

**INFLUÊNCIA DA CORRENTE DE SOLDAGEM NAS  
PROPRIEDADES DE JUNTAS DE AÇO DE ALTA RESISTÊNCIA E  
BAIXA LIGA SOLDADAS COM ELETRODO REVESTIDO.**

**G924i**

**Guedes, Ricardo Pereira**

Influência da corrente de soldagem nas propriedades de juntas de aço de alta resistência e baixa liga soldadas com eletrodo revestido / Ricardo Pereira Guedes. - Recife: O Autor, 2009.

xi, 76 f.; il., gráfs., tabs.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2009.

Inclui Referências Bibliográficas.

**1. Engenharia Mecânica. 2. Soldagem de Aço API 5L Gr B. 3. Soldagem a Arco. 4. Eletrodo Revestido. 5. Propriedades de Juntas Soldadas. I. Título.**

**UFPE**

**621 CDD (22.ed.)**

**BCTG/2010-177**

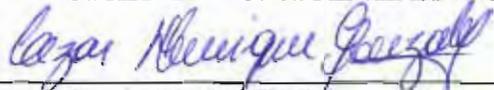
“INFLUÊNCIA DA CORRENTE DE SOLDAGEM NAS PROPRIEDADES DE JUNTAS DE AÇO DE ALTA RESISTÊNCIA E BAIXA LIGA SOLDADAS COM ELETRODO REVESTIDO”.

RICARDO PEREIRA GUEDES

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

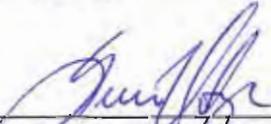
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: MATERIAIS E FABRICAÇÃO  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA/CTG/EEP/UFPE

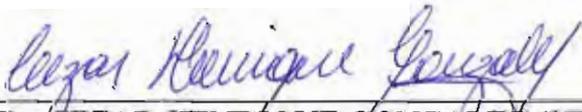
  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. SEVERINO LEOPOLDINO URTIGA FILHO  
ORIENTADOR/PRESIDENTE

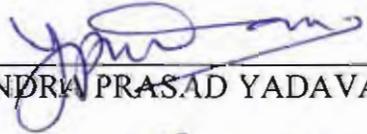
  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. CEZAR HENRIQUE GONZALEZ  
CO-ORIENTADOR

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. JORGE RECARTE HENRIQUEZ GUERRERO  
VICE-COORDENADOR DO CURSO

BANCA EXAMINADORA:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. SEVERINO LEOPOLDINO URTIGA FILHO (UFPE)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. CEZAR HENRIQUE GONZALEZ (UFPE)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. YOGENDRA PRASAD YADAVA (UFPE)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. FRANCISCO DE BEZERRA (UPE)



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO**  
**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIA - EEP**

**INFLUÊNCIA DA CORRENTE DE SOLDAGEM NAS**  
**PROPRIEDADES DE JUNTAS DE AÇO DE ALTA RESISTÊNCIA E**  
**BAIXA LIGA SOLDADAS COM ELETRODO REVESTIDO.**

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

**RICARDO PEREIRA GUEDES**

**Recife, 19 de junho de 2009.**

**INFLUÊNCIA DA CORRENTE DE SOLDAGEM NAS  
PROPRIEDADES DE JUNTAS DE AÇO DE ALTA RESISTÊNCIA E  
BAIXA LIGA SOLDADAS COM ELETRODO REVESTIDO.**

RICARDO PEREIRA GUEDES

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: MATERIAIS E FABRICAÇÃO**

ORIENTADOR: PROF. DR. SEVERINO LEOPOLDINO URTIGA FILHO  
CO-ORIENTADOR: PROF. DR. CEZAR HENRIQUE GONZALEZ

Recife, 19 de junho de 2009.

“Bendito os que tem a oportunidade de se aperfeiçoar através do conhecimento de procedimentos alheios, e em toda as ocasiões de mudança, nesta rápida vida, ser livres para procurar seguir sucessos do passado, ao invés de fazer do presente uma árdua e personar vereda de enganos”.

Dioros (Argira, Sicilia, 90a.C.)

## **AGRADECIMENTOS**

Para a conclusão desta dissertação exigiu-se um grande trabalho de equipe multidisciplinar, pois tem os que me incentivaram e não me deixaram abandonar o barco, aos que contribuíram com seus sucessos e aprendizados enriquecendo cada vez mais o trabalho e o homem que se forma a cada dia que se passa. E que pude terminar graças a ajuda de varias pessoas as quais eu agradeço muito:

Ao meu orientador, Prof. Dr. Severino Leopoldino Urtiga Filho, pois sem sua paciência e dedicação não seria possível terminar esse trabalho.

Ao meu Pai Pedro Guedes, com quem aprendi os primeiros passos sobre solda, de sua vasta experiência na área, onde me incentivou no passado para participar da ABS - Associação Brasileira de Soldagem – Recife, com reuniões na Escola Técnica.

A minha Esposa Angela, por sua compreensão pela minha ausência, por sua amizade e incentivo.

A minha Mãe Inês, que sem ela isso nada poderia ser feito, pois além dos incentivos, a persistência na melhoria continua que é sempre levada em primeiro lugar.

Aos meus irmãos, cunhados, cunhadas e sobrinhos: Ana Paula, Rodrigo, Rogério, Ronaldo, Mariana, Maria, Rose, Robson, Simone, Livia, Amanda, José Guilherme, Lucas, João Pedro, João Felipe, Luiza e Bruno pela compreensão e incentivos. Pela paciência de minha tia Bernadete em ajudar com as correções de português.

Aos meus amigos Carlos Augusto, Paulo Carvalho, Mario César, José Claudino, Rosildo, Euclides e Zurdival, pelas varias colaborações neste trabalho.

Agradeço a Scala tubos pela doação dos tubos.

Agradeço ao amigo Valter pelas soldagem dos tubos e a paciência.

Ao Prof. Dr. César Gonzales, pela co-orientação com os vários apoios e estímulos.

Ao Prof. Dr. Armando Shinohara e seu laboratório de Análise Mecânica.

A Eliane Alves e Rose Lima, pelo apoio e paciência.

Aos Professores do Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Mecânica da UFPE pela oportunidade de cursar o mestrado.

Aos alunos de iniciação científica Leandro, Tiago, Menuella e Cidrack, pela colaboração durante a preparação dos corpos de prova e utilização dos equipamentos.

## **DEDICATÓRIA**

Eu dedico esse trabalho a minha família,  
em especial aos meus pais Pedro e Inês  
e minha querida esposa Angela.

## RESUMO

Este trabalho apresenta o resultado do estudo da caracterização das propriedades mecânicas e estruturais de juntas soldadas com variação de parâmetros de soldagem na faixa especificada para a aplicação do eletrodo revestido, e analisar os possíveis problemas na soldagem de aços para tubulação usados na montagem das malhas de redes de gasodutos. Estas redes se proliferaram em nosso País, principalmente com as investidas das Distribuidoras de Gás Natural para suprir as demandas industriais, comerciais, residenciais e de transporte. O estudo analisa as propriedades das juntas soldadas em processo a arco de soldagem com eletrodo revestido, em condições de parâmetros variados de corrente, adotando os valores extremos e um intermediário, na faixa de indicação dos eletrodos. Para sua realização foi usado o processo de soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido, com fonte micro processada com correntes de 90, 100 e 140 ampers, o metal base foi tubo 3 polegadas da Manesmman que possui qualificação de Tri-norma atendendo as normas API-5L, ASTM-A-106 e ASTM-A-53 com grau B, onde se mantém as mesmas aplicações de cada norma específica o eletrodo escolhido foi E-6010 do tipo celulósico da norma AWS/ASME SFA 5.1, por ser o eletrodo mais comum, e principalmente por ser o mais utilizado em campo, pela sua facilidade de estocagem e manipulação. Foram realizados ensaios de microdureza e de tração, e análise microestrutural e macroestrutural das juntas soldadas. Os resultados evidenciaram variações nas propriedades das juntas soldadas quando se realiza a solda nas diferentes amperagens adotadas neste trabalho.

**Palavras Chaves:** Soldagem de Aço API 5L Gr B, soldagem a arco, eletrodo revestido, propriedades de juntas soldadas.

## **ABSTRACT**

In the present dissertation, the mechanical proprieties and structural characterization of welded joints were studies. The welding parameters were varied in the range specified for SWAM process application; it was analyze the possible welded problems in welded joints of pipe used in pipelines. These pipelines have proliferated in our country. The study examines the welded joints proprieties in the SWAM process, in the range current value specified by Weld Procedure Specification. It was adopted two of the extremes specified values and an one intermediary value. In the welded used the SWAM process with micro-processed source in the current 90, 100 and 140 A, used in pipe with 3 inch from Manesmman manufacture who is in the standards API 5L, ASTM-A-106 and ASTM-A-53 B attendance, which remains the same applications for each specific standard. As the AWS E-6010 electrode is the most used in field applications, it was used in our work. It is ease for storage and handling. The welded joints were evaluated by microhardness and tensile tests, and were analyzed in their microstructural and structural aspects. The results showed important variations in the welded joints properties where welding takes place in different currents adopted in this work.

Keywords: Welding of Steel API 5L Gr B, the arc welding, electrode coated, properties of welded joints.

## LISTA DE SIGLAS

|                |   |
|----------------|---|
| <b>ABNT</b>    | - Associação Brasileira de Normas Técnicas        |
| <b>AISI</b>    | - American Iron and Steel Institute               |
| <b>ASME</b>    | - American Society Mechanical Engineers           |
| <b>ASTM</b>    | - American Petroleum Institute                    |
| <b>API</b>     | - American Society for Testing and Materials      |
| <b>AWS</b>     | - American Welding Society                        |
| <b>ARBL</b>    | - Aço de Alta Resistência e Baixa Liga            |
| <b>ISO</b>     | - International Standardization Organization      |
| <b>IIW</b>     | - International Institute Welding                 |
| <b>NBR</b>     | - Norma Brasileira.                               |
| <b>FBTS</b>    | - Fundação Brasileira de Tecnologia da Soldagem   |
| <b>µm</b>      | - Micro metro.                                    |
| <b>mm</b>      | - Milímetro.                                      |
| <b>Ø</b>       | - Diâmetro  |
| <b>m/s</b>     | - Metros por segundo                              |
| <b>°C</b>      | - Grau Celsius                                    |
| <b>%</b>       | - Percentual                                      |
| <b>HV</b>      | - Dureza Vickers                                  |
| <b>FS (A)</b>  | - Ferrita com Segunda Fase Alinhada               |
| <b>FS (NA)</b> | - Ferrita com Segunda Fase não alinhada           |
| <b>AF</b>      | - Ferrita Acicular                                |
| <b>LE</b>      | - Limite de escoamento no ensaio de tração        |
| <b>FC</b>      | - Agregado de Ferrita Carboneto                   |
| <b>PF(G)</b>   | - Ferrita Primária de Contorno de Grão            |
| <b>PF(I)</b>   | - Ferrita Primária Poligonal Intragranular        |
| <b>RGG</b>     | - Região de Grãos Grosseiros                      |
| <b>RGF</b>     | - Região de Grãos Finos                           |
| <b>RI</b>      | - Região Intercritica                             |
| <b>RS</b>      | - Região Subcritica                               |
| <b>ZTA</b>     | - Zona Termicamente Afetada                       |
| <b>CS</b>      | - Cordão de Solda                                 |
| <b>MB</b>      | - Metal Base                                      |
| <b>ZL</b>      | - Zona de Ligação                                 |
| <b>GTAW</b>    | - Gas Tungsten Arc Welding                        |
| <b>SMAW</b>    | - Shielded Metal Arc Welding                      |
| <b>FCAW</b>    | - Flux Cored Arc Welding                          |
| <b>SAER</b>    | - Soldagem a Arco Elétrico com Eletrodo Revestido |
| <b>SAW</b>     | - Submerged arc welding                           |
| <b>ERW</b>     | - Electric Resistance Welding                     |

## SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO, OBJETIVOS E MOTIVAÇÃO.</b>                           | <b>1</b>  |
| 1.1 Apresentação   | 2         |
| 1.2 Histórico do sistema de redes de dutos de gás                      | 3         |
| 1.3 Características de uma rede de dutos                               | 7         |
| 1.3.1 Tubulação  | 7         |
| 1.3.2 Sistema de compressão  | 9         |
| 1.3.3 Redutores de pressão   | 9         |
| 1.3.4 Supervisão e controle  | 9         |
| 1.3.5 Processo de instalação de uma rede de duto.                      | 9         |
| 1.4 Objetivo   | 10        |
| 1.5 Motivação  | 11        |
| <b>2 REVISÃO LITERÁRIA</b>   | <b>12</b> |
| 2.1 Aços de alta resistência e baixa liga                              | 13        |
| 2.2 Aços com classificação para dutos                                  | 14        |
| 2.3 Processo de fabricação dos aços de alta resistência e sua evolução | 15        |
| 2.4 Soldabilidade de aços de alta resistência e baixa liga             | 17        |
| 2.5 Processo de fabricação de tubos                                    | 17        |
| 2.6 Soldagem com eletrodo revestido.                                   | 19        |
| 2.6.1 Definição  | 19        |
| 2.6.2 Processo de soldagem   | 21        |
| 2.7 Fonte de soldagem  | 22        |
| 2.8 Tensão de soldagem   | 23        |
| 2.9 Corrente de soldagem   | 24        |
| 2.10 Velocidade de soldagem  | 24        |
| 2.11 Polaridade da corrente de soldagem                                | 24        |
| 2.12 Penetração da solda   | 25        |
| 2.13 Tipo de revestimento do eletrodo                                  | 26        |
| 2.14 Junta soldada   | 27        |
| 2.15 Resistência à tração  | 28        |
| 2.16 Dureza  | 30        |
| 2.17 Microestrutura da região soldada                                  | 30        |
| 2.18 Classificação da microestrutura do cordão de solda (CS).          | 30        |
| 2.19 Classificação da microestrutura da zona termicamente afetada.     | 32        |
| <b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b>   | <b>35</b> |
| 3.1 Metal base   | 36        |
| 3.2 Metal de adição  | 36        |
| 3.3 Preparação das juntas  | 37        |
| 3.4 Equipamento de soldagem  | 37        |
| 3.5 Montagem das juntas  | 37        |
| 3.6 Montagem e fixação dos tubos                                       | 39        |
| 3.7 Procedimento de soldagem   | 39        |
| 3.8 Corpos de prova  | 41        |
| 3.8.1 Corpo de prova para ensaio de micrografia, metalografia e micro- | 42        |

|  |           |
|--|-----------|
| dureza.                                    |           |
| 3.8.2 Corpo de prova para ensaio de tração | 42        |
| 3.9 Ensaio de micro-dureza                 | 42        |
| 3.10 Ensaio de tração                      | 43        |
| <b>4 RESULTADO E DISCUSSÕES</b>            | <b>45</b> |
| 4.1 Análise de micro-dureza                | 46        |
| 4.2 Análise de ensaio de tração            | 51        |
| 4.3 Análise macrográfica                   | 54        |
| 4.4 Análise micrografia                    | 55        |
| <b>5 CONCLUSÕES</b>                        | <b>66</b> |
| <b>6 SUGESTÕES DE ESTUDOS FUTUROS</b>      | <b>68</b> |
| <b>7 BIBLIOGRAFIA</b>                      | <b>70</b> |

## **1. Introdução, Objetivo e Motivação**

## 1.1 Apresentação.

A soldagem tem enorme importância na vida moderna e tecnológica das sociedades, com marcante atuação na fabricação e manutenção de equipamentos, que se tornou uma base para toda a evolução industrial desde o advento do arco elétrico no final do século XIX até os mais modernos processos de soldagem da atualidade. Apesar de todas as automações conhecidas, o processo manual a Arco Elétrico com Eletrodo Revestido (*Shielded Metal Arc Welding* - SMAW) ainda é dos processos de campo o mais utilizado pela sua versatilidade e baixo custo, sendo usado em alguns casos com ou sem combinações com outros processos, tais como, processo TIG (*Gas Tungsten Arc Welding* - GTAW) e Arames Tubulares (*Gas Metal Arc Welding* - GMAW), entre outros.

Pelo processo por Eletrodo Revestido (SMAW) foram construídos nessas últimas décadas muitos gasodutos pelo país e pelo mundo. Com o crescimento populacional e a vantagem de se poder utilizar o gás natural tanto nos seguimentos da indústria, comércio, residência e automotiva fez com que ele se consolidasse como uma nova fonte de energia por todo o mundo. Além de também ter o atrativo do preço e ser taxado como “energia limpa”, pela baixa emissão de poluentes, incentivou o crescimento da demanda do gás natural, levando a um importante produto na matriz energética também no Brasil. No início de seu fornecimento nos grandes centros o valor do gás natural era realmente muito baixo, e seu consumo se multiplicou rapidamente e logo necessitou de aumento na construção de novas tubulações, que conseqüentemente foram por dentro das cidades, onde mesmo com o aumento de consumo e se consolidando no mercado, houve um aumento de valor para consumidores finais muito grande, em relação aos outros produtos concorrentes, mas mesmo assim tem se configurado como um baixo investimento e uma boa opção para muitas utilizações.

Nessas políticas de preços, falta de maiores expansões e quebras de regularidades de fornecimento, por total falta de um planejamento energético mais criterioso em nosso país, ficando cada vez mais crítico, já que com a sua entrada na matriz energética brasileira o gás natural só fez crescer seu consumo nos diversos seguimentos. E assim com a falta de expansões e a possível falta de produto irá causar as empresas que optaram por essa fonte de energia grandes problemas e mesmo as que conseguirem o produto não terão como aumentarem sua produção, necessitando assim, mudar para outra fonte de energia.

Neste grande cenário de falta de produto, as empresas de Distribuição de Gás Natural, em conjunto com a Petrobras, estão encaminhando possíveis soluções para que se possa voltar ao crescimento do fornecimento de gás natural e conseqüentemente o aumento da demanda pelos consumidores. A solução imediata

será a importação do Gás Natural Líquido para o mercado nacional. Sendo assim considerada uma solução que deve ser colocada em prioridade, pois essa é uma solução emergencial, já que a produção de gás na bacia do Rio Grande do Norte só faz decrescer.

Mas as perspectivas para aumento de fornecimento de gás natural no país serão através dos novos descobrimentos de reservas, como o Pré-sal, com as importações de Gás Natural Liquefeito (GNL), além dos campos de produção já existentes e produtivos. Que com certeza irá demandar ainda muitas construções de grandes gasodutos em todo Brasil e a com isso a necessidade de se ter malhas mais confiáveis e maiores pelo País.

## **1.2 Histórico do sistema de redes de dutos de gás**

A implantação de gasodutos não é nada recente, sendo sua história vinda da Revolução Industrial na Inglaterra, impulsionando a troca do trabalho braçal pela energia motriz das máquinas, constituindo um ponto importante para a evolução da indústria como um todo no mundo.

Começando com a simples implantação da iluminação pelos lampiões a gás em 1805, na própria Inglaterra, as redes de dutos tiveram que ser construídas para alimentação dos postes de iluminação, que foi para a engenharia um grande passo de aprendizado com novos equipamentos como a criação de máquinas a vapor para impulsionar a produção das indústrias. Com a Revolução Industrial o grande avanço necessitava de operários e para a segurança desses operários a necessidade de iluminação, pois já existia o período noturno de produção nas fábricas. Fazendo assim com que a produção de gás se tornasse uma necessidade de evolução, necessidade essa que fez com que essa matriz energética se espalhasse para todo o mundo.

Já em 1839, com o impulso dado pela Revolução Industrial na Inglaterra, chegou ao Brasil a construção de sistemas de produção e construção de gás encanado para a iluminação das grandes cidades dessa época.

A cidade de Recife, no ano de 1859, recebeu a visita do Imperador do Brasil Dom Pedro II, para a inauguração do sistema de Iluminação Pública a Gás, começando a funcionar no dia 26 de maio de 1859 no Bairro de Santo Antonio e São José, no dia 20 de junho no bairro do Recife, em 16 de maio de 1860 no bairro de Afogados, e se expandindo pelo Recife, sendo utilizado para a iluminação dos postes públicos, onde existia a função de acendedores de iluminação pública que percorriam a cidade acendendo os postes de iluminação ao crepúsculo do dia. A implantação do sistema de gás levou a cidade do Recife ao mesmo patamar das cidades europeias da época.

Em 1839, o Presidente da Província de Pernambuco, Francisco do Rego Barros (Conde da Boa Vista) celebrou o primeiro contrato de concessão de serviços de iluminação pública a gás na cidade de Recife.

A implantação da fábrica de gás continha dois gasômetros de retorta, duas chaminés com mais de 10 metros de altura, edificações de escritórios técnicos, edificações para as válvulas e reguladores de distribuição das tubulações, onde se completava mais um novo serviço público prestado pelo Império, por meio de uma concessão pública a uma empresa privada.

O processo de fabricação de gás exigia muito dinheiro e dependia de importação de equipamentos e materiais de consumo como o carvão de pedra de onde era produzido o gás. Para o transporte do gás era necessária a construção de dutos subterrâneos de distribuição, o que causava grande transtorno a comunidade, já naquela época, com as obras de escavação.

Havia necessidade de mão de obra especializada, que era rara naquela época. Os gasodutos levavam anos para serem construídos e para a sua futura manutenção e operação necessitava-se de operários especializados. O sistema como um todo era muito caro, e dependia dos interesses das forças políticas da época.[1]

Na implantação das redes elétricas no país, todos esses esforços de implantação do gás em Pernambuco foram esquecidos e só quando a Petrobras construiu o Gasoduto Nordeste, se implantou neste estado sua rede de duto interligando algumas fábricas importantes, que na época, a Petrobras fazia tanto o transporte, como a distribuição do Gás Natural. Por se tratar de poucos consumidores, a prioridade era só a rede industrial que viabilizou a implantação no Estado de uma rede de gás canalizado.

Com a criação em 17 de setembro de 1992, através de uma Lei Estadual 10656/1991, a Companhia Pernambucana de Gás – COPERGÁS passou a ser a distribuidora de gás canalizado no estado de Pernambuco, onde vem implantando sua rede de dutos de gás não só para indústria, mas para os diversos ramos que o gás natural pode ser usado, como para residências na cocção de alimentos ou aquecedores de ambiente ou água, para o ramo automotivo como combustível que pode ser queimado pelos automóveis através de um sistema de conversão, e para comércios tanto para aquecedores como substituições de outros sistemas de alimentação de combustível. As mesmas dificuldades do tempo do império estão tendo na implantação dos dutos pela cidade que naquela época era só com a abertura de valas pelas ruas, um método totalmente destrutivo com escavação por todo lado, e hoje já se é implantado um sistema não destrutivo das vias, com apenas valas nas regiões de interligações dos tubos.

Nos dias atuais, os problemas com a implantação de dutos apresentam-se de forma bastante semelhante às do passado, ainda existem transtornos para a população quando da necessidade de se escavar valas para os dutos pelas cidades.

Mesmo quando se utilizam métodos cada vez mais avançados de construção, como os métodos de furo direcional, que utilizam máquinas de furo direcional, onde a maioria do duto é colocada sem a necessidade de se fazer valas. Mas, mesmo com essa tecnologia, os equipamentos para grandes percursos e diâmetros maiores necessitam de grandes forças, e conseqüentemente os equipamentos necessitam ser de grande porte e como os furos são nas vias de acesso, o transtorno de circulação dos carros e pessoas é cada vez mais complicado e isso tudo gera aborrecimentos para a comunidade presente nas zonas afetadas pela construção.

Atualmente existe a falta de mão de obra especializada que é uma realidade neste ramo de construção no Estado, além de que se necessita de apoio político para fazer faces aos grandes investimentos necessários à implantação de uma rede de dutos eficiente, confiável e versátil em toda sua extensão.

Na região metropolitana do Recife já existem milhares de interferências implantadas pelas companhias de utilidades existentes como água e esgoto, telefônicas, energia e outras. Além da particularidade da região com suas pontes, alagados e outros tipos de interferências naturais, que com isso necessitam de obras de engenharia especiais, as dificuldades de implantação da rede de dutos são cada vez maiores. Os cadastros das interferências de outras companhias de utilidades são inexistentes ou não são confiáveis, prejudicando muito a evolução e a segurança de futuras intervenções. Não existem legislação e locais apropriados para serem implantadas como em cidades planejadas, dificultando tanto as concessionárias como as empresas que executaram os serviços e prejudicando toda a cadeia desses sistemas, desde os funcionários a indústrias, comércios e outros, que as obras de interligação desses clientes das distribuidoras são paradas ou atrasadas sem estimativa prévia de tempo.

A Copergás conta com 300 Km de dutos por toda região metropolitana e na cidade de Goiana contando com cerca de 963 clientes entre automotivo, industrial, comercial e residencial.[2] A Transpetro, empresa de transporte logístico da Petrobrás, opera com 7 mil quilômetros de oleodutos e 4 mil quilômetros de gasodutos pelo país. [3]

A Transpetro cuida do transporte e logística do petróleo e seus derivados desde os campos de produção, por oleodutos, gasoduto e navios, para os seus terminais, que são transportados para as refinarias. Depois deste material ser refinado, tratado e adequado aos padrões, são transportados para os terminais e em seguida entregues às companhias distribuidoras chegando assim ao mercado consumidor.

