

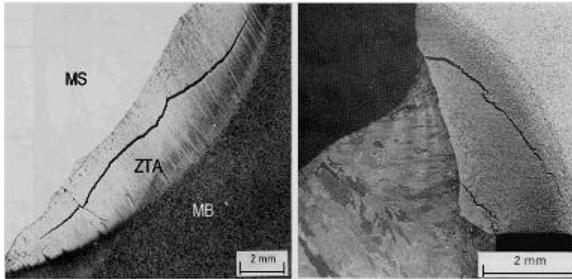


Figura 3.22 – Aspecto típico de trincas a frio (PÉREZ, 2005).

De uma forma geral, as trincas a frio ou induzidas pelo hidrogênio ocorrem a temperaturas inferiores a 150 °C, sendo praticamente inexistentes a temperaturas superiores a 250°C. O maior risco se dá, entretanto, à temperatura ambiente. A maior parte do hidrogênio em supersaturação se difunde e abandona a solda, após um tempo que, como em todo mecanismo de difusão, depende da temperatura. Na temperatura de 250 °C o hidrogênio difusível é eliminado em poucas horas (FBTS, 2005).

A Figura 3.23 apresenta esquematicamente a relação entre os fatores que influenciam a ocorrência de trincas a frio em soldas executadas em operação.

As microestruturas duras (usualmente martensítica e bainita) se formam em aços com elevado carbono equivalentes (CE) e por elevadas taxas de resfriamento. As taxas de resfriamento, por outro lado, são governadas pelo aporte de calor da solda, pela temperatura de preaquecimento e pelas condições operacionais da tubulação durante a soldagem. As condições operacionais que influenciam a taxa de resfriamento incluem a temperatura ambiente e do produto, vazão e tipo de produto, a espessura equivalente da região a ser soldada e, no caso de gases, a pressão interna (PAES et al, 2000).

### 3.5.1 Mecanismo de trinca por hidrogênio – O conceito de “Olho de Peixe”

A iniciação de trinca requer uma cavidade para a estocagem de hidrogênio e a deformação plástica. Isto pode ser mostrado muito claramente pela falha conhecida como olho de peixe, que é observada sobre a superfície da fratura de um simples dobramento de soldagem, se ela é executada dentro de um ambiente úmido.

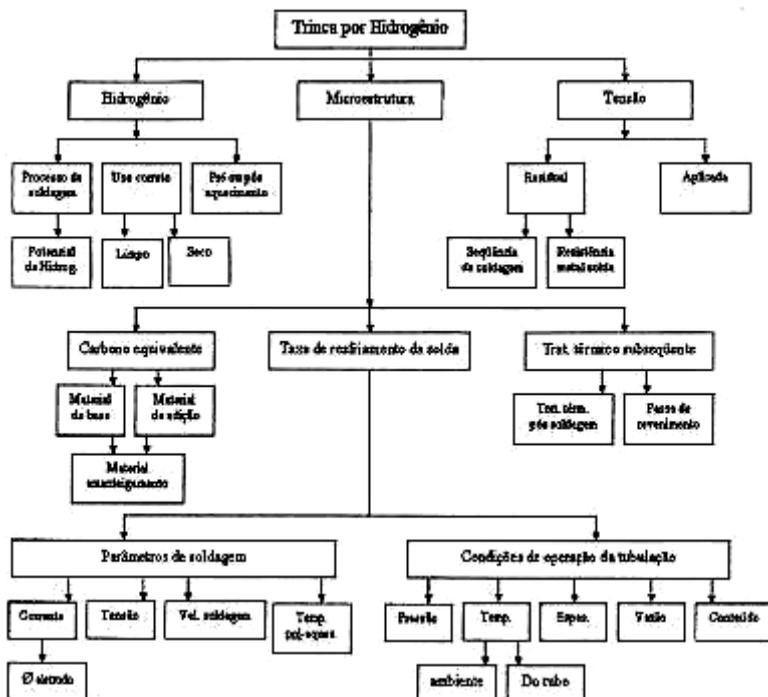


Figura 3.23 – Fatores necessários para ocorrência de trincas a frio (BRUCE apud MASCARENHAS, 2005).

Olho de peixe (*Fisheye*) é uma manifestação menos usual da fragilização por hidrogênio e que ocorre somente na superfície de fratura do metal de solda na condição como soldado. Como pode ser visto na Figura 3.24, cada olho de peixe consiste de uma região central (Pupila do olho) e circundada por uma região (Iris). A região central é uma pequena imperfeição, pode ser um poro ou uma inclusão, a qual foi enriquecida localmente por hidrogênio quando foi formado o olho de peixe (BAILEY, 2010).

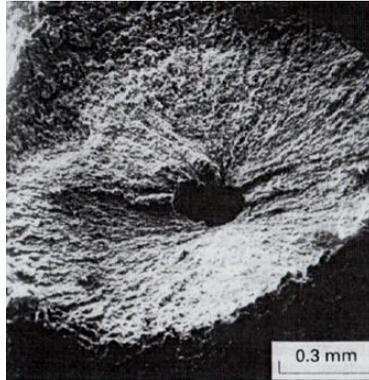


Figura 3.24 – Superfície de fratura de um olho de peixe (*fisheye*) vista através do MEV, mostrando um poro na região central circundada por uma fratura frágil (BAILEY, 2010).

Se o hidrogênio atômico não puder deixar a solda durante a solidificação difunde para inclusões, trincas ou poros, onde ocorre uma recombinação em moléculas e aumenta a pressão no local, ocasionando a fratura. A Figura 3.25 mostra inclusões (óxidos e sulfetos) como locais de origem da trinca.

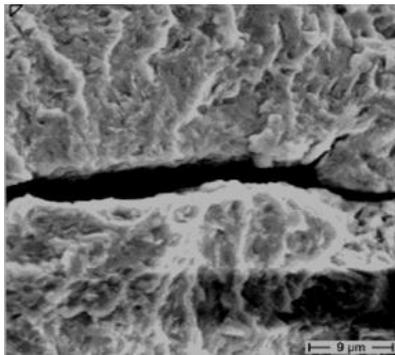


Figura 3.25 – Uma inclusão como local de origem da trinca (MÖSER, 1984)

### 3.5.2 Formas de evitar as trincas a frio ou induzidas por hidrogênio

A ação simultânea dos quatro fatores microestrutura suscetível, hidrogênio, tensão trativa e baixa temperatura é responsável pelo surgimento de trincas. A remoção ou atenuação de qualquer desses fatores pode ser usada no controle das trincas a frio. Caso se remova ou

atenuar mais de um dos fatores tem-se uma margem adicional de segurança no controle das trincas.

### 3.5.2.1 Controle da microestrutura

O risco da trinca a frio na ZTA cresce com o aumento da dureza, a qual depende da composição química do aço, da taxa de resfriamento na soldagem e do tratamento térmico subsequente. Para certa taxa de resfriamento, a dureza na ZAC é função do carbono equivalente (CE) da tubulação e das conexões, e esta aumenta com o aumento do CE. O valor de dureza normalmente aceita como limite máximo para evitar a trinca a frio para soldas de aços carbono ou de baixa liga é de 350 HV (algumas companhias operadoras de dutos especificam valores de 320 HV), embora este valor possa variar em função do: carbono equivalente, teor de carbono, restrição da junta soldada e quantidade de hidrogênio difusível presente no processo (BS 5135, 1984).

Muitas fórmulas de CE têm sido propostas e encontram-se na literatura. A do *International Institute of Welding* (IIW) tem sido usada com enfoque na temperabilidade (dureza) da ZAC (IRVING, 1992). Mais adequado para aços antigos com altos teores de carbono, de acordo com a norma API 5L (API 5L, 2000) a fórmula do  $CE_{IIW}$  deve ser utilizada quando o teor C for maior que 0,12%.

$$CE_{IIW} = \%C + \%Mn/6 + \%(\text{Cr} + \text{Mo} + \text{V})/5 + \%(\text{Ni} + \text{Cu})/15 \quad (\text{Eq. 3.3})$$

Por outro lado, existem outros tipos de CEs que tem sido usado com o enfoque no controle do hidrogênio. Estas são modelos empíricos onde tem sido relacionado entre a composição química e preaquecimento. Uma das mais utilizadas para o controle do hidrogênio é a  $P_{cm}$ , a qual foi originalmente desenvolvida no Japão (IRVING, 1992). Mais adequado para aços atuais com baixos teores de carbono e baixa liga, de acordo com a norma API 5L (API 5L, 2000) a fórmula do  $CE_{P_{cm}}$  deve ser utilizada quando o teor de C for menor ou igual a 0,12%.

$$CE_{P_{cm}} = \%C + \%Si/30 + \%Mn/20 + \%Cu/20 + \%Cr/20 + \%Mo/15 + \%V/10 + \%Ni/60 + 5\%B \quad (\text{Eq. 3.4})$$

A dureza na ZAC em aços de dutos soldados com fluxo interno será tanto maior quanto maior for a taxa de resfriamento imposta na faixa de temperatura onde ocorrem as transformações de fase no estado sólido. Esta taxa de resfriamento depende das condições de soldagem

(aporte térmico, preaquecimento) e das condições operacionais do duto. O aumento no aporte de calor resulta na diminuição da velocidade de resfriamento. O aporte térmico é diretamente proporcional à corrente de soldagem e inversamente proporcional à velocidade de soldagem.

O uso de pré-aquecimento é um dos recursos que permite reduzir a velocidade de resfriamento da solda e aumentar o tempo para difusão do hidrogênio. Entretanto, sua eficácia sobre o aumento do tempo de resfriamento  $\Delta t_{8/5}$  é inferior àquela do aporte térmico. Além disso, o pré-aquecimento de dutos em operação, utilizando técnicas convencionais de aquecimento (maçarico, mantas térmicas com resistências), é pouco aplicável devido à capacidade de fluxo interno em remover calor da parede do tubo, principalmente em tubulações de baixa espessura, e na presença de grandes vazões de produto (PAES et al, 2000).

Na Europa, para o pré-aquecimento e redução da taxa de resfriamento de soldas de dutos em operação, têm sido usados sistemas de aquecimento por indução, com bobinas colocadas ao redor do duto, alimentadas com grandes geradores. A Figura 3.26 mostra um equipamento completo para preaquecimento por indução disponível comercialmente, que pode ser utilizado para realizar pré-aquecimento ou tratamento térmico de soldas.

No procedimento de soldagem em operação do *Alyeska (Trans-Alaska)* foi utilizado eletrodo do baixo hidrogênio e temperatura de pré-aquecimento de 52 °C (BRUCE, 2004), conseguida mediante a disposição das bobinas junto à região sendo soldada que pode ser observada na Figura 3.27.



Figura 3.26 – Equipamento de aquecimento por indução, modelo ProHeat 35 Induction Power Source, da Miller. (MILLER, 2007).



Figura 3.27 – Sistema de aquecimento por indução utilizado durante a soldagem do Trans-Alaska. (BRUCE, 2004).

Os parâmetros operacionais da tubulação que afetam a taxa de resfriamento das soldas incluem o tipo de produto escoado, vazão, pressão (para gases somente), temperatura da tubulação, temperatura ambiente e espessura da tubulação. Ao contrário de outras aplicações em soldagem a velocidade de resfriamento de uma solda com fluxo interno aumenta quando as espessuras são menores. Soldas executadas com espessura de parede muito fina estão bastante próximas do fluido em movimento internamente, o qual remove calor da parede interna do duto.

Um método alternativo que pode reduzir a taxa de resfriamento de soldagem em operação consiste no ajuste de parâmetros operacionais (por exemplo, a redução da vazão). O modelo computacional desenvolvido pelo instituto Battelle (KIEFNER, 1981), permite o cálculo das taxas na resfriamento de soldagem em operação, tanto para a realização da soldagem em junta em ângulo (luva/duto) quanto para as juntas de topo (luva/conexão), modelo este que utiliza uma solução numérica bidimensional das equações de transferência de calor.

Na América do Norte são especificados procedimentos de soldagem para soldas em operação, mantendo-se o aporte térmico mínimo necessário para evitar a formação de microestruturas frágeis e suscetíveis a trincas a frio. Em determinadas situações, entretanto, até mesmo soldas executadas com elevados aportes térmicos podem resfriar numa velocidade superior ao limite requerido para evitar a formação de trincas. Soldagens com muito alto aporte de calor resultam num maior volume de material exposto durante mais tempo acima da temperatura de austenitização, permitindo crescimento de grão na ZAC mais próxima à linha de fusão. Esta região se torna comparativamente mais temperável do que aquela com baixo aporte de calor, tendo-se,

desta forma, uma ZAC não somente mais dura como também mais difícil de ser revenida pelos passes subseqüentes (PAES et al, 2000).

O tratamento térmico pós soldagem (TTPS) é largamente utilizado em diversas aplicações, com a finalidade de reduzir o nível de dureza através de um revenido da microestrutura e/ou de aliviar as tensões impostas pelo processo de soldagem. O TTPS ou a técnica do “passe de revenimento” podem também ser utilizados para controlar a difusão do hidrogênio, desde que o aquecimento seja executado imediatamente após o término da solda e que a mesma seja depositada de forma controlada. Da mesma forma que o preaquecimento, o TTPS é de difícil execução em soldagem de reparo de dutos em operação, principalmente quando se tem espessuras finas e alta vazão do fluxo interno de produto escoando (PAES et al, 2000).

A técnica de deposição dos passes de soldagem (passes estreitos ou oscilantes) pode influenciar a dureza da ZAC. A Figura 3.28 mostra estas técnicas de deposição. A deposição de passes estreitos é recomendada para a utilização da técnica do passe de revenimento (*temper bead*), onde passe posterior é depositado acima do passe anterior, tomando o cuidado para que os últimos passes não toquem o material da tubulação, como visto na Figura 3.29, resultando em valores de dureza inferiores quando comparada com a técnica de passes oscilantes. A técnica de passes estreitos convenientemente aplicados pode ser usada para tratar termicamente a ZAC endurecida de um passe com o calor do passe de solda subseqüente, podendo resultar numa retransformação para microestruturas mais macias ou pelo simples revenido de microestruturas frágil.

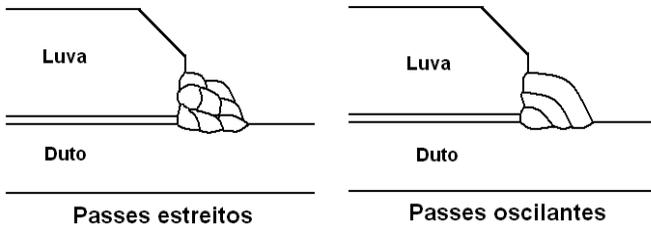


Figura 3.28 – Seqüências de deposição de passes de solda (BRUCE, 2004).

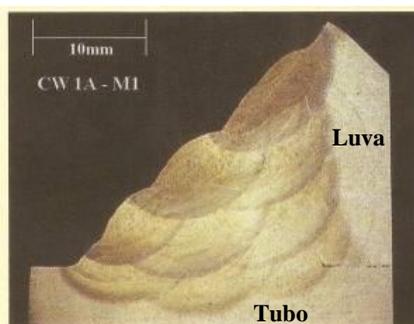


Figura 3.29 – Testes realizados utilizando passes de revenimento. (BRUCE, 2004).

### 3.5.2.2 Controle do hidrogênio

O teor de umidade dos eletrodos revestidos de baixo hidrogênio, após exposição à atmosfera, pode ser reduzido fazendo-se a secagem dos mesmos de acordo com as recomendações do fabricante. Para eletrodos de baixo hidrogênio, mais utilizado para reparo de dutos em operação, recomenda-se uma secagem a 350 °C por mais ou menos 1 hora, após o qual deve ser mantido em estufa de manutenção da secagem em temperatura não inferior a 150 °C. Outro aspecto a ser observado, entretanto, é a absorção de umidade dos eletrodos básicos em função da exposição à atmosfera durante a soldagem em si. A Figura 3.30 mostra como o hidrogênio difusível, medido numa determinada condição (de temperatura ambiente e umidade relativa), cresce quando as condições ambientais de utilização do eletrodo são mais desfavoráveis. Por exemplo, ao passar de uma atmosfera com temperatura de 20 °C e 60% de umidade relativa do ar, com hidrogênio medido de 5 ml/100g, para uma com temperatura de 30 °C e 90% de umidade relativa, o hidrogênio difusível cresce para quase 7 ml/100g (PAES et al, 2000).

Não se executa a secagem dos eletrodos celulósicos (E 6010) para remoção da umidade, pois este tipo de eletrodo requer uma atmosfera redutora no arco (como a gerada pelo hidrogênio), com o objetivo de produzir grande penetração, o que é indicado para soldagem do passe de raiz de tubulações. Trabalho anterior desenvolvido pelo *Edison Welding Institute* (apud PAES et al, 2000) mostrou que o risco de ocorrência de trinca induzida pelo hidrogênio é muito maior usando-se eletrodos celulósicos do que eletrodos de baixo hidrogênio. Portanto, eletrodos celulósicos não são recomendados para a soldagem de dutos em operação. A Tabela 3.3 mostra a evolução do hidrogênio nas soldas.

A introdução de hidrogênio nas soldas pode também ser reduzida com a utilização de processos e consumíveis de baixo hidrogênio, como mostram a Tabela 3.3 e a Figura 3.31. Os processos de soldagem TIG, MIG/MAG e eletrodo revestido (aplicado com eletrodos básicos) apresentam menores teores de hidrogênio.

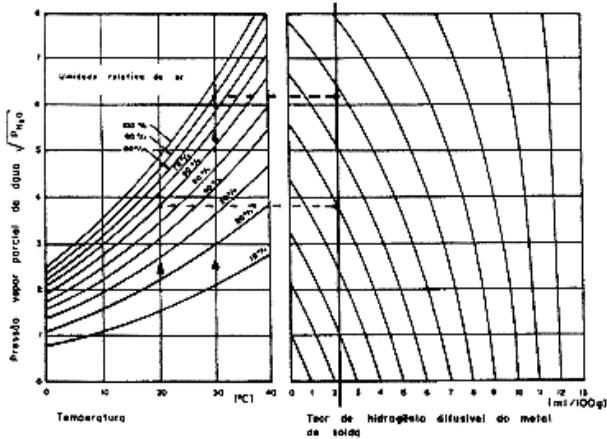


Figura 3.30 – Influência da temperatura e da umidade relativa do ar no hidrogênio difusível de eletrodos básicos (PAES et al, 2000).

Tabela 3.3 – Evolução do hidrogênio nas soldas (FBTS, 2005).

Concentração de hidrogênio em ml/100g				
Processo/ consumível	Na poça Fundida	Liberado nas primeiras 24 horas	Liberado nos 20 dias subseqüentes	Residual
Eletrodo revestido/ E 6010 (Celulósico)	28	10	3	15
Eletrodo revestido/ E 6012 (Rutílico)	15	6	2	7
Eletrodo revestido/ E 6015 (Básico)	8	2	1	5
TIG/(argônio)	4	1	0	3

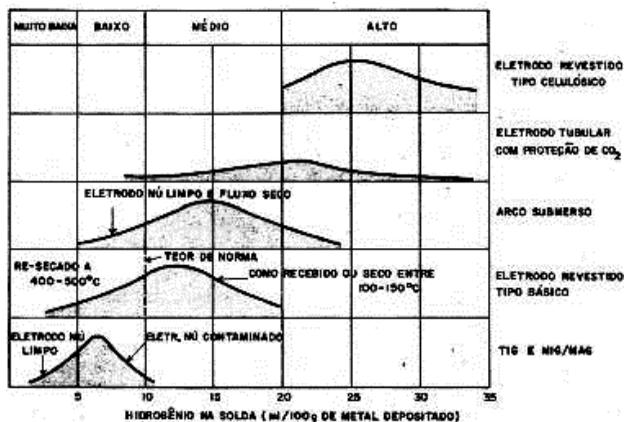


Figura 3.31 – teores típicos de hidrogênio para diversos processos de soldagem (COE apud WAINER et al, 1992).

Deve-se fazer uma limpeza no metal base, no chanfro e a 50 mm além da margem da solda. Também se deve limpar o metal de adição. Lubrificantes provenientes da fabricação do arame são potenciais fontes de hidrogênio. A quantidade de hidrogênio pode ser reduzida pelo controle do teor de umidade na região da execução da soldagem, como por exemplo, removendo a água depositada na parte inferior de uma área escavada. No reparo ou montagem dos dutos, a água condensa quando a temperatura na superfície da tubulação é inferior à temperatura de ponto de orvalho.

### 3.5.2.3 Controle das tensões na solda

As tensões trativas que promovem a formação de trincas a frio podem ser tanto aquelas oriundas de cargas externas quanto de tensões residuais presentes. Cargas externas não previstas podem ocorrer durante ou após a soldagem e incluem aquelas impostas pelo movimento da tubulação ou de conexões, suportes e luvas. As tensões aplicadas devem ser minimizadas se restringido o movimentos da tubulação e evitando que haja desmoronamento do trecho de solo na região desenterrada. Deve ser providenciada também correta fixação da luva e acessórios durante a execução da soldagem (PAES et al, 2000).

As tensões residuais se desenvolvem como resultado da restrição imposta à estrutura soldada e pela contração térmica durante o resfriamento da solda, as quais se somam aos efeitos de tração impostos pela pressão interna. Controlar a restrição da solda é muito difícil, apesar de que algum controle pode ser feito no projeto da conexão a ser

soldada. Um bom, que reduza o espaçamento entre luva e tubo e entre luvas, como também evitar desalinhamento entre as duas selas da luva, são procedimentos que minimizam a restrição introduzida na solda, tendo como resultado final uma redução das tensões residuais.

### **3.5.2.4 Controle da temperatura**

Manter a solda a uma temperatura suficientemente alta (acima de 150 °C), de modo a facilitar a difusão do hidrogênio, é uma medida que pode ser empregada para minimizar o risco da trinca a frio. Esta manutenção da temperatura por um período longo, reconhecida por Irving como um tipo de tratamento térmico após soldagem (IRVING, 1991), é uma extensão do preaquecimento com o intuito de remover hidrogênio.

## **3.6 Processos semi-automáticos a serem utilizados na soldagem em operação**

A soldagem em operação de dutos tem sido realizada com sucesso por longo tempo, usando principalmente o processo eletrodo revestido (SMAW). Nos últimos 25 anos, falhas ocorreram nos depósitos de solda nos dutos em operação, e estas foram atribuídas a trincas a frio na juntas soldadas, e irregularidades nas dimensões do cordão ou perfil de penetração. Procedimentos de soldagem projetados para evitar a perfuração e trincas a frio considera principalmente o ciclo térmico, enquanto a composição química do duto e a pressão interna são parâmetros de influencia adicional para a trinca a frio e perfuração, respectivamente.

Na indústria do petróleo, a soldagem tem constituído um processo de um alto nível tecnológico empregado dia a dia no reparo de dutos, tubulações e equipamentos, possibilitando a intervenção dos diversos equipamentos sem a interrupção da sua operação e evitando que o produto seja derramado para o meio ambiente.

Os principais processos utilizados na soldagem e aceitos pela norma API 1104, são: SMAW (eletrodo revestido), GTAW (TIG), GMAW (MIG/MAG) e FCAW (arame tubular).

Atualmente existe uma forte tendência na utilização de processos que aumente a produtividade na soldagem em operação em virtude de: possuir maior taxa de deposição, diminuir a perda de material de aporte, operar consistentemente por longos períodos de trabalho e ajudar na segurança do soldador. Os processos MIG/MAG e arame tubular apresentam alta produtividade e, em função disso, vêm substituindo o

processo de soldagem SMAW. Estes processos de soldagem mais avançados têm os benefícios de (BEGG, 2009):

- permitir maior taxa de deposição sem ocorrer a perfuração. Isto pode ser alcançado em virtude de um arco mais suave reduzindo a penetração, isto é, permitindo um menor aporte de calor para uma dada taxa de deposição;
- permitir um menor aporte de calor sem causar a trinca a frio. Isto pode ser alcançado através do uso de processo/consumível com menor potencial de hidrogênio. A eficiência térmica do arco de cada processo é outro fator que pode influenciar na taxa de resfriamento, e conseqüentemente a suscetibilidade da trinca a frio na microestrutura da zona fundida para um dado aporte de calor;
- reduzir os defeitos na solda;
- melhorar o controle da poça de solda;
- utilizar equipamento robusto e portátil para uso em campo;
- reduzir a habilidade necessária do soldador.

Segundo Bruce (2000a), o processo de soldagem mais utilizado para soldagem em operação é o eletrodo revestido, cuja produtividade é baixa e é de difícil automação. Esse processo normalmente é aplicado com eletrodos de baixo hidrogênio do tipo E XX18. Outro processo utilizado, embora com muito menor freqüência, é o processo MIG/MAG. O uso de variantes destes processos, ou de outros processos totalmente diferentes pode ter vantagens para algumas aplicações na soldagem em operação. Como exemplos podem-se citar as seguintes: o arame tubular autoprottegido tem como vantagens a alta produtividade, baixo teor de hidrogênio, não necessitar gases de proteção, ser menos suscetível a descontinuidades por efeito de correntes de ar no local da solda; o processo TIG com alimentação de arame tem a vantagem de alta produtividade, baixo teor de hidrogênio e possibilidade de uso de baixa energia de soldagem.

Durante a soldagem em operação de dutos os processos devem atender aos seguintes requisitos (NORRISH, 2002):

- não deve produzir a penetração total na parede do tubo causando a perfuração;
- não pode reduzir a resistência do tubo no ponto onde a pressão interna cause vazamento;
- deve produzir adequada fusão na parede do tubo e nas conexões;
- deve produzir solda sem defeito e adequada resistência;
- não pode induzir a trinca a frio;
- deve ter boa tolerância para a soldagem em campo.

### 3.6.1 Soldagem de tubulação pelo processo GMAW (MIG/MAG)

O processo MIG/MAG cada vez ganha mais área de aplicação na soldagem, através de pesquisas e desenvolvimentos em sistemas eletrônicos para máquinas de solda, que têm permitido melhorar o ajuste e controle da corrente, de forma a obter um maior controle da transferência metálica.

Na soldagem ao arco elétrico com gás de proteção MIG/MAG, um arco elétrico é estabelecido entre a peça e um consumível na forma de arame. O arco funde continuamente o arame à medida que este é alimentado à poça de fusão. O metal de solda é protegido da atmosfera pelo fluxo de um gás (ou mistura de gases) inerte ou ativo. A Figura 3.32 mostra esse processo e uma parte da tocha de soldagem.

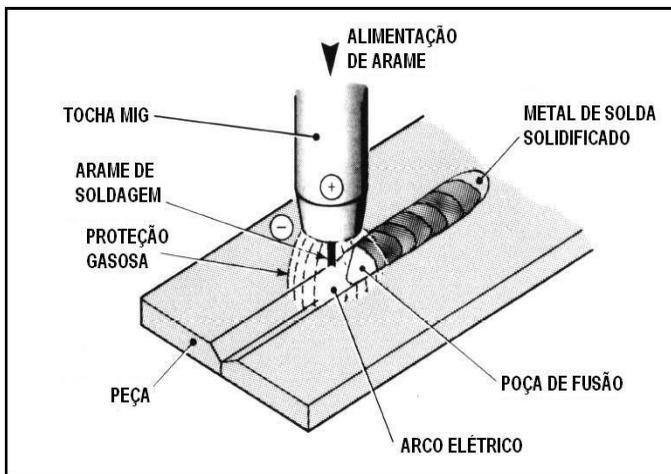


Figura 3.32 - Processo básico de soldagem MIG/MAG. Fonte: ESAB.

A transferência metálica no arco pode ser realizada de três formas básicas (ilustradas na Figura 3.33):

- a) Em curto-circuito;
- b) Em forma globular;
- c) Em forma goticular ou spray.

A transferência em curto-circuito se produz quando a gota metálica vai crescendo e atinge à poça de fusão, a força devido á tensão superficial consegue romper a união existente entre a gota e a ponta do arame absorvendo-a, neste instante se reinicia o arco elétrico. Este tipo de transferência se obtém quando a tensão e a intensidade de corrente

são baixas. A transferência de forma globular é caracterizada pela formação de uma gota com diâmetro muito maior que o do arame, a qual cai na poça de fusão pela ação do seu próprio peso. A aplicação tecnológica é difícil, porque não é possível o controle adequado do metal de aporte e porque às vezes provoca falta de penetração em espessuras elevadas. Este modo de transferência se encontra na zona de transição entre o curto-circuito e o goticular. A transferência goticular ocorre com altas correntes (acima da corrente de transição) e altas tensões, com altas taxas de deposição, na forma de pequenas gotas (com diâmetro similar ou menor que o do arame) que se deslocam no eixo do arco elétrico.

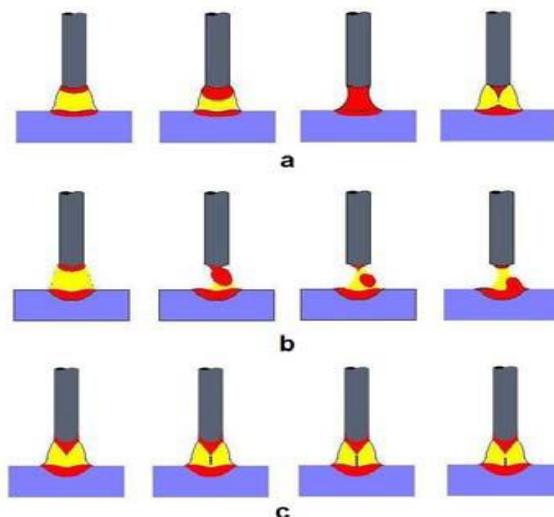


Figura 3.33 - Tipos básicos de transferência metálica: a) Transferência por curto-circuito, b) Transferência globular, c) Transferência goticular. Adaptado de (HERNÁNDEZ, 2002).

Uma forma de transferência derivada da goticular convencional (com corrente constante) é a pulsada, em que a transferência das gotas ocorre em forma sincronizada com pulsos de corrente regularmente espaçados, no lugar de acontecer aleatoriamente como ocorre no arco *spray* (HERNÁNDEZ, 2002).

Na transferência goticular pulsada, assim com na goticular convencional, a gota é destacada e projetada em direção à peça por efeito da força eletromagnética, que faz uma constrição na interface

líquido sólido da ponta do arame. Utiliza-se uma corrente pulsada com intervalos de tempo regularmente espaçados, composta de uma corrente de base de baixa intensidade, e uma corrente de pico de alta intensidade. Quando a corrente está na fase de baixa intensidade, Figura 3.34, o arame é aquecido e acondicionado para a formação da gota (a e b), no momento da aplicação da corrente de pico (c) a gota inicia o destacamento para a poça de fusão (d e e) (HERNÁNDEZ, 2002).

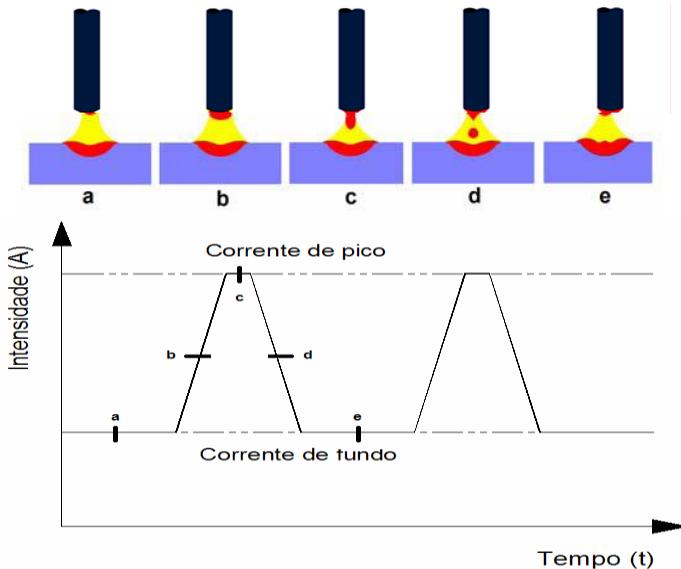


Figura 3.34 - Sequência de transferência por arco pulsado.  
Adaptado de (HERNÁNDEZ, 2002).

Normalmente o cordão de solda é caracterizado pela penetração, largura e reforço. De uma forma geral, pode-se dizer que a formação do cordão deve a dois efeitos, são eles, efeito térmico e efeito mecânico. A Figura 3.35 abaixo mostra o fenômeno da formação do cordão no processo GMAW (SCOTTI, 2008).

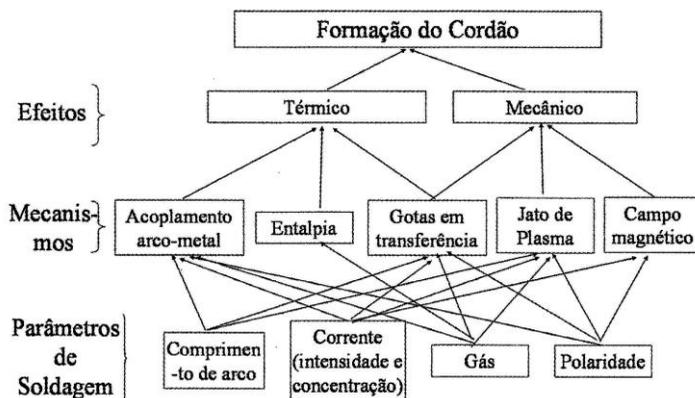


Figura 3.35 - fenômeno da formação do cordão no processo GMAW (SCOTTI, 2008).

É de conhecimento geral que a penetração do cordão de solda é diretamente proporcional a corrente e à tensão, e inversamente a velocidade de soldagem. Esta informação não é verdadeira quando se trata do processo MIG/MAG. Neste processo existe uma peculiaridade, quanto maior a velocidade de soldagem, menor se torna a sobreposição da poça e a tendência é um aumento na penetração. Por outro lado, quanto maior a velocidade de soldagem, menor o calor aportado por unidade de comprimento da solda, portanto, menor a penetração, para a mesma condição de corrente e tensão. Menores velocidades de soldagem deixam o efeito da sobreposição da poça prevalecer, sendo que para menores velocidades o efeito do calor de aporte se torna o principal. Pode ser visto através da Figura 3.36, que o comportamento da penetração em função da velocidade se caracteriza por uma curva com um ponto de máximo (SCOTTI, 2008).

O ângulo de ataque na soldagem GMAW com as mesmas extensões livres do eletrodo, mas alterada a distância bico de contato peça. Observa-se que a penetração diminui de puxando para empurrando (Figura 3.37a). Nota-se também que a penetração é máxima na posição perpendicular (Figura 3.37b)

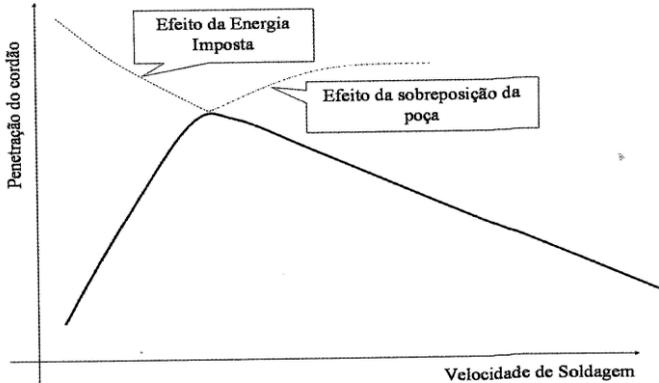


Figura 3.36 - Balanceamento dos efeitos da energia imposta e da sobreposição da poça sobre a penetração para velocidade de soldagem crescente. (SCOTTI, 2008)

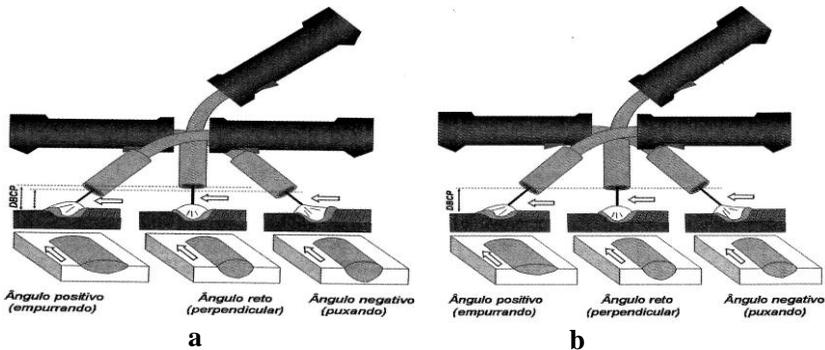


Figura 3.37 – Esquema para definição do ângulo de ataque na soldagem MIG/MAG (SCOTTI, 2008).

### 3.6.2 Soldagem pelo processo arame tubular auto protegido

Uma variante do processo arame tubular é aquela sem proteção externa. A proteção do metal é realizada pela fusão do fluxo inserido no arame tubular, que gera gás protetor e escória. Além desta função, o fluxo é responsável pela estabilização do arco elétrico e pela transferência de elementos de liga adicionais. Portanto, uma composição adequada do fluxo é fundamental, pois pode gerar restrições em sua utilização.

A Figura 3.38 mostra esquematicamente a soldagem realizada pelo processo arame tubular. Como pode ser observado, não há a representação do bocal da tocha e do fluxo do gás de proteção, pois estes

não são utilizados. Ainda na Figura 3.38, verifica-se o bico de contato, responsável pelo contato elétrico da fonte de soldagem com o arame tubular; nota-se também, o gás de proteção gerado pela fusão do fluxo do arame; a formação do arco elétrico entre a ponta do arame e a poça de fusão, que, quando solidificada, formará o cordão de solda, protegido pela escória.

