

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

BRUNA BERBEL SELOTO

**ANÁLISE COMPARATIVA DAS REGIÕES DE SOLDA NOS
PROCESSOS GW E SAWH EM DUTOS DE AÇOS API 5L X70**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO
2016

BRUNA BERBEL SELOTO

**ANÁLISE COMPARATIVA DAS REGIÕES DE SOLDA NOS
PROCESSOS GW E SAWH EM DUTOS DE AÇOS API 5L X70**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof. Dr. João Roberto Sartori
Moreno

Coorientador: Prof. Dr. Julio Cesar de Souza
Francisco

CORNÉLIO PROCÓPIO
2016

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus orientadores Prof. Dr. João Roberto Sartori Moreno e Prof. Dr. Júlio César de Souza Francisco por me transmitirem conhecimento do meio acadêmico e científico desde o começo do meu curso.

Aos meus pais que me concederam a oportunidade de cursar engenharia mecânica, à minha irmã por me orientar sobre os percursos da universidade. Aos meus amigos do “apartamento 104” e minhas amigas de muitos anos: Mariely, Rafaely e Marjory.

Agradeço à CAPES por me fornecer uma bolsa a qual me fez buscar uma iniciação científica no começo do curso.

“Não há barreira, fechadura ou ferrolho que possas impor à liberdade da minha mente.”
Virginia Woolf

RESUMO

SELOTO, Bruna Berbel. **Análise Comparativa das Regiões de Solda nos Processos GW E SAWH em Dutos de Aços API5L X70.** 2016. 65 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) –Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procopio, 2016.

Os aços API 5L X70 são aços de alta resistência e baixa liga (ARBL) os quais apresentam boas propriedades mecânicas como elevada resistência, boa tenacidade e soldabilidade. Por essas razões, os aços API são indicados para a produção de dutos. O objetivo deste trabalho foi investigar a Zona Fundida, Metal de Base e a Zona Afetada pelo Calor nos processos de soldagem SAWH- Solda Helicoidal Arco Submerso e CW – Solda Circunferencial com eletrodo revestido realizados em dutos aço API 5L X70. As informações foram obtidas pela análise macroscópica, microscópica e microdureza Vickers. Os resultados mostraram que a Solda Circunferencial, por apresentar multipasses, fornece energia para os passes subsequentes causando alterações semelhantes ao revenimento, assim tanto a ZAC da região inferior quanto a raiz de solda obtiveram menores durezas e mudanças nos grãos constituídos majoritariamente por Ferrita Primária de Contorno de Grão grosseiros.

Palavras-chave: Aço API 5L X70, Zona afetada pelo calor, propriedades mecânicas.

ABSTRACT

SELOTO, BrunaBerbel; **Comparative Analysis of the Welding Regions in the GW and SAWH Processes in Steel Pipes API5L X70.**;2016. 65 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) –Engenharia Mecânica. UniversidadeTecnológica Federal do Paraná -CornélioProcópio, 2016.

The API 5L X70 steels are high strength low alloy steel (HSLA) which have good mechanical properties as high strength, good toughness and weldability. For these reasons, the API steels are suitable for production pipelines. The objective of this study was to investigate the the heat affected zone (HAZ), fusion metal (FM) and the base metal (BM) in the welding cord for the processes SAWH- Helical Submerged Arc Welding and CW - Welding circumferentially with coated electrode in the steel pipes API 5L X70. The information was obtained with analysis macro and microscopically, and microhardness. The results showed that Weld Circumferential for presenting multipass, provides energy for subsequent passes causing changes similar to annealing, so as the HAZ as the weld root had lower hardness and modification of grains consisting mainly of ferrite Primary coarse grain boundary.

Keywords: Steel API 5L X70, Heat-Affected Zone, mechanical properties.

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AÇO API 5L NÍVEL DE ESPECIFICAÇÃO PSL 1	23
TABELA 2 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AÇO API 5L NÍVEL DE ESPECIFICAÇÃO PSL 2	23
TABELA 3 - TABELA 3: COMPOSIÇÃO QUÍMICA EM % MASSA DO AÇO API 5L X70 NACIONAL	23
TABELA 4 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO ELETRODO UTILIZADO	24

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 OBJETIVOS GERAIS	11
1.1.1 Objetivos Específicos	12
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
2.1 SOLDAGEM.....	13
2.1.1 Soldagem com eletrodo revestido.....	14
2.1.2 Soldagem com Arco Submerso.....	15
2.2 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE DUTOS	16
2.3 AÇOS API 5L.....	18
2.3.1 Aços de alta resistência e baixa liga (ARBL)	20
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	23
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
4.1 MACROGRAFIA.....	27
4.2 MICROGRAFIA	28
4.3 MICRODUREZA.....	31
4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	33
5 CONCLUSÃO.....	36
REFERÊNCIAS.....	33

1 INTRODUÇÃO

O aumento da produção mundial de petróleo e seus derivados gera uma maior necessidade de escoamento da produção e de distribuição de combustíveis. O gás natural é uma das principais fontes de energia do país. Por motivos logísticos, a melhor forma de transportá-lo é através de dutos. No Brasil há 22mil km de malha dutoviária, é a 16ª maior do mundo (Figura 1). Elas são desenvolvidas de acordo com as normas internacionais com padrões máximos de segurança, pois qualquer vazamento - devido à alta pressão e os possíveis produtos transportados - pode acarretar danos ambientais e socioeconômicos (CETESB, 2014).

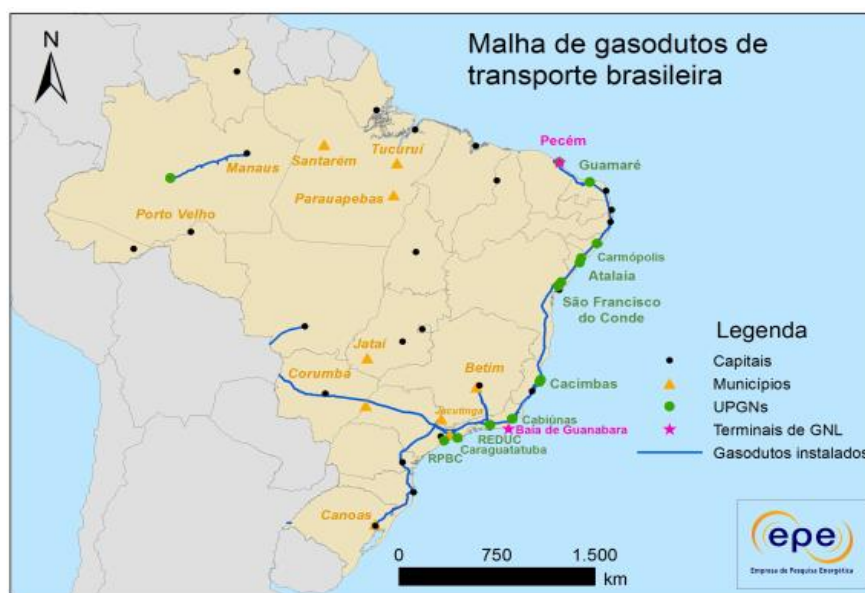


Figura 1 - Mapa da malha de gasodutos no Brasil
Fonte: PEMET (2013-2022).

Em 2013 o consumo de gás natural foi de 40.648 mil m³/dia e é previsto que haja um aumento contínuo para 2022 com um consumo de 89.705 mil m³ /dia (PEMET,2013-2022). A crescente necessidade dessa fonte de energia ao longo dos anos culmina em uma maior demanda por tubos para construção de dutos. Em 2010, a Petrobras inaugurou o

Gasoduto que integra o Sudeste e o Nordeste (GANESE), maior gasoduto em extensão construído na década de 2000 no Brasil (FERNANDES,2011).

Por tais razões, torna-se necessária segurança e confiabilidade elevada dos sistemas dutoviários. Além disso, um duto deve ter baixo custo de produção, eficiência operacional e ser constituído por um material adequado que ofereça menores riscos de acidentes. Por causa dessas exigências do mercado, os aços devem ser projetados para altas resistências, com boa tenacidade e melhor soldabilidade.

Vêm se tornando uma opção favorável em operações de dutos os aços de alta resistência e baixa liga (ARBL) de classificação API. Esses aços microligados, além de atenderem os requisitos citados, apresentam peso e custos baixos em comparação aos materiais tratados termicamente uma vez que suas características foram obtidas pela laminação, um tratamento termomecânico (SILVIA,2009).

