



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**EFEITO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM NAS PROPRIEDADES
MECÂNICAS DE JUNTAS DO AÇO API 5L X-80 SOLDADAS PELO PROCESSO
FCAW-G**

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE
PERNAMBUCO PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

CARLO REILLEN LIMA MARTINS

RECIFE, AGOSTO DE 2010

M386e

Martins, Carlo Reillen Lima.

Efeito dos parâmetros de soldagem nas propriedades mecânicas de juntas do aço API 5L X-80 soldadas pelo processo FCAW-G / Carlo Reillen Lima Martins. - Recife: O Autor, 2010.

Xi, 57f., il : grafs., tabs., figs.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2010.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia Mecânica 2. Aços microligados 3. API 5L GRAU X-80. 4. Soldagem FCAW-G. 5. Zona termicamente afetada pelo calor (ZTA) I.Título.

UFPE

621

CDD (22. ed.)

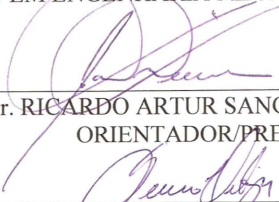
BCTG/2010-224

“EFEITO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM NAS PROPRIEDADES
MECÂNICAS DE JUNTAS DO AÇO API 5L X-80 SOLDADAS PELO PROCESSO
FCAW”.

CARLO REILLEN LIMA MARTINS

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: MATERIAIS E FABRICAÇÃO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA/CTG/EEP/UFPE

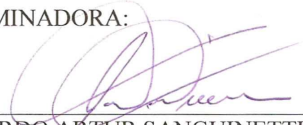


Prof. Dr. RICARDO ARTUR SANGUINETTI FERREIRA
ORIENTADOR/PRESIDENTE

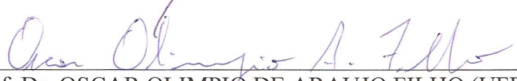


Prof. Dr. SEVERINO LEOPOLDINO URTIGA FILHO
COORDENADOR DO CURSO

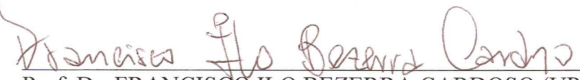
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. RICARDO ARTUR SANGUINETTI FERREIRA (UFPE)



Prof. Dr. OSCAR OLÍMPIO DE ARAÚJO FILHO (UFPE)



Prof. Dr. FRANCISCO ILO BEZERRA CARDOSO (UPE)

“A todos aqueles que duvidam,
pois deles depende a evolução da humanidade.”

Do Autor.

AGRADECIMENTOS

A DEUS, acima de todas as coisas, e principalmente por sua suprema justiça.

Ao meu orientador, o Professor Dr. Ricardo Sanguinetti, por tudo que me ensinou como professor e como líder, e por sua paciência e amizade para comigo sempre.

Ao brilhante Professor Paulo Marcelo, por todo conhecimento transmitido, apoio e pelo exemplo de profissional e de pessoa que é.

A toda minha família, em especial ao meu pai, o Sr. Rivaldo Martins da Silva, e a minha mãe, a Sra Terezinha de Jesus Lima Martins, por todo o alicerce e apoio dedicado.

Aos meus irmãos, Carlos Christiano e Vicente Neto, pelos “puxões de orelha” e pela força e incentivo.

A Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) e os seus colaboradores, por me darem estrutura e conhecimento para a realização deste trabalho científico.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM) do Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC) da Universidade Federal de Pernambuco.

Ao SENAI do Cabo de Santo Agostinho, na pessoa do seu diretor e seus colaboradores, por possibilitarem a realização deste trabalho científico cedendo espaço físico e equipamentos.

A empresa TENARIS CONFAB pela doação do metal de base (tubo API 5L Grau X-80), material fundamental para o objetivo desta pesquisa.

A WHITE MARTINS pelo fornecimento do gás de proteção e arame tubular utilizados para soldagem das chapas de teste.

À FACEPE, pela bolsa de estudos que possibilitou a minha dedicação exclusiva ao mestrado.

A todos os colegas contemporâneos do PPGEM da UFPE, que com suas contribuições, incentivos e amizade, ajudaram na realização deste projeto, e em especial aos amigos Mercinha (Mércia Franca) e Rodrigo José.

Aos amigos que dividiram não só a moradia, mas também muitos conhecimentos, momentos de alegria, e sobretudo, verdadeiras amizades.

E a todos aqueles que contribuíram de maneira direta ou indireta para a realização deste trabalho, que recebam meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

A soldagem é aplicada em diversos seguimentos industriais e é a forma mais difundida e empregada quando, deseja-se a união de materiais metálicos de maneira econômica e confiável. Mas para se conseguir uma boa adequação dos parâmetros nestes aspectos existe a necessidade do domínio dos fatores que afetam os processos de soldagem.

A qualidade do produto final é uma preocupação do seguimento metalúrgico que exige especial atenção. Podemos compreender aços microligados como uma família de aços que apresentam em sua composição química, alguns elementos de liga que se localizam em posições intrínsecas nos grãos ou nos contornos de grãos. Os elementos de liga comumente presentes são V, Ti, Nb, Mo, entre outros. A melhoria nas propriedades mecânicas são bastante significativas, os custos de produção encontram-se em patamares praticáveis, o que os tornam bastantes atrativos aos setores industriais automotivos, de mineração e petrolífero.

Pouco estudo tem sido dedicado a este tema e os dados levantados sobre as propriedades mecânicas da junta soldada ainda não são conclusivos. Ainda há muito a se estudar sobre a influência dos parâmetros de soldagem de um processo FCAW-G sobre as propriedades mecânicas destes aços estruturais.

Com o intuito de intensificar os esforços para a elucidação de algumas dúvidas que circundam o processo FCAW-G na aplicação em tubulações do tipo API 5L Grau X-80, este trabalho de dissertação vem contribuir somando esforços na tentativa de responder a algumas das perguntas sobre os parâmetros de soldagem utilizados no processo e sua interação com a citada família de aços. Neste sentido o trabalho de pesquisa se preocupa em discutir o processo de soldagem por arame tubular com proteção gasosa, FCAW-G, quando aplicado a juntas de aço estrutural microligado da família dos aços API 5L Grau X-80. Propondo-se como principal objetivo avaliar a influência dos parâmetros de soldagem no processo FCAW-G sobre a microestrutura da Zona Termicamente Afetada pelo calor (ZTA) e sobre as propriedades mecânicas em juntas de aço API 5L Grau X-80.

Fica como contribuição dados que comprovam ser possível a utilização de um único processo de soldagem, o FCAW-G, para a união de tubulações do tipo API 5L Grau X-80 de maneira a atender aos requisitos de qualidade exigidos pelos setores mencionados.

Palavras chaves: Aços microligados; API 5L GRAU X-80; soldagem FCAW-G; Zona termicamente afetada pelo calor (ZTA).

ABSTRACT

The welding is applied in many industrial metallurgy and is the most widespread and when employed, would be the union of metallic materials cost effectively and reliably. But to get the best parameters in these respects there is a need in the field of the factors that affect the welding process.

The quality of final product is a concern of the following metals requiring special attention. We call the microalloyed steels, a family of steels that present in its chemical composition, some alloying elements that are located in positions inherent in the grains or at grain boundaries. Alloying elements are commonly present V, Ti, Nb, Mo, among others. The increases in mechanical properties are quite significant, costs of production are at levels feasible, which makes them very attractive to the industrial sectors automotive, mining and petroleum.

Little study has been devoted to this topic and the data collected on the mechanical properties of the weld are not conclusive. Much remains to study the influence of welding parameters for FCAW-G process on the mechanical properties of structural steels. Aiming to step up efforts for the elucidation of some questions surrounding the application process in FCAW-Gtype pipes API 5L GRAU X-80 , this dissertation work is a contribution by joining forces to try to answer some questions about the parameters of used in the welding process and its interaction with the aforementioned family of steels. In this sense the research work is concerned to discuss the process of welding flux cored wire, FCAW-G API SL Grau – X80, when applied to joints of structural steel microalloyed steels family API 5L GRAU X-80 . Proposing itself as the main objective to evaluate the influence of welding parameters in FCAW-G process on the microstructure of heat affected zone (HAZ) and on the mechanical properties of joints in steel API 5L GRAU X-80. Expected to promote the direction for the certification process from the FCAW-Gwelding root pass up the passes of finish, proving to be possible to use a single welding process for joining pipes of the type API 5L GRAU X-80 .

Key-words: Microalloyed steels; API 5L GRAU X-80; FCAW-Gwelding, heat affected zone.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	i
AGRADECIMENTOS.....	ii
RESUMO.....	iii
ABSTRACT.....	iv
SUMÁRIO.....	v
LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIMBOLOS.....	ix
LISTA DE TABELAS.....	x
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Generalidades.....	1
1.2 Justificativa.....	1
1.3 Objetivos.....	2
1.3.1 Objetivo Geral.....	2
1.3.2 Objetivos Específicos.....	2
1.4 Estruturas da Dissertação.....	3
CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	4
2.1 Aços Estruturais Microligados.....	4
2.2 API 5L Grau X-80.....	5
2.2.1 Laminação das chapas para a produção de tubos API 5L Grau X-80,,.....	5
2.2.2 A conformação do Tubo.....	6
2.3. Processo de soldagem (a arco elétrico) com Arame Tubular.....	7
2.3.1 Vantagens e Limitações do Processo Arame Tubular.....	8
2.3.2 Principais variáveis de soldagem.....	9
2.3.3 Modos de transferência do metal de adição.....	11
2.4 Metalurgia da Soldagem.....	13
2.4.1 A Junta Soldada.....	14
2.4.2 Aporte Térmico.....	14
2.4.3 Ciclo Térmico.....	15
2.4.4 Repartição Térmica.....	16
2.4.4.1 Zona Afetada pelo Calor (ZTA).....	17
2.4.4.2 Zona Fundida (ZF)	18
2.4.4.3 Zona de Ligação (ZL)	21

2.5 Material de Base.....	22
CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS.....	23
3.1 Materiais.....	23
3.2 Metal de Base.....	23
3.3 Consumíveis de soldagem.....	25
3.3.1 Arame eletrodo.	25
3.3.2 Gás de proteção.....	25
3.3.3 Equipamento de soldagem.....	25
3.4 Métodos.....	26
3.4.1 Parâmetros de Soldagem.....	26
3.4.2 Procedimento de soldagem.....	26
3.5 Ensaio de Líquido Penetrante (LP)	28
3,6 Ensaio Mecânicos.....	29
3,6,1 Ensaio de Microdureza.....	29
3,6,2 Ensaio de Dobramento.....	30
3,6,3 Ensaio de tração.....	30
3,7 Caracterização Microestrutural.....	31
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	32
4.1 Resultados das Soldagens dos corpos de prova.....	32
4.2 Ensaio de Líquido Penetrante (LP).....	35
4.3 Análises Microestrutural.....	36
4.4 Ensaio Mecânicos.....	40
4.4.1 Ensaio de Microdureza.....	40
4.4.2 Ensaio de Dobramento.....	42
4.4.3 Ensaio de tração.....	44
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO.....	47
CAPÍTULO 6 – SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	48
CAPÍTULO 7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	49
ANEXO – Dados técnicos do metal de base	52

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Processo de laminação controlada. Fonte Adaptado: Durand (2007).....	6
Figura 2.2 - Processo de conformação UOE. a) Conformação em “U”. b) Etapas de conformação em “O”. Fonte: Durand (2007).....	7
Figura 2.3 - Processo de soldagem a arco com arame tubular, (A) com proteção auxiliar de gás e (B) autoprotégido. Fonte: Ordóñez (2004).....	7
Figura 2.4 -Esquema do processo de soldagem FCAW-Gcom proteção gasosa.....	10
Figura 2.5 - Representação esquemática do modo de transferência metálica globular.....	12
Figura 2.6 - Representação esquemática do modo de transferência metálica spray.....	12
Figura 2.7 - Representação esquemática do modo de transferência metálica curto-circuito...	13
Figura 2.8 - Regiões de uma junta soldada. Fonte: Pedrosa (2008).....	14
Figura 2.9 - Representação esquemática do ciclo térmico na soldagem em um só passe.....	19
Figura 2.10 - Repartição Térmica X Diagrama de Fases. Fonte adaptado: AWS (1995).....	16
Figura 2.11 - Repartição térmica. Fonte adaptado de FBTS (2000).....	17
Figura 2.12 - Influência do pré-aquecimento na largura e na dureza da Zona termicamente afetada pelo calor (ZTA). Caso 1 sem pré-aquecimento onde B – A corresponde à largura da ZTA. Caso 2 com pré-aquecimento onde C – A corresponde à largura da ZTA. Fonte: AWS (1995).....	18
Figura 2.13 – Crescimento competitivo de grãos na zona fundida. Fonte: Kou (1987).....	19
Figura 2.14 - Constituintes da zona fundida em aços ferríticos conforme Tabela 3.1. Fonte: Modenesi (2004).....	21
Figura 2.15 - Crescimento epitaxial, solidificação da zona fundida, (FBTS, 2000).....	21
Figura 3.1 - Metal base: A) Anéis tubulares API 5L Grau X-80; B) Fatias a partir dos anéis tubulares cortados pelo processo oxi-corte.....	23
Figura 3.2. - Esquema dos pontos investigados pelo fabricante do tubo para o ensaio de dureza Vickers.....	24
Figura 3.3 - Fonte de tensão Kemppi Pro 3200.....	26
Figura 3.4 - A1) Esmerilhamento; A2) Detalhe do corpo de prova esmerilhado; B) Visão interna da chapa de teste.....	27
Figura 3.5 - Desenho esquemático da junta a ser soldada e da distribuição de passes de soldagem.....	28
Figura 3.6 - Sequência do processamento do ensaio de líquido penetrante; 1) líquido penetrante e revelador; 2) Aplicação do líquido penetrante; 3) Aplicação do líquido revelador.....	29

Figura 3.7 - Microdurômetro utilizado no ensaio de microdureza, modelo HVS-5, IMPORTÉCNICA.....	30
Figura 3.8 - Ensaio de dobramento; A) Vista Geral da prensa usada; B) Ensaio de dobramento; C) Vistas panorâmicas da área soldada dobrada.....	30
Figura 3.9 - Equipamento utilizaados no ensaio de tração. A) Maquina Instron 3520; B) Detalhe do corpo de prova na célula de carga; C) Corpos de prova utilizado neste ensaio.....	31
Figura 4.1 - Corpos de prova soldados. (a) Vista da face; (b) Vista da raiz.....	33
Figura 4.2 - Ensaio dos líquidos penetrante e o revelador sobre a solda SS1, SS2 e SS3; SS2a) Revelação dos defeitos superficiais; SS2b) Defeitos superficiais de porosidade do tipo vermiforme.....	37
Figura 4.3 - Distribuição das imagens micrografia da condição de soldagem 1 (SS1).....	38
Figura 4.4 - Fotos micrográfia da situação de soldagem SS2.....	39
Figura 4.5 - Distribuição das imagens foto micrografia da situação de soldagem 03 (SS3)...	40
Figura 4.6 - Distribuição das imagens foto micrografia da situação de soldagem 03 (SS3)...	41
Figura 4.7 - Esquema dos pontos de indentação para ensaio de microdureza.....	42
Figura 4.8 - Curva do resultado de microdureza do CP 01 da condição de soldagem SS1....	42
Figura 4.9 - Curva do resultado de microdureza do CP 02 da condição de soldagem SS2....	42
Figura 4.10 - Curva do resultado de microdureza do CP 03 da condição de soldagem SS3..	43
Figura 4.11 - Resultados dos corpos de prova CP1, CP2 e CP3 após ensaio de dobramento.	43
Figura 4.12 - Resultado dos ensaios de dobra da situação de soldagem SS1 (CPI).....	44
Figura 4.13 - Perfis dobrados da situação de soldagem SS2 (CPII) e SS3 (CPIII).....	45
Figura 4.14 - Detalhe do ensaio de tração. A) Célula de carga do equipamento de tração; B) Corpo de prova rompido na zona de fusão.....	45
Figura 4.15 - Resultado do ensaio de tração da situação de soldagem SS1.....	46
Figura 4.16 - Resultado do ensaio de tração da situação de soldagem SS2.....	47
Figura 4.17 - Resultado do ensaio de tração da situação de soldagem SS3.....	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

API	American Petroleum Institute
ARBL	Alta Resistencia e Baixa Liga
ASME	American Society of Mechanical Engineers
ASTM	Associação Americana de Ensaio de Materiais (do inglês: American Society for Testing and Materials)
CA	Corrente Alternada
CP	Corpo de Prova
FCAW-G	Flux-Cored Arc Welding – soldagem a arco com arame tubular e proteção gasosa
GMAW	Gás Metal Arc Welding – soldagem a arco com proteção gasosa
IIW	International Institute of Welding
MAG	Processo de Soldagem de Metais com Gás Ativo (do inglês: Metal Active Gas Welding)
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
MIG	Processo de Soldagem de Metais com Gás Inerte (do inglês: Metal Inert Gas Welding)
NBR	Associação Brasileira de Normas Técnicas
TIG	Tungsten Inert Gas Welding - Soldagem de Metais com Gás Inerte e eletrodo não-consumível de Tungstênio
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
ZF	Zona Fundida
ZL	Zona de Ligação
ZTA	Zona Termicamente Afetada

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Constituintes da zona fundida em aços ferríticos, segundo o IIW. Fonte: Modenesi (2004).....	21
Tabela 3.1 - Dureza Vickers do metal base apresentado pelo fabricante do tubo.....	23
Tabela 3.2. - Limites de escoamento e resistência última a tração fornecidos pelo fabricante do tubo.....	24
Tabela 3.3. - Composição química do aço API 5L Grau X-80.....	24
Tabela 3.4 - Composição química e propriedades mecânicas do arame tubular,.Fonte: White Martins.....	25
Tabela 4.1 - Distribuição dos dados da situação de soldagem 01 (SS1).....	35
Tabela 4.2 - Distribuição dos dados da situação de soldagem 02 (SS2).....	36
Tabela 4.3 - Distribuição dos dados da situação de soldagem 03 (SS3).....	36

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1 Generalidades

A busca incessante por parte dos seres humanos por melhores condições de subsistência e conforto em nosso planeta tem sido uma luta constante e presente em nosso cotidiano desde os primeiros passos de nossa espécie. Desde o domínio do fogo por nossos ancestrais mais primitivos, até o desenvolvimento industrial conseguido no século XIX, e se perpetuando até os dias atuais, é prova desta intenção de propiciar melhor qualidade de vida aos membros que compõem nossas sociedades.

Embora identificados alguns problemas conceituais e filosóficos em nossa sociedade sobre o que realmente é importante para a manutenção e perpetuação de nossa espécie, nós, os cientistas e pesquisadores de nossa época trabalhamos em busca de obter uma resposta, ou respostas, a respeito dos grandes questionamentos que promovem o desenvolvimento tecnológico e social de nosso tempo.

Em função das perguntas e da necessidade de repostas em torno do tema, é interessante a pesquisa em novos materiais e o processamento destes, na discussão a respeito dos aços estruturais microligados, apontando o seu desenvolvimento, custo e aplicação dos mesmos em nossos dias, e aplicações e desenvolvimentos futuros de curto e médio período.

Podemos agrupar em uma mesma família de aços, aqueles que apresentam em sua composição química, alguns elementos de liga que se localizam em posições intrínsecas nos grãos ou nos contornos de grãos. Os elementos de liga comumente presentes são V, Ti, Nb, Mo, dentre outros, que atuam aumentando a resistência mecânica por solução sólida, possibilitando a redução de carbono e assegurando a boa soldabilidade destes materiais. A melhoria das propriedades mecânicas são bastante significativas, os custos de produção encontram-se em patamares praticáveis, o que os tornam bastante atrativos aos setores industriais automotivos, de mineração e pelo setor de petróleo e gás natural. Em alguns aços desenvolvidos nos últimos anos, os níveis de resistência mecânica chegam a 110.000 psi (cerca de 760 MPa).

1.2 Justificativa

As propriedades mecânicas nas diferentes regiões da junta soldada e a transferência de metal de adição para poça de fusão são influenciadas pelos parâmetros de soldagem. Alguns

aços estruturais, como o API 5L Grau-X80, ainda não estão sendo amplamente utilizados no seguimento de petróleo e gás natural no Brasil, tendo em vista que mesmo uma das maiores empresas de energia do país, a Petrobras, e que investe maciçamente em desenvolvimento e tecnologia, tem poucos procedimentos de soldagem qualificados. Mesmo estes utilizam-se do processo SMAW para a execução do passe de raiz e do GMAW para os de preenchimento.

Pouco estudo tem sido dedicado a este tema e os dados levantados sobre as propriedades mecânicas da junta soldada ainda não são conclusivos. Ainda há muito a se estudar sobre a influência dos parâmetros de soldagem do processo FCAW-G sobre as propriedades mecânicas desses aços estruturais.

Com o intuito de intensificar os esforços para a elucidação de algumas dúvidas que circundam o processo FCAW-G na aplicação em tubulações do tipo API 5L Grau-X80, este trabalho de dissertação vem contribuir somando esforços na tentativa de responder a algumas das perguntas sobre os parâmetros de soldagem utilizados no processo e sua interação com tal família de aços.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Objetiva-se avaliar a influência dos parâmetros de soldagem no processo FCAW-G sobre a microestrutura da Zona Termicamente Afetada (ZTA) pelo calor e sobre as propriedades mecânicas em juntas de aço API 5L Grau X-80.