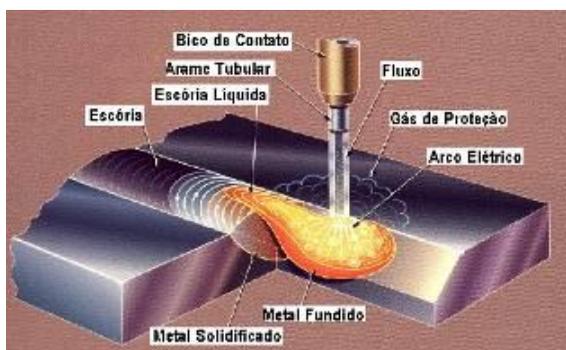


Figura 3.38 - Esquema de soldagem com arame tubular pelo processo FCAW-S. (WELDING HANDBOOK, vol 2, 2007).

Este processo de soldagem é adequado para a soldagem em campo, onde se deseja que ventos moderados não afetem a qualidade do cordão de solda. Na Figura 3.39 (BONISZEWSKY, 1992) pode ser verificada que o aumento da velocidade do vento não altera a tenacidade do metal depositado.

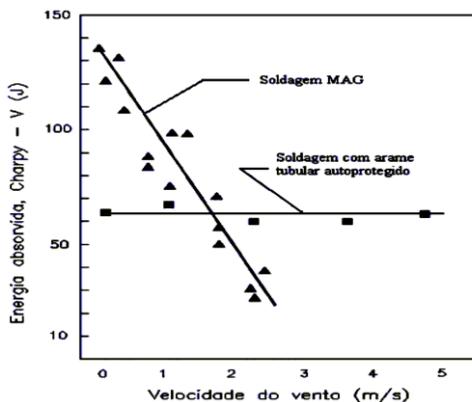


Figura 3.39 – Efeito da velocidade do vento sobre a tenacidade de aço depositado pelos processos GMAW e FCAW-S (BONISZEWSKY, 1992).

Na transferência metálica em soldagens com arames tubulares auto protegidos ocorre o denominado “efeito colchão”, que é causado pela reflexão de parte do gás de proteção após atingir a superfície da poça de fusão. A gota fundida ainda presa na ponta do eletrodo flutua neste colchão gasoso, deslocando-se do eixo do arame e girando ao redor dele, como esquematizada na Figura 3.40 (BONISZEWSKY, 1992). O tempo de destacamento da gota é retardado pelo “efeito colchão”, o que a faz aumentar de volume e expor parte de seu conteúdo à contaminação do ar atmosférico por não permanecer sob o fluxo do gás de proteção, sendo esta a principal fonte de contaminação do metal fundido.

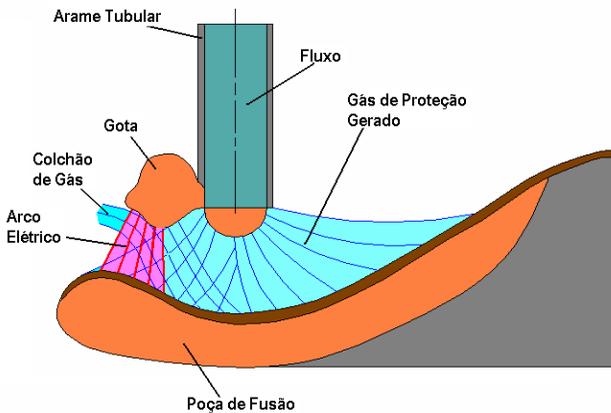


Figura 3.40 – Representação esquemática do “efeito colchão” (BONISZEWSKY, 1992).

### 3.7 Qualificação de procedimentos de soldagem em operação segundo a norma API 1104 e apêndice B.

O apêndice B da norma API 1104 mostra como deve ser a peça de teste, para a qualificação de procedimento de soldagem e soldador, na execução da soldagem em operação de dutos (veja a Figura 3.41).

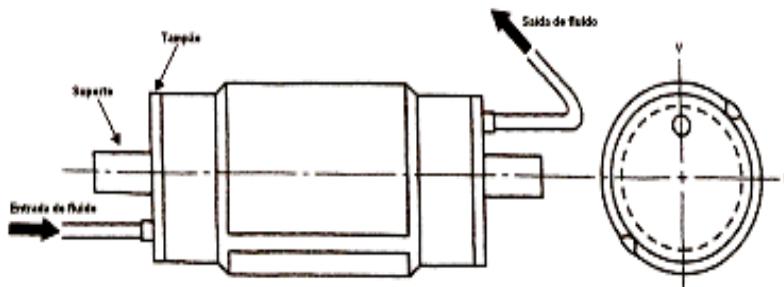


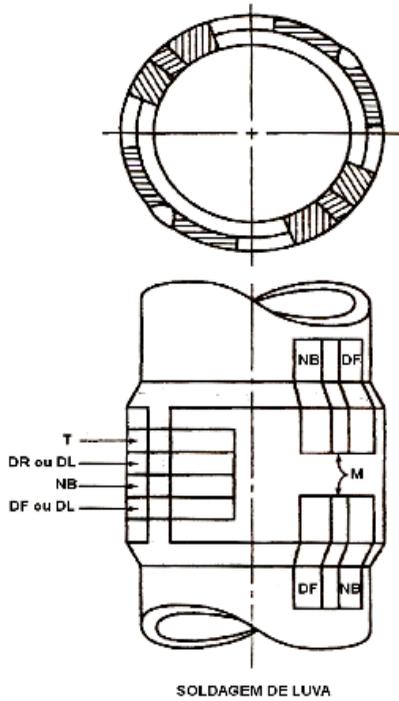
Figura 3.41 – Peça de teste para a qualificação da solda em operação de dutos. (API 1104, apêndice B, 1999).

Os tipos e quantidades dos corpos de prova utilizados para qualificação de acordo com a norma API 1104 apêndice B são mostrados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Tipos e números de corpos de prova para qualificação de procedimento de soldagem em operação. (API 1104, apêndice B, 1999).

Espessura	Tipo de Solda	Quantidade de CPs por tipo de ensaio					Total de CPs
		Tração	Nick - Break	Dobra Raiz	Dobra Face	Macro	
≤ 12,7 mm	Chanfro (topo)	2	2	2	2		8
	Luva (filete)		4		4	4	12

Os locais para retirada dos corpos de prova para a qualificação estão mostrados na Figura 3.42.



**SOLDAGEM DE LUVA**  
 Nota: T = tração; DR = dobramento de raiz;  
 DL = dobramento lateral; DF = dobramento de face;  
 M = macrografia; NB = nick-break

Figura 3.42 – Localização da retirada dos Corpos de prova (API 1104, apêndice B, 1999).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento desta pesquisa foram realizados numerosos experimentos, seguindo um planejamento dividido em diversas fases. Na sequência são detalhados todos os materiais e os equipamentos utilizados, são ilustrados os corpos de prova (CP) e são descritas as metodologias adotadas.

### 4.1 Materiais

Para o desenvolvimento do trabalho foram usados diferentes materiais de acordo com o previsto em suas etapas de execução.

Foi executada a soldagem com eletrodo revestido (SMAW) para avaliação da trinca a frio em função da folga entre a calha e tubo. Para isto, foi selecionado um metal de base de maior temperabilidade, tubo ASTM A-335 P5 no  $\phi$  5” com espessura de parede de 6,3 mm, cuja composição química é mostrada na Tabela 4.1; metal de adição eletrodo AWS E 8018-B8 com  $\phi$  3,2 mm cuja composição química pode ser vista na Tabela 4.2.

Na avaliação da trinca a frio induzida pelo hidrogênio em função da restrição imposta a junta foram feitas a soldagens das calhas com os tubos nos processos GMAW-P (MIG/MAG Pulsado) e arame tubular alto protegido (FCAW-S). Para tal, foi usado como metal de base o tubo API 5 L X-70 no  $\phi$  4” e espessura de parede 6,2 mm, cuja composição química aparece na Tabela 4.3; escolhido como metais de adição o arame eletrodo AWS ER 80S-G e o eletrodo AWS E 71T-11 no  $\phi$  de 1,2 mm cuja composições químicas podem ser vistas na Tabela 4.6 e Tabela 4.7, respectivamente.

Para o resto da pesquisa, foram depositadas soldas sobre tubos ASTM 106 Graus B e API 5L X70 na avaliação da perfuração e na qualificação de procedimento de soldagem. Para estas classes de aços, as composições químicas e as propriedades mecânicas são apresentadas nas Tabela 4.3, Tabela 4.4 e Tabela 4.5, respectivamente. As soldas foram executadas com os processos GMAW (Arame Eletrodo ER 80S-G, Tabela 4.6) e FCAW-S (Eletrodo E 71T-11, ).

Tabela 4.1- Composições químicas do tubo ASTM A 335 P5

Elemento	(*)% Em peso / Analisado	% Em peso / Norma
Carbono	0,07	máx. 0,15
Manganês	0,56	0,30 – 0,60
Silício	0,26	min. 0,50
Fósforo	0,010	máx. 0,025
Enxofre	0,016	máx. 0,025
Cromo	5,30	4,00 – 6,00
Molibdênio	0,44	0,45 – 0,65

(\*) Espectrometria de emissão ótica  $CE_{(IIV)} = 1,31$

Tabela 4.2– Composições químicas do eletrodo AWS E 8018-B8

Elemento	(*)% Em peso / Analisado	% Em peso / Norma
Carbono	0,073	0,05 – 0,10
Manganês	0,505	máx. 1,00
Silício	0,400	máx. 0,90
Fósforo	0,013	máx. 0,03
Enxofre	0,012	máx. 0,03
Cromo	8,833	8,0 – 10,5
Molibdênio	0,866	0,85 – 1,20
Níquel	0,163	máx. 0,40

(\*) Valores obtidos no certificado da qualidade do fornecedor Böhler.

$CE_{(IIV)} = 2,1$

Tabela 4.3– Composições químicas dos tubos.

Elemento	(*)% Em peso		Norma	
	106 Grau B	Analisado X70	106 Grau B	X70
Carbono	0,228	0,088	máx. 0,24	máx. 0,22
Manganês	0,515	1,397	máx. 1,20	máx. 1,65
Fósforo	0,001	0,015	máx. 0,025	máx. 0,025
Enxofre	0,016	0,004	máx. 0,015	máx. 0,015
Cromo	0,044	0,023		
Níquel	0,070	0,016		
Cobre	0,023	0,016		

(\*) Espectrometria de emissão ótica,  $CE_{(IIV)} 106 \text{ Grau B} = 0,336,$

$CE_{(IIV)} X-70 = 0,328.$

Tabela 4.4- Propriedades mecânicas dos tubos ASTM 106 Grau B

Propriedades Mecânicas	Valores Ensaiaados		Referência de Norma	
	MPa	lb/pol <sub>2</sub>	MPa	lb/pol <sub>2</sub>
Limite de Resistência	462,5	67.070	min. 415,0	min. 60.000
Limite de Escoamento	311,40	45.150	min. 241,0	min. 35.000
Alongamento min. (%)		38,6		

Tabela 4.5- Propriedades mecânicas dos tubos API 5L X70

Propriedades Mecânicas	Valores Ensaiaados		Referência de Norma	
	MPa	lb/pol <sub>2</sub>	MPa	lb/pol <sub>2</sub>
Limite de Resistência	566,40	82.130	Min. 565,0	min. 82.000
Limite de Escoamento	498,00	72300	min. 483,0	min. 70.000
Alongamento min. (%)		24,80		

Para a soldagem dos tubos API 5L X70 no processo de soldagem GMAW foi usado como metal de adição o arame eletrodo AWS ER 80S-G, já para o processo de soldagem FCAW-S foi escolhido o metal de adição o eletrodo AW E 71T-11. As composições químicas fornecidas pelos fabricantes dos consumíveis são apresentadas nas Tabela 4.6 e Tabela 4.7.

Tabela 4.6- Composição química do arame AWS ER 80S-G

Elemento	(*)% Em peso / Analisado	% Em peso / Norma
Carbono	0,074	
Manganês	1,350	
Silício	0,750	Não Especificada
Fósforo	0,013	
Enxofre	0,012	
Cromo	0,028	
Molibdênio	0,470	

(\*) Valores obtidos no certificado da qualidade do fornecedor KESTRA.

$$CE_{(IIW)} = 0,413$$

Tabela 4.7- Composição química do eletrodo AWS E 71T-11

Elemento	(*)% Em peso / Analisado	% Em peso / Norma
Carbono	0,230	máx. 0,30
Manganês	0,360	máx. 1,75
Silício	0,120	máx. 0,60
Fósforo	0,006	máx. 0,03
Enxofre	0,006	máx. 0,03
Cromo	0,030	máx. 0,20
Alumínio	1,720	máx. 1,80
Cobre	0,030	máx. 0,35

(\*) Valores obtidos no certificado da qualidade do fornecedor HOBART.

$$CE_{(ITW)} = 0,298$$

## 4.2 Preparação dos corpos de prova

Nas Figura 4.1 a Figura 4.3, referentes ao experimento “F”, mostra-se como se procedeu para verificar a ocorrência de trinca a frio pelo efeito da tensão residual proveniente da folga entre a luva e tubo e alto carbono equivalente. Na Figura 4.1 é mostrada a configuração da junta e como foi executada a soldagem. Na Figura 4.2 é mostrada a folga deixada propositalmente de 0 a 5,0 mm entre a calha e o tubo. Na Figura 4.3, por fim, observam - se os locais de onde foram retirados os corpos de prova para o ensaio macrográfico.



Figura 4.1 – Desenho mostrando os locais das juntas C e D com a execução de um único passe e em condições distintas.

A Figura 4.2 mostra o desenho da folga deixada propositalmente de 0 a 5,0 mm entre a calha e o tubo, e na Figura 4.3 observa-se os locais onde foram retirados os corpos de prova para o ensaio macrográfico.



Figura 4.2 – Desenho mostrado a folga de 0 a 5,0 mm entre a calha e o tubo.

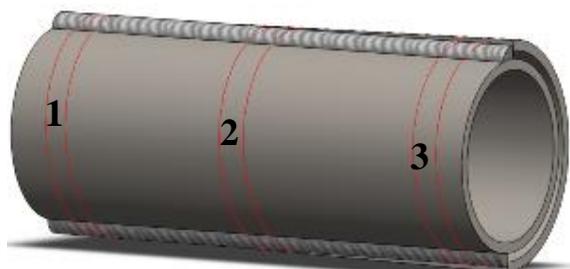


Figura 4.3 – Locais de retiradas dos corpos de prova para ensaio macrográfico.

Com relação ao experimento “R” foi executada a soldagem com restrição para a verificação da possível ocorrência de trinca a frio decorrente do efeito da tensão residual. A Figura 4.4 mostra em detalhes as restrições da junta.

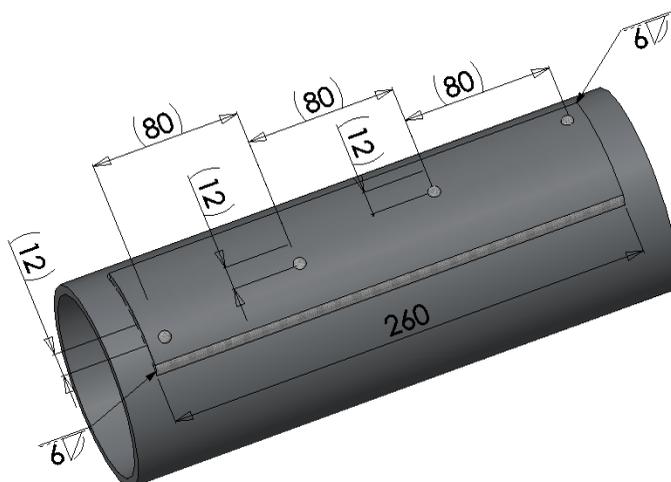


Figura 4.4 – Desenho mostrando os detalhes da junta com restrição.

Para avaliar a ocorrência de perfuração em função dos parâmetros de soldagem e condições de vazão e pressão de água, foram depositados cordões sobre tubo ASTM A 106 Grau B e API 5L X70, ambos com diâmetro 4" e espessura de parede de 3,0 e 3,2 mm.

Foram avaliados os parâmetros de soldagem, a saber, corrente, tensão, velocidade e energia de soldagem e os parâmetros de fluido, a saber, pressão e vazão. A Figura 4.5 mostra como foram depositados os cordões de solda sobre o tubo.

Depois de efetuados os cordões de solda sobre a tubulação, estes foram limpos com escova rotativa e inspecionados visualmente quanto ao acabamento superficial.

Os corpos de prova foram seccionados na direção transversal ao cordão de solda como mostra a Figura 4.6. Foram embutidos, lixados e polidos, com posterior ataque de reagente nital 3% por um tempo de 10 a 20 segundos. Depois de efetuada esta preparação metalográfica, os corpos de prova foram fotografados usando uma câmera digital com lente macro. As imagens obtidas foram inseridas num programa de imagem (*ImageTool*), para a medição das dimensões do cordão e da zona afetada pelo calor (ZAC), como é mostrado esquematicamente na Figura 4.7.

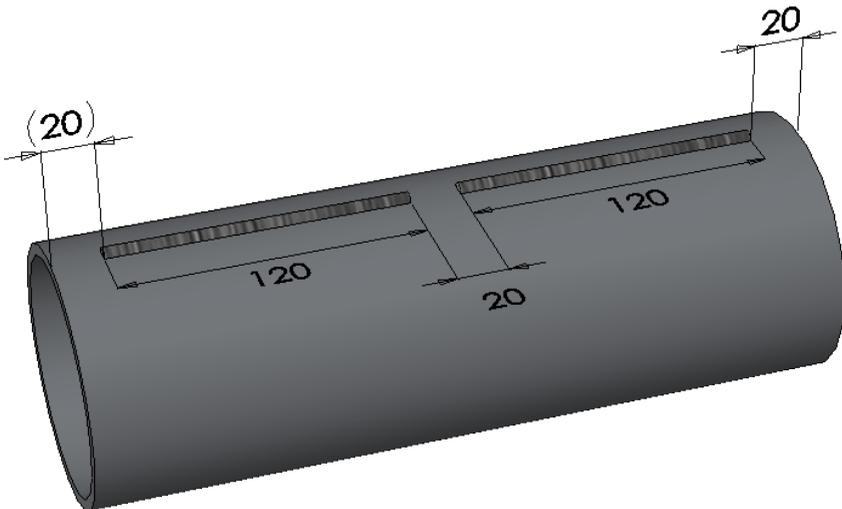


Figura 4.5 - Localizações dos cordões de solda sobre o tubo.



Figura 4.6 – Corpos de prova para análises.

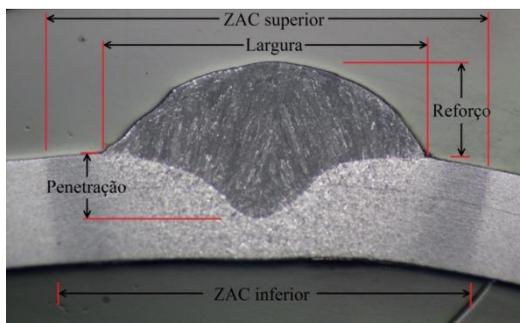


Figura 4.7 – Foto mostrando como medir as dimensões do cordão e da ZAC.



Figura 4.8 – Detalhes da solda de topo com chanfro em V com três cordões (calha com tubo).

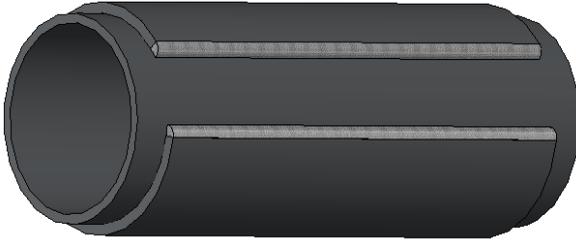


Figura 4.9 – detalhe da solda em ângulo com um filete (calha com tubo).

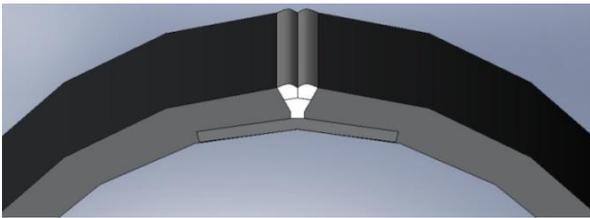


Figura 4.10 - Desenho mostrando a calha após a soldagem com o tubo e antes da planificação.

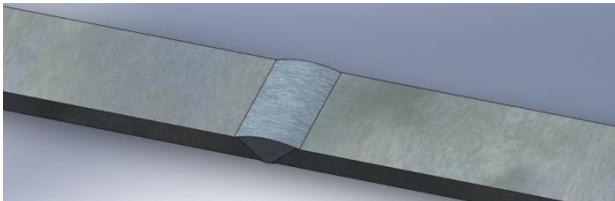


Figura 4.11 - Corpo de prova para ensaio de tração (API 1104).

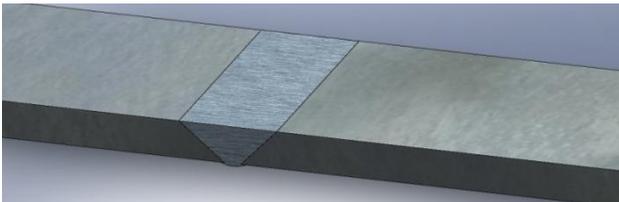


Figura 4.12 - Corpo de prova para ensaio de dobramento face (API 1104).

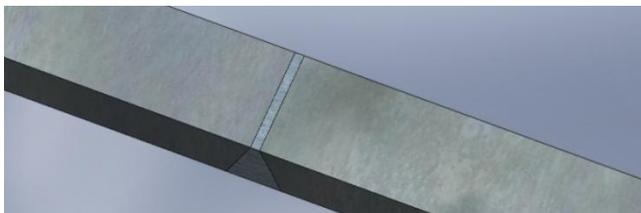


Figura 4.13 - Corpo de prova para ensaio de dobramento raiz (API 1104).

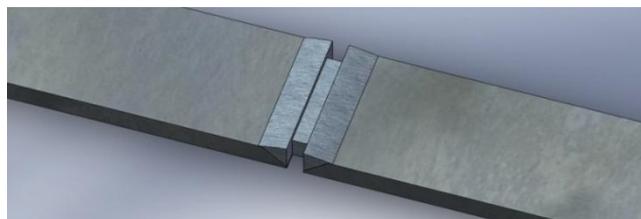


Figura 4.14 - Corpo de prova para ensaio de fratura (*Nick-Break*) (API 1104).

### 4.3 Bancada de teste

Para a realização desta pesquisa foi projetada e construída uma bancada para teste com os seguintes equipamentos (Figura 4.15):

- 1 - Bomba hidráulica centrífuga com três estágios com capacidade: na vazão de 80 l/min. pressão máxima de 2 bar, na vazão até 40 l/min. pressão máxima de 5 bar (fluido água);
- 2 - Motor elétrico trifásico com 4 CV 2 pólos (3400 rpm);
- 3 - Reservatório capacidade de 60 litros em aço inoxidável (AISI 304) com chicanas para evitar turbulência do fluido;
- 4 - Rotâmetro Modelo AP-4000, Fluido água, que permite medir vazões entre 8,5 a 80 l/min. com subdivisões de 1 l/min., Pressão de 3 bar, pode operar a uma temperatura de até 60°C;
- 5 - Manômetro marca WIKA na escala de 0 a 7 bar com subdivisões de 0,1 bar;
- 6 - Termômetro marca ICEL com temperatura na escala de -5 a 950°C;
- 7 - Conjuntos de válvulas de esferas e tubulações rígidas e flexíveis para a interligação dos componentes;
- 8 - Flanges e acessórios para a fixação dos tubos a serem soldados;
- 9 - Mesa e suporte para tubos e acessórios.



Figura 4.15 – Bancada de teste.

## 4.4 Equipamentos para soldagem

### 4.4.1 Fonte (maquina de solda)

A fonte utilizada para a execução da soldagem foi a DIGITEC 450 microcontrolada (Figura 4.16), cuja operação pode ser realizada de forma remota através do painel de controle. Possuindo corrente nominal com capacidade de 280 A para um fator de trabalho de 100% do ciclo, sendo que a capacidade de corrente máxima é de 450 A, trabalhando com corrente contínua constante ou pulsada.



Figura 4.16 - Fonte de soldagem DIGITEC 450.

#### 4.4.2 Sistema de deslocamento da tocha

A Figura 4.17 mostra o sistema de deslocamento automático de tocha, modelo IMC Tartilope V1, que permite a realização de soldas e cortes em qualquer posição. A faixa de velocidade de deslocamento varia de 5 a 160 cm/min., com resolução de 0,2 cm/min.



Figura 4.17 - Sistema de deslocamento da tocha.

#### 4.4.3 Sistema de aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados de soldagem (SAP), desenvolvida pela IMC Soldagem, é um equipamento para análise e monitoração de processos de soldagem. O sistema tem capacidade de apresentar na tela do microcomputador, em forma dinâmica, todas as variáveis de soldagem, bem como os respectivos valores médios e eficazes (Figura 4.18).



Figura 4.18- Sistema de aquisição portátil de dados de soldagem (SAP).

#### 4.5 Planejamento experimental

A metodologia adotada nesse trabalho consistiu em três etapas principais, a saber, avaliação de trincas a frio induzidas por hidrogênio, avaliação da penetração através da técnica de simples deposição de cordões e qualificação de procedimento de soldagem com a técnica da dupla calha, conforme pode ser observado no fluxograma das etapas para a realização da pesquisa (Figura 4.19).

Inicialmente foi executada a soldagem com a técnica de simples deposição de cordões sobre tubos e soldagem com a técnica de dupla calha. Posteriormente foram qualificados os procedimentos de soldagem de reparo de dutos em operação. Para a soldagem com a técnica de simples deposição de cordões foram escolhidos tubos e chapas nas espessuras de 3,0, 3,2 e 4,8 mm. Já para a soldagem com a técnica de dupla calha foram utilizados tubos de espessura de 4,8 mm. A escolha das espessuras foi de acordo com o projeto de pesquisa apoiado pelo CNPq com o título mencionado no capítulo 1 (introdução). Estas espessuras reduzidas foram obtidas através do rebaixamento por usinagem de dutos originalmente com espessura de 6,2 mm.

#### 4.6 Avaliação das condições que podem ocorrer trincas a frio (hidrogênio).

Para esta etapa foram executados dois conjuntos de experimentos distintos, denominados de “F” e “R”.

**Experimento “F”:** em função da folga e do alto carbono equivalente. Antes da montagem da bancada de testes foram executadas soldagens nas condições mais críticas, objetivando o surgimento de trincas.

Para esta avaliação foram executadas duas soldas manuais com o processo eletrodo revestidos em condições distintas, a saber, junta C com pré-aquecimento de 180°C e ressecagem do eletrodo e junta D sem pré-aquecimento e sem ressecagem do eletrodo (Figura 4.1). As variáveis de soldagem foram as mesmas para as duas juntas: passe único; corrente de 150A; tensão de 27 V; velocidade de soldagem 18,0 cm/min. e energia de soldagem de 13,5 kJ/cm. Desta forma foram realizados os experimentos nas condições:

a) utilizado-se de materiais de alta resistência e com alto carbono equivalente (Figura 4.3 e Figura 4.4);

b) aplicando-se a técnica de soldagem em calha com tubo, particularmente para o passe de raiz;

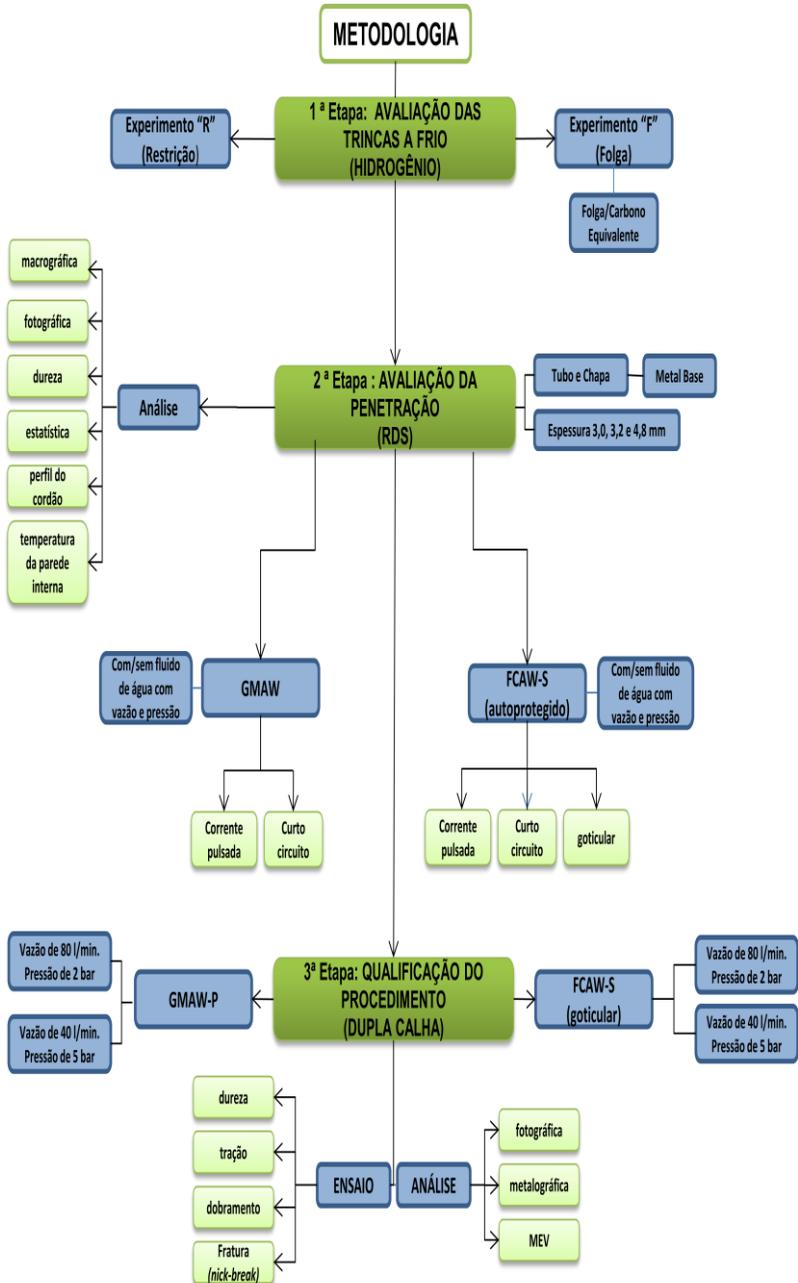


Figura 4.19 - Fluxograma das etapas para a realização do trabalho.

c) verificando-se a influência da folga (*gap*) maior que 5,0 mm (Figura 4.2), como pode ocorrer ao instalar-se calha em dutos que apresente ovalização.

**Experimento “R”:** em função da restrição imposta à junta soldada foram executadas soldagens com restrição, em tubos e calhas API 5L X70 nas seguintes condições (Figura 4.4):

a) Processo GMAW com corrente pulsada, técnica empurrando (junta A e B),  $I_m = 180A$ ;  $U_m = 25,3 V$ ;  $V_s = 25 \text{ cm/min.}$ ;  $E_s = 10,9 \text{ kJ/cm}$ ; com água na vazão de 80l e pressão de 2 bar.

b) Processo FCAW-S transferência goticular e tocha reta (junta A1 e B1),  $I_m = 170A$ ;  $U_m = 22,3 V$ ;  $V_s = 25 \text{ cm/min.}$ ;  $E_s = 9,1 \text{ kJ/cm}$ ; com água na vazão de 80l e pressão de 2 bar.

Após a execução da soldagem da junta de filete da calha com o tubo (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**), foi realizado ensaio não estrutivo por líquido penetrante e posteriormente retiradas três seções (Figura 4.3) para o mesmo filete de solda, nas quais foram feitas as análises macrográfica, de dureza e fotográfica.

#### 4.7 Avaliação das condições em que ocorre a perfuração.

Foram pesquisados os parâmetros de soldagem limite para que ocorra a perfuração (Figura 4.19), para cada tipo processo, em função das condições obtidas de vazão e de pressão.

Para a realização da soldagem (conforme indicado na **Erro! Fonte e referência não encontrada.**) foram usados dois processos: GMAW em corrente pulsada e curto circuito; FCAW autoprottegido na forma goticular, curto circuito e pulsado.

Para os experimentos foram utilizados tubos com costura no diâmetro de 4 ½” nas seguintes especificações: ASTM A53 Tipo E Grau A, ASTM A 106 Grau B e API 5L X70 e chapa SAE 1020, com espessuras de 3,0 e 3,2 mm.

Os ensaios foram realizados em tubos contendo somente ar e também, com fluxo de água e pressão. Também foram executadas soldagem de cordões sobre chapa.

Após o término do cordão de solda sobre o tubo (Figura 4.5) foram retiradas duas seções (Figura 4.6) para o mesmo cordão, nas quais foram realizadas as análises macrográfica, fotográfica, de medição do perfil do cordão (penetração, reforço e largura), de medição da ZAC (Figura 4.7), estimativa da temperatura na parede interna do tubo usando a solução analítica de Santos (SANTOS, 2001) e estatística através do

programa *Minitab* para verificar a tendência da penetração em função da corrente ( $I_m$ ) e velocidade ( $V_s$ ) de soldagem.

#### **4.8 Qualificação de procedimento de soldagem (dupla calha) de acordo com o apêndice B da norma API 1104.**

Com os valores obtidos nos experimentos das etapas anteriores, foram qualificados oito procedimentos de soldagem (Figura 4.19) de reparo de dutos em operação. Nas qualificações foram seguidos os critérios prescritos no apêndice B da norma API 1104 (ver item 3.7), ou seja, uma junta de topo para emenda das calhas (ver Figura 4.8) e duas junta de filete para emenda da calha com tubo (Figura 4.9).

Porém, foram utilizadas durante a soldagem das calhas com tubos, água com pressão (2 e 5 bar) e vazão (40 e 80 l/min.), de forma que as condições fossem as mais próximas dos reparos de dutos em operação com circulação de fluido interno.

Na execução da soldagem foram usados os seguintes metais de adição: ER 80S-G (GMAW) e E 71T-11 (FCAW-S) e como metal de base o tubo API 5L X70. As condições e os parâmetros escolhidos para as qualificações dos procedimentos de calha com dutos foram:

##### **a) Processo GMAW pulsado com tocha empurrando**

**Procedimento 1** – Vazão de 80 l/min. e pressão de 2 bar; junta de topo com chanfro em V com três cordões de solda (Figura 4.8 e Figura 4.10); variáveis de soldagem:  $I_m = 160$  A;  $U_m = 26$  V;  $V_s = 30$  cm/min.;  $E = 9,1$  kJ/cm.

**Procedimento 2** – Vazão de 40 l/min. e pressão de 5 bar; junta de topo com chanfro em V com três cordões de solda; variáveis de soldagem:  $I_m = 160$  A;  $U_m = 25$  V;  $V_s = 30,0$  cm/min.;  $E = 8,9$  kJ/cm.

**Procedimento 3** – Vazão de 80 l/min. e pressão de 2 bar; junta de ângulo com um filete de solda (Figura 4.9); variáveis de soldagem:  $I_m = 180$  A;  $U_m = 25$  V;  $V_s = 25$  cm/min.;  $E = 11,7$  kJ/cm.

**Procedimento 4** – Vazão 40 de l/min. e pressão de 5 bar; junta de ângulo com um filete de solda; variáveis de soldagem:  $I_m = 180$  A;  $U_m = 26$  V;  $V_s = 25$  cm/min.;  $E = 12,1$  kJ/cm.

##### **b) Processo FCAW-S com transferência goticular e tocha reta**

**Procedimento 5** – Vazão 80 de l/min. e pressão de 2 bar; junta de topo com chanfro em V com três cordões de solda; variáveis de soldagem:  $I_m = 160$  A;  $U_m = 20$  V;  $V_s = 25$  cm/min.;  $E = 7,7$  kJ/cm.

**Procedimento 6** – Vazão de 40 l/min. e pressão de 5 bar; junta de topo com chanfro em V com três cordões de solda; variáveis de soldagem:  $I_m = 160$  A;  $U_m = 20$  V;  $V_s = 25$  cm/min.;  $E = 7,6$  kJ/cm.

**Procedimento 7** – Vazão de 80 l/min. e pressão de 2 bar; junta de ângulo com um filete de solda; variáveis de soldagem:  $I_m = 175$  A;  $U_m = 21$  V;  $V_s = 25$  cm/min.;  $E = 8,8$  kJ/cm.

**Procedimento 8** – Vazão de 40 l/min. e pressão de 5 bar; junta de ângulo com um filete de solda; variáveis de soldagem:  $I_m = 185$  A;  $U_m = 21$  V;  $V_s = 25$  cm/min.;  $E = 9,2$  kJ/cm.

Após a execução da soldagem a calha foi retirada do tubo, como observado na Figura 4.10. Esta calha foi planificada em uma prensa, de onde posteriormente foram retirados os corpos de prova (Figura 4.11 a Figura 4.14) através de usinagem para a execução dos seguintes ensaios e análises:

- a) fotográfica;
- b) metalografia (macrografia e micrografia);
- c) medição de dureza;
- d) ensaio de tração (Figura 4.11),
- e) ensaio de dobramento (Figura 4.12 face, Figura 4.13 raiz);
- f) ensaio de fratura (*Nick-break*) (Figura 4.14).