Para união desses metais nos dutos é feito, principalmente, o uso da costura (com solda), porque com ela é possível fazer alguns reparos no material sem impedir o fluxo de fluido. Uma das definições de solda pela literatura é “uma operação que visa obter a união de duas ou mais, assegurando na junta a continuidade das propriedades físicas e químicas” (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE 2011). Apesar de tentativa de obter as mesmas características dos materiais de base, a zona fundida (ZF) e zona afetada pelo calor (ZAC)¹ apresentam mudanças na microestrutura do material devido às altas temperaturas e a velocidade de resfriamento no processo de soldagem por fusão como mostra a Figura 2.

¹ Algumas literaturas denominam Zona Afetada pelo Calor (ZAC) de Zona Termicamente Afetada (ZTA).

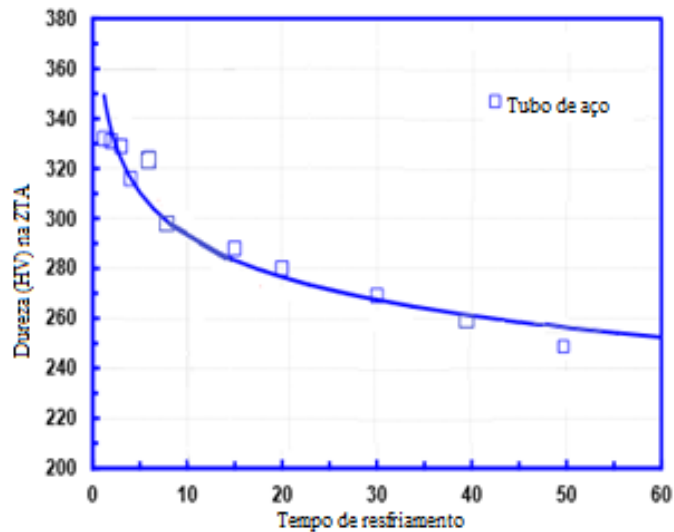


Figura 2 - Microdureza na ZAC x tempo de resfriamento na solda em aço ARBL
Fonte: Rosado et al. (2013).

As soldas são regiões críticas com relação ao resto do material, por isso é importante sua qualidade para segurança dos dutos. A necessidade de estudo minuciosa de cada elemento da solda foi o motivo gerador deste trabalho.

Para este trabalho as soldas foram divididas em dois tipos: Solda Helicoidal de Arco Submerso (chanfro duplo V) e Solda Circunferencial de topo (chanfro meio V). A primeira é produzida por máquinas próprias automatizadas, em condições ideais controladas; a segunda é feita por um soldador no local e momento da instalação dos dutos com uso do eletrodo revestido.

Para estudar aço API 5L X70 e as consequências dos processos de soldagem foram utilizadas a macrografia, micrografia e a microdureza.

1.1 OBJETIVOS GERAIS

O objetivo principal deste trabalho é analisar dois corpos de prova obtidos dos dutos, um com solda utilizando chanfro meio V e outro com solda dupla V, com o uso da macrografia, micrografia e microdureza.

1.1.1 Objetivos Específicos

- Levantamento de informações de livros, sites e artigos a respeito do assunto tratado.
- Fazer macrografia para observar as nuances das zona fundida, zona afetada pelo calor e metal de base, ou ainda possíveis defeitos como trincas;
- Realizar o ensaio de microdureza Vickers na superfície do material, a fim de analisar as variações de dureza ao longo dos elementos de solda, principalmente a zona termicamente afetada.
- Analisar pela microscopia ótica as amostra e observar a microestrutura formada nas respectivas regiões.
- Análise conjunta dos resultados dos experimentos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SOLDAGEM

Na literatura é possível encontrar alguns tipos de definição de soldagem, para Marques, Modenesi e Bracarense (2011) é a “união de metais por fusão”. A Associação Americana de Soldagem (AWS) conceitua por “processo de união de materiais usado para obter coalescência localizada de metais e não-metais, produzida por aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem adição de pressão e material de adição”.

Ao se soldar, há criação de uma poça de fusão, durante esse momento, os elementos hidrogênio, nitrogênio e oxigênio podem se dissolver no metal de solda e causar trincas, redução da ductilidade e inclusões. (MARQUES; MODENESI ;BRACARENSE, 2011) .O tamanho e a forma da poça de fusão tem forte influência sobre a microestrutura, solidificação, integridade e propriedades mecânicas da junta soldada (BUENO, 2007).

A Zona Fundida possui três regiões diferentes de grãos: zona coquilhada, zona colunar e zona central. A primeira, por ter grande diferença de temperatura entre a o metal de base e o metal líquido, causa um resfriamento mais rápido, ocorrendo nucleação dos grãos. Na segunda área os números de grãos nucleados são menores, assim os grãos já existentes apenas crescem em direção a região central. A região fundida pode conferir uma menor tenacidade ao material devido a essas estruturas de grãos colunares e grosseiros (MARQUES; MODENESI ;BRACARENSE, 2011).

A Zona Afetada pelo Calor é uma região não fundida, adjacente à poça de fusão, ocasionada pelos ciclos térmicos do próprio processo de soldagem, onde os grãos são modificados. Segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2011) em aços baixo carbono e aços baixa liga, pode-se dividir a Zona Termicamente Afetada em três partes: região de

crescimento de grão (1200°C) região do metal de base mais próxima a solda, os grãos são austeníticos, esse local diminui a tenacidade do aço, é a região mais problemática da ZAC; região de refino de grão (aproximadamente 900°C) e região intercrítica (aproximadamente 727°C) onde o aço é rapidamente levado à fase austenítica. A ZAC é o local onde deve haver maior cuidado na junta, mais precisamente a região de grãos grosseiros, considerada uma região crítica e favorável ao surgimento de trincas. O aumento dos tamanhos de grãos está entre os principais fatores metalúrgicos para baixa tenacidade nessa local (ALBUQUERQUE et al, 2012).

A obtenção de boa resistência em juntas soldadas se torna difícil quando a tenacidade precisa ser elevada. Basicamente dois mecanismos são utilizados para obter tenacidade na Zona Termicamente Afetada pelo Calor: o controle do crescimento de grão austenítico e nucleação de ferrita no interior dos grãos austenítico (ferrita intragranular) (COLPAERT, 2008, p. 474.).

2.1.1 Soldagem com eletrodo revestido

No processo de Eletrodo Revestido, também conhecido como SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*), o cordão de solda é produzido pelo calor do arco criado entre o eletrodo revestido e a peça a ser soldada. A Figura 3 esquematiza esse fenômeno. Esse processo permite soldar diversos tipos de materiais (várias composições químicas dos eletrodos); atingir várias posições de difícil acesso. O SMAW possui baixo custo nos equipamentos e nos consumíveis. O revestimento do eletrodo protege o arco de contaminação da atmosfera (ALBUQUERQUE, 2010).

Na solda manual, os parâmetros de soldagem são feitos pelo soldador, ou seja, depende da experiência do operário. Além disso, esse processo apresenta como desvantagens cuidados no armazenamento de seus consumíveis e baixa produtividade (BELTRÃO, 2005).

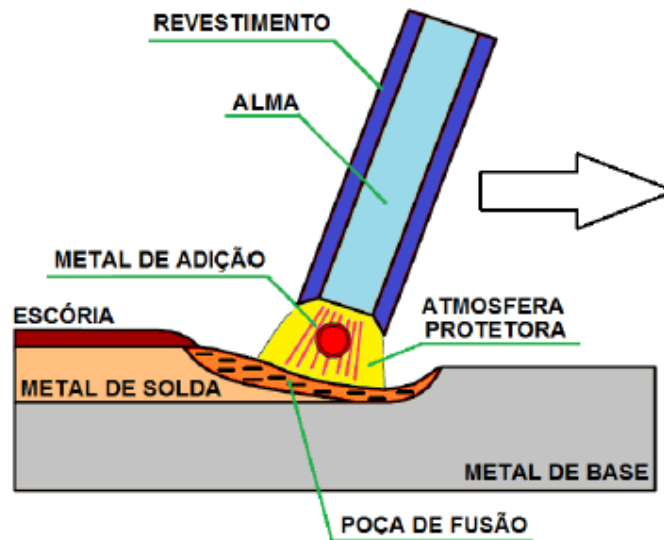


Figura 3 - Processo de soldagem manual com eletrodo revestido.
Fonte: Albuquerque (2010).

2.1.2 Soldagem com Arco Submerso

O processo de soldagem por Arco Submerso ou *Submerged Arc Welding (SAW)* conta com um arco elétrico entre o eletrodo e o metal de base para fornecer calor e fundi-los em conjunto com uma camada de fluxo granulado. O eletrodo é armazenado em uma bobina e é continuamente alimentado até a poça de fusão. (ROCHA, 2010). A Figura 4 representa esse processo.