Com a ajuda da TBG – (Transportadora Brasileira Gasoduto Bolívia Brasil) – que é a segunda maior transportadora por dutos do país, atualmente com cerca de 3.150 quilômetros de dutos, dos quais 2.593 quilômetros são no Brasil [4]. Algo infinitamente longe do potencial dos Estados Unidos cujas linhas de gasoduto de

transporte, tanto *onshore* e *offshore* são de aproximadamente 450.000 quilômetros de dutos. As linhas de distribuição, junto com as pequenas linhas de casas, comércios, ruas e cidades pelos Estados Unidos podem chegar a 2.900.000 quilômetros de dutos, só de Gás Natural, segundo a AOPL (*Association of Oil Pipe Line*). Além disso, os transportes dutos respondem por mais de 17% do frete movido nos Estados Unidos, sendo menos que 2% do custo de frete. Os Estados Unidos têm a maior rede de dutos de qualquer nação. Por exemplo, toda Europa têm uma rede de duto que é só 1/10 do tamanho da rede norte-americana, segundo a *Allegro Energy Group*. [5]

Mostrando que o Brasil está muito longe ainda e que o potencial brasileiro de expansão de suas linhas de gasodutos e oleodutos tem a necessidade de crescer tanto em transporte como na área de distribuição de derivados, se tornando algo necessário para a aceleração do país. Isso contribui com a necessidade de se conhecer cada vez mais que o transporte através de dutos é eficiente, seguro e barato.



Figura 1.1: Construções de Tubulação no mundo até 2010 [6]

A Pesquisa de Construção de Dutos Norte Americana do ano de 2009 (figura 1.1) informa que existem 220.990 quilômetros de novos e projetados dutos de óleo e gás em construção para 2009 até 2010. Dos quais na América do Norte responde por 74.145 quilômetros, enquanto o resto do mundo fica com 146.845 quilômetros de projetos de dutos internacionais. [6]

No Brasil, a Sinopec está construindo cerca de 965 quilômetros do gasoduto Gascac que é parte da rede de gasoduto do Gasene que liga o Nordeste ao Sul do país. [6]

### 1.3 Características de uma rede de dutos

Um projeto de dutos tem que interligar o maior número de clientes para ser viável economicamente, devendo formar uma malha de interligações, além de oferecer segurança para a sociedade.

A formação de uma malha de interligação, a companhia de gás ganha em aumento de sua confiabilidade das linhas, podendo alimentar o cliente por vários pontos de entrega, com a facilidade de se fazer em vários tipos de manobras em válvulas, para uma possível manutenção das linhas ou de alguma estação distrital que venha a necessitar de manutenção e assim não deixar nenhum cliente sem gás. A rede de dutos deve ser dimensionada para suportar todos os seus clientes que serão interligados. Uma rede segura e bem dimensionada deve ter alguns detalhes importantes para o projeto, a rede deve ser composta por uma rede de tubulações principais e de maior diâmetro que suportará toda a demanda e os possíveis picos de consumo da região que será construída, que serão as linhas troncos. Nas derivações das malha de linhas troncos se formarão com diâmetros menores outras malhas, que formarão as redes distritais, de onde serão interligadas as redes secundárias que são as linhas alimentadoras dos ramais dos clientes, que receberão o rebaixamento de pressão para consumirem com segurança.

A tendência de uma rede de dutos é ser cada vez mais capilarizada pelos bairros das cidades, suportadas pelos pontos de entregas das empresas transportadoras para dar segurança e confiabilidade ao sistema, caso venha a falhar algum ramal, podendo dessa maneira ser alimentada por outro, isso se dá em todas as redes de utilidades, como água, energia, telefonia e televisões por assinaturas por cabos.

Uma rede de dutos de transporte de gás natural é composta basicamente por:

- Tubulação
- Sistema de compressão
- Redutores de pressão
- Supervisão e controle

#### 1.3.1 Tubulação

A tubulação é o conjunto de tubos e seus diversos acessórios conectados, para estabelecer um sistema de condução que é o principal equipamento da indústria do Petróleo e Gás. A necessidade de aumentar a demanda dessa indústria em todo o país, cuja visão geral é de se conseguir com o transporte dutoviário um modal de logística de transporte de excelente custo e segurança. Para o aumento de demanda necessitaria de se aumentar os diâmetros das tubulações, ou aumentar as pressões do fluido interno, aumentando assim também a sua quantidade. Sendo assim para

atender a demanda de gás necessita-se de se dimensionar para pressões maiores, fazendo com que as tubulações suportem maiores pressões. Para que essas tubulações suportem esses novos esforços elas necessitam de aumento em sua espessura de parede, possibilitando desse modo um maior transporte de produto para as regiões de consumo. Essa seria a tendência normal, mas com as novas tecnologias e novos materiais implementados nas ligas dessas tubulações, o que ocorre são paredes de menor espessura, tubulações que suportam maiores pressões, que ocasionam uma diminuição de material empregado, facilidades de transporte e deslocamento de cargas, facilitando assim todo o processo construtivo dessas novas tubulações. Esta está sendo uma tendência normal da engenharia de construção e montagem desses dutos, em um panorama mundial para as tubulações de transporte.

O tubo fabricado pela norma deve ter o cinete da API – *American Petroleum Institute* para que possa ser aceito, confirmando que a empresa fabricante do tubo seja certificada pela API e que o produto atenda a todos os itens da norma. Desta maneira a empresa construtora pode adquirir esses tubos e utilizar na construção de gasodutos e oleodutos.

Após a aquisição, a tubulação é armazenada pelo construtor, inspecionada por pessoal qualificado, verificado seu número do certificado de qualidade do fabricante, com o qual pode ser totalmente rastreado, e assim pode ser levada para campo, a qual será soldada e enterrada pelo método destrutivo, com a abertura de valas, ou método não destrutivo, com o auxílio de uma máquina de furo direcional, que por qualquer um dos métodos, dependendo da região e do tipo de solo, conforme norma, poderá a tubulação ser enterrada a uma camada de 450 mm até 1500 mm da geratriz superior do tubo, podendo ser até mais profundas dependendo das interferências encontradas, como é o caso das cidades que já estão densamente ocupadas por dutos e cabos das diversas empresas de utilidades.

Para a proteção corrosiva externa da tubulação é utilizado um sistema de proteção catódica por corrente impressa e um revestimento de tripla camada de Polietileno extrudado no próprio tubo.

As tubulações podem ainda ter um revestimento interno como a do projeto de interiorização do gasoduto Recife-Caruaru que utilizou uma pintura epóxi para a proteção contra corrosão interna e ou redução de atrito. A pintura de epóxi tem cerca de 60 micrômetros e a região próxima à junta de soldagem não tem revestimento, ficando em torno de 30 mm sem revestimento em cada extremidade do duto.

Todo o tubo já vem testado pelo fabricante, e depois da soldagem ainda é testado e antes de se colocar em operação é exigido o teste hidrostático de todo o duto, para detectar a estanqueidade do sistema e identificar quaisquer outros defeitos.

### **1.3.2 Sistema de compressão**

Para que o fluido possa percorrer todas as distâncias, entre o ponto de fornecimento e ponto de consumo final, se faz necessário um sistema de compressão, que comprimirá o fluido na tubulação impulsionado o existente, implementando assim maior quantidade de produto na linha conforme o consumo que estará sendo efetuado, transportando assim todo o fluido com suas respectivas perdas de transporte. Nas tubulações de transportes são dimensionados e distribuídos vários sistemas de compressão por turbinas a gás ou motores elétricos ao longo da rede.

### **1.3.3 Redutores de pressão**

São Estações de Gás completas ou apenas válvulas de controle distribuídas nas linhas, para segurança da tubulação. Estas estações de gás são unidades compostas por jogos de válvulas de redução de pressão, de bloqueio automático e/ou alívio de pressão, que são distribuídas de forma que adequem a pressão à jusante e em casos de problema, podem automaticamente interromper o consumo, limitando a pressão entre a máxima e a mínima contratada. As estações de gás que possuem medidores de vazão também servem para registrar o volume de gás consumido.

### **1.3.4 Supervisão e controle**

O sistema de supervisão e controle pode ser automatizado através da instrumentação das válvulas e pelo monitoramento, dos vários tipos de equipamentos de aquisição de dados existentes. O avanço tecnológico permite que cada vez se torne mais barato projetar sistemas instrumentados. Que deverão ser projetados dependendo do grau de importância da rede, do tipo de sistema de supervisão e controle que se deseja monitorar e pela simples questão de se ter um sistema simples ou complexo, ou seja, as informações das grandezas monitoradas e os acionamentos dos comandos podem ser disponíveis somente pelo acionamento ou leitura no local onde está o equipamento, ou serem à distância em uma sala de controle, com sistema de monitoramento tipo SCADA(*Supervisory Control And Data Acquisition*), que além de supervisionar a rede, possibilita interferir em sua configuração através de comandos acionados remotamente.

### **1.3.5 Processo de instalação de uma rede de duto.**

O processo de instalação de uma rede de dutos é relativamente simples, do ponto de vista de construções de grande porte. Sendo dividida em várias etapas. Em

uma construção como essa o terreno aonde se vai escavar, a logística que se deve ter e o pessoal qualificado são os grandes empecilhos para o construtor, pois geralmente as grandes obras de dutos são realizadas em regiões que ainda não foram habitadas ou com dificuldades de acesso. Já para as construções urbanas, esse empecilho não é problema, mas o trabalho em avenidas e ruas de muito movimento também é um fator de grande problema.

Etapas de uma construção de duto:

- Abertura da Faixa de Domínio
- Abertura de Vala
- Desfile de Tubos
- Curvamento
- Concretagem
- Montagem
- Soldagem
- Revestimento das Juntas
- Abaixamento da Coluna
- Cruzamento e Travessias
- Fechamento de Tie-ins
- Recomposição da Vala e Faixa de Domínio
- Limpeza da Linha
- Teste Hidrostático
- Comissionamento

#### **1.4 Objetivo**

Analisar os resultados dos testes de laboratórios feitos nos corpos de prova confeccionados de uma tubulação de aço carbono através de eletrodo revestido, usados na construção de gasodutos em todo país, caracterizando as propriedades mecânicas e estruturais das juntas soldadas com as variações de parâmetros de soldagem na faixa de especificação do eletrodo, verificando:

- Os valores das durezas Vickers na zona afetada termicamente (ZAT) e no cordão de solda (CS);
- Os valores dos testes de tração dos corpos de prova soldados com os do próprio aço;
- As macrografias e micrografias das mudanças causadas com as variações impostas pelos parâmetros de soldagem.

## 1.5 Motivação

Este trabalho tem como motivação observar os possíveis problemas na soldagem de aços API 5L das malhas de redes de gasodutos. Redes essas que se proliferaram em nosso país, com as investidas das distribuidoras de gás natural. O estudo analisa as propriedades das juntas soldadas em processo a arco de soldagem com eletrodo revestido, em condições de variação do parâmetro de corrente, conseqüentemente variando a tensão. Adotando os valores extremos e um intermediário, na faixa de indicação dos eletrodos, podendo assim verificar se a utilização dos equipamentos de soldagens que são utilizados podem comprometer em algum ponto a integridade das tubulações. Mesmo sabendo que os procedimentos de soldagem são bem acompanhados por profissionais treinados, coibindo assim qualquer situação que gere descontinuidades, mas como pode ser visto em campo, muita coisa pode ser negligenciada, quer seja pela falta de prática dos profissionais novos profissionais envolvidos, já que a mão de obra necessária é escassa, podendo assim estar produzindo certas descontinuidades que irão prejudicar a segurança do gasoduto.

Mesmo os vários problemas com a indústria de petróleo e gás em nosso país, de planejamento e com a crise mundial, em conjunto com a baixa produtividade de gás natural dos campos da região, a necessidade de estudos constantes para aperfeiçoar a segurança das instalações e poder julgar qualquer falha que venha ocorrer com a má utilização, nos leva a pesquisa para solucionar possíveis problemas de campo.

A soldagem de campo necessita de diferentes equipamentos e podem ocorrer situações inusitadas no seu decorrer, pois existem obras em locais urbanos, em regiões rurais e também, como foi a construção do Gasoduto Coari-Manaus, em regiões de selva. Desta forma é necessário o uso de procedimentos de fechamento de soldagem em tubo em situações adversas, com máquinas de solda trabalhando com geradores e redes elétricas, com pouco ou nenhuma estabilidade de corrente e tensão, máquinas que não tem display de tensão, sendo ajustada pela experiência do operador que em questão é o próprio soldador ou do ajudante.

Estes problemas incentivam a necessidade de pesquisas de variações dos parâmetros de soldagem para verificar suas influências na soldagem em gasodutos, simulando situações reais e contribuindo com a segurança destas linhas que a cada dia estão mais presentes nas cidades brasileiras.

## **2. Revisão Literária**

## 2.1 Aços de alta resistência e baixa liga

Os aços de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL) são os que apresentam, em sua composição química, teores de carbono variando entre 0,05 até 0,25%, chegando até a 2,0% de manganês, e pequenas quantidades de cromo, níquel, molibdênio, cobre, nitrogênio, vanádio, nióbio, titânio e zircônio. Dependendo da utilização em determinadas combinações, raramente excede individualmente o teor de 0,1%, sem que o total destes componentes ultrapasse 8% em peso da composição total do aço [7].

Historicamente, os projetos em geral com estruturas de aços eram baseados no limite de ruptura e no teor de carbono, que era o principal elemento de liga. Com isso os aços apresentavam baixo custo, mas sempre associados com baixa tenacidade e soldabilidade, o que os tornavam impróprios para muitas das aplicações industriais. O advento da soldagem e os acontecimentos de colapsos catastróficos de estruturas soldadas, foi quando se deu mais importância ao controle de tenacidade e os projetos passaram a serem dimensionados não pelo limite de ruptura e sim pelo de escoamento [8].

O desenvolvimento desses aços está correlacionado com o desenvolvimento de pesquisas e o conhecimento crescente da relação microestrutura dos metais e suas propriedades. O sucesso dos métodos de adição de elementos de liga com os processos de metalurgia contribuem para o desenvolvimento de aços com resistências cada vez mais elevadas.

O processo de soldagem tem exigido uma diminuição do teor de carbono nas ligas, assim teve-se que usar elementos de liga mais caros como o manganês, para o aumento da resistência. No entanto não se tinha ainda verificado a importância da tenacidade dessas peças soldadas, provocando grandes falhas catastróficas foram.

Levando a estudos onde foi dando a real importância do limite de resistência ao escoamento, do tamanho de grão e da tenacidade, para os projetos das novas ligas tomarem novos rumos, contribuindo com a diminuição do teor de carbono e o aumento da porcentagem de Manganês nessas ligas.

O aparecimento de novos aços, também acelerou o desenvolvimento de novos consumíveis, para formar depósitos compatíveis com o metal base e com a tenacidade necessária das novas juntas. Neste cenário, os aços ARBL foram inicialmente projetados para atender às necessidades da indústria do petróleo e gás, embora o bom desempenho industrial tenha incrementado seu uso em outros tipos de indústrias, como a automotiva, a naval, além de seu uso como aço estrutural. [8]

Os tubos utilizados para construção de dutos, na indústria de petróleo e gás, são fabricados a partir de chapas de aço ARBL.

Nas últimas décadas, o desenvolvimento na tecnologia de produção dos aços de ARBL exigiu que a compreensão da relação entre propriedades mecânicas e microestruturas fosse cada vez mais estudada e compreendida [9].

As principais características dos aços ARBL são seu alto limite de resistência, boa tenacidade a baixas temperaturas; boa conformabilidade e boa soldabilidade, em função do baixo índice de carbono equivalente [7].

A principal vantagem da utilização dos aços ARBL é que eles podem suportar graus elevados de resistência mecânica com espessuras mais finas, fornecendo economia em peso e propiciando uma redução do custo do projeto como um todo. Os tubos construídos com esses aços conseqüentemente terão uma redução da parede do tubo existente, tendo redução de custo com a soldagem, pois será necessária menor quantidade de consumível de soldagem.

O alto limite de resistência destes aços produzem tubos que podem resistir a maiores pressões internas ou em alguns casos pressões externas, pois o ARBL tem seu limite de escoamento aumentado pela tecnologia utilizada. Essa vantagem de resistir a maiores pressões faz com que possa transportar uma maior quantidade de material em um mesmo diâmetro de tubulação, e no caso do transporte de gás pode-se economizar com estações de recompressão espalhadas pelo trajeto de um gasoduto. O que vem sendo uma realidade com o crescente aumento de demanda de petróleo e gás, levando a essa necessidade de melhorar dos aços para condições de trabalho mais severas. Além disso, custos mais baixos podem ser realizados, se um aço microligado substituir um aço ligado, os quais têm maiores conteúdos de elementos de liga caros como níquel, cromo e molibdênio. Ainda assim, a redução de custo mais significativa fornecida pelos aços microligados é a eliminação dos custos de tratamentos térmicos. Os aços microligados na sua condição de laminados fornecem propriedades comparáveis aos aços normalizados ou revenidos. Os custos associados ao tratamento térmico são evitados com o aproveitamento dos elementos de microliga nos aços ARBL [7].

## **2.2 Aços com classificação para dutos**

Para que os aços atinjam as especificações para os dutos de condução da indústria do petróleo e gás, eles têm que atender as especificações da *American Petroleum Institute (API)*, através da norma API 5L - *Specification for Line Pipe*.

Os valores dos dutos de uma obra de transporte por tubulação correspondem a mais de 50% do valor da obra, logo seu custo está ligado a sua ótima qualidade e segurança. Os aços com a classificação API são de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL), que garantem aos dutos alta resistência, aliada a boa soldabilidade que são necessárias na montagem de uma obra de tubulação.

As composições químicas do aço usado na fabricação dos dutos estão em tabelas específicas na norma API 5L (tabela 2.1), com as máximas e mínimas quantidades de elementos para cada grau de aço em porcentagem de peso, onde os elementos C, Mn, P e S estão bem especificados e outros como Co, V e Ti têm seus limites apresentados. A adição de qualquer elemento é alertada e pode afetar a soldabilidade dos dutos. Essa composição química é quem vai dar aos aços as propriedades específicas [10].

Tabela 2.1: Composição dos Aços API conforme Norma API 5L[10].

| Aço           | C         | Mn          | P     |      | S    | Outros |
|---------------|-----------|-------------|-------|------|------|--------|
| Grau / Classe | Max       | Max         | Max   | Min  | Max  |        |
| A25, CI I     | 0,21      | 0,60        |       | 0,03 |      |        |
| A25, CI II    | 0,21      | 0,60        | 0,045 | 0,08 | 0,03 |        |
| A             | 0,22      | 0,90        |       | 0,03 | 0,03 |        |
| B             | 0,26-0,28 | 1,20        |       | 0,03 | 0,03 |        |
| X42           | 0,26-0,28 | 1,30        |       | 0,03 | 0,03 | *      |
| X46,X52,X56   | 0,26-0,28 | 1,30        |       | 0,03 | 0,03 | **     |
| X60           | 0,26-0,28 | 1,40        |       | 0,03 | 0,03 | **     |
| X65           | 0,26-0,28 | 1,40 - 1,45 |       | 0,03 | 0,03 | **     |
| X70           | 0,26      | 1,65        |       | 0,03 | 0,03 | **     |

Nióbio, Vanádio, Titânio, ou combinações podem ser  
 \* usados mediante acordo entre o fabricante e o comprador não ultrapassando sua soma em 0,15%

Nióbio, Vanádio, Titânio, ou combinações podem ser  
 \*\* usados com discricão do fabricante não ultrapassando sua soma em 0,15%

### 2.3 Processo de fabricação dos aços de alta resistência e sua evolução

A evolução dos aços ARBL veio com a evolução da indústria, que nos anos 60 até os 70, o processo era feito com laminação a quente e normalizado para produzir uma microestrutura composta de finas lamelas de ferrita, perlita e grãos maiores de ferrita. Já nos anos 70 o processo foi modificado para se utilizar à conformação termomecânica, permitindo a produção de aços como o API X-70 com tensão mínima de escoamento de 70.000 psi (483 MPa), podendo-se assim reduzir teores de carbono, e adicionar elementos de liga como nióbio e vanádio. Essa nova técnica permite uma microestrutura com grãos mais refinados e melhor uniformidade [11].

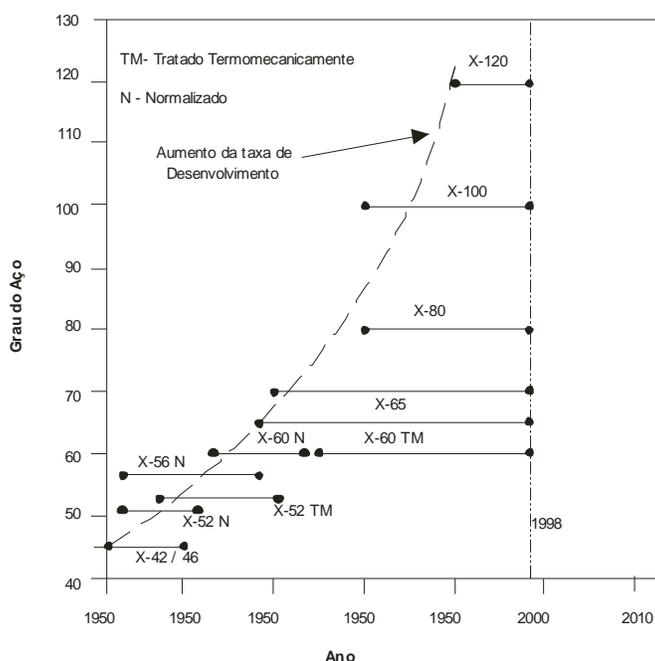


Figura 2.1: Esquematisação da evolução dos aços API 5L. [12]

Nos anos 80, o processo foi melhorado para a nova necessidade das indústrias, com a introdução do processo de resfriamento controlado adicionado à laminação termomecânica, possibilitando a produção do aço X80, com teores de carbono ainda mais reduzidos, melhorando assim o carbono equivalente e consequentemente a soldabilidade dos novos aços. A microestrutura neste aço é refinada e do tipo ferrita-bainita. Nestes últimos anos, têm sido feitas várias pesquisas adicionando elementos de liga como o molibdênio, o cobre e o níquel, além de processos modificados de resfriamento controlado, possibilitando o desenvolvimento dos aços de grau X100 (689 MPa) e X120 (827 MPa).

Na evolução dos aços, para conseguir melhorias nas propriedades mecânico-metalúrgicas, é necessário produzi-lo utilizando uma composição química diferenciada e processos de laminação controlados, os quais conferem aos materiais maiores resistências, aliados a boas características de trabalhabilidade. O processamento termomecânico de laminação controlada leva a um refinamento de grão, que é um processo pelo qual se têm vários estágios de laminação com temperaturas controladas, quantidade de redução também predefinida para cada passe de laminação e a temperatura de acabamento bem definida, seguido por um resfriamento acelerado.

No processo de laminação controlado consegue-se deformar os grãos de austenita durante o processo, para obtenção de grãos finos de ferrita + perlita durante o resfriamento do aço. Isso resulta um aumento simultâneo de resistência e

tenacidade, possibilitando a redução da quantidade de carbono nos aços ARBL, melhorando a soldabilidade destes aços [12].

Para uma comparação dos aços dos anos 70 e 80 com os atuais, os aços conseguiram aumentar sua resistência e a soldabilidade, o que esta esquematizado em uma linha de tempo pela figura 2.1[13].

## **2.4 Soldabilidade de aços de alta resistência e baixa liga**

Tubulações com maiores resistências conduzem conseqüentemente a maiores quantidades de elementos de liga, aumentando se a preocupação com a soldabilidade desses aços, já que a soldagem tem também que resistir às novas pressões de trabalho e condições cada vez mais severas. Estas juntas soldadas têm que ter propriedades mecânicas compatíveis com a do aço que será usado, no caso de tubulação, pois os dutos são fabricados com esses aços.

Os fatores que definem a soldabilidade de um aço são a facilidade com que pode ser soldado e o seu comportamento em serviço, pois o comportamento no campo exige que esse material possa ser soldado em situações adversas requerendo um mínimo de cuidado, tais como projeto da junta, escolha da energia de soldagem e temperaturas de pré-aquecimento.

Esta tecnologia de fabricação de aços ARBL, nos quais os processos tendem a obter grãos refinados, podem ser parcialmente destruídos no processo de soldagem. Essa preocupação é um dos grandes fatores para estudos, uma vez que a soldagem longitudinal, feita na própria fabricação dos dutos, tem as suas propriedades garantidas, embora sejam executadas sobre parâmetros bem controlados por ser uma solda de fábrica mecanizada. Esta padronização não se pode prever nas soldagens de campo, na hora de construção e montagem, é que sempre haverá algum tipo de descontinuidade que possa não ser detectada na inspeção. Num contexto geral, para que um aço tenha uma boa soldabilidade, ele depois de soldado tem que possuir uma boa tenacidade e não deixar que o metal de base fique frágil.

Os principais fatores que podem influenciar soldabilidade são as variações produzidas na ZTA, a composição química do metal de base e de adição, as tensões internas produzidas pela soldagem na peça e os fatores elementares do procedimento de soldagem empregado.

## **2.5 Processo de fabricação de tubos**

Para a fabricação dos tubos a norma API 5L especifica todos os parâmetros necessários como a composição química, as propriedades mecânicas e o próprio processo de fabricação dos tubos empregados para montagem de dutos.

Existem vários processos de fabricação de tubos que podem ser de dois tipos: com costura (welder) e sem costura (seamless) que se referem ao tipo construtivo. O tubo que tiver costura é fabricado com uma soldagem, se for sem costura é que o processo de fabricação deste tubo não precisou de soldagem para fechamento circunferencial do duto. Os tubos sem costura são fabricados por um processo de conformação plástica sem soldagem, conferindo os diâmetros necessários. Os tubos fabricados com soldagem, os com costura, têm uma soldagem que seus processos diferem pelo tipo de equipamento usado na soldagem e números de soldas longitudinais realizadas.