1.3.2 Objetivos Específicos

Avaliar os efeitos dos parâmetros de soldagem analisando:

- A microestrutura das diferentes condições de soldagem;
- A possível existência de descontinuidades a partir dos ensaios de dobramento;
- As propriedades mecânicas das juntas por tração uniaxial
- Os defeitos superficiais da solda com a aplicação de técnicas de ensaios não destrutivos;
- A qualidade da junta soldada pelo processo FCAW-G através de ensaios de microdureza, tração e dobramento;
- A viabilidade do uso do processo FCAW-G em tubulações para o seguimento da indústria de petróleo e gás natural.

1.4 Estruturas da Dissertação

A estrutura desta dissertação está organizada por capítulos onde:

Discussões sobre o que é o processo de soldagem e sua importância é abordado dentro do capítulo 1, devido a sua importância e necessidade dentro do setor industrial. É esclarecida a necessidade do estudo proposto. A explanação é desenvolvida em forma de justificativa apoiada em objetivos que mapeiam os principais parâmetros a serem analisados e que darão suporte ao sucesso da pesquisa proposta. A estrutura da dissertação está baseada na divisão de capítulos para uma sequência lógica dos assuntos, os quais serão apresentados.

No capítulo 2, desenvolve-se o enquadramento teórico. Apresenta-se uma leitura quanto ao estado da arte no que diz respeito ao processo FCAW-G, assim como do desenvolvimento de aços microligados da família API 5L Grau-X80 para o seguimento industrial de petróleo e gás natural, bem como a forma como estes são processados e como são realizadas as uniões destes tipos de junta.

No capítulo 3, são tratados os materiais e os métodos adotados para a análise dos resultados. São apresentados os materiais empregados nos experimentos realizados durante a execução deste projeto, bem como o método empregado. Neste capítulo serão descritos maiores detalhes do aço empregado nos experimentos, o equipamento e o processo utilizados para unir os corpos de prova e os procedimentos metodológicos utilizados no ensaio de microscopia óptica, dobramento e tensão de engenharia.

No capítulo 4, são expostos os resultados e realizadas as devidas discussões das análises realizadas. A discussão é realizada de acordo com os parâmetros metodológicos já determinados como a serem atingidos e seguidos para a verificação das propriedades mecânicas, e em concordância com as micrografias observadas. Dentro dos resultados e discussões buscou-se mostrar os resultados obtidos durante os diversos ensaios realizados, assim como as observações e discussões que a partir deles podem ser geradas.

A partir dos resultados obtidos e discutidos são elaboradas as conclusões finais, as quais poderão ser afirmadas em função das análises e da pesquisa realizadas. Apontam-se sugestões para trabalhos futuros como uma contribuição da pesquisa para o setor metalúrgico e industrial. O referencial bibliográfico indica as fontes pesquisadas e que discutem o contexto em torno dos temas metalurgia, soldagem e materiais metálicos.

CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Aços Estruturais Microligados

Os aços microligados são especificados pela sua resistência mecânica, e não pela sua composição química. São desenvolvidos a partir de aços de baixo carbono com pequenas adições de elementos de liga. Estes aços apresentam maior resistência mecânica que os aços de baixo carbono idênticos, mantendo a ductilidade e a soldabilidade, e são destinados às estruturas onde a soldagem é um requisito importante, assim como a resistência, de acordo com Pannoni (2005).

Os fatores mais importantes que contribuem para o aumento da resistência mecânica dos aços microligados são: composição química do aço; microestrutura; precipitação de carbonitreto; efeito das discordâncias, conforme alerta Gallego (2004).

Os ganhos nas propriedades tais como resistência, tenacidade e soldabilidade são obtidos através da combinação do uso de microligantes com um tratamento termomecânico adequado. Em função do refinamento do tamanho do grão ferrítico final, assim como do endurecimento por precipitação controlado, estas propriedades mecânicas são obtidas. Os elementos microligantes tais como Nb, Ti, V, facilitam o refinamento do grão através da precipitação e do ancoramento por soluto na austenita e contribuem para o aumento da resistência através da precipitação na ferrita durante e após a transformação austenita – ferrita, conforme afirma Elisei *et. al.* (2006).

Os aços de alta resistência e baixa liga (ARBL), ou aços microligados, são aços onde ocorre um rigoroso controle, tanto na forma de produzir, quanto na forma de processar. Esses aços são aplicados como aços estruturais, aços para a indústria automobilística, aços para tubulação, vasos de pressão, etc. Podem ser agrupados ainda como aços bifásicos (*dual phase*), aços de perlita-reduzida (*reduced-pearlite*), aços laminados controladamente, etc.

Não podendo, portanto, confundir-se pelas diversas nomenclaturas, devendo deter-se as propriedades e características que se exige para as diversas aplicações a que se dispõem os aços ARBL. Estas decorrem basicamente de sua composição química, processamento e, como consequência destes, da sua macro e micro estrutura. Para a produção de tubos com costura da família API 5L, os lingotes que servirão de matéria prima para a confecção das chapas são fabricadas sob um rigoroso controle químico, onde os teores de elementos de liga e de impurezas encontram-se sob uma estreita faixa de tolerância.

Estes teores de elementos de liga podem ser consultados na norma API, que define os limites máximos de concentração em peso para cada elemento, de acordo com a classe do tubo. É prática comum encontrar a concentração dos elementos de liga abaixo do indicado na norma, pois estes obedecem a acordos entre o fabricante do aço e o fabricante do tubo, para que ao final de todo o processo, consiga-se atender aos níveis de propriedades mecânicas que se deseja para produto final.

Após a etapa de obtenção da matéria prima, a laminação das chapas acontece também de maneira controlada onde se alcança os níveis de propriedades mecânicas desejados, controlando os tratamentos termomecânicos aplicados para a confecção das chapas e, por fim, do tubo.

2.2 API 5L Grau X-80

Uma família dos aços microligados que exerce bastante interesse no seguimento de petróleo e gás natural são os aços para a fabricação de tubos que seguem a especificação da norma segundo a *American Petroleum Institute*. Tendo em vista a sua aplicação, estes materiais necessitam de uma elevada resistência mecânica, elevada resistência a corrosão, resistência a fadiga, boa soldabilidade, entre outros conforme Silva *et. al.* (2008). Tais propriedades podem ser modificadas durante e após a aplicação de processos de conformação, por exemplo, para a produção de tubos, ou aplicação de processos de soldagem, devido ao calor imposto sobre os materiais, igual ou superior a temperatura de recristalização de tais aços.

2.2.1 Laminação das chapas para a produção de tubos API 5L Grau X-80

O processo de laminação controlada utilizado na fabricação de chapas para a produção de tubos segundo a norma API 5L Grau X-80 de fabricação brasileira se dão em três fases principais de acordo com Durand (2007):

Fase 1: nesta fase que acontece à temperatura de aproximadamente 1523 K (1250 °C), o material é reduzido de espessura, deformando os grãos austeníticos a uma geometria alongada. Graças aos níveis de temperatura, novos grãos de austenita poligonal nucleiam e crescem nos contornos da austenita deformada, sendo de menor tamanho em relação aos grãos iniciais. Os passes de laminação são realizados até iniciar a recristalização estática. Os novos grãos de austenita deformados e recristalizados possuem o mesmo tamanho dos antigos;

Fase 2: acontece a uma temperatura abaixo de 1323 K (1050 °C). A cada passe de laminação a austenita é deformada sem existir recristalização nos contornos de grão,

aumentando a relação área-volume da austenita, conseguindo-se uma redução de grão entre 60% e 80%;

Fase 3: é realizada próxima à temperatura de transformação austenita-ferrita. A chapa é resfriada em água, até atingir a temperatura onde a ferrita nucleia nos contornos da austenita deformada. Quanto menor o tamanho do grão austenítico, maior o número de sítios onde a ferrita pode nuclear, gerando dessa forma uma granulometria de 10 a 30 μm . Após a formação dos grãos ferríticos, a chapa é retirada do resfriamento a água e passa a resfriar ao ar. As três etapas a níveis microscópicos estão representados na figura 2.1.

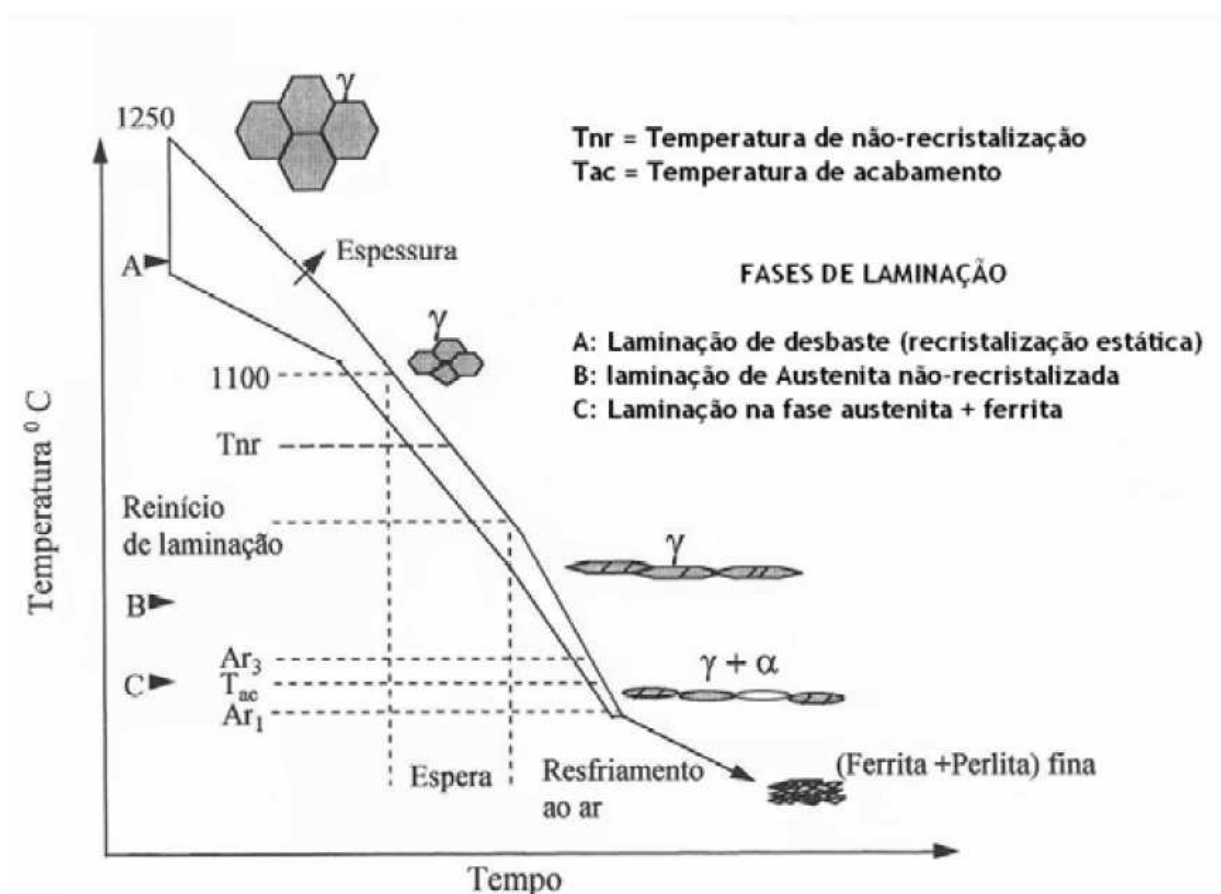


Figura 2.1 - Processo de laminação controlada. Fonte: Durand (2007).

2.2.2 A conformação do Tubo

A chapa para fabricação do tubo segundo a classificação API 5L é conformada pelo processo UOE, o qual se desenvolve em três etapas: a) Dobramento da chapa em forma de “U”; b) Conformação da chapa de “U” para “O”, execução da soldagem longitudinal, normalmente pelo processo a arco submerso, para o fechamento; c) Expansão (E) interna por

pressão hidráulica para a correção da geometria de acordo com a especificação API 5L. (Norma API 5L, 2004). A figura 2.2 é uma representação do processo UOE.

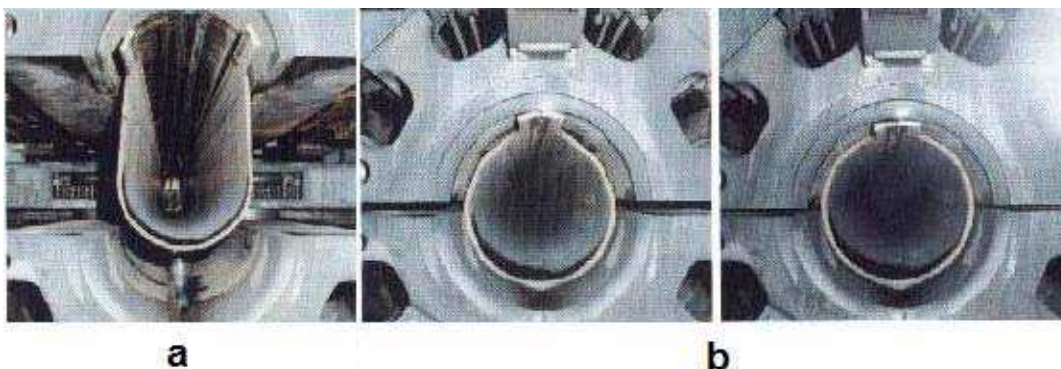


Figura 2.2 - Processo de conformação UOE. a) Conformação em “U”. b) Etapas de conformação em “O”. Fonte: Durand (2007).

2.3 Processo de soldagem (a arco elétrico) com Arame Tubular

O processo com Arame Tubular é um processo de soldagem por fusão, cujo arco é estabelecido entre a peça e o eletrodo alimentado continuamente, sendo protegido pela ação de um gás, FCAW-G, ou não, FCAW, e pela decomposição do fluxo alojado no interior do arame, conforme Welding Handbook (1991).

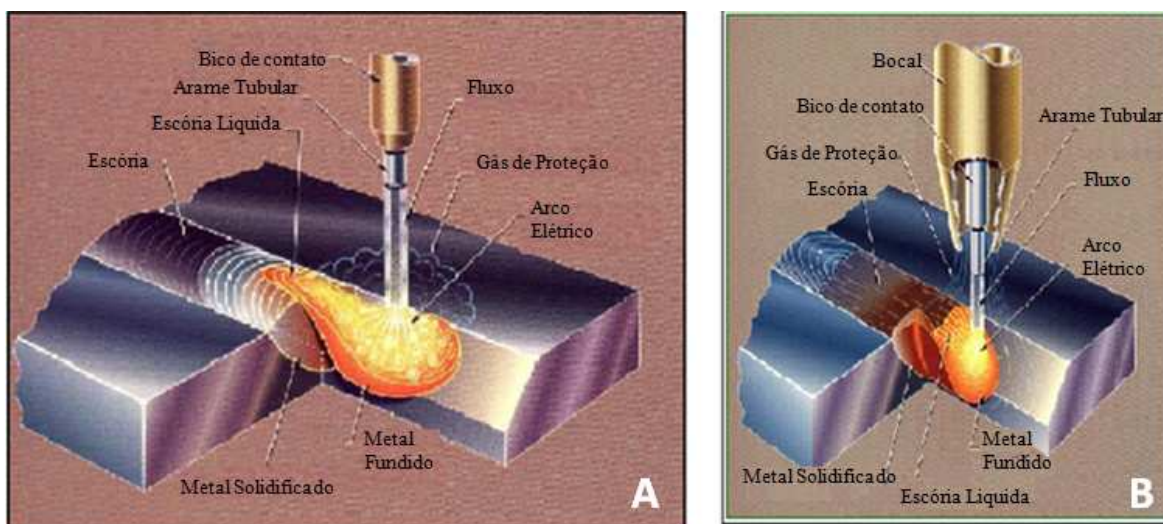


Figura 2.3 - Processo de soldagem a arco com arame tubular, (A) com proteção auxiliar de gás e (B) autoprotégido. Fonte: Ordóñez (2004).

O processo FCAW-G é normalmente um processo semi-automático e muito semelhante ao processo a arco com proteção gasosa e eletrodo consumível (GMAW) no que diz respeito a equipamento e princípios de funcionamento. Por outro lado, o processo também se assemelha

à soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido (SMAW), do ponto de vista metalúrgico. Assim, a soldagem FCAW-G é um processo que acumula as principais vantagens da soldagem GMAW, como alto fator de trabalho do soldador, alta taxa de deposição, alto rendimento, resultando em alta produtividade e qualidade da solda produzida, bem como as da soldagem SMAW, como alta versatilidade, possibilidade de ajustes de composição química do cordão de solda e facilidade de operação em campo, conforme Ordóñez (2004).

Na soldagem de dutos, o processo FCAW-G tem sido usado, em alguns casos, combinado com o processo de soldagem a arco com eletrodo revestido (SMAW), como apresentado por Silva et al. (2001). O passe de raiz é normalmente feito, ou pelo processo de soldagem com eletrodo revestido, ou pelo processo de soldagem TIG. A utilização do processo de soldagem FCAW-G acontece para os passes de enchimento e acabamento.

2.3.1 Vantagens e limitações do processo Arame Tubular

Devido às características do processo arame tubular, onde uma junção entre algumas características dos processos MIG/MAG e eletrodo revestido é conseguida, o processo acumula as principais vantagens da soldagem MIG/MAG, tais como um alto fator de trabalho do soldador, alta taxa de deposição e alto rendimento, o que culmina em uma grande produtividade; e as vantagens da soldagem com eletrodo revestido como a alta versatilidade, possibilidade de ajustes de composição química do metal de solda e facilidades de operação em campo. Pode ser dito que o processo arame tubular apresenta características em termos de flexibilidade e produtividade superiores às da soldagem com eletrodos revestidos e MIG/MAG, conforme Marques *et. al.* (2007).

Devido à alimentação automática e contínua de arame eletrodo pelo próprio equipamento, similar ao equipamento de soldagem MIG/MAG, e a regulação de consumo deste arame, dentro de certas limitações, que é conseguida pela característica da fonte utilizada no processo, conforme Scotti e Ponomarev (2008), é o que justifica o aumento na produtividade em relação ao processo de soldagem por eletrodo revestido, onde o soldador, nesse caso, é responsável basicamente pela manutenção do arco aberto entre a tocha de soldagem e a peça a ser soldada.

A taxa de deposição elevada, em relação ao processo eletrodo revestido, dar-se pela regulação devido à característica da fonte, evitando assim a extinção do arco elétrico, associada à alimentação contínua e automática, característica do processo MIG/MAG e arame tubular. Quando nos deparamos com o processo arame tubular autoprotégido, a melhora no rendimento é graças também, além dos fatores citados para explicar a melhor taxa de

deposição e o fator de trabalho do soldador, a queima do fluxo encontrado no interior do arame, que é na verdade um tubo de pequeno diâmetro (0,8 a 1,6 mm), e com isso temos uma geração de atmosfera protetora ao redor da poça de fusão. Quando nos deparamos com o processo arame tubular com proteção gasosa, a principal função do fluxo é a estabilização do arco, controle da composição química da junta, além de apoio a atmosfera de proteção da poça de fusão. Como limitação, podemos citar a necessidade de remoção de escória e a geração de grande quantidade de fumaça quando comparado com o processo MIG / MAG ou mesmo ao eletrodo revestido de acordo com Durand (2007).

2.3.2 Principais variáveis de soldagem

Podemos citar como principais variáveis de soldagem do processo FCAW-G a intensidade de corrente, tensão de soldagem, velocidade de soldagem, tipo de polaridade, comprimento energizado do eletrodo (*stick out*) e o gás de proteção.

A intensidade de corrente de soldagem influencia diretamente na taxa de consumo de material de adição, na penetração da solda e na energia de soldagem, conforme Quites (2002) e Machado (1996).

O tipo de polaridade mais usado no processo FCAW-G é a inversa, onde a corrente é contínua e o eletrodo está no pólo positivo (CC+). Nesta polaridade o arco torna-se mais estável, como propõe Machado (1996). A polaridade direta (CC-), onde o eletrodo está ligado no pólo negativo, não apresenta aplicação prática na soldagem com o processo FCAW-G. A técnica de soldagem com a utilização da corrente alternada (CA) ainda está sendo estudada e aprimorada, de acordo com Quites (2002) e Machado (1996).

A tensão de soldagem influencia diretamente na energia de soldagem, na largura do cordão, na altura do arco e no modo de transferência de metal de adição. De modo geral em níveis de tensões baixas tem-se a transferência de material por curto-circuito e em elevadas tensões tem-se a transferência por spray, segundo Quites (2002) e Machado (1996). De uma maneira geral, tensões do arco menores que 22 V favorecem a transferência por curto-circuito, dependendo da corrente utilizada. Acima desse valor, a transferência é globular ou por pulverização axial, conforme a corrente de soldagem esteja abaixo ou acima da corrente de transição, conforme Brandi (1992).

A velocidade de soldagem é a velocidade relativa entre a pistola de soldagem e a peça a ser soldada. Para uma certa condição de soldagem, quando é utilizada uma velocidade de soldagem relativamente alta, a penetração da solda diminui, a energia de soldagem também diminui, e o contrário ocorre em baixas velocidades de soldagem, conforme Quites (2002) e

Machado (1996). O comprimento do eletrodo é o comprimento do arame que está projetado em relação ao bico de contato até o início do arco, conforme mostrado na figura 2.4.