Os corpos de prova foram codificados segundo as condições em que foi realizada a soldagem, a saber, vazão, pressão e processo de soldagem. As condições nas quais ocorreu a soldagem são mostradas na Tabela 4.8 e numerada da seguinte forma

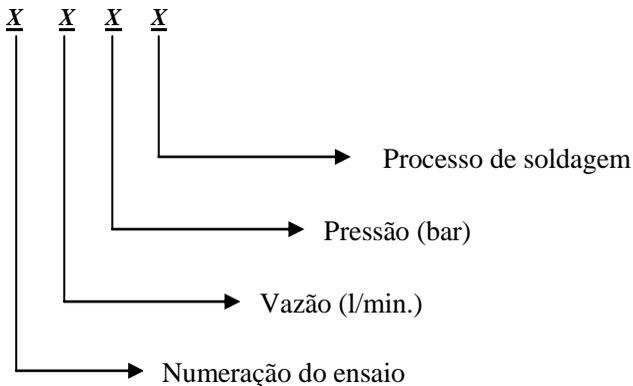


Tabela 4.8 - Codificação dos ensaios realizados.

<b>Código</b>	<b>Designação</b>	<b>Fluído</b>	<b>Pressão</b>	<b>Vazão</b>
<b>2</b>	Vazão	água	X	20 l/min.
<b>4</b>	Vazão	água	X	40 l/min.
<b>8</b>	Vazão	água	X	80 l/min.
<b>2</b>	Pressão	água	2 bar	X
<b>5</b>	Pressão	água	5 bar	X
<b>0</b>	Vazão	água	X	0
<b>0</b>	Pressão	água	0	X

Observações:

G – Processo de soldagem GMAW: seguido da letra de “G” para a soldagem de topo e seguido da letra “F” para a soldagem de filete;

F – Processo de soldagem FCAW: seguido da letra de “G” para a soldagem de topo e seguido da letra “F” para a soldagem de filete;

Letra “G” ou “F” sozinha refere-se a soldagem com simples deposição sobre o tubo.

Como exemplo: **3 8 2 G F** – Terceiro ensaio na vazão de 80 l/min. com pressão de 2 bar, soldagem com o processo GMAW e solda de filete (ângulo).

## 5.1 Medição de dureza

Foram levantados os perfis de dureza nas soldas de filete (junta de ângulo) para todas as soldas de calha e tubo conforme foto ilustrativa mostrada na Figura 4.20. Para este levantamento foi utilizado um micro durômetro da marca SHIMADZU modelo HMV - 2000, os valores de dureza foram medidos na escala Vickers com carga aplicada de 300 gramas e tempo de aplicação de 15 segundos, sendo que a distância entre os pontos medidos foi de 200µm. As medições de micro dureza Vickers foram efetuadas de acordo com a norma ASTM E 384 – 73.

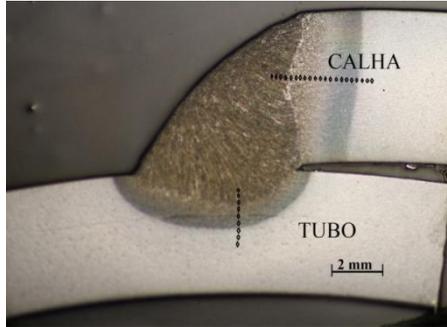


Figura 4.20 - Foto ilustrativa mostrando os locais das medições de micro dureza.

## 5.2 Aplicativo Computacional

O programa de computador utilizado no atual trabalho foi uma versão atualizada daquele desenvolvido por Santos (SANTOS, 2001), adaptada para determinar a temperatura interna da parede da tubulação através da solução analítica para a transferência de calor na soldagem. O mesmo foi concebido com o fim de estimar a condução de calor que ocorre durante a soldagem a arco voltaico, a qual é de caráter tridimensional e de regime transiente. A solução analítica de Santos tem em consideração os efeitos da espessura do material, o calor que ele recebe do arco e as perdas que ele sofre por processos de troca de calor com o ambiente (descritas através dos coeficientes de transferência de calor por convecção).

A sua aplicação foi feita da seguinte forma:

1. Em primeiro lugar, os parâmetros de eficiência térmica ( $\eta_i$ ) e de distribuição do fluxo de calor ( $\sigma$ ) foram estimados a partir de coordenadas de pontos de temperatura conhecida (linha de transformação  $A_{c1}$ ), identificados em macrografias de seção transversal ao cordão de solda. Na Figura 4.21 são apresentados desenhos esquemáticos das seções transversais à solda e as dimensões que foram levadas em consideração para determinar os parâmetros da fonte ( $\eta_i$ ,  $\sigma$ ).

Nesta primeira etapa foram introduzidos os parâmetros de soldagem (corrente, tensão, e velocidade de soldagem), da mesma forma que as medições geométricas extraídas da macrografias dos corpos de prova, espessura da chapa e propriedades termofísicas do metal de base como a condutividade e difusividade térmica, a temperatura inicial da chapa e os coeficientes de transferência de calor por convecção nas duas

superfícies (superfície externa, atingida pelo arco e a oposta, superfície interna da tubulação).

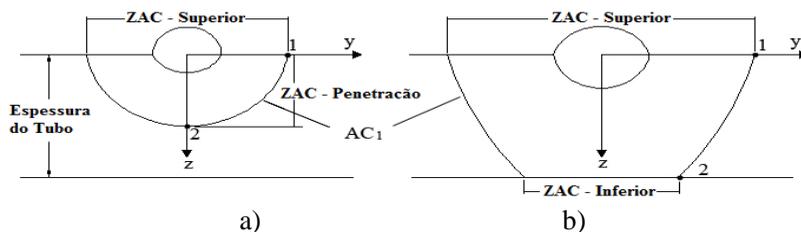


Figura 4.21 - Pontos de coordenadas  $(y_1, z_1)$  e  $(y_2, z_2)$  usados no programa de Santos para determinar os parâmetros fonte. a) penetração da ZAC < espessura; b) penetração da ZAC > espessura.

2. Depois foi determinado o campo de temperaturas de pico no plano transversal ao cordão de solda, utilizando como dados as condições de soldagem, os parâmetros da fonte de calor (determinadas na etapa 1), propriedades termofísicas do material e os coeficientes de transferência de calor por convecção. Especificamente, do campo de temperaturas determinado, o que interessa é a temperatura máxima atingida na parede interna da tubulação no ponto de coordenadas  $Y = 0, Z = \text{espessura}$  (conforme os eixos mostrados na Figura 4.21).

## 6 RESULTADOS E DISCURSÕES

Primeiramente, são apresentados os resultados dos ensaios realizados para verificação de possíveis ocorrências de trincas a frio sob variação dos seguintes parâmetros: da folga entre a calha e o tubo; do carbono equivalente do metal de base e metal de adição; do nível de restrição entre a calha e tubo e, finalmente, da velocidade de resfriamento através da circulação de água no interior do tubo.

Na sequência são mostrados os resultados preliminares da soldagem sobre tubos, avaliando a penetração da solda em função dos parâmetros de soldagem com o processo GMAW-P com a tocha puxando ou empurrando.

Posteriormente, são expostos os resultados da perfuração em função dos processos e parâmetros de soldagem, vazão e pressão do fluido.

Finalmente, são mostrados os resultados para as qualificações dos procedimentos de soldagem, similares ao prescrito pela norma API 1104, em função do processo de soldagem, da pressão interna e da vazão do fluido.

### 6.1 Avaliação da ocorrência de trincas a frio.

#### 6.1.1 Efeito da folga entre a calha e tubo e do alto carbono equivalente.

Os resultados da soldagem mostraram que em condições distintas (item 4.6, experimento “F”), ou seja, com ou sem pré-aquecimento, com ou sem ressecagem dos consumíveis e sob diferentes energias de soldagem, não houve nenhuma ocorrência de trincas a frio.

Na Figura 5.1 observa-se o filete de soldagem denominado como junta C, onde tanto para calha como para o tubo foi empregado aço ASTM A 335 Grau P5 ( $CE_{IIW} = 1,31$  conforme Tabela 4.1). Para soldagem com eletrodos revestidos foi escolhido o metal de adição de baixo hidrogênio AWS E 8018 – B8 também com altíssimo carbono equivalente ( $CE_{IIW} = 2,1$  conforme Tabela 4.2).

Apesar do uso de materiais de alto carbono equivalente na soldagem, que contribuiu para o aumento na temperabilidade e, portanto, na dureza da região soldada do tubo, não foi constatada qualquer ocorrência de trinca a frio, mesmo realizando os ensaios por líquidos penetrantes (Figura 5.2) e macrográficos após 48 horas da soldagem (respeitando eventual “retardo” na ocorrência do fenômeno induzido pelo H).



Figura 5.1 - Junta de filete com eletrodo revestido na união calha/tubo: metal de base ASTM A 335 Grau P5 e metal de solda E 8018 – B8.



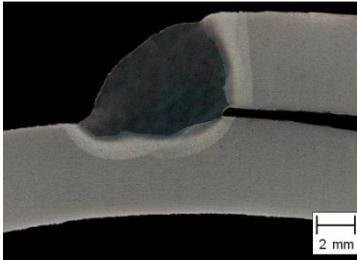
Figura 5.2 - Ensaio com líquido penetrante para a detecção de trinca superficial na união do calha/tubo: metal de base ASTM A 335 Grau P5 e metal de solda E 8018 – B8.

Os resultados mostraram que na soldagem de uma junta com folga de até 5,0 mm (Figura 5.1 e Figura 5.2) entre calha e tubo, a ausência de trinca nas condições de ensaio (Figura 5.3), o que se deve, provavelmente em função da baixa espessura (6,3 mm), ao fato do nível de tensão não ter sido suficientemente elevado para causar as trincas.

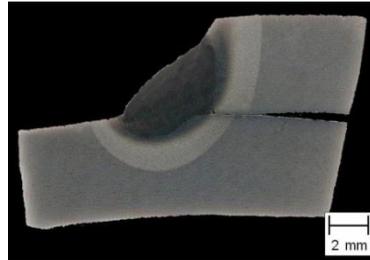
O experimento com folga excessiva calha-tubo e sua análise na pesquisa da soldagem de dutos em operação pela técnica da dupla calha foi motivado pela possibilidade de surgimento, quando na realização da solda em campo, de uma folga proveniente da ovalização do tubo (PAES et al, 2000).

No restante dessa pesquisa foram empregados tubos API 5L (X70) e metais de adição (ER 80S-G e E 71T-11) por apresentar

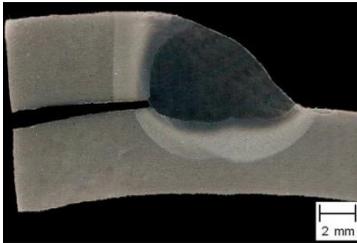
carbono equivalente mais baixo do que o pesquisado neste trabalho, fator favorável ao não surgimento de trincas. Portanto, isto contribui favoravelmente à segurança quando da realização da soldagem em operação de dutos.



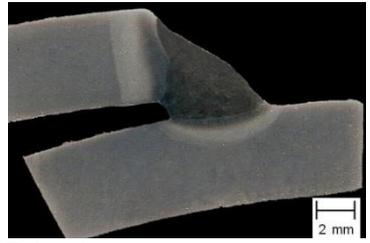
Folga 0,5 mm



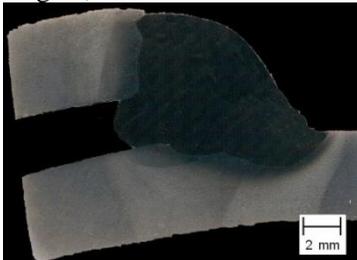
Folga 0,1 mm



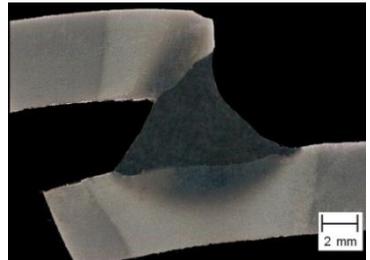
Folga 0,5 mm



Folga 1 mm



Folga 2 mm



Folga 3 mm

Figura 5.3 - Macrografia de soldas com folga variável entre calha e tubo (metal de base ASTM A 335 Grau P5 e metal de solda E 8018 – B8): à esquerda, com preaquecimento e ressecagem; à direita sem preaquecimento nem ressecagem.

### 6.1.2 Efeito da restrição imposta à junta soldada.

Com a finalidade de avaliar a ocorrência de trinca em condições mais próximas do real, para a soldagem de reparo com a técnica da

dupla calha em dutos operando com fluido interno e pressão, foi executada a soldagem de acordo com os processos e parâmetros descritos no item 4.6, experimento “R”, com a restrição imposta à junta. As Figura 5.4 e Figura 5.5 mostram os filetes de solda executados com os processos GMAW em corrente pulsada com a tocha empurrando a poça de fusão e FCAW-S com transferência goticular com a tocha reta, respectivamente. Visualmente não se observou a presença de trincas, e do mesmo, modo o ensaio não destrutivo por líquidos penetrantes nas juntas de filete da calha com o tubo (Figura 5.6) não detectou nenhum trincamento.



**Junta A**



**Junta B**

Figura 5.4 - Soldas de filete com o processo GMAW-P para avaliação da trinca na soldagem do tubo/calha com restrição.



**Junta A1**



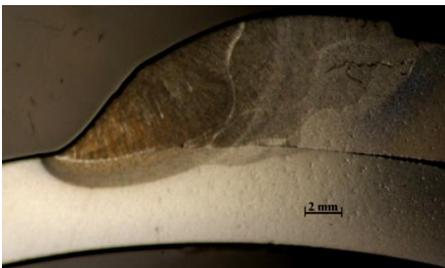
**Junta B1**

Figura 5.5 - Soldas de filete com o processo FCAW-S para avaliação da trinca na soldagem do tubo/calha com restrição.



Figura 5.6 – Foto do ensaio com líquido penetrante para a detecção de trinca superficial na soldagem da calha/tubo com restrição no metal de base API 5L (X70) e metal de adição (ER 80S-G).

A Figura 5.7 mostra as metalografias de uma amostra de cada junta soldada (A, B, A1 e B1). Também neste ensaio não foi observada a presença de trincas.



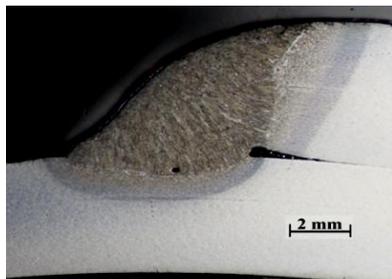
GMAW-P (junta A)



GMAW-P (junta B)



FCAW-S (junta A1)



FCAW-S (junta B1)

Figura 5.7 - Macrografias da solda com restrição entre calha e tubo

A Figura 5.8, obtida com o sistema de aquisição de dados de soldagem (SAP), mostra os oscilogramas de tensão e corrente do processo de soldagem GMAW em corrente pulsada. Ratifica-se que a transferência metálica foi realmente com corrente pulsada durante a soldagem das juntas A e B mostrada anteriormente.

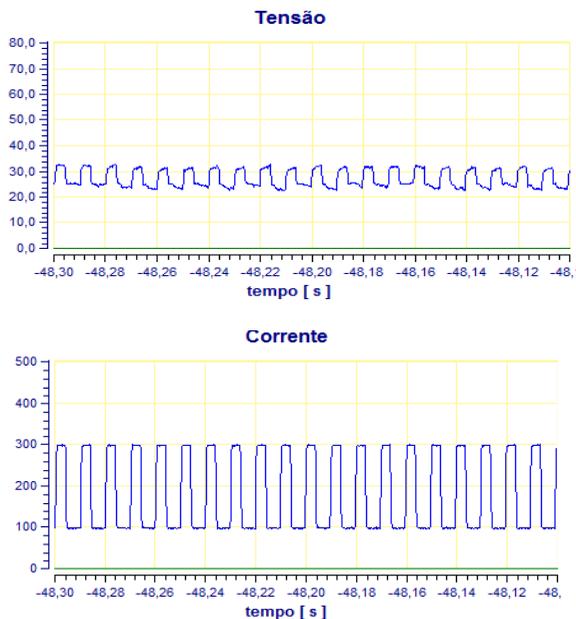


Figura 5.8 - Oscilograma de tensão e corrente para GMAW-P na soldagem do tubo/calha com restrição (corrente pulsada).

Da mesma maneira, a Figura 5.9 mostra os oscilogramas de tensão e corrente do processo de soldagem FCAW-S goticular. A transferência metálica, descrita na norma AWS A5.20 como goticular, corrobora com os oscilogramas observados na soldagem das juntas A1 e B1 (goticular / *spray*).

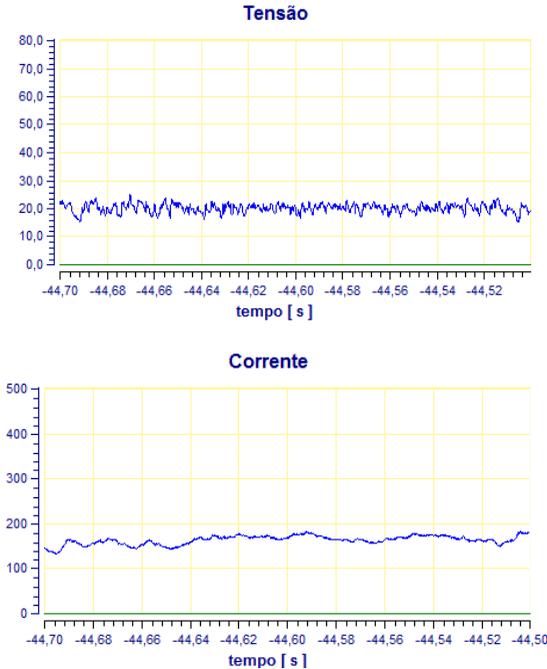


Figura 5.9 - Oscilograma de tensão e corrente para FCAW-S na soldagem do tubo/calha com restrição (goticular).

Os ensaios de dureza (Figura 5.10) mostram que a dureza na zona fundida com o processo FCAW-S foi discretamente maior do que no processo GMAW-P, em torno de 50 HV-0,3. Com relação à ZAC o comportamento da dureza não apresentou variação significativa entre um processo e o outro, como era de esperar.

Este comportamento corrobora com o apresentado pelos metais de adição. No processo GMAW-P utilizou-se do arame ER 80S-G com resistência mecânica mínima à tração do metal depositado de 80 ksi / 550 MPa. Já no processo FCAW-S empregou-se o arame eletrodo E 71T-11 com resistência mecânica mínima 490 a 670 MPa (620 MPa no certificado de qualidade), de acordo com a norma AWS D5.28 e D5.20, respectivamente. Portanto, o processo GMAW-P apresentou menor dureza na zona fundida com consumível de menor resistência mecânica em relação ao FCAW-S.

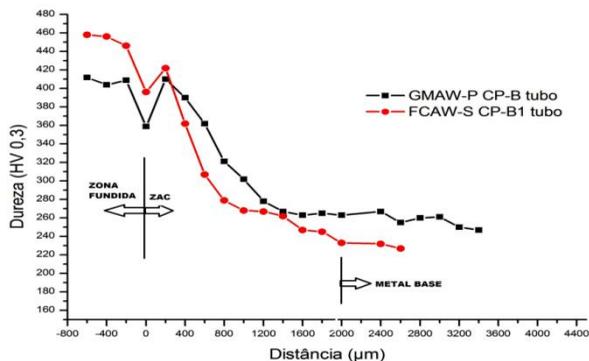


Figura 5.10 – Comparação do perfil de dureza entre tubos nos processos GMAW-P (CP-B) e FCAW-S (CP-B1).

Entre o tubo e a calha há uma tendência de maior dureza (60 HV 0,3) para o tubo na zona fundida e início da ZAC, como pode ser visto na Figura 5.11 (gráficos A e B).

O aumento da dureza nestas regiões deve ocorrer, provavelmente, como decorrência do contato direto do tubo com a água, tendo como consequência uma maior taxa de resfriamento na região de contato. Mesmo com essa condição desfavorável (maior dureza) não se observou a presença da trinca a frio.

Os perfis de dureza obtidos e comparados, tanto para tubo, como para calha, para todas as condições (CP- A, B, A1 e B1), são mostrados na Figura 5.12, gráfico C e gráfico D (calha e tubo respectivamente). Percebe-se que os perfis de dureza foram similares, com exceção do CP-A para calha que apresentou um comportamento diferente dos demais. Este comportamento divergente deve-se, provavelmente, ao fato de nesta junta soldada foram depositados três filetes de solda em relação aos demais, isto pode ser constatado claramente na Figura 5.7 GMAW-P (junta A).

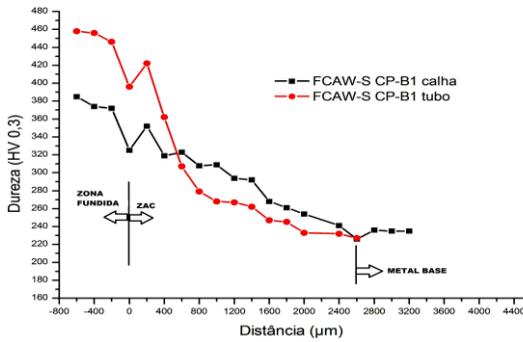
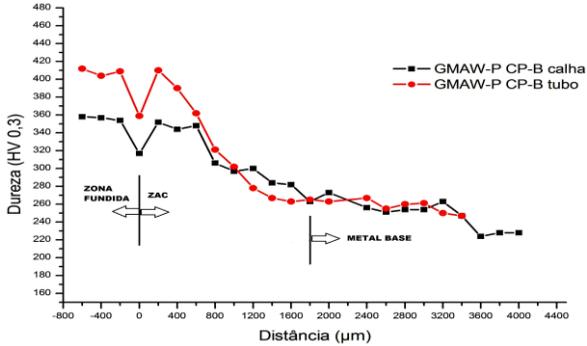


Figura 5.11 – Comparação do perfil de dureza entre tubos e calhas nos processos GMAW-P (CP-B) e FCAW-S (CP-B1).

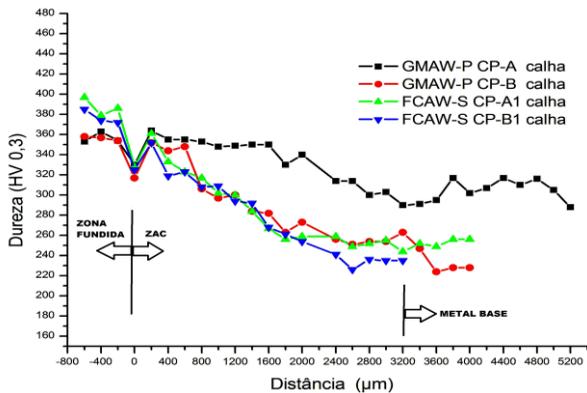


Gráfico C

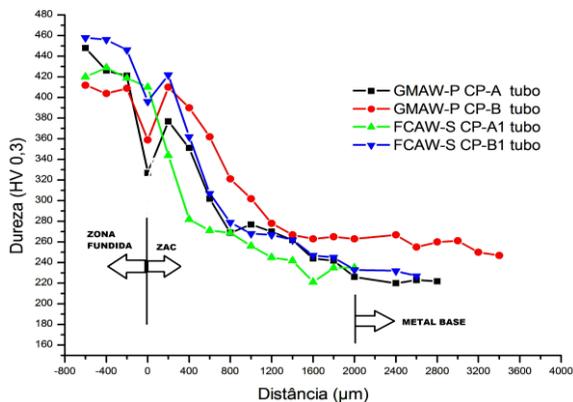


Gráfico D

Figura 5.12 - Comparação do perfil de dureza para calhas e para tubos nos processos GMAW-P (CP-A e B) e FCAW-S (CP-A1 e B1).

Finalizando esta etapa da pesquisa, constata-se que não ocorreram trincas a frio induzidas pelo hidrogênio, apesar das condições favoráveis criadas para a ocorrência das mesmas, com o uso de metais de base e adição de alto carbono equivalente, uma alta restrição da junta e uma elevada folga entre a calha e o tubo. Admite-se que este fato deve-se ao emprego de processos de soldagem e consumíveis com muito baixo teores de hidrogênio na solda ( $\leq 5$  ml/100g).

## 6.2 Avaliação das condições em que ocorre a perfuração

### 6.2.1 Avaliação da penetração da solda com o processo GMAW-P (em função da inclinação da tocha)

Antes do início dos experimentos referentes à soldagem pela técnica de reparo por deposição de solda (RDS), para determinação dos parâmetros para os quais ocorre a perfuração de tubos API com alta resistência e baixa espessura, foram executados ensaios preliminares para verificação da penetração do cordão de solda em função da inclinação da tocha para o processo de soldagem GMAW-P. Os resultados da penetração do cordão de solda com as técnicas puxando e empurrando, podem ser vistos nas Tabela 5.1 e Tabela 5.2, que também mostram os parâmetros de soldagem empregados.

Através da macrografia, como mostra a Figura 5.13, observa-se que os perfis dos cordões são distintos. Caso típico, pode-se citar o perfil do cordão da foto A (empurrando), que apresenta menor penetração, maior largura e menor reforço em função deste possuir melhor molhabilidade em relação ao da foto B (puxando).

Na técnica de soldagem com a tocha empurrando a poça de fusão ocorre maior sobreposição da poça e, portanto, diminui a penetração do cordão de solda.

Tabela 5.1 – Parâmetros de soldagem e perfis dos cordões de solda com processo GMAW-P e técnica empurrando.

Amostra	Corrente (A)	Tensão (V)	Velocid. Soldagem (cm/min)	Energia Soldagem (kJ/cm)	Penetração (mm)	Reforço (mm)	Largura (mm)
1E	75	23,7	25	4,27	1,02	1,98	6,61
2E	75	24,5	18	6,12	1,47	2,6	8,22
3E	110	27,3	25	7,21	1,79	2,15	9,44
4E	100	27,4	20	8,23	2,05	2,26	9,78
5E	50	20,9	30	2,09	0,28	1,7	3,94
6E	75	22,7	32	3,19	1,07	1,85	5,99
7E	75	23,8	25	4,27	0,94	1,94	6,86
8E	75	23,8	25	4,27	1,13	2,02	6,61
9E	75	23,4	25	4,21	0,98	1,92	6,58
10E	50	19,8	20	2,97	0,64	2,30	4,90
11E	100	26,6	30	5,32	1,32	2,05	7,82
12E	40	21,4	25	2,05	0,23	1,75	3,54
13E	75	24,1	25	4,34	0,83	1,98	6,69

Tabela 5.2 – Parâmetros de soldagem e perfis dos cordões de solda com processo GMAW-P e técnica puxando

Amostra	Corrente (A)	Tensão (V)	Velocid. Soldagem (cm/min)	Energia Soldagem (kJ/cm)	Penetração (mm)	Reforço (mm)	Largura (mm)
1P	75	23,3	25	4,20	1,85	2,62	6,16
2P	75	23,2	18	5,80	2,66	2,94	7,95
3P	110	26,6	25	7,03	Perfurou		
4P	100	26,5	20	7,96	Perfurou		
5P	50	20,9	30	2,09	0,66	2,32	3,31
6P	75	23,4	32	3,29	1,32	2,54	6,36
7P	75	23,5	25	4,24	1,17	2,58	6,36
8P	75	23,0	25	4,15	1,45	2,47	6,41
9P	75	23,3	25	4,20	1,47	2,64	7,05
10P	50	20,5	20	3,03	0,89	2,73	4,62
11P	100	26,2	30	5,24	1,60	2,51	8,35
12P	40	22,4	25	2,15	0,55	2,77	2,81
13P	75	22,8	25	4,11	1,62	2,37	6,48



Foto A ( $I_m = 75A$ ;  $V_s = 25 \text{ cm/min.}$ ;  $E_s = 4,2 \text{ kJ/cm}$ ;  $P = 1,0 \text{ mm}$ )

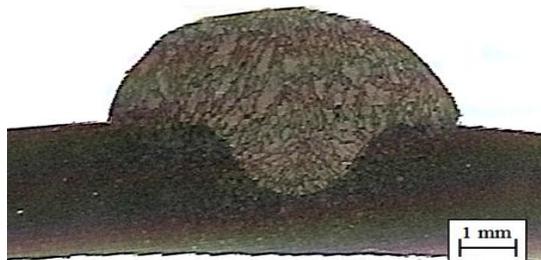


Foto B ( $I_m = 75A$ ;  $V_s = 25 \text{ cm/min.}$ ;  $E_s = 4,2 \text{ kJ/cm}$ ;  $P = 1,8 \text{ mm}$ )

Figura 5.13 – Macrografia com os mesmos parâmetros de soldagem  
Foto A – técnica empurrando      Foto B – técnica puxando

O gráfico da Figura 5.14 mostra o efeito da corrente sobre a penetração com a tocha puxando e empurrando para uma velocidade de soldagem de 25 cm/min. Este foi obtido através das equações 5.1 e 5.2 (regressão linear múltipla), onde foi fixada a velocidade de soldagem em 25 cm/min., variando a corrente de 40 a 120 A obtendo a penetração desejada. O resultado mostra que com a tocha empurrando a poça de fusão, mantidas todas as outras variáveis de soldagem fixas, a penetração do cordão de solda foi menor. Esta condição é propícia para a soldagem de reparo de dutos em operação com menor espessura, para minimizar o efeito do furo. Este fato ocorre, provavelmente, devido ao efeito da maior parte do arco incidir em cima das gotas provenientes do metal de adição, reduzindo desta maneira a penetração. Por outro lado, com a tocha puxando a poça de fusão, o arco incide em maior proporção no metal base, aumentando-se, desta forma, a penetração.

Este comportamento de aumentar ou reduzir a penetração em função de empurrar ou puxar a tocha para o processo de soldagem GMAW já foi comprovado por vários pesquisadores, de forma mais recente está ilustrada na Figura 3.37 (SCOTTI, 2008). Desta forma, a partir desta comprovação, o restante da pesquisa foi realizado, quando da utilização do processo de soldagem GMAW-P, com a “tocha empurrando” a poça de fusão.

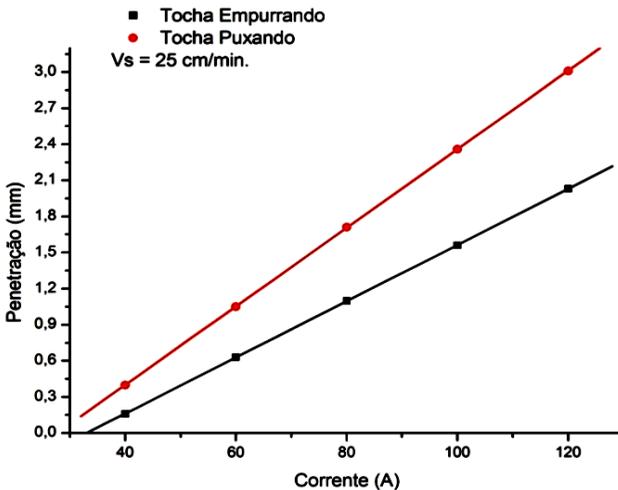


Figura 5.14 - Gráfico do efeito da corrente sobre a penetração para velocidade de soldagem 25 cm/min., obtido pela regressão linear com dados equações 5.1 e 5.2.

Em complementação os dados foram processados estatisticamente feitos através do programa *Minitab*, para verificar o comportamento da penetração do cordão de solda em função da corrente e da velocidade de soldagem, tanto para a tocha empurrando como para a tocha puxando. As equações abaixo, penetração (P) do cordão de solda, em função da Corrente ( $I_m$ ) e velocidade de soldagem ( $V_s$ ), foram obtidas através de regressão linear múltipla pelo método da superfície de resposta.

#### **Empurrando a poça de fusão:**

$$P = 2,07 + 0,0422(I_m) - 0,242 (V_s) - 3,000E-06(I_m)^2 + 0,00513(V_s)^2 - 0,00074(I_m*V_s). \quad (\text{Eq. 5.1})$$

#### **Puxando a poça de fusão:**

$$P = 1,11060 + 0,0802141(I_m) - 0,218126(V_s) + 7,24000E-05(I_m)^2 + 0,00611000(V_s)^2 - 0,00234000(I_m*V_s). \quad (\text{Eq. 5.2})$$

A Figura 5.15 mostra o gráfico da correlação ( $R^2$ ) entre os valores ajustados e medidos da penetração do arco para a tocha empurrando a poça de fusão. O modelo estatístico tornou-se adequado com R-Sq(adj) de aproximadamente 95%.

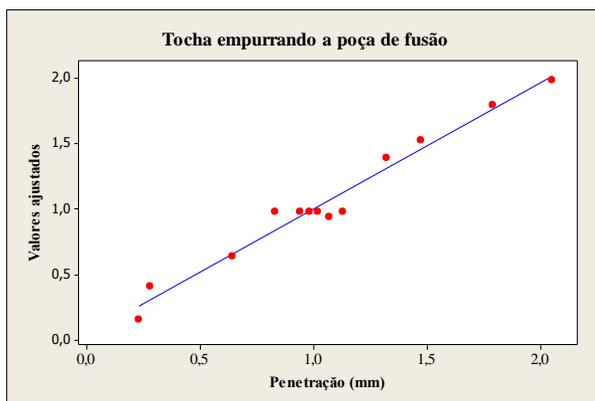


Figura 5.15 - Gráfico da correlação dos valores de penetração para a tocha empurrando a poça de fusão.

Analisando o gráfico da superfície de resposta da Figura 5.16, empurrando a poça de fusão, podem-se retirar as seguintes informações:

- Para todos os níveis de velocidades de soldagem, a penetração aumenta com o aumento da corrente. Esta constatação é mais evidente para baixa velocidade de soldagem.

- Para o intervalo pesquisado de velocidade de soldagem entre 20 a 30 cm/min. e de corrente entre 50 a 100 A, a penetração diminui com aumento da velocidade de soldagem. Este fato é mais claro para maiores correntes de soldagem (100 A). Por outro lado, para baixas correntes (50 A), o aumento da velocidade não reduz significativamente a penetração.

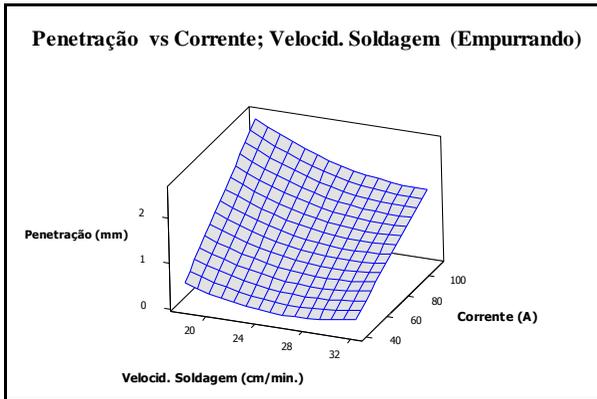


Figura 5.16 - Gráfico da superfície de resposta da penetração versus corrente e velocidade de soldagem com a tocha empurrando

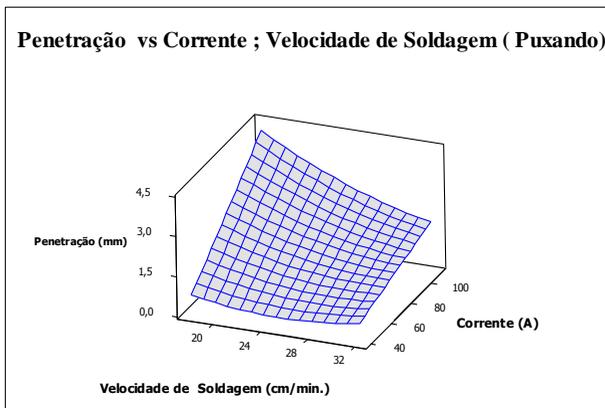


Figura 5.17 - Gráfico da superfície de resposta da penetração versus corrente e velocidade de soldagem com a tocha puxando.

Observando os gráficos da superfície de resposta (Figura 5.16 e Figura 5.17) juntos, para uma mesma velocidade de soldagem, a penetração do cordão de solda foi maior usando a técnica da tocha puxando a poça de fusão.

### **6.2.2 Avaliação da penetração em função da espessura e do processo de soldagem.**

Foram executados numerosos ensaios para determinação dos parâmetros críticos de soldagem (corrente média e energia de soldagem), em função do processo e da transferência metálica, para os quais ocorre a perfuração (furo). Para este estudo foram utilizados tubos e chapas nas espessuras de 3,0 a 4,8 mm. A sequência de apresentação dos resultados está de acordo com o processo de soldagem escolhido e da espessura crescente.

Todos os resultados experimentais estão nos apêndices A até Z, e incluem as condições de soldagem (tipo de processo, dimensões do tubo, tipos de consumíveis, etc.) e os valores medidos ou calculados (penetração, energia de soldagem e temperatura interna do tubo).

Nas análises que estão a seguir são descritas apenas os resultados que são pertinentes.

#### **6.2.2.1 Soldagem GMAW-P, tubo 4" e cordão sobre chapa, espessura 3,0 mm, velocidade soldagem de 30 cm/min.**

Dos apêndices A até F são apresentados aqui os valores de corrente e energia de soldagem para os quais ocorreu a perfuração.

Neste trabalho considerou-se a perfuração quando ocorreu o furo no material, entende-se que pode ocorrer a perfuração sem furar (este assunto será apresentado e discutido no item 5.2.3).

