

9º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



9º CONGRESSO
Brasileiro de **P&D** em
PETRÓLEO E GÁS

Maceió, AL
de 09 a 11 de novembro
2017

Realização:



ABPG
ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE P&D EM
PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

EVOLUÇÃO DA MICROESTRUTURA E COMPARAÇÃO COM A EVOLUÇÃO DO PERFIL DE TENSÕES RESIDUAIS DURANTE NA SOLDAGEM DO AÇO API 5L X65

AUTORES:

Íverson Caio Pontes Pacheco¹; Raimundo Quindere Cruz Neto²; Theophilo Moura Maciel³; José Hilton Ferreira da Silva⁴; Jaime Matias da Silva Neto⁵.

INSTITUIÇÃO:

^{1,3,5}Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

^{2,4}Universidade Federal da Paraíba – UFPB

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 8º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás - 9º PDPETRO, realizado pela Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás - ABPG, no período de 09 a 11 de novembro de 2017, em Maceió/AL. Esse Trabalho foi selecionado pelo Comitê Científico do evento para apresentação, seguindo as informações contidas no documento submetido pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pela ABPG. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões da Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás. O(s) autor(es) tem conhecimento e aprovação de que este Trabalho seja publicado nos Anais do 9º PDPETRO.

AVALIAÇÃO DA EVOLUÇÃO DO PERFIL DE TENSÕES RESIDUAIS DURANTE A SOLDAGEM DO AÇO API 5L X65

Abstract

The presente work aim to evaluate the Evolution of the residual stress profile in the welded joints of API 5L X65 steel, applied in the oil and gas industry. Two processes were used: Shield Metal Arc Weld – SMAW for the root pass and Gas Metal Arc Weld for the hot, filling and finishing pass. The residual stresses were evaluated by X-ray diffraction in the root face. In the analysis, a reversal of the residual stress profile was observed when the hot pass was performed. Trative residual stress up to 280 MPa were reversed to compressive residual stress up to 160 MPa when the hot pass was performed at a distance of 25 mm from the fusion line. Afterwards microhardness and metallographic analysis will be done to evaluate the influence of the microstructure on the residual stress values.

Keywords: Welding, API 5L X65 steel, Residual Voltages, X-ray diffraction.

Introdução

Atualmente, a demanda energética mundial vem crescendo a cada dia. Este fato vem incentivando a ampliação e construção de novos oleodutos e gasodutos. Junto com este crescimento a necessidade da redução de custo, nos novos investimentos, é um pouco crucial na análise de implementação, associado a segurança e confiabilidade operacional do sistema [1]. Além disso, a necessidade de canalizar insumos provenientes de locais de extração recém descobertos e de abastecer centros consumidores com demanda em ascensão, também tem contribuído para o crescimento da rede dutoviária [2,3].

A API (American Petroleum Institute) é a instituição que normatiza a fabricação de tubos para transporte no setor P&G (Petróleo e Gás), norma API 5L. Os aços presentes nesta norma têm especificações que aliam alta resistência mecânica e baixa porcentagem de elementos ligantes em sua composição (ARBL), sendo identificados pelo seu limite de escoamento, como no caso do aço API 5L X65, cujo valor é da ordem de 65 psi (448MPa). [4]

Os processos mais utilizados para união de dutos para condução de petróleo e gás são: ao Arco Elétrico com Eletrodo Revestido (*Shielded Metal Arc Welding* - SMAW), ao Arco Elétrico com Eletrodo de Tungstênio e Proteção Gasosa (*Gas Tungsten Arc Welding* - GTAW) e ao Arco Elétrico com Proteção Gasosa (*Gas Metal Arc Welding* - GMAW), sendo estes regidos pela norma API 1104. [5] O processo SMAW com a utilização de consumível celulósico assim como o processo GTAW, são os mais empregados na execução do passe de raiz, devido à boa penetração. Já o processo GMAW é bastante utilizado nos passes de enchimento, por ter uma alta taxa de deposição proporcionando uma boa produtividade na execução dos passes. [6]

Durante os processos de soldagem, muitas são as alterações metalúrgicas sofridas pelos materiais quando submetidos a um ciclo térmico de soldagem, destacando-se o surgimento de tensões residuais [7]. O surgimento de tensões residuais após o processo de soldagem exerce uma considerável influência sobre as propriedades mecânicas das juntas soldadas e seu controle permite evitar possíveis falhas da estrutura soldada [8].