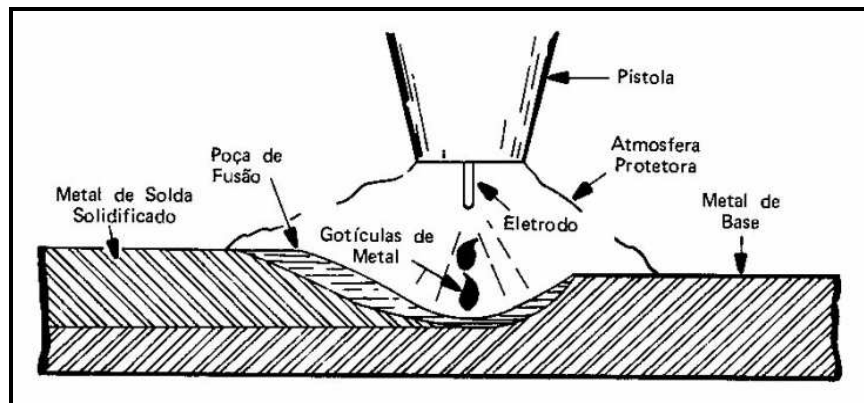


Figura 2.4 -Esquema do processo de soldagem FCAW-G com proteção gasosa. Fonte: Marques et al (2007)

Neste trecho de arame por onde passa a corrente elétrica gera-se calor por efeito joule. Quanto maior o comprimento do eletrodo, maior será o calor gerado por efeito Joule e conseqüentemente terá um acréscimo na taxa de fusão de material. Este calor gerado influencia diretamente na taxa de fusão de material, de acordo com Quites (2002) e Machado (1996).

A velocidade de alimentação do arame influencia a tensão e a corrente de soldagem, para uma dada regulação de tensão na fonte de energia. Um aumento na velocidade de alimentação resulta na diminuição da distância do arco, na redução da tensão de soldagem e no aumento da corrente de soldagem, aumentando então a energia para fundir o arame, o que provoca a volta da distância do arco original de acordo com Brandi (1992). Da literatura de soldagem, é entendido que velocidades de alimentação do arame muito altas não tem se estabelecido particularmente devido à incapacidade de alcançar as propriedades mecânicas desejadas na junta soldada. A velocidade de alimentação do arame aplicável na prática é, portanto, em torno de 417 mm/s na maior parte (arames de 1.2mm) em conformidade com Stekly (1989) e Lahsteiner (1991).

Outra variável importante é a vazão do gás de proteção. Esta afeta diretamente a qualidade do metal depositado. Ao se utilizar uma vazão inadequada, a possibilidade de propiciar pouca proteção da poça de fusão aumenta e, conseqüentemente, ocorre uma possibilidade maior de ocorrência de poros e oxidação. Uma vazão excessiva resultará em turbulência e aumento de impurezas no metal depositado. A escolha correta da vazão do gás

dependerá do tipo e do diâmetro do bocal da tocha, da distância entre bocal e a peça de trabalho e das correntes de ar durante a soldagem, concordando com Bracarense (2000).

O comprimento do eletrodo é o comprimento do arame que se estende desde o bico de contato até o início do arco. Este trecho de arame por onde passa corrente elétrica gera calor por efeito Joule. Quanto maior o comprimento do eletrodo, maior será o calor gerado por efeito Joule e, conseqüentemente, haverá um acréscimo na taxa de fusão de material. Este calor gerado influi diretamente na taxa de fusão de material, como mencionado por Quites (2002) e Machado (1996).

2.3.3 Modos de transferência do metal de adição

De maneira geral, o modo de transferência do metal de adição nos processos de soldagem com fusão influencia na geometria e nas propriedades da solda, nas características dos processos, na estabilidade do arco, na possibilidade de ser executada em determinadas posições, na qualidade final da solda destacando-se a quantidade de respingos produzido, entre outros, de acordo com Quites (2002).

A transferência metálica natural acontece basicamente por dois mecanismos, os quais caracterizam duas classes. No primeiro, há o contato da gota com a poça antes do destacamento e, por isto, essa classe de transferência é denominada transferência por curto-circuito. De acordo com o segundo mecanismo, a gota destaca-se antes do contato com a poça, caracterizando a classe denominada de transferência por vôo livre. Esta última se subdivide ainda em seis diferentes modos, conforme as particularidades da formação e destacamento das gotas, conforme Scotti e Ponomarev (2008).

O modo de transferência do metal de adição pode ser identificado pelo soldador durante a execução da soldagem através do diâmetro da gota fundida, comprimento do arco e nível de ruídos. Scotti e Ponomarev (2008) fizeram uma subdivisão da forma de transferência metálica por vôo livre em seis diferentes formas, aqui iremos nos deter em duas destas, a serem: transferência globular e transferência por spray. Faremos menção também a forma de transferência citada no primeiro mecanismo, transferência por curto-circuito.

A transferência globular ocorre para baixas densidades de corrente e níveis de tensão mais elevados quando comparada a transferência por curto-circuito. As gotas de metal fundido são transferidas para a poça de fusão principalmente pela ação da força gravitacional, o que limita a soldagem a posição plana. O diâmetro das gotas é maior que o diâmetro do arame. Alguns defeitos comuns neste modo de transferência são observados, como a ocorrência de falta de fusão, falta de penetração e respingos, segundo Quites (2002). Este

mecanismo de transferência metálica pode ser esquematicamente representado conforme a figura de representação esquemática 2.5.

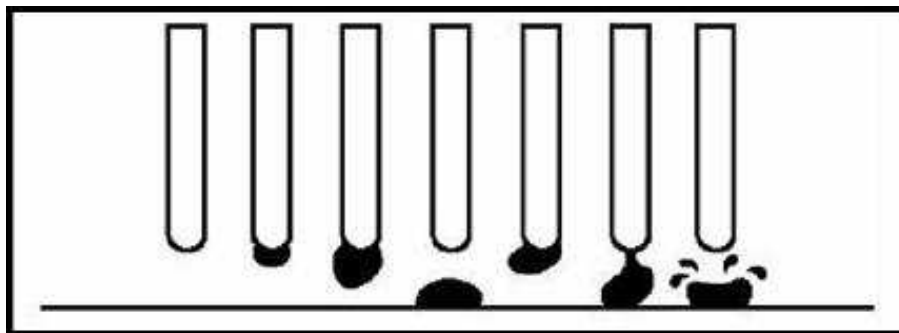


Figura 2.5 - Representação do modo de transferência metálica globular. Fonte: Marques et al (2007)

A transferência metálica por spray é fruto do aumento da corrente de soldagem, onde outras forças que influenciam este mecanismo começam a exercer maiores níveis de influência. Desta forma, é favorecida uma diminuição do diâmetro da gota de metal de adição durante a transferência metálica. Estes novos fatores começam a aumentar a partir de determinados níveis de corrente que é denominado de corrente de transição.

As gotas desta vez são pequenas e são destacadas da ponta do arame devido a certas forças magnéticas que atuam nas direções radiais e axiais. Para comprimentos de arco curtos, o cordão tem um bom acabamento e praticamente não há respingos.

Devido aos altos níveis de corrente, a soldagem se torna difícil nas posições vertical e sobre cabeça, podendo ocorrer escorrimento a partir da poça de fusão. No spray, um arco alto (aproximadamente 33 V) e uma certa quantidade de oxigênio no gás de proteção mantém a estabilidade do arco, conforme Modenesi e Nixon (1994). A quantidade de calor colocada na peça para a solda é bastante elevada, sendo esse modo de transferência adequado para soldar chapas grossas. A penetração é bem elevada e o arco é bastante suave, como mostrou Brandi (1992). A Figura 2.6 representa esquematicamente o modo de transferência metálica spray.

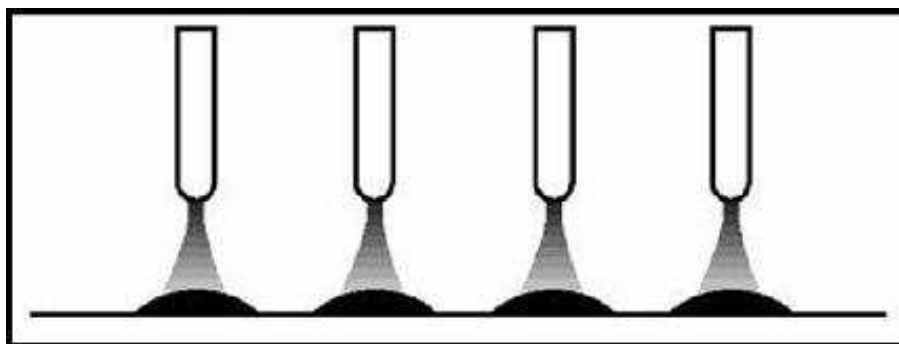


Figura 26 - Representação do modo de transferência metálica spray. Fonte: Marques et al (2007)

A transferência por curto-circuito ocorre para valores mais baixos de corrente que a transferência globular. A gota que se forma na ponta do arame tubular toca a poça de fusão, formando um curto-circuito. A gota é puxada para a poça de fusão devido a diversos fatores, entre os quais o que se destaca é a tensão superficial desta e, por isso, este modo de transferência é adequado para todas as posições. A quantidade de calor colocada na peça é bem menor que a da transferência globular, sendo assim recomendada para soldar chapas de menor espessura. A penetração não é muito grande e existe problema de respingo e instabilidade do arco, como mostrou Brandi (1992). A Figura de representação esquemática 2.7 representa esquematicamente o modo de transferência metálica curto-circuito.

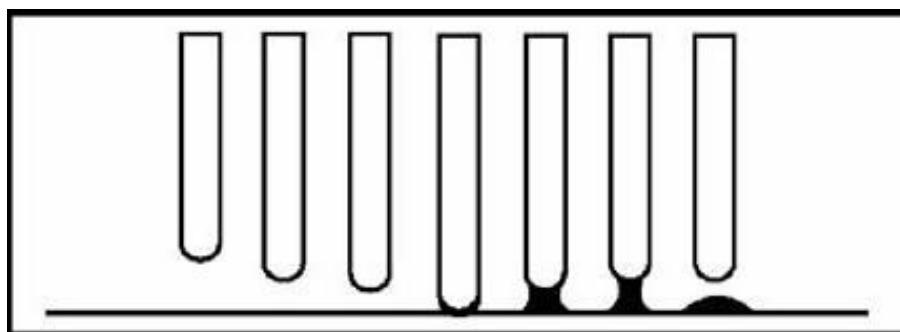


Figura 2.7 - Representação do modo de transferência metálica curto-circuito. Fonte: Marques et al (2007)

2.4 Metalurgia da Soldagem

Soldagem pode ser entendida como processo de união entre dois ou mais materiais de forma permanente, sejam eles similares ou não, baseados na ação de forças em escala atômica semelhante às existentes no interior do material. Essa união pode ser promovida com o uso de calor, onde as partes a serem unidas sofrem aquecimento e fundem-se. A esse tipo de processo dá-se o nome de soldagem por fusão.

O calor é, portanto, elemento essencial à execução de uniões soldadas, mas pode, por outro lado, representar fonte potencial de problemas devido à sua influência direta nas transformações metalúrgicas e nos fenômenos mecânicos que ocorrem na zona de solda, conforme Brandi (1992). Devido ao calor utilizado no processo, o material adjacente à zona de soldagem é exposto a ciclos térmicos e transformações metalúrgicas complexas, bem como à indução de deformações e tensões residuais de acordo com Okumura e Taniguchi (1982). Todos esses fenômenos têm profunda relação com a ductilidade, defeitos de soldagem, aparecimento de trincas e outros problemas correlatos na estrutura, os quais, por sua vez,

exercem grande influência na segurança das estruturas soldadas, Okumura e Taniguchi (1982).

2.4.1 A Junta Soldada

Do ponto de vista microestrutural, a junta soldada pode ser dividida em três regiões distintas: a zona fundida, a zona de ligação e a Zona termicamente afetada pelo calor (ZTA). Na figura 2.8 é mostrado um esboço destas três regiões.

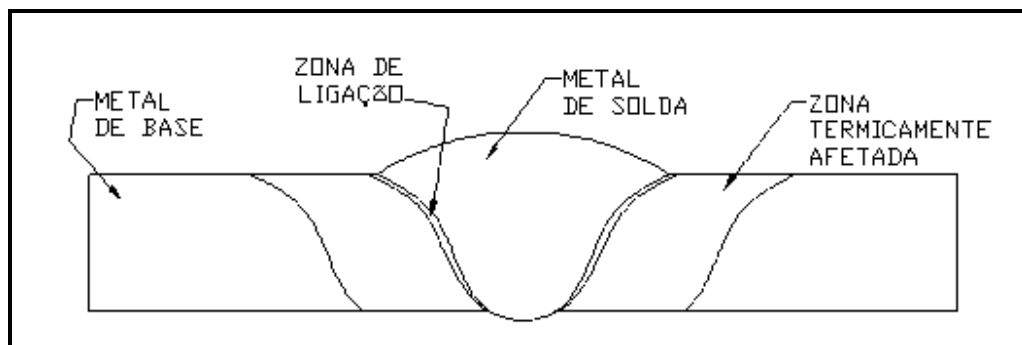


Figura 2.8 - Regiões de uma junta soldada. Fonte: Pedrosa (2008).

As características microestruturais são configuradas a depender basicamente das condições térmicas na qual a junta foi submetida e da composição química do metal de base e do metal de adição.

2.4.2 Aporte Térmico

As temperaturas as quais o material é submetido durante o processo de soldagem é função da energia de soldagem e da temperatura de pré-aquecimento. a energia de soldagem absorvida pela junta soldada é calculado pela equação (a).

$$E = \eta \cdot \frac{60 \times U \times I}{v} \quad (a)$$

Onde:

E – Energia de soldagem [J/cm]

n – Eficiência térmica (rendimento do arco)

U – Tensão de soldagem [V]

I – Corrente de soldagem [A]

v – Velocidade de soldagem [cm/min]

2.4.3 Ciclo Térmico

Na maioria dos processos de soldagem, a junta precisa ser aquecida até uma temperatura adequada. Em particular, na soldagem por fusão, trabalha-se com fontes de calor de elevada temperatura (2.000 a 20.000°C) e concentradas (como, por exemplo, o arco elétrico, cuja intensidade atinge cerca de $8 \times 10^8 \text{ W/m}^2$), as quais ao serem deslocadas ao longo da junta resultam na formação da solda pela fusão e solidificação localizadas da junta. Esta aplicação concentrada de energia gera, em pequenas regiões, temperaturas elevadas, altos gradientes térmicos (10^2 a 10^3 °C/mm), variações bruscas de temperatura (de até 10^3 °C/s) e, conseqüentemente, extensas alterações de microestrutura e propriedades, em um pequeno volume de material como apontam Marques et. al. (2007).

A peça a ser soldada experimenta duas situações que podem ser distintas de maneira simplificada como fornecimento de calor a junta e dissipação deste calor pela peça. Na soldagem a arco elétrico, a energia de soldagem, entendido como a quantidade de energia por unidade de comprimento fornecida a junta, é um parâmetro importantíssimo para a caracterização do processo. Podemos considerar o arco como sendo a única fonte de calor. A dissipação de calor ocorre na peça principalmente por condução e pode ser estimado experimentalmente ou teoricamente.

Denominamos ciclo térmico como a curva que caracteriza as diferentes temperaturas atingidas pela junta e pelas regiões próximas a esta. A figura 2.9 mostra um esquema de como se comporta as curvas de ciclo térmico.

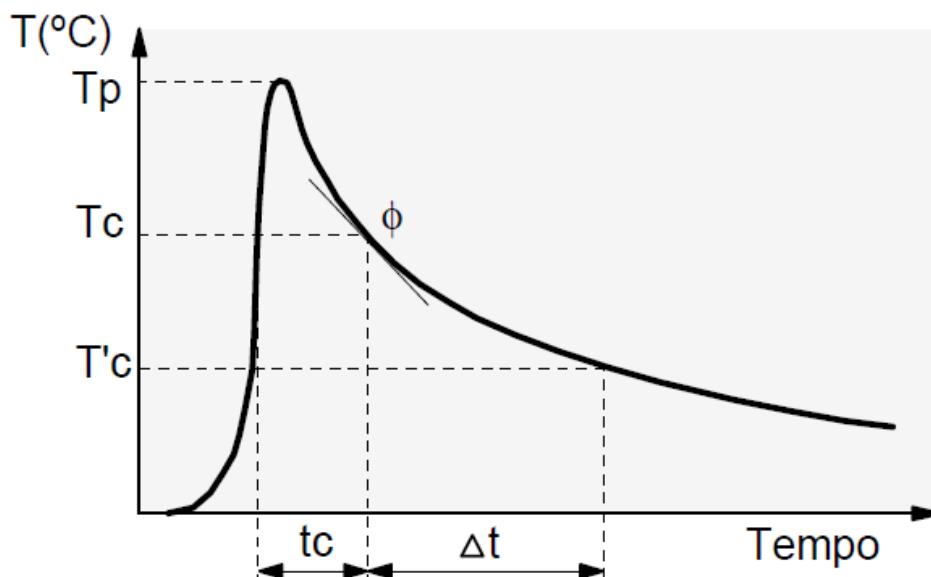


Figura 2.9 - Representação do ciclo térmico na soldagem em um só passe. Fonte: Marques et. al. (2007)

Existem outras características do ciclo térmico, as quais podem se destacar a temperatura de pico, que é a máxima temperatura atingida pelo ponto e que indica a possibilidade de ocorrência de transformações microestruturais, delimitando dessa forma a Zona termicamente afetada pelo calor (ZTA) durante a soldagem; o tempo de permanência acima da temperatura crítica, o que é significativo no sentido de ocorrer alterações microestruturais ou de propriedades do material; velocidade de resfriamento, que é obtida pela derivada em uma determinada temperatura da curva de resfriamento, como escreveram marques e Modanesi (2007). Para os aços carbono, e conseqüentemente para os aços ARBL, na região da junta, são aquecidos a altas temperaturas e dessa forma, austenitizados. O produto da transformação da austenita dependem fortemente das condições de resfriamento.

2.4.4 Repartição Térmica

A repartição térmica de uma junta soldada é expressa pelas máximas temperaturas atingidas ao longo da seção transversal da junta, como ilustrado na Figura 2.10. A repartição térmica exerce influência direta na microestrutura da junta, conforme ilustra a Figura 2.11. As altas taxas de resfriamento e a composição de grãos grosseiros podem promover a formação de fases frágeis e duras no metal fundido e na ZTA de aços soldados. Temos ainda aliado a estes fatores que a presença de hidrogênio difundido no processo de soldagem pode levar ao trincamento a frio do conjunto soldado segundo KOU (1987).

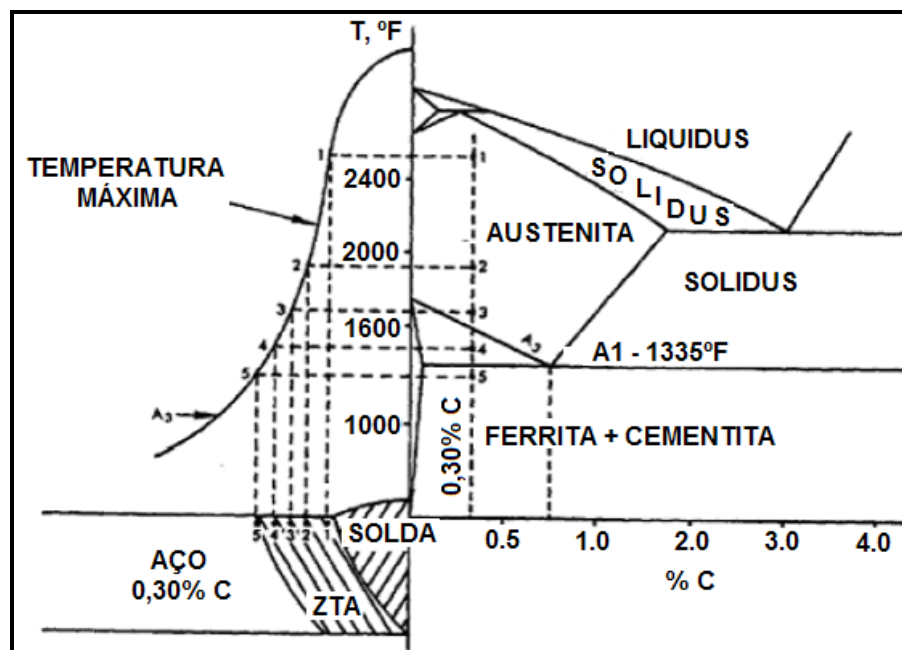


Figura 2.10 - Repartição Térmica X Diagrama de Fases. Fonte adaptado: AWS (1995)

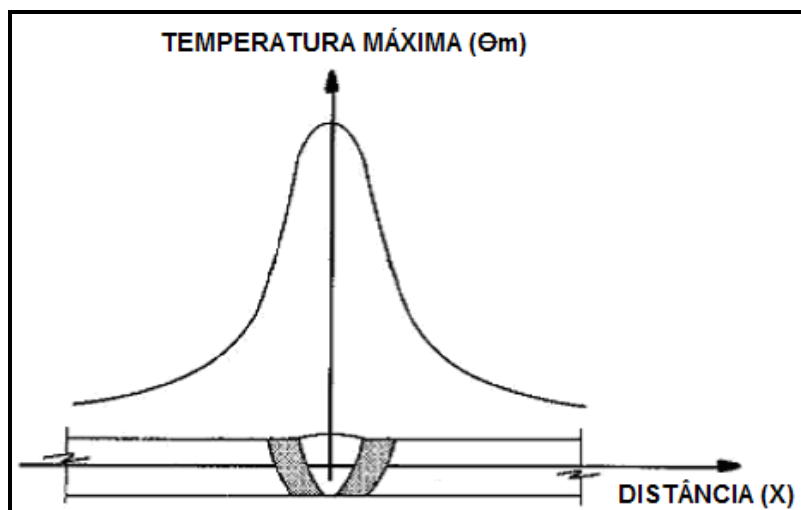


Figura 2.11 - Repartição térmica. Fonte: FBTS (2000)

2.4.4.1 Zona Termicamente Afetada pelo calor (ZTA)

Na soldagem por fusão, parte do metal de base funde juntamente com o metal de adição e parte próxima à região fundida é afetada pelo calor da solda e denominada Zona Afetada pelo calor (ZTA), a qual depende do material soldado (metal de base), do processo e do procedimento de soldagem. Sua extensão está em função do gradiente térmico na região que, por sua vez, depende: da temperatura de pré-aquecimento, das espessura e geometria da peça, das características térmicas do metal de base e do processo de soldagem, como sugerem Linert (1967) e Easterling (1983).