A Tabela 5.3 mostra os valores de corrente média ( $I_m$ ) e eficaz ( $I_{ef}$ ) e energia de soldagem ( $E_s$ ) em função das condições de vazão e de pressão, acima dos quais ocorreu o furo.

Tabela 5.3 - Valores de Im e Es para perfuração durante a soldagem com GMAW-P em tubo na espessura de 3,0 mm e Vs de 30 cm/min.

Condição: pressão e vazão	Im (A)	Ief (A)	Es (kJ/cm)
6 0 0	> 200	> 220	> 12,2
5 2 2	>190	>213	> 11,2
4 2 5	> 180	> 205	> 11,0
7 4 2	> 210	> 227	> 14,2
5 4 5	> 190	> 213	> 12,0
8 8 2	> 220	> 234	> 15,9

A pior condição encontrada para furar o tubo foi para 4 2 5, ou seja, na vazão de 20 l/min. e sob pressão de 5 bar, com Im acima de 180 A (Ief 205 A) e Es maior que 11,0 kJ/cm. Para a espessura de 3,0 mm considerada fina, os valores necessários de Im e Es para que ocorra a perfuração foram relativamente altas, em favor da segurança, característico do processo de soldagem GMAW-P com a tocha empurrando a poça de fusão. A literatura (BRUCE, 2000a) limita a energia de soldagem em 8,7 kJ/cm para evitar a perfuração ao soldar com eletrodos revestidos de baixo hidrogênio na espessura de 3,2 mm (Tabela 3.2).

Por outro lado, a melhor condição obtida foi para 8 8 2 sendo: 80 l/min. e 2 bar, esta situação foi mais favorável por apresentar maior vazão (melhor troca térmica) e menor pressão em relação a perfuração. Durante esta pesquisa empregando-se o processo de soldagem GMAW-P verificou-se uma variação nos valores de penetração, comportamento que pode ser observado através da Tabela 5.4 em função da corrente média.

A Figura 5.18 mostra o efeito da penetração do cordão de solda em função da média da corrente (resultado da média aritmética de quatro medições em conformidade com a Tabela 5.4). Observa-se que não houve variação da penetração entre Im de 100 A a 140 A, enquanto para valor abaixo desta faixa ocorreu uma redução da penetração. Contudo, para valores acima houve um aumento na penetração.

Tabela 5.4 - Soldagem GMAW – P, Gás de proteção: 92% Ar + 8% CO<sub>2</sub>, Metal de base: Chapa espessura 3,0 mm, Metal de Adição: ER 80S – G  $\phi$  1,2 mm.  
DBCP: 18,0 mm

Sequência Solda	Corrente (A)	Velocidade (cm/min)	Tensão (V)	Energia de Soldagem (kJ/cm)	Penetração (mm)
130 – A	81	30	21,7	4,56	1,23
130 - B	81	30	21,7	4,56	1,17
130 – C	81	30	21,7	4,56	1,12
130 - D	81	30	21,7	4,56	0,83
<b>MÉDIA</b>	<b>81</b>	<b>30</b>	<b>21,7</b>	<b>4,56</b>	<b>1,09</b>
230 – A	100,5	30	24,4	6,00	2,22
230 - B	100,5	30	24,4	6,00	1,74
230 – C	100,5	30	24,4	6,00	1,22
230 - D	100,5	30	24,4	6,00	2,47
<b>MÉDIA</b>	<b>10,5</b>	<b>30</b>	<b>24,4</b>	<b>6,00</b>	<b>1,91</b>
330 – A	120,2	30	26,4	7,46	1,42
330 - B	120,2	30	26,4	7,46	1,48
330 – C	120,2	30	26,4	7,46	1,97
330 - D	120,2	30	26,4	7,46	1,75
<b>MÉDIA</b>	<b>120,2</b>	<b>30</b>	<b>26,4</b>	<b>7,46</b>	<b>1,66</b>
430 – A	140,3	30	27,1	8,70	1,62
430 - B	140,3	30	27,1	8,70	1,97
430 – C	140,3	30	27,1	8,70	1,89
430 - D	140,3	30	27,1	8,70	2,12
<b>MÉDIA</b>	<b>140,3</b>	<b>30</b>	<b>27,1</b>	<b>8,70</b>	<b>1,90</b>
<b>5 3 0*</b>	<b>160</b>	<b>30</b>	<b>29,2</b>	<b>10,22</b>	

\*Furo

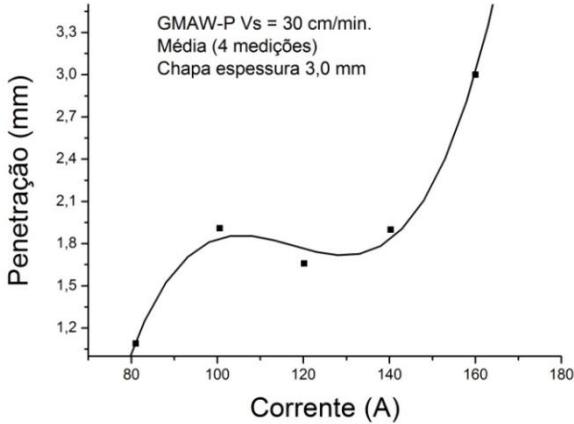


Figura 5.18- Gráfico mostrando o efeito da Im com GMAW-P na penetração do cordão para uma mesma Vs.

A Figura 5.19 mostra que para a Im de 81 a 140 A no intervalo de confiança de 95% a média (4 valores Tabela 5.4) da penetração do cordão de solda no processo GMAW-P pode-se considerar a mesma.

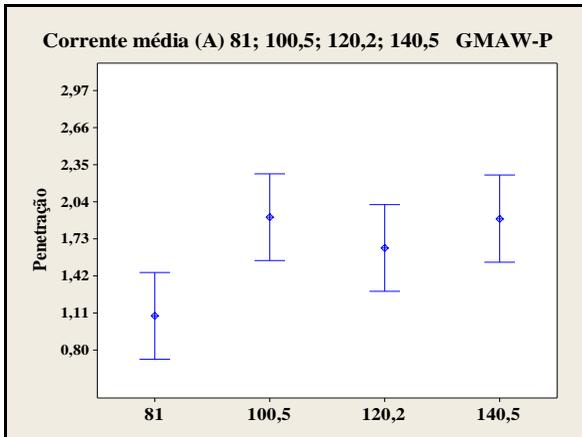


Figura 5.19 – Mostra o intervalo de confiança de 95% no processo GMAW-P

A Figura 5.20 mostra diferentes perfis de penetração com um único cordão de solda através do ensaio macrográfico. Para os mesmos parâmetros de soldagem, inclusive a mesma corrente (100,5 A), a penetração foi diferente na medida das quatro macros. A amostra 230 – C apresentou menor penetração (1,2 mm) em relação às outras.

Todavia, o valor médio destas medidas (1,9 mm) está de acordo com o esperado nesta condição de soldagem e dentro do intervalo de confiança de 95%.

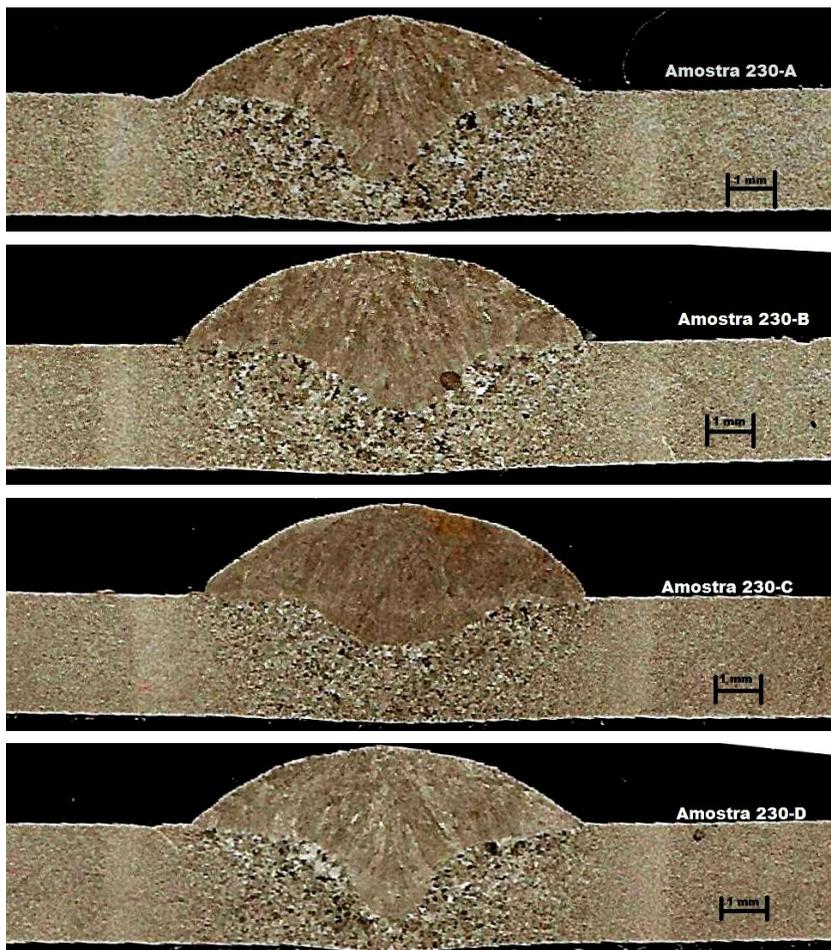


Figura 5.20 – Macrografia mostrando diferentes perfis de penetração com único cordão de solda depositado com GMAW-P.

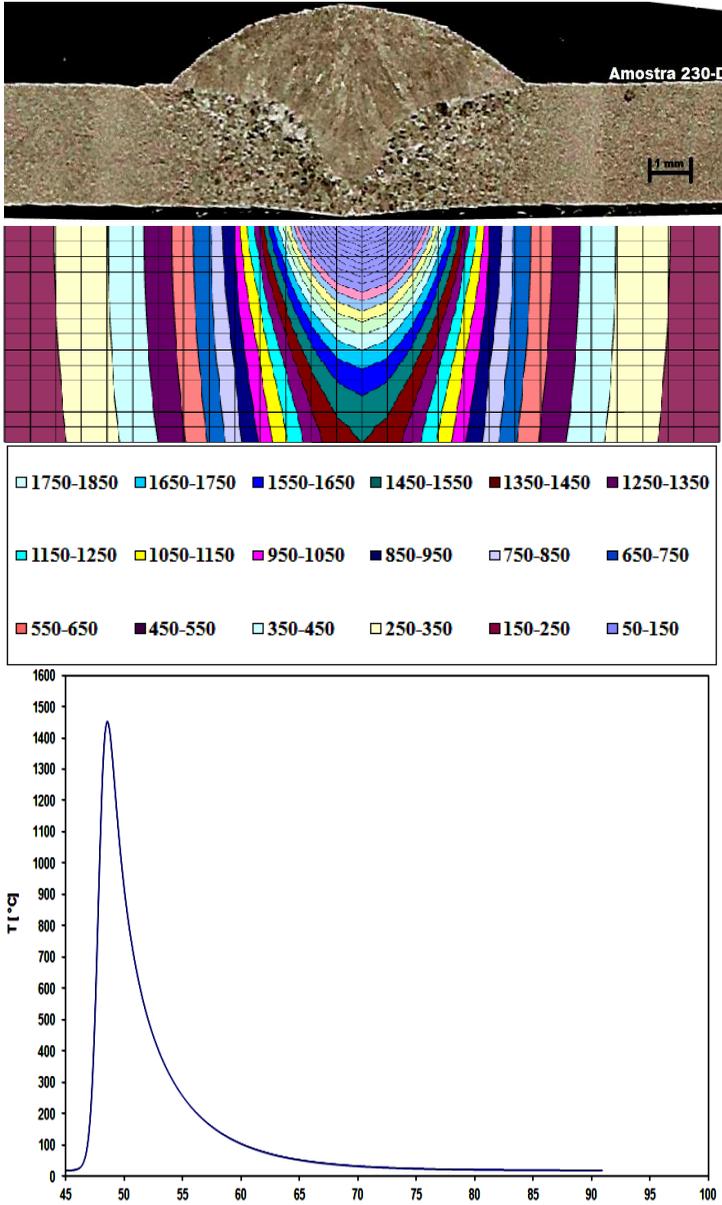


Figura 5.21 – Amostra “230-D” com suas isolinhas de temperatura máxima (1451 $^{\circ}\text{C}$ ) e o ciclo térmico imposto durante a soldagem com GMAW-P na parede interna da chapa na espessura de 3,0 mm.

As temperaturas máximas atingidas na superfície da chapa do lado da raiz da solda (isto é, do lado oposto àquele que incide o arco), nas amostras 230-A, B, C e D, conformes estimadas pelo programa desenvolvido por Santos (SANTOS, 2001), foram respectivamente 1407, 1280, 1165 e 1451°C. A Figura 5.21 mostra as isolinhas de temperatura máximas e o ciclo térmico imposto durante a soldagem com GMAW-P para a amostra 230-D, onde a mais elevada temperatura (1451°C) acarretou na formação de um bojo na face inferior da chapa.

### 6.2.2.2 Soldagem GMAW-P e Curto circuito, tubo API 5L X70 $\phi$ 4", espessura 3,2 mm e velocidade soldagem de 30 cm/min.

Os resultados aqui apresentados (obtidos das tabelas dos apêndices G até L), mostram os valores  $I_m$  e  $E_s$  (Tabela 5.5) para os quais ocorreu a perfuração na soldagem com GMAW com imposição de tensão em curto circuito.

Tabela 5.5 - Valores de  $I_m$  e  $E_s$  para furar durante a soldagem GMAW - curto circuito em tubo API 5L X70 com espessura 3,2 mm e  $V_s$  de 30 cm/min.

Condição: pressão e vazão	$I_m$ (A)	$E_s$ (kJ/cm)
8 0 0	> 204,9	> 9,02
6 2 2	> 180,8	> 7,56
5 2 5	> 184,3	> 7,68
5 4 2	> 184,0	> 7,72
4 4 5	> 174,5	> 6,72
7 8 2	> 200,7	> 8,80

A pior condição encontrada para a ocorrência do furo foi a 4 4 5, ou seja, para a vazão de 40 l/min. e pressão de 5 bar, com  $I_m$  acima de 174,5 A e  $E_s$  maior que 6,72 kJ/cm. Apesar de o tubo apresentar maior espessura (3,2 mm) do que no item anterior (3,0 mm), os valores de  $I_m$  (174,5 A) e  $E_s$  (6,72 kJ/cm) foram menores para furar. Portanto, a soldagem com GMAW em curto circuito apresenta comportamento desfavorável em relação ao pulsado, tratando-se da penetração do arco. O resultado encontrado em todos os casos sobre o melhor comportamento do arco, em relação ao furo, foi para 7 8 2 sendo: 80 l/min. e 2 bar .

Da mesma forma, foram executadas soldagens com o processo GMAW-P sobre tubo API 5L X70 e espessura de parede 3,2 mm. A Tabela 5.6 mostra os valores de  $I_m$  e  $E_s$  em função das condições de vazão e pressão no qual ocorreu o furo. Novamente, a pior condição

encontrada de perfuração foi também para 11 4 5, na vazão de 40 l/min. e pressão de 5 bar, com Im acima de 200 A e Es maior que 12,5 kJ/cm. Ocorre que ao aumentar a pressão do fluido diminui a corrente limite para perfuração. Entretanto o valor limite da corrente não variou com a vazão como era esperado e, além disso, a corrente limite ao soldar sem fluxo foi menor que ao ter um fluido sob pressão.

Os altos valores encontrados de Im e Es para que ocorra a perfuração, com a soldagem GMAW-P, mostram que esse processo é mais adequado para a soldagem de operação de dutos por apresentar uma melhor segurança em relação a perfuração (furo). Este resultado é promissor em se tratando de um processo de soldagem semi-automático com alta produtividade e de muito baixo teor de hidrogênio (Erro! Fonte e referência não encontrada.). Outro resultado interessante foi observado na perfuração do arco que ocorreu com alta energia de soldagem (12,5 kJ/cm). Para condição semelhante de espessura e com o processo eletrodo revestido, a recomendação encontrada na literatura é usar a máxima energia de 8,7 kJ/cm (BRUCE, 2000a).

No uso do processo de soldagem GMAW as piores condições apresentadas, para ocorrência do furo, foram com a pressão de 5 bar, sendo esta a maior pressão alcançada durante os testes. Ao contrário, as melhores condições encontradas foram na vazão de 80 l/min., sendo esta maior vazão de água durante os testes. Quanto maior a vazão, maior a troca térmica na parede do tubo, minimizando a penetração da solda.

Tabela 5.6 - Valores de Im e Es para furar durante a soldagem GMAW-P em tubo API 5L X70 com espessura 3,2 mm e Vs de 30 cm/min.

Condição: pressão e vazão	Im (A)	Ief (A)	Es (kJ/cm)
1 2 0 0	> 210	> 227	> 13,5
15 2 2	> 240	> 251	> 16,2
12 2 5	> 210	> 227	> 13,8
14 4 2	> 230	> 242	> 15,7
11 4 5	> 200	> 220	> 12,5
16 8 2	> 250	> 255	> 17,7

### 6.2.2.3 Soldagem FCAW-S com curto circuito, tocha empurrando, cordão sobre chapa, espessura 3,0mm e velocidade de soldagem de 30 cm/min.

Os dados retirados do apêndice S mostram que soldando com o processo FCAW-S em curto circuito foi exigido maior Im (190 A), para

que ocorresse a perfuração, em comparação com GMAW-P na mesma espessura e cordão sobre a chapa (160 A, Tabela 5.4).

Porém, este melhor comportamento apresentado em relação à perfuração não pode ser aplicado para a soldagem em virtude de surgirem cavidades alongadas na zona fundida no topo do cordão. Esta cavidade alongada (Figura 5.22) surgiu em razão de se utilizar o arame tubular em curto circuito e empurrando a tocha. É de conhecimento na soldagem que quando se utiliza um processo de soldagem tendo um consumível que produz escória, não se pode adotar a forma empurrando. Outra constatação foi o uso do consumível E 71T-11 na transferência metálica não recomendada. De acordo com a norma AWS A5.20 este eletrodo deve ser utilizado na transferência goticular (*spray*).

Em relação à penetração do cordão de solda, a soldagem com o processo FCAW-S apresentou perfil semelhante daquele mostrado pelo GMAW-P para o mesmo intervalo de corrente, ou seja, entre 90 a 140 A verifica-se um patamar no nível de penetração. Acima de 160 A de  $I_m$  houve um aumento da penetração, e abaixo de 90 A ocorreu uma redução. A Figura 5.23 mostra o comportamento da corrente com a penetração para o processo FCAW-S.

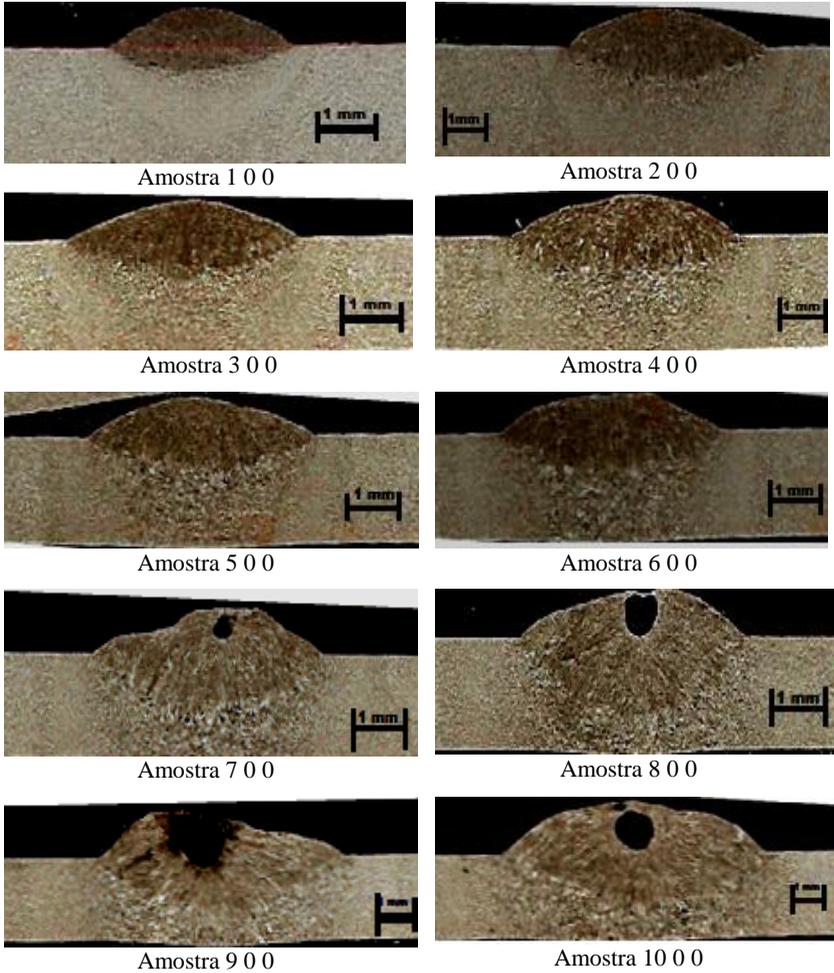


Figura 5.22 - Macrografia mostrando cavidades alongadas na soldagem com GMAW em curto circuito e empurrando a poça de solda.

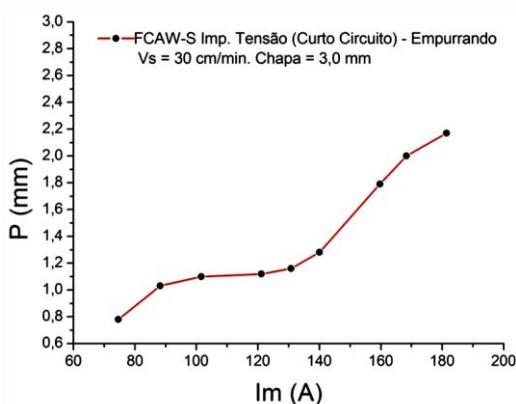


Figura 5.23 - Gráfico mostrando um patamar no nível da penetração entre 90 a 140 A no processo de soldagem FCAW-S.

#### 6.2.2.4 Soldagem FCAW-S com curto circuito e corrente pulsada, tocha empurrando, tubo API 5L X70, espessura 3,2mm.

Novamente, conforme ocorrido e descrito no item 5.2.2.3, na soldagem com FCAW-S em curto circuito em tubos API com espessura de 3,2 mm, surgiram cavidades alongadas na zona fundida no topo do cordão com corrente média superior a 160 A. Assim sendo, mesmo com resultado satisfatório quanto ao surgimento da perfuração, que aconteceu somente com  $I_m$  de 227 A (apêndice T), para o tubo com espessura de 3,2 mm sem fluido interno, superando o valor obtido no processo de soldagem GMAW-P de 210 A (Tabela 5.6), o processo não poderia ser utilizado na soldagem de reparo de dutos em operação por apresentar este tipo de descontinuidade.

O mesmo comportamento foi observado para a soldagem com o processo FCAW-S em corrente pulsada e empurrando a poça de fusão, na qual surgiram as cavidades alongadas na zona fundida no topo do cordão como mostrado na Figura 5.24. Esta descontinuidade surgiu com uma menor corrente média de soldagem a partir de 120 A, ou seja, foi impraticável o uso deste processo em curto circuito e empurrando a poça de solda.

Os dados foram retirados da tabela do apêndice U, na qual são apresentados os valores de corrente média e energia de soldagem para os quais ocorreu a perfuração. A Tabela 5.7 mostra estes valores em função das velocidades de soldagem para que ocorra o furo.

Tabela 5.7 - Valores de Im e Es para furar durante a soldagem com FCAW-S em curto circuito e empurrando, tubo com espessura de 3,2 mm sem água.

Velocidade de soldagem	Im (A)	Es (kJ/cm)
33 cm/min.	> 201	> 9,3
30 cm/min.	> 191	> 9,9
27,2 cm/min.	> 161	> 9,2
20 cm/min.	> 131	> 11,0

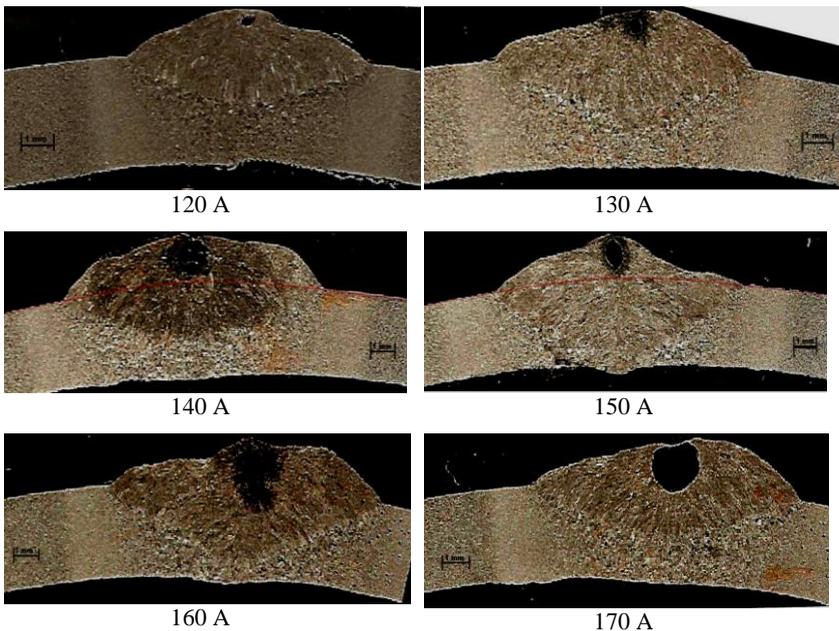


Figura 5.24 - Macrografia mostrando cavidades alongadas na soldagem com FCAW-S em corrente pulsada e empurrando a poça de solda.

### 6.2.2.5 Soldagem FCAW-S com transferência goticular/*spray*, tubo API 5L X70, espessura 3,2mm.

De acordo com o prescrito na AWS A5.20, a transferência metálica adequada para o processo de soldagem FCAW-S é goticular. Sendo assim, os resultados da soldagem com esta transferência e tocha reta mostraram a ausência do tipo de descontinuidade reconhecida como cavidade alongada.

Os valores de corrente média (acima de 212 A) e energia de soldagem (acima de 9,5 kJ/cm.) para furar o tubo na espessura de 3,2

mm e sem fluido (ver apêndice Z) foram superiores àqueles obtidos para o processo de soldagem GMAW com curto circuito conforme Tabela 5.5, e na condição de 8 0 0.

A Figura 5.25 mostra que para uma mesma corrente, a penetração do cordão de solda com o processo de soldagem FCAW-S com transferência goticular foi menor quando comparado com GMAW com curto circuito.

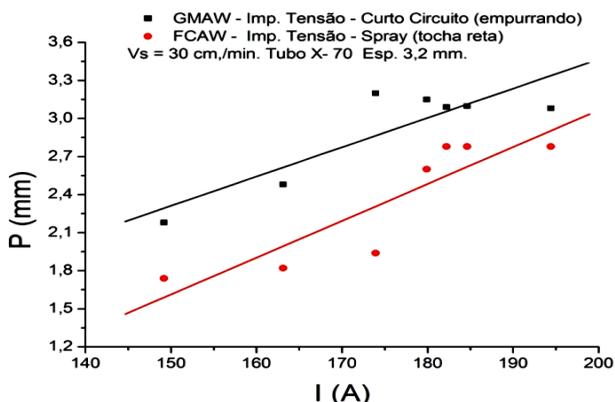


Figura 5.25 - Penetração do cordão de solda para GMAW (curto circuito) e para FCAW-S (goticular), tubo sem fluido e 3,2 mm de espessura.

A Figura 5.26 mostra macrografias da solda com FCAW-S em imposição de tensão (goticular), podendo-se observar através das mesmas a ausência de discontinuidades. O resultado foi significativo para o uso na soldagem de reparo de dutos com esse processo e nesta forma de transferência metálica.

Em relação à Figura 5.26 e aos limites de corrente, é importante ressaltar que:

Pode-se observar que o perfil de penetração nos cordões obtidos pelo processo FCAW-S é suave, diferente do que ocorre com o processo GMAW ao utilizar atmosferas ricas em argônio (veja as Figura 5.13 e Figura 5.20). Este perfil, denominado em inglês de *finger shape*, pode ser resultante da elevada pressão do plasma que desloca a poça na região próxima ao eixo do arco e promove um fluxo convectivo que aumenta a transferência de calor para a peça.

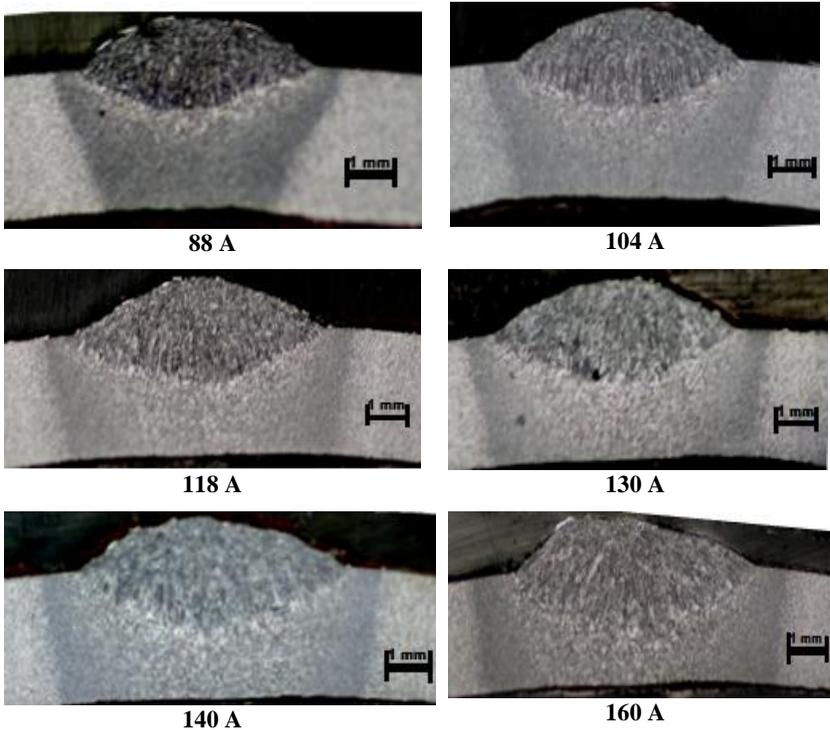


Figura 5.26 – Macrografias mostrando a ausência de descontinuidades para o processo de soldagem FCAW-S com transferência goticular e Vs de 30 cm/min.

#### **6.2.2.6 Soldagem GMAW e FCAW-S com imposição de tensão (curto circuito) e corrente pulsada, tocha empurrando, cordão sobre chapa, espessura 4,8 mm.**

Os resultados obtidos de penetrações dos cordões de solda dos processos de soldagem e modos de transferências metálicas são mostrados nos apêndices V a Z e Figura 5.27 e Figura 5.28. Propósito destes foi minimizar o efeito da perfuração (furo) com o intuito de utilizá-los em reparo de dutos em operação.

A Figura 5.27 mostra gráficos da penetração do cordão de solda em função da corrente média para diferentes velocidades de soldagem.

São mostrados também, na Figura 5.28, macrografias de cordões de solda executados com a mesma velocidade e corrente média, onde a penetração do cordão difere em função do processo de soldagem e do modo de transferência metálica.

Analisando os resultados das Figura 5.27 e Figura 5.28, pode-se depreender que a menor penetração da solda ocorre no processo de soldagem GMAW com corrente pulsada. Por outro lado, a pior condição (maior penetração) ocorre no processo FCAW-S com corrente pulsada.

Além do processo de soldagem FCAW-S, tanto em corrente pulsada como em imposição de tensão (curto circuito) apresentar maior penetração, também surgiram as cavidades alongadas na zona fundida no topo do cordão quando a corrente média ultrapassou 160 A

Dentro das condições ensaiadas, de correntes médias e velocidades de soldagem (ver apêndice V a Y), não ocorreu o furo em cordões sobre chapa de espessura de 4,8 mm.

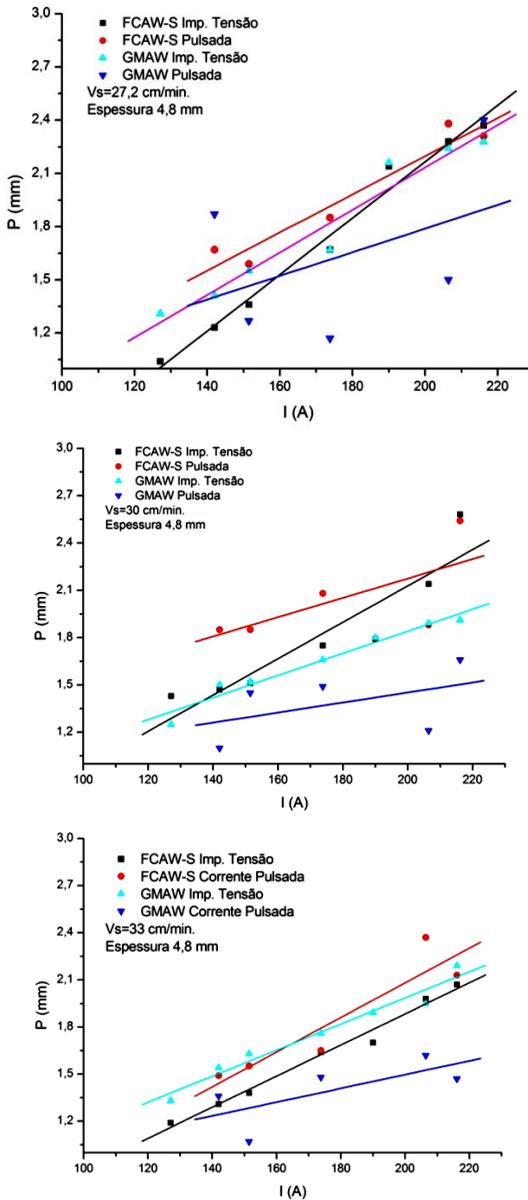


Figura 5.27 - Gráficos da penetração do cordão de solda em função da  $I_m$ , para GMAW e FCAW-S de acordo com  $V_s$ .



GMAW Imp. Tensão,  $V_s=30\text{cm/min.}$ ,  $I_m=143\text{ A}$ ,  $E_s=3,32\text{ kJ/cm.}$ ,  $P=1,35\text{ mm}$



GMAW Pulsado,  $V_s=30\text{cm/min.}$ ,  $I_m=140\text{ A}$ ,  $E_s=8,4\text{ kJ/cm.}$ ,  $P=1,1\text{ mm}$



FCAW-S Imp. Tensão,  $V_s=30\text{cm/min.}$ ,  $I_m=139\text{ A}$ ,  $E_s=4,9\text{ kJ/cm.}$ ,  $P=1,47\text{ mm}$

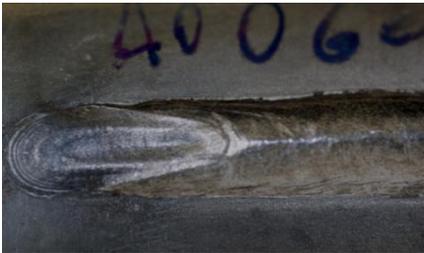


FCAW-S Pulsado,  $V_s=30\text{cm/min.}$ ,  $I_m=140\text{ A}$ ,  $E_s=8,3\text{ kJ/cm.}$ ,  $P=1,85\text{ mm}$

Figura 5.28 - Macrografias mostrando a penetração em função do processo de soldagem e modo de transferência.

### 6.2.3 Influência da pressão interna na perfuração/furo.

Durante a soldagem dos tubos em alguns casos ocorreram furos e em outros casos aconteceu somente a penetração sem furar. Quando da soldagem de simples deposição em tubos sem fluido interno, ao ultrapassar certo valor da corrente média, em função da espessura, ocorre uma penetração excessiva (terminologia adotada pela norma Petrobras N-1738) como visto através da Figura 5.29, nota-se na superfície interna do tubo uma saliência conhecida como bojo. Esta descontinuidade além de alterar o movimento do fluido, pode também dificultar a passagem de qualquer instrumento colocado no interior do tubo.



Face externa do tubo



Face interna do tubo

Figura 5.29 – Penetração excessiva durante a soldagem de tubo sem fluido interno, GMAW em curto circuito, Im 180 A, Vs 30 cm/min. e espessura de parede 3,2 mm.

Na soldagem de simples deposição em tubos com fluido interno (água) ao ultrapassar certo valor da corrente média, ocorre o furo sem a presença da penetração excessiva. Este fato deve-se, provavelmente, à ação da pressão interna do fluido. Este resultado mostra mais uma vantagem de soldar dutos em operação com fluido interno, pelo motivo de evitar a presença da penetração excessiva eliminando possível inconveniente desta descontinuidade discutida anteriormente. A Figura 5.30 mostra o lado externo e interno do tubo onde ocorreu o furo, observando-se a ausência do bojo na superfície interna do tubo.

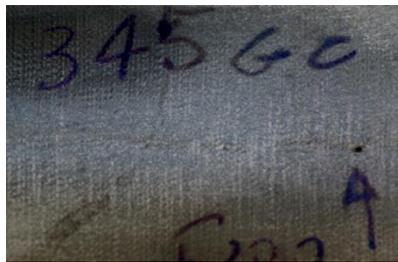
A Figura 5.31 mostra o furo na parte interna e externa do tubo, onde pode ser observada a ausência de tal penetração excessiva. A face externa foi esmerilhada para melhor visualização do furo.