O fluxo granulado fornece proteção contra os efeitos da atmosfera, ele funde-se parcialmente, formando uma camada de escoria líquida que posteriormente solidifica. Uma característica importante do processo de arco submerso é a eficiência de deposição, próxima dos 100%, porque não há perdas do metal por projeção e, além disso, o fluxo granulado funciona como isolante térmico permitindo uma excelente concentração de calor que resulta uma alta penetração no processo. A elevada taxa de deposição e de intensidade de corrente

oferecem ao Arco Submerso maior economia e rapidez. Em média despende-se 1 /3 do tempo de soldagem requerido para o mesmo trabalho com eletrodo revestido (ARAÚJO, 2006).

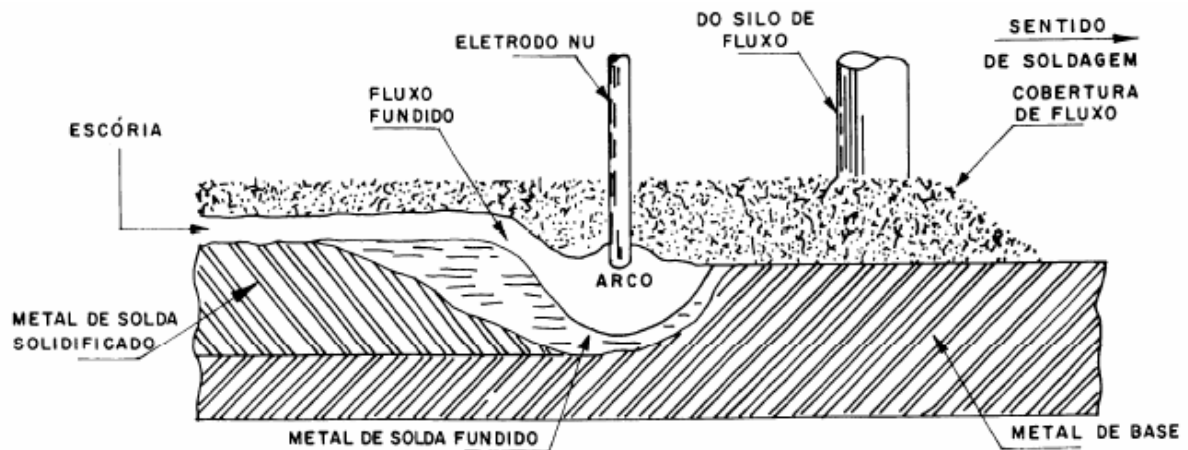


Figura 4 - Representação da poça de fusão no processo Arco Submerso
Fonte: Rocha (2010).

O processo *Submerged Arc Welding* não possui arco visível, nem respingos e nem fumos (YSHII;CHIODO, 2007). As soldas por esse processo apresentam boa ductilidade, boa uniformidade e uma excelente aparência do cordão de solda. Obtêm-se propriedades mecânicas compatíveis com às do metal de base (ARAÚJO, 2006).

2.2 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE DUTOS

Os dutos podem ser com costura (com solda) ou sem costura (sem solda). Normalmente os tubos são de aço ARBL conformados pelo processo UOE. U significa a conformação da chapa em forma de “U”, depois em formato de “O” assim ocorre a soldagem longitudinal interna e externa para o fechamento. A letra E vem de expansão interna por

pressão hidráulica que corrige a geometria como determina as normas API (BALLESTEROS,2009).

Na soldagem circinferencial de dutos, o uso do processo manual de soldagem por eletrodo revestido SMAW é amplamente utilizado na montagem de linhas dutoviárias, pois é relativamente simples e versátil. O fator limitante desse processo é sua taxa de deposição que diminui sua produção comparada com processo semi-automático. No local da instalação dos dutos são necessárias grandes equipes de trabalho para realização dos passes e, sendo o passe de raiz a etapa mais critica, requer profissionais bem treinados (ALBUQUERQUE; et al., 2012).

A soldagem de tubulações de aços API 5L ainda é objeto de estudo no Brasil no que se diz respeito aos melhores processos e melhores parâmetros. A utilização de processos automatizados vem crescendo, pois há maior controle da soldagem (ALBURQUERQUE et al, 2012).

Dutos produzidos em linha contínua a partir de bobinas laminadas costumam apresentar dois processos de soldagem possíveis: SAW espiral-helicoidal contínuo, ou ainda chamado de SAWH (*Helical Submerged Arc Welding*), mostrado na Figura 5, e o processo ERW Longitudinal contínuo. O primeiro consiste em dobrar continuamente a bobina laminada na forma de um tubo e concomitantemente ocorrerá soldagem interna e externa por arco submerso, posteriormente, o duto é passado por processo de inspeção. Para o segundo processo há formação de tubos por meio de rolos. (YSHII;CHIODO, 2007).

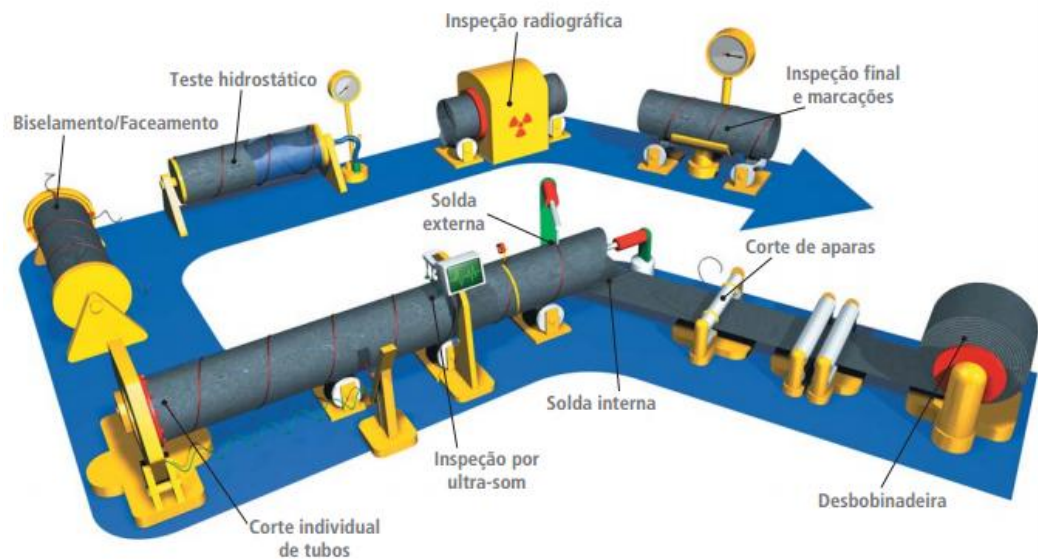


Figura 5 - Processo de fabricação automatizada da solda de topo em dutos
Fonte: Tenaris(2016)

Na manufatura dos aços para dutos, a composição química e o controle termomecânico programado são duas importantes áreas de decisões a serem feitas que influenciam na microestrutura e propriedades mecânicas finais (STEVEYSON; et al. ,2002 e NAFISI et al, 2012).

2.3 AÇOS API 5L

A API – *American Petroleum Institute* – classifica os aços empregados na fabricação de dutos em função de sua composição química e resistência mecânica, a chamada normal API 5L. A Figura 6 apresenta essa classificação de acordo com o limite de escoamento mínimo aceito. Portanto, se os aços API 5L é de classificação X70 significa que 70000psi é o mínimo para Limite de Escoamento e 82000psi mínimo de Resistência à tração (SOHN et al. 2013).

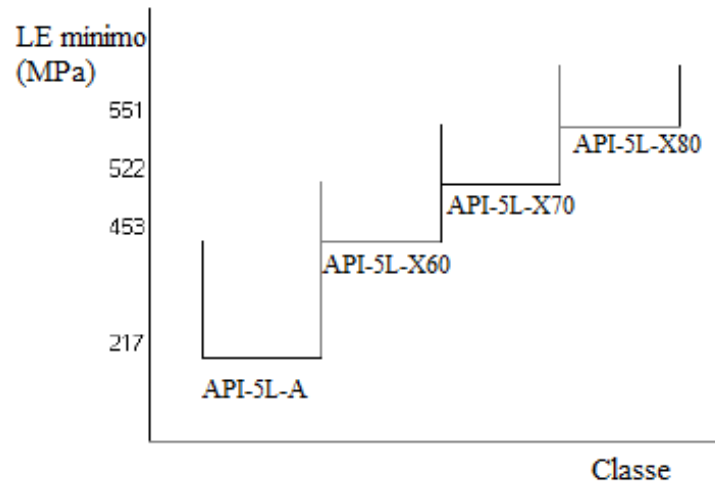


Figura 6 - Classificação aços API
Fonte: Beltrão(2005).