Os tubos soldados apresentam as seguintes variações quanto ao processo de fabricação:

- soldagem por arco submerso - SAW - solda longitudinal
- soldagem por arco submerso - SAW - espiral
- soldagem por resistência elétrica – ERW

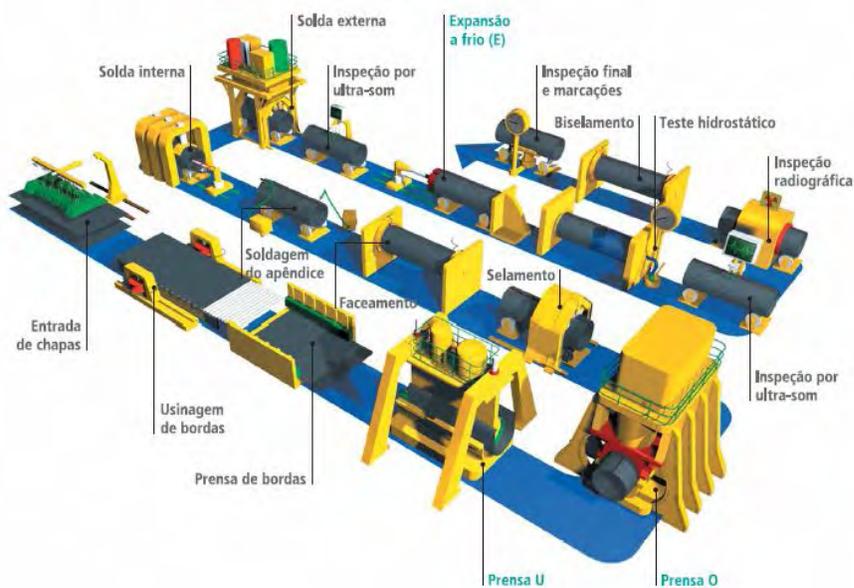


Figura 2.2: Processo de fabricação por soldagem longitudinal por Arco Submerso (SAW) [14]

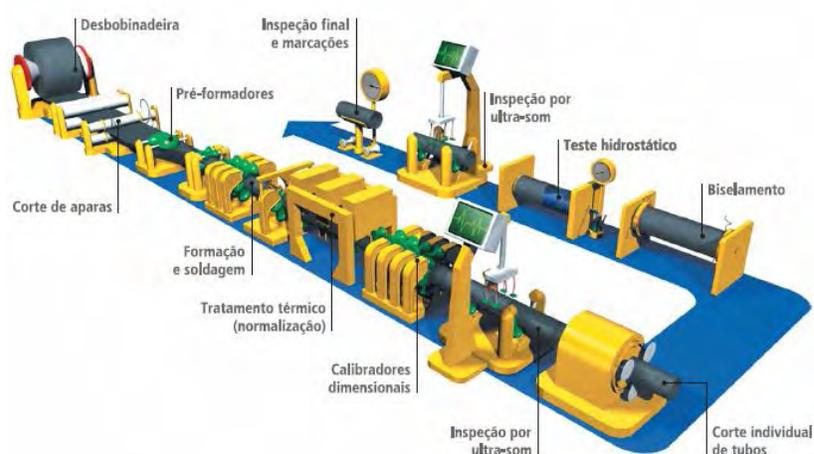


Figura 2.3: Processo de fabricação por soldagem longitudinal por Resistência Elétrica (ERW).[14]

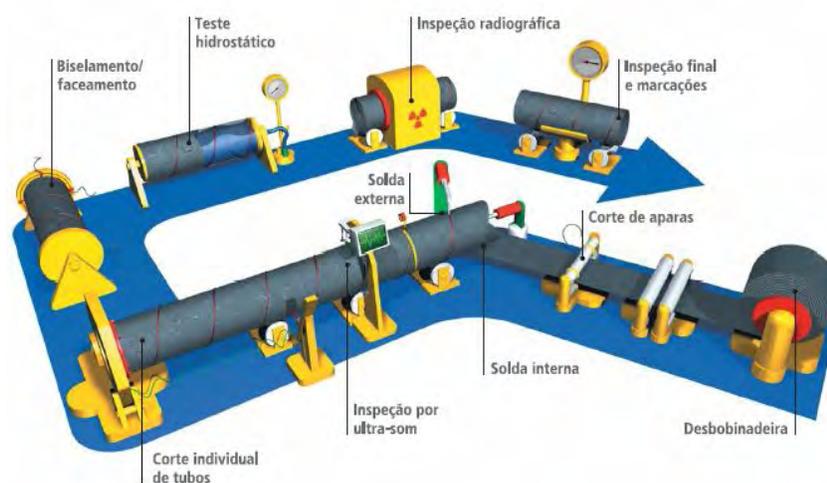


Figura 2.4: Processo de fabricação por soldagem helicoidal por Arco Submerso (SAW) [14]

## 2.6 Soldagem com eletrodo revestido.

### 2.6.1 Definição

A Soldagem a Arco Elétrico com Eletrodo Revestido (SAER) ou Shielded Metal Arc Welding (SMAW) tem seu uso muito difundido, devido à facilidade de sua execução e à simplicidade dos equipamentos utilizados para abertura e manutenção dos arcos elétricos, associados com a qualidade das soldas obtidas, o baixo custo, facilidade de uso dos consumíveis, facilidade de transporte e instalação do equipamento, que pode ser feito sem grandes problemas de logística. O processo não é tão sensível ao vento e correntes como alguns outros processos de solda a

arco. O próprio eletrodo consegue proteger tanto a poça fusão como adicionar elementos de liga para a mistura. O processo é satisfatório para a maioria dos metais e ligas comumente usados, e o eletrodo típico pode alcançar em áreas de acesso limitado [15]. Devido a estas facilidades e na sua difusão verificar-se a existência de maior quantidade de mão de obra qualificada neste processo, a sua utilização em fabricas, no campo, e em pequenas oficinas.

O processo a arco elétrico com eletrodo revestido é comumente encontrado em grandes obras de oleodutos e gasodutos, onde o acompanhamento com as inspeções adequadas asseguram sua eficiência e segurança, podendo ser ainda usado combinado com outros processos, como processos TIG (GTAW - *Gas Tungsten Arc Welding*), arames tubulares (FCAW - *Flux Cored Arc Welding*), entre outros.

O grande volume de obras executadas mundialmente com este processo pode ser avaliado pela construção de duas grandes redes de tubulações, constituídas de um gasoduto e de um oleoduto, no Ártico. Usando soldagem por arco elétrico com eletrodo revestido, constituídas de 19,3 quilômetros de tubulação no oceano e 33,8 quilômetros em terra, executadas com o aço dos tubos tipo API 5L grau X65 e X52, e com o uso do eletrodo revestido E 8010-G, onde foram gastos em torno de 1 milhão de dólares apenas para qualificar o procedimento de soldagem [16].

Para classificar o procedimento de soldagem existem algumas definições segundo alguns autores e instituições. Segundo Sergio Brandi [17] denomina-se soldagem ao processo de união entre duas partes metálicas, usando uma fonte de calor, com ou sem aplicação de pressão. A *American Welding Society* (AWS) denomina-se soldagem a operação que visa obter a coalescência localizada produzida pelo aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a aplicação de pressão e de metal de adição.

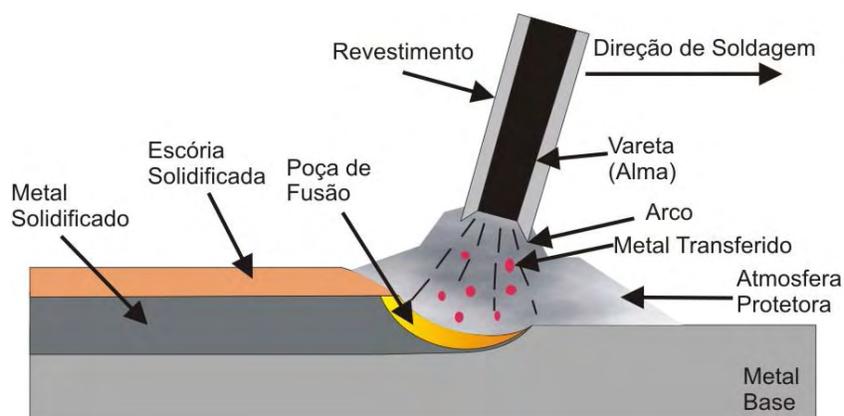


Figura 2.5: Soldagem por Eletrodo Revestido

A Fundação Brasileira de Tecnologia da Soldagem (FBTS) define a soldagem a arco com eletrodo revestido como o processo que produz a coalescência entre metais pelo aquecimento e fusão destes com um arco elétrico estabelecido entre a ponta de um eletrodo revestido e a superfície do metal de base, na junta que está sendo soldada [18].

### **2.6.2 Processo de soldagem por eletrodo revestido**

Na soldagem, o eletrodo é condutor e ao mesmo tempo é quem faz a adição de materiais para a fusão, sendo formados por um núcleo metálico, chamado também de alma, com comprimento em torno de 250 a 500 mm. Dependendo do fabricante alguns eletrodos podem ter variações, onde é revestido por uma camada de minerais e/ou outros materiais, com um diâmetro total típico entre 2 e 8mm. A alma é o condutor de corrente elétrica entre a peça e é quem fornece a maior quantidade de metal de adição, já que o revestimento do eletrodo tem também em alguns casos, essa função, mas a principal é de gerar escória e gases que protegem a atmosfera da região soldada e estabilizar o arco.

O processo de transferência do metal do eletrodo para a peça ocorre por gotas ou gotículas dependendo da intensidade de corrente. Nesta energia que gera o calor é formada uma poça de fusão, onde a mistura dos materiais do eletrodo, a peça ou material base forma uma mistura homogênea com a adição do material do arame do eletrodo, mais aos materiais do revestimento, que adicionam ligas e produtos químicos que atuam metalurgicamente ao banho formado a poça de fusão. Os metais do eletrodo e do material base têm que ter a compatibilidade das ligas. Após a mistura metalúrgica ocorrida na poça de fusão, o eletrodo avança para outro ponto e começa a solidificação de toda essa mistura, ocorrendo microscopicamente todos os processos metalúrgicos que podem influenciar no futuro da junta soldada. Este processo de soldagem está totalmente dependente das variáveis do processo, pois por se tratar de um processo manual, várias alterações podem afetar o seu sucesso.

Segundo Wainer *et al* [17], uma característica importante da soldagem com eletrodos revestidos que o diferencia dos demais processos semiautomáticos convencionais, é que a tensão de arco não é controlável, independente dos outros parâmetros, por três razões básicas:

- O controle da distância entre o eletrodo e a peça é realizado manualmente e não pode ser executado com grande precisão.
- A transferência dos glóbulos no arco está associada a variações consideráveis no comprimento efetivo do arco (e conseqüentemente na tensão).
- Maiores tensões são requeridas para operação normal, à medida que a corrente de soldagem é aumentada.

Algumas questões constantes são as variáveis de controle do processo de soldagem, que pode ser demonstrada na figura 2.6 [19], que discute o monitoramento e controle no processo de soldagem, onde descreve a operação de soldagem em quatro elementos básicos de controle: o próprio processo de soldagem, as variáveis de entrada de manipulação (incremento de energia, fornecimento de material, orientação de energia, distribuição de energia), variáveis de entrada de perturbações indesejadas (contaminações, localização de juntas, etc), e as variáveis de responsáveis pelo processo (geometria, propriedades mecânicas, microestrutura, descontinuidades na solda).

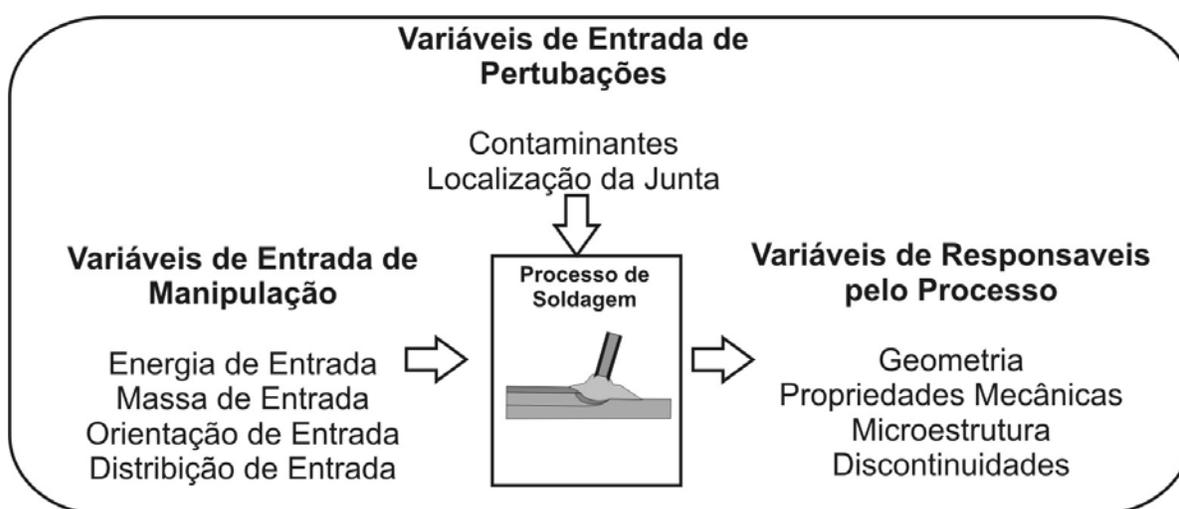


Figura 2.6: Esquema de Variáveis do Processo de Soldagem [19]

Como a utilização do processo de eletrodo revestido é totalmente manual, sem automação, logo é influenciado pelas variáveis de manipulação do processo que depende do operador, das alterações durante todo o processo e das variáveis operacionais que podem influir na soldagem, tais como:

- tensão de soldagem;
- corrente de soldagem;
- velocidade de soldagem;
- polaridade da corrente de soldagem;
- penetração da solda.

## 2.7 Fonte de soldagem

No processo do eletrodo revestido, o soldador precisa avançar o eletrodo na direção da solda na mesma velocidade em que o mesmo é consumido, procurando sempre manter o comprimento de arco constante.

Este processo de soldagem necessita de que seja fornecida uma temperatura com que ocorra a fusão tanto do eletrodo, como do metal base, recuperação ou revestimento. Para a fusão dos materiais é utilizada uma fonte de energia que podem ser: [20]

- um transformador, que fornece somente corrente alternada (CA);
- um retificador, transforma corrente alternada (CA) da rede elétrica e fornece corrente contínua (CC) com polaridade direta ou inversa;
- um gerador, que fornece de CA ou CC com polaridade direta ou inversa;
- um inversor, que fornece CC com polaridade direta ou inversa, e que pode ser estacionário ou portátil.

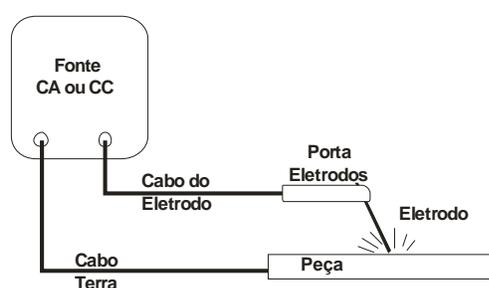


Figura 2.7: Esquema de Fonte de Energia por Soldagem.

A fonte fornece a quantidade necessária de energia para o processo, a energia fornecida passa pelo arame ou alma (do eletrodo), por sua vez é fundido através do arco elétrico, gerado entre a diferença de polaridade do metal base e o eletrodo, produzindo muito calor em uma descarga elétrica de baixa tensão e alta intensidade [17].

Nas situações de campo, onde não se tem rede elétrica próxima ou não se tem ponto de interligação, a solução é utilizar geradores movidos a motor, para gerar a energia necessária na soldagem, além de já existirem no mercado máquinas de solda já com geração própria de energia.

## 2.8 Tensão de soldagem

A tensão de soldagem tem influência no tipo do eletrodo, no acabamento da peça soldada. Como o processo é manual e dependendo do soldador, ele irá afastar ou aproximar a ponta do eletrodo da peça, essa variável do processo terá uma oscilação em todo o percurso de soldagem.

A tensão na soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido é dependente do comprimento do arco. Arcos longos produzem tensão alta e arcos pequenos produzem baixa tensão. Como uma regra geral, o comprimento do arco não deveria

exceder o diâmetro da alma do eletrodo, embora o comprimento menor que este valor para eletrodo com revestimentos espessos. Uma mão fixa do soldador é importante para prevenir flutuações da força elétrica que podem ser prejudiciais à soldagem [15].

## **2.9 Corrente de soldagem**

A corrente de soldagem é um dos parâmetros importantíssimos para a soldagem, pois é o fluxo de corrente vai dar a energia de soldagem necessária para a formação da poça de fusão e todo o aporte térmico necessário para a homogeneidade do processo.

A corrente de soldagem controla de forma bastante predominante todas as características operatórias do processo, o aspecto do cordão e as propriedades da junta soldada. Ela controla, de modo direto, a magnitude e a distribuição espacial da energia térmica disponível no arco elétrico e também a maior parte dos fenômenos que ali ocorrem. [17]

A intensidade de corrente é também o mais importante efeito controlador da penetração da solda, da largura e do reforço do cordão, além da diluição. [17]

## **2.10 Velocidade de soldagem**

É um dos parâmetros muito importante para a soldagem além de ser uma das variáveis para a análise do aporte térmico da soldagem. E mais uma variável que em processos manuais depende do soldador. Conseqüentemente, esse parâmetro pode influenciar no calor gerado pelo arco, assim como na penetração da solda e com isso em alguns pontos da estrutura da zona fundida e afetada pelo calor.

## **2.11 Polaridade da corrente de soldagem**

A polaridade está relacionada pela escolha na fonte de soldagem, de qual lado se colocará o eletrodo ou o aterramento da peça. Se colocar o eletrodo no positivo e a peça no negativo, terá uma polaridade inversa e o eletrodo no negativo e a peça no positivo, terá uma polaridade direta. Esta afetará diretamente a soldagem com o fornecimento maior de calor no eletrodo.

Nem todos os eletrodos podem ser utilizados com diferentes polaridades, mas essa mudança pode afetar diretamente na penetração, conforme é mostrado na figura 2.8.

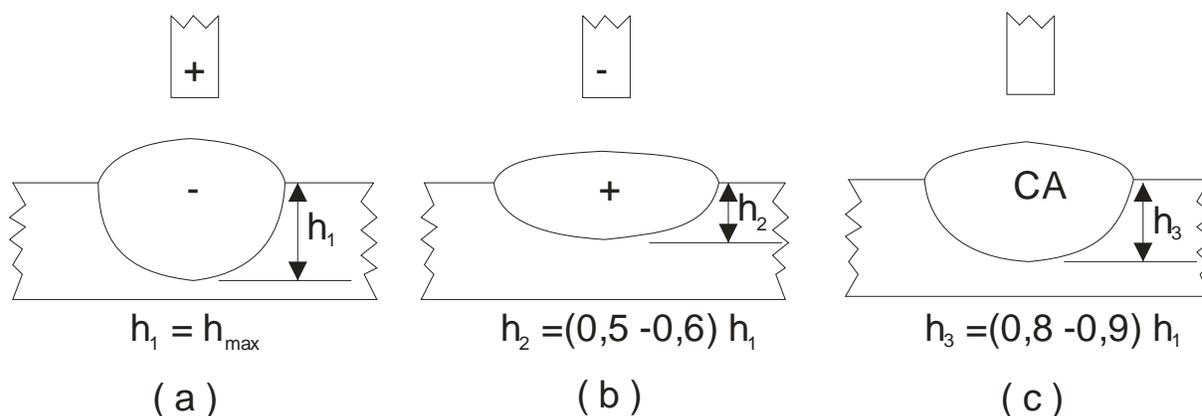


Figura 2.8: Influência da Polaridade e do tipo de corrente na penetração : (a) Polaridade Inversa (CC+), (b) Polaridade Direta (CC-) e (c) Corrente Alternada (CA)[29]

## 2.12 Penetração da solda

A penetração é muito importante para a estrutura da junta soldada, influenciada por algumas variáveis do processo, como a velocidade de soldagem, diâmetro do eletrodo, ângulo do chanfro, intensidade de corrente e a polaridade como propriedades essenciais e as propriedades dos fluxos e fundentes, extensão do eletrodo e a tensão usada que tem um efeito menor na penetração.



Figura 2.9: Três tipos de penetrações de soldagem em uma seção transversal

Segundo Okui apud [18] a figura 2.9 A representa o tipo de penetração simples, que tende a ocorrer em baixas correntes e comprimento do arco curto, já na figura 2.9 B o tipo de penetração é centralizado, que tende a ocorrer com altas correntes, onde o alto fluxo de plasma faz com que a poça de fusão fique profunda no centro, e a figura 2.9 C representa o tipo de penetração periférica que é observado quando ocorre um alto comprimento de arco, feito por um longo tempo.

Para um resumo dos fatores que influenciam numa boa penetração segundo Buzzoni [20], teremos:

- tipo de eletrodo;
- espessura da peça a ser soldada;
- intensidade de corrente;
- tensão no arco;
- polaridade;
- comprimento do arco;
- velocidade de avanço do eletrodo;
- tipo de entalhe usado.

Uma das observações que se devem ser vistas em um trabalho com solda em tubulação é a verificação do aporte térmico, se foi capaz de se ter uma boa penetração e se a qualidade da solda feita pode ser capaz de conferir à soldagem qualidades mínimas aceitáveis para a confiabilidade do processo, sabendo que os tubos soldados trabalharão compressões baixas, mas com alta necessidade de segurança, já que estamos falando de tubulações em áreas altamente habitadas.

### **2.13 Tipo de revestimento do eletrodo**

Os tipos de revestimentos dos eletrodos podem ser:

- revestimento celulósico;
- revestimento rútilico;
- revestimento básico;
- revestimento oxidante.

Os eletrodos revestidos mais usados para soldagem de tubulação são os com revestimentos celulósicos, pois segundo Fedele [21] falando do eletrodo tipo E 6010, disse que este eletrodo deposita um metal com menor resistência mecânica, mas com elevados valores de tenacidade quando comparados aos outros eletrodos celulósicos. Por isso, são os mais indicados para absorver tensões térmicas e mecânicas de soldagem, também provenientes da movimentação relativa dos tubos, garantindo a ausência de trincas na raiz.

A tenacidade está relacionada com a energia que o material pode absorver antes de se romper. Onde não está relacionada com a resistência a ruptura, pois segundo Okumura et al [22], mesmo que dois metais apresentem o mesmo valor limite de ruptura, suas tenacidades poderão variar consideravelmente, em função de sua composição química.

As características dos eletrodos celulósicos são:

- O alto teor de celulose no eletrodo proporciona um arco intenso e uma boa penetração em todas as posições.

- O alto teor de celulose produz uma escória fina cobrindo o cordão; embora a escória seja facilmente refundida, é recomendável removê-la antes de soldar o próximo cordão.
- O fino revestimento combinado com o arco penetrante possibilita que seja usada uma abertura menor na raiz, requerendo-se, portanto, menos material de adição para soldar a junta.
- A alta velocidade de solidificação do metal de solda permite realmente soldagem em todas as posições.

O revestimento tem função importantíssima para o processo de soldagem. Desde que o sueco Oscar Kjellberg descobriu o uso deste revestimento como formador de escória, vem-se cada vez mais se utilizando misturas químicas, que cada fornecedor de consumíveis tem suas formulas devidamente bem guardadas, mesmo que por normas elas já sejam bastante conhecidas, mas para certas utilidades existem os que se adaptam melhor a cada situação. Como em todas as normas existem faixas de proporções de produtos, o diferencial pode estar nessas variações possíveis, aliada com a experiência de cada fornecedor.

Segundo Okumura [22] as principais funções do revestimento são as seguintes:

- estabilizar o arco e promover a transferência das gotas de material fundente de modo estável;
- promover a formação da escória e de gases para proteger a poça de fusão e auxiliar o refino do metal depositado;
- adicionar elementos de liga ao metal depositado, nos casos necessários.

## 2.14 Junta soldada

Durante a soldagem as áreas ao redor do cordão de solda são afetados pelas diferenças de temperaturas geradas na soldagem, formando várias regiões, que dependendo da proximidade com o arco elétrico vão desde uma região fundida, a algumas afetadas com o calor produzido na fundição e aquelas que o calor afetado não provocaram nenhuma mudança.

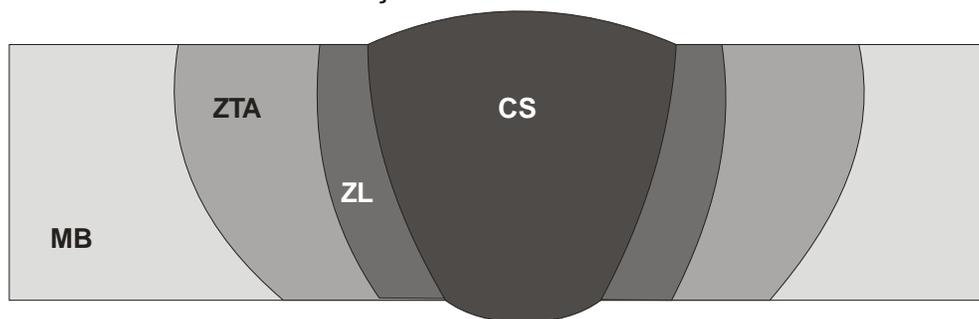


Figura 2.10: Esquema de um perfil das regiões de soldagem Perfil da soldagem

Estas regiões são representadas pela figura 2.10 e podem ser divididas em:

**Metal Base (MB):** Região que permanece com as características originais do material, pois esta mais afastada da solda e não sofre a influencia do calor gerado, pois não passou da temperatura de transformação do material.

**Cordão de Solda (CS):** Região onde ocorreu todo processo de fusão do material de solda depositado, foi a que recebeu o maior aporte térmico.

**Zona Termicamente Afetada (ZTA):** Região onde não ocorreu a fundição do material, sendo constituída do Metal Base (MB) que sofreu modificações estruturais de acordo com o aquecimento sofrido.

**Zona de Ligação (ZL):** Região onde houve a fundição do Material Base (MB) com o Material de Adição do eletrodo, sendo o ponto de interligação entre a região de soldagem e o Metal Base (MB).



Figura 2.11: Junta 005 logo após a soldagem.

## 2.15 Resistência à tração

As propriedades de tração de uma junta soldada estão relacionadas diretamente com as propriedades mecânicas do metal base, da zona termicamente afetada, do material de solda aplicado, da geometria junta de solda e de tensões que sejam atuantes nela.