Com o processo de união por solda surgem alguns problemas, como as tensões residuais. O nível destas tensões na junta soldada pode influenciar a vida em fadiga e a resistência à fratura do material, portanto, tendo que serem mitigadas. [9]

Muitos mecanismos relevantes de degradação podem ser acelerados pela presença de tensões residuais. Tensões residuais trativas, por exemplo, podem contribuir para o desenvolvimento de trincas de fadiga. Similarmente, a corrosão sob tensão pode ocorrer em soldas se a soma da tensão aplicada e a tensão residual excederem um valor limite [10]. Nesse sentido, o grande desafio é, portanto, manter a

alta resistência sem prejuízo da tenacidade devido a Zona Termicamente Afetada (ZTA), principalmente considerando-se o processo de corrosão e demais processos de fragilização que são dependentes, também, dos níveis de tensões residuais oriundas dos processos de soldagem [11].

Portanto, precisa-se conhecer e quantificar o nível de tensões residuais e desta forma implantar-se medidas mitigadoras. As técnicas de medição de tensão residuais são divididas em destrutivas e não destrutivas. [12]

Diante da problemática exposta, o objetivo desse trabalho é-foi avaliar a evolução do perfil de tensões residuais e relacionar estes dados com a microestrutura nos passes de juntas soldadas do aço API 5L X65, aplicado no setor de petróleo e gás. Para isso foram empregados processo de soldagem ao Arco Elétrico com Eletrodo Revestido – SMAW para execução dos passes de raiz e o processo ao arco elétrico com proteção gasosa - GMAW para os passes quente, de enchimento e acabamento. As tensões residuais foram avaliadas por difração de raios-X na face da raiz da junta.

Metodologia

A figura abaixo apresenta a metodologia utilizada para obtenção dos resultados.

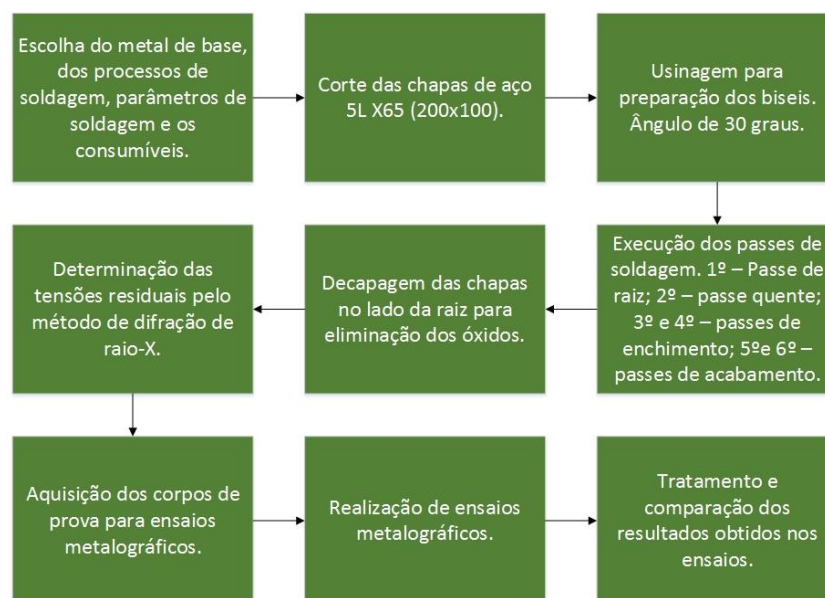


Figura 01: Fluxograma das atividades desenvolvidas. (Autoria própria, 2016).

Metal de Base

Na Tabela 01 são apresentadas algumas propriedades mecânicas do mesmo. A Tabela 02 Indica a composição química nominal do aço API 5L X65.

