



**Percy Marco Antonio Saavedra Pinto**

**Soldagem Circunferencial de Tubo API 5L X80  
Empregando Processos Manual / Semi-Automático**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Materiais pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica do Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia da PUC-Rio.

Orientadora: Ivani de Souza Bott

Rio de Janeiro, Março de 2006



**Percy Marco Antonio Saavedra Pinto**

## **Soldagem Circunferencial de Tubo API 5L X80 Empregando Processos Manual / Semi-Automático**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Materiais pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica do Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Profa. Ivani de S. Bott**

Orientadora

Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia – PUC-Rio

**Prof. Luis Felipe G. de Souza**

Centro Federal de Educação Tec. Celso Suckow da Fonseca – CEFET/RJ

**Dra. Annelise Zeemann do Pinho**

TECMETAL – Consultoria em Materiais Ltda

**Prof. Paulo Rangel Rios**

Universidade Federal Fluminense – UFF

**Professor José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial de Pós Graduação do Centro Técnico Científico da  
PUC-Rio

Rio de Janeiro, 15 de Março de 2006

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

### **Percy Marco Antonio Saavedra Pinto**

Graduou-se em Engenharia Metalúrgica na Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, no Perú em 1999. Possui experiência profissional como Engenheiro na área de Soldagem, Manutenção e Proteção contra a Corrosão de estruturas Off-Shore, além de ter experiência em operações e processos metalúrgicos de cobre, chumbo, zinco, prata e ouro.

#### Ficha Catalográfica

Saavedra Pinto, Percy Marco Antonio

Soldagem circunferencial de tubo API 5L X80 empregando processos manual/semi-automático / Percy Marco Antonio Saavedra Pinto ; orientador: Ivani de S. Bott. – Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Ciências dos Materiais e Metalurgia, 2006.

113 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Ciências dos Materiais e Metalurgia.

Inclui referências bibliográficas.

1. Ciências dos materiais – Teses. 2. Soldagem Circunferencial. 3. API 5L Grau X80. 4. Arame Tubular Autoprotégido. I. Bott, Ivani de S. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Ciências dos Materiais e Metalurgia. III. Título.

CDD: 669

Aos meus familiares Coco Nena e Delia pela dedicação, apoio e estímulo na busca  
de novos conhecimentos.

## **Agradecimentos**

À Deus, Jesus-Cristo e a Virgem Maria que iluminam meu caminho e sempre estão do meu lado.

Aos meus familiares que estão longe e sempre torcem por mim.

À minha orientadora, professora Ivani de S. Bott, pelo estímulo, ensinamentos e parceria durante a realização deste trabalho.

À Milagros Guillén pelo amor, convívio, estímulo e auxílios inestimáveis.

Aos funcionários da PETROBRAS, Marcy Saturno, Gilmar Zacca e Eduardo Hippert, pelo apoio e as contribuições técnico-científicas.

Aos engenheiros da ESAB Bernardo Gonçalves, Cláudio Vaz e José Roberto Cunha, pelo apoio concedido na realização das Soldagens.

Ao Técnico de Laboratório Heitor Nuss Guimarães, ao colega Richard Sanzd e a equipe de trabalho do projeto X80 da PUC pelo auxílio concedido.

À CAPES pelo apoio financeiro durante os estudos do mestrado.

À CONFAB pela doação dos tubos dos aços X80.

Aos meus colegas da PUC-Rio, e em particular ao pessoal da sala 13 e todos os alunos do DCMM pelo apoio.

A todos os professores e funcionários do DCMM, pelos ensinamentos e ajuda.

## Resumo

Percy Marco Antonio Saavedra Pinto. **Soldagem Circunferencial de Tubo API 5L X80 Empregando Processo Manual e Semi-Automático.** Rio de Janeiro 2006. 113p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O presente estudo faz parte de um projeto relacionado ao estudo de aplicação de tubos de aço API 5L Grau X80 fabricados no Brasil e destinados para a montagem de tubulações para o transporte de gás. Objetiva-se avaliar os parâmetros de soldagem empregados na execução da soldagem circunferencial combinando os processos de eletrodo revestido, para a execução do passe de raiz e passe quente, e arame tubular autoprottegido para a execução dos passes de enchimento e acabamento. Os resultados obtidos indicam que embora o material utilizado, tanto metal de solda como metal de base estejam atendendo aos requisitos básicos de tenacidade e resistência, em acordo com as normas, a qualificação do procedimento é dependente do desempenho dos soldadores. Existe portanto, a necessidade de habilitação técnica mais ampla quanto a formação de profissionais nesta área, excedendo assim o escopo do presente estudo cujo objetivo foi estudar e caracterizar a solda circunferencial. As propriedades mecânicas foram avaliadas mediante ensaios de dureza, tração, dobramento, ensaios nick-break e tenacidade mediante ensaios de impacto Charpy. A caracterização da junta soldada foi realizada, utilizando-se microscopia ótica e microscopia eletrônica de varredura. Embora o procedimento empregado não tenha sido qualificado pela norma API 1104, em função da execução do procedimento, os valores de resistência mecânica obtidos foram aceitáveis e a caracterização microestrutural e mecânica da junta comprova a não ocorrência de microestruturas frágeis, seja no metal de solda ou na ZTA.