Para a análise mecânica dos corpos de prova pela resistência à tração, é necessário que sejam medidas suas propriedades após a soldagem. O ensaio consiste em submeter esse corpo de prova a um esforço conhecido que tende a deformá-lo alongando. Para obter resultados que se possam ser comparados, ele deverá ser feito conforme algumas normas com dimensões e formas pré-estabelecidas.

Este corpo de prova é fixado na máquina de ensaio que irá aplicar esforços de uma forma crescente e alinhada na direção axial, para que sejam feitas as medições dos esforços e deformações respectivos, sendo levado até a ruptura, podendo assim ser plotado um gráfico e as cargas a que este corpo de prova poderá suportar.

Se o corpo de prova tracionado for só até o seu limite de escoamento, sofrerá um aumento de seu comprimento, mas se for cessado a força aplicada, ele voltará às suas dimensões originais, pois o material estará em seu limite de elasticidade. Prosseguindo com as forças de tração do teste, o metal continuará a ser alongado e atingirá um ponto além do qual não mais retornará as suas dimensões originais, extrapolando assim seu limite de elasticidade. Assim esse ponto é definido como o limite de escoamento. Com a continuidade da aplicação da força o metal excede esse limite de escoamento e continuará a se deformar permanentemente, não voltando mais a suas dimensões originais, chegando finalmente a um ponto em que o material não conseguirá se deformar mais e a carga aplicada atinge o seu valor máximo, definindo-se esse ponto como o ponto em que o corpo de prova atinge a sua carga máxima de tração. Prosseguindo o teste, ele chegará ao final com a redução de área e a ruptura final do corpo de prova, e podendo assim chegar aos gráficos e tabelas finais.

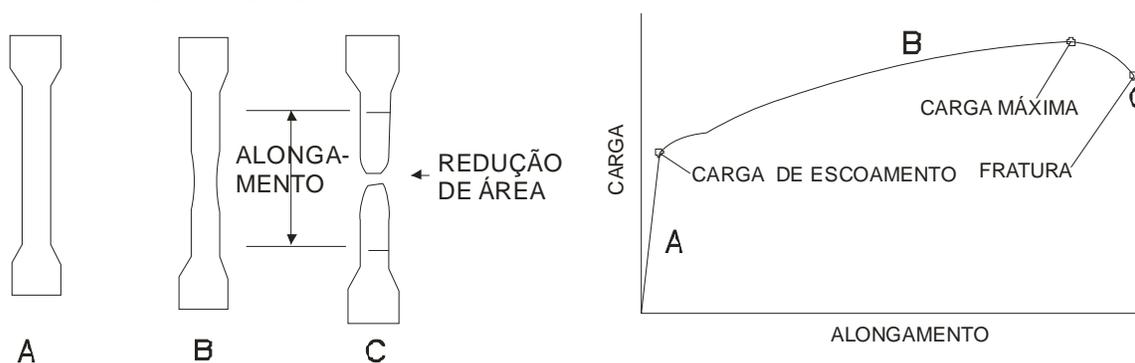


Figura 2.12: Curva gerada com os dados do ensaio de Tração.

As propriedades mecânicas, que podem ser obtidas do ensaio de tração, são:

- Limite de resistência (LR), que é a tensão máxima suportada pelo corpo de prova;
- Limite de escoamento (LE), que é a tensão que marca a transição do corpo de prova da zona de deformação elástica para a zona de deformação plástica;
- Limite de escoamento convencional ( $L_n$ ), que é calculado pelo gráfico tensão-deformação, quando não é possível calcular diretamente o limite de escoamento;
- Alongamento total do corpo de prova ( $\epsilon$ ), é expresso em %;

- Estricção ( $\varphi$ ), que é expressa em %, calcula a diminuição da seção transversal do corpo de prova.

Em juntas soldadas, a resistência à tração e à ductilidade do metal da solda são, na maioria dos casos, superior ao do metal base que está sendo soldado, desde que a solda seja isenta de defeitos e se respeite o procedimento de solda adequado ao serviço.

## 2.16 Dureza

Os equipamentos de análise de dureza usam equipamentos de penetração correlacionando assim a deformação à resistência do material.

Dos ensaios de dureza mais comuns estão os Brinell, Rockell ou Vickers, que dependendo da aplicação são selecionados, tendo em alguns casos tabelas comparativas de valores.

O penetrador do ensaio de dureza Vickers (HV) é uma pirâmide de diamante de base quadrada, que por ser de diamante é teoricamente indeformável. Sendo a dureza Vickers bastante usada em aplicações de microdureza, podendo determinar a dureza de constituintes individualmente ou de materiais frágeis.

## 2.17 Microestrutura da região soldada

As propriedades mecânicas como dureza, resistência mecânica e tenacidade em um cordão de solda podem ser determinadas pela microestrutura formada com a solda, que depende de alguns fatores como a composição química, ciclagem térmica, que tem a ver com o procedimento aplicado, tipo e quantidade de inclusões não metálicas.

## 2.18 Classificação da microestrutura do cordão de solda (CS).

A classificação da microestrutura da região do Cordão de Solda (CS), pelo *International Institute of Welding (IIW)* pode ser classificada por [17],[23],[24]:

Ferrita primária (*primary ferrite*) = PF – Pode ocorrer em ferrita de contorno de grão (*grain boundary ferrite*) = PF(G) ou como ferrita poligonal intergranular (*intergranular polygonal ferrite*) = PF(I) – são os primeiros produtos a se formarem na decomposição da austenita.

Ferrita Acicular (*acicular ferrite*) = AF – é constituída por finas ripas de ferrita com cementita entre essas ripas, que nucleiam internamente aos grãos da austenita primária.

Ferrita com fase secundária (*ferrite with second phase*) = FS – que pode ocorrer de duas maneiras:

Ferrita com Segunda Fase Alinhada (*ferrite with aligned second phase*) – FS(A): Microconstituente formado de grãos grosseiros que crescem ao longo de um plano, formando duas ou mais ripas de ferrita paralelas.

Ferrita com Segunda Fase Não Alinhada (*ferrite with non aligned second phase*) – FSF(NA): Formada por ferrita circundando microconstituintes ou ripas de ferrita acicular. Não se apresenta em forma paralela.

Ferrita de Widmanstätten (side plate) – FS (SP): Lamelas ou ripas laterais que são nucleadas nos contornos de grão da austenita primária e que crescem ao longo de planos bem definidos da matriz. [9].

Bainita : Microconstituente dividido em Superior (*upper bainite*) FS(UB) e Inferior (*lower bainite*) FS(LB), que conforme Alé, Jorge & Rebello [25], dependendo do tamanho de grão apresentado pode ter uma boa resistência ao mecanismo de fratura por clivagem na ZTA.

Martensita (*martensite*) – M: Microconstituente formado como produto final de transformação da austenita sob condições de alta taxa de resfriamento e elevado teor de carbono. Apesar do alto valor da dureza normalmente apresentado e consequente fragilidade, conforme Alé, Jorge & Rebello [25], o auto revenimento propiciado pelo aumento da temperatura na ZTA pode melhorar a resistência mecânica desta fase.

Agregado Ferrita-Carboneto (*ferrite carbide aggregate*) – FC: Microconstituente com estrutura fina de ferrita e carbonetos, incluindo perlita e ferrita com interfaces de carboneto.

Tabela 2.1: Constituintes Microestrutural do Cordão de Solda (CS) [23]

| Constituintes                         |                                 | 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 de Ferrita-Carboneto         |                                 | FC     |
| Martensita                            |                                 | M      |

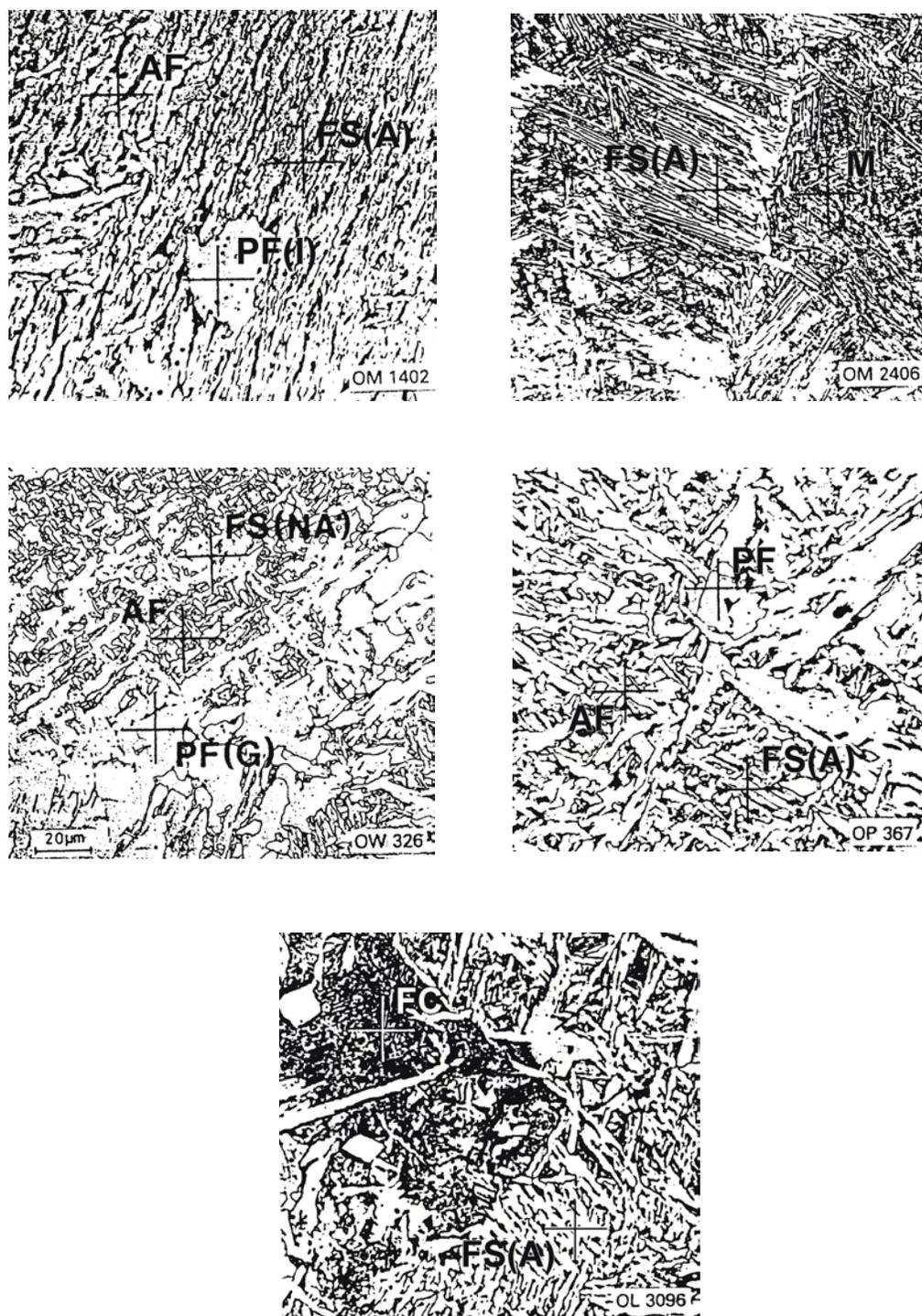


Figura 2.13: Microestrutura do Cordão de Solda em aços ferríticos. [23]

### 2.19 Classificação da microestrutura da zona termicamente afetada.

A Zona Termicamente Afetada (ZTA), por se tratar de uma região onde sofreu aquecimentos e resfriamentos, possui propriedades diferentes tanto do Metal Base

(MB) de onde se originou como do próprio metal de adição que é formado no Cordão de Solda (CS). Com essas características ela gera uma região de grãos grosseiros procedentes do aporte térmico dado pelo processo de soldagem.

A Zona Termicamente Afetada pode ser normalmente dividida em Regiões de Grãos Grosseiros (RGG), Regiões de Grãos Finos (RGF), Regiões Intercríticas (RI) e Regiões Subcríticas (RS).[26]

Região de Grãos Grosseiros (RGG): é uma região onde pode ocorrer fragilização dependendo do tipo de processo e do Material Base (MB) empregado, atinge uma temperatura entre 1100°C e 1400°C produzindo assim um crescimento de grãos. Sendo no caso de tubulação a região de maior fragilidade.

Região de Grãos Finos (RGF): é uma região que é submetida a temperaturas de 900 °C a 1100°C, onde os grãos são mais finos.

Região Intercrítica (RI): é uma região que tem uma maior fragilidade, podendo ter uma variedade muito grande de microestrutura em um espaço muito pequeno, sendo difícil até de distingui-la da RS.

Região Subcrítica (RS): é uma região onde está abaixo da temperatura de transformação, sofrendo os efeitos combinados do aquecimento e de tensões geradas com a solda, levando assim a uma possível fragilização.

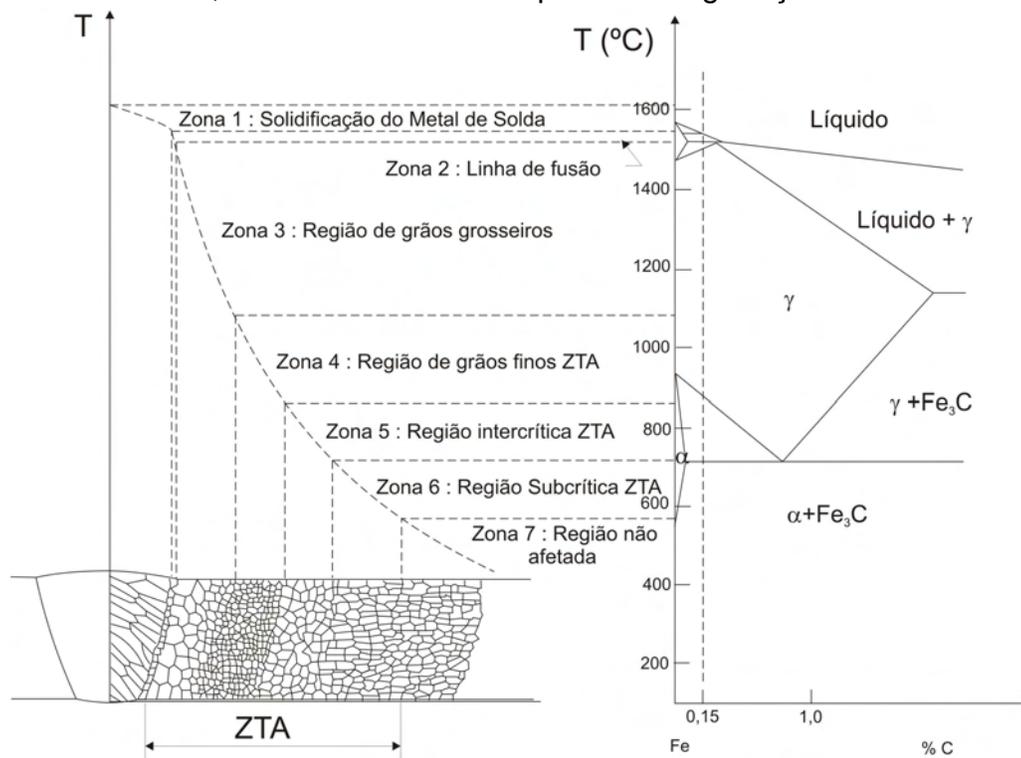


Figura 2.14: Esquema de Caracterização da Região soldada.[27]

Todos os conteúdos deste capítulo influenciaram para o estudo, junto ao planejamento de soldagem que teve o auxílio de uma EPS (Especificação do

Procedimento de Soldagem) específica para Eletrodo Revestido e de um profissional qualificado. Onde utilizando os aços ABRL com soldagem por eletrodo revestido utilizando a variação do parâmetro de corrente gerou um estudo investigativo para conhecer as influências deste parâmetro nas propriedades mecânicas das juntas soldadas.

### **3. Materiais e Métodos**

Neste capítulo serão descritos os materiais usados e métodos para se alcançarem os resultados do desenvolvimento do trabalho. Sendo utilizadas como referências para a execução as literaturas e normas utilizadas em soldagem de dutos.

### 3.1 Metal base

O material usado para estudo foi um tubo com Certificado de Inspeção N° 0050519205 da Vallourec & Mannesmann com dimensões de 88,90 mm de diâmetro externo por 5,5 mm de espessura da parede, sendo um tubo sem costura laminado a quente, com ponta lisa. O tubo atende a qualificação das normas API-5L, ASTM-A-106 e ASTM-A-53 com grau B, sendo denominado de Tri-norma, pois ele mantém as mesmas aplicações de cada norma específica, sendo tanto usado na indústria em geral, como na de petróleo e gás, aumentando assim sua área de atuação.

Tabela 3.1 Propriedades Químicas do Material Base

| Composição Química (%) |      |      |       |       |      |      |      |      |       |      |       |        |
|------------------------|------|------|-------|-------|------|------|------|------|-------|------|-------|--------|
| Corrida/Lote           | C    | Mn   | P     | S     | Si   | Ni   | Cr   | Mo   | Al    | Cu   | Ti    | Ca     |
| 82586/0006132739       | 0,18 | 0,48 | 0,018 | 0,007 | 0,21 | 0,01 | 0,06 | 0,01 | 0,023 | 0,01 | 0,001 | 0,0021 |

Tabela 3.2 Propriedades Mecânicas do Material Base

| Ensaio Mecânico  |                        |         |         |       |
|------------------|------------------------|---------|---------|-------|
| Corrida/Lote     | Área(mm <sup>2</sup> ) | Le(Mpa) | Lr(Mpa) | AL(%) |
| 82586/0006132739 | 113,1                  | 336     | 466     | 35    |

Os dados das tabelas 3.1 e 3.2 foram obtidos pelo certificado de qualidade do produto do fornecido pelo fabricante dos tubos.

### 3.2 Metal de adição

O eletrodo escolhido foi E-6010 do tipo celulósico da norma AWS/ASME SFA 5.1, por ser o eletrodo mais comum, e principalmente por ser o mais utilizado em campo, pela sua facilidade de estocagem e manipulação.

Tabela 3.3 - Propriedades Mecânicas do Eletrodo E-6010

| Eletrodo | L <sub>E</sub> | L <sub>R</sub> | AL  | TENACIDADE  |        |
|----------|----------------|----------------|-----|-------------|--------|
|          |                |                |     | IMPACTO (J) | t (°C) |
| (AWS)    | (MPa)          | (MPa)          | (%) |             |        |
| E-6010   | 331            | 414            | 22  | 27          | -29    |

Fonte: Catálogo de eletrodos Gerdau.

### 3.3 Preparação das juntas

Para a soldagem dos cupons de prova foram executadas as juntas conforme Norma API 1104.

Na execução foram cortados os tubos em seções de 150 mm e foram usinados para colocação do ângulo da junta com o nariz da raiz determinados para a soldagem, cujas dimensões são mostradas no desenho da figura 3.1.

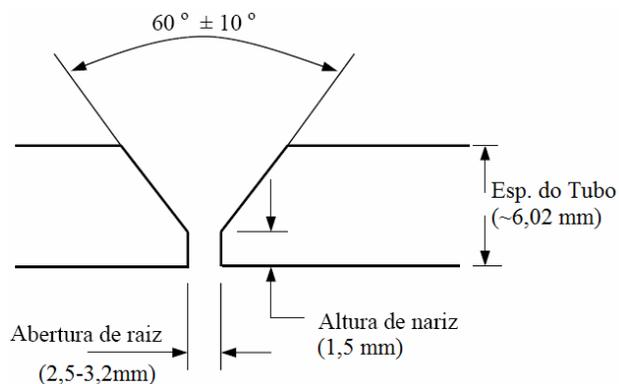


Figura 3.1: Desenho da junta utilizada nos cupons de prova.

### 3.4 Equipamento de soldagem

Na soldagem foi utilizada uma fonte multi-processo modelo Pro 3200 Evolution, da marca Kemppi, instalada no SENAI do Cabo de Santo Agostinho – PE com 320 A e 100% do ciclo. Operada por painel segundo figura 3.2, onde pôde ser ajustada a corrente desejada, para o estudo. Esta fonte disponibiliza várias opções de corrente de soldagem. Neste estudo optou-se pelo controle de ajuste da corrente de soldagem em valores pré-estabelecidos para o estudo, com base na especificação do eletrodo.



Figura 3.2: Máquina Kemppi Pro 3200

### 3.5 Montagem das juntas

A montagem das seções dos tubos para a confecção das juntas foi executada com o acoplamento feito por ponteamento, usando um afastamento de 1,6 mm entre as duas seções do tubo e em conformidade com a norma API 1104, com desalinhamento entre as seções dos tubos não excedendo 1,6 mm, ficando os cupons montados com comprimento total de 300 mm.

O ponto de solda, dos ponteamentos, penetrou a raiz fundindo o nariz da junta em ambas as peças. Sendo mostrado na figura 3.3 detalhes da montagem da junta.

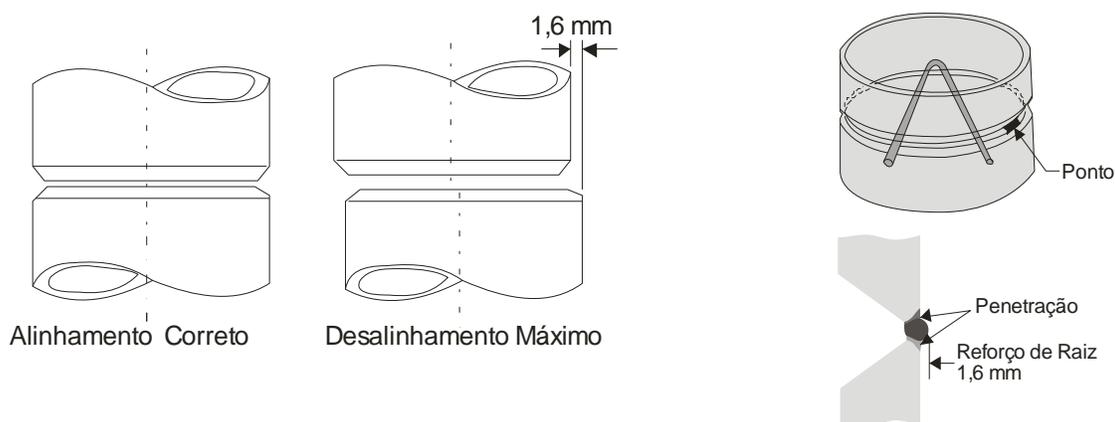


Figura 3.3: Detalhes de Montagem das Juntas.[28]

### 3.6 Montagem e fixação dos tubos

Os tubos foram montados e fixados à bancada em uma altura que se pudesse ter toda a mobilidade para a execução da soldagem, diferente do campo, onde os tubos estão lançados perto da vala e sobre pequenos apoios. Mas a soldagem foi executada na posição plana (5G), igual a existente no campo, melhorando a posição do soldador, diminuindo assim as possíveis variáveis impostas pelo operador.

Os tubos foram inicialmente limpos por uma máquina rotativa, para a total remoção de todas as impurezas que pudessem afetar na qualidade da solda.

### 3.7 Procedimento de soldagem

O objetivo do estudo é caracterizar o sistema de soldagem em campo. Desta forma foi utilizada a soldagem na posição plana (5G) com soldagem descendente conforme figura 3.4, como é feita em campo, em uma soldagem de tubulação de gasoduto, tentando diminuir o máximo os parâmetros de dificuldade para o soldador, em uma possível posição inclinada (6G) poderíamos colocar um grau de dificuldade, que não é objeto do estudo para esse trabalho.



Figura 3.4: Soldagem dos Cupons na posição 5G.

Os cupons de prova foram executados utilizando o ajuste do painel da máquina Kemppi, colocando cada corrente desejada e aplicando a soldagem para cada uma com um mesmo soldador qualificado de acordo com o API 1104 e ASME Seção IX, com habilidade de campo de várias obras. As soldagens foram executadas em 9 corpos de prova variando sua corrente, colocando na faixa do eletrodo para verificar as consequências de uma soldagem com máquinas com problema de regulagem ou variações na hora de soldar.

O serviço de limpeza da região a ser soldada teve seus cuidados redobrados, assim como qualquer ponto que pudesse provocar alguma inclusão de defeito na

junta soldada. O afastamento da junta foi verificado, para assim iniciar a soldagem do primeiro passe de cada cupon.

A soldagem foi disposta segundo a figura 3.5, iniciando pelo passe de raiz seguindo assim as camadas subseqüentes com o primeiro passe a quente, segundo e terceiro passe com suas respectivas limpezas de escorias, com a finalização dos passes de acabamento e mais limpeza. Configurando assim uma soldagem de múltiplos passes.

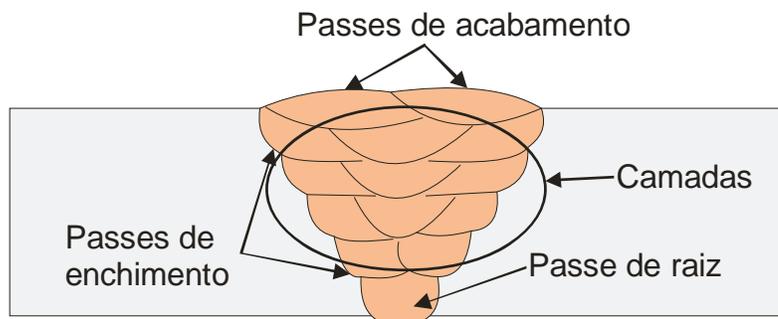


Figura 3.5: Soldagem de múltiplos passes .

Na tabela 3.4, abaixo temos as faixas para cada cupon de prova executado.