Todas as regiões da ZTA podem ter suas propriedades alteradas em relação ao metal de base devido ao ciclo térmico. Entretanto, de uma maneira geral, a região que maior alteração sofre e, portanto, onde as propriedades mecânicas podem ser mais prejudicadas é a região de grãos grosseiros. Exceções podem ocorrer em aços sensíveis à fragilização por envelhecimento por deformação, onde a região subcrítica pode ser fragilizada, e em aços temperados e revenidos, onde todas as regiões podem sofrer o amaciamento, como explicam Easterling (1983) e Modenesi et al (1985).

A largura da ZTA é influenciada pelo aporte térmico (heat input). A Figura 3.12 mostra a influência do pré-aquecimento na largura da ZTA e na dureza desta região. O pré-aquecimento aumenta a energia final de soldagem, aumentando assim a largura da ZTA, mas este pré-aquecimento diminui significativamente a taxa de resfriamento, promovendo uma redução da dureza nesta região. Esta redução na dureza diminui a susceptibilidade desta região sofrer fissuração por corrosão sob tensão quando a junta é submetida a serviços com H_2S , por exemplo, de acordo com a AWS (1995).

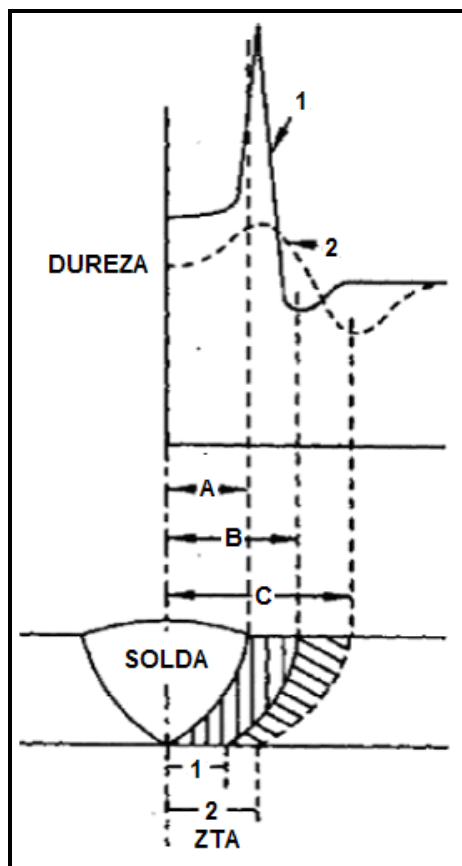


Figura 2.12 – Influência do pré-aquecimento na largura e na dureza da Zona Termicamente Afetada pelo calor (ZTA). Caso 1 sem pré-aquecimento onde B – A corresponde à largura da ZTA. Caso 2 com pré-aquecimento onde C – A corresponde à largura da ZTA. Fonte: AWS (1995)

Uma alternativa para reduzir a dureza na ZTA é a utilização de um cordão de revenimento, o qual é aplicado sobre os passes de acabamento, próximo a margem da solda em juntas multi-passes, este passe de revenimento pode diminuir em até 20% a dureza máxima da ZTA, conforme Kiefer (1995).

2.4.4.2 Zona Fundida (ZF)

A Zona fundida é a região formada pelo metal de solda (metal depositado) e pela diluição, sendo esta a contribuição do metal de base que fundiu durante a soldagem e se misturou com o metal depositado.

Um fenômeno que ocorre nesta região é o crescimento competitivo de grãos. Durante a solidificação, os grãos tendem a crescer na direção perpendicular à interface líquido/sólido, desde que esta é a direção do gradiente máximo de temperatura e, portanto, a direção da força

máxima para solidificação. Apesar disto, os grãos também tem sua própria direção preferencial de crescimento, chamada de direção de crescimento fácil, por exemplo, direção $\langle 100 \rangle$ em metais cúbicos de face centrada (CFC.) e cúbicos de corpo centrado (CCC), e direção $\langle 1010 \rangle$ em hexagonal compacto (HCP). Portanto, durante a solidificação, grãos com sua direção de crescimento fácil na direção do gradiente máximo de temperatura crescem e barram o crescimento de outros grãos cuja direção de crescimento não está orientada na direção do gradiente máximo de temperatura, conforme Kou (1987). Este fenômeno é ilustrado na Figura 3.13.

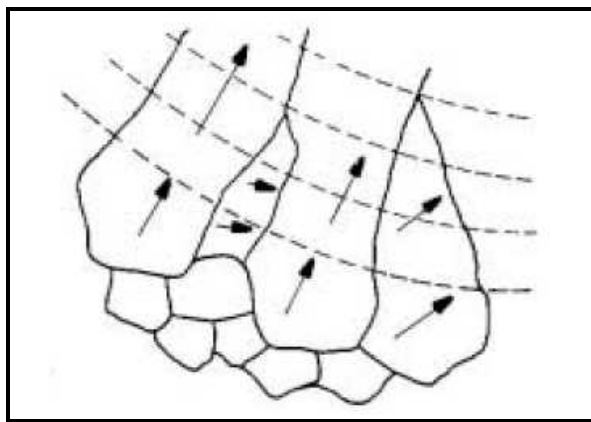


Figura 2.13 – Crescimento competitivo de grãos na zona fundida. Fonte: Kou (1987)

Segundo ASM (1997), as principais fases da Zona Fundida em aços de baixo carbono são:

- 1) Ferrita primária: a. Ferrita no contorno de grão: ferrita pro-eutetóide que cresce ao longo da austenita primária nos contornos de grão. É equiaxial ou poligonal, e pode ocorrer em veios.
b. Ferrita poligonal intragranular: ferrita poligonal que não é associada à austenita primária nos contornos de grão. É muito maior que a largura média das ripas de ferrita acicular.
- 2) Ferrita com segunda fase: a. Com alinhamento da segunda fase: ripas de ferrita paralelas classificadas como ferrita de Widmastatten. b. Com a segunda fase não alinhada: ferrita randomicamente distribuída, ou ripas isoladas de ferrita. c. Agregado de ferrita com carboneto: uma estrutura fina de ferrita com carboneto incluindo perlita.
- 3) Ferrita acicular: pequenos grãos de ferrita não alinhada encontrada dentro de grãos da austenita primária ou bainita; ambas formadas por mecanismos de difusão e cisalhamento.

4) Martensita: colônia de martensita maior que as ripas de ferrita adjacentes.

Em aços de baixo carbono, as juntas soldadas com microestruturas ricas em ferrita apresentam altos níveis de resistência, enquanto que as juntas soldadas com microestruturas ricas em martensita e bainita apresentam baixos níveis de resistência.

A formação de martensita e bainita está associada a altas taxas de resfriamento, de modo que reduzindo-se a taxa de resfriamento através de um aumento no aporte térmico ou realização de um pré-aquecimento, a quantidade de ferrita acicular aumenta melhorando-se assim a resistência da solda.

A caracterização microestrutural das juntas soldadas tem como finalidade avaliar a microestrutura obtida com suas respectivas propriedades e relacionar a mesma com o processo de soldagem utilizado e seus parâmetros. Os constituintes da zona fundida de aços ferríticos são identificados segundo codificação do IIW (International Institute of Welding), conforme descrito no Tabela 2.1 e ilustrado na figura 2.14.

Tabela 2.1 – Constituintes da zona fundida em aços ferríticos, segundo o IIW. Fonte adaptada: Modenesi (2004)

CONSTITUINTE		CÓDIGO
FERRITA PRIMÁRIA	FERRITA DE CONTORNO DE GRÃO	PF (G)
	FERRITA POLIGONAL INTRAGRANULAR	PF (I)
FERRITA ACICULAR		AF
FERRITA COM SEGUNDA FASE ALINHADA		FS (A)
FERRITA COM SEGUNDA FASE NÃO ALINHADA		FS (NA)
AGREGADO FERRITA CARBONETO		FC
MARTENSITA		M

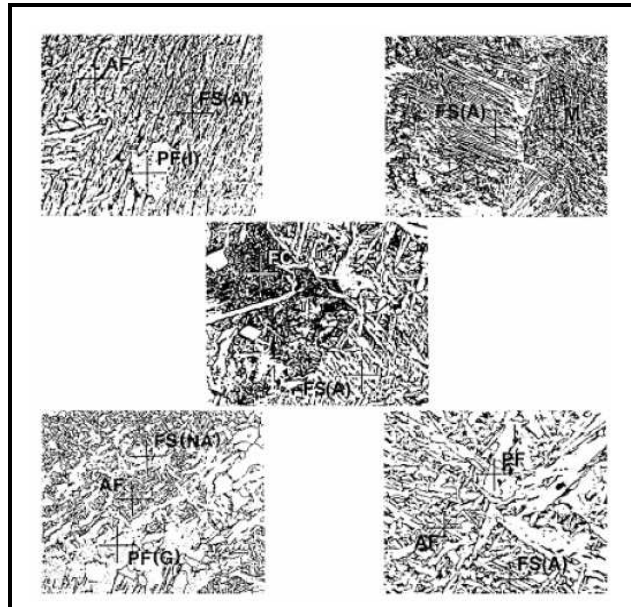


Figura 2.14 - Constituintes da zona fundida em aços ferríticos conforme Tabela 3.1. Fonte: Modenesi (2004)

2.4.4.3 Zona de Ligação (ZL)

É a região limite entre a poça de fusão (líquida) e o metal de base (sólido). A partir desta linha é iniciada a solidificação e o crescimento a partir de grãos parcialmente fundidos em direção à linha central da solda formando o metal de solda. Conforme descrito anteriormente, estes grãos parcialmente fundidos induzem o crescimento numa direção preferencial, este processo é chamado de epitaxia ou crescimento epitaxial, Kou (1987) afirma. O crescimento do grão inicia-se pelo agrupamento dos átomos da fase líquida ao substrato sólido existente, estendendo-se este, sem alterar a sua orientação cristalográfica, conforme ilustrado na Figura 2.15.

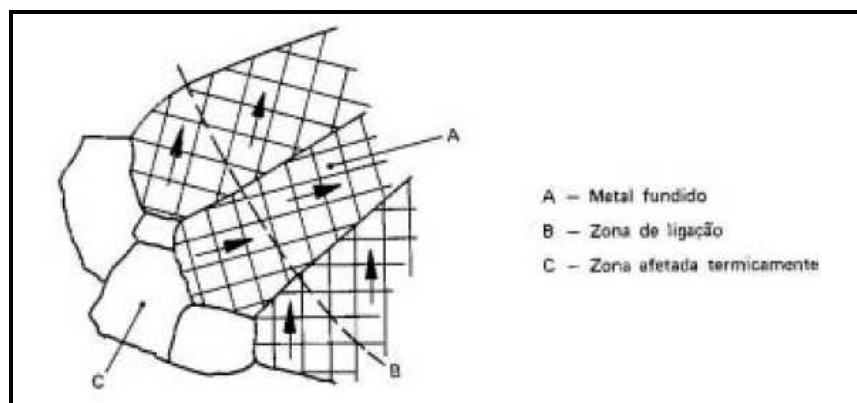


Figura 2.15 - Crescimento epitaxial, solidificação da zona fundida. Fonte: FBTS (2000)

2.5 Material de Base

Aço processado termomecanicamente, onde se consegue um tamanho de grão mais fino, submetido à deformação plástica e soldado para a conformação de tubos, e expandido até as dimensões finais. Após a obtenção do produto final (tubos), a microestrutura se apresenta com bandas de deformação características. Microestrutura com granulação fina apresentando efeito direcional de deformação devido aos processos de conformação a qual fora submetido e regiões características onde se observa a maior influência dos concentradores de tensão. Apresenta basicamente microestrutura ferrítica poligonal onde, a esse nível de observação, não é possível detectar a presença de segundas fases intragranular na microestrutura.

CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

A liga metálica objeto de estudo deste trabalho científico é oriundo da empresa Tenaris Confab. Os consumíveis de soldagem foram doados pela empresa White Martins. Um grande interesse por estes materiais é que servem de insumos para a fabricação e montagem de tubulações utilizados nas indústrias de petróleo e gás natural.

3.1.1 Metal de Base

Os corpos de prova utilizados na parte experimental deste trabalho foram confeccionados com o aço estrutural classificado como API 5L Grau X-80, cortados a partir de anéis tubulares nas dimensões 200 X 100 X 19 mm conforme ilustrado na figura 3.1 (B).



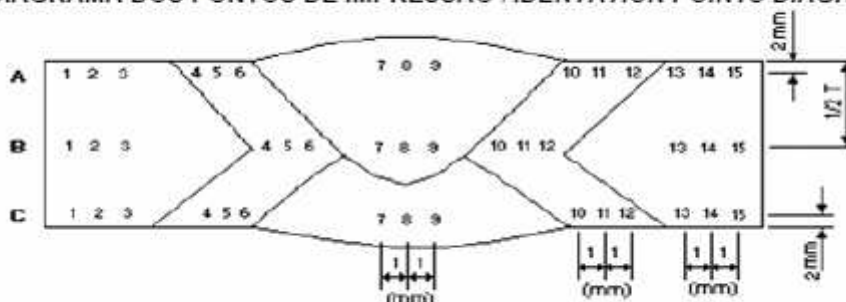
Figura 3.1 – Metal base: A) Anéis tubulares API 5L Grau X-80; B) Fatias a partir dos anéis tubulares cortados pelo processo oxi-corte

As propriedades mecânicas do material como recebido e a composição química do metal de base encontram-se representados nas Tabelas 3.1 e 3.2, e 3.3 e na figura 3.2 respectivamente, conforme o fabricante.

Tabela 3.1 - Dureza Vickers do metal base apresentado pelo fabricante do tubo.

Dureza Vickers do Tubo API 5L Grau-X80			Pontos de impressão															Média
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
Corrida	Tubo	Linha "A"	236	234	233	201	205	216	220	220	219	219	210	213	216	216	222	219
440774	08 4 34331	Linha "B"	217	219	220	196	208	211	219	218	217	217	218	209	210	213	213	217
		Linha "C"	231	231	227	223	213	205	241	244	245	220	225	224	220	224	224	224
													Média das médias					219

DIAGRAMA DOS PONTOS DE IMPRESSÃO / IDENTATION POINTS DIAGRAM



ESCALA USADA / SCALE USED : HV10

Figura 3.2. - Esquema dos pontos investigados pelo fabricante do tubo para o ensaio de dureza Vickers

Tabela 3.2. - Limites de escoamento e resistência última a tração.

Tração transversal - CP reduzido						
Nº de Corrida	Tubo Nº	Metal de Base			Solda	
		LE/YS (Mpa)	LR/UTS (Mpa)	Al/EI (%)	LR/UTS (Mpa)	
1	440774	08 4 34331	570	719	37	720
2	440832	08 4 34329	581	725	33.7	722
3	440831	08 4 34333	586	726	33.3	709

Tabela 3.3. - Composição química do aço API 5L Grau X-80.

Composição química do aço API 5L Grau X-80												
Elementos de Liga	C	S	N	O	Al	Si	P	Ti	V	Cr	Mn	Ni
Concentração em Peso (%)	0.03	0.004	0.0065	NR	0.029	0.21	0.016	0.015	0.025	0.161	1.76	0.014

Elementos de Liga	Cu	Nb	Mo	B	Ca	(A)	(B)	(C)	(D)	(E)	PCM	CE
Concentração em Peso (%)	0.01	0.069	0.189	0.0001	0.003	0.11	0.09	0.37	4.6	0.38	0.15	0.40

$$\begin{aligned}
 (A) &= Nb+V+Ti & P_{cm} &= C + Si/30 + (Mn + Cr + Cu)/20 + Ni/60 + Mo/15 + \\
 & & &= V/10 + B*5 \\
 (B) &= V + Nb & CE &= C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15 \\
 (C) &= Cr + Ni + Cu + Mo \\
 (D) &= Al / N \\
 (E) &= C + Mn/5
 \end{aligned}$$

3.3 Consumíveis de soldagem

Os consumíveis de soldagem utilizados para a confecção dos corpos de prova foram o gás de proteção e o arame eletrodo.

3.3.1 Arame eletrodo.

O arame eletrodo utilizado para a soldagem dos corpos de prova foi o E71T – 1 conforme AWS 5.20 (2005), de diâmetro 1,2 mm. As propriedades mecânicas e a composição química do arame eletrodo estão mostradas nas Tabelas 3.4.

Tabela 3.4 - Composição química e propriedades mecânicas do arame tubular.

Arame Tubular AWS E71T-1				
Composição Química				
C	Mn	Si	P	S
0,05	1,28	0,48	0,015	0,012
Propriedades Mecânicas				
LR/UTS (MPa)		LE/YS (MPa)		AI/EI (%)
518		584		28

3.3.2 Gás de proteção

O processo de soldagem utilizado nesse experimento foi o FCAW-G – Flux-Cored Arc Welding, utilizando como gás de proteção a mistura gasosa fornecida pela empresa White Martins conhecida comercialmente por Stargold Plus, nas proporções de 75% Ar (argônio) e 25% CO₂ (dióxido de carbono). A utilização da mistura Stargold Plus justifica-se devido aos resultados apresentados por Pedrosa (2008).

3.3.3 Equipamento de soldagem

O equipamento de soldagem utilizado nesse trabalho foi uma fonte de tensão comumente empregada em processos de soldagem GMAW ou FCAW-G. Este equipamento opera segundo uma faixa de corrente que vai de 20A a 320A e a tensão de circuito aberto que vai de 15,5 V a 44 V. A fonte de tensão esta ilustrada na figura 3.3.



Figura 3.3 - Fonte de tensão Kemppi Pro 3200

3.4 Métodos

O processo de soldagem utilizado nesse experimento foi o FCAW-G – Flux-Cored Arc Welding com proteção gasosa.

3.4.1 Parâmetros de Soldagem

Considerando-se que o processo FCAW-G para soldagens de aços para dutos do tipo API 5L determinou-se, portanto, os parâmetros de soldagem em função da limitação de capacidade operacional do equipamento disponibilizado para este estudo aplicaram-se inicialmente no primeiro teste de soldagem uma tensão de 24 V para uma corrente de curto-circuito, que ficou em torno de 157 A, resposta do próprio equipamento.

Para o segundo teste de soldagem, aumentou-se a tensão para 25 V, mantendo-se a corrente média em torno de 156 A e para o terceiro teste, a tensão utilizada foi 26 V e a corrente mantida em torno de 155 A. As correntes dos testes de soldagem são todas dadas pelo equipamento de soldagem de acordo com a tensão determinada. Esta verificação quanto a tensão e corrente de resposta foram observadas em análise preliminar, durante a preparação para os experimentos. Para efeito de aquisição de dados foram utilizados os instrumentos indicadores dos parâmetros de soldagem do próprio equipamento.

3.4.2 Procedimento de soldagem

A soldagem foi feita em juntas com chanfro em “V” com ângulo de bisel $\alpha=35^\circ$ e altura da face (nariz) de 2 mm. Foram preparados três chapas de testes do material aço API 5L Grau X-80 (aço ARBL), extraídos de um anel tubular (metal base) de uma tubulação de 34 polegadas de diâmetro e espessura de parede de 3/8 polegada (aproximadamente 19 mm),

cortados nas dimensões 200x100x19 mm. As superfícies das chapas de testes antes do primeiro passe de solda foram esmerilhadas e escovadas para eliminar o óxido formado durante a conformação das chapas e seu armazenamento, figura 3.4 (A1). A escovação da superfície da junta se repetia a cada passe com o objetivo de se retirar a escória produzida durante o processo. As chapas foram soldadas com abertura de raiz de 4,0 mm, figura 3.4 (A2). Em cada corpo de prova foram realizados 9 (nove) passes, sendo 1 de raiz, 5 de enchimento e 3 de acabamento.



Figura 3.4 - A1) Esmerilhamento; A2) Detalhe do corpo de prova esmerilhado

Durante a execução da soldagem, foram anotados os tempos médios de duração de cada passe, e desta forma estimou-se a velocidade de soldagem. As variações de corrente, em seus valores máximo e mínimo atingidos, bem como a intensidade de corrente mais freqüente também foram anotadas, sendo assim possível estimar o valor médio de intensidade de corrente com a qual se executou cada passe, desde o de raiz bem como os demais passes. A temperatura inicial das chapas quando da execução das juntas foi a ambiente, 30°C, e utilizou-se o pirômetro de contato para a leitura de temperatura entre passes de soldagens. A temperatura interpasse seguida foi a recomendada pelo fabricante do arame circular utilizado que está entre o valor máximo de 150°C e o valor mínimo de 50°C.