## Palavras-chave

Soldagem Circunferencial; API 5L X80; Arame Tubular Autoprottegido.

## Summary

Percy Marco Antonio Saavedra Pinto. **Circumferential Welding of API 5L X80 Pipe Using Manual and Semi-Automatic Process.** Rio De Janeiro, 2005, 113p. MSc. Thesis - Department of Science of the Materials and Metallurgy, Pontifical University Catholic of Rio De Janeiro.

The current work is part of a larger project to study the application of API 5L X80 steel tubes, produced in Brazil, in gas pipeline fabrication. The objective of this work is to evaluate the effects of the process parameters used when performing a circumferential welding technique which combines the utilization of coated electrodes for the root and hot passes, while exploiting self-shielded flux cored arc welding for the filling and finishing passes. The results obtained indicate that, though the material studied, both filler metal and the base alloy, meet the basic toughness and strength specifications of the relevant standards, the final overall quality of the joint is very dependent on the skill of the welders. Although there is a necessity to guarantee an adequate level of training for these professionals for such tasks, that would be beyond the scope of then present work, as it aims to emphasize the characterization of the circumferential weld itself. The mechanical properties were evaluated using hardness measurements, bend testing, nick-break tests and toughness was evaluated by Charpy notch-impact tests. The metallographic characterization of the girth weld joint was undertaken by means of optical and scanning electron microscopy. Though the specific methodology applied has not been qualified by the API 1104 Standard, as such, the strength values obtained were of acceptable levels and an analysis of the joint's microstructure and overall mechanical properties confirm that no typical fragile structures or phases were present either in the weld metal or the heat affected zone.

## Keywords

Circumferential Welding, API 5L X80 Steel, Self-Shielded Flux Cored Arc Welding.

## Sumário

1 – Introdução	16
1.1. Objetivos	17
2 - Revisão Bibliográfica	19
2.1. Desenvolvimento de aços de alta resistência	19
2.1.1. Vantagens da utilização dos aços de alta resistência	20
2.1.2. Tipos de Aços de Alta Resistência	21
2.2. Processos de fabricação de aços de alta resistência	22
2.2.1. Descrição do processo de fabricação do X80 nacional	23
2.2.2. Processo de conformação dos tubos	25
2.2.3. Efeito do processo de fabricação sobre as propriedades da chapa	26
2.3. Soldabilidade de aços de alta resistência e baixa liga	27
2.3.1. Carbono Equivalente (CE)	28
2.3.2. Aporte de calor e ciclo térmico	30
2.3.3. Zona afetada pelo calor	31
2.3.3.1. Efeito de vários passes de solda na ZTA	33
2.3.3.2. Efeito da Composição Química e dos parâmetros de soldagem sobre a microestrutura do metal de solda	34
2.3.3.3. Formação do microconstituente AM e sua influência na tenacidade	35
2.4. Transferência do metal de adição	36
2.5. Soldagem de tubulações	37
2.6. Processo de soldagem com eletrodo revestido	38
2.6.1. Vantagens e desvantagens do processo com eletrodo revestidos	39
2.7. Processo de soldagem com arame tubular	40
2.7.1. Processo de fabricação dos consumíveis tubulares	41
2.7.2. Secções transversais dos arames	42