A norma API 5L é bastante flexível no que diz respeito à composição química, tendo critérios mais restritos quanto o carbono equivalente (cálculo utilizado para avaliar a soldabilidade) alguns elementos químicos e propriedades mecânicas. (COLPAERT, 2008, p.459).

Aços de alta resistência, tais como (API) 5L X70 possuem grãos altamente refinados. Eles são caracterizados pelo baixo teor de enxofre e uma quantidade reduzida de segundas fases prejudiciais tais como óxidos, inclusões e perlita. A Figura 6 mostra a evolução contínua do aço ARBL e descrição dos elementos e processos (ROSADO et al, 2013).

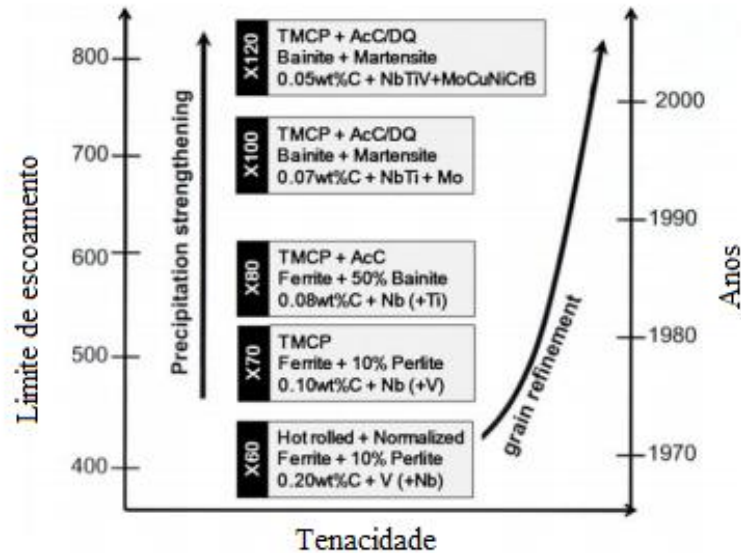


Figura 7 - Evolução aços de tubos API como, por exemplo, aço ARBL
Fonte: Rosado (2013).

Para aços de média e alta resistência, a produção é feita por meio de laminação convencional, laminação controlada ou laminação controlada com resfriamento acelerado (*Thermo Mechanical Control Process* - TMCP) (ROSADO, 2013 & USIMINAS, 2014).

2.3.1 Aços de alta resistência e baixa liga (ARBL)

Os aços carbono de alta resistência e baixa liga ou aços microligados (ARBL ou HSLA) apresentam elementos de liga como nióbio (Nb), titânio (Ti) e vanádio (V) que aumentam os limites de escoamento acima de 276MPa, entre suas características está uma boa relação de resistência mecânica/tenacidade (ASM, 1993). Por o aço ARBL apresentar boa resistência mecânica, a espessura da parede do duto pode ser menor, portanto a massa é reduzida. As vantagens de se usar aço-liga em comparação com aço carbono são: 1) maior temperabilidade; 2) menor distorção e trincas após tratamento térmico; 3) menor crescimento de grãos; 4) maior elasticidade; 5) maior resistência mecânica em alta temperatura. Como

desvantagem pode destacar: 1) maior custo; 2) fragilidade ao revenimento (SOUZA, 1989, p. 19).

A norma API foi uma das primeiras a aceitar o tratamento termomecânico ao invés do tratamento térmico em aplicações sujeitas às altas pressões em que a segurança é importante, por isso há grande variedade de estruturas e espessuras em dutos criadas pelas usinas (COLPAERT, 2008, p.459).

2.3.1.1 Processo de laminação controlada

A laminação controlada seguido do resfriamento controlado é uma das formas mais utilizadas da produção dos aços ARBL (BELTRÃO, 2005). Esse processo de fabricação juntamente com os elementos de ligas têm como principal objetivo diminuir o tamanho de grão da austenita, dando origem, após sua transformação, à microestrutura ferrítica refinada, aumentando a tenacidade do produto. Entretanto a estrutura é parcialmente modificada durante o processo de soldagem (YSHII et al, 2007 e GORNI et al 2009).

Os aços ARBL fabricados pelo processo laminado controlado (TMCP) produzem estruturas refinadas conferindo alta resistência, entretanto, a Zona Térmicamente Afetada, em soldas convencionais, é suscetível à trinca por hidrogênio (WEI; NELSON, 2011).

O processo de laminação controlada para chapas dos aços API 5L de fabricação brasileira segue as três etapas (BALLESTEROS, 2009 & USIMINAS, 2014):

- 1) Temperatura 1250°C diminui a espessura do material, os grãos austeníticos são deformados para espessuras alongadas. Devido à alta temperatura, nucleiam-se novos grãos de austenita poligonal que crescem nos contornos da austenita deformada. Os passes são realizados até ocorrer a recristalização estática, ou seja, os novos grãos de austenita possuem mesmo tamanho dos antigos grãos. Nessa etapa do processo de laminação promove a dissolução de impurezas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

No estudo, foi utilizado o aço API 5L X70, contendo Nióbio (Nb) e sua composição química está representada nas Tabelas 1, 2 e 3. As amostras foram obtidas por partes dos dutos, esquematizado na Figura 9, uma contendo solda de topo e outra a helicoidal.

Tabela 1 - Composição química do aço API 5L nível de especificação PSL 1

	C máx	Mn máx	P máx	S máx	Nb+V+Ti
Sem costura					
Grau					
X70	0,28	1,4	0,03	0,03	<0,15
Com costura					
X70	0,26	1,65	0,03	0,03	<0,15

Fonte API, 2004.

Tabela 2 - Composição química do aço API 5L nível de especificação PSL 2

	C máx	Mn máx	P máx	S máx	Nb+V+Ti
Sem costura					
Grau					
X70	0,24	1,4	0,025	0,015	<0,15
Com costura					
X70	0,22	1,85	0,025	0,015	<0,15

Fonte API, 2004.

Os níveis PSL1 e PSL2 pertencem a recente especificação API 5L. A diferença é quanto ao rigor de cada uma, a PSL2 deve apresentar maior controle da composição química. A composição química de aço para tubos de grande diâmetro da USIMINAS API 5L X70 está na tabela 3.

Tabela 3 - Composição química em % massa do aço API 5L X70 nacional

Grau	Espessura(mm)	C máx	Mn	Si	P	S	Nb
X70	6≤E≤38,10	0,12	1,70	0,45	0,025	0,015	0,075

Fonte: USIMINAS, 2014.

Os processos de soldagem utilizados foram: GW- *GirthWelds* - Solda Circunferencial para a solda de topo de chanfro meio V com eletrodo revestido E9010-G (parâmetros de soldagem ANEXO A) e o processo SAWH- *SubmergedArcWeldingHelical* - Solda Helicoidal Arco Submerso para a solda helicoidal de chanfro duplo V com eletrodos ER80S-G e ER90-S.

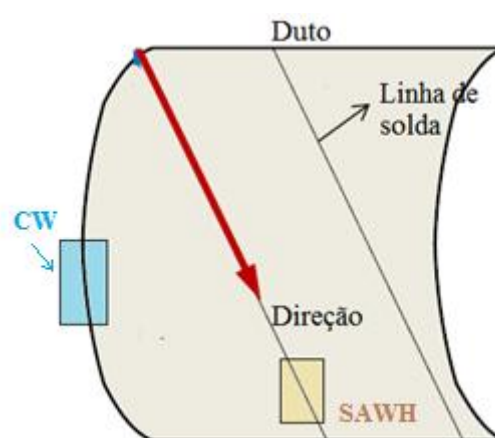


Figura 9 - Locais onde foram retiradas as duas amostras das soldas GW e SAWH
 Fonte: SOHN et al. modificado (2013).

Tabela 4 – Composição química do eletrodo E9010-G

%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Ni	%Mo	%V
0,098	0,190	0,780	0,015	0,012	0,026	0,780	0,520	0,005

As duas amostras analisadas foram obtidas de forma a não sofrerem alterações pelo método de corte. Para o corte primário, ou seja, para se separar a porção do todo pra a forma aproximada, utilizou-se a serra fita horizontal, em sentido transversal à solda. Na sequência, fez-se um corte mais preciso devidamente refrigerado com o fluido de corte, utilizando o Policorte da marca Arotec modelo COR-40. Assim ambas foram usinadas e retificadas até atingirem uma largura de 36mm com altura igual à espessura do duto de 15mm.