Tabela 3.4 Correntes usadas nos cupons de prova

|           | Correntes (A) |          |          |          |            |
|-----------|---------------|----------|----------|----------|------------|
|           | raiz          | 1º passe | 2º passe | 3º passe | acabamento |
| Junta 001 | 90            | 90       | 90       | 90       | 90         |
| Junta 002 | 90            | 100      | 100      | 100      | 100        |
| Junta 003 | 90            | 140      | 140      | 140      | 140        |
| Junta 004 | 100           | 90       | 90       | 90       | 90         |
| Junta 005 | 100           | 100      | 100      | 100      | 100        |
| Junta 006 | 100           | 140      | 140      | 140      | 140        |
| Junta 007 | 140           | 90       | 90       | 90       | 90         |
| Junta 008 | 140           | 100      | 100      | 100      | 100        |
| Junta 009 | 140           | 140      | 140      | 140      | 140        |

O eletrodo utilizado tinha a faixa de corrente de 80 a 140 A, utilizamos inicialmente essa faixa, mas não conseguimos executar com 80 A uma solda de qualidade, ficando apagando o arco e com dificuldade de soldar, sendo assim elevado para 90 A a corrente mínima de soldagem.

Antes do início da soldagem, foram checadadas as condições dos equipamentos, cabos de solda, alicates, entre outros. Sempre visando também que a soldagem dos

corpos de provas fosse executada procurando-se não fugir das condições reais da construção.

Todos os cupons de provas foram devidamente identificados, visando preservar sua rastreabilidade durante a soldagem até a execução final de todos os ensaios. Sendo efetuada a inspeção visual de cada junta e encaminhada para os ensaios.

### 3.8 Corpos de prova

A confecção dos corpos de prova foi feita cortando-se os cupons soldados em três pedaços, conforme mostrado na figura 3.6, formando assim os corpos de prova da série A, B e C, retirados a partir do ponto inicial de soldagem (ângulo  $0^\circ$ ), sendo assim os pontos de melhor acesso do soldador, tentando com isso diminuir qualquer ponto de defeitos gerado pelo operador.

Os cortes foram feitos com máquina de serra de fita, proporcionando um corte sem gerar calor suficiente para não ocorrer nenhum tipo de mudança na estrutura dos corpos de prova. Depois do corte, foram usinados numa fresadora para chegarem às dimensões finais, exigidas pelos testes subseqüentes.

Para o estudo foram retirados de cada junta executada 3 (três) corpos de prova para a execução dos testes. Os corpos de prova para a micrografia, macrografia e micro-dureza, e de tração.

Corpos de prova para a Micrografia, Macrografia e Microdureza foram únicos e retirados de uma seção do tubo soldado e sendo denominado com a numeração das juntas, recebendo a denominação A conforme figura 3.7, ficando os corpos de 1A até 9A, correspondendo a cada junta. Já para os dos testes de tração foram feitos dos jogos de corpos de prova com denominações de 1B a 9B e 1C a 9C, respectivamente a cada junta.

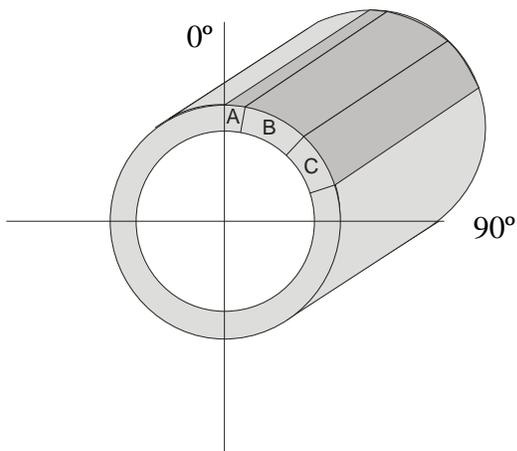


Figura 3.6: Retirada dos Corpos de Prova



Figura 3.7: Corpo de prova da série A

### 3.8.1 Corpo de prova para ensaio de micrografia, metalografia e microdureza.

A preparação metalográfica foi efetuada com o lixamento até o polimento dos corpos de prova seguindo as granulometrias das lixas na sequência de 100, 200, 400, 600 e 1200. Logo após o polimento, que foi realizado até a retirada dos riscos restantes do lixamento, para que se possa ter uma imagem no microscópio de boa qualidade. Foi utilizada pasta abrasiva de diamante com granulometria de 1  $\mu\text{m}$ . Ao término do polimento, o ataque químico foi realizado para a micrografia com Nital com 2% de concentração em um tempo máximo de 15 segundos. Para a macrografia o ataque foi com o Nital em uma concentração maior, chegando a 10 % do volume, e a duração de 60 segundos, tendo o cuidado para não queimar muito em ambas as fases para que não ofuscasse nos microscópios.

### 3.8.2 Corpo de prova para ensaio de tração

O procedimento realizado foi de executar os corpos de prova de tração conforme norma ASME Seção IX e demonstrado na figura 3.8.

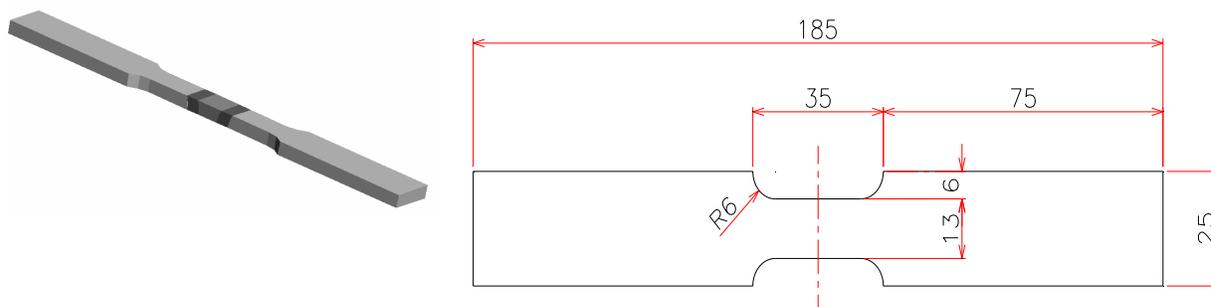


Figura 3.8: Corpo de prova de Tração com as dimensões para o ensaio de tração de acordo com a norma ASME Sec IX ed. 2003.

### 3.9 Ensaio de microdureza

Para as condições de microdureza foram estabelecidos os parâmetros de carga em 980 nN, com penetrador Vickers, com tempo de permanência de carga em

30 segundos para todas as amostras. Executados no durômetro da marca Shumadzu, modelo HMV 2T (figura 3.9).

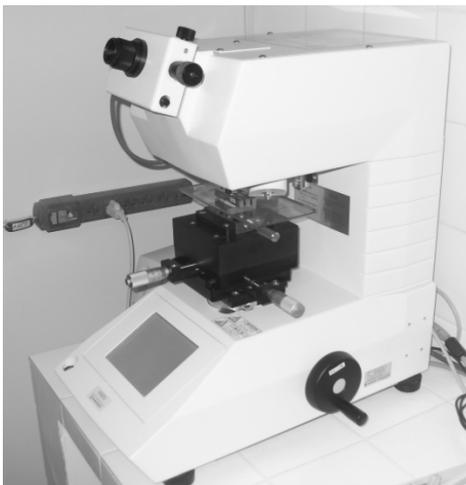


Figura 3.9: Fotografia do durômetro.

Para cada corpo de prova foram feitas 15 (quinze) medições, estabelecendo que foi traçada, uma linha de centro no meio do cordão de solda, sendo usada somente uma das partes que foi orientada por uma linha na parte central do corpo de prova com duas outras linhas paralelas acima e abaixo com 1 mm de distância para o final da espessura do material ensaiado, conforme mostrado na figura 3.10.

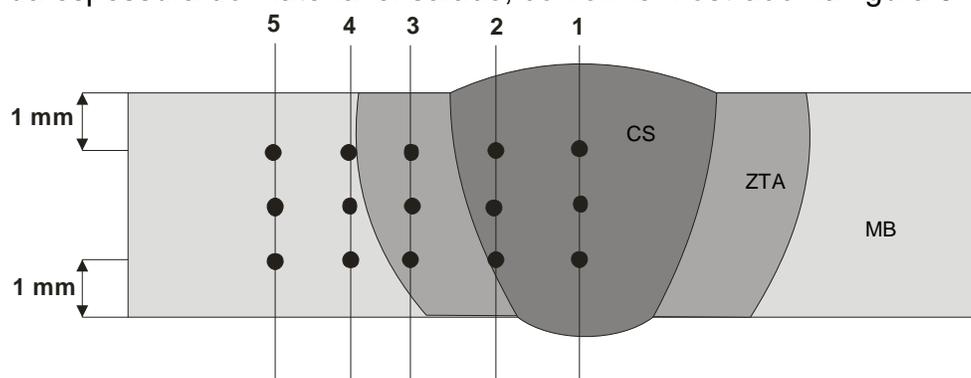


Figura 3.10: Pontos de aquisição de Microdureza

### 3.10 Ensaio de tração

Os ensaios de tração foram executados conforme a ASME Seção IX, em uma máquina de tração eletromecânica de marca EMIC com capacidade de 100 kN, a uma velocidade de deformação de 3 mm/min com os dados gerados no próprio computador que controla o equipamento conforme figura 3.11.



Figura 3.11: Máquina de tração EMIC Linha DL 10.000

Os resultados avaliados foram os da tensão limite de escoamento a 2% de deformação, os da tensão máxima e de alongamento.

Com as análises dos resultados encontrados através dos métodos descritos, pôde-se fazer o estudo investigativo do procedimento proposto. Sempre visando as dificuldades do soldador no campo.

## **4. Resultados e Discussões.**

#### 4.1 Análise de microdureza

A análise dos dados da tabela 4.1 da microdureza desvendou resultados não esperados, que pudesse acontecer na soldagem com baixas correntes registrando durezas maiores que 350 Hv, o que comprometem a resistência às trincas a frio nas juntas soldadas [12], podendo ocasionar após algumas horas trincas nas soldas. Sendo essa possibilidade afetada ainda mais pelo teor de carbono, logo foi calculado o teor de carbono equivalente da liga do aço do tubo utilizado pelo método do *Internacional Institute of Welding – IIW* (fórmula 1 abaixo). Calculando-se chegou a um valor de aproximadamente 0,28, o que leva ao aço ter boa soldabilidade e baixa temperabilidade [12].

$$CE = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15 \text{ (fórmula 1)}$$

Com esses resultados leva a se verificar os outros testes o fator que estes valores podem afetar com o estudo em questão. Quanto a soldabilidade do aço, sua tenacidade depois de soldado e o possível aparecimento de algumas trincas.

Nas maiores correntes pôde-se verificar que as durezas foram muito mais baixas. Onde se pode acompanhar nos gráficos subseqüentes por cada junta, executado conforme figura 3.9.

Tabela 4.1: Resultados do Ensaio de Microdureza.

| Pontos |        |             |        |             |        |             |        |             |        |             |
|--------|--------|-------------|--------|-------------|--------|-------------|--------|-------------|--------|-------------|
| CP     | 1      | Desv. Padr. | 2      | Desv. Padr. | 3      | Desv. Padr. | 4      | Desv. Padr. | 5      | Desv. Padr. |
| 1A     | 291,67 | 39,25       | 356,00 | 62,22       | 353,00 | 66,19       | 258,33 | 57,19       | 255,00 | 29,21       |
| 2A     | 341,00 | 54,53       | 252,00 | 26,51       | 276,67 | 44,19       | 195,00 | 8,89        | 204,00 | 8,72        |
| 3A     | 217,00 | 43,21       | 243,33 | 45,76       | 239,00 | 52,85       | 221,67 | 22,59       | 190,67 | 33,23       |
| 4A     | 218,33 | 20,21       | 222,00 | 15,39       | 213,33 | 27,54       | 189,33 | 4,73        | 213,33 | 27,54       |
| 5A     | 147,67 | 9,07        | 211,67 | 27,06       | 200,33 | 13,05       | 190,00 | 3,61        | 195,67 | 11,02       |
| 6A     | 207,00 | 22,65       | 213,00 | 20,22       | 198,33 | 12,86       | 170,33 | 9,61        | 165,33 | 2,52        |
| 7A     | 183,00 | 15,87       | 193,33 | 11,50       | 170,67 | 6,03        | 153,33 | 14,57       | 162,67 | 6,81        |
| 8A     | 183,00 | 10,82       | 183,67 | 8,96        | 182,33 | 23,54       | 162,00 | 4,58        | 160,67 | 2,52        |
| 9A     | 167,33 | 16,62       | 172,33 | 16,62       | 167,00 | 3,00        | 157,33 | 16,17       | 166,33 | 5,69        |