Os passes de soldagem de junta foram seguidos considerando os passes do desenho esquemático da figura 3.5. A importância de se seguir uma seqüência de passes pré-estabelecidos durante toda a etapa de união da junta se dá pelo ganho de energia de pré-aquecimento entre a aplicação de um cordão de solda anterior e um posterior. A elevação de temperatura do processo de soldagem realiza um trabalho de preparação da superfície para receber a nova camada de contato (solda), além de retirar umidade dos poros da superfície a ser soldada.

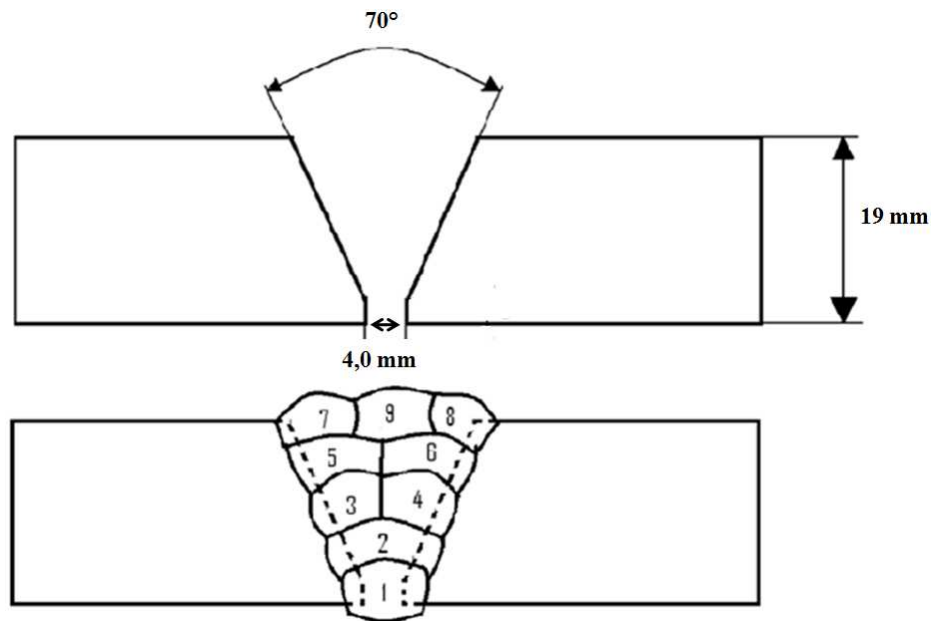


Figura 3.5 - Desenho esquemático da junta a ser soldada e da distribuição de passes de soldagem

3.5 Ensaio de Líquido Penetrante (LP)

Todos os corpos de prova foram ensaiados pela técnica de líquido penetrante com penetrante colorido lavável em água. As condições de iluminação atendia as necessidades exigidas de acordo com o código ASME Seção V (2004). Foi realizada uma lavagem e limpeza mecânica por escovamento das superfícies ensaiadas a fim de garantir que as superfícies estivessem livres de graxa, óleo, respingos, escória, óxidos e quaisquer outros tipos de contaminantes. Além do cordão de solda, a limpeza se estendeu as margens do cordão por uma distância mínima de 25 mm. A secagem se deu em temperatura ambiente por um tempo mínimo de 5 minutos.

A temperatura das superfícies ensaiadas foi verificada com um pirômetro de contato, garantindo uma temperatura para a aplicação do líquido penetrante abaixo de 50°C. A temperatura ambiente de 30°C. A aplicação foi feita por aerossol e o tempo de penetração de 20 minutos. O excesso de líquido penetrante foi removido por lavagem simples diretamente embaixo da água corrente. Foi feita novamente secagem ao ar em temperatura ambiente por 10 minutos e aplicado o líquido revelador. A aplicação do líquido revelador se deu por aerossol. Foram feitas observações imediatamente após a aplicação do líquido revelador e após 20 minutos de sua aplicação, de acordo com a figura 3.6.

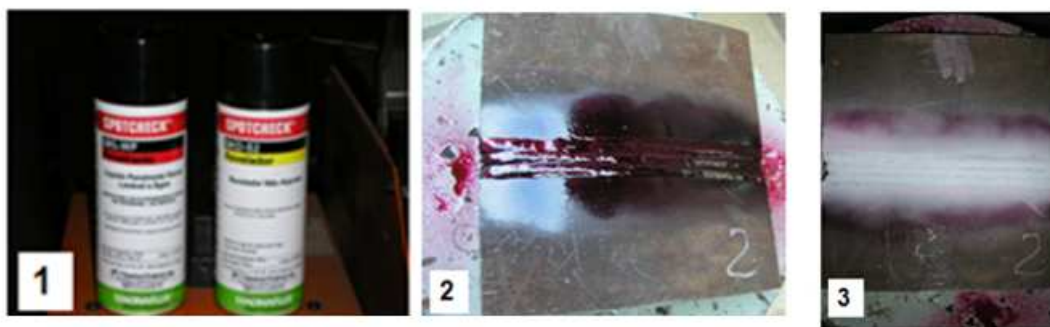


Figura 3.6 - Sequência do processamento do ensaio de líquido penetrante; 1) líquido penetrante e revelador; 2) Aplicação do líquido penetrante; 3) Aplicação do líquido revelador

3.6 Ensaios Mecânicos

3.6.1 Ensaio de Microdureza

Para as medições de microdureza foi utilizado um microdurômetro modelo HVS-5 fabricado pela Importécnica, figura 3.7. A microdureza sobre o cordão de solda foi avaliada na escala Vickers (HV). Esta análise fornece dados que permitem avaliar as condições e características obtidas em decorrência da qualidade de soldagem. No ensaio de microdureza procurou-se observar o comportamento do perfil de dureza ao longo do cordão, atentando para as exigências de comportamento requeridas por este tipo de procedimento de soldagem quando aplicado a tubulações.

As medições foram feitas utilizando-se carga de 500 g, com um tempo médio de indentação de 15 segundos, conforme norma ASTM-E 389 (1989). A preparação dos corpos de prova para a análise de microdureza seguiu os mesmos procedimentos dos ensaios metalográficos tradicionais. As medições de microdureza foram realizadas nas seções transversais das juntas soldadas e as regiões analisadas foram: o metal de solda depositado, a zona de ligação, a Zona Termicamente Afetada pelo calor (ZTA) e o metal de base.



Figura 3.7 - Microdurômetro utilizado no ensaio de microdureza, modelo HVS-5, IMPORTÉCNICA

3.6.2 Ensaio de Dobramento

Foram confeccionados para cada situação de soldagem (SS1, SS2 e SS3) 3 (três) corpos de prova e submetidos a ensaio de dobramento a 120°, figura 3.8 (B), com as regiões longitudinal (dobramento lateral), de raiz e de face submetidas a tração, segundo as recomendações da norma API 1104 (2007), figura 3.8 (C). A seção tinha 14x14mm e comprimento de 100 mm.

Foi confeccionada uma matriz metálica em aço-carbono 1020. O dobramento ocorreu em temperatura ambiente (entre 25°C e 35°C). Foi utilizado uma prensa hidráulica com capacidade de 12 ton, figura 3.8 (A). A carga empregada durante os ensaios de dobramento foi de 4 Ton (39,24 kN). Com este ensaio pode-se verificar como a junta soldada pelo processo FCAW-G utilizando o arame tubular AWS 5.20 E71T-1 tende a se comportar mediante as solicitações mecânicas as quais o material poderá vir a ser submetido.



Figura 3.8 – Ensaio de dobramento; A) Vista Geral da prensa usada; B) Ensaio de dobramento; C) Vistas panorâmicas da área soldada dobrada.

3.6.3 Ensaio de tração

Foram confeccionados para cada situação de soldagem 3 (três) corpos de prova para o ensaio de tração transversal, figura 3.9 (C). Foram confeccionados corpos de prova com eixo longitudinal perpendicular ao eixo longitudinal do cordão de solda. A norma regulamentadora utilizada para esse conjunto de testes foi a API 1104 (2007). As dimensões dos corpos de prova de formato retangular utilizados foi 100x14x5 mm, com as arestas e cantos vivos

ligeiramente arredondados com o intuito de minimizar os riscos de acidentes durante a manipulação.

Os ensaios de tração foram realizados em uma máquina de tração servo-hidráulica com célula de carga de 100 kN, figura 3.9 (A) e (B). Em todos os ensaios a velocidade de deslocamento do cabeçote de 1,0 mm/min.

Com este ensaio pode-se verificar os níveis de esforços de tração suportáveis pela junta, e desta forma comprovar se os materiais metal de base e de solda utilizados atendem as exigências quanto à resistência de esforços a tração. Simultaneamente, estará fornecendo informações quanto a qualidade da solda realizada e as condições da ZTA em cada uma das três situações de soldagens durante este ensaio. As situações de soldagens SS1, SS2 e SS3 estão representadas na figura 3.9 (C).

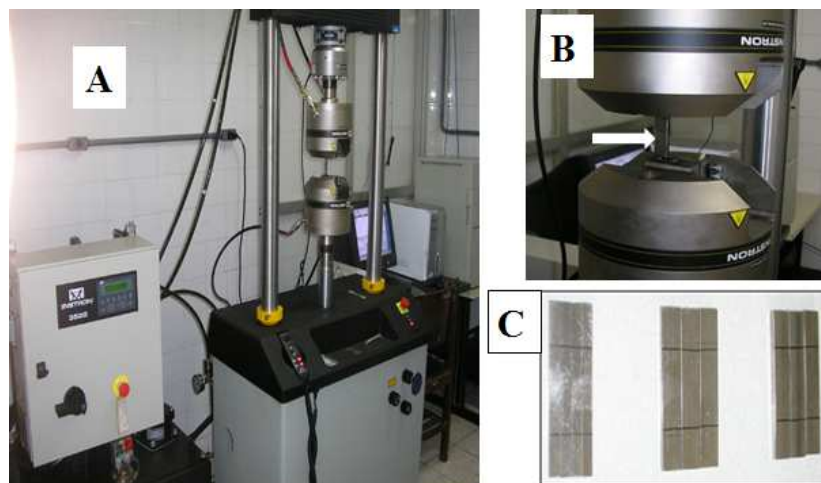


Figura 3.9 – Equipamentos utilizados no ensaio de tração. A) Máquina Instron 3520; B) Detalhe do corpo de prova na célula de carga; C) Corpos de prova utilizado neste ensaio.

3.7 Caracterização Microestrutural

Após serem executados os procedimentos de soldagem SS1, SS2 e SS3, as juntas soldadas foram fatiadas para preparação dos corpos de prova a serem submetidos a caracterização microestrutural.

Seguiram-se as etapas de preparação metalografica tradicional, onde para o lixamento foram utilizados papeis de granulometria 220, 400, 600 e 1000 mesh. Após a etapa de lixamento, os corpos de prova foram submetidos a um polimento em tapete com pasta diamantada de 1 μ m. Depois de polidos os corpos de prova foram atacados com nital a 2%, num tempo de exposição entre 15 e 25 segundos para revelação da microestrutura. Foram feitos ensaios de microscopia óptica com aumento de 1000 vezes com equipamento.

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Resultados das Soldagens dos corpos de prova

Os resultados obtidos foram a partir das condições dos fatores de velocidade de soldagem, intensidade de corrente e tensão, e temperatura interpassos, para os quais os ensaios de soldagem foram executados. Os resultados conseguidos com o procedimento de soldagem seguido mostraram-se satisfatórios, conforme as determinações pretendidas a serem alcançadas para as situações de soldagens SS1, SS2 e SS3 representados pelas três chapas de testes do material aço API 5L Grau X-80 (aço ARBL), de dimensões 200x100x19 mm, com chanfro em “V” com ângulo de bisel $\alpha=35^\circ$ e altura da face (nariz) de 2 mm.

A solda na face soldada (SS3a, SS2a, SS1a) e na vista da raiz (SS3b, SS2b, SS1b) a solda apresenta-se sem respingos e com bom aspeto, figura 4.1. O primeiro passe de soldagem aconteceu sem pré-aquecimento para as três condições de soldagem, onde a temperatura ambiente foi de 30°C, e considerando os valores de temperatura interpasse máxima de 150°C e mínima de 50°C, as temperaturas de soldagem registraram-se dentro dos limites para as três situações de soldagens realizadas.



Figura 4.1 – Chapas de testes soldadas. (a) Vista da face; (b) Vista da raiz.

No processo de soldagem dos corpos de prova as tensões de soldagem utilizadas foram alcançadas na primeira condição de soldagem (SS1) 24 V, para a segunda condição de soldagem (SS2) 25 V e para a terceira condição de soldagem (SS3) 26 V. A corrente de soldagem foi seguida em função da resposta do equipamento de soldagem. Partiu-se da corrente de curto-circuito na SS1. Para a SS2 e a SS3, a corrente de resposta do equipamento manteve-se nos mesmos patamares da SS1. Nas Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3 são mostrados os comportamentos da corrente de soldagem observado nos experimentos de soldagem.

Alcançou-se na SS1 como resultado o tempo médio de duração dos passes de soldagem na primeira condição de soldagem foi de 1min35seg, podendo assim ser estimada a velocidade de soldagem. Respostas de intensidade de corrente mais freqüente ao longo do cordão foi de 157 A (corrente de curto-circuito), com valores mínimos e máximos atingidos de 145 A e 170 A, respectivamente. A tensão de soldagem para SS1 manteve-se em 24,2 V.

A velocidade de alimentação do arame foi 6,3 m/min. Nos passes 2 a 9 conforme a Tabela 4.1, a corrente média apresentada representa a corrente com a qual se soldou a maior parte do tempo. Os valores máximos e mínimos de intensidade de corrente apresentados na Tabela são os valores de corrente atingidos e que permaneceram estáveis por um tempo considerável (mais de 5 segundos). A energia média de soldagem foi calculada em 1444 KJ/mm.

Tabela 4.1 - Distribuição dos dados da condição de soldagem SS1

Fatores e Condições de Soldagem SS1						
Passe n°	Tempo de Soldagem (min:seg)	Corrente (A)			Tensão (V)	Temperatura Inicial (°C)
		Máxima	Mínima	Média*		
1	01:46	170	158	162	24,2	30
2	01:33	169	154	160	23,9	48
3	01:52	163	154	158	24,2	70
4	01:39	169	145	155	24,1	95
5	01:52	162	151	155	24,2	96
6	01:30	170	148	154	24,2	92
7	01:31	163	148	152	24,3	104
8	01:17	163	152	158	24,2	93
9	01:15	168	150	155	24,2	105

* Intensidade de corrente mais freqüente ao longo do cordão.

Na condição de soldagem 2 (SS2), iniciada com o primeiro passe de soldagem do ensaio sem pré-aquecimento, onde a temperatura ambiente estava em 30°C. Obteve-se como resultado da soldagem o tempo médio de duração dos passes de soldagem foi de 1min30seg, indicando uma estimativa de velocidade de soldagem, registrando um tempo menor do que o tempo médio da SS1.

A intensidade de corrente mais freqüente ao longo do cordão registrada para esta condição de soldagem foi de 155,9 A, com valores mínimos e máximos atingidos de 142 A e 172 A, respectivamente. Valores de intensidades de corrente média frequente maiores ao longo do cordão foram registradas nos passes 1, 4, 6 e 8 os menores no passe 5 e 9. A tensão de soldagem para esta situação manteve-se em 25 V, para a execução dos passes de soldagem até os passes de acabamento, tabela 4.2. A energia média de soldagem foi calculada em 1408 KJ/mm.

Ocorreu uma interrupção (extinção instantânea do arco) na execução do passe 06. Foi reaberto o arco e se deu a continuidade do passe. Vale ressaltar o fato de que o passe 09 apresentou acentuada (grande) porosidade no final do cordão. Retirou-se o passe através de esmerilhamento e foi refeito por completo, onde os dados computados encontram-se anotados no Tabela 4.2 e a operação com a esmerilhadeira durou cerca de 10 minutos.

Tabela 4.2 - Distribuição dos dados da condição de soldagem SS2.

Fatores e Condições de Soldagem SS2						
Passe n°	Tempo de Soldagem (min:seg)	Corrente (A)			Tensão (V)	Temperatura Inicial (°C)
		Máxima	Mínima	Média*		
1	01:39	170	156	165	25,1	30
2	01:25	165	150	155	25,2	48
3	01:52	158	148	152	25,2	70
4	01:38	170	142	153	25,2	92
5	01:47	163	143	146	25,1	110
6	01:21	170	155	162	25,2	100
7	01:34	160	144	156	25,2	112
8	01:15	172	154	160	25,3	91
9	01:06	162	142	156	25,2	95

* Intensidade de corrente mais frequente ao longo do cordão

Os resultados da condição de soldagem três (SS3), as temperaturas entre os passes mantiveram-se dentro do patamar das condições 1 (SS1) e 2 (SS2) entre 50 e 150°C. O tempo médio de duração dos passes de soldagem foi de 1min28seg, tempo menor do que o tempo das condições de soldagens SS1 e SS2. A intensidade de corrente mais freqüente ao longo do cordão foi de 155,9 A, com valores mínimos e máximos atingidos de 141 A e 170 A, respectivamente. Valores de intensidades de corrente média frequente maiores ao longo do cordão foram registradas nos passes 1 e 4 e as menores nos passes 8, 2, 3 e 9. A tensão média de soldagem registrou-se em 26,0 V conforme se predeterminou para a soldagem SS3. A energia média de soldagem foi calculada em 1427 KJ/mm, a menor energia média de soldagem ao ser comparada com as SS1 e SS2.

Tabela 4.3 - Distribuição dos dados da condição de soldagem SS3

Fatores e Condições de Soldagem SS3						
Passe n°	Tempo de Soldagem (min:seg)	Corrente (A)			Tensão (V)	Temperatura Inicial (°C)
		Máxima	Mínima	Média*		
1	01:36	167	147	160	26,2	30
2	01:21	163	149	152	26,4	78
3	01:48	162	148	153	26,1	73
4	01:35	170	158	160	26,4	76
5	01:45	163	148	157	26,1	115
6	01:25	164	150	154	26,4	99
7	01:23	166	147	156	26,3	109
8	01:14	158	141	149	26,2	116
9	01:07	161	157	153	26,2	90

* Intensidade de corrente mais frequente ao longo do cordão.

4.2 Ensaio de Líquido Penetrante (LP)

Resultados de LP para verificação de eventuais descontinuidades da junta soldada como principalmente os poros e as inclusões. Foi aplicado o líquido penetrante colorido e em seguida o contraste ou líquido revelador sobre a superfície da solda e além do cordão de solda nas três chapas de teste, se mostrou como uma análise válida para o fim ao qual se propõe.

As chapas de testes SS1 e SS3 de modo geral em resultados apresentados nos ensaios de LP se mostraram satisfatórios devido a ausência de imperfeições superficiais relevantes.

Algumas discontinuidades foram observadas na superfície de soldagem SS2 (SS2a e SS2b) os defeitos superficiais são de porosidade do tipo vermiforme, embora com dimensões menores que 3 vezes a espessura da peça, figura 4.2. Mesmo tendo ocorrido a retirada do passe 9 através de esmerilhamento e ter sido refeito por completo não foi neste cordão verificado defeitos superficiais.

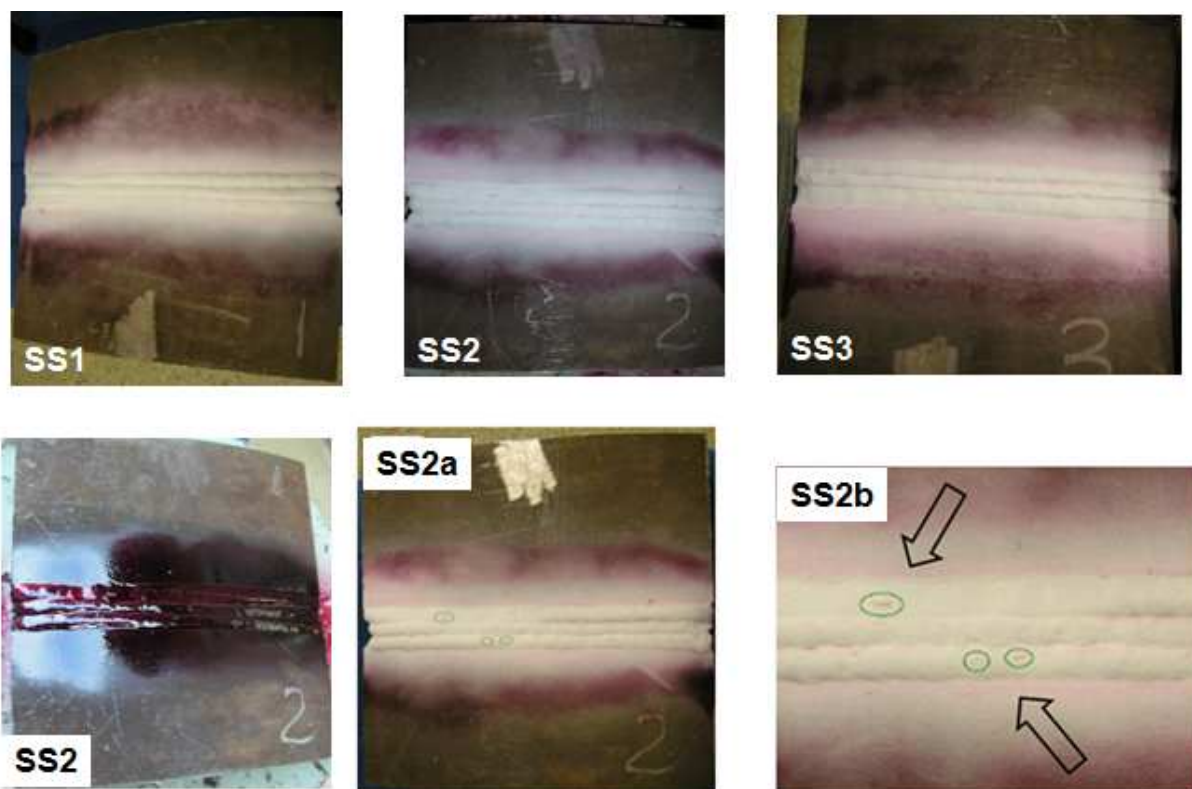


Figura 4.2 - Ensaio dos líquidos penetrante e o revelador sobre a solda SS1, SS2 e SS3; SS2a) Revelação dos defeitos superficiais; SS2b) Defeitos superficiais de porosidade do tipo vermiforme.