Fazendo-se uma análise visual interna ao tubo no local onde ocorreu o furo, em todos os casos ocorridos, não se constatou a evidência da deflexão radial até a pressão interna de 5 bar. Este

resultado não pode ser comparado ao publicado por Sabapathy et al (SABAPATHY, 2000), que afirma existir uma deflexão radial (bojo) no interior do tubo com o aumento da pressão do fluido, de forma a reduzir a espessura, favorecendo desta forma a perfuração. No experimento por ele executado a pressão mínima para a ocorrência deflexão medida foi de 20 bar. Provavelmente, a não observação de tal fenômeno, nos experimentos, deve-se a utilização de baixa pressão interna da água.



Face externa do tubo



Face interna do tubo

Figura 5.30 - Furo durante a soldagem de tubo com vazão de 40 l e pressão de 5 bar, GMAW em curto circuito, Im 165 A, Vs 30 cm/min. e espessura de parede 3,2 mm.



Face externa



Face interna

Figura 5.31 – Furo em tubo mostrando a parte externa e interna sem a ocorrência da penetração e sem deflexão radial com água a pressão de 5 bar.

Os ensaios para verificação da perfuração (furo) em função dos parâmetros de soldagem (Im, Vs, pressão e vazão) foram executados até o limite da ocorrência do evento. No momento da perfuração foram registrados dois tipos ocorrência: às vezes surgiam dois furos como mostra a Figura 5.32, outras vezes apresentava somente um furo como visto na Figura 5.33.

A presença de um único furo atrás da incidência do arco voltaico deve ser, provavelmente, em função da mudança da direção das tensões. Na poça de fusão, onde incide o arco, a tensão é compressiva, porém, em momento posterior, onde começa a solidificação, a tensão muda de direção e torna-se trativa. Assim, como a zona fundida não está totalmente solidificada, nesta condição apresenta baixa resistência mecânica. Portanto, com um pequeno esforço de tração ocorre o furo, às vezes acompanhado de uma trinca, como visto na Figura 5.32.



Figura 5.32 – Furos provenientes da soldagem de tubo com fluido e pressão interna: Seta 1 devido ao esforço trativo; Seta 2 devido a incidência do arco voltaico.

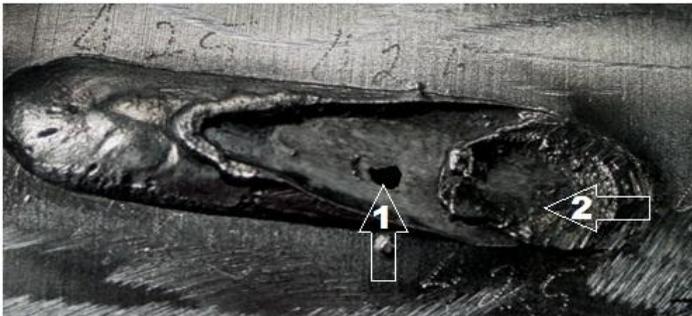


Figura 5.33 - Furo proveniente da soldagem de tubo com fluido e pressão interna: Seta 1 furo devido ao esforço trativo; Seta 2 ausência de furo na incidência do arco voltaico.

## 6.2.4 Avaliação da penetração para os processos de soldagem GMAW em corrente pulsada e FCAW-S transferência goticular.

### 6.2.4.1 Avaliação da penetração para o processo de soldagem GMAW em corrente pulsada empurrando a poça.

Após uma longa pesquisa sobre qual o melhor desempenho em relação à menor penetração obtida com o processo GMAW, os resultados demonstraram ser com o GMAW em corrente pulsada e empurrando a poça de fusão. Esta constatação foi discutida nos itens 5.2.1 e 5.2.2.6.

Com este processo de soldagem foram executados ensaios nas condições mais severas obtidas nos resultados anteriores. Portanto, para a perfuração a condição encontrada foi na vazão de 40 l/min. e pressão de 5 bar (Tabela 5.3, Tabela 5.5 e Tabela 5.6).

Os resultados da penetração dos cordões de solda com GMAW em corrente pulsada e empurrando a poça podem ser vistos na Tabela 5.8 e também contém os parâmetros de soldagem.

Os resultados foram processados estatisticamente através do programa *Minitab* para verificar o comportamento da penetração do cordão de solda em função da corrente e velocidade de soldagem, cujo resultado do projeto de superfície de resposta “2<sup>2</sup> total” (2 fatores: Im e Vs; 2 níveis: 120 e 180 A para corrente média, 25 e 35 cm/min. para velocidade de soldagem) é mostrado na Tabela 5.8.

A equação 5.3, expressando a penetração (P) do cordão de solda em função da Corrente (Im) e velocidade de soldagem (Vs), foi obtida através de regressão linear múltipla pelo método da superfície de resposta.

$$P = -9,2115 + 0,0189(Im) + 0,6147(Vs) - 0,0097(Vs)^2 - 0,0004(Im*Vs). \quad (\text{Eq. 5.3})$$

A Figura 5.34 mostra o gráfico da correlação (R<sup>2</sup>) entre os valores ajustados e medidos da penetração do arco para GMAW-P empurrando na soldagem com simples deposição sobre tubos API 5L X70 com água na vazão de 40 l/min. e pressão 5 bar. O modelo estatístico tornou-se adequado com R-Sq (adj) de 91%.

Tabela 5.8 - Parâmetros de soldagem e perfis dos cordões de solda com processo GMAW em corrente pulsada e empurrando a poça, tubo API-5L X70 espessura 3,2 mm, ER 80S-G.

<b>Amostra</b>	<b>Corrente (A)</b>	<b>Tensão (V)</b>	<b>Velocid. Soldagem (cm/min)</b>	<b>Energia Soldagem (kJ/cm)</b>	<b>Penetração (mm)</b>	<b>Reforço (mm)</b>	<b>Largura (mm)</b>
1G	150	27,4	30	9,16	1,58	2,13	10,30
2G	150	25,9	23	11,43	1,28	2,34	11,69
3G	150	25,8	30	8,74	1,55	2,18	10,40
4G	120	24,4	35	5,95	1,02	2,00	7,54
5G	180	28,4	25	13,32	1,62	2,54	13,24
6G	150	27,1	30	9,10	1,52	1,96	10,95
7G	120	25	25	8,62	1,24	1,92	9,94
8G	150	26,9	37	7,36	0,95	2,02	8,34
9G	180	30,9	35	10,22	1,17	2,38	10,14
10G	108	23,3	30	6,14	1,19	1,77	8,93
11G	150	25,1	30	8,56	1,54	2,18	10,40
12G	192	28,1	30	11,54	2,07	2,45	12,81
13G	150	26	30	8,80	1,53	2,15	10,62

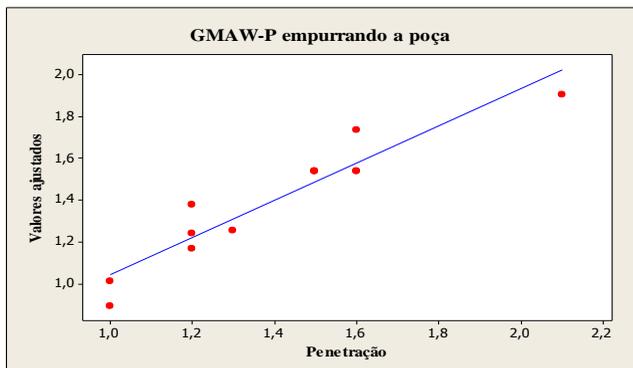


Figura 5.34 - Gráfico da correlação ( $R^2$ ) entre os valores ajustados e medidos da penetração do arco para GMAW-P empurrando na soldagem com simples deposição sobre tubos API 5L X70 com água na vazão de 40 l/min. e pressão 5 bar

Analisando o gráfico da superfície de resposta da Figura 5.35, para o processo GMAW-P empurrando na soldagem com simples deposição sobre tubos API 5L X70 com água na vazão de 40 l/min. e pressão 5 bar, pode-se retirar as seguintes informações:

- A penetração aumenta com o aumento da corrente. A influencia da corrente é maior para baixa velocidade de soldagem.
- Para o intervalo pesquisado de velocidade de soldagem entre 25 a 35 cm/min. e de corrente entre 120 a 180 A, a penetração aumenta com o aumento da velocidade de soldagem até o valor aproximado de 30 cm/min. Esta ocorrência de aumentar a penetração com o aumento da velocidade de soldagem deve-se ao efeito da sobreposição da poça de fusão. Por outro lado, quando a velocidade de soldagem é superior a 30 cm/min., a penetração diminui com o aumento da velocidade de soldagem. Nesta condição o efeito que prevalece é a energia de soldagem. Portanto, a velocidade de soldagem teve um ponto de máxima penetração em torno de 30 cm/min. Este fenômeno é mencionado na literatura (ver a Figura 3.36 no capítulo 3).

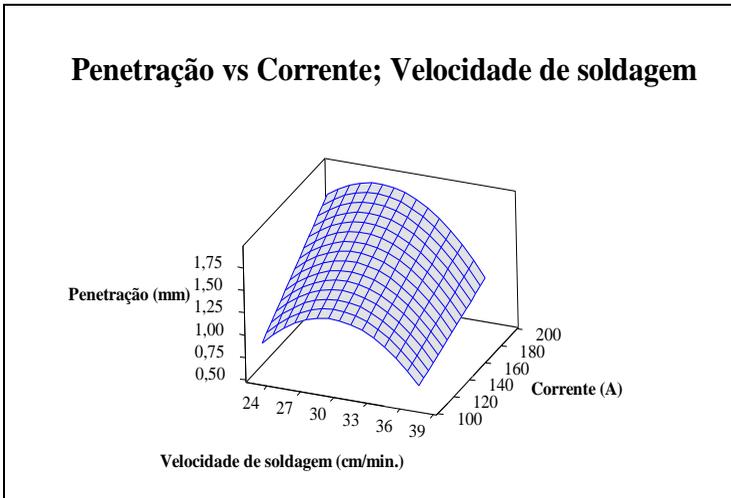


Figura 5.35 - Gráfico da superfície de resposta da penetração versus corrente e velocidade de soldagem para o processo GMAW-P empurrando na soldagem com simples deposição sobre tubos API 5L X70 com água na vazão de 40 l/min. e pressão 5 bar.

#### 6.2.4.1.1 Reforço do cordão de solda

Nesta análise estatística foi verificado o comportamento do reforço no cordão de solda em função da corrente e da velocidade de soldagem para o processo GMAW-P condição empurrando, na soldagem com simples deposição sobre tubos API 5L X70 com água na vazão de 40 l/min. e pressão 5 bar.

O modelo estatístico tornou-se adequado com R-Sq (adj) de 90%. A equação 5.4, reforço (R) no cordão de solda em função da Corrente (Im) e velocidade de soldagem (Vs), foi obtida através de regressão linear múltipla pelo método da superfície de resposta.

$$R = + 1,1133 + 0,0203(Im) - 0,0608 (Vs) + 0,0018(Vs)^2 - 0,0004(Im*Vs). \quad (\text{Eq. 5.4})$$

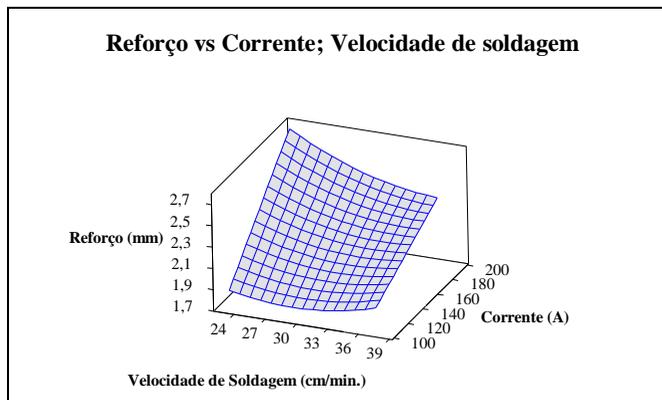


Figura 5.36 - Gráfico da superfície de resposta da reforço versus corrente e velocidade de soldagem para o processo GMAW-P empurrando na soldagem com simples deposição sobre tubos API 5L X70 com água na vazão de 40 l/min. e pressão 5 bar.

Analisando o gráfico da superfície de resposta da Figura 5.36, na soldagem com o processo GMAW-P condição empurrando a poça na técnica de simples deposição do cordão sobre tubos API 5L X70 com água na vazão de 40 l/min. e pressão 5 bar, pode-se retirar as seguintes informações:

- O reforço aumenta com o aumento da corrente. A influência da corrente é maior para baixa velocidade de soldagem.
- Ao soldar com baixas correntes, o reforço diminui com aumento da velocidade de soldagem até o valor aproximado de 30 cm/min. Por outro lado, quando a velocidade de soldagem for superior a 30 cm/min., o reforço aumenta com o aumento da velocidade de soldagem. Entretanto, para altas correntes, o reforço diminui com a velocidade de soldagem. O reforço (Figura 5.36) teve um comportamento menos perceptível, ao contrário da penetração (Figura 5.35). Isto é justificado pelo fato de que com a mesma corrente e com a mesma velocidade de soldagem, com o aumento na penetração, deve ocorrer uma redução no reforço do cordão de solda, ou seja, o volume depositado deve-se manter constante.

#### **6.2.4.1.2 Largura do cordão de solda.**

Finalmente, foi feita análise estatística para verificação do comportamento da largura no cordão de solda em função da corrente e da velocidade de soldagem para o processo GMAW-P condição

empurrando, na soldagem com simples deposição sobre tubos API 5L X70 com água na vazão de 40 l/min. e pressão 5 bar.

O modelo estatístico tornou-se adequado com R-Sq (adj) de 92%. A equação 5.5, largura (L) no cordão de solda em função da Corrente (Im) e da velocidade de soldagem (Vs), foi obtida através de regressão linear múltipla pelo método da superfície de resposta.

$$L = + 1,1133 + 0,0203(I_m) - 0,0608 (V_s) + 0,0018(V_s)^2 - 0,0004(I_m * V_s). \quad (\text{Eq. 5.5})$$

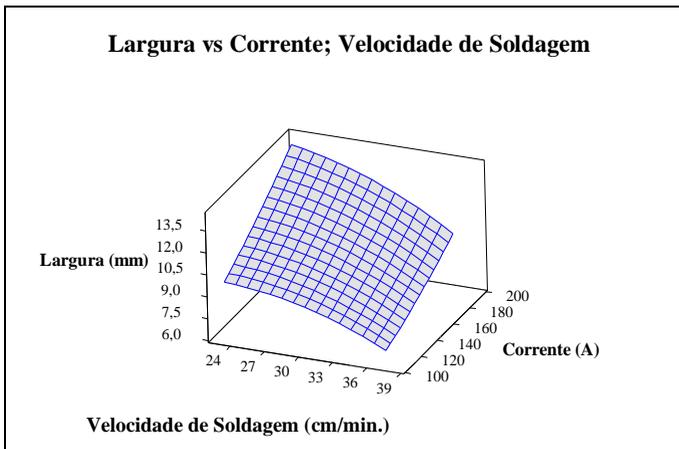


Figura 5.37 - Gráfico da superfície de resposta da largura versus corrente e velocidade de soldagem para o processo GMAW-P empurrando na soldagem com simples deposição sobre tubos API 5L X70 com água na vazão de 40 l/min. e pressão 5 bar.

Analisando o gráfico da superfície de resposta da Figura 5.37, na soldagem com o processo GMAW-P condição empurrando a poça na técnica de simples deposição do cordão sobre tubos API 5L X70 com água na vazão de 40 l/min. e pressão 5 bar, pode-se retirar as seguintes informações:

- A largura aumentou com o aumento da corrente. A influência da corrente foi maior para baixas velocidades de soldagem.
- A largura diminuiu com o aumento da velocidade de soldagem. A influência da velocidade foi maior para mais altas correntes.

- A variação da largura do cordão de solda em função da corrente e da velocidade de soldagem foi como esperado com qualquer processo de soldagem.

#### **6.2.4.1.3 Análise metalográfica nos cordões de solda.**

A Figura 5.38 mostra as macrografias após a soldagem GMAW-P condição empurrando a poça na soldagem com simples deposição sobre tubos API 51 X70 na espessura de 3,2 mm. Durante a soldagem, o tubo foi pressurizado com pressão de 5 bar na vazão de 40 l/min. e água como fluido.

As variáveis de soldagem e os dados da geometria dos cordões podem ser consultados na Tabela 5.8. A numeração das amostras do ensaio macrográfico está de acordo com a Tabela 5.8

O ensaio macrográfico (Figura 5.38) não revelou descontinuidades, nem penetração excessiva e/ou perfuração. Observou-se uma pequena deflexão radial na parede interna do tubo, especificamente na amostra 12G, porém foi considerada insignificante nesta pesquisa.

A maior penetração (2,1 mm) ocorreu na soldagem com corrente de 192 A e velocidade de soldagem de 30 cm/min., bem abaixo da espessura da parede do tubo que era de 3,1mm. Estes valores constam na Tabela 5.9 e Figura 5.38, amostra 12G.

A Figura 5.38 mostra que o perfil de penetração dos cordões foi o conhecido como *finger shape* (forma de dedo), típico da soldagem GMAW com gás de proteção rico em argônio. Não sendo um perfil de penetração ideal para a soldagem mutipasses, para esta pesquisa não ocorreu prejuízo porque foi realizado somente um passe de solda.

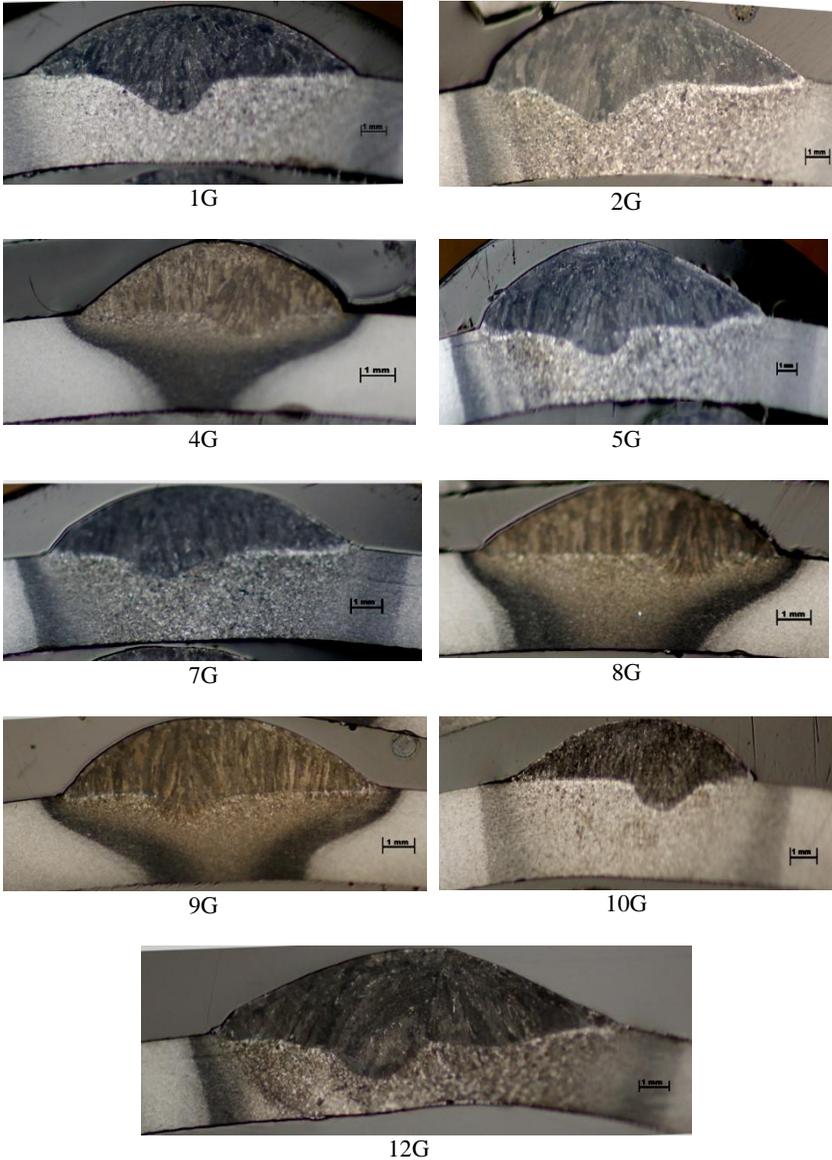


Figura 5.38 – Macrografias após a soldagem GMAW-P empurrando a poça em tubos API 51 X70, Vazão 40 l/min. e pressão de 5 bar, na espessura de 3,2 mm.

#### 6.2.4.1.4 Determinação da temperatura na parede interna do tubo

Aplicando-se o programa de computador desenvolvido por Santos (SANTOS, 2001) foram determinadas as temperaturas internas da parede da tubulação através da solução analítica para a transferência de calor na soldagem. A Tabela 5.9 mostra os valores obtidos da eficiência térmica ( $\eta$ ), da distribuição do fluxo de calor ( $\sigma$ ) e da temperatura da parede interna, na condição de soldagem com o processo GMAW-P empurrando a poça em tubos API 51 X70 na espessura de 3,2 mm. Durante a soldagem o tubo foi pressurizado com 5 bar na vazão de 40 l/min. e água como fluido.

A temperatura na parede interna, calculada através da equação analítica de Santos (SANTOS, 2001), foi muito próxima da medida por meio de termopar. Esta verificação foi efetuada no mestrado do Pérez (2005), de acordo com a Figura 3.13. Portanto, admite-se que os valores de temperatura apresentados na Tabela 5.9 sejam confiáveis.

Os valores de eficiência térmica parecem baixos quando comparados àqueles determinados por vários autores para o processo de soldagem GMAW aplicados em condições normais (peça em contato com o ar ambiente). Entretanto, como neste caso o fluido escoar calor pelo tubo, o ajuste do modelo analítico é feito supondo que há uma menor eficiência na transferência de calor do arco para a peça.

Os valores das temperaturas determinadas na parede interna do tubo foram além do limite recomendado pelo programa de análise desenvolvido pelo Instituto Battelle (BRUCE, 2000a), que afirma que com o processo de soldagem com eletrodo revestido, a perfuração tende a ocorrer quando a temperatura ultrapassa 1260°C. Em um trabalho mais recente, Begg (BEGG, 2009) mostra que para os processos de soldagem semi-automáticos, a temperatura na parede interna do tubo pode ser maior, sem que ocorra perfuração.

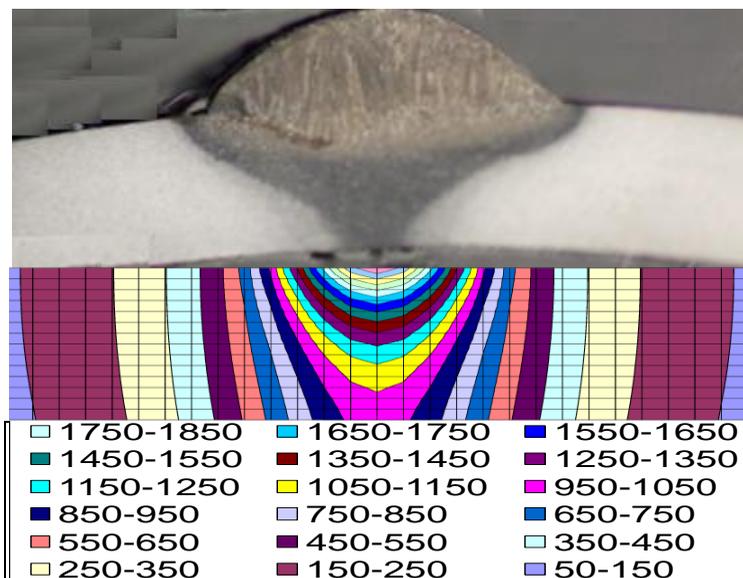
Os resultados mostram que, apesar da maior temperatura na parede interna do tubo não ocorreu perfuração (Figura 5.38). Pode-se depreender deste fato que os valores de temperatura na parede interna do programa de análise desenvolvido pelo Instituto Battelle é muito conservativo em relação à soldagem conduzida pelo processo GMAW-P.

Na Figura 5.39 é apresentada a amostra “7 G” com suas isolinhas de temperatura máxima e o ciclo térmico imposto durante a soldagem. De acordo com a Tabela 5.9 a máxima temperatura na parede interna do tubo foi de 981 °C.

Já na Figura 5.40 pode-se observar as isolinhas de temperatura máxima e o ciclo térmico imposto durante a soldagem da amostra “12 G”. De acordo com a Tabela 5.9, a máxima temperatura na parede interna do tubo foi de 1304 °C.

Tabela 5.9 - Parâmetros de soldagem dados da temperatura na parede interna do tubo API-5L X70 com processo GMAW em corrente pulsada e empurrando a poça, com água na vazão de 40 l/min. e pressão 5 bar.

Amostra	Corrente (A)	Tensão (V)	Velocid. Soldagem (cm/min)	Espessura do tubo (mm)	Penetração (mm)	ETA $\eta$ %	Sigma $\sigma$ (mm)	Temperatura parede Interna (°C)
1G	150	27,4	30	3,12	1,58	35	2,15	1211
2G	150	25,9	23	3,23	1,28	30	2,04	1106
3G	150	25,8	30	3,12	1,55	36,3	2,09	1130
4G	120	24,4	35	3,17	1,02	44	2,01	995
5G	180	28,4	25	3,22	1,62	27,2	2,2	1197
6G	150	27,1	30	3,17	1,52	35,7	2,21	1179
7G	120	25	25	3,20	1,24	30,7	1,32	1094
8G	150	26,9	37	3,17	0,95	33,2	2,13	997
9G	180	30,9	35	3,19	1,17	24	1,96	1044
10G	108	23,3	30	3,20	1,19	51,1	2,06	1086
11G	150	25,1	30	3,12	1,54	38	2,14	1059
12G	192	28,1	30	3,12	2,07	28,1	1,95	1304
13G	150	26	30	3,18	1,53	39,1	2,39	1213



Isolinhas de temperatura máxima ao longo da seção transversal

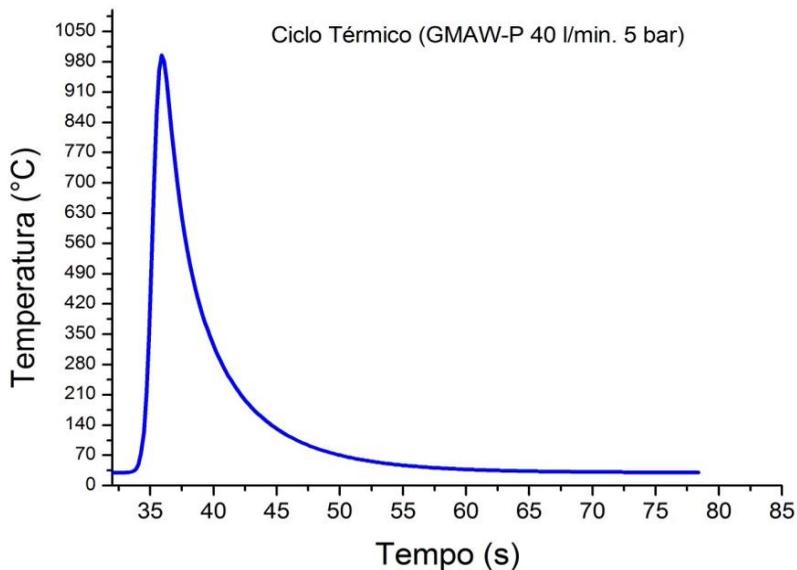
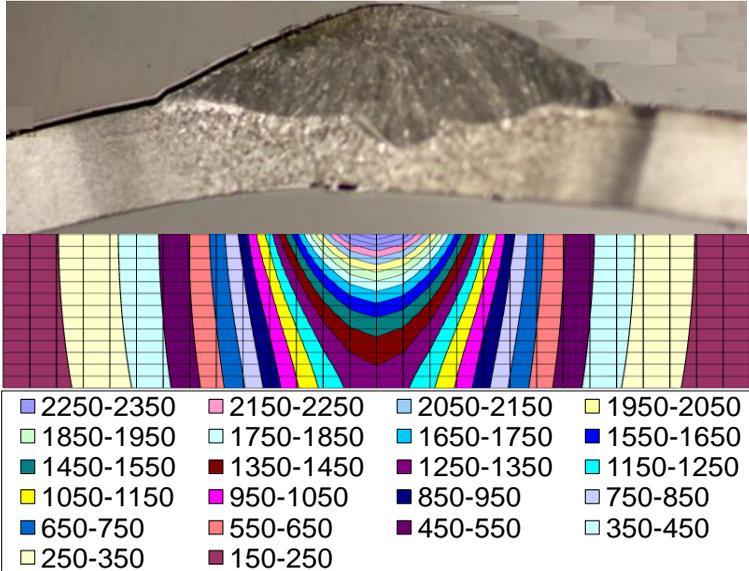


Figura 5.39 – Amostra “7 G” com suas isolinhas de temperatura máxima e o ciclo térmico imposto durante a soldagem com GMAW-P na vazão de 40 l/min. e pressão de 5 bar, na parede interna do tubo.



Isolinhas de temperatura máxima ao longo da seção transversal

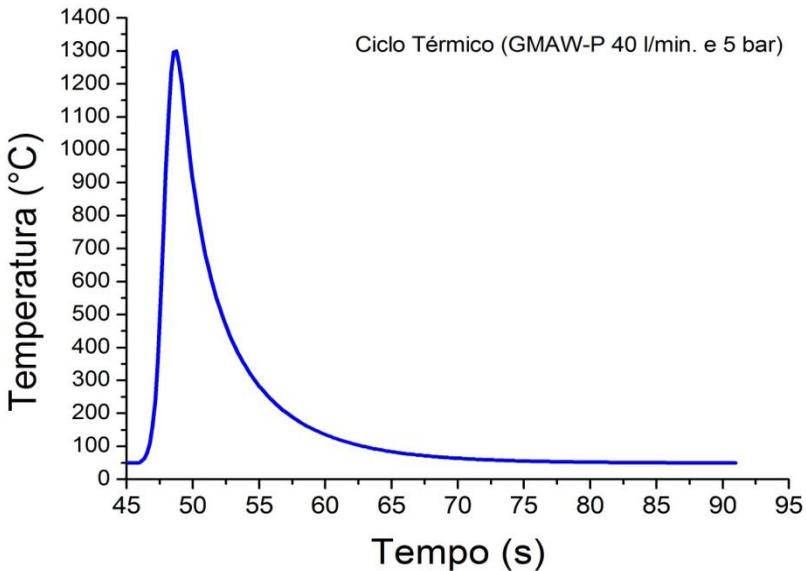


Figura 5.40 – Amostra “12 G” com suas isolinhas de temperatura máxima e o ciclo térmico imposto durante a soldagem com GMAW-P na vazão de 40 l/min. e pressão de 5 bar, na parede interna do tubo.

### 6.2.4.2 Avaliação da penetração para o processo de soldagem FCAW-S transferência goticular tocha reta.

Para este processo de soldagem foram executados ensaios nas condições mais severas daquele realizado no item 5.2.2.5, onde foram feitos cordões de solda sobre tubo sem fluido interno. Para tal fim foi executada a soldagem com fluido interno na vazão de 40 l/min. e na pressão de 5 bar, na solda com simples deposição sobre tubo.

#### 6.2.4.2.1 Penetração do cordão de solda

Os valores de penetração dos cordões depositados pelo processo FCAW-S goticular e tocha reta constam da Tabela 5.10, que também mostra os respectivos parâmetros de soldagem.

Tabela 5.10 - Parâmetros de soldagem e perfis dos cordões de solda com processo FCAW-S goticular e tocha reta, tubo API-5L X70 espessura 3,2 mm, E 71T-11 com água na vazão de 40 l/min. e pressão 5 bar.

Amostra	Corrente (A)	Tensão (V)	Velocid. Soldagem (cm/min)	Energia Soldagem (kJ/cm)	Penetração (mm)	Reforço (mm)	Largura (mm)
1F	140	20	30	5,76	1,93	1,48	7,65
2F	140	21	23	6,91	1,77	1,56	8,04
3F	140	20	30	5,68	1,98	1,45	7,62
4F	120	19,1	35	3,89	1,40	1,28	5,52
5F	160	20,5	25	7,42	1,89	1,66	9,06
6F	140	20	30	5,68	1,98	1,45	7,62
7F	120	19,1	25	5,33	1,52	1,22	7,04
8F	140	20	37	4,57	1,94	1,37	7,01
9F	160	20,7	25	5,95	2,17	1,54	7,95
10F	108	18,7	30	3,84	1,18	1,05	5,95
11F	140	20	30	5,68	1,96	1,43	7,78
12F	168	20,6	30	6,84	2,03	1,71	8,92
13F	140	20	30	5,54	1,94	1,41	7,70

A Tabela 5.10 mostra o resultado do projeto da superfície de resposta “2<sup>2</sup> total” (2 fatores: Im e Vs; 2 níveis: 120 e 160 A para corrente média, 25 e 35 cm/min. para velocidade de soldagem). Realizados trabalhos estatísticos através do programa *Minitab* para verificar o comportamento da penetração do cordão de solda em função da corrente e velocidade de soldagem. A Figura 5.41 mostra o gráfico da correlação (R<sup>2</sup>) entre os valores ajustados e medidos da penetração do arco no processo FCAW-S condição goticular e tocha reta na soldagem com a técnica da simples deposição sobre tubos API 5L X70 com água na vazão de 40 l/min. e pressão 5 bar.

O modelo estatístico tornou-se adequado com R-Sq (adj) de 99%. A equação 5.6, penetração (P) do cordão de solda em função da Corrente (Im) e velocidade de soldagem (Vs) foi obtida através de regressão linear múltipla pelo método da superfície de resposta.

$$P = - 6,3754 + 0,10556(Im) - 0,01538(Vs) - 0,0019(Vs)^2 (-)0,0004(Im)^2 + 0,001(Im*Vs). \quad (\text{Eq. 5.6})$$

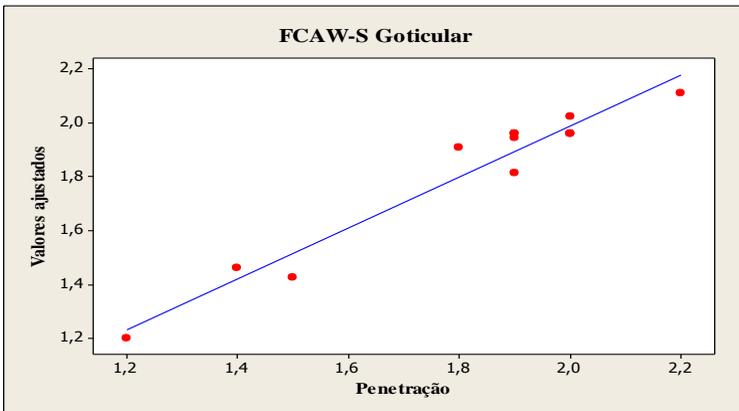


Figura 5.41 - Gráfico da correlação (R<sup>2</sup>) entre os valores ajustados e medidos da penetração do arco para o processo FCAW-S goticular na soldagem com simples deposição sobre tubos API 5L X70 com água na vazão de 40 l/min. e pressão 5 bar.

Analisando o gráfico da superfície de resposta da Figura 5.42, para o processo de soldagem FCAW-S goticular e tocha reta com simples deposição sobre tubos API 5L X70 com água na vazão de 40 l/min. e pressão 5 bar, pode-se retirar as seguintes informações:

- A penetração aumenta com o aumento da corrente, sendo evidente para alta velocidade de soldagem. Por outro lado, para baixa velocidade de soldagem (abaixo de 30 cm/min.) e alta corrente (acima de 145 A) ocorre uma redução na penetração do cordão de solda.

- Se for analisada a penetração somente em função da corrente de soldagem, sem o envolvimento da velocidade, a penetração aumenta com o aumento da corrente. Esta constatação pode ser verificada através da Figura 5.43.

- Para baixa corrente (abaixo de 135 A) a penetração diminui com o aumento da velocidade de soldagem. Este fato ocorre em função da energia de soldagem. Analisando melhor, a redução da penetração do cordão de solda foi muito pequena com aumento da velocidade de soldagem.

- Já para alta corrente (acima de 135 A), a penetração aumentou com o aumento da velocidade de soldagem. Neste processo ocorreu o mesmo fenômeno daquele do GMAW-P (item 5.2.4.1.1), quanto maior a velocidade de soldagem, menor se torna a sobreposição da poça e a tendência é um aumento na penetração.