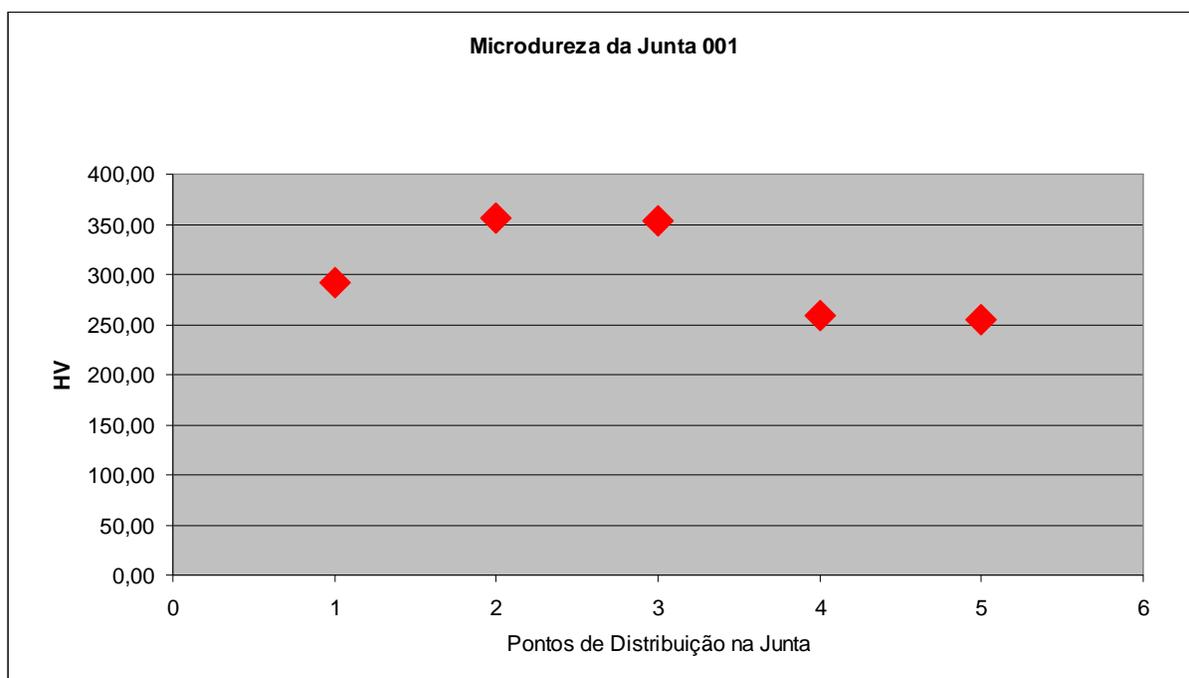


Gráfico 4.1: Microdureza da Junta 001

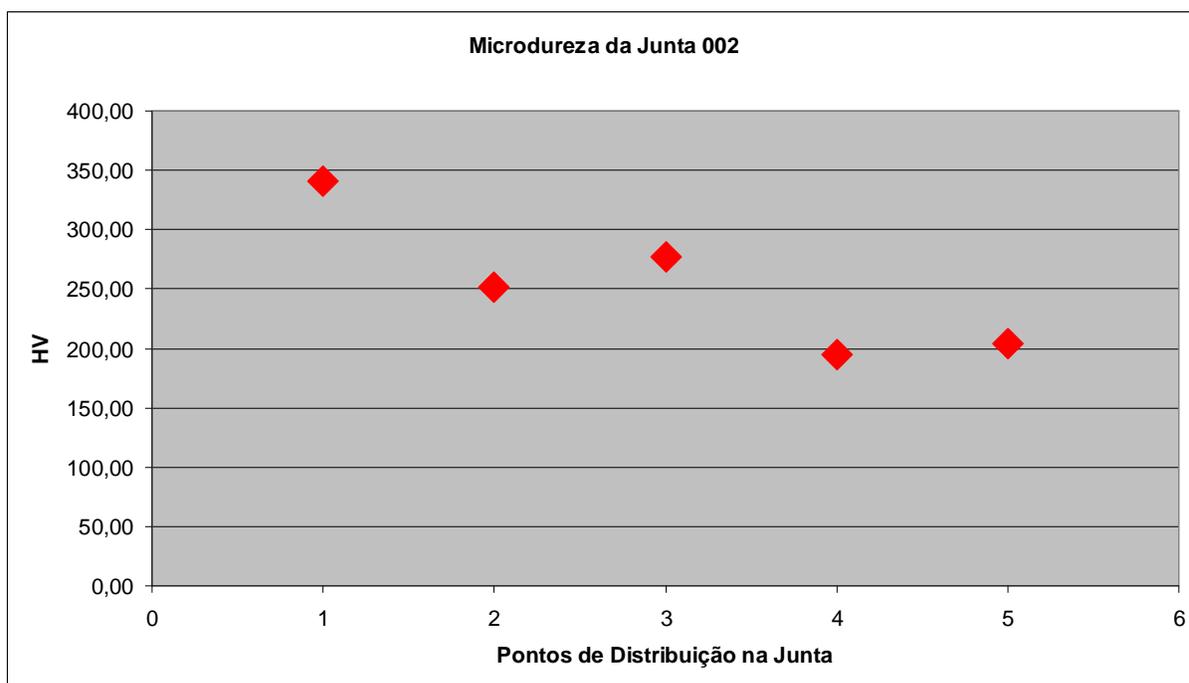


Gráfico 4.2: Microdureza da Junta 002

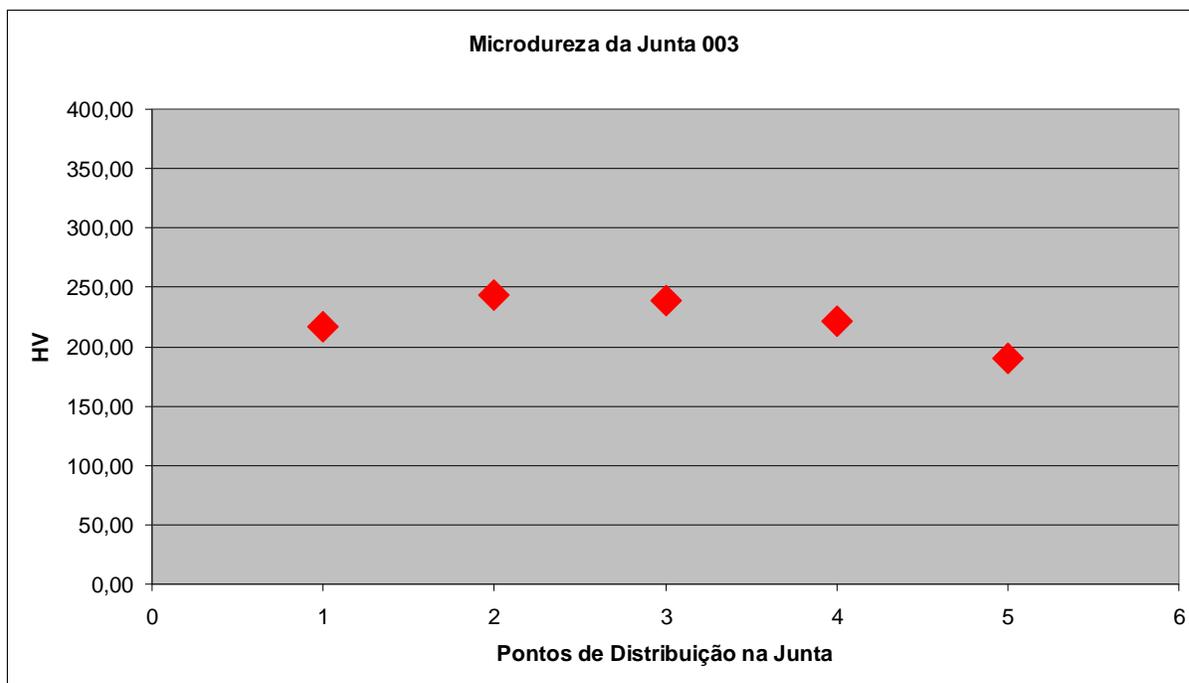


Gráfico 4.3: Microdureza da Junta 003

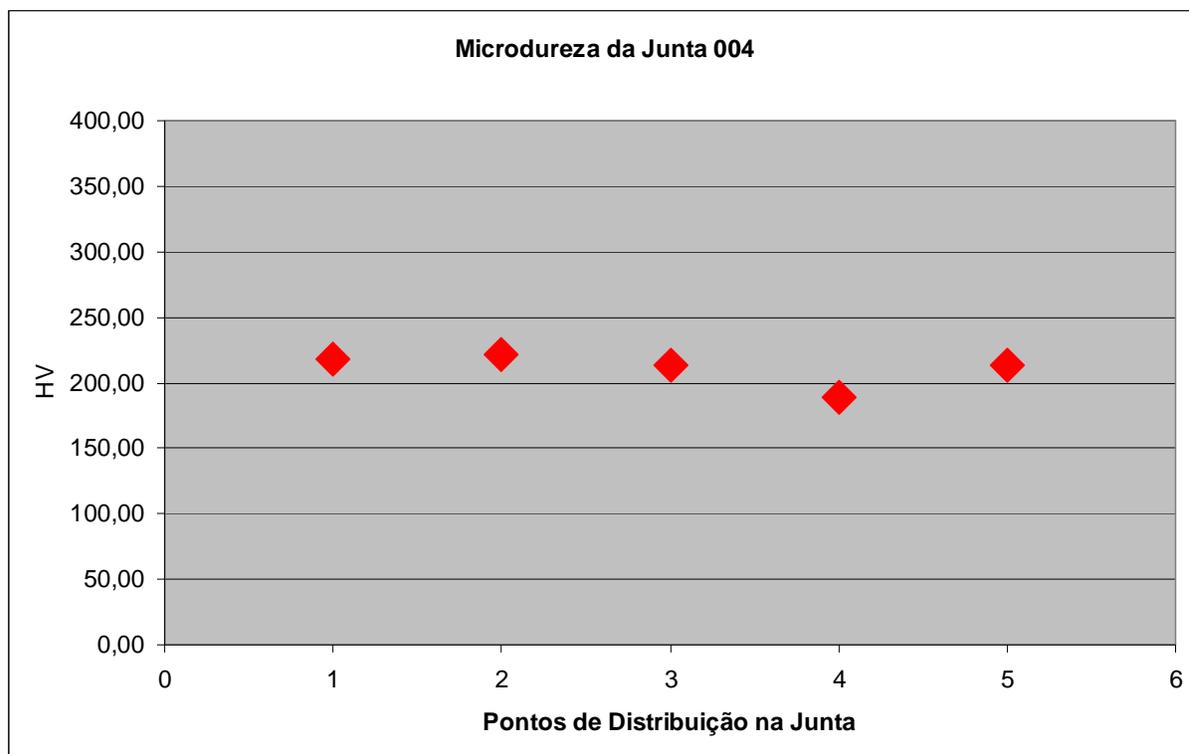


Gráfico 4.4: Microdureza da Junta 004

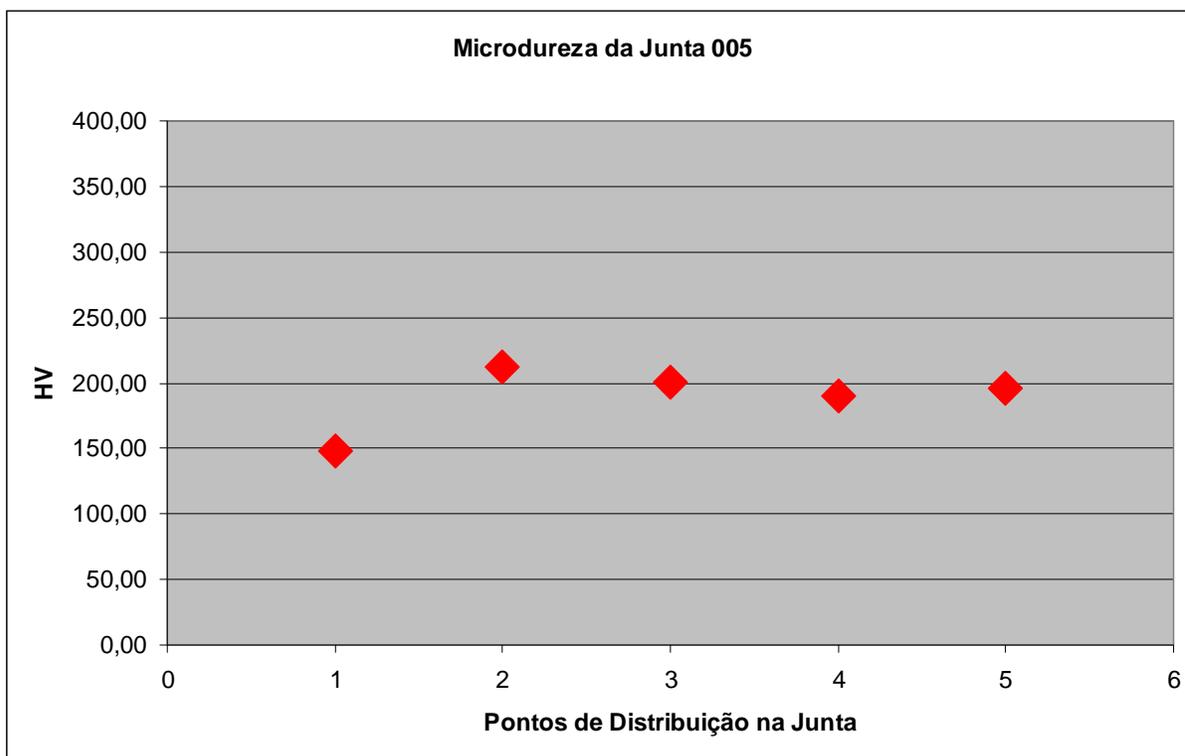


Gráfico 4.5: Microdureza da Junta 005

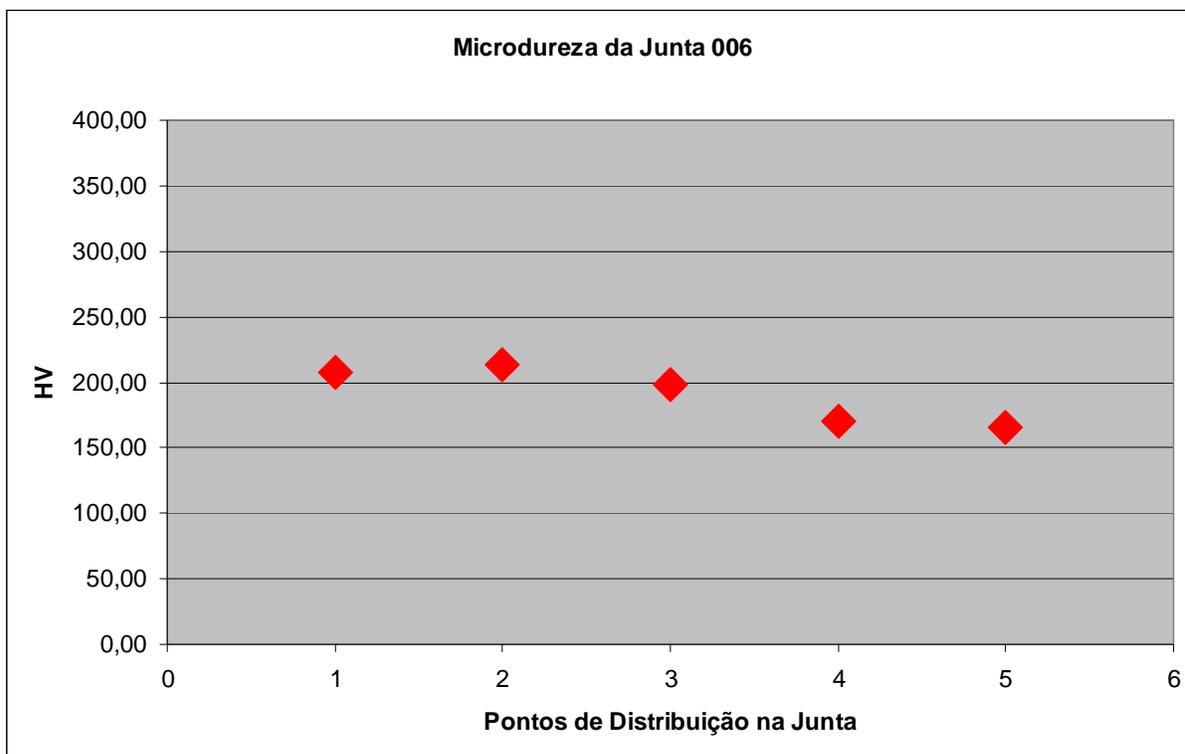


Gráfico 4.6: Microdureza da Junta 006

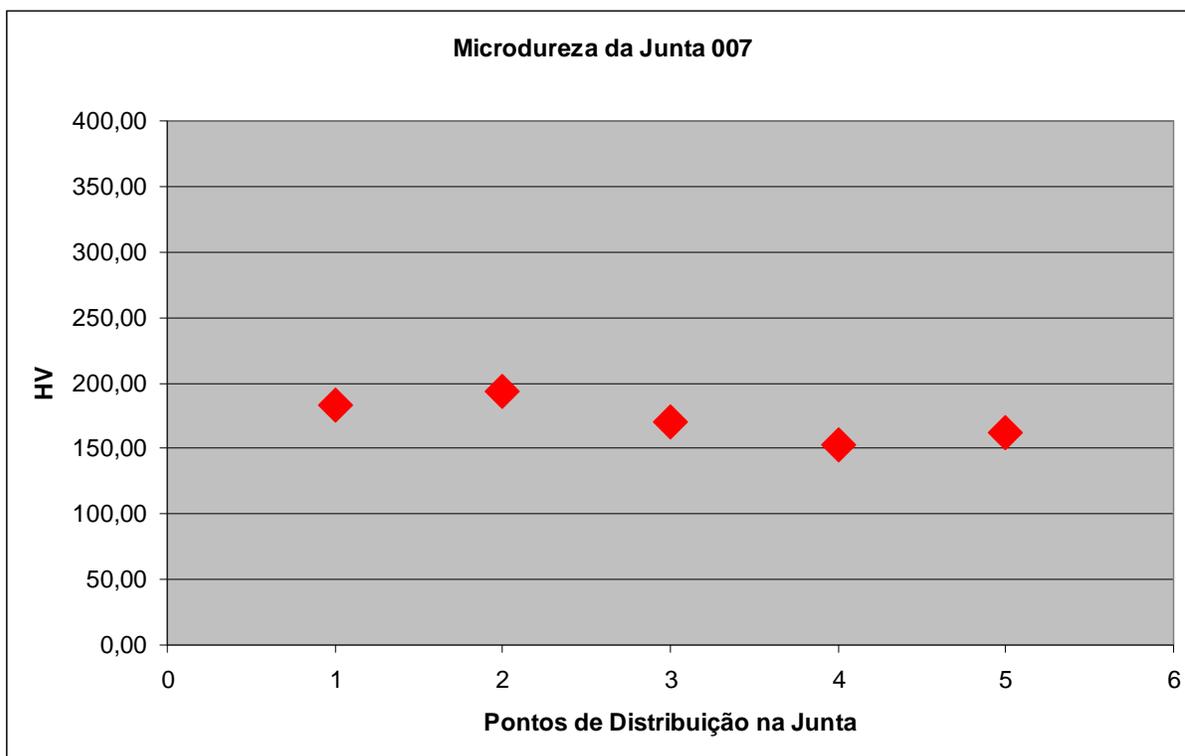


Gráfico 4.7: Microdureza da Junta 007

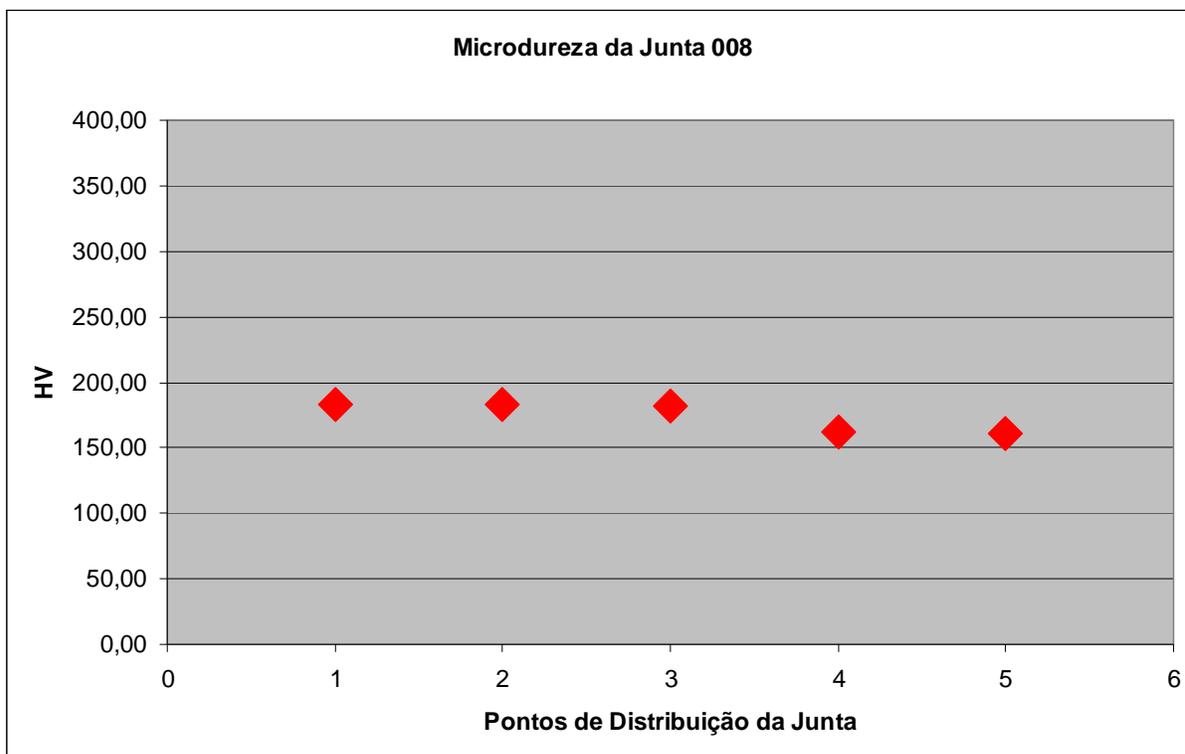


Gráfico 4.8: Microdureza da Junta 008

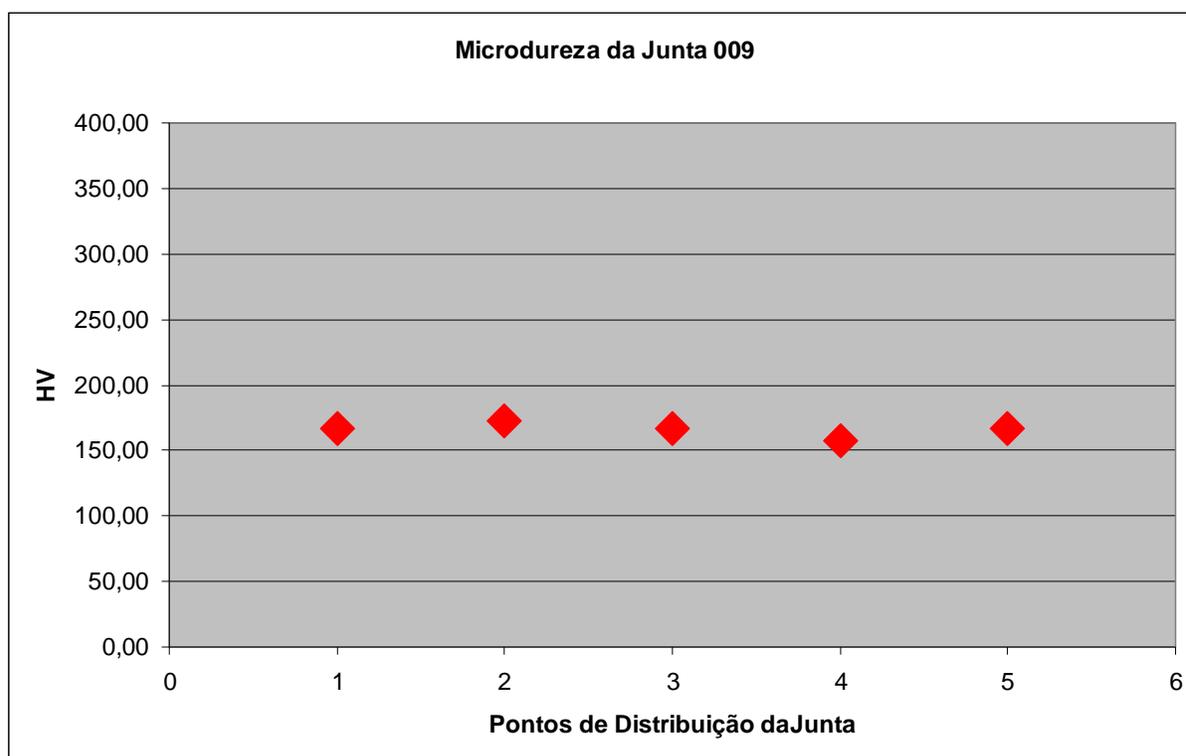


Gráfico 4.9: Microdureza da Junta 009

## 4.2 Análise de ensaio de tração

Os testes de laboratório para ensaio de tração foram executados conforme figura 3.7 e seus resultados estão na tabela 4.2.

Pelo acompanhamento dos gráficos gerados têm-se algumas situações encontradas. No gráfico 4.10, de tensão limite de resistência, foi verificado que houve uma tendência de aumento da resistência para valores de corrente maiores. O que permaneceu a tendência no gráfico 4.11 de tensão de escoamento. Para o alongamento no gráfico 4.12, os corpos de prova que tiveram menores deformações foram as que tiveram correntes intermediárias conforme a tabela 3.4 de correntes usadas nos cupons de prova, juntas 002, 005 e 008.

Para a análise do comportamento das juntas soldadas comparamos inicialmente com a do metal de base, ou seja, do aço sem solda, e os valores dos testes em questão estão acima dos valores encontrados no metal base, e como as fraturas não se deram na região do cordão de solda, demonstrando uma boa qualidade da soldagem.

Para uma análise em comparação com os valores da microdureza, foi verificado que o aumento das tensões para as juntas de maiores correntes são confirmadas, seja por sua melhor tenacidade, com sua menor dureza.

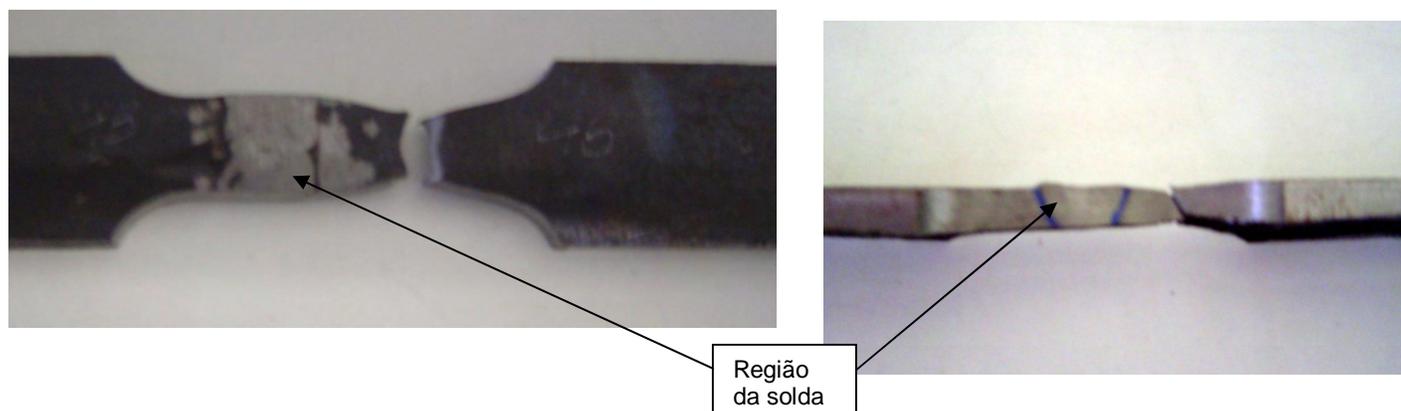


Figura 4.1: Corpos de Provas Tractionados

Tabela 4.2: Resultados dos Corpos de Prova Tractionados.

| Corpo de prova | MEDIA LIM. RESIST. | DESV. PADR | MEDIA ESCOAMENTO | DESV. PADR | MEDIA DEFORMAÇÃO | DESV. PADR |
|----------------|--------------------|------------|------------------|------------|------------------|------------|
| 1              | 506,24             | 9,87       | 339,16           | 3,78       | 54,89            | 2,91       |
| 2              | 509,75             | 4,49       | 343,82           | 3,14       | 47,10            | 5,43       |
| 3              | 516,50             | 9,80       | 342,31           | 2,26       | 52,93            | 5,19       |
| 4              | 502,01             | 10,68      | 337,78           | 4,14       | 54,55            | 2,91       |
| 5              | 499,99             | 10,08      | 331,67           | 4,74       | 46,96            | 1,44       |
| 6              | 508,07             | 3,29       | 340,62           | 14,14      | 48,96            | 0,54       |
| 7              | 509,19             | 1,76       | 340,58           | 6,09       | 54,48            | 1,15       |
| 8              | 508,22             | 8,80       | 337,19           | 10,18      | 48,97            | 0,40       |
| 9              | 522,60             | 15,81      | 350,14           | 1,49       | 53,33            | 7,22       |
| AÇO            | 468,83             |            | 314,83           |            | 65,58            |            |

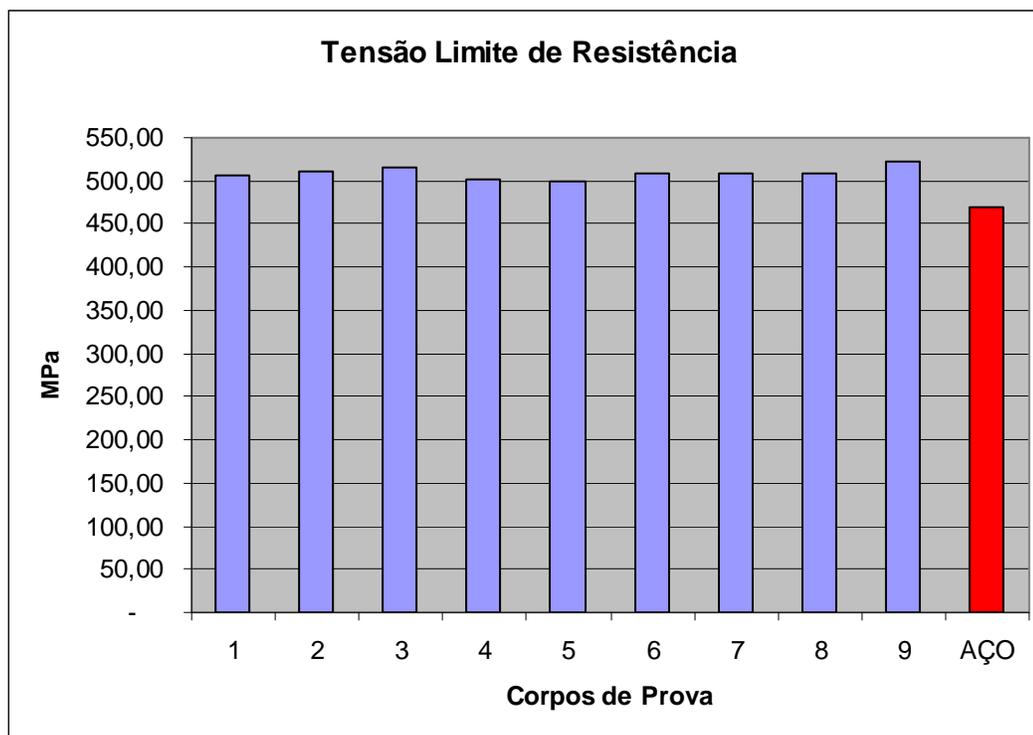


Gráfico 4.10: Limite de Resistência dos corpos de prova.

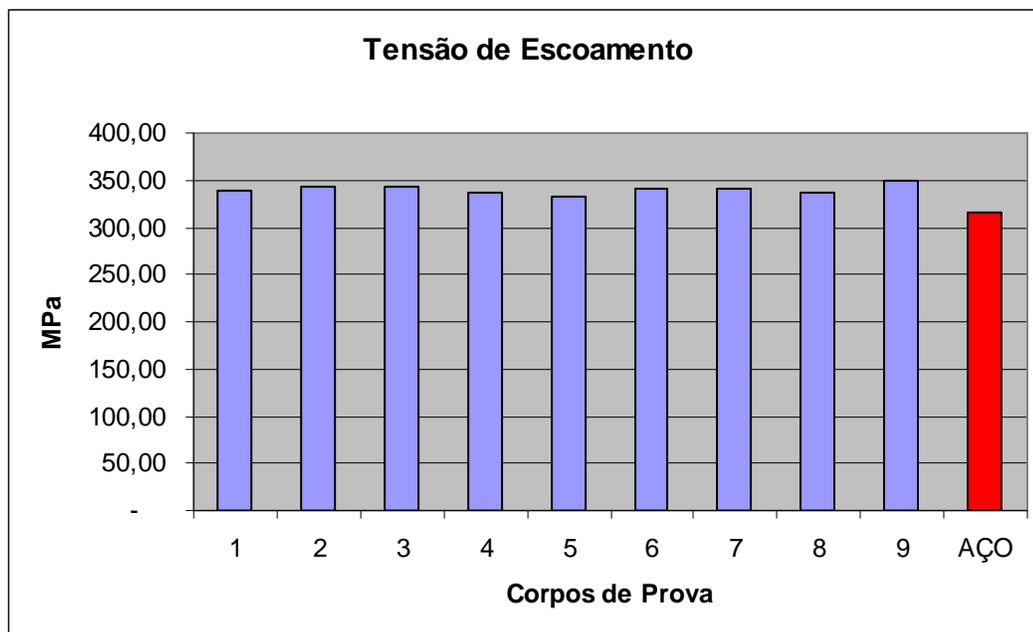


Gráfico 4.11: Limite de Escoamento dos corpos de prova.

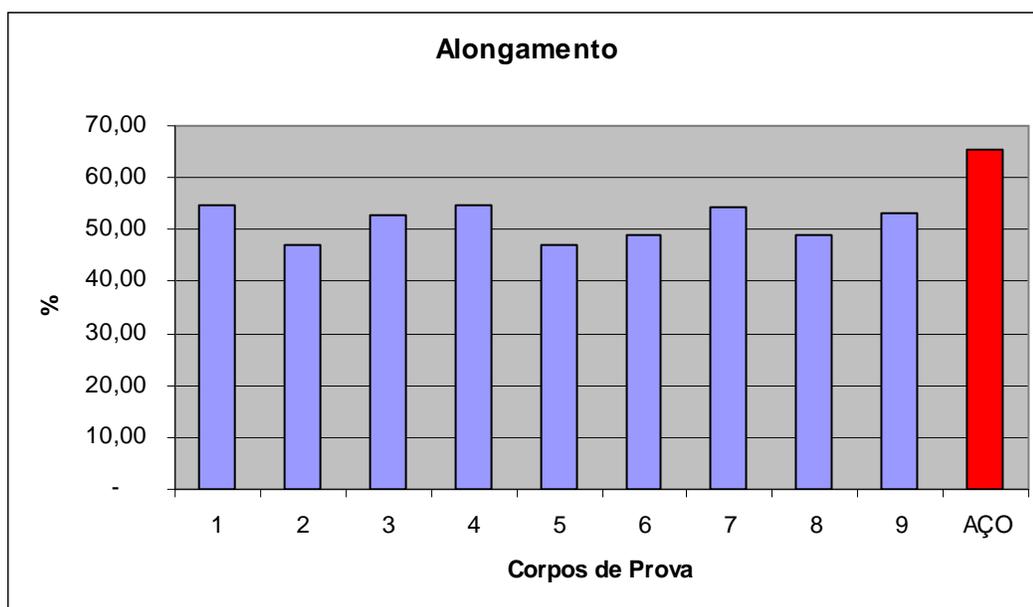
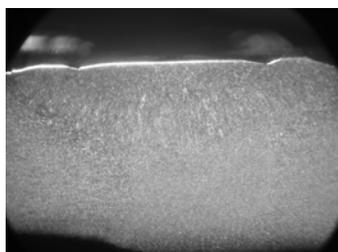


Gráfico 4.12: Alongamento dos corpos de prova

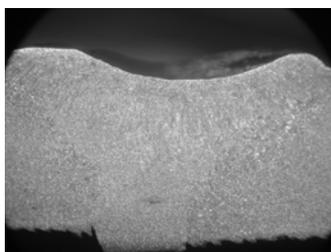
### 4.3 Análise macrográfica

As macrografias apresentadas na figura 4.2 foram visualizadas por microscopia ótica e se referem às distintas regiões das juntas soldadas, mostrando que o metal de adição se encontra muito parecido com o do metal base (MB), não dando para mostrar as camadas de passes, mesmo com exaustivos ataques, na tentativa de melhora das fotos.

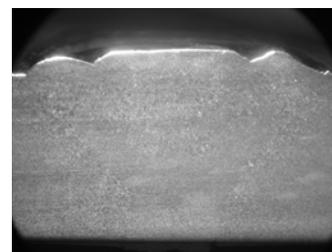
Todas as soldagens foram verificadas regiões com configuração mais grosseira no topo da soldagem, região de acabamento da soldagem, região essa que não tem passos subseqüentes para poder fazer um refinamento da estrutura como é observado nas soldagens da a região da raiz e dos passos subseqüentes, demonstrado na figura 3.5, formando uma área bastante homogênea com o material de base, sendo como dito até difícil de se demonstrar nas macrografias as varias camadas de soldagem conforme mostrado na figura 4.3 abaixo.



Macrografia da Junta 001(1A)



Macrografia da Junta 002(2A)



Macrografia da Junta 003(3A)

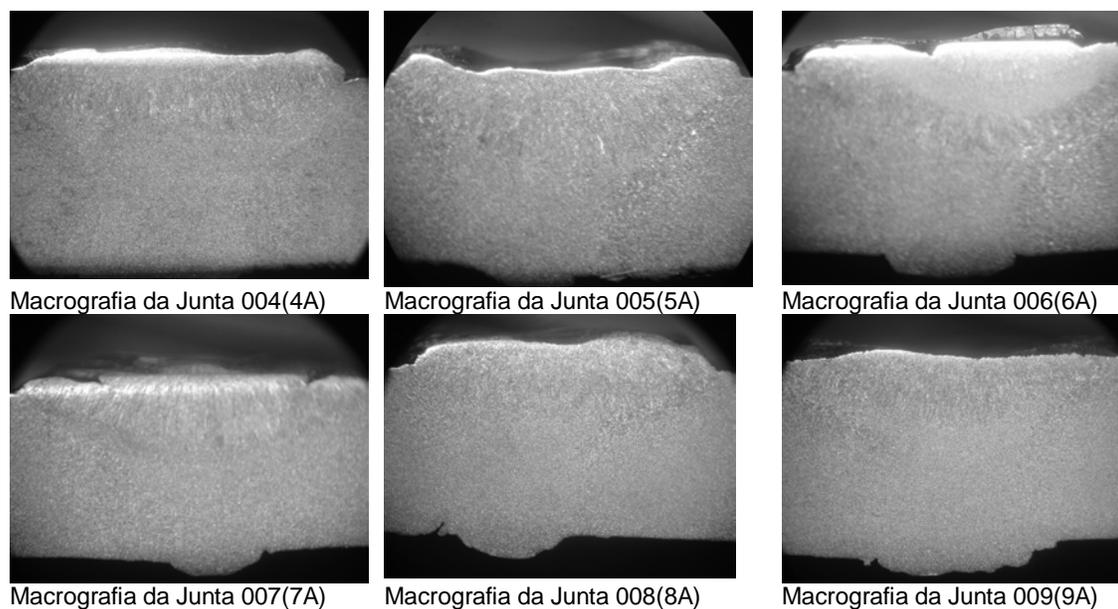


Figura 4.3: Macrografia

#### 4.4 Análise micrográfica

As microestruturas foram observadas por microscopia ótica formada nas distintas regiões da junta soldada, mostrando o refino da região da raiz com os múltiplos passes, o crescimento de grãos colunares nas regiões de passes do centro até o acabamento da solda, mostrando mais uma vez a que os múltiplos passes proporcionam o refino de grãos dos primeiros passes, através do reaquecimento do metal.