As chapas de aço a serem soldadas foram cortadas com as seguintes dimensões 200 mm por 100 mm e 18 mm de espessura. Como a norma API 1104 (2001) não especifica qual o tipo de chanfro a ser utilizado adotou-se um chanfro em V simples com ângulo 45°, conforme ilustrada na Figura 02. A escolha deste ângulo foi baseada na facilidade de usinagem do bisel e para facilitar a execução da soldagem pelo processo MIG.

Tabela 01: Propriedades Mecânicas do aço API 5L X65. (Usiminas, 2013).

Limite de escoamento (σ_{LE})	450 ~ 600 MPa
Limite de resistência à tração (σ_{RT})	535 ~ 760 MPa

Tabela 02: Composição Química nominal do aço API 5L X65. (Specification, 2004).

Porcentagem (%) em massa							
C	Mn	Si	P	S	Ni	Al	Ti + V + Nb
0,12	1,60	0,45	0,025	0,015	0,06	0,044	0,1 Max.

As chapas de aço a serem soldadas foram cortadas com as seguintes dimensões 200 mm x 100 mm e 18 mm de espessura. Como a norma API 1104 (2001) não especifica qual o tipo de chanfro a ser utilizado adotou-se um chanfro em V simples com ângulo 45°, conforme ilustrada na Fig. 02. A escolha deste ângulo foi baseada na facilidade de usinagem do bisel e para facilitar a execução da soldagem pelo processo MIG.

O espaçamento entre as chapas a serem soldadas correspondeu ao diâmetro 3,5 mm do consumível adotado na execução do passe de raiz. A altura do nariz foi de 2,0 mm, de modo a se ter uma boa homogeneidade do cordão e uma penetração total no passe.

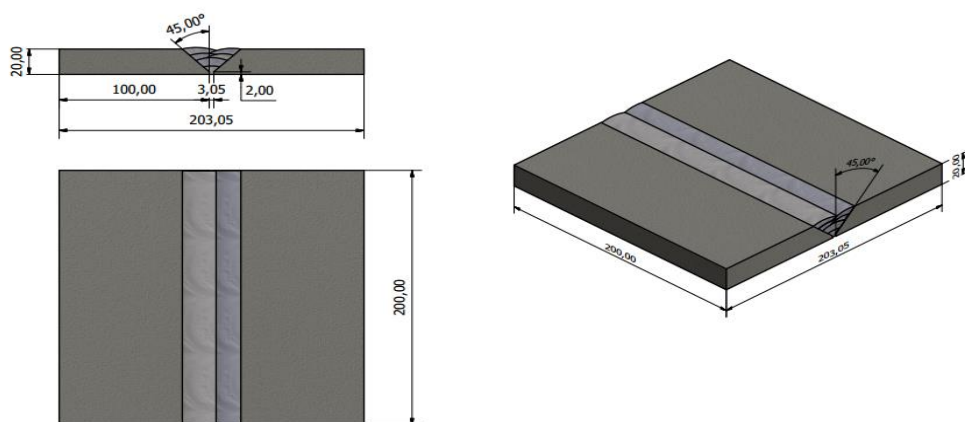


Figura 02: Esquema da junta e dimensões. (Giuliano Cavalcante, 2017).

As chapas a serem soldadas foram restringidas por apoio em parafusos, dispositivo fabricado (Figura 03), e por pontos de solda em suas extremidades. Este procedimento foi adotado visando a não ocorrência de deformações maiores nas chapas assim como, evitar que as tensões residuais provenientes do processo de soldagem fossem “aliviadas” pela deformação das mesmas. Nesta mesma figura apresenta-se a configuração das chapas para execução de soldagem e respectivo chanfro.



Figura 03: Configuração das Chapas e Chanfro. (Autoria Própria, 2017).

Processo de Soldagem

Na execução do processo de soldagem das chapas seguiram-se as recomendações da norma API 1104 (2001), onde esta estabelece que a soldagem de tubulações pode ser feita com um mesmo processo de soldagem ou combinação de processos.