Cada amostra foi devidamente polida com lixas d'água com granulações:180, 200, 400, 600, 1200, lixadas nessa ordem. Elas foram mergulhadas em uma lavadora ultrassônica digital por 15 minutos para retirar as impurezas. Posteriormente, utilizou-se alumina (óxido de alumínio) de 1µm na politriz PANAMBRA modelo DP-10e atacadas com Nital 4%. Para a

análise macrográfica, foram retiradas fotografias de ambas as amostras com um microscópio digital Dino-Lite-Am-413T PRO, zoom de 20x.

Subsequentemente, fez-se o ensaio de microdureza HV com indentação de 0,5mm e carga de 500g como esquematizado na Figura12, dividindo as Zona termicamente afetada, Zona fundida do Metal de base, conforme aconselha a norma da Petrobras (N-133,2004).

Para facilitar a análise micrográfica, Colpaert (2008) aconselha que seja escolhida a parte que se deseja estudar e fixá-las em resinas sintéticas. Neste trabalho foram utilizados suportes opacos, o baquelite. Ambos os exemplares foram usinados até atingirem medidas 15mmx5mmx15mm e novamente polidos com mesmo processo da macrografia, de forma que tanto o Metal de Base (MB), Zona fundida (ZF) e a Zona afetada pelo calor (ZAC) estivessem presentes na peça, o material embutido está na Figura 11 C).

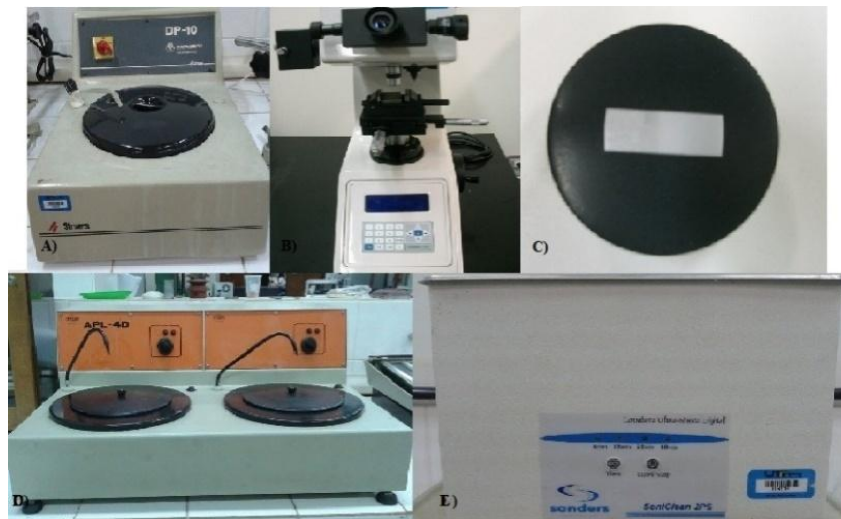


Figura 10 - Aparelhos utilizados nos experimentos. A- Lixadeira com pano B- Microdurômetro HV C- material embutido no baquelite D- Lixadeira de lixa d'água E- Lavadora digital
Fonte:próprio autor.

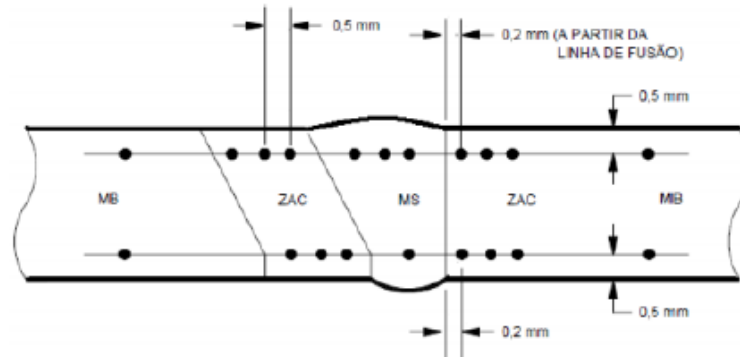


Figura 11 - Perfil dureza Vickers para medidas em soldas utilizada para uma segunda obtenção de pontos.

Fonte: Petrobras (2004).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 MACROGRAFIA

Após o devido polimento e o aço ser atacado com reativo apropriado, obteve-se a macroestrutura com as divisões de Metal de base, Zona Afetada Pelo Calor e a Zona fundida.

A linha vermelhada Figura 13 determina a região que foi denominada linha inferior, trata-se da raiz da solda. Próxima da ZAC é possível observar que a Zona fundida está mais escura que as demais regiões, isso é devido ao material de solda no passe da raiz ser diferente dos outros, pois há uma fusão do metal de base no local.

Observam-se também os contornos dos diversos passes e as suas respectivas ZACs, visivelmente maior na raiz, isso porque houve maior influência da energia de soldagem da camada superior. O tamanho da ZAC depende da temperatura da chapa, energia de soldagem, espessura, geometria do chanfro.

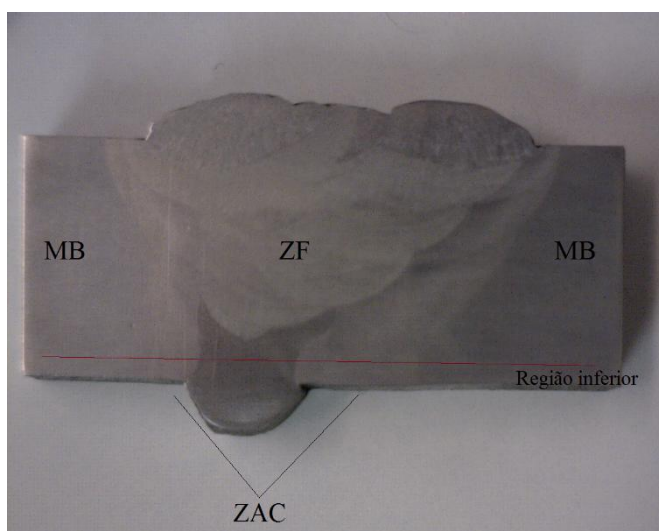
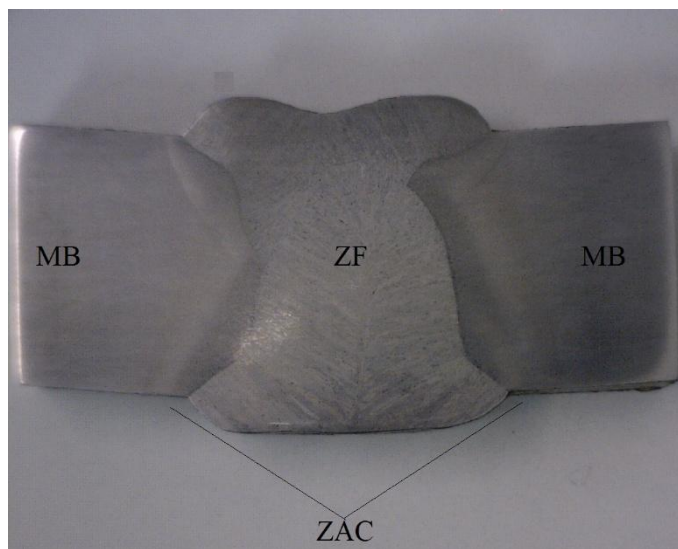


Figura 12 - Macroestrutura da região de solda com chanfro meio V, aumento 20x

Fonte: Próprio autor.

A macrografia da solda helicoidal, Figura 14, mostra que sua ZAC é praticamente uniforme em todo redor do seu cordão e, conforme a literatura (MARQUES; MODENESI ;BRACARENSE, 2011), é possível observar a zona colunar produzida na região fundida, processo semelhante que ocorre em peças fundidas.

As Figuras 13 e 14 mostram a diferença entre a solda helicoidal e a solda circunferencial.



**Figura 13 -Macroestrutura da região de solda com chanfro duplo V, aumento 20x
Fonte: Próprio autor.**

4.2 MICROGRAFIA

As amostras de solda GW- *GirthWelds* -Solda Circunferencial e SAWH – *Submerged Arc Welding Helical* - Solda Helicoidal Arco Submerso foram embutidas no baquelite e analisado o metal de base, ZAC, solda de enchimento e Raiz em microscópio obtendo-se suas micrografias.

Termologia utilizada:

a)Perlita - P.

b)Martensita - M.

- c) Austenita Dentrítica - AD.
- d) Ferrita Acicular - AF.
- e) Ferrita Primária de Contorno de Grão - PF(G).
- f) Ferrita Poligonal Intragranular - PF(I).