O aço dos tubos é de microestrutura ferrita/perlita sua estrutura final após o aquecimento da soldagem tende a acompanhar algumas configurações de PF(G), FS(A) e AF em sua maioria, respeitando o resfriamento normal da soldagem.

Na figura 4.4 estão sendo mostradas as microestruturas da junta 001, com o refinamento da parte entre a raiz e o primeiro passe através do aquecimento, que pode gerar grãos de AF onde confere a soldagem propriedades mecânicas desejáveis, como alta resistência e boa tenacidade. Mas acima da raiz observa-se grãos colunares dos demais passes e a estrutura grosseira, sendo próprio de microestruturas de forma alotrópica de PF(G), que são indesejáveis pela sua baixa resistência mecânica. No passe de acabamento encontra-se uma estrutura mais grosseira, mas sem estruturas colunares parecidas como no centro do cordão de solda, podendo ser uma forma alotrópica de AF, FS (A), entre outros. Onde a presença de FS (A) pode ser responsável pela alta dureza das regiões que foram medidas pela microdureza.

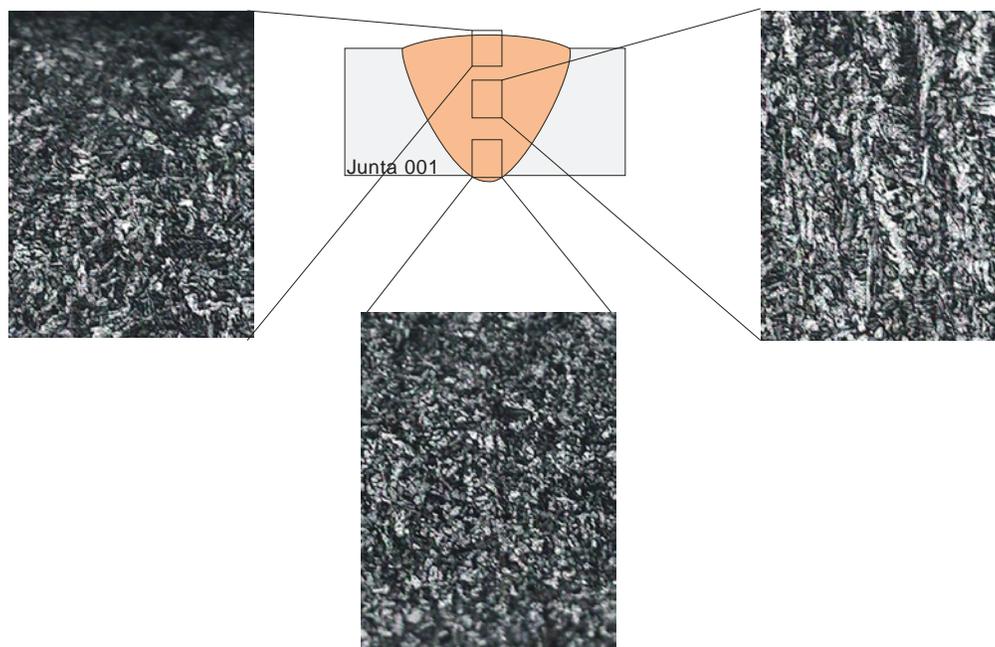


Figura 4.4: Junta 001 – Região do Cordão de Solda com Aumento de 200x

Nas figuras 4.5 e 4.6 estão sendo mostradas as microestruturas da junta 002 e 003 respectivamente, que repetem muito o ocorrido na junta 001, grãos refinados nos primeiros passes, grãos grosseiros do último passe de acabamento e com regiões de grãos colunares com uma pequena diminuição das colunas, criando grãos grosseiros e lamelas.

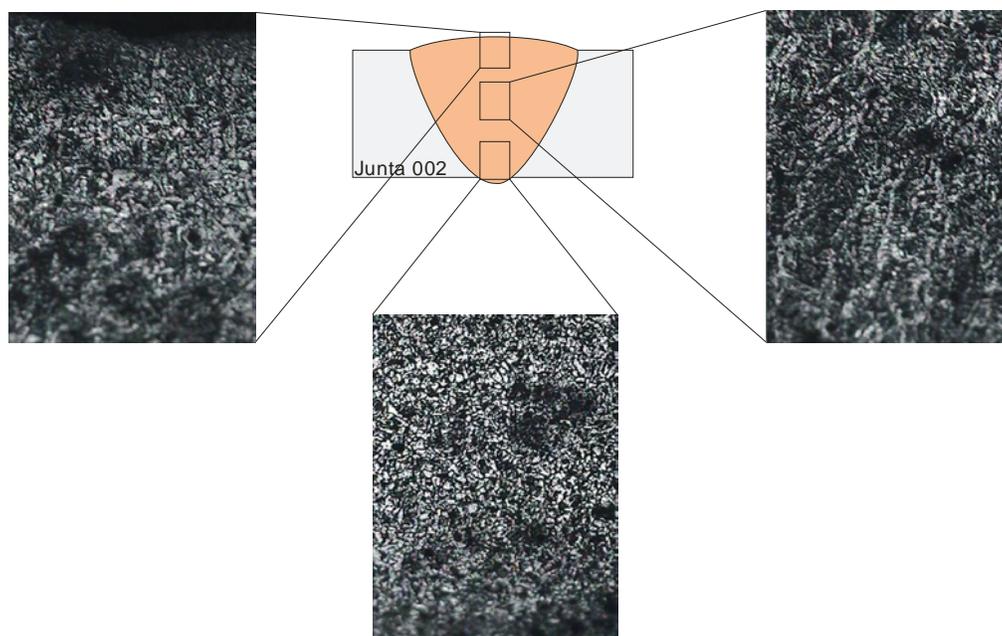


Figura 4.5: Junta 002 – Região do Cordão de Solda com Aumento de 200x

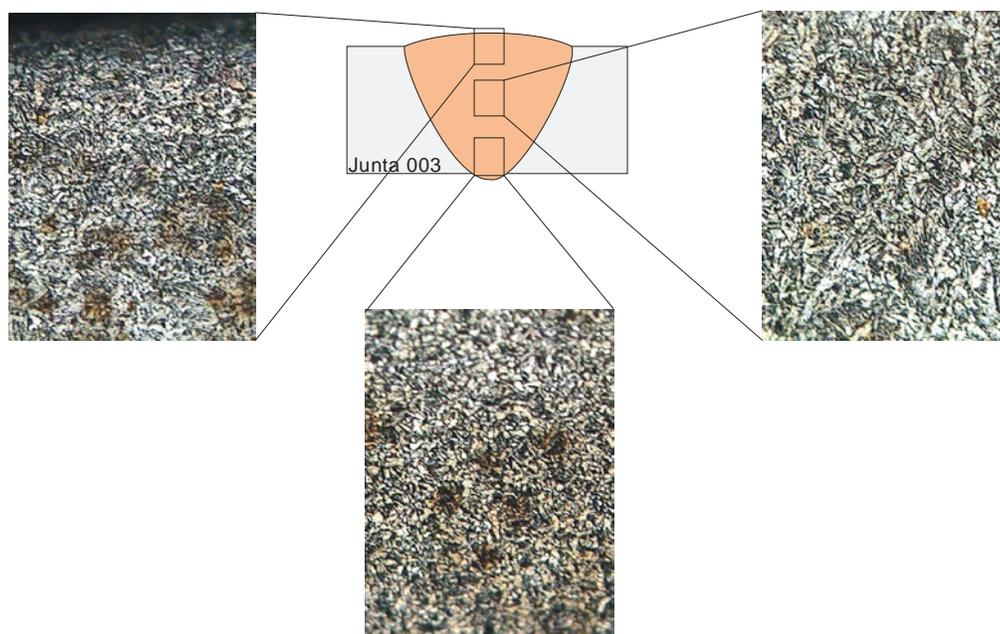


Figura 4.6: Junta 003 – Região do Cordão de Solda com Aumento de 200x

Nas figuras 4.7, 4.8 e 4.9 estão sendo mostradas as microestruturas da junta 004, 005 e 006 respectivamente, que configuram com as mudanças nos passes superiores, onde a colunas e lamelas aparecem mais fortemente, com os grãos mais grosseiros no passe de acabamento tendendo a diminuir e formar mais lamelas com o aumento da corrente.

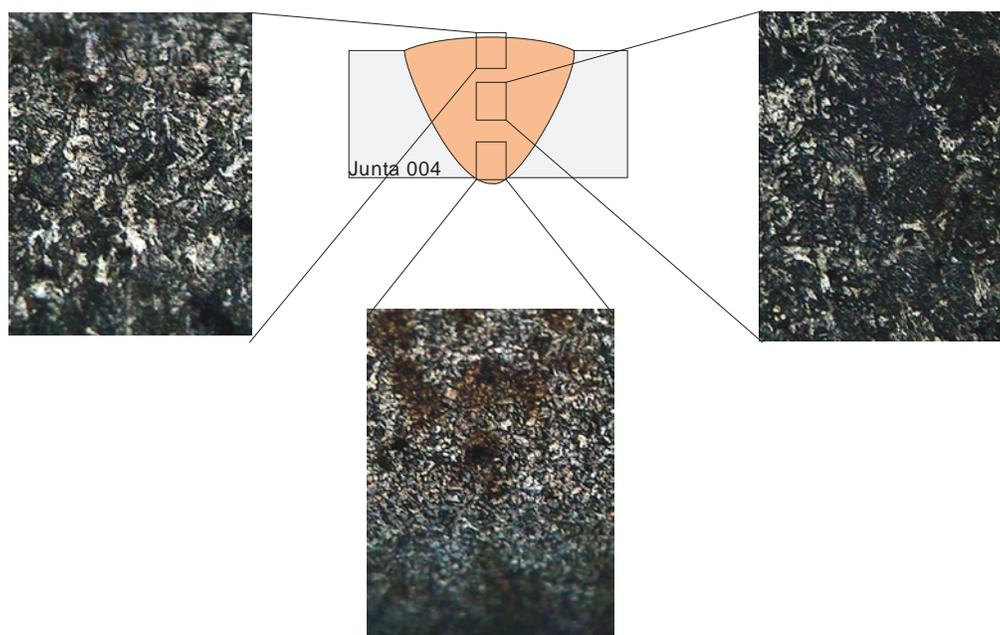


Figura 4.7: Junta 004 – Região do Cordão de Solda com Aumento de 200x

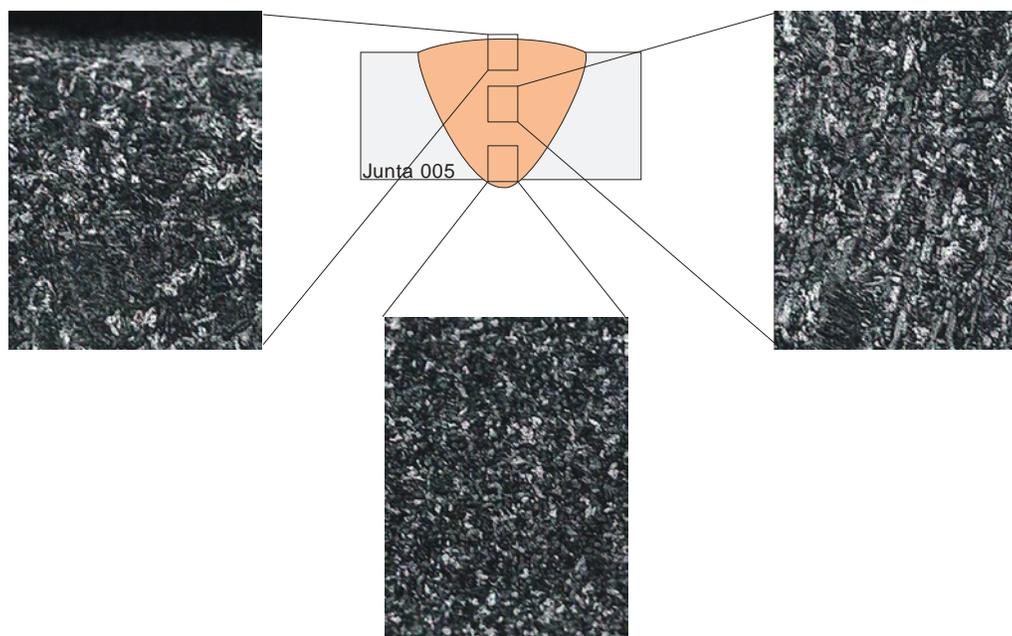


Figura 4.8: Junta 005 – Região do Cordão de Solda com Aumento de 200x

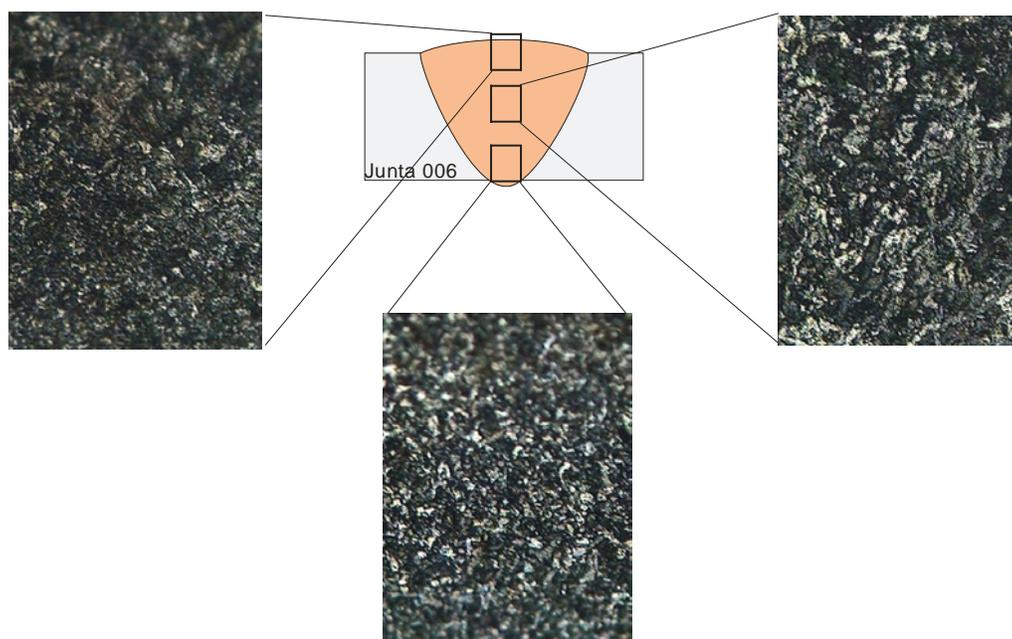


Figura 4.9: Junta 006 – Região do Cordão de Solda com Aumento de 200x

Nas figuras 4.10, 4.11 e 4.12 estão sendo mostradas as microestruturas da junta 007, 008 e 009 respectivamente, que configuram as presenças de formações de ripas nas estruturas, que podem ser formadas por FS nos passes de acabamento e nos passes do centro eles tem uma configuração sem os grãos colunares, mas aumentando de tamanho na junta 009.

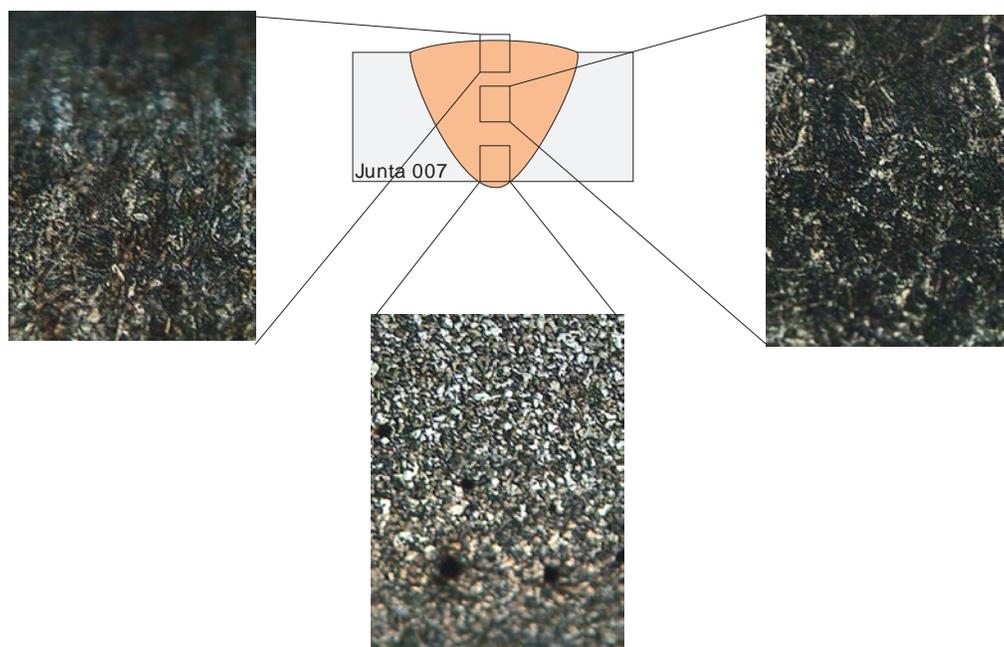


Figura 4.10: Junta 007 – Região do Cordão de Solda com Aumento de 200x

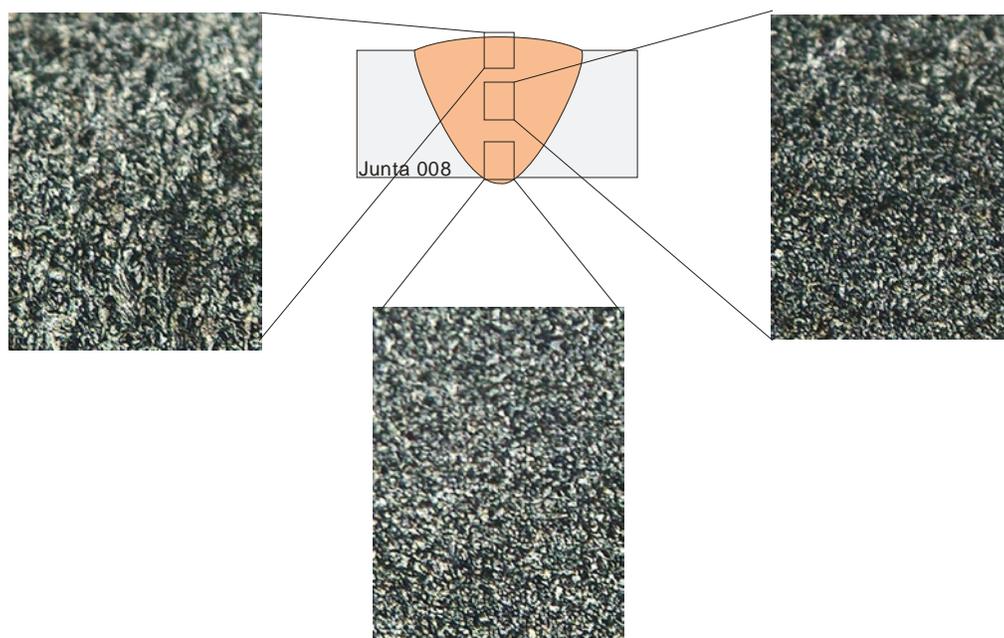


Figura 4.11: Junta 008 – Região do Cordão de Solda com Aumento de 200x

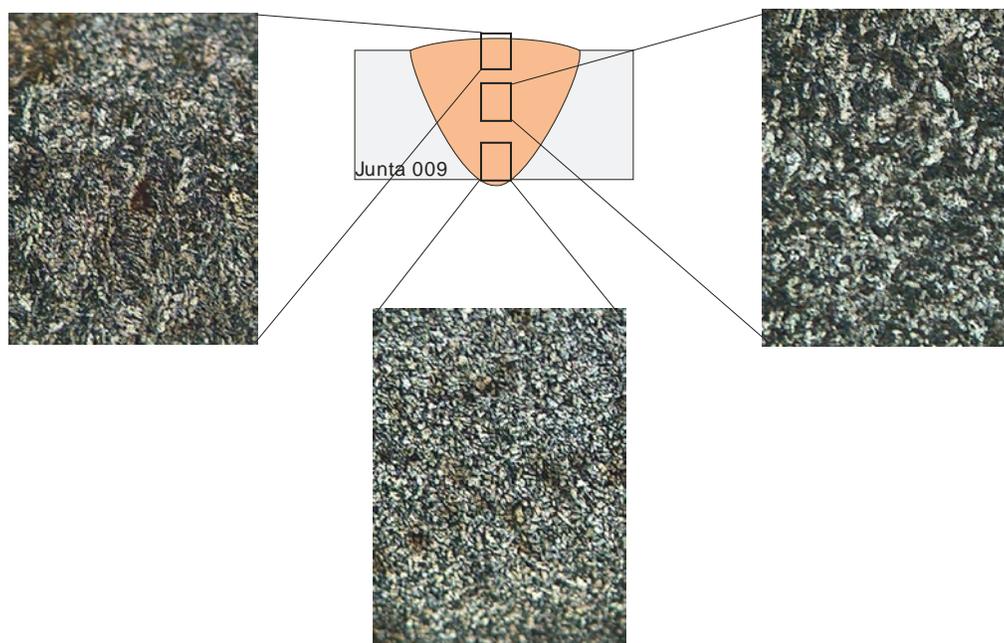


Figura 4.11: Junta 009 – Região do Cordão de Solda com Aumento de 200x

Para uma análise das extensões das regiões afetadas pela soldagem, foram utilizados as fotos das microestruturas com o comprimento de cada região afetada pela soldagem feitas com a utilização do próprio microscópio conforme figura 4.2.

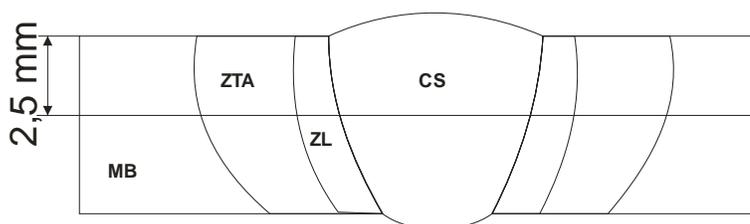


Figura 4.12: Região comparativa para as fotos.

Com os estudos analisaram-se as extensões das juntas e verificou-se que a influência de um soldador experiente e qualificado para soldagem de dutos foi uma variável essencial, pois mesmo com as correntes mais altas ele pôde executar a soldagem com qualidade e com melhores propriedades mecânicas, o que no início dos estudos foi uma preocupação grande com as altas correntes.

Com os estudos verificou-se que o aumento da região afetada, com o maior aporte térmico dado às peças, fosse à com a maior corrente, mas o que comprovou foi que com o aumento da velocidade pela necessidade de se aumentar a corrente levou a uma menor zona afetada termicamente (ZAT) e conseqüentemente um menor aporte térmico.

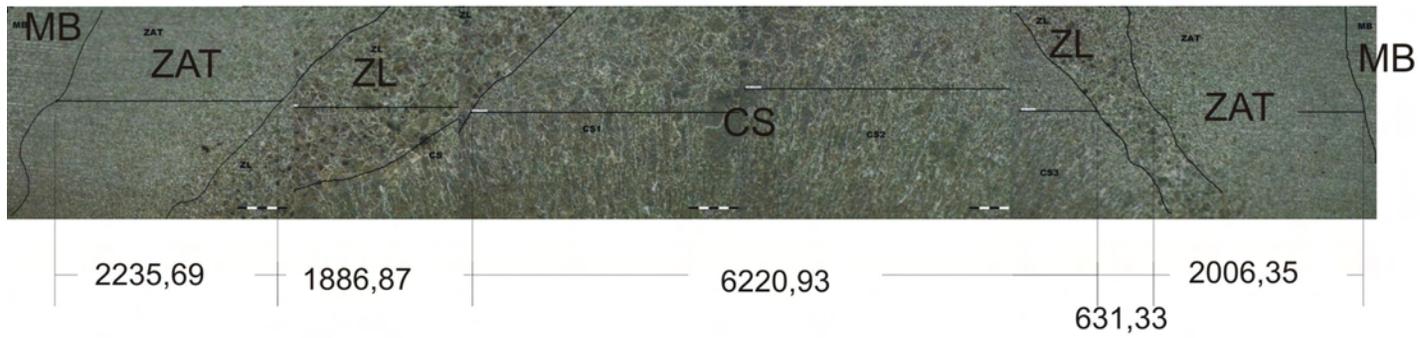
Segue abaixo o estudo da zona termicamente afetada (ZAT) executado conforme figura 4.12 onde foram feitas as comparações das extensões através das junções das micrografias feitas com aumento de 50 vezes, sendo mostradas na figuras 4.13, 4.14 e 4.15.