Foram empregados processo de soldagem ao Arco Elétrico com Eletrodo Revestido – SMAW para execução dos passes de raiz e o processo ao arco elétrico com proteção gasosa - GMAW para os passes quente, de enchimento e acabamento.

Os consumíveis utilizados foram eletrodo AWS E 6010 de 3,25 mm de diâmetro, e o processo GTAW com arame AWS ER70S-3 de 2 mm de diâmetro, o gás de proteção utilizado no processo GTAW foi o Argônio. A tabela 3 indica a composição química dos consumíveis utilizados.

Tabela 03: Composição Química do eletrodo AWS E 6010 de 3,25 mm (ENERGYARC s.d.)

Composição Química Típica (%)				
C	Si	Mn	P	S
0,10	0,30	0,47	0,020	0,015

Tabela 04: Composição Química do arame AWS ER70S-3 de 2 mm de diâmetro (Belgo Bekaert s.d.)

Composição Química Típica Média (%)					
C	Si	Mn	P	S	Cu
0,10	0,60	1,2	0,025	0,035	0,5

A fonte de energia utilizada na soldagem, processos SMAW e GMAW, é designada comercialmente como Aristo Power 460 AC/DC, fabricada pela ESAB. É uma fonte de corrente constante (CC: 5 -320A) e tensão em vazio de 80V A/C e 72 V D/C, trifásica com potência aparente de 27 KVA.

Os parâmetros de soldagem empregados na execução dos 6 passes de união das juntas estão apresentados na Tabela 05. Os seis passes são: um passe de raiz (SMAW), um passe quente (GMAW), dois passes de enchimento (GMAW) e dois passes de acabamento (GMAW).

Foi utilizado corrente contínua (CC), tensão constante, o gás de proteção utilizado foi o CO₂, com vazão de 15 l/min.

Tabela 05: Parâmetros de Soldagem adotados

Passe	Tempo (s)	Corrente (A)	Tensão (V)	Velocidade (mm/s)	Rendimento	Energia (KJ/mm)
Raiz	175	55	27	1,14	85%	1,107
Q1	99	198	25	2,02	90%	2,205
E2	87	186	22	2,30	90%	1,601
E3	84	185	22	2,38	90%	1,540
A4	53	162	22	3,77	90%	0,850
A5	55	165	22	3,63	90%	0,900

Para avaliação micrográfica após soldagem, seção transversal das chapas de teste foram retiradas, gerando 4 corpos onde cada um representa um passe da soldagem.

Decapagem

Antes de ser realizada a análise de tensões residuais por difração de raios-X as peças foram submetidas a um processo de decapagem localizada para remoção das camadas de óxido nas regiões a serem analisadas, de modo a não interferir nas aferições posteriores.

A solução utilizada para realização do processo de decapagem foi o ácido clorídrico (HCl) a uma concentração de 10%. A solução era posta em tubos de PVC estanque por silicone e repousadas por 24h.

Medição de Tensões Residuais

Ao término dos processos de soldagem foram definidas as regiões da junta que seriam analisadas, conforme mostra a Figura 03.

Para Análise das tensões residuais foi utilizado um difratômetro portátil – *Portable stress analyser STRESSRAD (RADICON, 2009)*, Figura. 08.

Como o material utilizado possui uma estrutura principalmente ferrítica, empregou-se um comprimento de onda de $\lambda = 2,2911\text{\AA}$. Este comprimento de onda é produzido por um tubo anódico de Cromo (LU *et al.*, 1996). O método empregado foi o $\text{sen}^2\psi$, com medidas realizadas para $\psi = 45^\circ$.