2.7.3. Funções dos componentes do fluxo	43
2.7.4. Modos de transferência na soldagem com arame tubular	43
2.7.5. Parâmetros de soldagem do processo FCAW	44
2.7.5.1. Corrente de soldagem	44
2.7.5.2. Tensão de soldagem	45
2.7.5.3. Extensão do eletrodo	45
2.7.5.4. Vazão do gás de proteção	46
2.7.5.5. Velocidade de alimentação do arame	46
2.7.5.6. Velocidade de soldagem	46
2.8. Processo de soldagem FCAW auto-protegido	47
2.8.1. Equipamento utilizado na soldagem FCAW autoprottegido	49
2.8.2. Aplicações da soldagem FCAW - autoprottegido	51
2.9. Defeitos comuns na soldagem	52
2.9.1. Trincamento a frio induzido pelo hidrogênio	52
2.9.2. Fissuração a quente	53
2.9.3. Falta de penetração	54
2.9.4. Porosidade	54
2.9.5. Inclusões de escória	55
2.9.6. Falta de fusão	55
3 - Metodologia Experimental	56
3.1. Descrição do método experimental	56
3.2. Características das amostras empregadas na soldagem manual	56
3.3. Parâmetros experimentais	58
3.3.1. Execução das soldagens	60
3.3.1.1. Preparação e montagem das juntas	60
3.3.1.2. Soldagem do passe de raiz	61
3.3.1.3. Soldagem do passe quente	61
3.3.1.4. Soldagem de enchimento e acabamento	62
3.3.1.5. Ensaios radiográficos e mapeamento de defeitos	62
3.4. Amostragem	64
3.4.1. Ensaio de tração	65
3.4.2. Ensaio nick-break	65

3.4.3. Ensaio de dobramento lateral	67
3.4.4. Ensaio de dureza	67
3.4.5. Ensaio de impacto	68
3.4.6. Observação fratógrafa	70
3.4.7. Observação microestrutural	70
4 – Resultados	72
4.1. Perfil do cordão de solda	72
4.2. Efeito dos parâmetros empregados na soldagem	73
4.2.1. Relação entre a corrente e a posição de soldagem	73
4.2.2. Variação da corrente de soldagem empregada	74
4.2.3. Efeito do aporte de calor	75
4.3. Análise química da junta soldada	75
4.4. Ensaio de tração	76
4.5. Ensaio de dobramento	79
4.6. Ensaio nick-break	80
4.6.1. Análise fratógrafa	81
4.7. Ensaio de dureza	82
4.8. Ensaio de impacto	84
4.8.1. Análise fratógrafa do ensaio Charpy-V	85
4.8.2. Quantificação das regiões colunares e reaquecidas na propagação da fratura	89
4.9. Análise Microestrutural	90
4.9.1. Caracterização do microconstituente AM	90
4.9.2. Micrografias	92
5 – Discussão	97
5.1. Desempenho da soldagem	97
5.2. Efeito da posição de soldagem	97
5.3. Avaliação dos parâmetros de soldagem na ocorrência de defeitos	98
5.4. Composição Química	99
5.5. Resistência mecânica	99
5.6. Ensaio de dobramento	100
5.7. Ensaio nick-break	100

5.8. Análise do perfil de dureza	101
5.9. Tenacidade e caracterização microestrutural	101
6 - Considerações finais, conclusões e trabalhos futuros	104
6.1. Considerações finais	104
6.2. Conclusões	104
6.3. Trabalhos futuros	105
7 - Referências bibliográficas	106

## Lista de figuras

Figura 1 – Fatores que contribuem ao desenvolvimento dos aços microligados <sup>[1]</sup> .	20
Figura 2 – Desenvolvimento dos aços para tubos API <sup>[4]</sup> .	22
Figura 3 – Processo Termo Mecânico Controlado (TMCP) <sup>[7]</sup> .	24
Figura 4 – Processo de conformação dos tubos.	25
Figura 5 – Mapa de soldabilidade dos aços em função do CE e do conteúdo e C <sup>[16]</sup> .	30
Figura 6 – Diagrama esquemático de várias sub-zonas da ZTA de um aço com 0.15%C <sup>[19]</sup> .	31
Figura 7 – Regiões da ZTA em soldas multipasse <sup>[19]</sup> .	33
Figura 8 – Modos de transferência de acordo com a classificação do IIW <sup>[31]</sup> .	36
Figura 9 – Processo de fabricação dos arames tubulares (esquemático) <sup>[38]</sup> .	41
Figura 10 – Secções de arames tubulares <sup>[38]</sup> .	42
Figura 11 – Formas típicas de transferência na soldagem com arames tubulares. Arames: (a) metal cored (b) rutílico, (c) básico e (d) auto-protegido <sup>[31]</sup> .	44
Figura 12 – Efeito da Corrente de Soldagem na Velocidade de soldagem e na Taxa de Deposição empregando FCAW-G (100%CO <sub>2</sub> ) <sup>[43]</sup> .	47
Figura 13 – Soldagem com arame tubular autoprottegido <sup>[39]</sup> .	48
Figura 14 – Equipamento para a soldagem com arame tubular <sup>[39]</sup> .	50
Figura 15 – Detalhe de um bico utilizado na soldagem com arame tubular autoprottegido <sup>[41]</sup> .	51
Figura 16 – Geometria do chanfro de solda.	60
Figura 17 – Fixação do anel na posição horizontal fixa.	60
Figura 18 – Aspecto final e passes de Solda. Processos SMAW-	