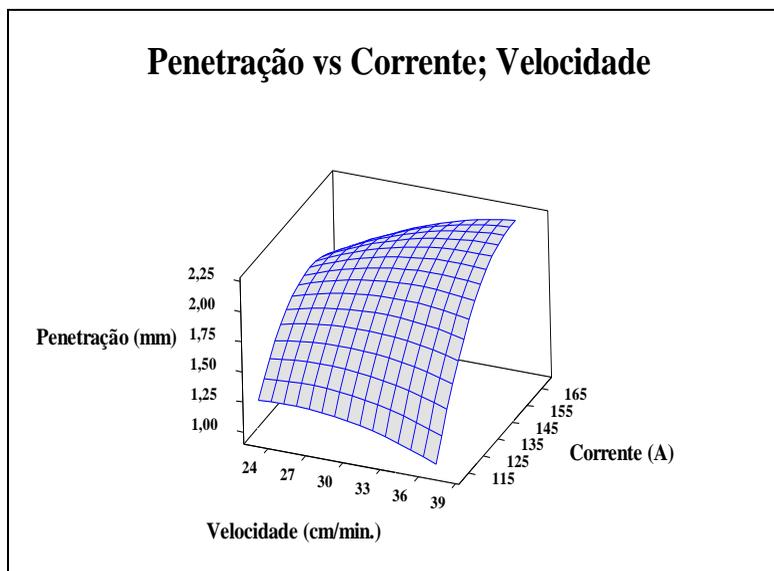


Figura 5.42 - Gráfico da superfície de resposta da penetração versus corrente e velocidade de soldagem para o processo FCAW-S goticular e tocha reta na soldagem com simples deposição sobre tubos API 5L X70 com água na vazão de 40 l/min. e pressão 5 bar.

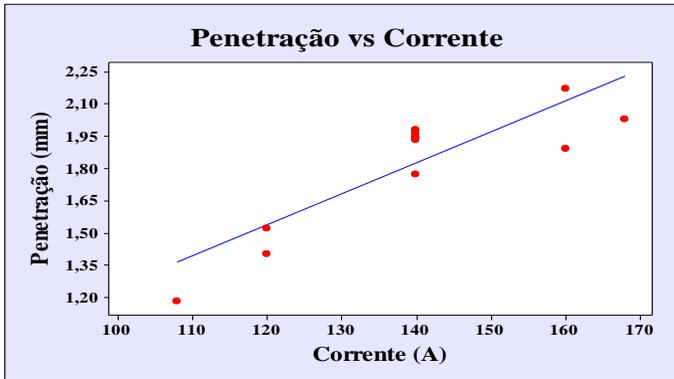


Figura 5.43 - Gráfico da superfície de resposta da penetração versus corrente para o processo FCAW-S goticular e tocha reta na soldagem com simples deposição sobre tubos API 5L X70 com água na vazão de 40 l/min. e pressão 5 bar.

#### 6.2.4.2.2 Reforço no cordão de solda

Nesta análise estatística foi verificado o comportamento do reforço no cordão de solda em função da corrente e da velocidade de soldagem para o processo FCAW-S goticular e tocha reta, na soldagem com simples deposição sobre tubos API 5L X70 com água na vazão de 40 l/min. e pressão de 5 bar.

O modelo estatístico tornou-se adequado com R-Sq (adj) de 95%. A equação 5.7, reforço (R) no cordão de solda em função da Corrente (Im) e velocidade de soldagem (Vs), foi obtida através de regressão linear múltipla pelo método da superfície de resposta.

$$R = - 2,7655 + 0,0456(Im) + 0,0280 (Vs) + 0,00044(Vs)^2 - 0,00078(Im)^2 - 0,00045(Im*Vs). \quad (\text{Eq. 5.7})$$

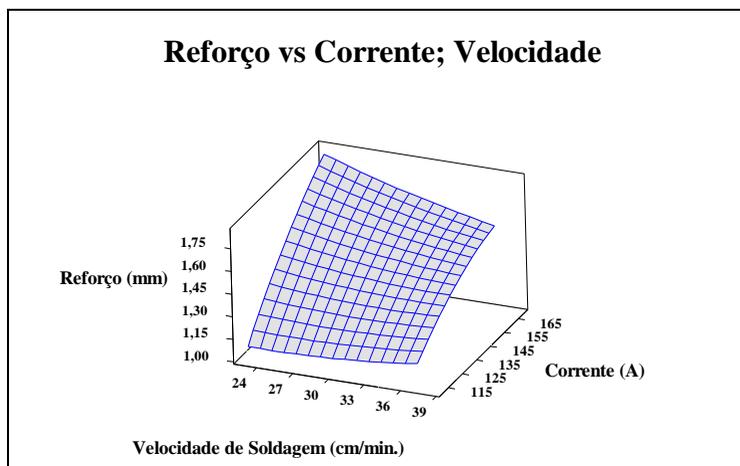


Figura 5.44 - Gráfico da superfície de resposta da reforço versus corrente e velocidade de soldagem para o processo FCAW-S goticular tocha reta na soldagem com simples deposição sobre tubos API 5L X70 com água na vazão de 40 l/min. e pressão 5 bar.

Analisando o gráfico da superfície de resposta da Figura 5.44, para o processo FCAW-S goticular e tocha reta na soldagem com simples deposição sobre tubos API 5L X70 com água na vazão de 40 l/min. e pressão 5 bar, pode-se retirar as seguintes informações:

- O reforço aumenta com o aumento da corrente. Esta constatação é mais evidente para baixa velocidade de soldagem. Mantidos os outros parâmetros fixos, a corrente foi diretamente proporcional ao reforço da solda. Resultado semelhante ao obtido para o processo de soldagem GMAW-P (item 5.2.4.1.2).
- Para alta corrente (acima de 135 A) o reforço diminui com o aumento da velocidade de soldagem. É comum ocorrer este comportamento durante a soldagem com qualquer processo, mantidas as outras variáveis fixas.
- Para baixa corrente (abaixo de 135 A) o reforço aumenta com o aumento da velocidade de soldagem. Para esta condição, como descrito no item 5.2.4.2.1, ocorreu uma redução na penetração, com aumento da velocidade de soldagem. Se mantidas as outras variáveis fixas, se ocorrer uma redução na penetração deve-se obrigatoriamente ocorrer um aumento do reforço do cordão de solda para manter o mesmo volume depositado.

### 6.2.4.2.3 Largura do cordão de solda.

Foi verificado o comportamento da largura do cordão de solda em função da corrente e velocidade de soldagem para o processo FCAW-S goticular e tocha reta, na soldagem com simples deposição sobre tubos API 5L X70 com água na vazão de 40 l/min. e pressão 5 bar.

O modelo estatístico tornou-se adequado com R-Sq (adj) de 96%. A equação 5.8, largura (L) no cordão de solda em função da Corrente (Im) e velocidade de soldagem (Vs), foi obtida através de regressão linear múltipla pelo método da superfície de resposta.

$$L = -3,0035 + 0,1236(I_m) + 0,0158(V_s) - 0,0038(V_s)^2 - 0,00035(I_m)^2 + 0,0010(I_m*V_s). \quad (\text{Eq. 5.8})$$

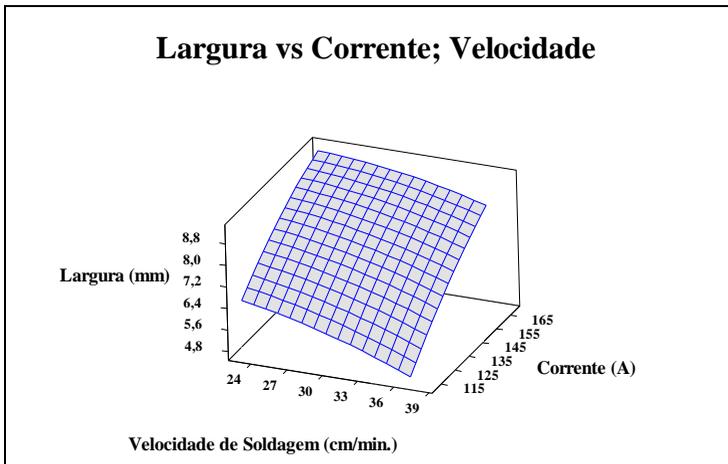


Figura 5.45 - Gráfico da superfície de resposta da largura versus corrente e velocidade de soldagem para o processo FCAW-S goticular tocha reta na soldagem com simples deposição sobre tubos API 5L X70 com água na vazão de 40 l e pressão 5 bar.

Analisando o gráfico da superfície de resposta da Figura 5.45, para o processo FCAW-S goticular e tocha reta na soldagem com simples deposição sobre tubos API 5L X70 com água na vazão de 40 l/min. e pressão 5 bar, pode-se retirar as seguintes informações:

- A largura aumenta com o aumento da corrente e foi maior para baixas velocidades de soldagem. Mantidos os outros parâmetros fixos, a corrente é diretamente proporcional à largura da solda.

- A largura diminui com o aumento da velocidade de soldagem, e foi menor para baixas correntes. Mantidas as outras variáveis constantes, a velocidade de soldagem é inversamente proporcional à largura.
- A largura do cordão de solda teve o comportamento semelhante daquele obtido para o processo de soldagem GMAW-P (item 5.2.4.1.3).

#### **6.2.4.2.4 Análise metalográfica nos cordões de solda.**

A Figura 5.46 mostra as macrografias após a soldagem FCAW-S goticular e tocha reta em tubos API 51 X70 na espessura de 3,2 mm. Durante a soldagem o tubo foi pressurizado com 5 bar na vazão de 40 l/min. e água como fluido.

As variáveis de soldagem e os perfis dos cordões de solda podem ser encontrados na Tabela 5.10. A numeração das amostras na foto do ensaio macrográfico está de acordo com os da Tabela 5.10. Pelo ensaio macrográfico (Figura 5.46) não se constatou descontinuidades também não ocorreram penetração excessiva nem perfuração. Não foi observada deflexão radial na parede interna do tubo.

A maior penetração ocorreu na soldagem com corrente de 160 A e velocidade de soldagem de 25 cm/min. e foi de 2,2 mm, bem menor que a espessura do tubo que era de 3,2 mm. Estes valores constam na Tabela 5.11 e na Figura 5.46 amostra 9F.

A Figura 5.46 mostra que a penetração foi uniforme, apresentando um ótimo perfil de penetração, boa molhabilidade e boa relação entre penetração, reforço e largura. Ideal para a utilização em qualquer situação na soldagem de reparo de dutos em operação, tanto para reparo por deposição de solda como para reparo por dupla calha.

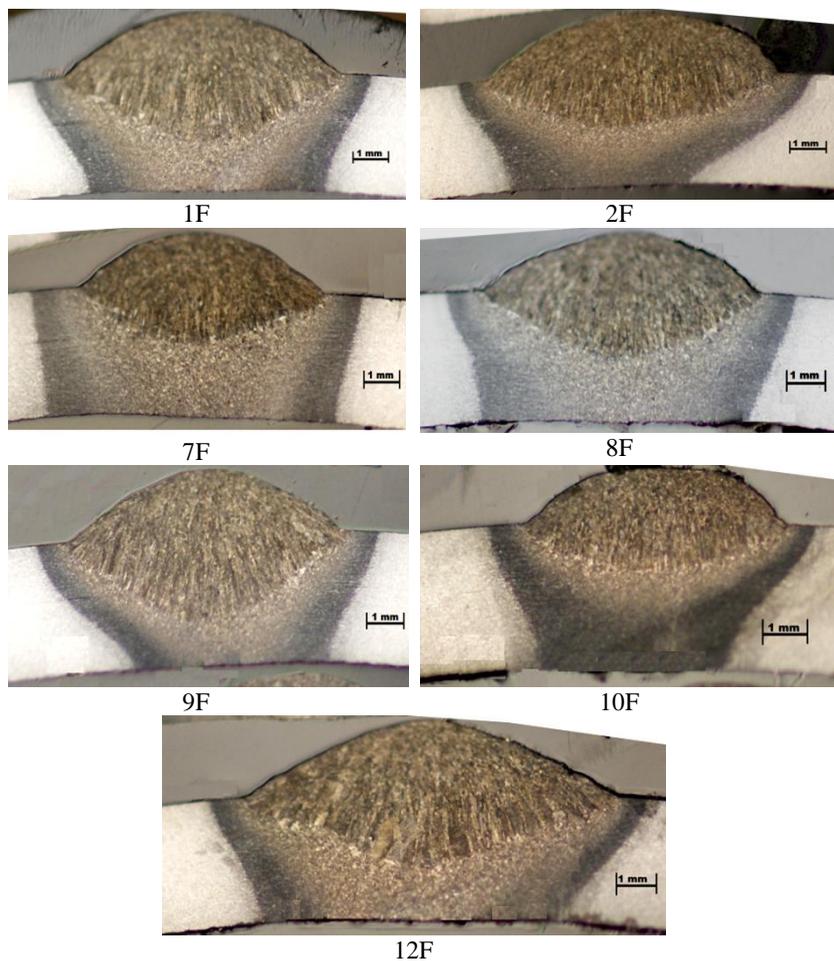


Figura 5.46 - Macrografias após a soldagem FCAW-S goticular e tocha reta em tubos API 51 X70, Vazão 40 l/min. e pressão de 5 bar, na espessura de 3,2 mm.

#### **6.2.4.2.5 Determinação da temperatura na parede interna do tubo**

Por meio do programa de computador desenvolvido por Santos (SANTOS, 2001) foram determinadas as temperaturas internas da parede da tubulação através da solução analítica para a transferência de calor na soldagem. A Tabela 5.11 mostra os valores obtidos da eficiência térmica ( $\eta$ ), da distribuição do fluxo de calor ( $\sigma$ ) e da temperatura da parede interna, na condição de soldagem com o processo FCAW-S goticular e tocha reta em tubos API 51 X70 na espessura de 3,2 mm. Durante a soldagem o tubo foi pressurizado com pressão de 5 bar na vazão de 40 l/min. e água como fluido.

Os valores determinados para a temperatura interna no tubo foram semelhantes ao do item 5.2.4.1.5 com GMAW-P.

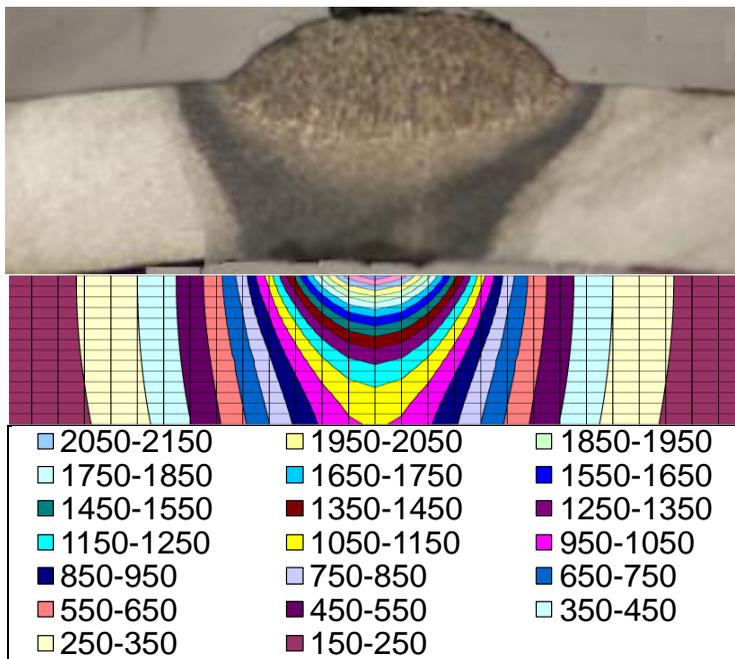
Os resultados mostram que apesar de ter atingido elevada temperatura na parede interna do tubo, não ocorreu perfuração nem furo (Tabela 5.11). Foram feitas pesquisas, com medição da temperatura do tubo, que levaram a estabelecer a temperatura de pico igual a 1260 °C como limite. No programa do Instituto Battelle apenas foi utilizado esse critério que previamente foi obtido experimentalmente.

A Figura 5.47 apresenta a amostra “10 F” com suas isolinhas de temperatura máxima e o ciclo térmico imposto durante a soldagem. De acordo com a Tabela 5.11 a máxima temperatura na parede interna do tubo foi de 1043 °C.

Já a Figura 5.48 apresenta a amostra “9 F” com suas com suas isolinhas de temperatura máxima e o ciclo térmico imposto durante a soldagem. De acordo com a Tabela 5.11 a máxima temperatura na parede interna do tubo foi de 1356 °C.

Tabela 5.11 - Parâmetros de soldagem dados da temperatura na parede interna do tubo API-5L X70 com processo FCAW-S goticular tocha reta, com água na vazão de 40 l/min. e pressão 5 bar.

Amostra	Corrente (A)	Tensão (V)	Velocid. Soldagem (cm/min)	Espessura do tubo (mm)	Penetração (mm)	ETA $\eta$ %	Sigma $\sigma$ (mm)	Temperatura parede Interna (°C)
1F	140	20	30	3,24	1,83	52,6	1,93	1247
2F	140	21	23	3,26	1,77	46,3	1,97	1235
3F	140	20	30	3,17	1,98	54,6	2,01	1327
4F	120	19,1	35	1,41	1,40	55,1	1,56	1059
5F	160	20,5	25	3,16	1,88	43,6	2,13	1295
6F	140	20	30	3,24	1,97	55,6	2,03	1295
7F	120	19,1	25	3,20	1,48	58,3	2,17	1180
8F	140	20	37	3,21	1,88	63,1	2,13	1279
9F	160	20,7	25	3,22	2,17	57,5	2,31	1356
10F	108	18,7	30	3,23	1,18	59,8	1,90	1043
11F	140	20	30	3,24	1,91	53,7	1,93	1271
12F	168	20,6	30	3,29	1,95	44,9	1,99	1275
13F	140	20	30	3,14	1,94	55,2	2,12	1315



Isolinhas de temperatura máxima ao longo da seção transversal

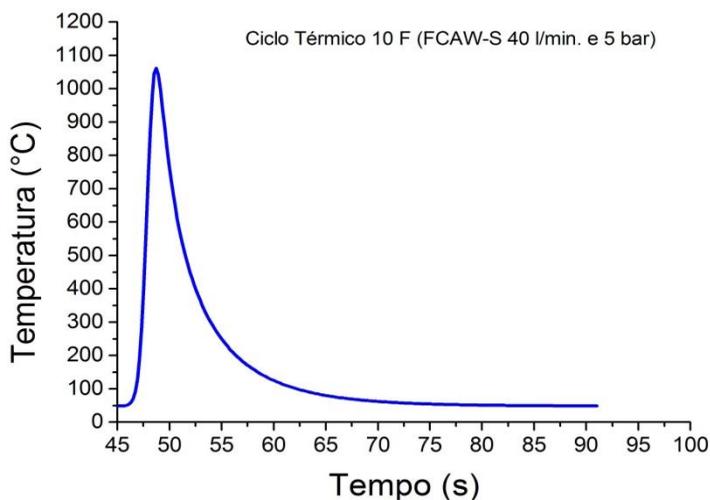
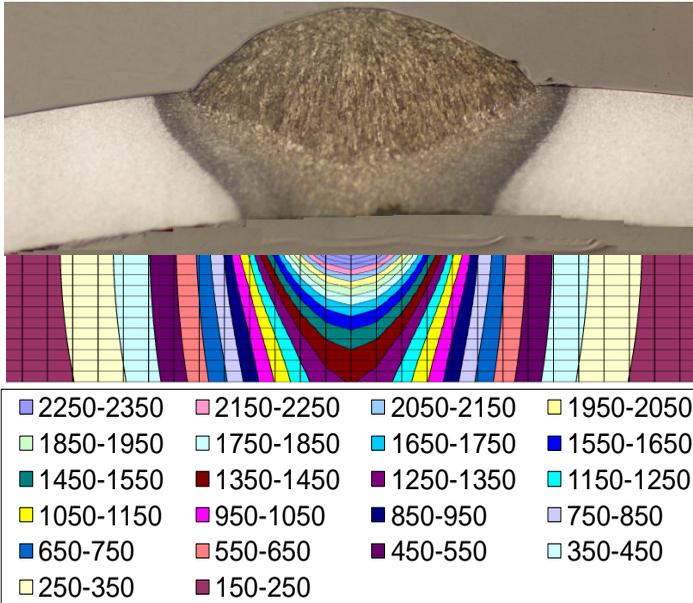


Figura 5.47 – Amostra “10 F” com suas isolinhas de temperatura máxima e o ciclo térmico imposto durante a soldagem com FCAW-S na vazão de 40 l/min. e pressão de 5 bar, na parede interna do tubo.



Isolinhas de temperatura máxima ao longo da seção transversal

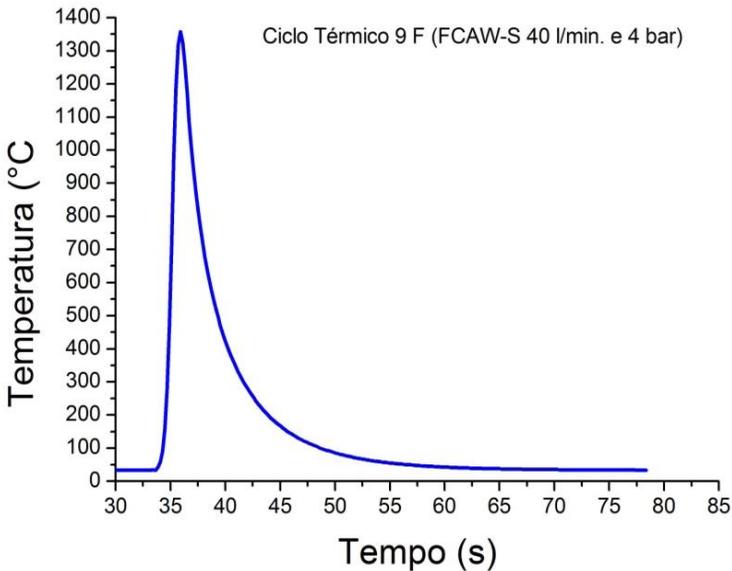


Figura 5.48 – Amostra “9 F” com suas isolinhas de temperatura máxima e o ciclo térmico imposto durante a soldagem com FCAW-S na vazão de 40 l/min. e pressão de 5 bar, na parede interna do tubo.

### **6.3 Qualificação de procedimento de soldagem de acordo com apêndice B da norma API 1104.**

#### **6.3.1 Processo GMAW-P empurrando; tubo e calha material API 5L X70; metal de adição AWS ER 80S-G; vazão 80 l/min. e pressão 2 bar.**

Para a qualificação do procedimento de soldagem para reparo de dutos em operação foi seguido o que prescreve o apêndice B da norma API 1104. Foram executadas soldagens em juntas de topo e de ângulo, e retirados corpos de prova para ensaios conforme Tabela 3.4.

A Figura 5.49 mostra solda de topo calha/tubo, onde se observam cordões de solda com bom acabamento, boa molhabilidade e ausência de descontinuidades visuais.

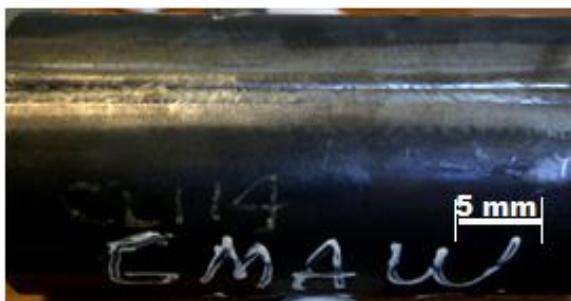


Figura 5.49 – Solda de topo calha-tubo material API 5L X70 e metal de adição AWS ER 80S-G no processo GMAW-P. O tubo contém água como fluido interno na vazão de 80 l/min. e pressão de 2 bar.

##### **6.3.1.1 Ensaio de Tração**

Os valores obtidos de 578 MPa e 567 MPa de resistência à tração nos ensaios de tração para solda de topo calha-tubo no processo GMAW-P foram satisfatórias (superiores ao mínimo especificado pela norma conforme Tabela 4.5). A Figura 5.50 mostra os corpos de prova do ensaio de tração. Nestes, observam-se fraturas dúcteis ocorridas no metal de base, demonstrando que as soldas foram bem executadas.



Figura 5.50 – Corpos de prova dos ensaios de tração material API 5L X70 e metal de adição AWS ER 80S-G no processo GMAW-P. O tubo contém água como fluido interno na vazão de 80 l/min. e pressão de 2 bar.

### 6.3.1.2 Ensaio de Dobramento

Do mesmo modo os ensaios de dobramento de face e de raiz executados na solda de topo do tubo com calha no processo GMAW-P na vazão de 80 l/min. e pressão de 2 bar foram satisfatórios. Pela Figura 5.51 pode-se constatar em um corpo de prova dobrado de face e um de raiz a ductilidade das juntas soldadas e ausência de descontinuidade nas curvaturas das dobras.



DF – Dobramento Face



DR – Dobramento Raiz

Figura 5.51 - Corpos de prova dos ensaios de dobramento de face e raiz material API 5L X70 e metal de adição AWS ER 80S-G no processo GMAW-P. O tubo contém água como fluido interno na vazão de 80 l/min. e pressão de 2 bar.

### 6.3.1.3 Ensaio de Fratura (*Nick-Break*)

Na execução dos ensaios de fratura, como prescrito na norma API 1104, mostram que as faces das fraturas não apresentaram descontinuidades relevantes e, portanto, foram considerados satisfatórios. A face da fratura mostrou regiões brilhantes típicas de “olho de peixe” (*eye fish*), conforme indicado pelas setas na Figura 5.52. Devido sua aparência bem estruturada e brilhante ocorre um contraste com a fratura final dúctil.

É importante frisar que este tipo de descontinuidade, conhecida como olho de peixe, que resulta de uma concentração de hidrogênio em um poro ou ao redor de uma inclusão, ainda não consta na norma API 1104 como critério de aprovação ou reprovação da solda quando identificado.

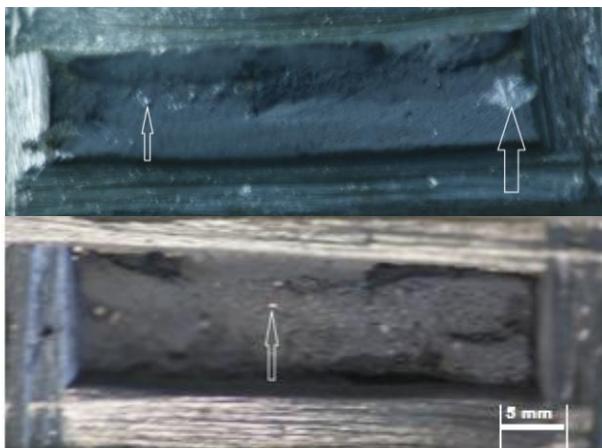


Figura 5.52 - Aspecto dos corpos de prova dos ensaios de fratura mostrando regiões brilhantes típicas de “olho de peixe” no processo GMAW-P. O tubo contém água como fluido interno na vazão de 80 l/min. e pressão de 2 bar.

A Figura 5.53 obtida através do MEV mostra região localizada de fratura frágil. Este tipo de fratura induzida pelo hidrogênio usualmente do tipo quase-clivagem ocorre em uma curta distância e pára (BAILEY, 2010), por isso, limita-se a uma região central circundado por fratura dúctil (*dimple*).

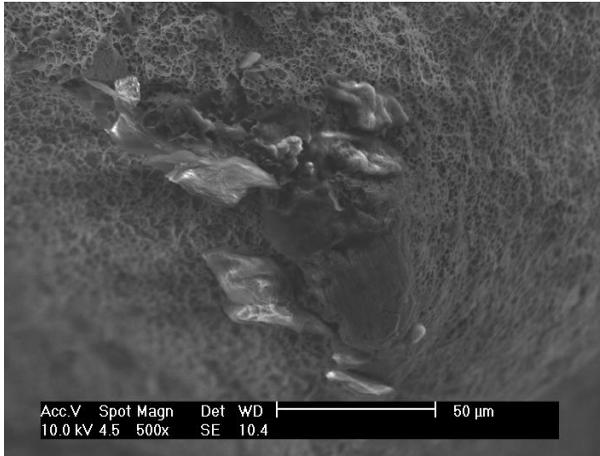


Figura 5.53 – Detalhe do aspecto da fratura revelado por MEV (região da seta CP inferior Figura 5.52), mostrando uma região central de quase-clivagem.

#### 6.3.1.4 Ensaio Macrográfico e Dureza

O ensaio macrográfico foi executado para a junta de ângulo (solda de filete) entre a calha e o tubo. A Figura 5.54 mostra uma macrografia do tubo com a calha no processo GMAW-P na vazão de 80 l/min. e pressão 2 bar. Na macrografia não se constata discontinuidades, resultando em uma solda satisfatória em conformidade com a norma API 1104. O vazio existente no fundo do cordão de solda entre o tubo e a calha (conforme indicado pela seta) é proveniente da folga entre os elementos que estão sendo soldados, não sendo motivo de reprovação da solda.

A parede do tubo foi rebaixada por usinagem até 4,8 mm, percebendo-se baixa penetração do cordão de solda. Deduz-se que para os mesmos parâmetros de soldagem na mesma pressão e vazão, e também na mesma espessura, podem-se reparar dutos em operação com muita segurança sem a ocorrência de perfuração ou furo.

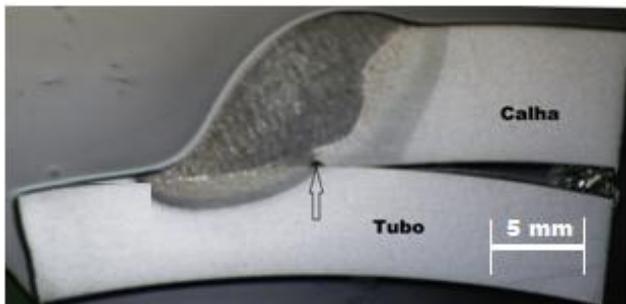


Figura 5.54 - Macrografia da calha-tubo material API 5L X70 e metal de adição AWS ER 80S-G no processo GMAW-P. O tubo contém água como fluido interno na vazão de 80 l/min. e pressão de 2 bar.

O resultado do perfil de dureza sobre o corpo de prova do ensaio macrográfico (Figura 5.55), mostra que as maiores durezas encontradas foram para a zona fundida e início da ZAC para o tubo. A diferença da dureza na zona fundida entre o tubo e a calha foi em torno de 30 HV 0,3, este valor pode ser considerado irrelevante pela diferença muito pequena. Já para o início da ZAC a diferença foi em torno de 60 HV 0,3. A maior dureza para o tubo em relação à calha nestas regiões admite-se que seja em decorrência de haver um contato direto do tubo com a água, tendo como consequência uma maior taxa de resfriamento na região de contato.

De acordo com a norma da *British Standards* (BS 5135, 1984) o limite máximo de dureza é de 320 Vickers para evitar a trinca a frio para soldas de aços carbono ou de baixa liga. Apesar da maior dureza encontrada na zona fundida e início da ZAC (de 350 a 390 HV 0,3) na solda com o tubo, não se observou a presença da trinca a frio.

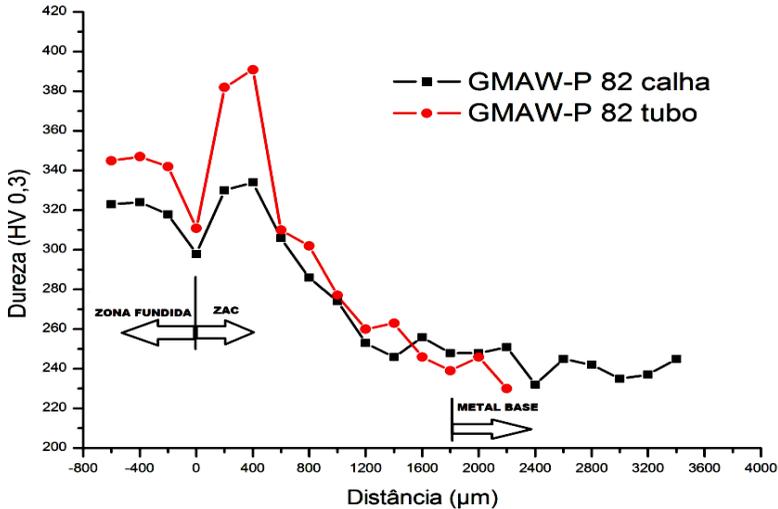


Figura 5.55 - Perfil de dureza na junta soldada material API 5L X70 e metal de adição AWS ER 80S-G no processo GMAW-P. O tubo contém água como fluido interno na vazão de 80 l/min. e pressão de 2 bar.

A Figura 5.56 mostra a micrografia da solda no lado do tubo no processo GMAW-P com de vazão de 80 l/min. e pressão de 2 bar. Observam-se na região do início da ZAC que os grãos estão maiores, este crescimento deve-se da alta temperatura atingida durante a soldagem.

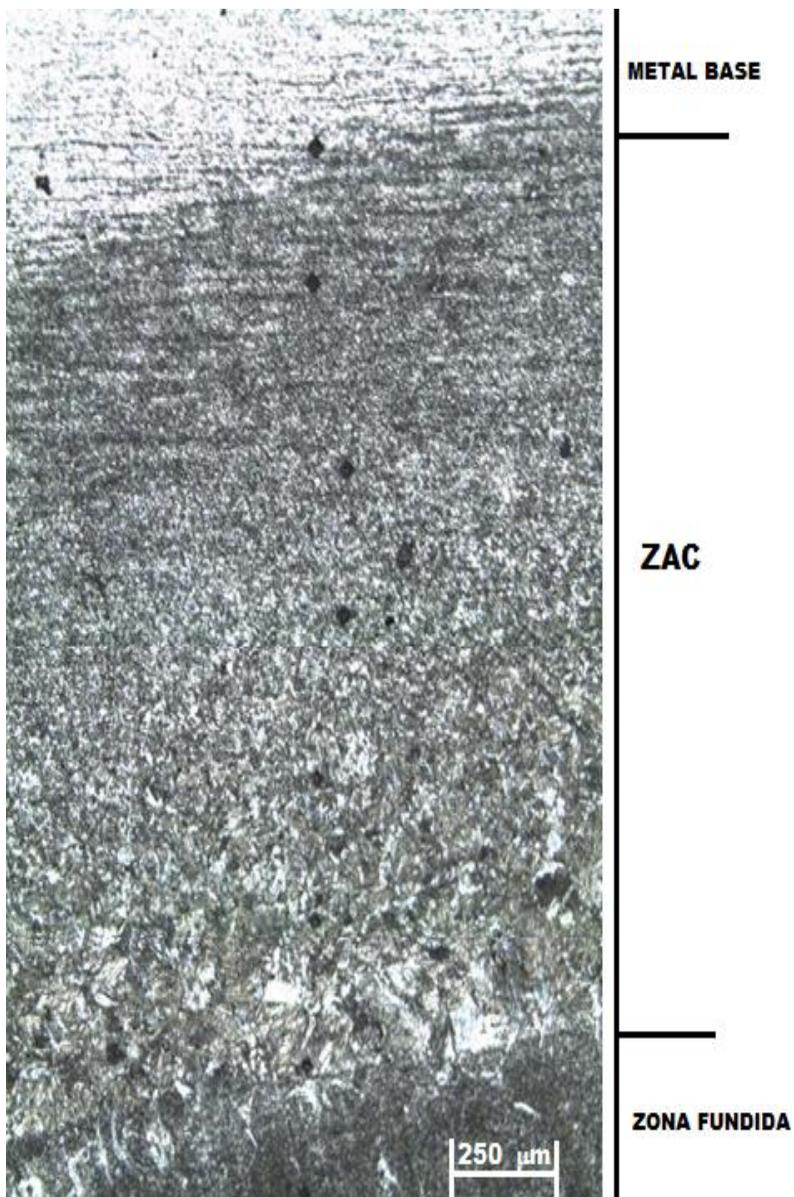


Figura 5.56- Microestrutura ao longo do ZF, ZAC e MB no lado do tubo material API 5L X70 e metal de adição AWS ER 80S-G no processo GMAW-P. O tubo contém água como fluido interno na vazão de 80 l/min . e pressão de 2 bar.

### 6.3.2 Processo GMAW-P empurrando; tubo e calha material API 5L X70; metal de adição AWS ER 80S-G; vazão 40 l/min. e pressão 5 bar.

A Figura 5.57 mostra a solda de topo calha-tubo, onde ambos os cordões de solda tem bom acabamento, boa molhabilidade e ausência de descontinuidades visuais.



Figura 5.57 – Solda de topo calha-tubo material API 5L X70 e metal de adição AWS ER 80S-G no processo GMAW-P. O tubo contém água como fluido interno na vazão de 40 l/min. e pressão de 5 bar.

#### 6.3.2.1 Ensaio de Tração

Os valores obtidos de 575 e 568 MPa de resistência a tração nos ensaios de tração para solda de topo calha/tubo no processo GMAW-P foram superiores ao mínimo especificado por norma. Portanto, os resultados do ensaio foram satisfatórios. A Figura 5.58 mostra os corpos de prova do ensaio de tração, na qual pode-se observar que as fraturas foram dúcteis e ocorreram no metais de base, demonstrando desta forma que as soldas foram bem executadas.



Figura 5.58 - Corpos de prova dos ensaios de tração material API 5L X70 e metal de adição AWS ER 80S-G no processo GMAW-P. O tubo contém água como fluido interno na vazão de 40 l/min. e pressão de 5 bar.

### 6.3.2.2 Ensaio de Dobramento

O ensaio de dobramento de face e de raiz executado na solda de topo calha/tubo no processo GMAW-P com vazão de 40 l/min. e pressão de 5 bar mostram resultados satisfatórios. A Figura 5.59 mostra um corpo de prova dobrado de face e um de raiz, podendo-se observar a ductilidade das juntas soldadas, verificam-se nas curvaturas das dobras ausência de descontinuidade.



Figura 5.59 - Corpos de prova dos ensaios de dobramento de face e raiz material API 5L X70 e metal de adição AWS ER 80S-G no processo GMAW-P. O tubo contém água como fluido interno na vazão de 40 l/min. e pressão de 5 bar.