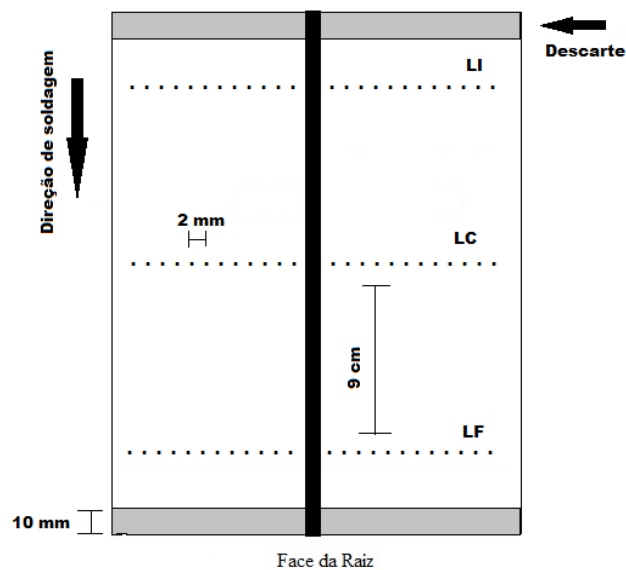


Figura 03: Regiões Analisadas. (Autoria Própria, 2017).

Aquisição de Imagens

As seções transversais foram embutidas a frio com resina epóxi. Em seguida, as suas superfícies foram submetidas ao processo de lixamento com lixas de granulometria 80, 120, 240, 360, 400, 600 e 1200; e polimento com alumina de granulometria 1 micron, 0,3 micron e 0,05 micron. Finalmente elas foram submetidas ao ataque químico, com Nital 2% com tempo de ataque de 20 segundos. As imagens foram analisadas no microscópio Olympus SC-30.

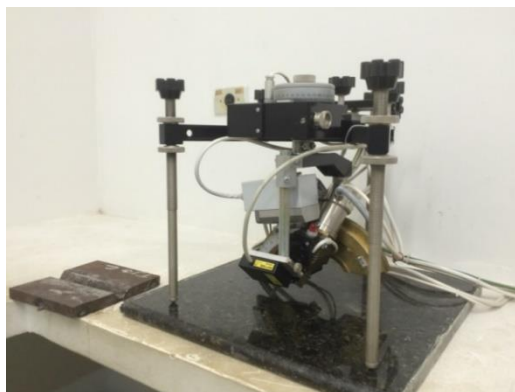


Figura 08: Difratômetro Portátil Utilizado na Análise. (Autoria Própria, 2017)

Resultados e Discussão

Perfil de Tensão Residual

Com a metodologia utilizada, foi possível traçar o perfil de tensão residual na face da raiz e observar o comportamento deste perfil quando foi aplicado o passe de acabamento. A Figura 09 mostra o perfil de tensão residual para o passe de raiz.

A curva, mostrada na Figura 09, é bastante similar a curva encontrada na literatura para uma soldagem de topo, perfil predominantemente trativo. A figura 10, mostrada abaixo, apresenta o perfil de tensão residual quando foi aplicado o passe de acabamento, ou seja, o último passe para os corpos de prova.

A Figura 10 mostra que devido a aplicação dos diversos passes de soldagem, houve uma inversão do perfil de tensão residual. Enquanto no passe de raiz, tínhamos um perfil trativo, com valores de até 280 MPa, temos agora um perfil compressivo, com tensões de até 160 MPa. A inversão do perfil se deve a dois fatores que ocorrem após a soldagem: o gradiente de temperatura da superfície para o final do cordão depositado. Neste caso o metal em fusão e em aquecimento na parte mais interna do cordão, tende a dilatar e é comprimido pela massa mais fria em contato com o ar. Quanto mais volume contiver os passes subsequentes maior a tensão de compressão impedindo a dilatação. O outro fator são as subsequentes restrições às dilatações proporcionadas pelas expansões de volume causadas pelas transformações de fase da austenita para os produtos de transformação (ferrita, perlita, bainita ou martensita). Quanto mais baixa a temperatura de transformação (perlita fina ou bainita) maior a tensão de compressão pois maior volume de metal frio estará comprimindo a dilatação da transformação. A transformação da austenita em martensita é a que proporciona maior mudança de volume. Portanto, aços com maior teor de C e/ou com maior espessura devem proporcionar maiores valores de tensões residuais.