As Figuras 15 e 16 mostram as microestruturas reveladas de ambas as amostras. Na Figura 15 observa-se que a matriz perlítica está dominada pela transformação ferrítica em toda ZAC onde contém a estrutura ferrita primária com contorno de grãos mais grosseiros. Na solda de enchimento apresenta martensita com ilhas de bainita e perlita, praticamente solubilizadas. Para a raiz de solda há predominantemente ferrita com cortonos grosseiros na matriz de perlita.

- Amostra GW – *GirthWelds* – Solda Circunderencial

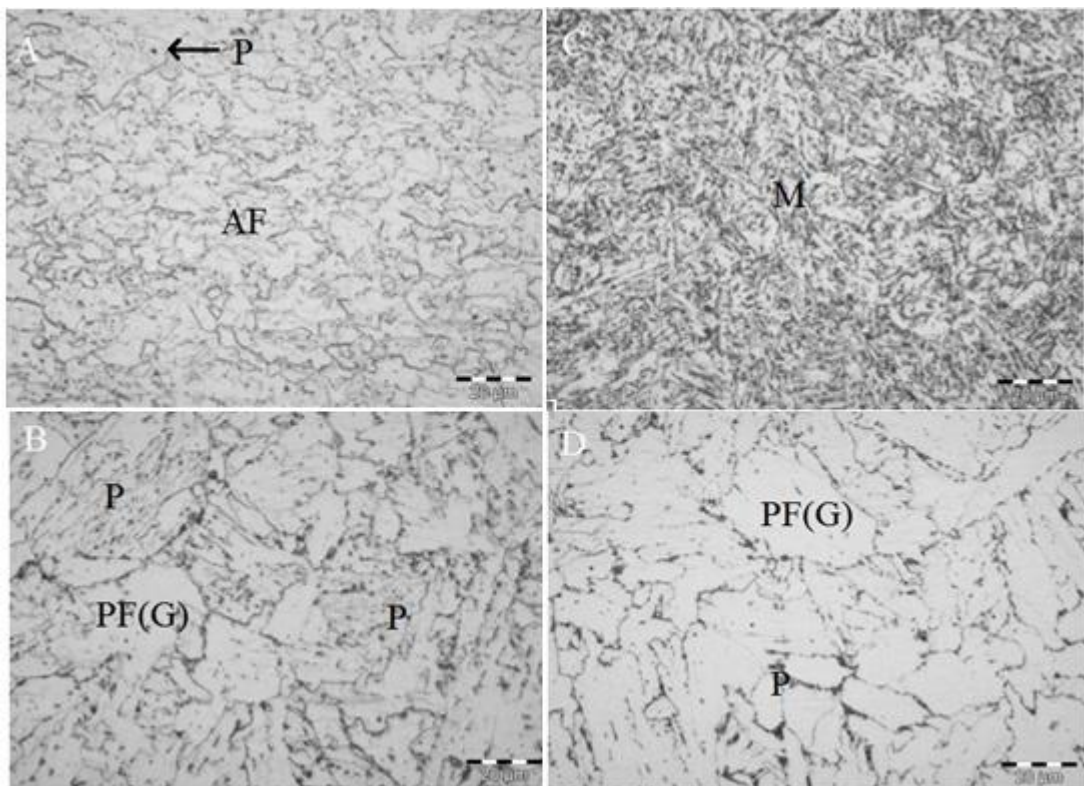


Figura 14 - Microestruturas: a)Metal de base b)Zona Termicamente Afetada pelo Calor c)Solda de enchimento d)Solda de raiz.Aumento 1000x

- Amostra SAWH – *Submerged Arc Welding Helical* – Solda Helicoidal Arco Submerso

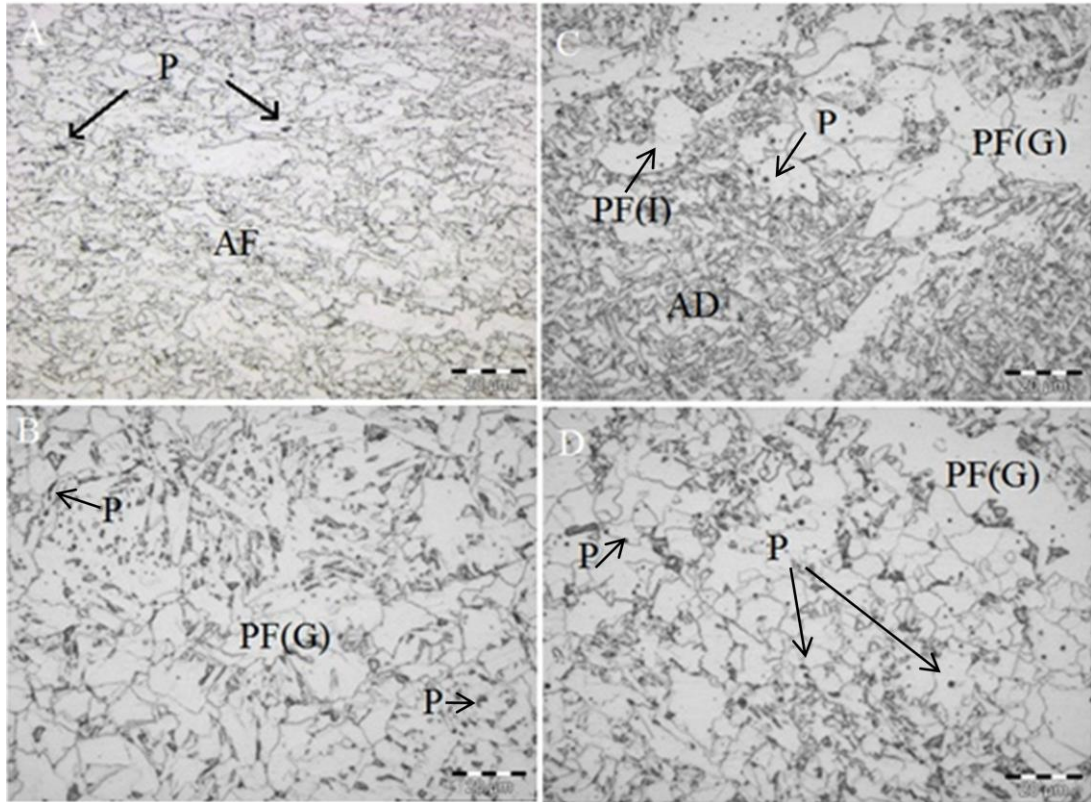


Figura 15 - Microestruturas: a)Metal de base b)Zona Termicamente Afetada pelo Calor c)Solda de enchimento d)Solda de raiz.Aumento 1000x

Basicamente, no processo CW na região da raiz de solda e ZAC há grãos grosseiros de Ferrita Primária de Contorno de Grãos. Por outro lado, nas regiões de solda do SAWH os grãos são mais refinados quando comparados ao outro processo de soldagem.

Como se sabe, a microestrutura modifica-se nas soldas principalmente pelo efeito dos parâmetros de solda: corrente de solda = 230 amperes; velocidade de solda = 32cm/minandarc, voltagem = 26 volts e sua velocidade de resfriamento (HASHEMI; POURANVARI; MOUSAVIZADEH, 2012). Entretanto, na Figura 16 o processo de Arco Submerso não se observa o aparecimento de martensita, mas possui ilhas menores de bainita e austenita dentrítica, principalmente no metal de solda. Importante mencionar a vantagem da bainita ao conferir boas propriedades de resistência e tenacidade. (ALBUQUERQUE et al, 2012).

4.3 MICRODUREZA

Com a especificação das regiões MB, ZAC e ZF, conseguiu-se um perfil de microdureza HV, mas agora com carga de 500g aconselhada pela Petrobras (N-133,2004) houve um total de com 50 medidas espaçadas em 0,5mm. Os resultados desse procedimento são mostrados nos gráficos 3, 4 e 5.

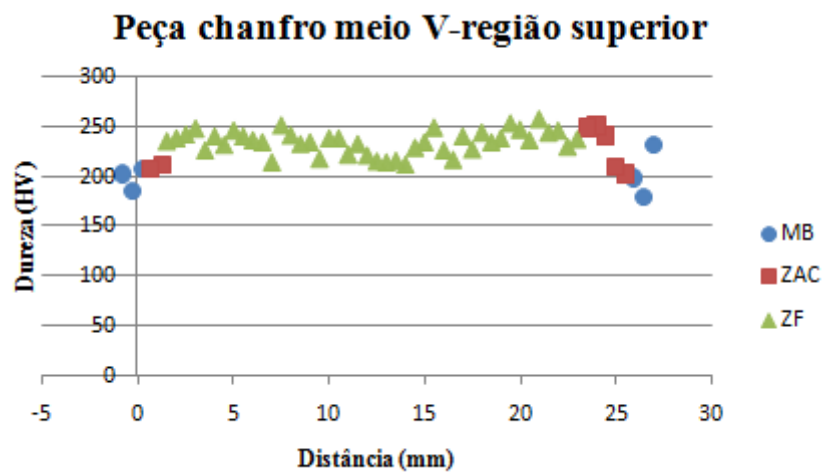


Figura 16 - Perfil de dureza especificando o MB, ZAC e ZF e suas respectivas médias da amostra chanfro meio V, região superior.