Tabela 4.3: Resultados das extensões da solda.

| Juntas | Extensões ( $\mu\text{m}$ ) |
|--------|-----------------------------|
| J002   | 12.981,17                   |
| J003   | 13.787,43                   |
| J004   | 13.007,61                   |
| J006   | 15.180,15                   |
| J007   | 13.764,30                   |
| J009   | 11.289,67                   |

Pela tabela 4.3 é mostrado que a região mais afetada pela soldagem foi a junta J006 com 34,5 % mais afetada que a junta J009, onde a junta J002 ficou com 15 % a mais que a junta J009, e as outras juntas ficaram muito próximos, podendo-se dizer que as juntas J002, J003, J004 e J007 tiveram o mesmo aporte térmico.

**JUNTA 002**



**JUNTA 003**

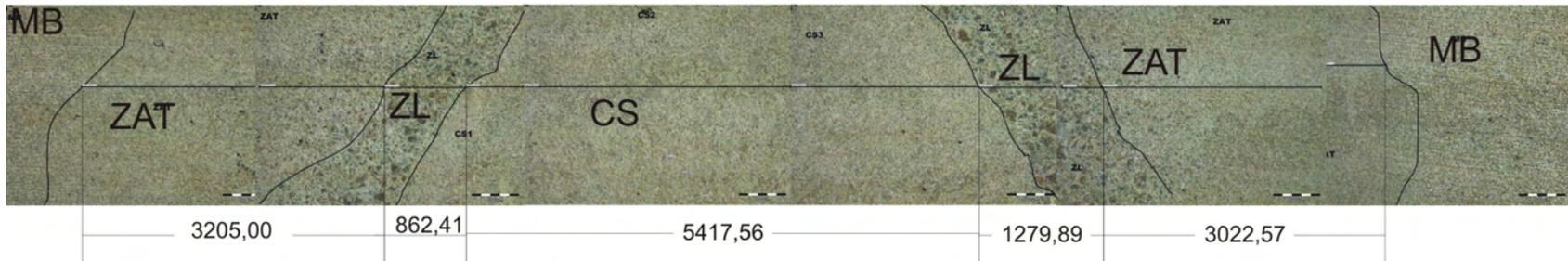
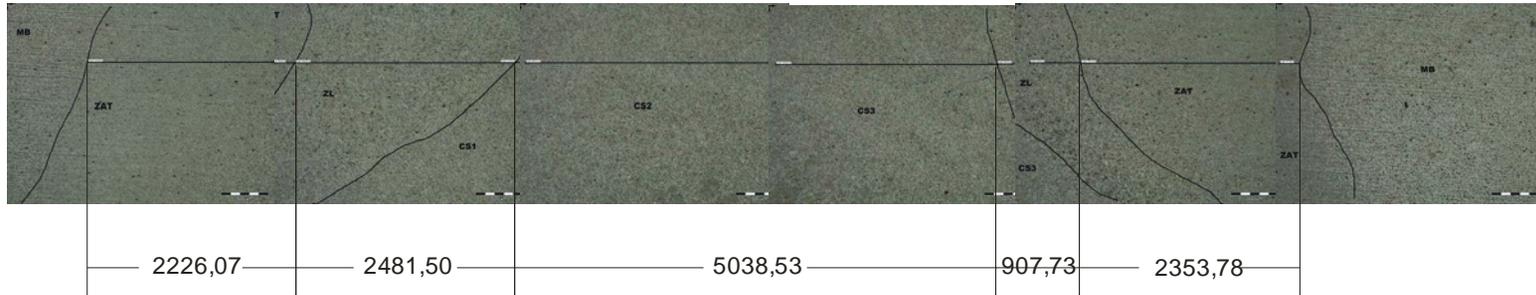


Figura 4.13 : Dimensões em micro metro ( $\mu\text{m}$ ) das fases das Junta 002 e 003 com aumento de 50x

JUNTA 004



JUNTA 006

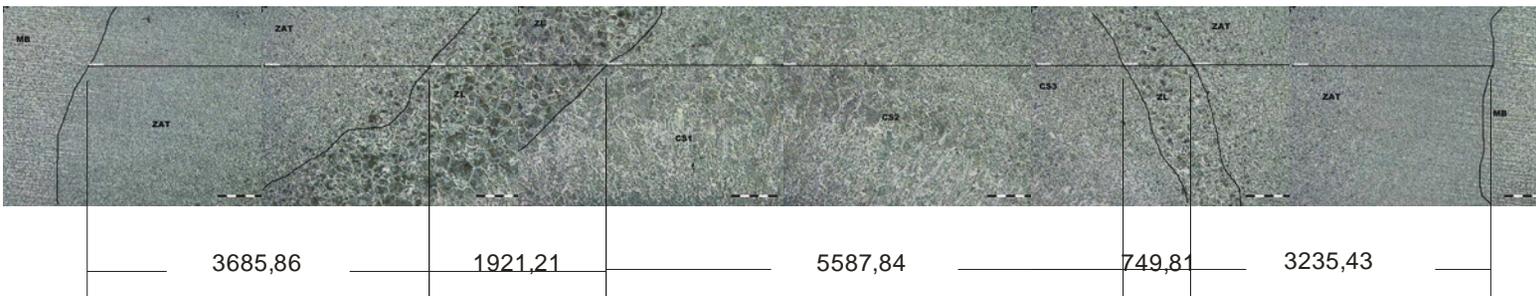
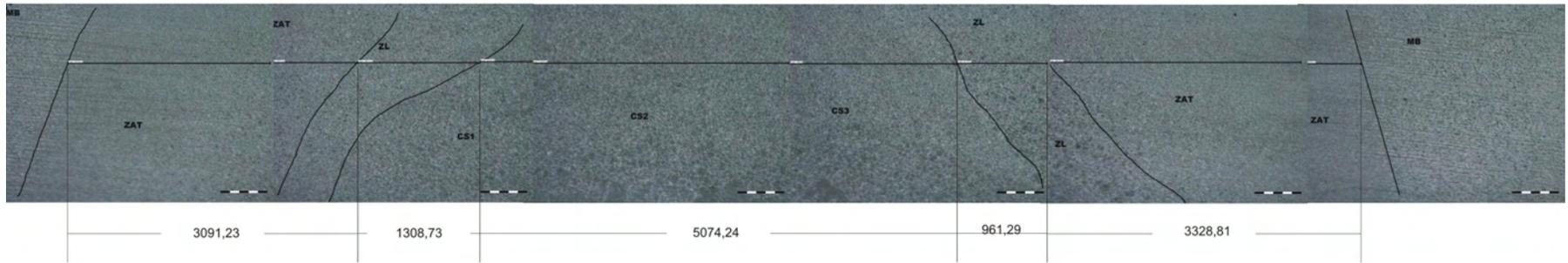


Figura 4.14 : Dimensões em micro metro ( $\mu\text{m}$ ) das fases das Junta 004 e 006 com aumento de 50x

### JUNTA 007



### JUNTA 009

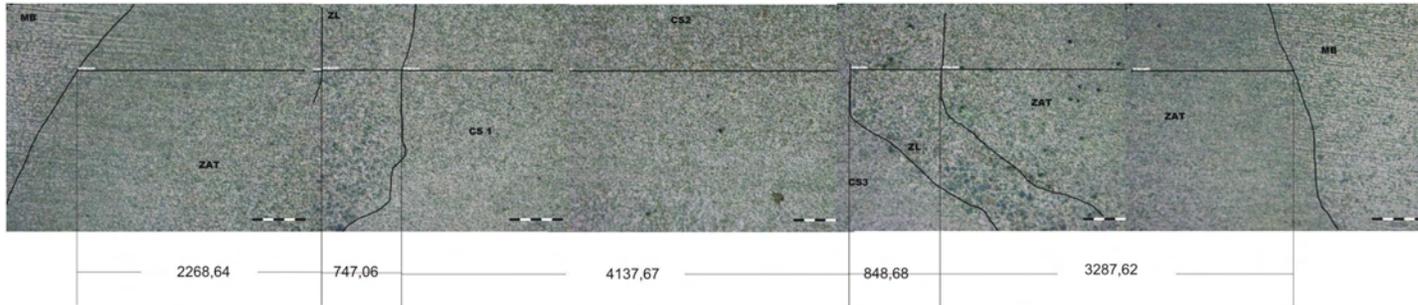


Figura 4.15 : Dimensões em micro metro ( $\mu\text{m}$ ) das fases das Junta 007 e 009 com aumento de 50x

A figura 4.16 mostra as microestruturas das áreas de uma solda, com suas diversas estruturas bem definidas. Sendo possível visualizar as mudanças afetadas pela soldagem, com suas altas temperaturas, causando diversas mudanças e necessitando de estudos cada vez mais aprofundado.

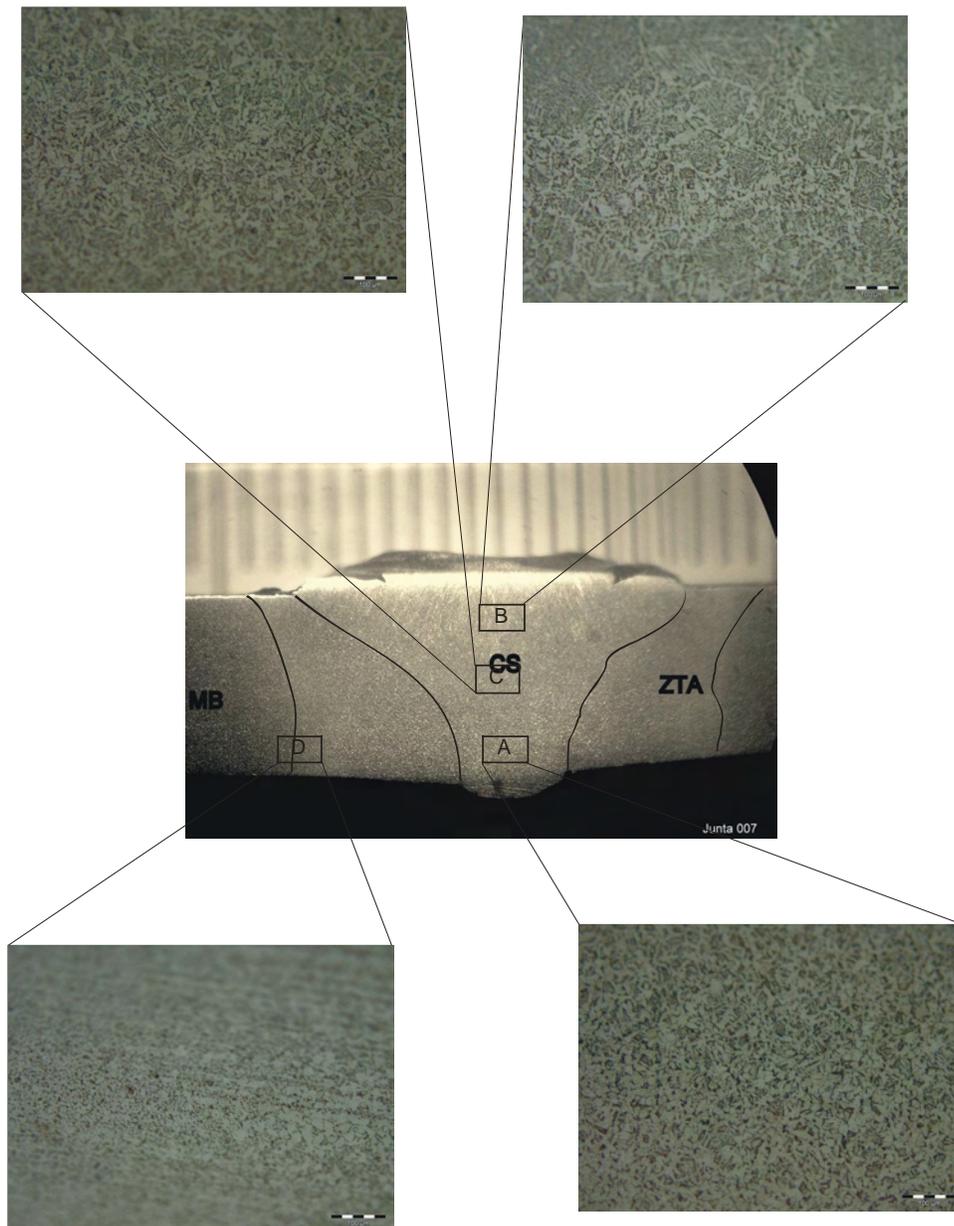


Figura 4.16 : Variação da microestrutura da Junta 007 com os pontos com aumento de 200x

## **5. Conclusões.**

A partir dos estudos observados podemos verificar que:

- Apesar do eletrodo sugerir soldagem com correntes de 80 a 140 A, a soldagem a baixas correntes é prejudicada pelas propriedades mecânicas geradas, o que deveria se aumentar esse valor para a faixa de 100A.
- Para soldagem com a corrente de 140A, há a necessidade de aumento na velocidade de soldagem para garantir a integridade do Metal Base (MB), com isso uma maior habilidade do soldador, que necessita de uma boa qualificação e experiência.
- Mesmo com o aumento da velocidade de soldagem para a corrente de 140A, houve significativo crescimento de grão na zona de ligação na Zona Termicamente Afetada (ZTA) e uma diminuição considerável da zona, sendo a junta 009 com as maiores correntes considerada a que teve menor aporte térmico já que na medição de extensão afetada foi a menor.
- A soldagem com 140A resultou no aumento das propriedades mecânicas o que pode indicar difusão da material para a Zona Termicamente Afeta (ZTA).
- A soldagem com equipamentos de boa qualidade e profissionais experientes e qualificados foi mais uma conclusão plausível e esperada, sendo um diferencial nas soldagens.
- A preocupação inicial do estudo era de se ter problemas com altas correntes na soldagem no caso de algum problema do sistema encontrado em campo (maquina de solda e gerador), mas foi comprovado agora que não é o problema maior de uma soldagem em campo e sim as baixas correntes que podem fazer com que o soldador tenha que diminuir a velocidade de avanço da soldagem e possa influenciar negativamente nas propriedades mecânicas da solda, como foi demonstrado.

## **6. Sugestões de estudos futuros.**

A partir dos estudos pode-se sugerir:

- Fazer varredura com outras correntes de soldagem na faixa indicada pelo fabricante do eletrodo e investigar a variação composicional da ZTA, a formação de fases precipitadas nesta região e na zona de ligação e de propriedades mecânicas.
- Fazer este estudo para outras situações de solda de responsabilidade como dutos para transporte de petróleo e derivados, tubos para caldeira e transporte de vapor, e soldagem em materiais dissimilares.

## **7. Bibliografia.**

- [1] FERRAZ, M.A.P. O gás em Pernambuco – breve história da utilização do gás a partir do século XIX – 1ª ed. – Recife: Copergás, 2001
- [2] COPERGÁS “Site na internet [www.copergas.com.br](http://www.copergas.com.br)” março 2009.
- [3] TRANSPETRO “Site na Internet [www.transpetro.com.br](http://www.transpetro.com.br) “ 30/05/2007.
- [4] TRANSPORTADORA BRASILEIRA GASODUTO BOLIVIA-BRASIL “Site na Internet [www.tbq.com.br](http://www.tbq.com.br) “ 30/05/2007.
- [5] ALLEGRO ENERGY GROUP - How Pipelines Make the Oil Market Work – Their Networks, Operation and Regulation, 2001, New York – USA
- [6] TUBB, R. – P&GJ's Worldwide Pipeline Construction Report – Pipeline and Gas Journal – 2009.
- [7] ORDÓÑEZ, R. E. C.. Soldagem e Caracterização das Propriedades Mecânicas de Dutos de Aço API 5L-X80 com Diferentes Arames Tubulares – Campinas – SP, 2004
- [8] MEESTER, B. The weldability of modern structural TMCP steels. ISIJ International, v. 37, n.6, p. 537-551, 1997.
- [9] SILVA, ANDRÉ LUIZ DA COSTA, MEI, PAULO ROBERTO – Aços e Ligas especiais , 1988 – Eletrometal
- [10] API 5L – “API Specification for Line Pipe”, American Petroleum Institute ,Forthy – Second Edition, July, 2000
- [11] SILVA, M. C. - Caracterização das propriedades mecânicas e metalúrgicas do aço API 5L X80 e determinação experimental de curvas J-R para avaliação da tenacidade a fratura, 96 p – Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – SP, 2004.
- [12] SANTOS NETO, N. F. S. Caracterização de soldas em aços API 5L com diferentes arames tubulares e temperaturas de preaquecimento. 2003. 87 p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas
- [13] CARDOZO, F.I.B. Previsão da dureza em junta soldada de um aço ASTM a 516 grau 60 sujeito à corrosão sob tensão com H2S. 2003. 143 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife.
- [14] NATAL, Y.O.; Soldabilidade de aços de alta resistência baixa liga, SP, Anais Associação Brasileira de Soldagem 1986

- [15] BOHORQUEZ, C.E.N. Previsão de dureza máxima na zona afetada pelo calor em soldagem, 1989, 93p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis.
- [16] CONFAB “Site na internet [www.tenaris.com](http://www.tenaris.com)”
- [17] WELDING JOURNAL – Smaw Best Practice -v 85 nº5 Maio 2006
- [18] HARRIS, R. A. – Welding on Arctic pipeline challenges construction crews - Pipeline & Gas Journal v 227 nº9 Setembro.
- [19] WAINER, E.; BRANDI, S.D. & DE MELLO, F.D.H. Soldagem: Metalurgia e Processos, Editora: Edgard Blücher. São Paulo - SP,1992
- [20] OKUI, N., et al – Methodology for Prediction of Fusion Zone Shape, Welding Journal, v 86 nº2 –Março 2007
- [21] WELDING WORKBOOK, Monitoring and Control of Welding Processes Welding Journal, v 86 nº3 – 2007.
- [22] BUZZONI, H.A. – Manual de Solda Elétrica, 2ª ed., editora Ícone – São Paulo – 1988.
- [23] FEDELE, R.A. Desafios da soldagem em tubulações. Metalurgia e Materiais, ABM, v. 58, n. 521, Maio 2002.
- [24] OKUMURA, T.; TANIGUCHI, C. Engenharia de soldagem e aplicações, Editora: LTC, Rio de Janeiro – RJ, 1982
- [25] MONDENESI, P.J.; MARQUES, P.V. & SANTOS, D.B. Soldabilidade dos Aços Transformáveis, Belo Horizonte, 2004
- [26] NETO, N. F. S. Caracterização de soldas em aços API 5L com diferentes arames tubulares e temperaturas de preaquecimento. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas – SP, 2003
- [27] ALÉ, R.M.; JORGE, J.C.F.; REBELLO, J.M.A. Constituintes Microestruturais de Soldas de Aços C-Mn Baixa Liga-Parte III: ZAC. Soldagem & Materiais, ABS, Brasil, v.1, n.3, Outubro/Dezembro 1993.
- [28] SAAVEDRA PINTO, P. M. A. – Soldagem circunferencial de tubo API 5L X80 empregando processos manual/semi-automático, 2006, Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- [29] VALIM, M. T. – Tenacidade a fratura da junta soldada obtida a arco submerso de aço API 5L grau X80, 2005, Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – RJ.

- [30] ESAB– Soldagem de Tubulações – agosto 2004.
- [31] MONDENESI, P.J. Técnica Operatória da soldagem SMAW, Belo Horizonte, 2004
- [32] ALÉ, R.M; Estudo da progressão microestrutural da ZAC de um aço C-Mn normalizado In XVIII Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, 1991, Recife Anais: Associação brasileira de soldagem, 1991.
- [33] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. ASTM E 23-02: Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials. Philadelphia.
- [34] AMERICAN WELDING SOCIETY. Welding Handbook – Welding Processes. Miami, 1995.
- [35] AMERICAN WELDING SOCIETY. ANSI/AWS A5.20-95: Specification for Carbon Steel Electrodes for Flux Cored Arc Welding. Miami, 1995.
- [36] BRACARENSE, A. Q. Processo de Soldagem por Arame Tubular - FCAW, Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005.
- [37] BATISTA, G. Z. et al. Estudo da correlação microestrutura – propriedades mecânicas de aço da classe API X80. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 2003, Rio de Janeiro. CD-Rom único, 2003.
- [38] CALLISTER, W. D. JR. - Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução. Editora: LTC. Rio de Janeiro RJ, 2000.
- [39] CASTELLO BRANCO, J. F. et al. Soldagem circunferencial em tubos de aço da classe API X80. In: RIO PIPELINE CONFERENCE & EXPOSITION, 2003, Rio de Janeiro. Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás. CD-Rom único.
- [40] CAMPOS, P.T. - Caracterização mecânica e microestrutural de juntas soldadas pelos processos MIG/MAG (GMAW) e arame tubular (FCAW), 2005, Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba.
- [41] DIETER, G. E. Metalurgia Mecânica. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981.
- [42] GARCIA, A. Solidificação: fundamentos e aplicações. São Paulo: Editora Unicamp, 2001.
- [43] LUIZ, T. de S.; FERRARESI, V.A. & BALSAMO, P.S.S. Análise da transferência metálica do arame tubular com proteção gasosa cobef - 2007

- [44] MACHADO, I. G. Soldagem e Técnicas Conexas: Processos. Porto Alegre: editado pelo autor, 1996.
- [45] MARQUES, P. V. Tecnologia da Soldagem. Belo Horizonte – MG, 1991: ESAB.
- [46] MARQUES, P. V.; MONDENESI, P.J. & BRANCARENSE, A. Q. Soldagem; Fundamentos e Tecnologia, Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005.
- [47] MONDENESI, P.J.; MARQUES, P.V. & SANTOS, D.B. Introdução à Metalurgia da Soldagem, Belo Horizonte: Editora DEMM-UFMG, 2004.
- [48] NAYYAR, M. L. Piping handbook. Editora: McGRAW-Hill. New York USA, 7th ed. 2000.
- [49] MONDENESI, P.J.; MARQUES, P.V. & SANTOS, D.B. Introdução a Física do Arco Elétrico e sua Aplicação na Soldagem dos Metais, Belo Horizonte: Editora DEMM-UFMG, 2004.
- [50] SMITH, W. F. – Princípios de ciência e engenharia de materiais: Uma introdução. Editora: McGRAW-Hill. Portugal, 1998.
- [51] SOUZA, S. A. Ensaios mecânicos de materiais metálicos – Fundamentos teóricos e práticos, 5ª Ed. São Paulo: Editora Edgar Blücher Ltda, 1982.
- [52] SCOTTI, A. – Apostila de fontes de soldagem a arco voltaico – 1998 – Departamento de Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Uberlândia.
- [53] TELES, P. C. S.– Tubulações industriais: Materiais, Projeto, Montagem. Editora: LTC. Rio de Janeiro RJ, 2001.
- [54] TELES, P. C. S. – Materiais para Equipamentos de Processo. Editora: Interciência. Rio de Janeiro RJ, 2003.
- [55] FARIAS, J.P.; QUITES, A.M.; Fatores que influenciam a microestrutura e as propriedades mecânicas do metal de solda de aço ao C-Mn e baixa liga, In: Latin American Regional Welding Congress, 1992, Rio de Janeiro, ANAIS Associação Brasileira de Soldagem, Abril 1992.
- [56] FERREIRA, M.H.M.; VENTRELLA, V.A.; ALCÂNTARA, N.G. Microestruturas do Metal de Solda do Aço API X-70 Soldado com Arame Tubular AWS E81T1-Ni1. In: Congresso Nacional de Soldagem, 27, Campinas, 2001.
- [57] FUNDERBURK, R.S. The Importance of Interpass Temperature. Welding Innovation, v. XV, n. 1, 1998.

- [58] LIU, S.; BRACARENSE A.Q. Desenvolvimento da Soldagem de Aços de Alta Resistência e Baixa Liga. Soldagem & Materiais, ABS, Brasil, v.2, n.2, Abril/Junho 1994.
- [59] MACHADO, I.G. Condução do Calor na Soldagem: Fundamentos & Aplicações. Porto Alegre: Imprensa Livre Editora, 2000. Cap. 2: Aquisição do Ciclo Térmico.
- [60] MACHADO, I.G. Soldagem & Técnicas Conexas: Processos. Porto Alegre: Editado pelo Autor, 1996.
- [61] SANTOS NETO, N.F.; TREVISAN, R.E.; FALS, H.C.; Santos, A.A. Caracterização da soldagem do aço API 5L X65 para diferentes temperaturas de interpasse. In: Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2., João Pessoa, 2002.
- [62] SILVA, A.V.; Domingues, J.R.; Silva, J.M.S.; Costa, M.A.M. Estudo da Soldabilidade de Tubos Sem Costura Temperados e Revenidos em Aço API 5L X70 e X80. In: Congresso Nacional de Soldagem, 27, Campinas, 2001.
- [63] SVENSSON, L.E., Control of Microstructures and Properties in Steel Arc Welds. Florida, USA: CRC Press, 1994. Cap. 6: Control of Microstructure and Properties.
- [64] DIXON, B.; HAKANSSON, K. Effects of welding parameters on weld zone toughness and hardness in 690 MPa steel. Welding Journal, v. 74, n. 4, April 1995.
- [65] EROGLU, M.; AKSOY, M. Effect of initial grain size on microstructure and toughness of intercritical heat affected zone of a low carbon Steel. Materials Science & Engineering: A. vol. A286, p. 289-297, 2000.
- [66] FAIRCHILD, D.P. et al. A study concerning intercritical HAZ microstructure and toughness in HSLA steels. Welding Journal, v. 70, n. 12, p. 321s-329s, Dec. 1991.
- [67] LINCOLN ELECTRIC CO. - Welding equipment and consumables - Welding Design & Fabrication. v 77 nº12, dezembro 2004.
- [68] RAMÍREZ, M.G. et al - Caracterização microestrutural de um aço API 5L-X80 através de microdureza e microscopia ótica e eletrônica - 62º Congresso Anual da ABM – 2007 – Vitória – ES.
- [69] MENDEZ, P. F.; EAGAR, T. W. - Penetration and Defect Formation in High-Current Arc Welding, Welding Journal nº10 ,2003.

- [70] MACIEL, Theophilo Moura. *Ciclos Térmicos em Metais de Solda de Aços de Alta Resistência*. 1994. 194 p. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de São Carlos, São Paulo, 1994.