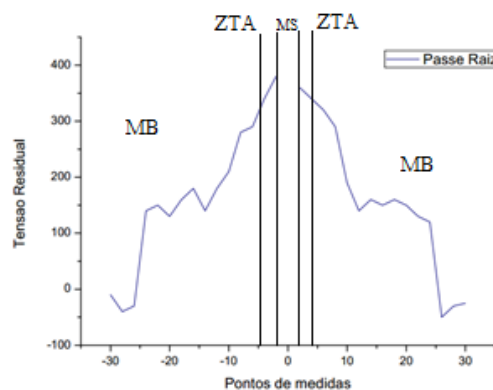


Figura 09: Perfil de Tensão Residual no passe de raiz (Autoria Própria, 2017)

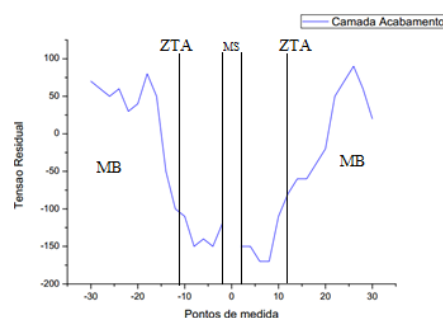


Figura 10: Perfil de Tensão Residual no passe de acabamento (Autoria Própria, 2017)

Micrografia e Macrografia

Após a execução do passe de raiz a ZTA apresentou uma micro estrutura croceira, devido a passe termico do proceso de soldagem como ta evidenciado na Figura 11 da microestrutura, observando a macrografia verifica que a ZTA apresentou uma extens~so de 4,2 para esquerda e de 3,9 para direita, região esta que apresentam os maiores picos d tensão residual, por dois motivos pela quantidade de material depositado (metalde solda) e o tipo de microestrutura.

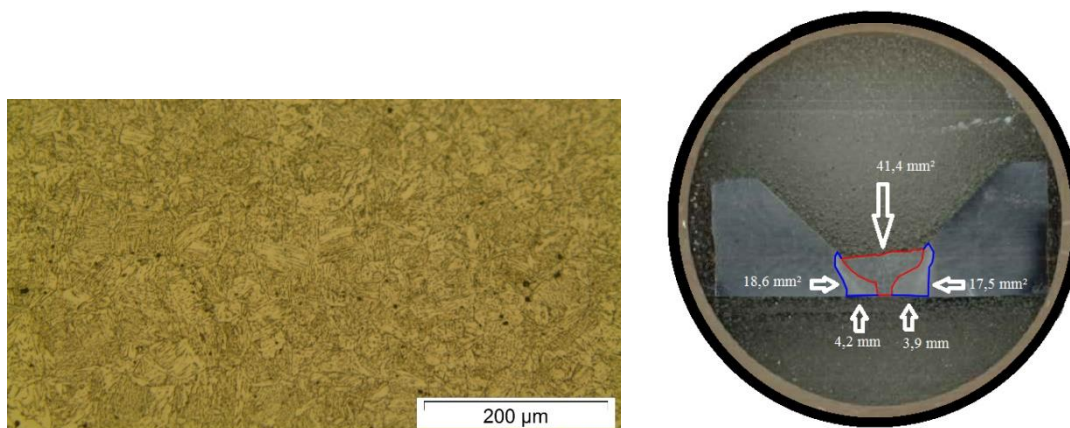


Figura 11: Microestrutura da ZTA no passe de raiz e Macrografia do passe de Raiz. Aumento 200x (Autoria própria, 2017)

Ao executar todo o preenchimento da junta (passe de acabamento), verifica que ouve o refino da microestrutura da ZTA devido ao passe quente (passe de soldagem executado após o passe de Raiz) assim como ouve o aumento de extensão da ZTA. Na macrografia é possível observa o grande volume de metal de solda que foi depositado após o ultimo passe como pode ser observado na figura 12, ambas as combinações de quantidade de material depositado e refino microestrutural foram preponderante para a inversão do perfil de tensão residual medido a uma mesma profundidade (2 mm na fase da raiz).