### 6.3.2.3 Ensaio de Fratura (*Nick-Break*)

As faces da fratura do ensaio como mostra na Figura 5.60 não apresentaram descontinuidades relevantes e, portanto foram consideradas satisfatórias. Podem-se observar, nas setas indicativas, regiões brilhantes típica de “olho de peixe” (*eye fish*) devido sua aparência bem estruturada e brilhante ocorre um contraste com a fratura final dúctil.

A presença deste tipo de descontinuidade conhecida como olho de peixe, de acordo com a literatura (BAILEY, 2010), não é motivo de rejeição da junta soldada.

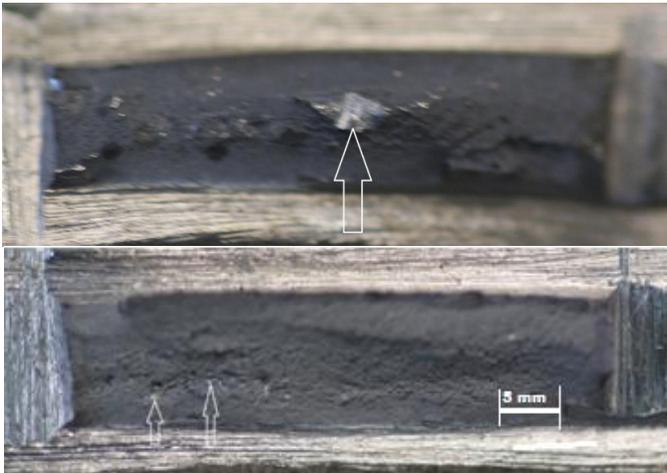


Figura 5.60 - Aspecto dos corpos de prova dos ensaios de fratura mostrando regiões brilhantes típicas de “olho de peixe” no processo GMAW-P. O tubo contém água como fluido interno na vazão de 40 l/min. e pressão de 5 bar.

A Figura 5.61 obtida através MEV mostra uma fragilização por hidrogênio muito usual na superfície de fratura em corpo de prova soldado sem tratamento térmico. Este fato ocorreu pelo uso de metal de adição com mais alta resistência que o metal de base.

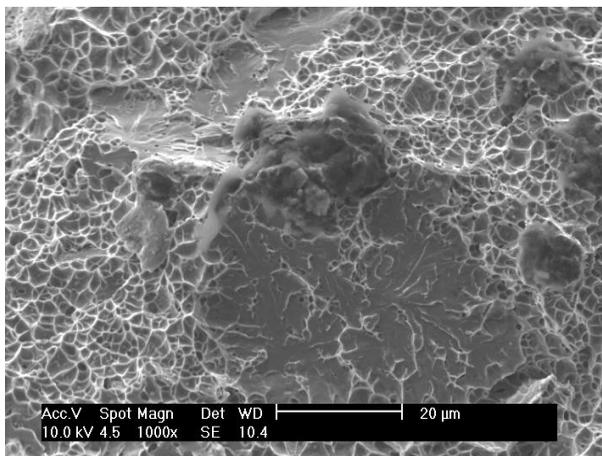


Figura 5.61 - Fratografia de um corpo de prova de fratura (*nick-break*) no processo GMAW-P. O tubo contém água como fluido interno na vazão de 40 l/min. e pressão de 5 bar.

#### 6.3.2.4 Ensaio Macrográfico e Dureza

A Figura 5.62 mostra uma macrografia da solda do tubo com a calha no processo GMAW-P na vazão de 40 l/min. e pressão de 5 bar. Esta condição de baixa vazão e de alta pressão é mais propícia para a ocorrência da perfuração (ver item 5.2.2). A macrografia não revelou descontinuidades; portanto a junta soldada é considerada aprovada.



Figura 5.62- Macrografia da calha-tubo material API 5L X70 e metal de adição AWS ER 80S-G no processo GMAW-P. O tubo contém água como fluido interno na vazão de 40 l/min. e pressão de 5 bar.

O perfil de dureza sobre o corpo de prova do ensaio macrográfico (Figura 5.63), mostra maior dureza na zona fundida e

início da ZAC para o tubo. A diferença da dureza na zona fundida entre o tubo e a calha foi em torno de 40 HV 0,3. Já para o início da ZAC a diferença apresentada foi em torno de 50 HV 0,3.

Mesmo nesta condição de menor vazão e de maior pressão a dureza teve comportamento similar se comparado ao anterior de maior vazão (80 l/min.) e de menor pressão (2 bar).

Mesmo apresentando dureza acima do limite recomendado pela norma (BS 5135, 1984), na zona fundida e início da ZAC (350 HV0,3) na solda com o tubo, não se observou a presença da trincas.

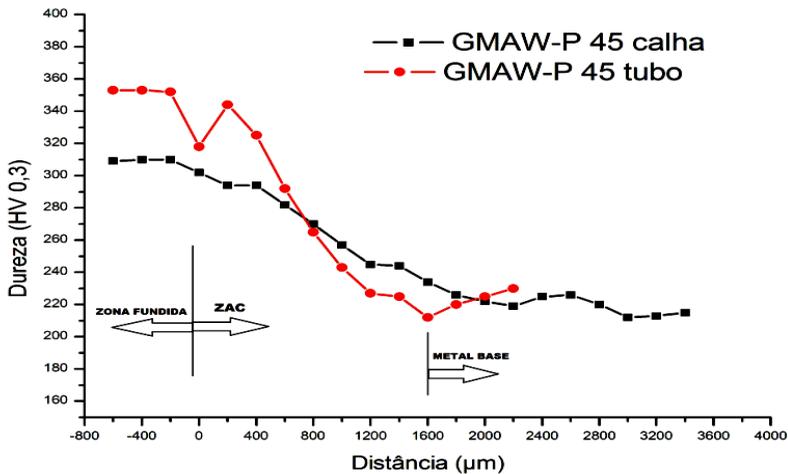


Figura 5.63 - Perfil de dureza na junta soldada material API 5L X70 e metal de adição AWS ER 80S-G no processo GMAW-P. O tubo contém água como fluido interno na vazão de 40 l/min. e pressão de 2 bar.

### 6.3.3 Processo FCAW-S goticular tocha reta; tubo e calha material API 5L X70; metal de adição AWS E 71T-11; vazão 80 l/min. e pressão 2 bar.

A Figura 5.64 mostra a solda de topo da calha com tubo e Figura 5.65 a solda de filete. Os cordões de solda têm bom acabamento, boa molhabilidade e ausência de descontinuidades visuais.



Figura 5.64 – Solda de topo da calha-tubo material API 5L X70 e metal de adição AWS E 71T-11 no processo FCAW-S. O tubo contém água como fluido interno na vazão de 80 l/min. e pressão de 2 bar.



Figura 5.65 – Solda de filete da calha-tubo material API 5L X70 e metal de adição AWS E 71T-11 no processo FCAW-S. O tubo contém água como fluido interno na vazão de 80 l/min. e pressão de 2 bar.

#### 6.3.3.1 Ensaio de Tração

Os valores de 581 e 594 MPa de resistência á tração nos ensaios de tração para solda de topo calha/tubo no processo FCAW foram superiores ao mínimo especificado por norma. Portanto, os resultados do ensaio foram satisfatórios. A Figura 5.66 mostra os corpos de prova do ensaio de tração, na qual pode-se observar que as fraturas foram dúcteis e ocorreram no metais de base, demonstrando desta forma que as soldas foram bem executadas



Figura 5.66 – Corpos de prova dos ensaios de material API 5L X70 e metal de adição AWS E 71T-11 no processo FCAW-S. O tubo contém água como fluido interno na vazão de 80 l/min. e pressão de 2 bar.

### 6.3.3.2 Ensaio de Dobramento

Os ensaios de dobramento de face e de raiz, executados na solda de topo da calha-tubo no processo FCAW-s com vazão de 80 l/min. e pressão de 2 bar, mostraram resultados satisfatórios. A Figura 5.67 mostra um corpo de prova dobrado de face e um de raiz livre de discontinuidades na curvatura da dobra.



Figura 5.67 - Corpos de prova dos ensaios de dobramento de face e de raiz material API 5L X70 e metal de adição AWS E 71T-11 no processo FCAW-S. O tubo contém água como fluido interno na vazão de 80 l/min. e pressão de 2 bar.

### 6.3.3.3 Ensaio de Fratura (*Nick-Break*)

A Figura 5.68 mostra as faces fraturadas após o ensaio, as quais como nos anteriores não apresentaram descontinuidades relevantes e, portanto foram consideradas satisfatórias. As setas indicam regiões brilhantes típicas de olho de peixe como já comentado no item 5.3.2.3. Novamente, este tipo anomalia na solda não é causa para reprovação. Através do MEV, vê-se uma estrutura típica de trinca com faceta característica de uma fratura frágil como mostra a Figura 5.69.

Nas demais regiões da fratura (fora do olho de peixe), observado através do MEV, constata-se a presença de alvéolos, sendo esta a principal característica microfractográfica de uma fratura dúctil. A Figura 5.70 mostra a fractografia de um corpo de prova soldado no processo FCAW-S com vazão de 80 l/min. e pressão de 2 bar, onde pode-se ver alvéolos grandes e profundos.

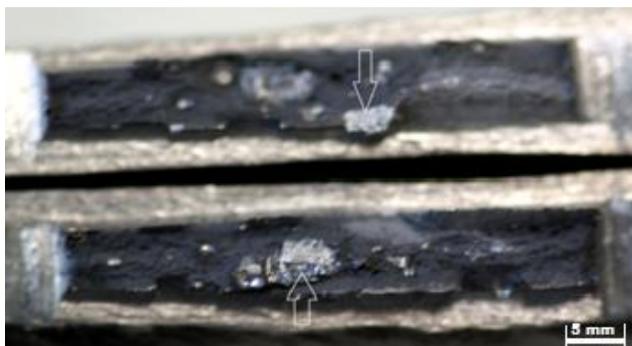


Figura 5.68 - Aspecto dos corpos de prova dos ensaios de fratura (*Nick-break*) mostrando as regiões brilhantes típica de “olho de peixe” no processo FCAW-S. O tubo contém água como fluido interno na vazão de 80 l/min. e pressão de 2 bar.

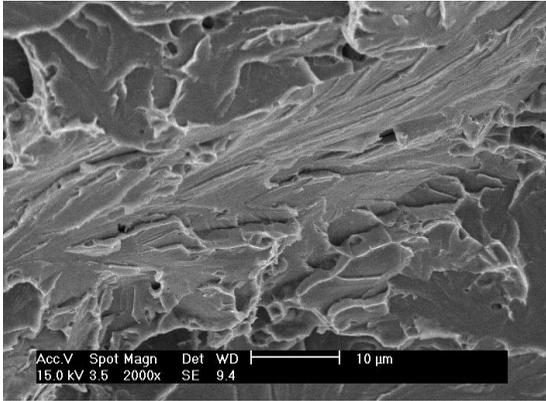


Figura 5.69 – Fratografia de um corpo de prova de fratura (*nick-break*) no processo FCAW-S. Contendo água como fluido interno na vazão de 80 l/min. e pressão de 2 bar. O tubo contém a estrutura típica de trinca facetada em um olho de peixe.

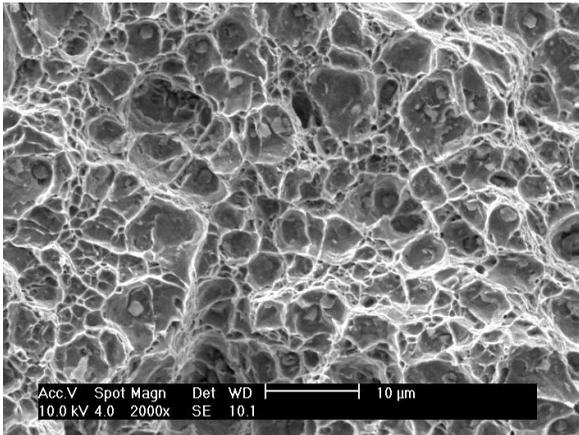


Figura 5.70 – Fratografia de um corpo de prova soldado no processo FCAW-S. O tubo contém água como fluido interno na vazão de 80 l/min. e pressão de 2 bar. Mostrando fratura dúctil com a presença de alvéolos.

#### 6.3.3.4 Ensaio Macrográfico e Dureza

A Figura 5.71 mostra uma macrografia do tubo com a calha no processo FCAW-S na vazão de 80 l/min. e pressão 2 bar, onde não se constatam discontinuidades, resultando em uma solda satisfatória em conformidade com a norma API 1104.

A parede do tubo foi rebaixada por usinagem até 4,8 mm. Este processo de soldagem apresentou baixa penetração do cordão de solda.

Tomando-se o devido cuidado quanto aos parâmetros de soldagem, pressão e vazão, pode-se reparar dutos em operação com muita segurança sem a ocorrência de perfuração ou furo.

O resultado do perfil de dureza realizado sobre o corpo de prova do ensaio macrográfico (Figura 5.72), mostra que as maiores durezas foram encontradas na zona fundida da solda com o tubo. A diferença da dureza na zona fundida entre o tubo e a calha foi em torno de 50 HV 0,3. Por outro lado, na ZAC a diferença da dureza entre o tubo e a calha foi muito pequena, podendo-se considerar insignificante.

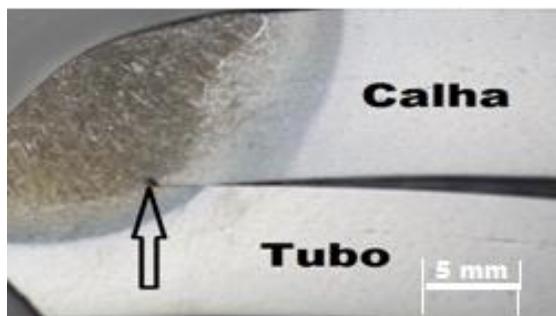


Figura 5.71 - Macrografia da calha-tubo material API 5L X70 e metal de adição AWS E 71T-11 no processo FCAW-S. O tubo contém água como fluido interno na vazão de 80 l/min. e pressão de 2 bar.

A maior dureza para o tubo em relação à calha nestas regiões admite-se que seja em decorrência de haver um contato direto do tubo com a água.

Mesmo com maior dureza encontrada na zona fundida e início da ZAC, de 440 a 380 HV 0,3 respectivamente, na solda com o tubo não se observou a presença da trinca a frio.

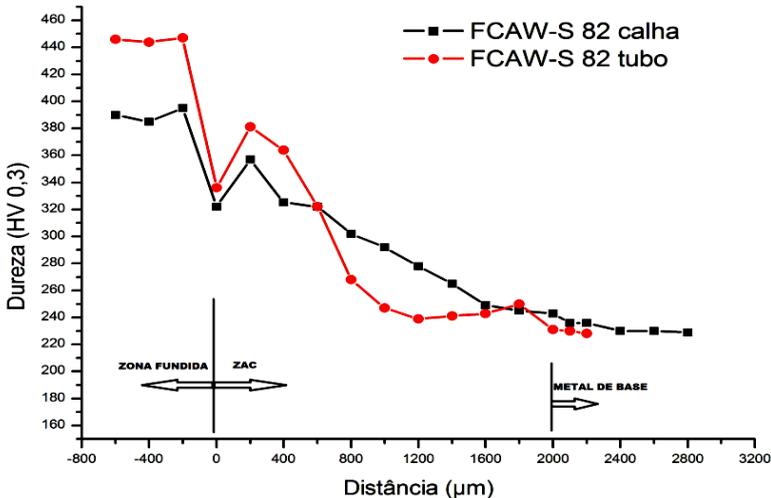


Figura 5.72 - Perfil de dureza na junta material API 5L X70 e metal de adição AWS E 71T-11 no processo FCAW-S. O tubo contém água como fluido interno na vazão de 80 l/min. e pressão de 2 bar.

### 6.3.4 Processo FCAW-S goticular tocha reta; tubo e calha material API 5L X70; metal de adição AWS E 71T-11; vazão 40 l/min. e pressão 5 bar.

As Figura 5.73 e Figura 5.74 mostram, respectivamente, solda de topo e de filete calha-tubo. Ambos os cordões de solda apresentam bom acabamento, boa molhabilidade e ausência de descontinuidades visuais.



Figura 5.73 – Solda de topo calha-tubo material API 5L X70 e metal de adição AWS E 71T-11 no processo FCAW-S. O tubo contém água como fluido interno na vazão de 40 l/min. e pressão de 5 bar.



Figura 5.74 – Solda de filete calha-tubo material API 5L X70 e metal de adição AWS E 71T-11 no processo FCAW-S. O tubo contém água como fluido interno na vazão de 40 l/min. e pressão de 5 bar.

#### 6.3.4.1 Ensaio de Tração

Os valores de 594 e 614 MPa de resistência à tração nos ensaios de tração para solda de topo calha/tubo no processo FCAW foram superiores ao mínimo especificado por norma. A Figura 5.75 mostra os corpos de prova do ensaio de tração, onde a fratura do corpo de prova T1 (tração 1) ocorreu na zona fundida (solda) e frágil. O valor da tensão de ruptura foi superior (594 MPa) ao mínimo especificado por norma (min. 565 MPa). Por outro lado, a fratura do corpo de prova T2 foi dúctil e ocorreu no metal de base.



Figura 5.75 – Corpos de prova dos ensaios de tração material API 5L X70 e metal de adição AWS E 71T-11 no processo FCAW-S. O tubo contém água como fluido interno na vazão de 40 l/min. e pressão de 5 bar.

#### 6.3.4.2 Ensaio de Dobramento

Os ensaios de dobramento de face e de raiz, executados na solda de topo da calha-tubo no processo GMAW-P com vazão de 40 l/min. e

pressão de 5 bar mostraram resultados satisfatórios. A Figura 5.76 mostra os corpos de prova dobrados de face e de raiz. Pode-se observar a ductilidade da junta soldada na curvatura da dobra com ausência de descontinuidade.



Figura 5.76 - Corpos de prova dos ensaios de dobramento de face e de raiz material API 5L X70 e metal de adição AWS E 71T-11 no processo FCAW-S. O tubo contém água como fluido interno na vazão de 40 l/min. e pressão de 5 bar.

#### 6.3.4.3 Ensaio de Fratura (*Nick-Break*)

A Figura 5.77 mostra as faces fraturadas após o ensaio, não foi percebida nenhuma irregularidade e, portanto foram consideradas satisfatórias. Vê-se varias indicações de regiões brilhantes típicas de olho de peixe.

Na análise da fratura por MEV (Figura 5.78) foram observados vários vazios, na forma de poro, provavelmente provenientes do processo de soldagem com FCAW-S. Estes foram muito pequenos, não visíveis ao olho nu, portanto, não motivam a reprovação do procedimento de soldagem em conformidade com a norma.

Além disso, verifica-se a presença de alvéolos grandes e profundos (Figura 5.79), sendo esta a principal característica microfractográfica de uma fratura dúctil.

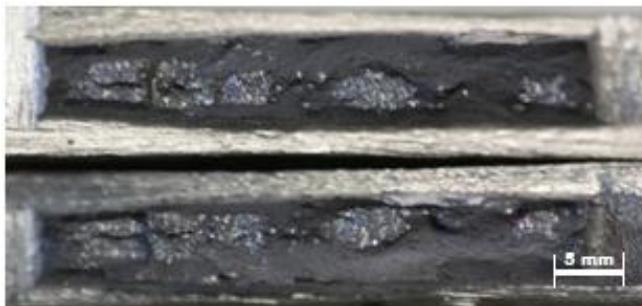


Figura 5.77 – Aspecto dos corpos de prova dos ensaios de fratura (*Nick-break*) no processo FCAW-S. O tubo contém água como fluido interno na vazão de 40 l/min. e pressão de 5 bar.

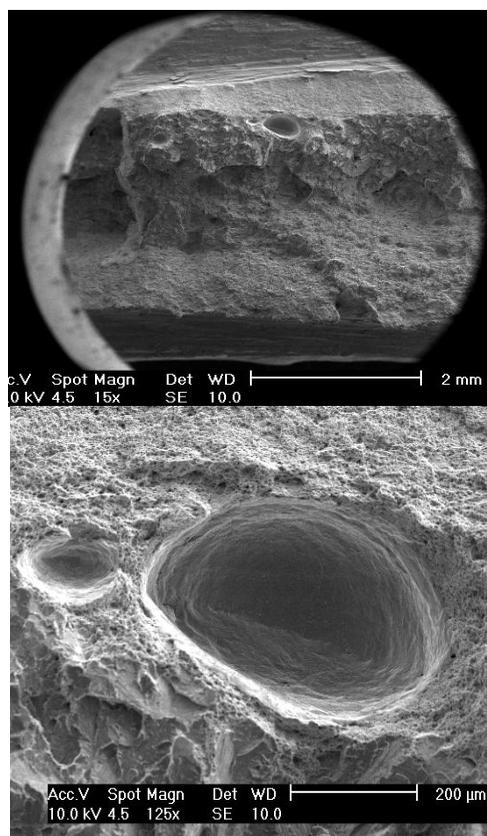


Figura 5.78 – Fratografia de um corpo de prova fraturado (*nick-break*) no processo FCAW-S, mostrando vazios em forma de poros muito pequenos.

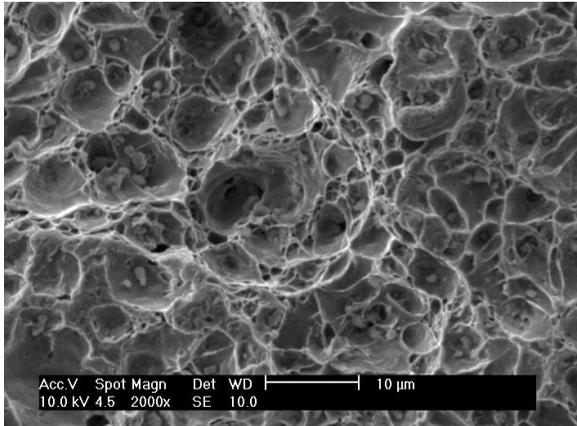


Figura 5.79 – Fratografia de um corpo de prova soldado no processo FCAW-S, mostrando fratura dúctil com a presença de alvéolos.

#### 6.3.4.4 Ensaio Macrográfico e Dureza

A Figura 5.80 mostra uma macrografia da calha-tubo no processo FCAW-S com vazão de 40 l/min. e de pressão de 5 bar. A junta soldada está limpa e isenta de qualquer descontinuidade, resultando em uma solda satisfatória em conformidade com a norma API 1104.



Figura 5.80 - Macrografia da calha-tubo material API 5L X70 e metal de adição AWS E 71T-11 no processo FCAW-S. O tubo contém água como fluido interno na vazão de 40 l/min. e pressão de 5 bar.

O perfil de dureza realizado sobre o corpo de prova do ensaio macrográfico (Figura 5.81) mostra que as maiores durezas encontradas foram para a zona fundida e início da ZAC para o tubo. A diferença da dureza na zona fundida e na ZAC entre o tubo e a calha foi em torno de

50 HV 0,3. A maior dureza da zona fundida é devido ao uso do metal de adição com alta resistência mecânica.

Mesmo com maior dureza encontrada na zona fundida e início da ZAC de 430 a 390 HV 0,3 respectivamente, na solda com o tubo, não se observou a presença de trinca a frio.

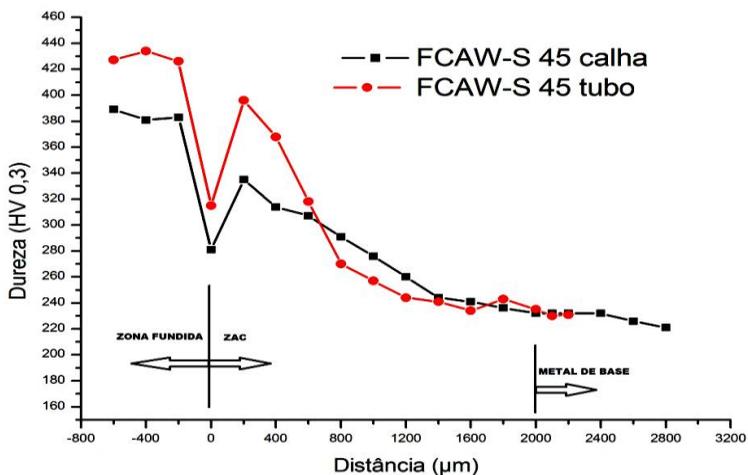


Figura 5.81 - Perfil de dureza na junta material API 5L X70 e metal de adição AWS E 71T-1 no processo FCAW-S. O tubo contém água como fluido interno na vazão de 40 l/min. e pressão de 5 bar.

## 7 CONCLUSÕES

A partir da análise bibliográfica e dos resultados apresentados nessa pesquisa concluiu-se que:

### 7.1 Quanto ao risco de ocorrência da trinca a frio na soldagem em operação de dutos de alta resistência.

- a) Os procedimentos de soldagem empregados, mesmo para metal base e de adição com alto carbono equivalente, proporcionando microestrutura martensítica e com alta dureza, não conduzem ao trincamento a frio. Admite-se que a ausência de trincas, mesmo para níveis de dureza superiores ao prescrito por norma na ZF e ZAC, deve-se ao uso de processos e de consumíveis com muito baixo teor de hidrogênio na solda.
- b) A folga maior entre a calha e o tubo (5,0 mm) do mesmo modo não resulta em nenhum trincamento.
- c) Mesmo condições mais próximas do real, para a soldagem de reparo em dutos operando com fluido interno e pressão com a técnica da dupla calha, com a restrição imposta à junta, não conduzem ao trincamento a frio.

### 7.2 Quanto ao risco de perfuração pelo arco de soldagem em dutos de pequena espessura.

- a) Tanto para o processo GMAW-P como para FCAW-S os níveis de energia de soldagem para ocorrência da perfuração são superiores aos obtidos com SMAW reportados na literatura.
- b) Na soldagem GMAW-P condição empurrando a poça de fusão, mantidas todas as outras variáveis de soldagem fixas, a penetração do cordão de solda é a menor.
- c) O processo de soldagem FCAW-S goticular e tocha reta apresenta bom resultado em relação à penetração.
- d) É impraticável a utilização do processo de soldagem FCAW-S tanto em corrente pulsada como em curto circuito, com tocha empurrando a poça de fusão, por apresentar descontinuidade do tipo de cavidade alongada.
- e) Na soldagem de simples deposição em tubos sem fluido interno, ao ultrapassar certo valor da corrente média, em

função da espessura, ocorre uma penetração excessiva sem ocorrer o furo.

- f) Na soldagem de simples deposição em tubos com fluido interno (água), ao ultrapassar certo valor da corrente média, ocorre furo sem a presença da penetração excessiva.

### **7.3 Aplicação dos processos de soldagem semi-automáticos de reparo de dutos em operação.**

#### **7.3.1 Processo GMAW em corrente pulsada empurrando a poça.**

- a) Para o intervalo pesquisado de velocidade de soldagem entre 25 a 35 cm/min. e de corrente entre 120 a 180 A percebeu-se que: i) a penetração cresce com aumento da corrente, constatação que é mais evidente para baixa velocidade de soldagem; ii) a penetração é máxima para uma velocidade de soldagem em torno de 30 cm/min.
- b) Mesmo apresentando alta temperatura na parede interna do tubo, superior ao limite máximo determinado na literatura para SMAW, não ocorreu perfuração.

#### **7.3.2 Processo FCAW-S transferência goticular tocha reta.**

- a) A penetração cresce com aumento da corrente, constatação que é mais evidente para alta velocidade de soldagem.
- b) Para baixa velocidade de soldagem (< 30 cm/min.) e alta corrente (> 145 A) ocorre uma redução na penetração do cordão de solda.
- c) Para baixa corrente (< 135 A) a penetração diminui com o aumento da velocidade de soldagem.
- d) Para alta corrente (> 135 A) a penetração aumenta com o aumento da velocidade de soldagem.

### **7.4 Qualificação de procedimento de soldagem de reparo de dutos em operação nos processos GMAW-P e FCAW-S de acordo com apêndice B da norma API 1104.**

- a) Todos os procedimentos de soldagem foram aprovados para reparo de dutos em operação. Para qualquer condição de pressão e vazão pesquisada, os ensaios mecânicos realizados foram satisfatórios.
- b) O surgimento da descontinuidade conhecida como olho de peixe no ensaio de fratura, ainda não consta na norma API 1104 como critério de aprovação ou reprovação da solda.

## 8 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho propiciou novas idéias sobre os fenômenos envolvidos na perfuração e trincas a frio de dutos em operação, quando estes são soldados com os processos GMAW-P e FCAW-S. Porém, há ainda muitos tópicos que necessitam ser aprofundados por pesquisas posteriores, dos quais podem ser citados:

- a) Melhorar a bancada de teste aumentando a capacidade de pressão e vazão, simular as condições mais próximas daquelas usadas durante a soldagem de reparo em dutos em operação.
- b) Aprofundar o estudo da influência da pressão no fenômeno da perfuração na soldagem em operação. Para isto, deverão ser feitos ensaios com diferentes níveis de pressão, vazão e da espessura do duto.
- c) Estudar o comportamento do aço de maior resistência mecânica na fabricação dos dutos (API 5L X-80 e X100) durante a soldagem em operação, da possibilidade da ocorrência da trinca a frio induzida pelo hidrogênio com alto grau de restrição da junta.
- d) Realizar medições com termopar em condições de ensaio com fluxo de água variando a vazão e a pressão, com o intuito de comparar as temperaturas estimadas teoricamente e as temperaturas reais.
- e) Estudar o fenômeno de ebulição para os diversos fluidos que costumam ser transportados por dutos submetidos à soldagem em operação.

## 9 REFERÊNCIAS

- ADOLFSSON, S. at al. Automatic detection of burn-through in GMA welding using a parametric model. **Mechanical Systems and Signal Processing**, 2006. P. 633-651.
- API 5L, Specification for Line Pipe, 42th Edition, **American Petroleum Institute**, Washington, 2000. 12 p.
- API Standard 1104 – Welding of Pipelines and Related Facilities, Nineteenth Edition, September 1999. 53 p.
- API Standard 1104 Appendix B – **In-Service welding**, 19th Edition, September 1999. 8 p.
- ASME B31G. Method for determining the remaining strength of corroded pipelines. U.S.A, ed. 1991.
- ASTM E384 – 72 (Reapproved 1979), Standard Methods for **Microhardness Vickers of Materials**, 1985, p 559-579.
- AWS A5.20, Specification for Carbon Steel Electrodes for Flux Cored Arc Welding. **American Welding Society**, Miami – USA, 2005. 34 p.
- BAILEY, Norman. Weldability of Ferritic Steels. **Woodhead Publishing Limited**, Second Edition (revised), 2010.
- BANG, I.W. at al. Numerical simulation of sleeve repair welding of in-service gas pipelines. **Welding Journal**, December 2002, p. 273-282.
- BATTELLE, Putting technology. Investigation and prediction of cooling rates during pipeline maintenance welding. **Report**, December 1991. 162 p.
- BEGG, Darren. Alternate Welding Processes for In-Service Welding. **Final Report**, BMT Group, April, 2009.
- BELANGER, R. J., PATCHETT. B. M. The Influence of Working Fluid Physical Properties on Weld Qualification for In-Service Pipelines. **Welding Journal**, August 2000, p. 209-214.

BONISZEWSKI, T. Self-Shielded Arc Welding. **Woodhead Publishing Ltd in Association with The Welding Institute**, Cambridge, England, 1992. 82 p.

BRUCE, W. A. Guidelines for weld deposition repair on pipelines. **Final Report**, Project PR-185-9734, Catalog No. 51782, Columbus/OH, 1998. 36 p.

BRUCE, W. A. Overview of in-service welding research at EWI. **First International conference on Welding onto In-service Petroleum gas and Liquid pipelines**. March 2000a, Wollongong – Australia.

BRUCE, W. A. Welding onto in-service thin-wall pipelines. **Final Report**, Project PR-185-9908, Columbus/OH, 2000b.

BRUCE, W. A., BECKETT, A. S. Maintenance Welding on the Trans-Alaska Pipeline. **Welding Journal**, July 2004. p. 48-52..

BS - 5135. Process of Arc Welding C and C-Mn Steel. **British Standards Institution**, 1984.

COE, F. R. et al. Welding Steel without Hydrogen Cracking. **Woodhead Publishing Limited**, Second Edition (revised), 2004.

DELGADO, L. C., Estudo e desenvolvimento do processo TIG com alimentação automática de arame. **Dissertação de mestrado POSMEC – UFSC**, Florianópolis, Setembro 2000. 82 p.

FAIRCHILD, D. P. et al. High Strength Steel – Beyond X-80. Application and Evaluation of High-Grade Linepipes in Hostile Environments. **Pipe Dreamer's Conference**. Yokoroma, Japan. November, 2002. p. 307-308.

FBTS. Inspetor de Soldagem. Apostila modulo I. **Editada pela Fundação Brasileira de Tecnologia da Soldagem**, 12<sup>a</sup> Edição, Rio de Janeiro, Janeiro de 2005.

FEDELE, R. Desafio da Soldagem em Tubulações. **Revista Metalurgia e Materiais**, Artigo: Maio de 2002, p. 322.

FILHO, Byron G. S. et al. Soldagem em operação de dutos sem fluxo de produto interno. **I Encontro Técnico de Soldagem**. Rio de Janeiro, Julho 2004. 10 p.

FRIEDRICH, J., SMITH, J. *Sleeve installations speed pipeline defect repair*. **Pipeline & Gas Journal**, p 36-38, December 1995.

HERNÁNDEZ, R. G. Manual del Soldador, Asociación Española de Soldadura y Tecnologías de Unión, **CESOL**, 10 Ed., 2002.

HILLENBRAND, H.G.; KALWA, C. High strength steels. **World Pipelines**. Vol. 2, n. 1, Jan/Feb. 2002. p. 57-61.

IRVING, Bob. Preheat: The Main defense against Hydrogen Cracking. **Welding Journal**, July 1992. p. 25-31..

KEJELIN, N. Z., Estudo do revestimento por soldagem e aspersão térmica de aços C-Mn para proteção contra corrosão. **Projeto de tese de doutorado POSMEC – UFSC**, Florianópolis, Novembro 2007. 63 p.

KIEFNER, J. F. et al. Development of guidelines for repair and hot tap welding on pressurized pipelines. **Final Report, Phase 1, to Repair and Hot Tap Welding group**. Battelle Columbus Division. Columbus, OH September 1981.

KIEFNER, J. F. et al. *Pipeline in-service repair manual*. **Final Report, Project PR-218-9307, Catalog No. L51716**, Worthington/OH, 1994.

KOU, Sindo. *Welding Metallurgy*. University of Wisconsin. **A John Wiley & sons, Inc., Publication**, Second Edition, 2003.

MALCOLN, J. G. Guide for understanding & specifying chemical composition of high strength line pipe steels. **Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração**, 2007. 37p.

MASCARENHAS, L. A. B. Estudo da aplicação do processo TIG alimentado para a soldagem em operação. **Dissertação de mestrado POSMEC – UFSC**, Florianópolis, Maio de 2005. 90 p.

METALS HANDBOOK, Vol 6. High-Strength structural and high-strength low-alloy steels: HSLA Steels. Properties and Selection: Iron

Steels and High Performance Alloys. **American Society of Metals**. 10<sup>o</sup> Ed., 1997. P. 1009 – 1102.

MÖSER, M., SCHMITDT, V. Fractography and Mechanism of Hydrogen Cracking – The Fisheye Concept. **Academy of Sciences of GDR**. German Democratic Republic. 1984. 10 p.

NIÑO, Carlos E. et al. Previsão da Perfuração na Soldagem em Operação pelo processo Eletrodo Revestido. **XXXIII CONSOLDA**. Caxias dos Sul. RS, Agosto 2007.

NORMA N-2163. Soldagem e trepanação em equipamentos, tubulações e dutos em operação. **Petrobras**. Revisão D, Junho de 2006. 31 p..

NOVICKI, Nilceu. Aplicação da aspensão térmica na soldagem em operação de tubulações com pequena espessura remanescente. **Tese de Doutorado, UFSC**, Florianópolis, Março de 2008. 157 páginas.

NOVICKI, Nilceu et al. Amanteigamento por Aspensão Térmica na Soldagem em Operação de Dutos de Pequena Espessura - Estabilidade e Penetração do Arco Voltaico. **Revista soldagem & Inspeção**, São Paulo, Vol.16, No. 3, p.243-255, Jul/Set 2011.

PAES, Marcelo T.P. et al. Procedimentos para soldagem de dutos e tubulações industriais em operação. **Relatório Técnico Final**, Rio de Janeiro/RJ, 2000. 42 paginas.

PAES, Marcelo T.P. et al. Soldagem em operação de dutos e tubulações. **I Encontro Técnico de Soldagem**. Rio de Janeiro, Julho 2004.

PALMER, A. C.; KING, R. A. Subsea pipeline Engineering. 2<sup>o</sup> Ed. **Pennwell Books**, 2008. 575 p.

PELLIZZARO, F., JUNIOR R. G. Desenvolvimento de procedimentos alternativos para soldagem de dutos. **2<sup>o</sup> Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo & Gás**. Rio de Janeiro, Junho de 2003.

PÉREZ, Guber, E. G. Estabelecimento de critério para evitar a perfuração na soldagem de tubulações em operação de pequena espessura. **Dissertação de mestrado POSMEC – UFSC**, Florianópolis, Setembro 2005. 85 p.

PETROBRAS, **Norma N-1738 Rev. B**. Descontinuidades em juntas soldadas, fundidos, forjados e laminados. Rio de Janeiro, Julho de 2003.