Fonte: próprio autor.

Peça chanfro meio V- região inferior

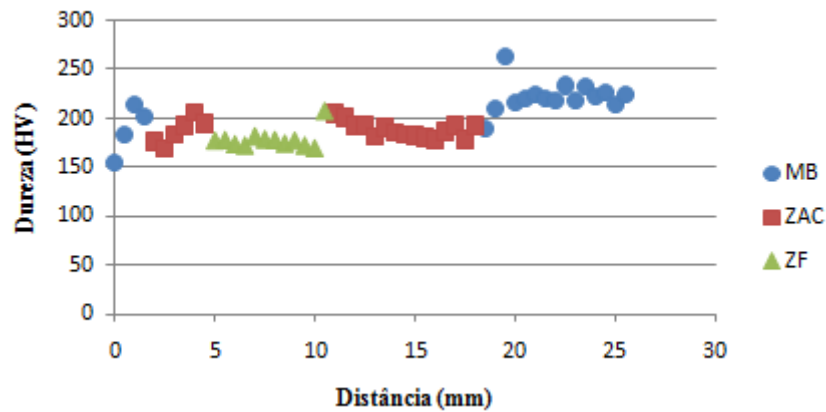


Figura 17 - Perfil de dureza especificando o MB, ZAC e ZF e suas respectivas médias da amostra com chanfro meio V. região inferior.
Fonte: próprio autor.

Peça chanfro duplo V- região inferior

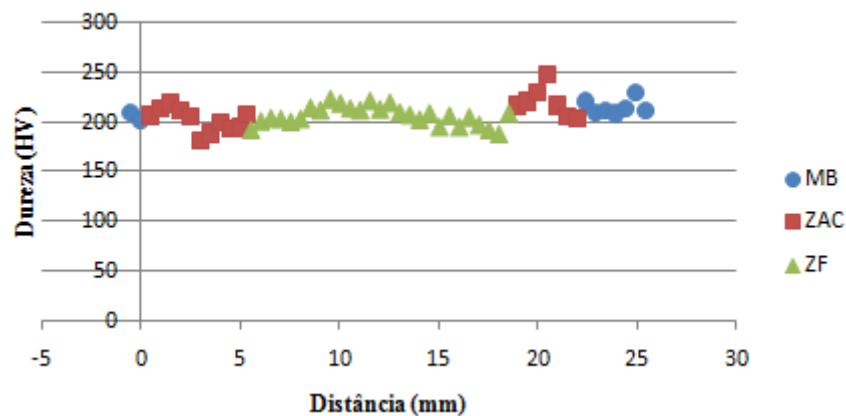


Figura 18 - -Perfil de dureza especificando o MB, ZAC e ZF e suas respectivas médias da amostra chanfro duplo V, região inferior.
Fonte: próprio autor.

A partir da análise das figuras, para a solda Circunferencial o perfil de dureza foi em formato de “M”, seguindo cada passe. A menor média de dureza obtida foi no processo de Soldagem Circunferencial por eletrodo revestido na região inferior. Segundo Albuquerque e et al. os vários passes proporcionam uma taxa de resfriamento muito baixa e, conseqüentemente uma redução na dureza, aumentando a possibilidade de apresentar Ferrita Widmanstatten, ocorrendo queda na resistência mecânica indo de encontro com as propriedades requeridas dos aços ARBL.

4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Analisando os resultados obtidos fica evidente a distinção entre o Metal de Base, Zona Afetada pelo Calor e a Zona Fundida.

Isso ocorre porque no entorno do cordão de solda as regiões são termomecanicamente modificadas pelo calor. As mudanças acontecem principalmente em função do material utilizado e ao tempo de resfriamento. A figura 15 explica a mudanças das microestruturas com diferentes graus de temperatura e o consequente aparecimento da Zona Termicamente Afetada pelo Calor.

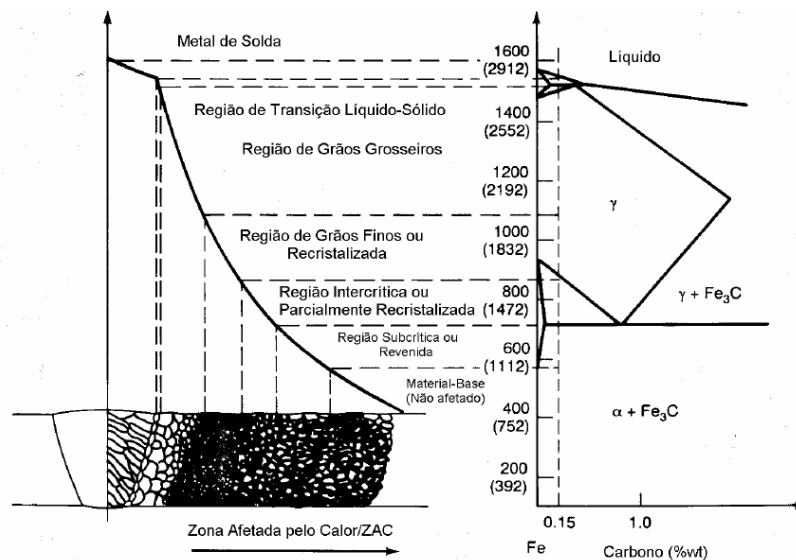


Figura 19 - Ciclo térmico e transformação de fases
Fonte: Colpaert (2011).

Conforme aumenta a quantidade de carbono, maior é a dureza do material. Entretanto o material utilizado neste trabalho é o aço microligado, cujos seus microconstituintes modificam as fases do aço, tornando a análise mais complexa.

A outra variável modificadora das propriedades mecânicas é a taxa de resfriamento. Próxima à Zona Fundida, dentro da região Afetada pelo Calor, a temperatura aumenta rapidamente e logo é resfriada, efeito semelhante à têmpera, a qual resulta em aumento de grãos e da dureza. Quanto mais afastada do cordão, mais rápida ainda é a taxa de resfriamento e assim os grãos diminuem. Um pouco mais além da região de refino de grãos, há outra área chamada intercrítica, onde ocorre uma transformação parcial do metal de base e a dureza é reduzida.

Analisando os resultados obtidos percebe-se que ora a ZAC possui dureza maior que o Metal de Base ora apresenta dureza inferior. As diferentes formas de soldagem utilizada contribuem para as modificações apresentadas.

A solda Helicoidal Arco Submerso (SAWH) apresenta basicamente monopasse no chanfro duplo V. A solda Circunferencial (GW) possui multipasses no chanfro meio V. A primeira apresenta modificações na ZAC mais simplificada e pode ser exemplificada na figura 15. O caso de juntas soldadas com vários passes em aços microligados é significativamente mais complicado.

Da mesma forma que a solda por monopasse, a multipasse é influenciada pelo calor, formando região de aumento de grão. Entretanto, um passe pode influenciar o outro fornecendo mais energia, causando algo semelhante ao revenimento. Por essas razões a dureza na região raiz da solda meio V tem dureza inferior em relação a todos os dados obtidos. Há também outros fatores como materiais diferentes e chanfro mais estreito na região da raiz - fusão de aproximadamente 30% metal de base no cordão.

Esse calor da soldagem causa o aumento de grãos da região da ZAC, diminuindo sua dureza com relação ao Metal de Base.

Os números obtidos da microdureza podem se relacionar as imagens obtidas nas microestruturas. As menores durezas do estudo foram na ZAC e metal de solda de raiz do processo GW (chanfro meio V) onde possuem Ferrita Primária com contorno de grãos mais grosseiros que o Metal de Base. Para o processo SAWH os tamanhos de grãos são menores

que o processo GW nas regiões da ZAC, portanto a dureza é superior que no processo de multipasses.

A maior dureza apresentada, 235HV, foi na região superior da solda no chanfro meio V – devido à martensita - entretanto a norma Petrobras (N-2163,2008) permite uma dureza máxima de 264 HB que é equivalente a 279 HV. Em todo o ensaio realizado a dureza foi inferior a esse valor, comprovando que o material cumpre as normalidades.