4.3 Análises Microestrutural

O metal de base na condição de “como-recebido” apresenta uma microestrutura constituída por grãos ferríticos com contornos levemente enriquecidos de perlita. Na microestrutura da figura 4.3 (SS1 MB) do metal base observa-se estrutura levemente texturizada com grãos ferríticos e contornos perlíticos com pequenas segregações na linha de centro (constituindo eutetóide).

A junta soldada na condição SS1, apresentou na zona fundida porosidade e grãos ferríticos majoritariamente poligonais a medida que se aproximam do centro e não apresenta segundas fases intragranulares (SS1 ZF).

Na zona de ligação, vê-se nitidamente o efeito da eptaxia, com grãos crescidos na direção contrária ao fluxo de calor. Os grãos ferríticos na zona de ligação passam a ter morfologia colunar (lamelar) na direção das linhas de fluxo de calor (figura 4.3 (SS1 ZL)). Vizinha à zona de ligação é observada a região de grãos grosseiros (GG). Na zona termicamente afetada os grãos ferríticos apresentam leve contorno da ordem de 1/3 em relação a zona termicamente afetada de grãos grosseiros (SS1 ZTA GG) da figura 4.3.

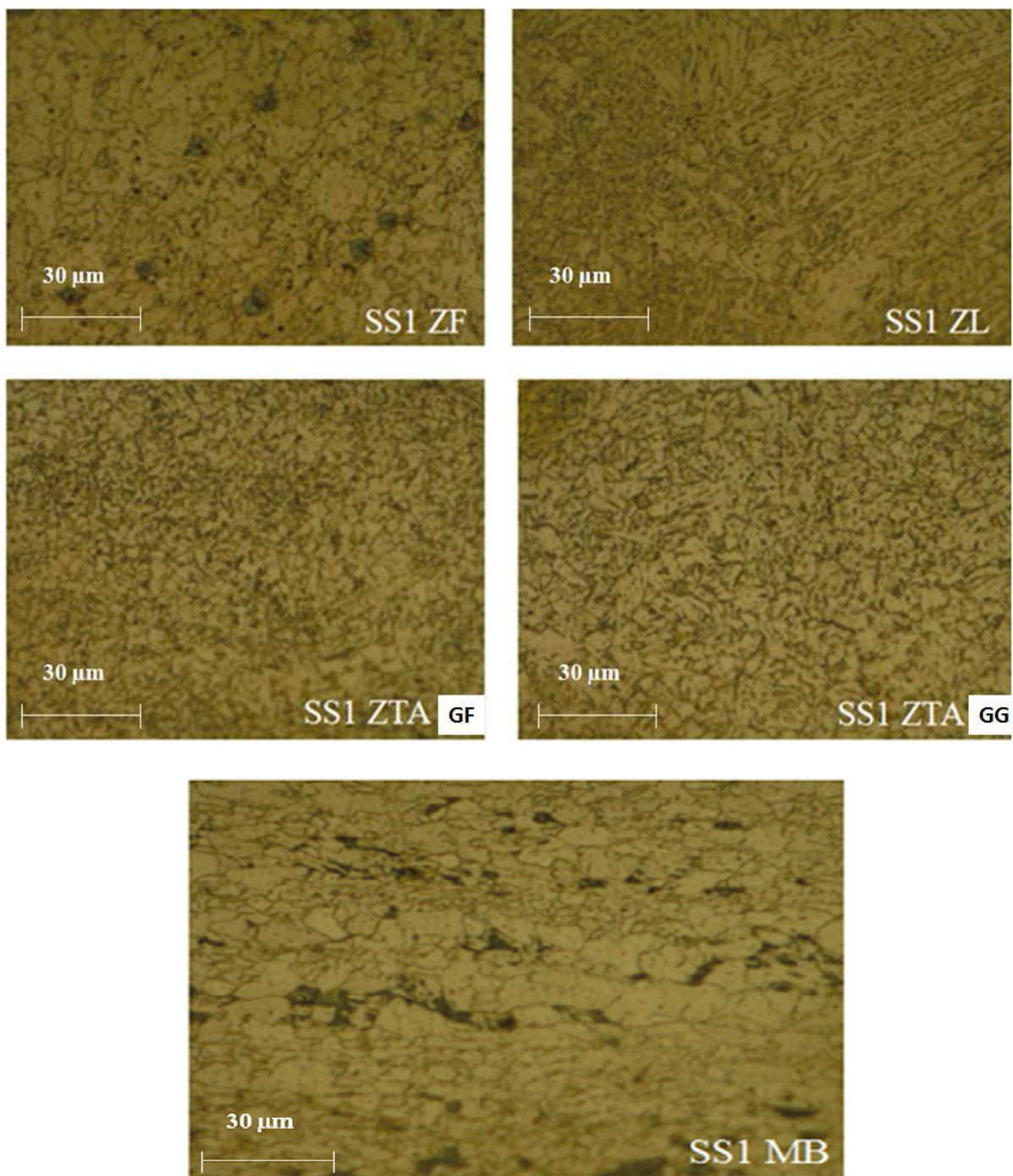


Figura 4.3 - Distribuição das imagens de micrografia da condição de soldagem 1 (SS1).

A junta soldada na condição SS2 apresentou na região da zona fundida porosidade mais acentuada do que na condição SS1 (figura 4.3 (SS1 ZF)), embora, os poros se apresentem com grãos ferríticos poligonais que não apresentaram segundas fases intragranulares.

Na zona de ligação, o efeito da eptaxia não está tão claro como na imagem da condição SS1. Embora, possa ser observado o crescimento dos grãos no sentido contrário ao fluxo de calor as imagens SS1 ZL e SS2 MB, figura 4.4.

Um pouco mais distante do centro da solda encontra-se a região de grãos refinados, recristalizados devido o efeito da plastificação. As setas apontam a linha de contato entre o metal base e a solda com a divisão de crescimento de cristais na primeira imagem da soldagem SS2 MB. Com a mudança de iluminação a imagem SS2 MB revela pontos de em relevo de oxidação, conforme a figura 4.4.

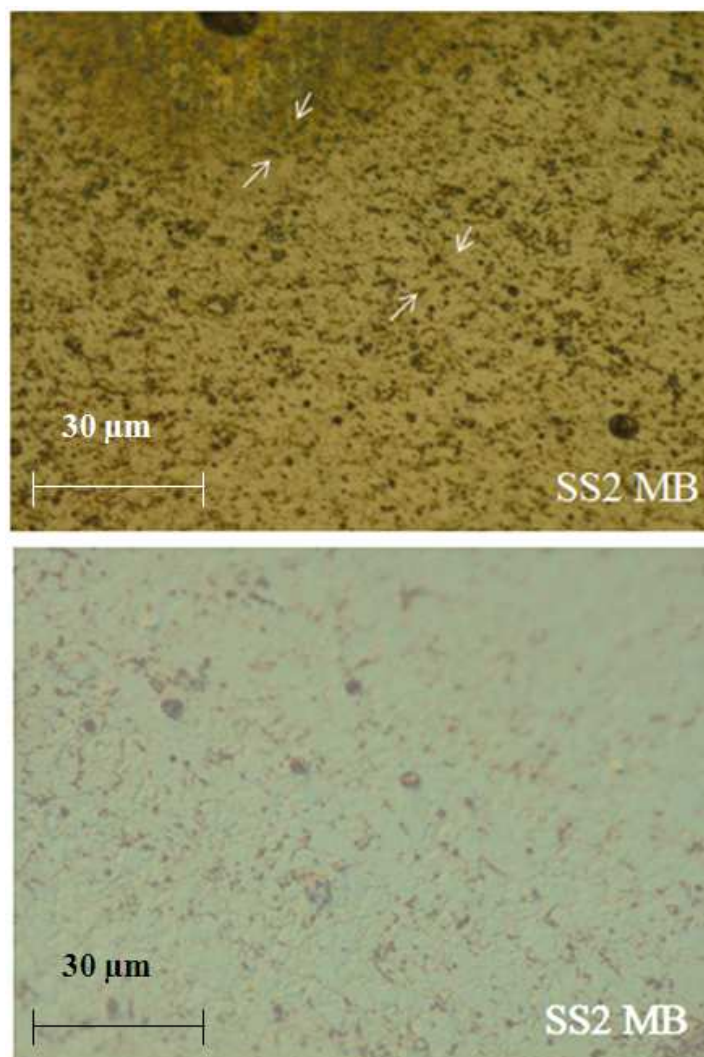


Figura 4.4 – Imagem da micrografia da condição de soldagem SS2.

A junta soldada na condição SS3, apresenta na região da zona fundida grãos ferríticos poligonais que, com o aumento conseguido com o microscópio óptico, não foi observado segundas fases intergranular. Não há nessa região uma presença de porosidade considerável. Na zona de fusão os cristais de grãos são finos (SS3 ZF) verificados na imagem de cor clara, figuras 4.5 e 4.6.

Na zona de ligação observou-se nitidamente o efeito da eptaxia com o crescimento de grão na direção contrária ao fluxo de calor, e ainda alguma porosidade com dimensões equivalentes ao tamanho médiodos grãos. Na SS3 a zona de ligação (ZL) os grãos equiaxiais. na região central e a medida que se aproxima da zona de ligação (ZL) os grãos se alongam na direção do fluxo de calor.

Na região (SS3 ZTA) de transição entre grãos finos e grãos grosseiros é onde observa-se a região de grãos mais grosseiros (SS3 ZTA GG), cujo tamanho de grão mostra-se maior do que o apresentado na condição SS1. Um pouco mais distante do centro da solda encontra-se a região de grãos refinados (SS3 ZTA GF), recristalizados devido o efeito da plastificação (SS3 ZL). O calor de soldagem influencia diretamente na economia de calor de pré aquecimento entre os passes de solda e na morfologia e tamanho dos grãos. Devido ao calor sofrido os grãos da SS3 ZL configuraram-se na forma plástica devido ao fluxo do calor, figura 4.5.

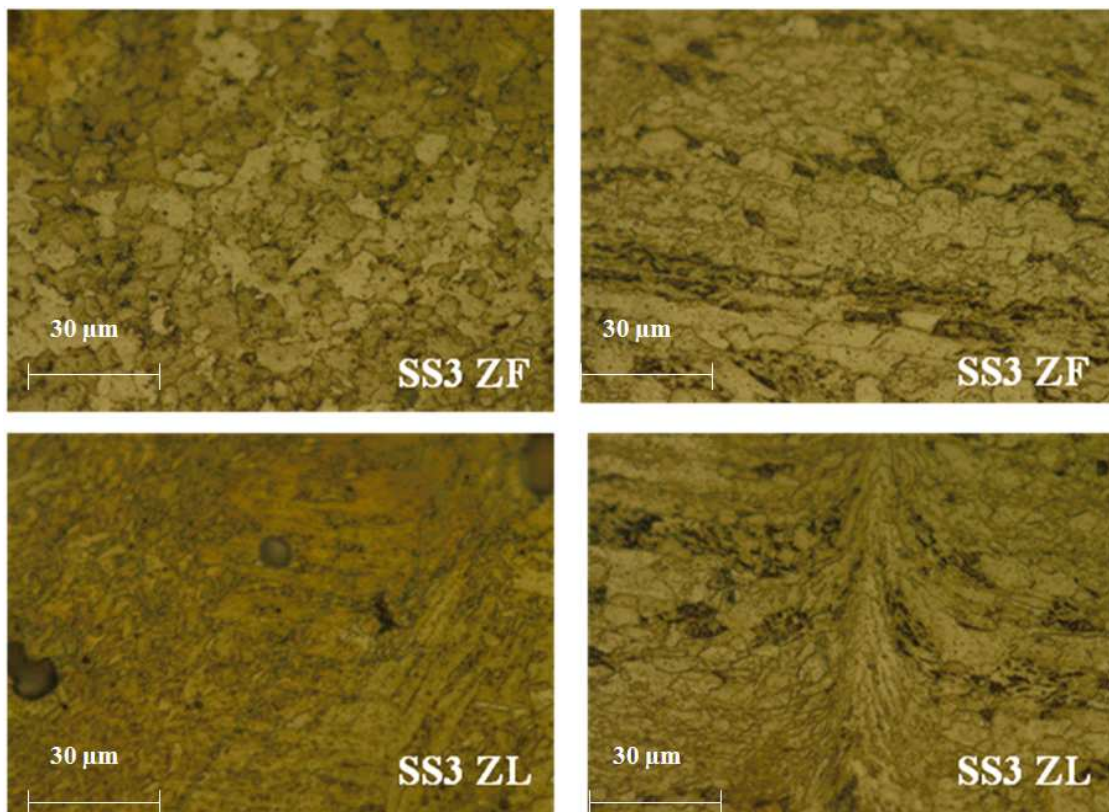


Figura 4.5 - Distribuição das imagens de micrografia da condição de soldagem 03 (SS3).

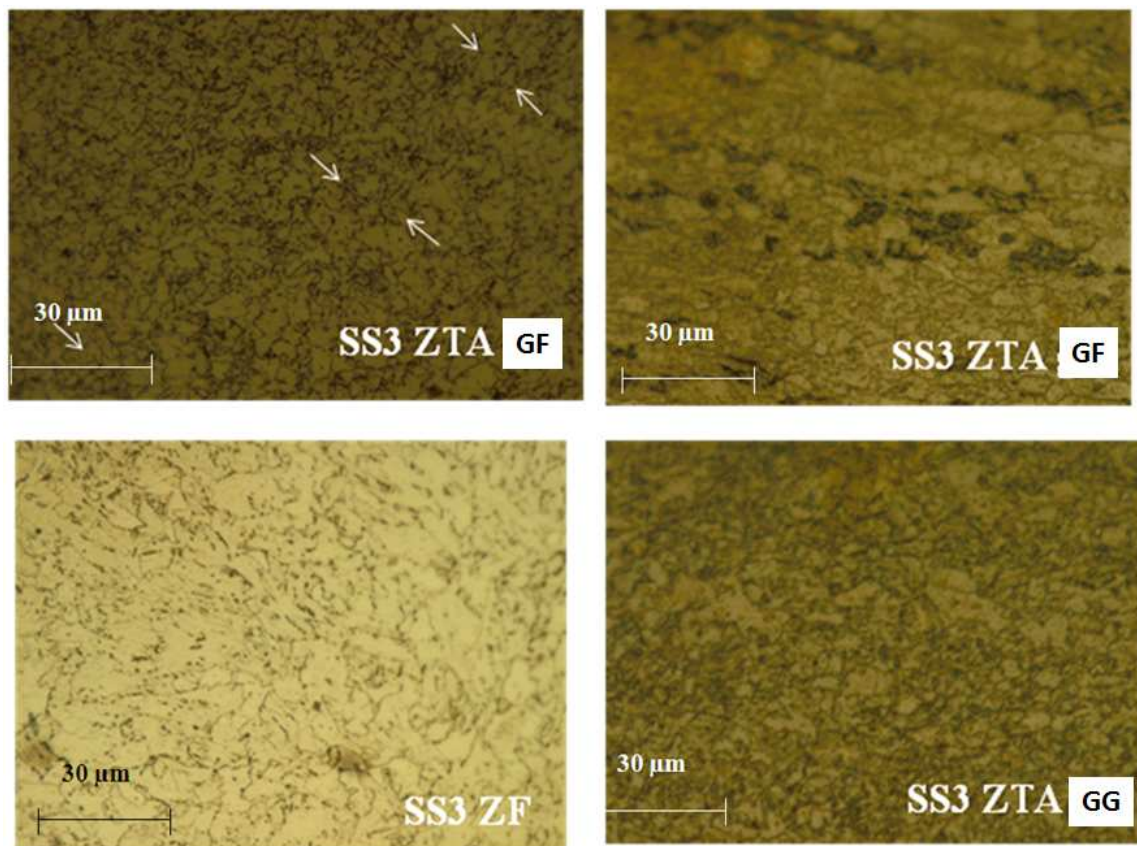


Figura 4.6 - Distribuição das imagens de micrografia da condição de soldagem 03 (SS3).

4.4 Ensaios Mecânicos

4.4.1 Ensaio de Microdureza

O ensaio de microdureza sobre o cordão possibilita uma análise comparativa das propriedades mecânicas das juntas soldadas sob diferentes parâmetros de soldagem. O perfil de dureza pode ser observado nas figuras 4.8, 4.9 e 4.10. A dureza máxima sob o cordão é uma condição que poderá indicar a necessidade de tratamentos de pré-aquecimento. O ensaio foi realizado a 2 mm de distância da linha da superfície dos corpos de prova.

A distribuição dos pontos de indentação analisados foi iniciada do centro da zona fundida da junta soldada denominada ponto P1 passando pela interface da zona de ligação até chegar ao metal de base, figura 4.7.

O ensaio de microdureza registrou um perfil de dureza compatível com a literatura. Em todas as situações de soldagem a tendência da curva do perfil de dureza apresentou-se de acordo com a literatura e pode ser observado nos gráficos das figuras 4.8, 4.9 e 4.10 que correspondem as condições de soldagem SS1, SS2 e SS3 respectivamente.

Para a condição SS3 observou-se um ponto onde a microdureza apresentou-se com valor muito acima do esperado, o que se justifica devido à indentação ter coincidido com um poro que neste caso atuou como um concentrador de tensão, ponto P3 da figura 4.10.

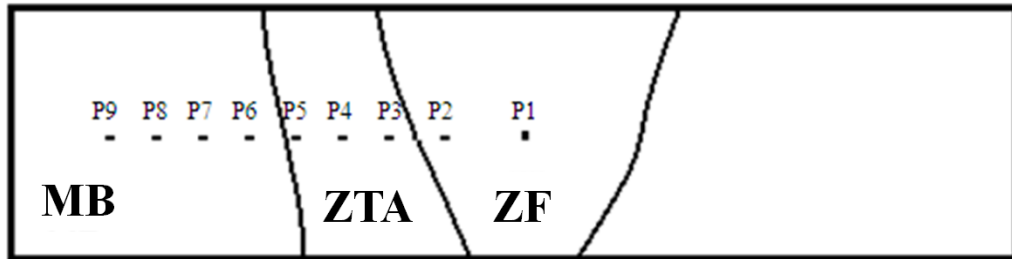


Figura 4.7 – Esquema dos pontos de indentação para ensaio de microdureza.

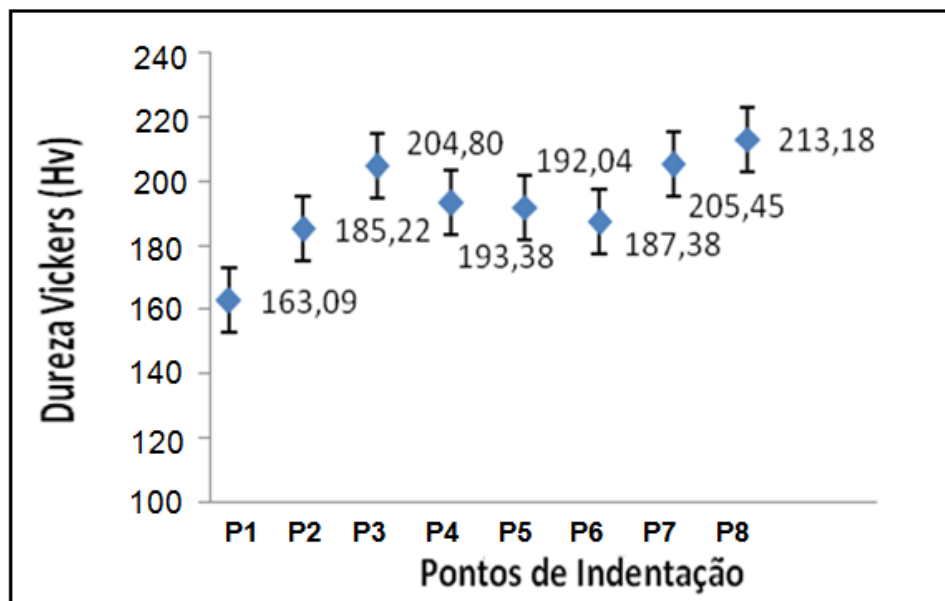


Figura 4.8 – Curva do resultado de microdureza do CP 01 da condição de soldagem SS1.