SABAPATHY, P.N.et al. The prediction of burn-through during in-service welding of gas pipelines. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**. Vol 77. 2000. p. 669-677.

SANTOS, L.A. Condução de Calor na Soldagem com Pulsação Térmica. **Tese de Doutorado, UFSC**, Florianópolis, 2001. 145 páginas.

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho. **Artliber Editora**, São Paulo, 2008.

SICILIANO, F. Materiais para gasodutos: aços de alta resistência para dutos de transporte de gás e petróleo – tendências atuais. **Metalurgia & Materiais**. São Paulo: Vol. 64, Maio 2008. p 208 – 211.

SILVA, A. C. Reparo por deposição de solda aplicada a tubulação de petróleo e gás em serviço com pequena espessura remanescente. **Dissertação de mestrado POSMEC – UFSC**, Florianópolis, Setembro 2004. 85 p.

STEVENSON, M. E. et. al. Metallurgical failure Analysis of Cold Cracking in a Structural Steel Weldment: Revisiting a Classic failure Mechanism. **ASM International**. Practical Failure Analysis, Vol. 2, August 2002. P 55 – 60.

TAISS, Juarez Mendes. Workshop: Inovações para Desenvolvimento de Aços de Alto Valor Agregado - Tubos de Alta Resistência para Aplicações Estruturais e Transmissão de Fluídos. **62º Congresso Anual da ABM**. Vitória, Julho 2007.

TELLES, P.C.S. Tubulações Industriais. **Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.**, São Paulo, 1984. 204 p.

VERGES, A. S., at al. Soldagem de derivações em tubulação em serviço: experiência da REVAP. I ENSOLD, **Encontro Técnico de Soldagem**, PETROBRÁS, Rio de Janeiro/RJ, 2004.

WAINER, Emílio, et al. Soldagem Processo e Metalurgia. São Paulo: **Edito a Edgard Blücher Ltda.**, 1992.

WELDING HANDBOOK Volume1, Welding science and technology. **American Welding Society**, Miami – USA, 2004. 720 p.

WELDING HANDBOOK, Volume 2. **Welding Processes**, Part 1. AWS, Ninth Edition, 2007.

<http://www.petrobras.com.br>. Acessado em 29 de outubro de 2009.

<http://www.ctdut.org.br>. Acessado em 18 de outubro de 2009.

<http://www.usiminas.com.br>. Acessado em 31 de outubro de 2009.

<http://www.tenaris.com/TenarisConfab/pt/default.aspx>. Acessado em 06 de novembro de 2009.

<http://www.tenaris.com/Argentina/es/flash/laco1.swf>. Acessado em 15 de dezembro de 2008.

<http://www.transpetro.com.br>. Acessado em 18 de outubro de 2009.

<http://www.millerwelds.com>. Acessado em 11 de dezembro de 2009.

<http://www.power.inf.br>. Acessado em 19 de Julho de 2010.

<http://www.petrobras.com/pt/quem-somos/perfil/>. Acessado em 24 de maio de 2011.

## 10 APÊNDICE

**APÊNDICE A** - Soldagem GMAW-P, Tubo  $\phi$  4,0", espessura 3,0 mm, Metal de Adição: ER 70S-6  $\phi$  1,2 mm, Gás de proteção: 92% Ar + 8% CO<sub>2</sub>, Tubo sem água, DBCP: 18,0 mm.

Sequência Solda	Corrente (A)	Velocidade (cm/min)	Tensão (V)	Energia de Soldagem (kJ/cm)	Temperatura (°C)
1 0 0	160	30	29,4	10,10	23
2 0 0	170	30	28,7	10,44	28
3 0 0	180	30	30,5	11,54	43
4 0 0	190	30	31,1	12,24	39
5 0 0	200	30	32,0	13,20	29
6 0 0*	210	30	32,6	14,02	29

\*Furou

**APÊNDICE B** - Soldagem GMAW-P, Tubo  $\phi$  4,0", espessura 3,0 mm, Metal de Adição: ER 70S-6  $\phi$  1,2 mm, Gás de proteção: 92% Ar + 8% CO<sub>2</sub>, Tubo com fluido água (vazão de 20 l/min.) e pressão (2 bar), DBCP: 18,0 mm.

Sequência Solda	Corrente (A)	Velocidade (cm/min)	Tensão (V)	Energia de Soldagem (kJ/cm)	Temperatura (°C)
1 2 2	160	30	33,7	11,40	24
2 2 2	170	30	33,4	11,86	29
3 2 2	180	30	30,7	11,62	33
4 2 2	190	30	31,0	12,28	34
5 2 2*	200	30	30,2	12,50	36

\*Furou

**APÊNDICE C** - Soldagem GMAW-P, Tubo  $\phi$  4,0", espessura 3,0 mm, Metal de Adição: ER 70S-6  $\phi$  1,2 mm, Gás de proteção: 92% Ar + 8% CO<sub>2</sub>, Tubo com fluido água (vazão de 20 l/min.) e pressão (5 bar), DBCP: 18,0 mm

Sequência Solda	Corrente (A)	Velocidade (cm/min)	Tensão (V)	Energia de Soldagem (kJ/cm)	Temperatura (°C)
1 2 5	160	30	28,9	10,24	30
2 2 5	170	30	29,7	10,74	31
3 2 5	180	30	31,4	11,84	34
4 2 5*	190	30	31,8	12,52	36

\*Furou

**APÊNDICE D** - Soldagem GMAW-P, Tubo  $\phi$  4,0", espessura 3,0 mm, Metal de Adição: ER 70S-6  $\phi$  1,2 mm, Gás de proteção: 92% Ar + 8% CO<sub>2</sub>, Tubo com fluido água (vazão de 40 l/min.) e pressão (2 bar), DBCP: 18,0 mm

Sequência Solda	Corrente (A)	Velocidade (cm/min)	Tensão (V)	Energia de Soldagem (kJ/cm)	Temperatura (°C)
1 4 2	160	30	29,8	10,20	28
2 4 2	170	30	28,8	10,38	35
3 4 2	180	30	31,8	12,00	38
4 4 2	190	30	31,1	12,28	40
5 4 2	200	30	33,9	13,88	42
6 4 2	210	30	33,2	14,20	43
<b>7 4 2*</b>	<b>220</b>	<b>30</b>	<b>35,2</b>	<b>15,62</b>	<b>45</b>

\*Furou

**APÊNDICE E** - Soldagem GMAW-P, Tubo  $\phi$  4,0", espessura 3,0 mm, Metal de Adição: ER 70S-6  $\phi$  1,2 mm, Gás de proteção: 92% Ar + 8% CO<sub>2</sub>, Tubo com fluido água (vazão de 40 l/min.) e pressão (5 bar), DBCP: 18,0 mm

Sequência Solda	Corrente (A)	Velocidade (cm/min)	Tensão (V)	Energia de Soldagem (kJ/cm)	Temperatura (°C)
1 4 5	160	30	29,2	10,06	27
2 4 5	170	30	29,5	10,68	30
3 4 5	180	30	30,3	11,48	40
4 4 5	190	30	30,5	12,06	38
<b>5 4 5*</b>	<b>200</b>	<b>30</b>	<b>31,3</b>	<b>12,90</b>	<b>40</b>

\*Furou

**APÊNDICE F** - Soldagem GMAW-P, Tubo  $\phi$  4,0", espessura 3,0 mm, Metal de Adição: ER 70S-6  $\phi$  1,2 mm, Gás de proteção: 92% Ar + 8% CO<sub>2</sub>, Tubo com fluido água (vazão de 80 l/min.) e pressão (2 bar), DBCP: 18,0 mm

Sequência Solda	Corrente (A)	Velocidade (cm/min)	Tensão (V)	Energia de Soldagem (kJ/cm)	Temperatura (°C)
1 8 2	160	30	29,8	10,14	45
2 8 2	170	30	28,8	10,22	50
3 8 2	180	30	31,4	11,72	56
4 8 2	190	30	31,8	12,38	58
5 8 2	200	30	33,6	13,72	35
6 8 2	210	30	33,0	14,14	41
7 8 2	220	30	36,0	15,9	46
<b>8 8 2*</b>	<b>230</b>	<b>30</b>	<b>34,9</b>	<b>16,2</b>	<b>49</b>

\*Furou

**APÊNDICE G** - Soldagem GMAW Imposição de tensão (curto circuito), Tubo X70  $\phi$  4,0", espessura 3,2 mm, Metal de Adição: ER 80S-G  $\phi$  1,2 mm, Gás de proteção: 92% Ar + 8% CO<sub>2</sub>, Tubo sem água, DBCP: 16,0 mm

Sequência Solda	Corrente (A)	Velocidade (cm/min)	Tensão (V)	Energia de Soldagem (kJ/cm)	Penetração (mm)
1 0 0	149,2	30	19,8	6,00	2,18
2 0 0	163,1	30	20,0	6,60	2,48
3 0 0	173,9	30	20,4	7,16	3,12
4 0 0	179,9	30	20,9	7,58	3,15
5 0 0	184,6	30	21,1	7,88	3,09
6 0 0	182,2	30	21,3	7,82	3,10
7 0 0	194,4	30	21,6	8,50	3,08
<b>8 0 0*</b>	<b>204,9</b>	<b>30</b>	<b>21,8</b>	<b>9,02</b>	

\*Furou

**APÊNDICE H** - Soldagem GMAW Imposição de tensão (curto circuito), Tubo X70  $\phi$  4,0", espessura 3,2 mm, Metal de Adição: ER 80S-G  $\phi$  1,2 mm, Gás de proteção: 92% Ar + 8% CO<sub>2</sub>, Tubo com fluido água (vazão de 20 l/min.) e pressão (2 bar), DBCP: 16,0 mm

Sequência Solda	Corrente (A)	Velocidade (cm/min)	Tensão (V)	Energia de Soldagem (kJ/cm)	Penetração (mm)
1 2 2	140,3	30	18,6	5,26	1,94
2 2 2	152,1	30	19,0	5,84	2,25
3 2 2	152,1	30	19,0	5,84	2,04
4 2 2	168,5	30	20,0	6,82	2,20
5 2 2	177,7	30	20,3	7,28	2,31
<b>6 2 2*</b>	<b>180,8</b>	<b>30</b>	<b>20,7</b>	<b>7,56</b>	

\*Furou

**APÊNDICE I** - Soldagem GMAW Imposição de tensão (curto circuito), Tubo X70  $\phi$  4,0", espessura 3,2 mm, Metal de Adição: ER 80S-G  $\phi$  1,2 mm, Gás de proteção: 92% Ar + 8% CO<sub>2</sub>, Tubo com fluido água (vazão de 20 l/min.) e pressão (5 bar), DBCP: 16,0 mm

Sequência Solda	Corrente (A)	Velocidade (cm/min)	Tensão (V)	Energia de Soldagem (kJ/cm)	Penetração (mm)
1 2 5	142,2	30	18,9	5,54	1,43
2 2 5	154,5	30	19,3	6,04	1,85
3 2 5	160,0	30	19,4	6,30	1,91
4 2 5	169,3	30	20,2	6,90	1,83
<b>5 2 5*</b>	<b>184,3</b>	<b>30</b>	<b>20,6</b>	<b>7,68</b>	

\*Furou

**APÊNDICE J** - Soldagem GMAW Imposição de tensão (curto circuito), Tubo X70  $\phi$  4,0", espessura 3,2 mm, Metal de Adição: ER 80S-G  $\phi$  1,2 mm, Gás de proteção: 92% Ar + 8% CO<sub>2</sub>, Tubo com fluido água (vazão de 40 l/min.) e pressão (2 bar), DBCP: 16,0 mm

Sequência Solda	Corrente (A)	Velocidade (cm/min)	Tensão (V)	Energia de Soldagem (kJ/cm)	Penetração (mm)
1 4 2	147,4	30	19,0	5,66	1,53
2 4 2	156,7	30	19,3	6,12	1,98
3 4 2	165,1	30	19,6	6,56	1,99
4 4 2	177,2	30	20,4	7,30	2,14
<b>5 4 2*</b>	<b>184,0</b>	<b>30</b>	<b>20,8</b>	<b>7,72</b>	

\*Furou

**APÊNDICE H** - Soldagem GMAW Imposição de tensão (curto circuito), Tubo X70  $\phi$  4,0", espessura 3,2 mm, Metal de Adição: ER 80S-G  $\phi$  1,2 mm, Gás de proteção: 92% Ar + 8% CO<sub>2</sub>, Tubo com fluido água (vazão de 40 l/min.) e pressão (5 bar), DBCP: 16,0 mm

Seqüência Solda	Corrente (A)	Velocidade (cm/min)	Tensão (V)	Energia de Soldagem (kJ/cm)	Penetração (mm)
1 4 5	154,8	30	19,4	6,08	1,75
2 4 5	159,7	30	19,9	6,42	2,35
3 4 5	169,5	30	20,2	5,90	2,01
4 4 5*	174,5	30	20,2	6,72	

\*Furou

**APÊNDICE K** - Soldagem GMAW Imposição de tensão (curto circuito), Tubo X70  $\phi$  4,0", espessura 3,2 mm, Metal de Adição: ER 80S-G  $\phi$  1,2 mm, Gás de proteção: 92% Ar + 8% CO<sub>2</sub>, Tubo com fluido água (vazão de 80 l/min.) e pressão (2 bar), DBCP: 16,0 mm

Seqüência Solda	Corrente (A)	Velocidade (cm/min)	Tensão (V)	Energia de Soldagem (kJ/cm)	Penetração (mm)
1 8 2	147,1	30	19,5	5,84	2,02
2 8 2	157,3	30	19,8	6,30	1,74
3 8 2	167,8	30	20,2	6,86	1,89
4 8 2	178,2	30	20,7	7,46	2,02
5 8 2	190,4	30	21,4	8,10	2,45
6 8 2	194,4	30	21,4	8,26	2,30
7 8 2*	200,7	30	21,7	8,80	

\*Furou

**APÊNDICE L** - Soldagem GMAW-P, Tubo X70  $\phi$  4,0", espessura 3,2 mm, Metal de Adição: ER 80S-G  $\phi$  1,2 mm, Gás de proteção: 92% Ar + 8% CO<sub>2</sub>, Tubo sem água, DBCP: 16,0 mm

Sequência Solda	Corrente (A)	Velocidade (cm/min)	Tensão (V)	Energia de Soldagem (kJ/cm)	Temperatura (mm)
1 0 0	80	30	25,7	5,06	25
2 0 0	100	30	24,5	5,96	32
3 0 0	120	30	24,5	6,98	37
4 0 0	130	30	25,1	7,56	39
5 0 0	140	30	25,8	8,28	45
6 0 0	150	30	28,1	9,42	26
7 0 0	160	30	27,5	9,76	34
8 0 0	170	30	28,4	10,54	44
9 0 0	180	30	29,1	11,30	40
10 0 0	190	30	28,9	11,72	41
11 0 0	200	30	29,8	12,54	39
12 0 0	210	30	30,9	13,50	38
<b>13 0 0*</b>	<b>220</b>	<b>30</b>	<b>31,0</b>	<b>14,10</b>	

\*Furou

**APÊNDICE M** - Soldagem GMAW-P, Tubo X70  $\phi$  4,0", espessura 3,2 mm, Metal de Adição: ER 80S-G  $\phi$  1,2 mm, Gás de proteção: 92% Ar + 8% CO<sub>2</sub>, Tubo com fluido água (vazão de 20 l/min.) e pressão (2 bar), DBCP: 16,0 mm

Sequência Solda	Corrente (A)	Velocidade (cm/min)	Tensão (V)	Energia de Soldagem (kJ/cm)	Temperatura (mm)
1 2 2	80	30	27,1	5,40	25
2 2 2	100	30	25,4	6,20	32
3 2 2	120	30	25,8	7,60	37
4 2 2	130	30	26,7	8,00	39
5 2 2	140	30	26,7	8,40	35
6 2 2	150	30	27,7	9,20	26
7 2 2	160	30	27,6	9,80	34
8 2 2	170	30	28,6	10,60	35
9 2 2	180	30	29,1	11,40	35
10 2 2	190	30	28,7	11,70	38
11 2 2	200	30	29,4	12,48	40
12 2 2	210	30	31,3	13,66	43
13 2 2	220	30	31,5	14,40	45
14 2 2	230	30	31,3	14,82	47
15 2 2	240	30	33,0	16,10	49
<b>16 2 2*</b>	<b>250</b>	<b>30</b>	<b>33,6</b>	<b>17,00</b>	

\*Furou

**APÊNDICE N** - Soldagem GMAW-P, Tubo X70  $\phi$  4,0", espessura 3,2 mm, Metal de Adição: ER 80S-G  $\phi$  1,2 mm, Gás de proteção: 92% Ar + 8% CO<sub>2</sub>, Tubo com fluido água (vazão de 20 l/min.) e pressão (5 bar) , DBCP: 16,0 mm

Sequência Solda	Corrente (A)	Velocidade (cm/min)	Tensão (V)	Energia de Soldagem (kJ/cm)	Temperatura (mm)
1 2 5	80	30	24,0	4,90	27
2 2 5	100	30	23,7	5,80	34
3 2 5	120	30	26,0	7,30	38
4 2 5	130	30	25,5	7,68	39
5 2 5	140	30	26,3	8,38	42
6 2 5	150	30	27,5	9,22	43
7 2 5	160	30	28,3	9,96	45
8 2 5	170	30	29,1	10,70	47
9 2 5	180	30	30,2	11,66	35
10 2 5	190	30	28,9	11,86	39
11 2 5	200	30	29,5	12,60	40
12 2 5	210	30	33,4	13,86	43
<b>13 2 5*</b>	<b>220</b>	<b>30</b>	<b>33,9</b>	<b>14,16</b>	

\*Furou

**APÊNDICE O** - Soldagem GMAW-P, Tubo X70  $\phi$  4,0", espessura 3,2 mm, Metal de Adição: ER 80S-G  $\phi$  1,2 mm, Gás de proteção: 92% Ar + 8% CO<sub>2</sub>, Tubo com fluido água (vazão de 40 l/min.) e pressão (2 bar) , DBCP: 16,0 mm

Sequência Solda	Corrente (A)	Velocidade (cm/min)	Tensão (V)	Energia de Soldagem (kJ/cm)	Temperatura (mm)
1 4 2	80	30	24,4	4,84	29
2 4 2	100	30	23,8	5,84	31
3 4 2	120	30	23,4	7,28	39
4 4 2	130	30	25,4	7,60	41
5 4 2	140	30	25,7	8,20	43
6 4 2	150	30	24,8	9,20	36
7 4 2	160	30	27,5	9,70	38
8 4 2	170	30	27,8	10,32	40
9 4 2	180	30	27,9	10,86	44
10 4 2	190	30	28,3	11,48	45
11 4 2	200	30	29,9	12,70	49
12 4 2	210	30	30,9	13,58	47
13 4 2	220	30	31,8	14,52	48
14 4 2	230	30	33,3	15,74	48
<b>15 4 2*</b>	<b>240</b>	<b>30</b>	<b>31,8</b>	<b>15,58</b>	

\*Furou

**APÊNDICE P** - Soldagem GMAW-P, Tubo X70  $\phi$  4,0", espessura 3,2 mm, Metal de Adição: ER 80S-G  $\phi$  1,2 mm, Gás de proteção: 92% Ar + 8% CO<sub>2</sub>, Tubo com fluido água (vazão de 40 l/min.) e pressão (5 bar), DBCP: 16,0 mm

Seqüência Solda	Corrente (A)	Velocidade (cm/min)	Tensão (V)	Energia de Soldagem (kJ/cm)	Temperatura (mm)
1 4 5	80	30	24,2	4,92	27
2 4 5	100	30	24,1	5,92	31
3 4 5	120	30	25,3	7,18	34
4 4 5	130	30	25,4	7,60	38
5 4 5	140	30	25,7	8,24	39
6 4 5	150	30	26,1	8,46	42
7 4 5	160	30	27,8	9,50	45
8 4 5	170	30	27,6	10,28	38
9 4 5	180	30	27,7	10,80	40
10 4	190	30	29,3	11,84	45
11 4 2	200	30	29,8	12,54	50
<b>12 4 5*</b>	<b>210</b>	<b>30</b>	<b>33,0</b>	<b>13,14</b>	

\*Furou

**APÊNDICE Q** - Soldagem GMAW-P, Tubo X70  $\phi$  4,0", espessura 3,2 mm, Metal de Adição: ER 80S-G  $\phi$  1,2 mm, Gás de proteção: 92% Ar + 8% CO<sub>2</sub>, Tubo com fluido água (vazão de 80 l/min.) e pressão (2 bar) , DBCP: 16,0 mm

Sequência Solda	Corrente (A)	Velocidade (cm/min)	Tensão (V)	Energia de Soldagem (kJ/cm)	Temperatura (mm)
1 8 2	80	30	22,3	4,46	29
2 8 2	100	30	22,5	5,68	36
3 8 2	120	30	25,1	7,14	40
4 8 2	130	30	25,1	7,66	42
5 8 2	140	30	25,5	8,24	42
6 8 2	150	30	26,7	9,30	51
7 8 2	160	30	27,6	9,84	53
8 8 2	170	30	27,8	10,38	55
9 8 2	180	30	29,3	11,36	28
10 8 2	190	30	31,0	12,54	32
11 8 2	200	30	30,1	12,72	36
12 8 2	210	30	31,5	13,86	38
13 8 2	220	30	32,7	14,88	40
14 8 2	230	30	32,7	15,42	45
15 8 2	240	30	33,6	16,40	50
16 8 2	250	30	35,0	17,70	52
<b>17 8 2*</b>	<b>260</b>	<b>30</b>	<b>35,6</b>	<b>18,52</b>	

\*Furo

**APÊNDICE R** - Soldagem FCAW-S Imposição de tensão (curto circuito), Chapa, espessura 3,0 mm, Metal de Adição: E 71T-11,  $\phi$  1,2 mm, DBCP: 13,0 mm

Seqüência Solda	Corrente (A)	Velocidade (cm/min)	Tensão (V)	Energia de Soldagem (kJ/cm)	Penetração (mm)
1 0 0	74,6	30	15,7	2,22	0,78
2 0 0	88,2	30	15,9	2,66	1,03
3 0 0	101,5	30	17,0	3,06	1,10
4 0 0	212,1	30	17,7	3,74	1,12
5 0 0	130,8	30	18,1	4,34	1,16
6 0 0	140	30	18,4	4,46	1,28
7 0 0	159,7	30	19,2	5,52	1,79
8 0 0	168,3	30	18,3	5,84	2,00
9 0 0	181,4	30	18,9	6,5	2,17
10 0 0	176,6	30	19,5	6,78	2,00
<b>11 0 0*</b>	<b>190,3</b>	<b>30</b>	<b>19,8</b>	<b>7,48</b>	

\*Furou

**APÊNDICE S** - Soldagem FCAW-S Imposição de tensão (curto circuito), Tubo API 5L X70, espessura 3,2 mm, Metal de Adição: E 71T-11,  $\phi$  1,2 mm, Tubo sem água, DBCP: 13,0 mm

Seqüência Solda	Corrente (A)	Velocidade (cm/min)	Tensão (V)	Energia de Soldagem (kJ/cm)	Penetração (mm)
1 0 0	154,2	30	18,3	5,64	1,65
2 0 0	163,3	30	18,6	6,06	1,98
3 0 0	174,5	30	19,0	6,64	2,02
4 0 0	182	30	19,8	7,20	2,32
5 0 0	194	30	20,8	8,06	2,56
6 0 0	206,9	30	20,7	8,56	2,65
7 0 0	212,8	30	20,9	8,90	2,89
<b>8 0 0*</b>	<b>227,1</b>	<b>30</b>	<b>21,0</b>	<b>9,50</b>	

\*Furou

**APÊNDICE T** - Soldagem FCAW-S corrente pulsada e empurrando a poça de solda, Tubo API 5L X70, espessura 3,2 mm, Metal de Adição: E 71T-11,  $\phi$  1,2 mm, Tubo sem água, DBCP: 13,0 mm

Sequência Solda	Corrente (A)	Velocidade (cm/min)	Tensão (V)	Energia de Soldagem (kJ/cm)	Penetração (mm)
1 0 0	142,7	33	22,3	6,56	2,27
2 0 0	151,5	33	23,5	7,16	1,95
3 0 0	163	33	23,1	7,49	2,14
4 0 0	177	33	22,4	7,76	2,52
5 0 0	184	33	22,3	7,96	2,40
6 0 0	194,5	33	22,1	8,29	2,90
<b>7 0 0*</b>	<b>201,3</b>	<b>33</b>	<b>24,0</b>	<b>9,27</b>	
1 0 0	142,5	30	23,2	7,40	2,42
2 0 0	155	30	22,8	7,82	2,74
3 0 0	161,7	30	23,9	8,48	3,20
4 0 0	173	30	21,9	8,42	2,74
5 0 0	182	30	22,8	9,04	2,86
<b>6 0 0*</b>	<b>191</b>	<b>30</b>	<b>24,4</b>	<b>9,94</b>	
1 0 0	141,3	27,2	23,7	8,27	3,10
2 0 0	151,1	27,2	24,0	8,80	
<b>3 0 0*</b>	<b>161,2</b>	<b>27,2</b>	<b>23,7</b>	<b>9,18</b>	
1 0 0	80	20	22,3	6,58	1,10
2 0 0	91	20	22,2	7,39	1,70
3 0 0	100	20	24,0	8,71	2,14
4 0 0	110	20	25,3	9,79	3,31
5 0 0	121	20	25,3	10,54	3,36
<b>7 0 0*</b>	<b>131</b>	<b>20</b>	<b>24,7</b>	<b>10,99</b>	

\*Furou

**APÊNDICE U** - Soldagem GMAW imposição de tensão (curto circuito) e empurrando, chapa, espessura 4,8 mm, Metal de Adição: ER 80S-G  $\phi$  1,2 mm, Gás de proteção: 92% Ar + 8% CO<sub>2</sub>, DBCP: 16,0 mm.

Sequência Solda	Corrente (A)	Velocidade (cm/min)	Tensão (V)	Energia de Soldagem (kJ/cm)	Penetração (mm)
1 0 0	132	33	18,0	4,38	1,33
2 0 0	142,2	33	18,3	4,80	1,54
3 0 0	152,5	33	19,0	5,31	1,63
4 0 0	169,2	33	19,8	6,14	1,76
5 0 0	189,3	33	20,6	7,14	1,89
6 0 0	201	33	21,3	7,89	1,95
7 0 0	216,8	33	21,6	8,60	2,19
8 0 0	128,3	30	18,2	4,72	1,25
9 0 0	143	30	18,4	5,32	1,50
10 0 0	154,4	30	18,8	5,88	1,52
11 0 0	171,1	30	19,6	6,80	1,66
12 0 0	188,5	30	20,5	7,78	1,80
13 0 0	207,1	30	21,3	8,88	1,89
14 0 0	211,6	30	21,5	9,16	1,91
15 0 0	131,5	27,2	17,8	5,23	1,31
16 0 0	145,9	27,2	18,5	6,02	1,41
17 0 0	150	27,2	18,7	6,26	1,55
18 0 0	167,5	27,2	19,5	7,30	1,67
19 0 0	192,6	27,2	20,6	8,82	2,16
20 0 0	202,2	27,2	21,3	9,57	2,24
21 0 0	210,7	27,2	21,6	10,14	2,28

**APÊNDICE V** - Soldagem GMAW corrente pulsada e empurrando, chapa, espessura 4,8 mm, Metal de Adição: ER 80S-G  $\phi$  1,2 mm, Gás de proteção: 92% Ar + 8% CO<sub>2</sub>, DBCP: 16,0 mm.

<b>Sequência Solda</b>	<b>Corrente (A)</b>	<b>Velocidade (cm/min)</b>	<b>Tensão (V)</b>	<b>Energia de Soldagem (kJ/cm)</b>	<b>Penetração (mm)</b>
<b>1 0 0</b>	<b>140</b>	<b>33</b>	<b>24,6</b>	<b>7,10</b>	<b>1,36</b>
<b>2 0 0</b>	<b>160</b>	<b>33</b>	<b>27,0</b>	<b>8,50</b>	<b>1,07</b>
<b>3 0 0</b>	<b>180</b>	<b>33</b>	<b>28,4</b>	<b>9,80</b>	<b>1,48</b>
<b>4 0 0</b>	<b>200</b>	<b>33</b>	<b>27,2</b>	<b>10,40</b>	<b>1,62</b>
<b>5 0 0</b>	<b>220</b>	<b>33</b>	<b>32,1</b>	<b>13,10</b>	<b>1,47</b>
<b>6 0 0</b>	<b>140</b>	<b>30</b>	<b>26,8</b>	<b>8,40</b>	<b>1,10</b>
<b>7 0 0</b>	<b>160</b>	<b>30</b>	<b>26,9</b>	<b>9,40</b>	<b>1,45</b>
<b>8 0 0</b>	<b>180</b>	<b>30</b>	<b>28,1</b>	<b>10,80</b>	<b>1,49</b>
<b>9 0 0</b>	<b>200</b>	<b>30</b>	<b>30,5</b>	<b>12,60</b>	<b>1,21</b>
<b>10 0 0</b>	<b>220</b>	<b>30</b>	<b>32,8</b>	<b>14,80</b>	<b>1,66</b>
<b>11 0 0</b>	<b>140</b>	<b>27,2</b>	<b>25,4</b>	<b>8,90</b>	<b>1,87</b>
<b>12 0 0</b>	<b>160</b>	<b>27,2</b>	<b>27,8</b>	<b>10,70</b>	<b>1,27</b>
<b>13 0 0</b>	<b>180</b>	<b>27,2</b>	<b>28,7</b>	<b>12,20</b>	<b>1,17</b>
<b>14 0 0</b>	<b>200</b>	<b>27,2</b>	<b>30,2</b>	<b>14,00</b>	<b>1,50</b>
<b>15 0 0</b>	<b>220</b>	<b>27,2</b>	<b>32,0</b>	<b>16,00</b>	<b>2,40</b>

**APÊNDICE W** - Soldagem FCAW-S imposição de tensão (curto circuito) e empurrando, chapa, espessura 4,8 mm, Metal de Adição: ER 71T-11  $\phi$  1,2 mm, DBCP: 16,0 mm.

<b>Sequência Solda</b>	<b>Corrente (A)</b>	<b>Velocidade (cm/min)</b>	<b>Tensão (V)</b>	<b>Energia de Soldagem (kJ/cm)</b>	<b>Penetração (mm)</b>
<b>1 0 0</b>	<b>134,8</b>	<b>33</b>	<b>16,7</b>	<b>3,73</b>	<b>1,19</b>
<b>2 0 0</b>	<b>141,7</b>	<b>33</b>	<b>18,1</b>	<b>4,51</b>	<b>1,31</b>
<b>3 0 0</b>	<b>154,1</b>	<b>33</b>	<b>18,4</b>	<b>5,13</b>	<b>1,38</b>
<b>4 0 0</b>	<b>172,2</b>	<b>33</b>	<b>19,1</b>	<b>5,98</b>	<b>1,64</b>
<b>5 0 0</b>	<b>199,2</b>	<b>33</b>	<b>19,6</b>	<b>7,09</b>	<b>1,70</b>
<b>6 0 0</b>	<b>207,3</b>	<b>33</b>	<b>20,1</b>	<b>7,56</b>	<b>1,98</b>
<b>7 0 0</b>	<b>213,9</b>	<b>33</b>	<b>20,7</b>	<b>8,04</b>	<b>2,07</b>
<b>8 0 0</b>	<b>123,8</b>	<b>30</b>	<b>16,5</b>	<b>4,08</b>	<b>1,43</b>
<b>9 0 0</b>	<b>139,9</b>	<b>30</b>	<b>17,7</b>	<b>4,94</b>	<b>1,47</b>
<b>10 0 0</b>	<b>158,1</b>	<b>30</b>	<b>18,6</b>	<b>5,94</b>	<b>1,51</b>
<b>11 0 0</b>	<b>174,8</b>	<b>30</b>	<b>18,8</b>	<b>6,28</b>	<b>1,75</b>
<b>12 0 0</b>	<b>190,1</b>	<b>30</b>	<b>19,6</b>	<b>7,44</b>	<b>1,79</b>
<b>13 0 0</b>	<b>209,1</b>	<b>30</b>	<b>20,0</b>	<b>8,38</b>	<b>2,14</b>
<b>14 0 0</b>	<b>211,5</b>	<b>30</b>	<b>20,6</b>	<b>8,72</b>	<b>2,58</b>
<b>15 0 0</b>	<b>127,1</b>	<b>27,2</b>	<b>16,5</b>	<b>4,16</b>	<b>1,04</b>
<b>16 0 0</b>	<b>142</b>	<b>27,2</b>	<b>17,8</b>	<b>5,63</b>	<b>1,23</b>
<b>17 0 0</b>	<b>151,5</b>	<b>27,2</b>	<b>18,2</b>	<b>6,05</b>	<b>1,36</b>
<b>18 0 0</b>	<b>173,8</b>	<b>27,2</b>	<b>18,8</b>	<b>7,22</b>	<b>1,67</b>
<b>19 0 0</b>	<b>190</b>	<b>27,2</b>	<b>19,0</b>	<b>7,97</b>	<b>2,14</b>
<b>20 0 0</b>	<b>206,4</b>	<b>27,2</b>	<b>19,2</b>	<b>8,72</b>	<b>2,28</b>
<b>21 0 0</b>	<b>216,1</b>	<b>27,2</b>	<b>20,4</b>	<b>9,76</b>	<b>2,37</b>

**APÊNDICE X** - Soldagem FCAW-S corrente pulsada e empurrando, chapa, espessura 4,8 mm, Metal de Adição: ER 71T-11  $\phi$  1,2 mm, DBCP: 16,0 mm.

<b>Sequência Solda</b>	<b>Corrente (A)</b>	<b>Velocidade (cm/min)</b>	<b>Tensão (V)</b>	<b>Energia de Soldagem (kJ/cm)</b>	<b>Penetração (mm)</b>
<b>1 0 0</b>	<b>140</b>	<b>33</b>	<b>26,1</b>	<b>7,69</b>	<b>1,49</b>
<b>2 0 0</b>	<b>160</b>	<b>33</b>	<b>24,8</b>	<b>7,85</b>	<b>1,55</b>
<b>3 0 0</b>	<b>180</b>	<b>33</b>	<b>22,4</b>	<b>7,71</b>	<b>1,65</b>
<b>4 0 0</b>	<b>200</b>	<b>33</b>	<b>24,8</b>	<b>9,56</b>	<b>2,37</b>
<b>5 0 0</b>	<b>220</b>	<b>33</b>	<b>24,3</b>	<b>10,09</b>	<b>2,13</b>
<b>6 0 0</b>	<b>140</b>	<b>30</b>	<b>26,7</b>	<b>8,30</b>	<b>1,85</b>
<b>7 0 0</b>	<b>160</b>	<b>30</b>	<b>26,2</b>	<b>9,08</b>	<b>1,85</b>
<b>8 0 0</b>	<b>180</b>	<b>30</b>	<b>26,9</b>	<b>10,30</b>	<b>2,08</b>
<b>9 0 0</b>	<b>200</b>	<b>30</b>	<b>27,4</b>	<b>11,48</b>	<b>1,88</b>
<b>10 0 0</b>	<b>220</b>	<b>30</b>	<b>27,1</b>	<b>12,28</b>	<b>2,54</b>
<b>11 0 0</b>	<b>140</b>	<b>27,2</b>	<b>28,2</b>	<b>9,51</b>	<b>1,67</b>
<b>12 0 0</b>	<b>160</b>	<b>27,2</b>	<b>24,4</b>	<b>9,38</b>	<b>1,59</b>
<b>13 0 0</b>	<b>180</b>	<b>27,2</b>	<b>22,5</b>	<b>9,60</b>	<b>1,85</b>
<b>14 0 0</b>	<b>200</b>	<b>27,2</b>	<b>23,4</b>	<b>10,90</b>	<b>2,38</b>
<b>15 0 0</b>	<b>220</b>	<b>27,2</b>	<b>24,1</b>	<b>12,14</b>	<b>2,31</b>

**APÊNDICE Y** - Soldagem FCAW-S imposição de tensão (goticular) tocha reta, Tubo API 5L X70 espessura 3,2 mm, Metal de Adição: ER 71T-11  $\phi$  1,2 mm, sem fluido, DBCP: 16,0 mm.

Sequência Solda	Corrente (A)	Velocidade (cm/min)	Tensão (V)	Energia de Soldagem (kJ/cm)	Penetração (mm)
1 0 0	88	30	17,5	3,08	1,09
2 0 0	103,8	30	18,1	3,76	1,32
3 0 0	118,1	30	18,8	4,44	1,48
4 0 0	130,3	30	18,9	4,98	1,63
5 0 0	139,3	30	19,4	5,40	1,64
6 0 0	145	30	20	5,80	1,74
7 0 0	160,6	30	23,3	6,54	1,82
8 0 0	168,9	30	20,7	7,00	1,94
9 0 0	176	30	21	7,40	2,60
10 0 0	184,8	30	21,4	7,90	2,78
11 0 0	197,3	30	21,6	8,50	2,78
12 0 0	209,3	30	22,2	9,28	3,11
13 0 0	206,5	30	22,4	9,24	3,15
14 0 0	211,8	30	22,8	9,27	3,36
<b>15 0 0</b>	<b>221,7</b>	<b>30</b>	<b>23,3</b>	<b>10,36</b>	

\*Furou