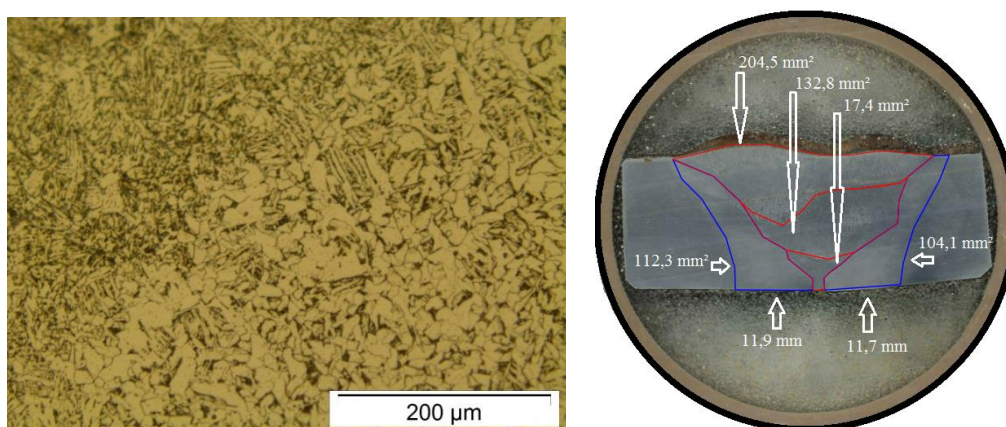


Figura 11: Microestrutura Aumento 200x da ZTA no passe de raiz e Macrografia após o passe de acabamento. (Autoria própria, 2017)

Conclusões

O refino do grão assim como a quantidade de material depositada durante o processo de soldagem são fatores preponderantes para inversão do perfil de tensão residual.

Assim como o volume de material depositado, a extensão da ZTA, a mudança microestrutural todas essas variáveis são regida pela energia de soldagem, sendo assim de maneira indireta podemos afirma que a energia de soldagem vai influencia o comportamento dos perfis de tensão ao logo da junta.

Referências Bibliográficas

- [1] SANTOS NETO, N. F. Caracterização de Soldas em Aços API 5L Com Diferentes Arames Tubulares e Temperaturas de Pré-Aquecimento, 2003. 110 p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2003.
- [2] FEDELE, R. Soldagem de tubulações: metalurgia, procedimentos e desafios, Metalurgia & Materiais, v.58, n.521, 2002.
- [3] GORNI, A.A., SILVEIRA, J.H.D., REIS, J.S. Metalurgia dos aços microligados usados na fabricação de tubos soldados com grande diâmetro. Tubo & Companhia, v.5:26, p.52-63, 2009.
- [4] SPECIFICATION for Line Pipe: API 5L. American Petroleum Institute. 43º Ed. Washington. 166p. 2004.
- [5] WELDING of Pipelines and Related Facilities: API Standard 1104. American Petroleum Institute. 19º ed. Washington. 79p. 2001.
- [6] AMERICAN WELDING SOCIETY (AWS). Welding Handbook, vol.4, 7 ed., AWS, Miami, 1982.
- [7] KOU, S, Welding Metallurgy, 2nd. John Wiley & Sons, 2002.
- [8] ASSIS, J. T., et al. X-ray analysis of residual stress distribution in weld region, International Centre for Diffraction Data, Advances in X-ray Analysis, Volume 45, 2002.
- [9] KOU, S. Welding metallurgy, 2nd Ed., John Wiley & Sons, 2003.
- [10] FRANCIS, J.A, et al. Transformation Temperatures and Welding Residual Stresses in Ferritic Steels. In: Proceedings of PVP2007 2007 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference July 22-26, 2007, San Antonio, Texas.
- [11] BALLESTEROS, A.F., PONCIANO, J.A.C., BOTT, I.S. Susceptibilidade de juntas soldadas circunferenciais de aço API 5L X80 à corrosão sob tensão e à fragilização por hidrogênio, Tecnol. Metal. Mater. Miner., v.6, n.3, p.147-152, Jan.-Mar. 2010.
- [12] RODRIGUES, L.D. Medição de tensões residuais em tubos visando à determinação de esforços em dutos enterrados. 2007. 155p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Pontifica Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.