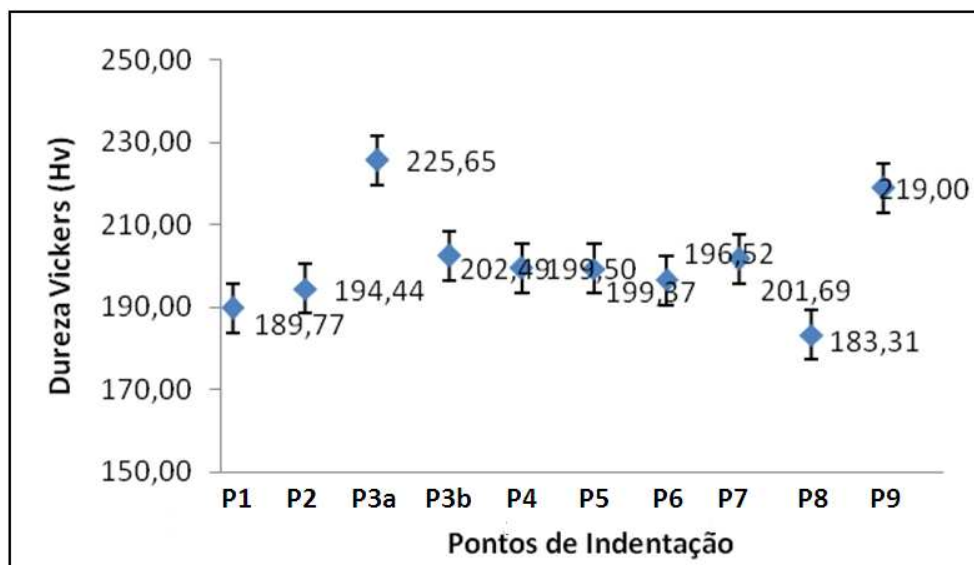


Figura 4.9 – Curva do resultado de microdureza do CP 02 da condição de soldagem SS2.

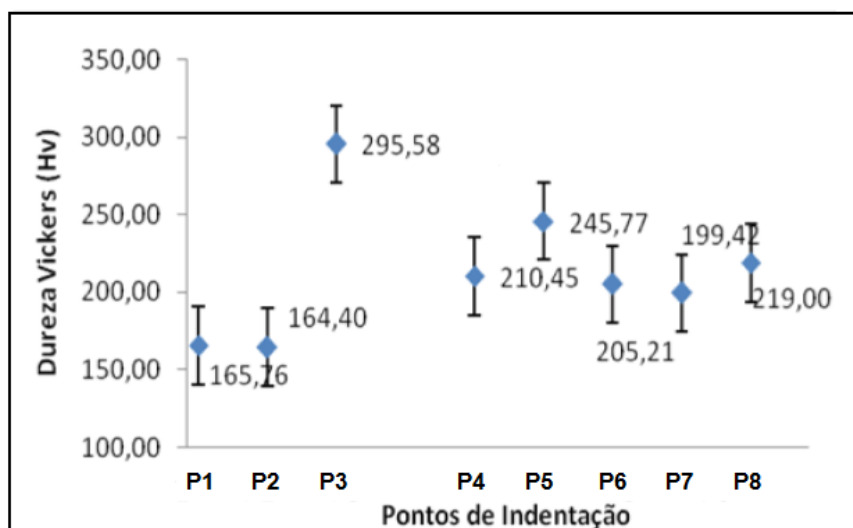


Figura 4.10 – Curva do resultado de microdureza do CP 03 da condição de soldagem SS3.

Os pontos de maior dureza que podem ser observados nas figuras 4.8, 4.9 e 4.10 são resultantes do fenômeno de plastificação observado em juntas soldadas onde ocorre fusão.

4.4.2 Ensaio de Dobramento

Os ensaios de dobramento foram feitos para se avaliar a ductibilidade das juntas soldadas sob diferentes posições de dobra na área soldada como face, raiz e lateral. Considera-se que uma tubulação poderá em alguma situação ao longo de sua vida útil estar sujeita a esforços onde a ductibilidade do cordão de solda será requerida.

Os corpos de prova obtidos das situações de soldagens SS1, SS2 e SS3 estão sendo mostrados na figura 4.11, onde são mostradas as dobras nas superfícies de face (I), raiz (II) e lateral da área soldada (III) para a análise do desempenho plástico da solda com metal base adotado em situação de comportamento plástico ao ser dobrado por esforços mecânicos. Comprova-se um bom desempenho de plasticidade na área de ligação entre o metal depositado na soldagem e o metal de base.

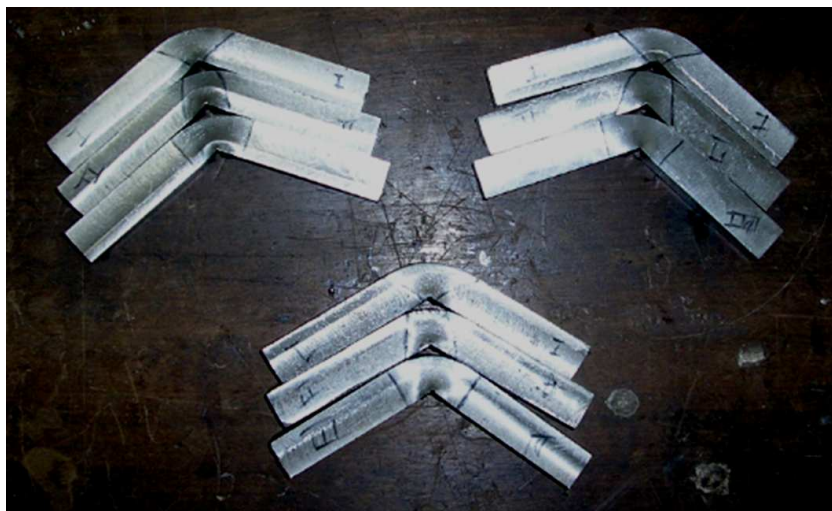


Figura 4.11 – Resultados dos corpos de prova CP1, CP2 e CP3 após ensaio de dobramento

Considerando os tempos de soldagens da SS1 ter sido na maioria dos passes superiores as temperaturas da soldagens SS2 e SS3, tal fato possa ter contribuído para o aparecimento de descontinuidade, poros ocasionados durante a operação de soldagem. Registrou-se apenas a ocorrência de poro na lateral de soldagem na figura 4.12 CPI LAT, um defeito que pode ter origem em erro de operação da solda, durante a disposição dos cordões de solda em passes, conforme.

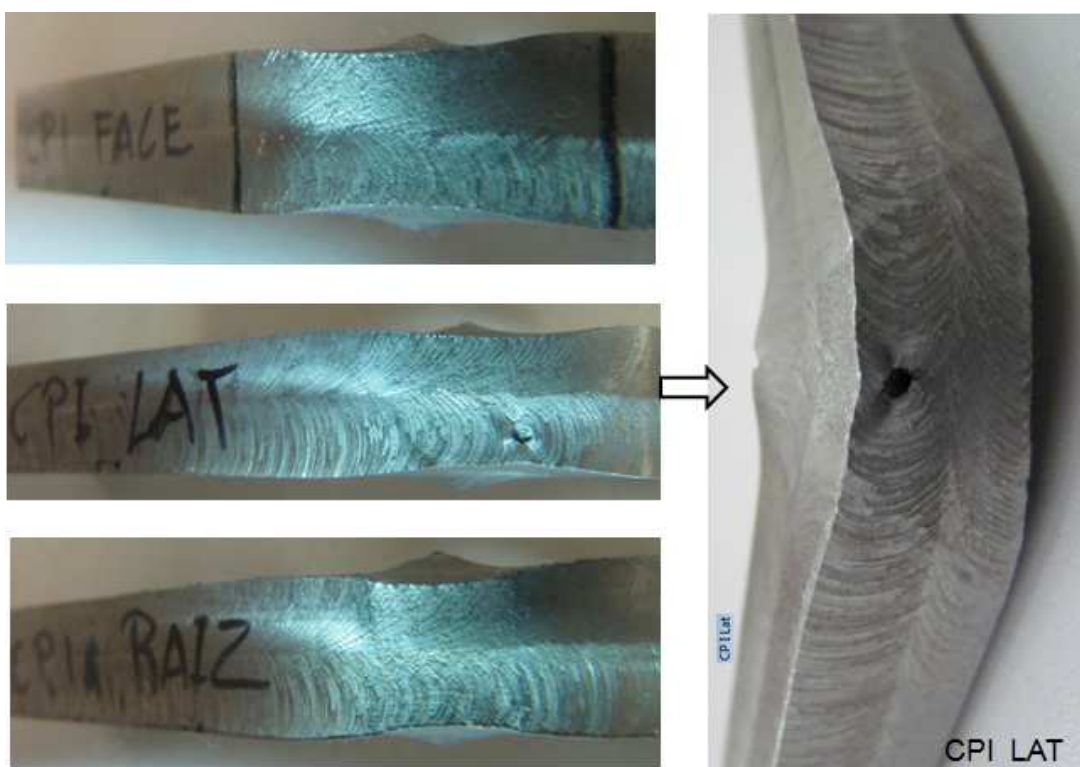


Figura 4.12 - Resultado dos ensaios de dobra da condição de soldagem SS1 (CPI)

Os corpos de prova dobrados a 120° das situações de soldagens SS2 (CPII) e SS3 (CPIII) não apresentaram descontinuidades, logo mostram a eficiência e a qualidade de soldagem realizada com o uso do arame tubular, figura 4.13. As áreas de face, raiz e lateral das soldagens SS2 e SS3

Obteve-se como resultado das análises de dobramentos a maximização das prováveis possibilidades de desprendimento entre a região da poça e o metal base, da qualidade da junta solda efetuada através dos dobramentos realizados nas diversas direções nas quais as áreas de soldagem poderá expor as prováveis imperfeições superficiais da junta soldada e de seu interligamento com o metal base.



Figura 4.13 - Perfis dobrados da condição de soldagem SS2 (CPII) e SS3 (CPIII).

4.4.3 Ensaio de tração

Todos os corpos de prova submetidos ao ensaio de tração romperam na região da zona fundida, figura 4.14 (B), onde as setas indicam visualmente a separação entre o metal base e o metal depositado como solda. A área onde ocorreu o rompimento por tração, era um comportamento esperado já que os níveis de tensão suportados pelo material base são maiores que os níveis de tensão suportados pelo arame tubular utilizado.

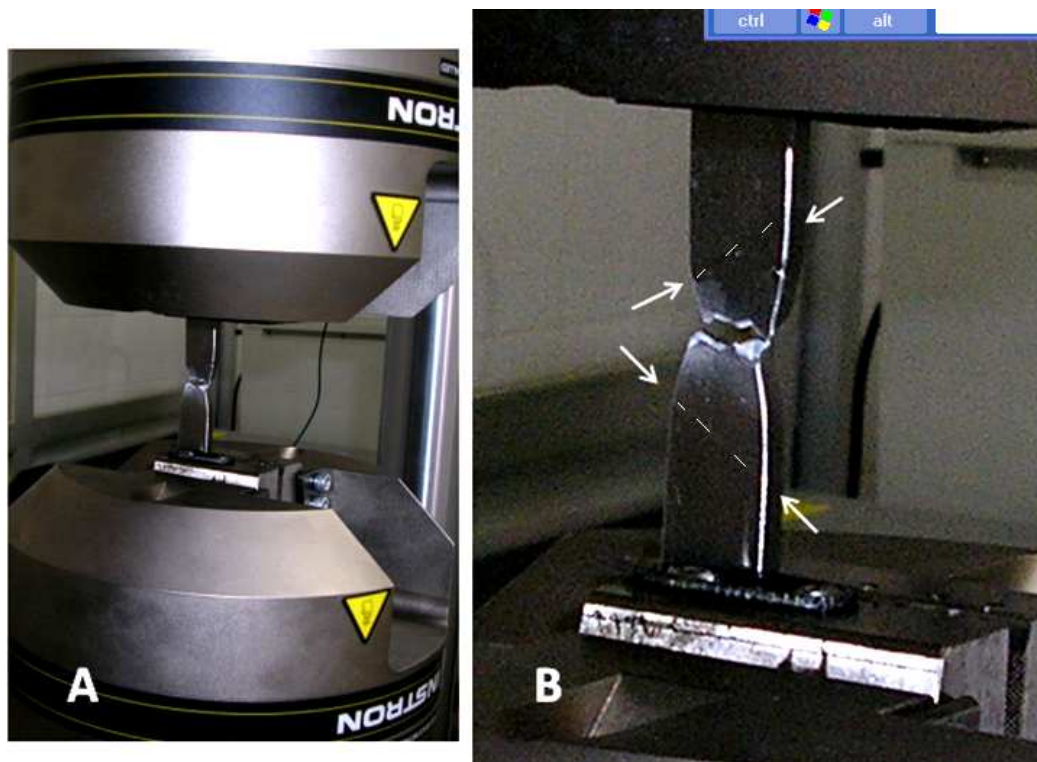


Figura 4.14 - Detalhe do ensaio de tração. A) Célula de carga do equipamento de tração; B) Corpo de prova rompido na zona de fusão.

Os resultados obtidos para a SS1 quanto ao módulo de elasticidade foi o que registrou os menores valores dentre as três condições de soldagem, conforme os gráficos das figuras 4.15 da SS1, 4.16 da SS2 e a figura 4.17 da condição de soldagem SS3. A máxima carga suportada aconteceu para os corpos de prova da SS1, embora tenha sido observada uma pequena variação nestes valores para as três situações. Este comportamento pode ser explicado devido a qualidade de execução da soldagem, o que nos leva a crer que qualquer das tensões de soldagem utilizadas atendem aos requisitos de resistência mecânica a tração quando empregado o processo de soldagem FCAW-G .

Os níveis de tensão de ruptura mais elevados foram registrados para a condição de soldagem SS1. Esta condição de soldagem foi a que apresentou maior ductibilidade/tenacidade e este fato se justifica pelo maior aporte térmico, possibilitando assim uma maior diluição dos elementos de liga na região da zona fundida.

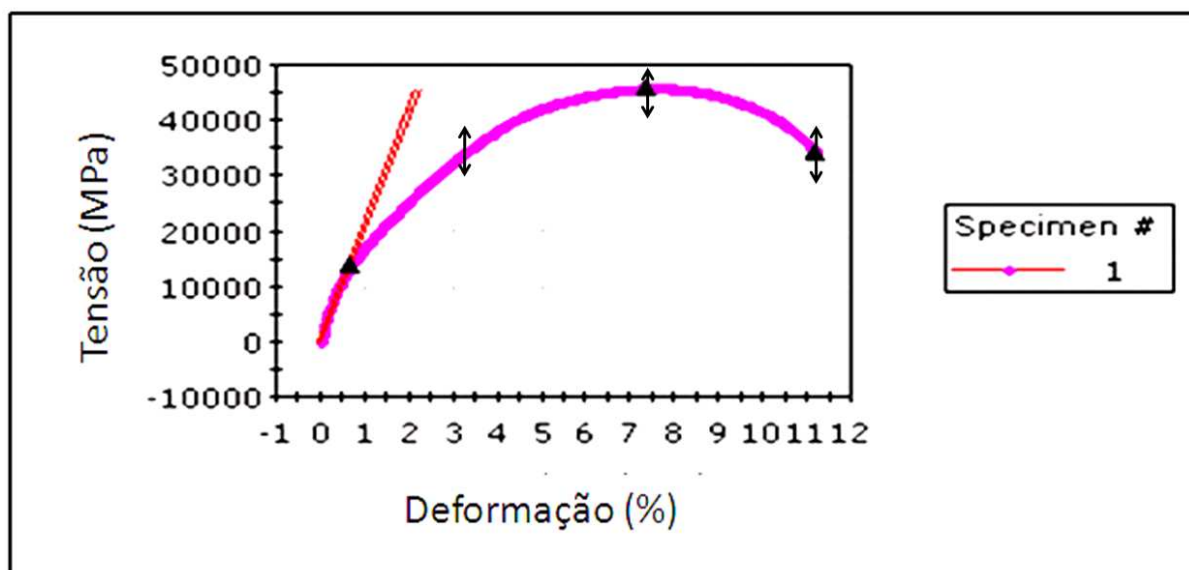


Figura 4.15 – Resultado do ensaio de tração da condição de soldagem SS1.

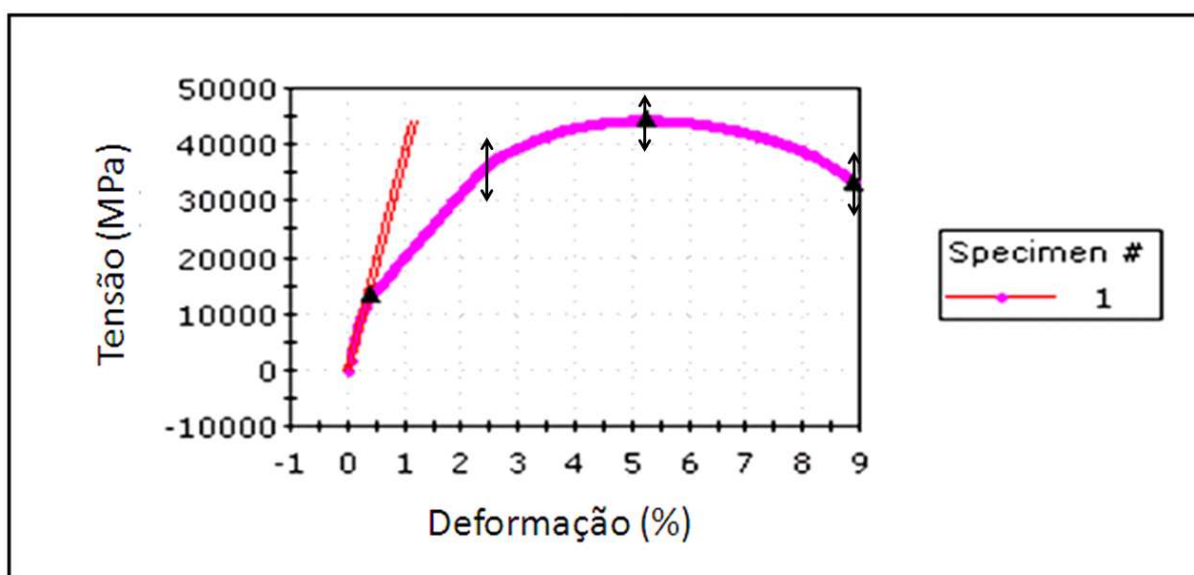


Figura 4.16 – Resultado do ensaio de tração da condição de soldagem SS2.

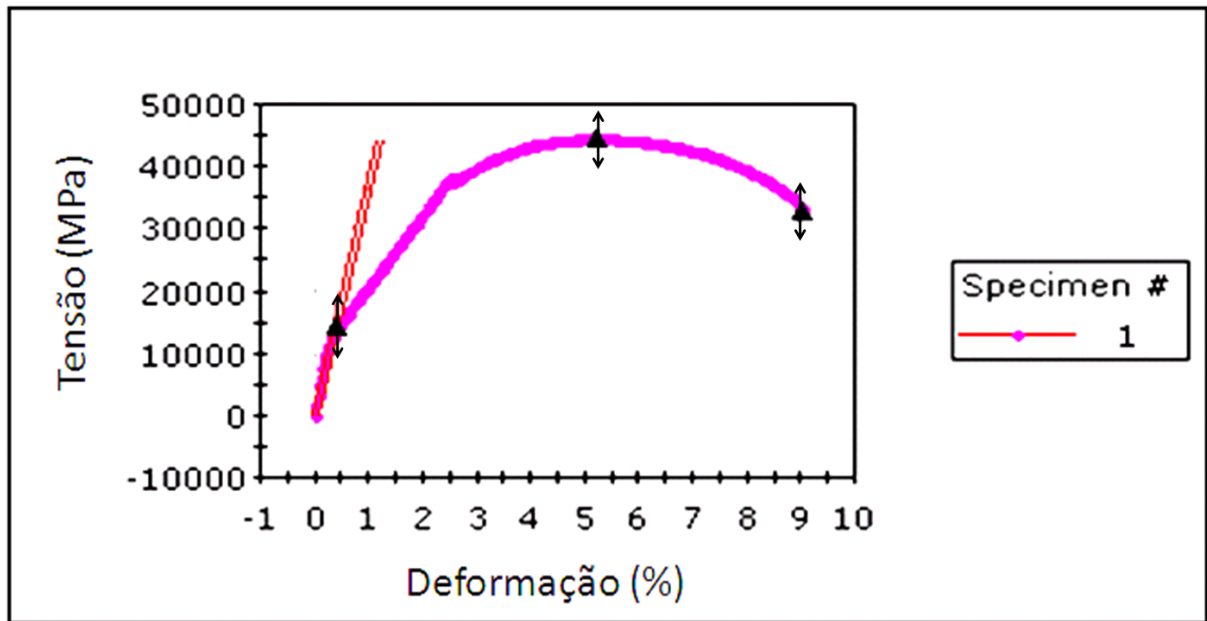


Figura 4.17 – Resultado do ensaio de tração da condição de soldagem SS3.

Os corpos de prova romperam na região da zona fundida (ZF), embora, suportando tensões superiores a 621MPa, demonstrando assim, que para estas condições de soldagem sem pré-aquecimento os requisitos exigidos para esta classe de tubulação atende a norma API 1104 quando comparado aos resultados apresentados por Ordóñez (2004), tendo como vantagem a realização da soldagem sem pré-aquecimento.