Na ZAC pode ocorrer tanto o aumento da resistência mecânica com relação ao resto do material, como diminuição das propriedades mecânicas. A queda da dureza e da resistência mecânica na ZAC é preocupante para os aços ARBL, cujo principal função é ter boa resistência e boa tenacidade.

5 CONCLUSÃO

O aço API 5L X 70 é constituído principalmente de Ferrita Acicular e Perlita. , a segunda é responsável por atribuir as propriedades do aço ARBL, pois se trata de um composto com elevada dureza e tenacidade. A dureza do material é em torno de 214HV.

Os grãos do Metal de Base são refinados, isso é diferente para as regiões de solda onde os grãos são mais grosseiros, exceto a solda de enchimento do processo GW que apresenta martensita.

Os grãos da ZAC no processo GW são mais grosseiros comparado à mesma região no processo SAWH, porque este processo é executado por máquinas próprias automatizadas, em condições ideais controladas e por não possuir vários passes de solda.

Os multipasses no processo circunferencial fazem com que a região da raiz de solda é influenciada pela energia do passe anterior, causando um processo semelhante ao revenimento, diminuindo a dureza.

A microestrutura presente na ZAC na região inferior e na raiz da solda, nos procedimentos de soldagem GW, apresentou uma maior proporção de ferrita primária grosseira; enquanto que empregando processo robotizado SAWH, observou-se uma microestrutura mais refinada com formação de bainita.

Apesar das mudanças observadas no MB, ZAC e ZF, a dureza em todas as regiões não foram tão discrepantes, em torno de 215HV, exceto para raiz de multipasses.

Maior dureza na ZAC foi de 225HV, menor que o valor máximo permitido pela norma N-2163 .

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, Siderley F.; ALMEIDA, Daisy M.; BRACARENSE, Alexandre Q.; MACIEL, Theophilo M.; SILVA, Raphael S. Estudo do Comportamento do Aço API 5L X80 quando Submetido à Soldagem por Processo Automatizado. **Soldagem e Inspeção**. São Paulo, v 17, n2, p 137 – 146, abri /jun 2012.

ALBUQUERQUE, Siderley F. **Avaliação do Efeito da Aplicação de Processos de Soldagem Manual e Automatizado Sobre a Microestrutura e as Propriedades Mecânicas de Junta Soldada do Aço API 5L X80**. 2010.109f. Dissertação (Mestrado em Ciência de Materiais) – Universidade Federal de Campina Grande, 2010.

AMERICAM PETROLEUM INSTITUTE, **API: Specification for Line Pipe**. The United States, 2004.

ARAÚJO, Márcia R. V. **Caracterização Microestrutural do Metal de Solda Depositado pó Arco Submerso em Chapas de Aço-Carbono Estrutural**. 2006. 96f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2006.

ASM. **American Society for Metals Handbook**, Vol1, p31.10ed, 2005.

BALLESTEROS, Adriana F. **Avaliação da Resistência de Juntas Soldadas Circunferenciais de Aço API 5L X-80 à Corrosão sob Tensão na presença de sulfetos e Susceptibilidade à Fragilização por Hidrogênio**. 2009. 209f. Tese (Doutorado) – Pontificadora Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2009.

BELTRÃO, Marcelo A. N. **Propagação de Trincas de Fadiga em Juntas Soldadas Longitudinais de Aço para Dutos da Classe API 5L- X70**. 2005. 106f. Tese (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005. Disponível em: <http://teses.ufrj.br/coppe/_M/MarceloAugustoNevesBeltr%C3%A3o.pdf> Acesso em: 8 jul 2014

BUENO, Sergio I.O. **Avaliação Estrutural de Dutos com Defeitos de Corrosão Coincidentes com a Solda Longitudinal**. 2007.200 f. (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2007.

CETESB. **Dutos**. Disponível em:

<1-<http://www.cetesb.sp.gov.br/gerenciamento-de-riscos/emergencias-quimicas/133-dutos-introducao>>. Acesso em: 20 maio 2014.

COLPAERT, Hubertus. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4 ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2008.

FERNANDES, Paulo E. A. F. **Avaliação da Tenacidade à Fratura da Zona Afetada Pelo Calor (ZAC) do Aço API 5L X80 Soldados pelos processos SMAW e FCAW**. 2011. 89f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2011. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3135/tde-30032012-121048/pt-br.php>>. Acesso em: 22 maio 2014.

FRANCISCO, Julio C. S. **Resistência à Propagação Dúctil de Trincas em Aço API 5L X70 com Teor de Nióbio Modificado**. 2015. 219f.

GORNI, Antônio A.; NAKASHIMA, Júlio T.; PEREIRA, Maurício M.; PLAUT, Ronald L.; SILVEIRA, José H.D. Estudo das Propriedades Mecânicas do Aço API X70 Produzido por Laminação Controlada. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, São Paulo, v 6, n1, p 7-12, jul/set 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2016.

MARQUES, Paulo V.; MODENESI, Paulo J.; BRACARENSE, Alexandre Q. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. 3 ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2011.

NAFISI, S.; ARAFIN, M.A.; COLLINS, L. and SZPUNAR, J.; Texture and Mechanical Properties of API X100 Steel Manufactured under Various Thermomechanical Cycles. **Materials Science and Engineering A**, v. 531, p. 2-11, 2012.

PEMET- Ministério de Minas e Energia. **Plano Decenal de Expansão da malha de Transporte Dutoviário - PEMET 2013-2022**. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/PEMAT/Relat%C3%B3rio_PEMAT_Consulta%20P%C3%BAblica.pdf> Acesso em 10 jun. 2014.

PETROBRAS. **N-133: Soldagem**. 2004.

_____. **N-2163: Soldagem e Trepanação em Equipamentos, Tubulações Industriais e Dutos em Operação.** 2008.

ROCHA, David B. **Estudo da Soldabilidade do Tubo API 5L X80 Utilizando os Processos de Soldagem: MAG com Transferência Controlada e Eletrodo Tubular.** 2010. 218f. (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2010.

ROSADO, D.B, WAELE, W., VANDERSCHUEREN, D. e HERTELÉ, S. Latest Developments in Mechanical Properties and Metallurgical Features of High Strength Line Pipe Steels; **Sustainable Construction and Design**, v.4, p.10, 2013. Disponível em: <<http://ojs.ugent.be/SCAD/article/viewFile/742/730> > Acesso : jul 2016;

SOHN, S.S.; HAN, S.Y.; BAE, H-J.; KIM, H.S. e LEE, S. Effects of Microstructure and Pipe Forming Strain on Yield Strength Before and After Spiral Pipe Forming of API X70 and X80 Line Pipe Steel Sheets. **Materials Science & Engineering A**; v. 573, p. 18–26, 2013.

SILVA, Maurício C. de. **Caracterização das Propriedades Mecânicas e Metalúrgicas do Aço API 5L X80 e Determinação Experimental de Curvas J-R para Avaliação da tenacidade a Fratura.** 2004. 96f.(Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2004. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3135/tde-11022005-162828/pt-br.php>>. Acesso 22 maio 2014.

SOUZA, Sérgio Augusto de. **Composição química dos aços.** São Paulo: E. Blücher, 1989. 134 p.

STEVENSON, M.E.; LOWRIE, S.L.; BOWMAN, R.D.; BENNETT, B.A.; Metallurgical Failure Analysis of Cold Cracking in a Structural Steel Weldment: Revisiting a Classic failure Mechanism. **ASM International Practical Failure Analysis**, v. 2, p. 55-60, 2002.

TENARIS **CONFAB**: tenaris – tecnologia em produtos. 2016. Disponível em:

<http://www.tenaris.com/TenarisConfab/pt/files/CF_Tubos_Cond.pdf> Acesso 10 out 2016.

USIMINAS. **Chapas Grossas**: catálogo. Belo Horizonte: 2014. p 10. Disponível em:
< <http://usiminas.com/wp-content/uploads/2014/02/novo-catalogo-chapasgrossas-v16-baixa.pdf>> Acesso 1 out 2016.

WEI B.Y.L.Y.;NELSON, TW ; Correlation of Microstructures and Process Variables in FSW HSLA-65 Steel; **Welding Journal**, v.90, p.95-101, 2011; Disponível em:
<https://app.aws.org/wj/supplement/wj201105_s95.pdf> Acesso jun 2016

YSHII, L. N.; CHIODO, M. S. G.**Aplicação de Aços de Alta Resistência em Dutos de Transporte de Óleo e Gás: Implicações sobre o Projeto e Construção.** 2007.10f.Dissertação. – Universidade de São Paulo.