FCAW.	62
Figura 19 – Posicionamento dos quadrantes ao longo do perímetro da junta.	63
Figura 20 – Mapeamento de defeitos: porosidade (○), inclusão de escória (-), e mordeduras (θ).	63
Figura 21 – Localização dos corpos de prova segundo a norma API 1104 <sup>[55]</sup> .	64
Figura 22 – Dimensão do corpo de prova para o ensaio de tração, norma API 1104 <sup>[55]</sup> .	65
Figura 23 – Dimensões do corpo-de-prova para o ensaio nick-break norma API 1104 <sup>[54]</sup> .	66
Figura 24 – Dimensões do corpo de prova para o ensaio de dobramento lateral, norma API 1104 <sup>[54]</sup> .	67
Figura 25 – Desenho esquemático dos pontos de medidas de dureza <sup>[55]</sup> .	68
Figura 26 – Posições para o ensaio de impacto em juntas tubulares <sup>[56]</sup> .	69
Figura 27 – Macrografia das juntas soldadas.	72
Figura 28 – Valores médios de corrente no perímetro da junta (passes de enchimento e acabamento).	74
Figura 29 – Médias da corrente empregada por quadrantes.	74
Figura 30 – Valores de Aporte de calor e $\Delta t_{8/5}$ empregados por quadrantes.	75
Figura 31 – Curvas Tensão – Deformação dos corpos-de-prova de tração.	77
Figura 32 – Fraturas dos corpos-de-prova submetidos aos ensaios de tração.	78
Figura 33 – Macrografias das superfícies dos cp's de dobramento.	80
Figura 34 – Seções das fraturas dos cp's Nick Break.	81
Figura 35 – Fractografias das superfícies de fratura do corpo de prova IE.	82
Figura 36 – Medição de dureza dos 2 eixos da junta.	83
Figura 37 – Comparação das médias dos perfies de dureza nos 2	

eixos.	84
Figura 38 – Resultado dos ensaios de Impacto Charpy.	84
Figura 39 – Fratografia dos cp's R02, T02, e Z02, ensaiados a 0 °C.	85
Figura 40 – Fratografia dos cp's R21, T21, e Z21 ensaiados a -20 °C.	86
Figura 41 – Fratografia dos cp's R41, T43, e Z43, ensaiados a -40 °C.	87
Figura 42 – Fratografia dos cp's B03 e X02 ensaiados a 0 °C.	88
Figura 43 – Comparativos de Charpy-V que apresentaram melhor tenacidade no metal de solda.	89
Figura 44 – Imagens do microconstituente AM no metal base e metal de solda.	90
Figura 45 – Imagens do microconstituente AM na linha de fusão e ZTA.	91
Figura 46 – Microestrutura do metal de base, passe de raiz e passe quente.	93
Figura 47 – Microestrutura dos passes de enchimento, acabamento e linha de fusão.	94
Figura 48 – Microestrutura da ZTA na região de grãos grosseiros, grãos finos e subcritica.	95
Figura 49 – Quantidade de defeitos na junta soldada.	98
Figura 50 – Valores de L.E. e L.R. da junta soldada.	99

## Lista de tabelas

Tabela 1 – Classificação dos tubos de acordo com as principais normas internacionais de fabricação <sup>[5]</sup> .	21
Tabela 2 – Comparação de 3 processos de soldagem empregados em tubulações <sup>[33]</sup> .	38
Tabela 3 – Composição química típica do metal de solda (all weld metal).	57
Tabela 4 – Propriedades mecânicas do metal de solda (all weld metal) fornecido pelo fabricante.	57
Tabela 5 – Propriedades mecânicas do tubo.	57
Tabela 6 – Composição química do aço API 5L X80 utilizado.	57
Tabela 7 – Especificação do Procedimento de Soldagem.	58
Tabela 8 – Quantidade de corpos-de-prova para testes.	64
Tabela 9 – Identificação dos corpos-de-prova Charpy-V.	70
Tabela 10 – Parâmetros empregados na soldagem.	73
Tabela 11 – Resultados da análise química do metal de base e metal de solda.	76
Tabela 12 – Resultados dos ensaios de tração.	76
Tabela 13 – Resultados do teste de dobramento.	79
Tabela 14 – Resultados do teste nick-break.	80
Tabela 15 – Resultados do ensaio de dureza.	83
Tabela 16 – Quantificação das zonas colunar e reaquecida na região do entalhe Charpy.	89
Tabela 17 – Quantificação do microconstituente Austenita-Martensita (AM).	92