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO

A soldagem do aço API 5L Grau-X 80 soldado pelo processo FCAW-G utilizando-se tensões de 24, 25 e 26 V e correntes suficientes para assegurar o modo de transferência do metal por curto-circuito asseguraram as condições de qualidade recomendadas na norma API 1104.

A maior energia de soldagem, da ordem de 1444 KJ/mm para a condição SS1, promove uma maior diluição em relação às energias menores, 1408 KJ/mm para a condição SS2 e 1427 KJ/mm para a condição SS3, gerando com isso um maior limite de resistência a tração.

A soldagem realizada nas condições de 24 V, 25 V e 26 V com corrente de curto-circuito não apresenta descontinuidades que possam ser reveladas pela técnica de LP.

O dobramento de 120° realizado nas juntas soldadas das condições de soldagens SS1, SS2 e SS3 neste trabalho mostrou que nenhuma das descontinuidades foram superiores a 3,2 mm em qualquer das superfícies tracionadas, seja, transversal, longitudinal de face ou a longitudinal de raiz.

A resistência a tração de juntas do aço API 5L Grau-X 80 soldado pelo processo FCAW-G nas condições de tensão 25 V e 26 V com corrente de curto-circuito podem ser melhoradas por redução da velocidade de soldagem, assegurando uma melhor diluição.

O perfil de dureza revelou um comportamento similar ao perfil de dureza que se apresenta quando feita a soldagem por outros processos para este mesmo tipo de material. Os máximos valores atingidos para esta propriedade na região da zona de ligação dos corpos de prova submetidos aos ensaios de microdureza é devido ao processo de plastificação.

Diante das respostas obtidas após os ensaios de verificação da qualidade da junta soldada é possível com um único processo de soldagem a união de tubulações do tipo API 5L Grau-X 80 de maneira a atender as necessidades estruturais e requisitos de qualidade exigidos pelo seguimento de petróleo e gás natural, onde a qualificação do procedimento de soldagem FCAW-G do passe de raiz até os passes de acabamento é comprovadamente possível conforme API 1104.

CAPÍTULO 6 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Utilização de arames tubulares com maior resistência mecânica para aplicação em tubos de aço API 5L Grau-X 80.

Verificar o comportamento da junta soldada pelo processo FCAW-G em aços API 5L Grau-X 80 com modificações microestruturais.

Verificar o comportamento do processo de soldagem FCAW-G com aços API 5L Grau-X 100.

CAPÍTULO 7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- API 5L. AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, **Specification for Line Pipe – API Specification 5L**. 43rd. Norma API 5L, 2004.
- API Standard 1104, **Welding of Pipelines and Related Facilities**. 12th edition, july 2007.
- ASM. Weld Integrity and Performance, 1997, p. 417.
- ASM. **Welding Handbook**: vol. 2, 7 ed., 1978.
- ASME Section V. ASME Boiler & Pressure Vessel cod. An International code. The American Society of Mechanical Engineers. New York 2004.
- ASTM. **Standard Test Methods for Determining Average Grain Size**, ASTM E112 – 96, 2004. e 2, Physical and Mechanical Testing Standards.
- AWS. A5.18. **Specification for Carbon Steel Electrodes and Rods for Gas Shielded Arc Welding**. 2001.
- AWS. **Structural Welding Code - Steel**, AWS D1.1 2002.
- AWS. **Weldability, Welding Metallurgy, and Welding Chemistry**. 1995.
- BRACARENSE, A. Q. **Processo de Soldagem por Arame Tubular – FCAW-G**. UFMG, 2000.
- BRANDI, S. D. **Classificação dos Processos de Soldagem**. In: WAINER, E. ; BRANDI, S. D.; MELO, V. O. **Soldagem Processos e Metalurgia**. Editora Edgard Blücher Edgard, p. 504, ISBN: 9788521202387, São Paulo, 1992.
- CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. 7^o edição, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, 2002, p.22.
- DURAND, R. Z. S. **Avaliação da Microestrutura e Propriedades Mecânicas da Soldagem Circunferencial do Aço API 5L Grau-X80 por Processo de Soldagem Semi-Automáticos com Proteção Gasosa**. Dissertação de Mestrado, Rio de Janeiro, 2007.
- EASTERLING, K. E. - **Introducion to the Physical Metallurgy of Welding**. London, Butterworths & Co. Ltd. 1983, 232p.
- ELISEI, C. C. A.; ABDALLA, A. J.; HASHIMOTO, T. M.; PEREIRA, M. S. **Utilização de Metalografia Colorida na Identificação dos Microconstituintes de um Aço**. In: 17^o CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Foz do Iguaçu, PR, Brasil. 2006, p. 12.
- FBTS - FUNDAÇÃO BRASILEIRA DE TECNOLOGIA DA SOLDAGEM **Curso de Inspetor de Soldagem**. 2000.

GALLEGO, J. **Interação entre os Mecanismos de Endurecimento nos Aços Microligados**. In: XVI CBECIMat . Porto Alegre, RS, Brasil, 2004.

IRVING, B. **Shielding Gases are the Key to Innovations in Welding**. Welding Journal: Jan, 1999.

KIEFER, J. H. **Bead Tempering Effects on FCAW-G Heat-Affected Zone Hardness**. Welding Journal: Vol. 74, 1995, p. 363 – 367.

KOU, S. **Welding Metallurgy**: John Wiley & Sons, New York, 1987.

LAHSTEINER, R. **Welding of high-tensile steels with the T.I.M.E. process**, IIW/IIS Doc. XII-1263-91, 1991.

LINERT, G. E. - **Welding Metallurgy**. 3rd. American Welding Society, New York, 1967.

MACHADO, I. G. **Soldagem & Técnicas Conexas: Processos**. UFRGS, Porto Alegre, 1996, 477p.

MARQUES, P. V; MODENESI, P. J; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem, Fundamentos e Tecnologia**; 2ª edição; Editora UFMG; 2007.

MODENESI, Paulo J. **Soldabilidade dos Aços Transformáveis**. Belo Horizonte, MG. UFMG, 2004.

MODENESI, P. J.; NIXON, J. H. **Arc Instability Phenomena in GMA welding**. Welding Journal: Vol. 73, 1994, p. 219-224.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; SANTOS, D. B. **Curso de Metalurgia de Soldagem**. Universidade Federal de Minas Gerais, DEM, Belo Horizonte - MG, 1985, 388p.

MODENESI, P. J. **Efeitos Mecânicos do Ciclo Térmico**. Apostila. UFMG, 2001. Fonte: <http://www.google.com.br/> Acessado em: 05/05/2008

_____ **Soldabilidade de Algumas Ligas Metálicas**. Apostila. UFMG, 2008. Fonte: <http://www.google.com.br/> Acessado em: 08/07/2008

_____ **Soldabilidade dos Aços Transformáveis**. Apostila. UFMG, 2004. Fonte: <http://www.google.com.br/> Acessado em: 14/05/2008

MULLER, L. R; ALCÂNTARA, N. G. **Obtenção e Caracterização das Curvas de Resfriamento Direto em Metais de Solda**. In: Encontro Nacional de Tecnologia de Soldagem, XII, Campos do Jordão, 5-8 out. 1986, Anais.

OKUMURA, T. & TANIGUCHI, C. **Engenharia de Soldagem e Aplicações**. Rio de Janeiro, 1982.

ORDÓÑEZ, R. E. C. **Soldagem e Caracterização das Propriedades Mecânicas de Dutos de Aço API 5L – X80 com Diferentes Arames Tubulares**. Dissertação de Mestrado, Campinas, SP, 2004.

PADILHA, A. F.; GUEDES, L. C. **Aços Inoxidáveis Austeníticos – Microestrutura e Propriedades**. São Paulo, Hemus Editora, 1994. p. 170.

PANNONI, F. D. **Aços Estruturais**. Eng. de Proteção Estrutural da Gerdau Açominas S.A. 2005, p.7.

PANNONI, F. D. **Princípios da Proteção de Estruturas Metálicas em Situação de Corrosão e Incêndio**. Perfis Gerdau Aço Minas, 2 ed, v. 2, 2004.

PEDROSA, I. R. V. **Influência do Gás de Proteção no Modo de Transferência do Metal de Adição e nas Propriedades Mecânicas das Juntas Soldadas pelos Processos GMAW**. Dissertação de Mestrado, UFPE, 2008.

QUITES, A. M. **Introdução à Soldagem a Arco Voltaico**. ed. Soldasoft, Florianópolis, 2002, 352p.

SOUZA, S. A. **Ensaaios Mecânicos de Materiais Metálicos, Fundamentos Teóricos e Práticos**. 5ª ed. Editora Edgard Blücher, 1982.

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. **Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho**. 1ª ed. Editora Artliber, 2008.

SILVA, E. S.; BELTRÃO, M. A.; BASTIAN, F. L. **Comportamento em Fadiga de Juntas Soldadas Circunferenciais de um Aço API 5L X80**. In: 18º CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Porto de Galinhas, PE, Brasil, 2008.

STEKLY, J. J. K. **Deposition Rates: Principles and Data**. Weld. Rev. 4, 1989, p. 238-240.

SUBAN, M. & TUSEK, J. **Dependence of Melting Rate in MIG/MAG Welding on the Type of Shielding Gas Used**. Journal of Materials Processing Technology, vol. 119, 2001, p. 185-192.

SUBAN, M. & TUSEK, J. **Methods for the Determination of Arc Stability**. Journal of Materials Processing Technology. 143-144, 2003, p. 430-437.

WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. **Soldagem: Processos e Metalurgia**. Edgard Blücher, São Paulo, 1992.

WELDING HANDBOOK. **Fundamentals of Welding**. vol. 1, 7th ed. American Welding Society; Miami, Florida, 1981. p. 7-9.

WELDING HANDBOOK. **Welding Processes-Arc and Gas Welding and Cutting, Brazing and Soldering**. vol. 2, 7th ed. American Welding Society, Miami, Florida, 1978. p. 114-6.

ANEXO – Dados técnicos do metal de base.

FOLHA DE CAPA / COVER SHEET
REGISTRO DE ENSAIOS N° / LABORATORY TEST RECORD

CLIENTE / CUSTOMER: XXXXXX		PROJETO / PROJECT: XXXX																					
LOTE / LOT: XXXXXX		ITEM: XXXX																					
NORMA / SPEC: API 5L		GRAU / GRADE: X80 - PSL2																					
DIMENSÕES / DIMENSIONS: 34"OD x 0,750"WT (864,0 mmOD x 19,1 mmWT)		EDIÇÃO / EDITION: 2004																					
ESPECIFICAÇÃO DO CLIENTE / CUSTOMER SPECIFICATION: XXXXXX																							
REFERÊNCIA / REFERENCE: 1º DIA DE PRODUÇÃO / FIRST DAY PRODUCTION																							
CONTEÚDO / TABLE OF CONTENTS																							
<table><thead><tr><th>NOME DO DOCUMENTO / DOCUMENT NAME</th><th>LOTE / LOT</th><th>DE / FROM</th><th>FOLHA / SHEET</th></tr></thead><tbody><tr><td>REGISTRO DE ENSAIO DE TRAÇÃO E DOBRAMENTO / TENSILE AND GUIDED BEND TEST RECORD</td><td>N/A</td><td>01/01</td><td>01/01</td></tr><tr><td>REGISTRO DE ANÁLISE QUÍMICA / CHEMICAL ANALYSIS RECORD</td><td>N/A</td><td>01/01</td><td>01/01</td></tr><tr><td>REGISTRO DE ENSAIO DE CHARPY / IMPACT TEST RECORD (CHARPY)</td><td>N/A</td><td>01/01</td><td>01/01</td></tr><tr><td>DUREZA VICKERS E MACROGRAFIA / VICKERS HARDNESS AND MACROGRAPH</td><td>N/A</td><td>01/01</td><td>01/01</td></tr></tbody></table>				NOME DO DOCUMENTO / DOCUMENT NAME	LOTE / LOT	DE / FROM	FOLHA / SHEET	REGISTRO DE ENSAIO DE TRAÇÃO E DOBRAMENTO / TENSILE AND GUIDED BEND TEST RECORD	N/A	01/01	01/01	REGISTRO DE ANÁLISE QUÍMICA / CHEMICAL ANALYSIS RECORD	N/A	01/01	01/01	REGISTRO DE ENSAIO DE CHARPY / IMPACT TEST RECORD (CHARPY)	N/A	01/01	01/01	DUREZA VICKERS E MACROGRAFIA / VICKERS HARDNESS AND MACROGRAPH	N/A	01/01	01/01
NOME DO DOCUMENTO / DOCUMENT NAME	LOTE / LOT	DE / FROM	FOLHA / SHEET																				
REGISTRO DE ENSAIO DE TRAÇÃO E DOBRAMENTO / TENSILE AND GUIDED BEND TEST RECORD	N/A	01/01	01/01																				
REGISTRO DE ANÁLISE QUÍMICA / CHEMICAL ANALYSIS RECORD	N/A	01/01	01/01																				
REGISTRO DE ENSAIO DE CHARPY / IMPACT TEST RECORD (CHARPY)	N/A	01/01	01/01																				
DUREZA VICKERS E MACROGRAFIA / VICKERS HARDNESS AND MACROGRAPH	N/A	01/01	01/01																				
CONTROLE DE REVISÃO / REVISION CONTROL																							
NUMERO / NUMBER	DATA / DATE	REVISÃO / REVISION																					
00	APR 25 th , 2008	Emissão Original / Original Issue																					

REGISTRO DE TRAÇÃO E DOBRAMENTO GUIADO / TENSILE AND GUIDED BEND TEST RECORD

IDENTIFICAÇÃO / IDENTIFICATION				DIMENSÕES / DIMENSIONS								LEITURA / READING				RESULTADOS / RESULTS								TESTE DE DOBRAMENTO								
INT	USINA	CORRIDA	TUBO	METAL BASE / BASE METAL								METAL BASE / BASE METAL				METAL BASE / BASE METAL				METAL BASE / BASE METAL				DOBRAMENTO								
STEEL MILL HEAT				A	B	A	B	CARGALOAD				CARGALOAD				CARGALOAD				BEND TEST												
Nr	Nr	Nr	Nr	mm	mm	mm	mm	LE / YS	LR / UTS	LF	LR / UTS	AI / EI	LR / UTS	YS / UTS	%	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa	LR / UTS	AI / EI	LR / UTS	EXTERNAL OUTSIDE	INTERNAL INSIDE	DL1	DL2	DL3	DL4				
TRAÇÃO TRANSVERSAL - CP REDUZIDO / TRANSVERSE TENSILE TEST - STRIP SPECIMEN																																
1				USIMINAS				440774				08 4 34331				37,91	18,95	38,53	18,77	41.782	52.645	69,6	53.085	570	719	0,79	37,0	720	OK	OK	OK	OK
2				USIMINAS				440832				08 4 34329				38,61	19,01	38,71	18,79	43.497	54.299	67,9	53.558	581	725	0,80	33,7	722	OK	OK		
3				USIMINAS				440831				08 4 34333				38,03	19,15	38,12	18,82	43.541	53.949	67,7	52.131	586	726	0,81	33,3	709	OK	OK		
OBSERVAÇÕES / REMARKS:																																
1) Testes conforme API 5L / ASTM A 370 / Tests according to API 5L / ASTM A 370																																
2) Dimensão / Dimension "A" = A largura da seção reduzida / The width of the reduced section																																
3) Dimensão / Dimension "B" = A espessura da seção reduzida / The thickness of the reduced section																																
4) Carga / Load in : Kgf																																
5) Diâmetro do pino dobramento guiado / Guided bend test mandrel diameter = 157,5 mm																																
6) Diâmetro do pino dobramento lateral / lateral bend test mandrel diameter = 38,1 mm																																
7) Limite de Escoamento / Yield Strength = (0,5 %)																																
REGISTRO / RECORD																																
LOTE / LOT N/A																																
FOLHA / SHEET 01/01																																
REVISÃO / REVISION 00																																

DEPARTAMENTO DA QUALIDADE / QUALITY DEPARTMENT
Laboratório / Laboratory

IDENTIFICAÇÃO / IDENTIFICATION				REGISTRO DE ANÁLISE QUÍMICA / CHEMICAL ANALYSIS RECORD																							
LAB	TIPO	CORRIDA	TUBO Nº	ELEMENTOS / ELEMENTS (%)																							
Nº	TYPE	HEAT Nº	PIPE Nº	C	S	N	O	Al	Si	P	Ti	V	Cr	Mn	Ni	Cu	Nb	Mo	B	Ca	(A)	(B)	(C)	(D)	(E)	PCM	CE
1	QT	440774	08 4 34331	0,03	0,003	0,0054	NR	0,027	0,21	0,013	0,017	0,023	0,158	1,78	0,013	0,008	0,071	0,183	0,0001	0,0032	0,11	0,08	0,36	5,0	0,38	0,15	0,40
2	QT	440832	08 4 34329	0,02	0,004	0,0081	NR	0,032	0,24	0,018	0,016	0,025	0,166	1,77	0,014	0,010	0,072	0,193	0,0002	0,0024	0,11	0,10	0,38	4,0	0,38	0,15	0,40
3	QT	440831	08 4 34333	0,03	0,004	0,0059	NR	0,028	0,17	0,016	0,013	0,026	0,159	1,72	0,014	0,008	0,065	0,192	0,0001	0,0030	0,10	0,08	0,37	4,7	0,37	0,15	0,39
OBSERVAÇÕES / REMARKS: 1) Teste conforme API 5L / ASTM A 751 Test according to API 5L / ASTM A 751				(A) = Nb + V + Ti (B) = V + Nb (C) = Cr + Ni + Mo + Cu (D) = Al / N (E) = C + Mn/5 Pcm= C + Si/30 + (Mn + Cr + Cu)/20 + Ni/60 + Mo/15 + V/10+ B*5 CE = C + Mn/8 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15																							
				REGISTRO / RECORD																							
				LOTE / LOT																							
				FOLHA / SHEET																							
				REVISÃO / REVISION																							
				N/A																							
				01/01																							
				00																							

REGISTRO DE ENSAIO DE CHARPY / CHARPY TEST RECORD

IDENTIFICAÇÃO / IDENTIFICATION			TESTE DE IMPACTO / IMPACT TEST																				
LAB	CORRIDA	TUBO	METAL BASE (BASE METAL) - Joule						SOLDA (WELD) - Joule						ZTA-LF (HAZ-FL) - Joule						% F.D METAL BASE / % S.A BASE METAL		
LAB	HEAT	PIPE	01	02	03	MED/AVG	01	02	03	MED/AVG	01	02	03	MED/AVG	01	02	03	MED/AVG	01	02	03	MED/AVG	
Nr	Nr	Nr																					
1	440774	08 4 34331	185	203	202	197	113	122	113	116	120	142	93	118	100	100	100	100	100	100	100	100	
2	440832	08 4 34329	190	188	181	186	110	133	120	121	132	121	143	132	100	100	100	100	100	100	100	100	
3	440831	08 4 34333	194	193	192	193	128	146	133	136	83	163	110	119	100	100	100	100	100	100	100	100	
OBSERVAÇÕES / REMARKS:																							
1) TESTES CONFORME API 5L / ASTM A 370 / TESTS ACCORDING TO API 5L / ASTM A 370																							
2) DIMENSÕES DO CP / SPECIMEN DIMENSIONS : 10 x 10 x 55 mm. ORIENTAÇÃO DO CP / SPECIMEN ORIENTATION: TRANSVERSAL / TRANSVERSE																							
3) NR - NÃO REQUERIDO / NOT REQUIRED																							
4) CAPACIDADE MÁXIMA DA MÁQUINA / MAXIMUM MACHINE CAPACITY: 300 J																							
5) TEMPERATURA DE TESTE / TEST TEMPERATURE: 0°C																							
6) FD - FRATURA DUCTIL / SA - SHEAR AREA																							
REGISTRO / RECORD																				N/A			
LOTE / LOT																				01/01			
FOLHA / SHEET																				00			
REVISÃO / REVISION																							

REGISTRO DE ENSAIO DE DUREZA VICKERS / VICKERS HARDNNESS TEST RECORD																						
IDENTIFICAÇÃO / IDENTIFICATION			PONTOS DE IMPRESSÃO / INDENTATION POINTS																			
LAB	CORRIDA/HEAT	TUBO/PIPE	LINHA																			
Nr.	Nr.	Nr.	LINE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15				
1	440774	08 4 34331	A	236	234	233	201	205	216	220	220	219	219	219	210	213	216	222				
			B	217	219	220	196	208	211	219	218	217	217	217	218	209	210	213	213			
			C	231	231	227	223	213	205	241	244	245	220	225	224	220	224	224	224			
REGISTRO DE MACROGRAFIA / MACROGRAPH RECORD																						
OBSERVAÇÕES / REMARKS: 1) Dureza - Teste conforme ASTM E - 92 Hardness - Test according to ASTM E - 92 2) Valor máximo especificado : 345 HV10 Maximum value specified : 345 HV10 3) Junta soldada / Welded Joint DIAGRAMA DOS PONTOS DE IMPRESSÃO / INDENTATION POINTS DIAGRAM Diagrama dos pontos de impressão / Indentation points diagram showing three rows of points (A, B, C) with their respective hardness values and a scale bar. ESCALA USADA / SCALE USED : HV10																						
REGISTRO / RECORD															LOTE / LOT		FOLHA / SHEET		REVISÃO / REVISION		MACRO EXAMINATION	
															N/A		01/01				OK	
																					OK	
																					OK	